



Salamanpaikanninanturin testausaseman toteutus

Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka, insinööri (AMK)
Kevät 2025
Tom Stenvall

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Tekijä Tom Stenvall

Työn nimi Salamanpaikanninanturin testausaseman toteutus

Ohjaaja Juhani Henttonen

Tiivistelmä

Vuosi 2025

Tässä opinnäytetyössä toteutettiin Vaisala Oyj:n salamanpaikanninanturien tuotekehitykselle testausasema, pääosin ennalta annetun laitteiston pohjalta. Työn toimeksiantajana toimi Vaisala Oyj.

Salamointi on luonnonilmiö, joka on luonteeltaan ennalta arvaamaton ja ei-toistettava. Salamanpaikanninanturien tuotekehitykselle on kuitenkin olennaista voida testata antureita olosuhteissa, jotka vastaavat niiden todellisessa toimintaympäristössä kohtaamia ilmiöitä. Testausaseman tarkoituksena on mahdollistaa salamanpaikanninanturin altistaminen näille ilmiöille hallitussa ympäristössä, jolloin laitteen toiminnallinen testaus voidaan suorittaa toistettavasti ja turvallisesti toimistoympäristössä.

Työssä perehdyttiin Vaisalan LS7002-salamanpaikanninanturin toimintaperiaatteeseen, jonka perusteella määritettiin testausaseman laitteistolle käyttötarkoitukset ja rakennettiin kokonaisuus, joka tukee anturin toiminnallista testaamista todellisia ilmiöitä jäljittelevissä olosuhteissa. Työssä käydään läpi salamointia sähkömagneettisena ilmiönä ja syvennyttään näiden ilmiöiden toistamisen yksityiskohtiin testausaseman toteutuksen kannalta.

Työn lopputuloksena syntyi testausasema, jonka avulla voidaan helposti, tarkasti ja toistettavasti tuottaa sähkömagneettisia aaltomuotoja salamanpaikanninanturien testaukseen. Asema soveltuu suoraan Vaisalan salamanpaikanninanturien tuotekehityksen tukemiseen ja validointitarpeisiin.

Avainsanat salamanpaikanninanturi, salamointi, testausasema, Helmholtz-kelat

Sivut 50 sivua

Electrical and automation engineering

Author Tom Stenvall

Subject Implementation of a test station for lightning detection sensors

Supervisors Juhani Henttonen

Abstract

Year 2025

In this thesis, a test station was implemented to support the product development of Vaisala Oyj's lightning detection sensors, primarily based on pre-specified hardware. The work was commissioned by Vaisala Oyj.

Lightning is a natural phenomenon that is inherently unpredictable and non-repeatable. However, for the development of lightning detection sensors, it is essential to be able to test the sensors under conditions that correspond to the phenomena they encounter in their real operating environment. The purpose of the test station is to enable the sensor to be exposed to these phenomena in a controlled environment, allowing for functional testing of the device to be performed repeatedly and safely in an office setting.

This work explores the operating principle of Vaisala's LS7002 lightning detection sensor, based on which the intended uses for the test station hardware were defined. A complete system was then pieced together to enable functional testing of the sensor under conditions that simulate real-world phenomena. The thesis discusses lightning as an electromagnetic phenomenon and examines the details of reproducing these phenomena from the perspective of the test station's implementation.

As a result of the work, a test station was developed that allows for the easy, accurate, and repeatable generation of electromagnetic waveforms for testing lightning detection sensors. The station directly supports Vaisala's product development and validation processes for their lightning detection sensors.

Keywords lightning detection sensor, lightning, test station, Helmholtz coils

Pages 50 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sähkömagnetismin teoriaa ja sovelluksia	2
2.1	Magneettivuon tiheys, magneettikentän voimakkuus ja permeabiliteetti	2
2.2	Amperen laki	3
2.3	Biot-Savartin laki	4
2.4	Helmholtzin kelat	5
3	Salamoinnin ja salamanpaikannuksen teoriaa	7
3.1	Salamointi ja sen sähkömagneettiset ilmiöt	8
3.2	Salamanisku, sen paikantaminen ja Vaisalan LS7002	8
4	Testausasema	12
4.1	Aaltomuotogeneraattori	13
4.2	Oskilloskooppi ja magneettikenttäanturi	13
4.3	Kammion EMI-suojaus	13
4.4	Magneettikenttä Helmholtz-keloilla	14
4.4.1	Vaihe 1: Magneettivuon tiheys ja magneettikentän voimakkuus	16
4.4.2	Vaihe 2: Magneettikentän voimakkuus ja virta	16
4.4.3	Vaihe 3: Kelojen virta ja piirin jännite	16
4.5	Testikammion ja sen EMI-suojauksen vaikutus magneettikenttään	17
4.5.1	Kammion materiaalin permeabiliteetin taajuusriippuvuus	19
4.5.2	Taajuusriippuvuuden kompensointi	19
4.6	Kelojen piirin kalibroitimittaus	20
4.6.1	Kalibroitivaihe 1: Aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssi	20
4.6.2	Kalibroitivaihe 2: Kelojen piirin resistanssi	21
4.6.3	Kalibroitivaihe 3: Kelojen piirin induktanssi	22
4.6.4	Kalibroitivaihe 4: Kelojen H- ja B-kentän suhteen korjaustaulukko	25
4.7	Sähkökenttä ja sähkökenttäkruunu	27
4.7.1	Magneettikentän ja sähkökentän suhde	27
4.7.2	Sähkökentän muodostaminen	28
5	Testausaseman ohjelmisto	29
5.1	Ohjelmiston rakenne	30
5.1.1	Käyttöliittymätaso	30
5.1.2	Aaltomuotomallit	31
5.1.3	Ohjaintaso	31
5.1.4	Laitetaso	32

5.1.5	Ajuritaso	32
5.2	Käyttöliittymä ja ohjelmiston käyttö	32
5.2.1	Pääikkuna.....	33
5.2.2	Aaltomuotojen luominen ja luomisikkuna	33
5.2.3	Aaltomuotojen toistaminen	35
5.2.4	Salamanpaikanninanturilla näytteistäminen	36
5.2.5	Kalibrointi	37
5.3	Aaltomuotogeneraattorin aaltomuotojen välimuistitus ja tietomuoto	39
5.3.1	Aaltomuotojen tietomuoto	39
5.3.2	Aaltomuotogeneraattorin muisti ja aaltomuotojen lataushierarkia	40
5.3.3	Aaltomuotojen välimuistitus	41
6	Testausaseman suorituskyky	43
6.1	Tuotetun magneettikentän verifiointi.....	43
6.2	Mittausten toistettavuus	45
7	Yhteenveto ja pohdinta	48
	Lähteet	49

Kuvat

Kuva 1.	Oikean käden sääntö.	3
Kuva 2.	Helmholtzin kelojen rakenne.	6
Kuva 3.	Kahden kauas toisistaan asetetun, ympyrämuotoisen kelan muodostaman magneettivuon tiheys.	6
Kuva 4.	Helmholtzin kelojen mukainen magneettikenttä näiden keskiakselilla.	7
Kuva 5.	Helmholtzin kelojen kenttäviivat.	7
Kuva 6.	Vaisalan LS7002 salamanpaikanninanturi.	9
Kuva 7.	Salamaniskun sähkömagnetismi.....	9
Kuva 8.	LS7002:n silmukka-antennit.	10

Kuva 9. Salamaniskun magneettikenttä ja LS7002.	10
Kuva 11. Testausaseman lohkokaavio.....	12
Kuva 12. HHS 5206-4 Helmholtz-kela.....	14
Kuva 13. Kelojen signaaliketju	15
Kuva 14. Anturin kiertosäädin.	15
Kuva 15. Kelojen piirin sijaiskytkentä	17
Kuva 16. B-kenttä ja kelojen virta. Kelat kammion ulkopuolella.	18
Kuva 17. B-kenttä ja kelojen virta. Kelat kammion sisällä.....	18
Kuva 18. Lähtöimpedanssin mittauspiiri.	21
Kuva 19. Kelojen piirin resistanssin mittauspiiri.....	22
Kuva 20. Kelojen piirin induktanssin kalibrointi- piiri.	23
Kuva 21. Shunttivastusrasia.....	23
Kuva 22. Sähkökenttäkruunu ja LS7002	27
Kuva 23. Sähkökenttäkruunun etäisyyden määrittäminen.....	29
Kuva 24. Testiaseman ohjelmiston rekinen.....	30
Kuva 25. Pääikkuna.....	33
Kuva 26. Aaltomuotojen luomisikkuna.	34
Kuva 27. Aaltomuotoikkuna ja aaltomuotojen summaus.	34
Kuva 28. Pääikkunan aaltomuotopaneeli.	35
Kuva 29. Näytteistystulosikkuna.....	36

Kuva 30. Lähtöimpedanssimittauksen ohjeikkuna	37
Kuva 31. Kelojen piirin vastusmittauksen ohjeikkuna	38
Kuva 32. Kelojen piirin induktanssimittauksen ohjeikkuna.....	38
Kuva 33. Kelojen H- ja B-kentän munnostaulukon luonnin ohjeikkuna.	39
Kuva 34. Aaltomuotojen lataushierarkia.....	41
Kuva 35. Aaltomuotojen välimuistitus.....	43
Kuva 36. Magneettikentän ja virran virhe.	44
Kuva 37. Virran ja magneettikentän virhe, taajuuskompensoitu.	45
Kuva 38. Toistettavuustestin proseduurin lohkokaavio.....	46
Kuva 39. Toistettavuustestin tulokset.....	48

Kaavat

Kaava 1. Magneettikentän voimakkuuden ja vuontiheyden yhtälö.....	2
Kaava 2. Suhteellinen permeabiliteetti.	3
Kaava 3. Amperen laki.....	3
Kaava 4. Magneettivuon tiheys etäisyydellä virtajohtimesta.....	4
Kaava 5. Biot-savartin laki, differentiaalimuoto.....	4
Kaava 6. Magneettivuon tiheys etäisyydellä virtasilmukan keskipisteestä.....	5
Kaava 7. Salamaniskun suunta.....	11
Kaava 8. Magneettikentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys.....	16
Kaava 9. Virta ja magneettikentän voimakkuus aikatasossa.....	16

Kaava 10. Jänniteaaltomuoto virran aaltomuodolle.....	17
Kaava 11. Lähtöimpedanssimittauksen kaava.	21
Kaava 12. Kelojen piirin resistanssin mittauksen yhtälö.	22
Kaava 13. Shunttivastuksen resistanssin laskukaava.	24
Kaava 14. Piirin virran amplitudi.....	24
Kaava 15. RL-piirin virran yhtälö.	24
Kaava 16. Kelojen piirin virran teoreettinen malli.....	25
Kaava 17. Mittauspisteen residuaali.....	25
Kaava 18. Residuaalien neliösumman kaava.....	25
Kaava 19. Odotettu magneettivuon tiheys.....	26
Kaava 20. Magneettivuon tiheyden korjauskerroin.....	26
Kaava 21. Valonnopeuden määritelmä	28
Kaava 22. Vastaava sähkökentän aaltomuoto magneettikentän aaltomuodolle.	28
Kaava 23. Jänniteaaltomuoto sähkökentän aaltomuodolle.....	28
Kaava 24. Vastaava kruunun jänniteaaltomuoto magneettikentän aaltomuodolle.	29
Kaava 25. Aaltomuotogeneraattorin näyte jännitenäytteen funktiona.	40

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Vaisala Oyj, suomalainen vuonna 1936 perustettu yritys, joka kehittää ja valmistaa mittalaitteita ja -järjestelmiä teollisuuteen, sekä sään- ja ympäristömittaukseen. Vaisalan asiakkaina toimii mm. ilmatieteen laitokset, lentokentät, meriliikennöitsijät sekä tie- ja raideliikenneviranomaiset. (Vaisala Oyj, n.d.)

Vaisala osti vuoden 2000 alussa ranskalaisen salamanpaikannusjärjestelmien valmistajan Dimensions SA:n, joka liitettiin osaksi Vaisalan etämittaussjärjestelmät-liiketoimintaa. Vuonna 2002 Vaisala osti amerikkalaisen Global Atmospheric yrityksen, joka oli tuolloin maailman suurin salamanpaikannuslaitteiden ja -järjestelmien valmistaja. Yritysostojen myötä Vaisala nousi markkinajohtajan asemaan salamanpaikannuksen alalla. (Vaisala Oyj, 2002)

Salamoinninilmaisinjärjestelmillä on tärkeä rooli turvallisuuden takaamisessa erityisesti ympäristöissä, joissa salamanisku voi aiheuttaa vakavia seurauksia. Esimerkiksi lentokentillä salamailmaisinjärjestelmät ovat keskeisiä turvallisuuden kannalta, sillä salamanisku voi vaurioittaa kriittisiä laitteita ja järjestelmiä. Vastaavasti tuulipuistojen operatiivisen turvallisuuden kannalta salamailmaisinjärjestelmien merkitys korostuu, sillä tuuliturbiinit sijaitsevat usein avoimilla ja korkeilla alueilla, mikä tekee niistä erityisen alttiita salamaniskuille. Salamailmaisinjärjestelmät auttavat varautumaan salamaniskuihin ja mahdollistavat niiden aiheuttamien vahinkojen ja riskien tehokkaan minimoinnin. (Biral, n.d.)

National Weather Servicen vuosina 2014–2023 keräämien tietojen mukaan USA:ssa salamaniskuihin kuolee keskimäärin 23 henkilöä vuodessa. Lisäksi salamaniskuihin liittyviä vakuutuskorvauksia maksettiin vuonna 2023 noin 1,2 miljardia dollaria (Insurance Information Institute, 2023). Nämä tilastot korostavat tehokkaiden salamailmaisinjärjestelmien merkitystä osana nykyaikaista turvallisuus- ja riskienhallintaa.

Salamaniskut ovat luonnossa satunnaisia ja ei-toistettavia ilmiöitä, minkä vuoksi salamanpaikanninanturin suorituskyvyn todentaminen aidossa ympäristössä on haastavaa ja aikaa vievää. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Vaisalan salamanpaikannantureiden tuotekehityksen tueksi, pääosin annetun laitteiston pohjalta testausasema. Testausaseman tarkoituksena on mahdollistaa salamanpaikanninanturin altistaminen sen todellisessa toimintaympäristössä esiintyville ilmiöille, mikä mahdollistaa laitteen toiminnallisen testauksen toimistoympäristössä.

2 Sähkömagnetismin teoriaa ja sovelluksia

Tässä kappaleessa käsitellään tiiviisti sähkömagnetismin teoriaa, painottaen erityisesti niitä ilmiöitä, joilla on merkitystä testausaseman toimintaan ja siihen liittyviin ilmiöihin.

Tarkoituksena on tarjota riittävä teoreettinen taustatieto, jonka pohjalta testausaseman suunnitteluratkaisut ja ilmiöiden simulointi voidaan ymmärtää ja perustella.

2.1 Magneettivuon tiheys, magneettikentän voimakkuus ja permeabiliteetti

Magneettikentän suuruus ja suunta voidaan esittää vektorisuureilla B ja H , jotka kuvaavat magneettikentän eri ominaisuuksia. Magneettivuon tiheyttä kuvaava vektorisuure B (magneettivuon tiheys) ilmaisee magneettikentän voimakkuutta ja sen vaikutusta aineeseen. Sen yksikkö SI-järjestelmässä on tesla (T). Toinen vektorisuure, H (magneettikentän voimakkuus), kuvaa magneettikentän aiheuttamaa voimavaikutusta ilman aineeseen liittyviä magneettisia ominaisuuksia. Magneettikentän voimakkuuden yksikkö on ampeeri metriä kohti (A/m). (Zurek S. , 2023a)

Näiden kahden suureen välillä on yhteys, joka määräytyy materiaalin magneettisen permeabiliteetin μ avulla, jonka SI-yksikkö on henryä per metri (H/m). Permeabiliteetti kuvaa siis suoraan magneettikentän voimakkuuden H ja magneettivuon tiheyden B suhdetta väliaineessa. (Zurek S. , 2023a)

Magneettivuon tiheyden yhteys magneettikentän voimakkuuteen voidaan siis esittää kaavan 1 mukaisesti.

Kaava 1. Magneettikentän voimakkuuden ja vuontiheyden yhtälö.

$$B = \mu H$$

Suhteellinen permeabiliteetti μ_r kuvaa väliaineen permeabiliteetin suuruutta suhteessa tyhjiön permeabiliteettiin μ_0 , jota kutsutaan myös magneettivakioksi. Magneettivakion μ_0 arvo on noin $1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$. Suhteellisen permeabiliteetin yhtälö on esitetty kaavassa 2. (Zurek S. , 2023b)

Kaava 2. Suhteellinen permeabiliteetti.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

2.2 Amperen laki

Amperen lain mukaan liikkuva varaus, eli sähkövirta synnyttää ympärilleen magneettikentän. Lain mukaisesti suorassa virtajohtimessa kulkeva sähkövirta aiheuttaa virran suuruuteen suoraan verrannollisen magneettivuon, joka sulkeutuu johtimen ympärille. Amperen laki integraalimuodossaan on esitetty kaavassa 3. (Martin, Neary, Rinaldo, & Woodman, n.d.-a)

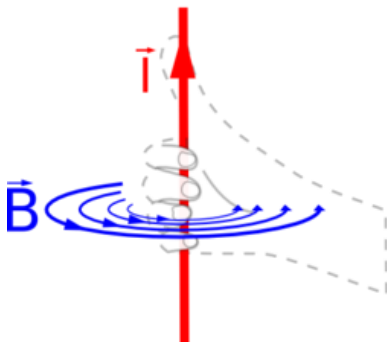
Kaava 3. Amperen laki.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu I$$

, missä \mathbf{B} on magneettivuon tiheyden vektori, $d\mathbf{s}$ on äärimmäisen pieni siirtymävektori suljetulla polulla virtajohtimen ympärillä, μ on väliaineen permeabiliteetti ja I on polun sisään jäävä kokonaisvirta.

Kun tiedetään johtimessa kulkevan virran suunta, voidaan magneettivuon suunta määrittää myös käyttäen niin kutsuttua oikean käden sääntöä. Oikean käden säännöllä määritetään suorassa virtajohtimessa kulkevan virran tuottaman magneettivuon suunta, asettamalla oikean käden peukalo virran suuntaisesti, jolloin sormet kiertyvät magneettikentän suuntaisesti. Oikean käden sääntö on havainnollistettu kuvassa 1. (Hanks, 2024)

Kuva 1. Right Hand Rule (Wikimedia Commons, 2006).



Amperen lain avulla voidaan määrittää magneettivuon tiheys etäisyydellä virtajohtimesta, kun tiedetään johtimessa kulkevan virran suuruus. Amperen lain soveltaminen yksinkertaistuu,

kun tiedetään magneettivuon tiheyden olevan yhtä suuri tietyllä etäisyydellä koko virtajohtimen ympärillä ja että suljetun polun pienien siirtymävektorien integraali on yhtä suuri kuin suljetun polun piiri. Tällöin magneettivuon tiheys etäisyydellä virtajohtimesta voidaan määrittää kaavan 4 mukaisesti. (Martin, Neary, Rinaldo, & Woodman, n.d.-a)

Kaava 4. Magneettivuon tiheys etäisyydellä virtajohtimesta.

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r}$$

, missä B on magneettivuon tiheys, r on tarkasteltavan pisteen etäisyys johtimesta ja I on johtimessa kulkeva virta.

Jos jätämme Kaava 4 väliaineen permeabiliteetin huomioimatta ja korvaamme tämän arvolla yksi, saamme tulokseksi magneettikentän voimakkuuden H (A/m).

2.3 Biot-Savartin laki

Biot-Savartin laki on jatketta Amperen laille ja soveltuu käytettäväksi, kun määritetään epämääräisen johtimen kuljettaman virran muodostamaa magneettikenttää tarkastelupisteessä. Biot-Savartin lain mukaan, jos valitaan mistä tahansa virtaa kuljettavan johtimen kohdasta differentiaalinen virta-alkio $I ds$, saadaan tarkastelupisteelle tätä vastaava differentiaalinen magneettivuon tiheys $d\mathbf{B}$, kaavan 5 mukaisesti. (Tatum, n.d.)

Kaava 5. Biot-savartin laki, differentiaalimuoto.

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I ds \times \hat{\mathbf{r}}}{4\pi r^2}$$

, missä I on johtimen kuljettama virta, ds on virran suuntainen differentiaalinen pituusvektori (eli pieni virtaelementti), $\hat{\mathbf{r}}$ on virtaelementistä tarkastelupisteeseen osoittava yksikkövektori ja r on virtaelementin ja tarkastelupisteen välinen etäisyys.

Yllä esitetystä kaavasta huomataan, että magneettikenttä on kohtisuorassa virran suuntaiseen pituusvektoriin ds , sekä virtaelementistä tarkastelupisteeseen osoittavaan yksikkövektoriin $\hat{\mathbf{r}}$.

Biot-Savartin lakia voidaan soveltaa magneettivuon laskentaan ympyränmuotoisen virtasilmukan keskiakselilla olevalle pisteelle etäisyydellä virtasilmukan keskipisteestä.

Laskenta perustuu kenttävaikutusten integrointiin koko silmukan ympäri, jolloin otetaan huomioon jokaisen virtaelementin vaikutus tarkastelupisteen magneettivuohon. Sovelluksen symmetrian ansiosta kenttävektorin komponentit, jotka eivät ole virtasilmukan akselin suuntaisia kumoutuvat ja jäljelle jää vain virtasilmukan keskiakselin suuntainen magneettivuon komponentti. Asetelman korkean symmetrian takia voidaan Biot-Savartin laista johtaa yksinkertaistettu, kaavan 6 mukainen yhtälö, joka kuvaa magneettivuon tiheyttä silmukan keskiakselilla etäisyydellä sen keskipisteestä. (Martin, Neary, Rinaldo, & Woodman, n.d.-b)

Kaava 6. Magneettivuon tiheys etäisyydellä virtasilmukan keskipisteestä.

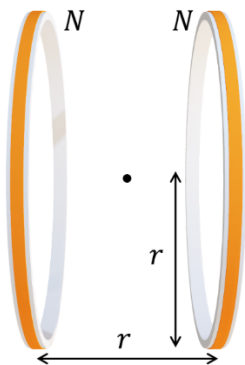
$$B_z = \frac{\mu_0}{2} \frac{I R^2}{(R^2 + Z^2)^{\frac{3}{2}}}$$

, missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, R on virtasilmukan säde ja Z on tarkastelupisteen etäisyys silmukan keskipisteestä sen keskiakselilla.

2.4 Helmholtzin kelat

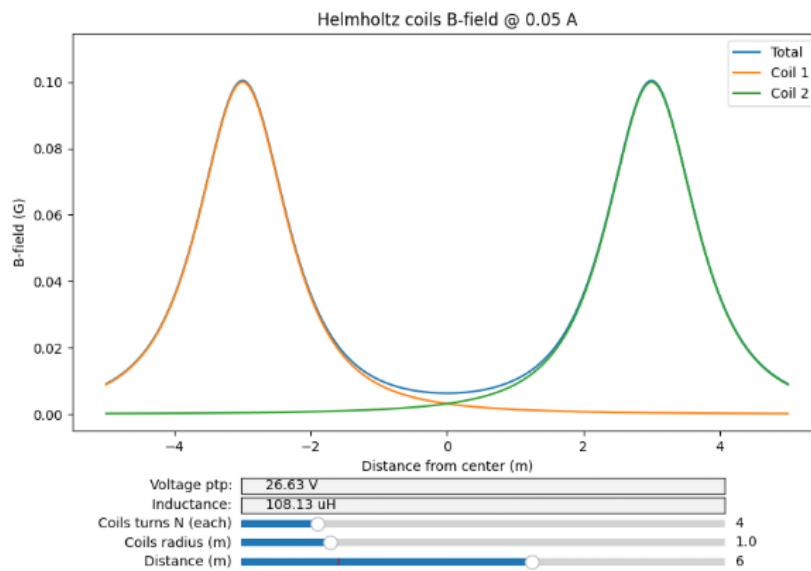
Helmholtzin kelat ovat tunnettu Biot-Savartin lain sovellus. Helmholtzin kelat koostuvat kahdesta identtisestä, saman keskiakselin omaavasta ympyränmuotoisesta kelasta (virtasilmukka), jotka ovat asetettu tarkasti siten, että näiden etäisyys toisistaan on tarkalleen niiden säteen verran. Määritetty geometria takaa sen, että kelojen keskiakselille muodostuvan magneettikentän suuruus on melkein täydellisen homogeeninen. Helmholtzin kelojen rakenne on esitetty kuvassa 2. (Dexin Mag, n.d.)

Kuva 2. Helmholtz Coil (Zurek S. , 2023).



Alla kuvassa 3 on esitetty kahden ympyrämuotoisen kelan yhteiselle keskiakselille muodostuneen magneettivuon tiheys, kun kelat ovat asetettuna kauas, 6 metrin päähän toisistaan ja kelojen läpi kulkee 50 milliampeerin virta.

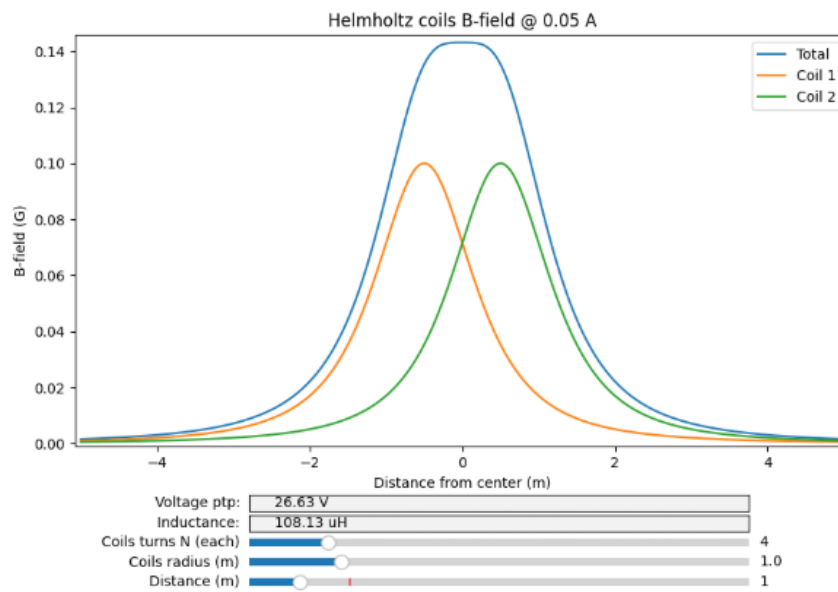
Kuva 3. Kahden kauas toisistaan asetetun, ympyrämuotoisen kelan muodostama magneettivuon tiheys.



Yllä esitetystä kuvasta voidaan huomata, että kelojen muodostamat magneettikentät vaikuttavat toisiinsa erittäin vähän, lähes merkityksettömästi.

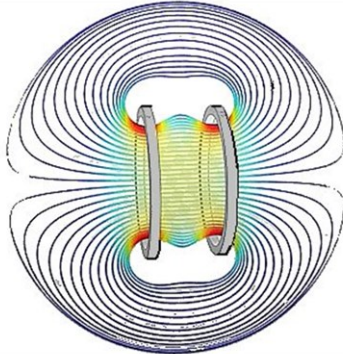
Kun kelat tuodaan lähelle toisiaan ja muodostetaan näistä Helmholtzin kelojen periaatteen mukainen kelapari, huomataan alla esitetyn kuvan 4 mukaisesti, yksittäisten kelojen muodostamien magneettikenttien summautuvan siten, että kelojen väliin näiden keskiakselille muodostuneen magneettikentän suuruus on lähes täydellisen homogeeninen.

Kuva 4. Helmholtzin kelojen mukainen magneettikenttä näiden keskiakselilla.



Alla kuvassa 5 on visualisoitu Helmholtzin kelojen muodostama magneettivuo kenttäviivoilla.

Kuva 5. The magnetic field lines of a Helmholtz coil setup (Herres, 2022).



3 Salamoinnin ja salamanpaikannuksen teoriaa

Tässä kappaleessa käydään läpi salamaniskun ja sen paikantamisen teoriaa testiasemalle ja Vaisalan LS7002-salamanpaikanninturille olennaisesta näkökulmasta. Salamatyypit voidaan yksinkertaistaa kahteen luokkaan, jotka ovat pilven ja maan väliset salamaniskut, sekä pilvestä-pilveen tapahtuvat salamaniskut. Käydään kuitenkin yksinkertaistamisen merkeissä läpi salamanisku vain maan ja pilven välisenä.

3.1 Salamointi ja sen sähkömagneettiset ilmiöt

Salamointi luonnossa tapahtuu ukkospilvestä, joka voimakkaiden nousuvirtauksien takia aiheuttaa varausten erotuksen. Tämän prosessin aikana pilvessä olevat jääkiteet, rakeet ja vesipisarat törmäilevät voimakkaiden ilmavirtausten vaikutuksesta, minkä seurauksena elektronien luovutus ja vastaanotto jakaa varausta pilven ala- ja yläosiin. Yleisimmin pilven alaosaan kertyy negatiivinen varaus ja yläosaan positiivinen varaus, minkä seurauksena ukkospilven sisällä, sekä maan ja pilven alaosan välillä vallitsee voimakas sähkökenttä. (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023)

Varauksen syntyessä riittävän suureksi se voi läpäistä eristävän ilmakerroksen pilven sisällä tai maan ja pilven välillä, synnyttäen voimakkaan sähköpurkauksen eli salamaniskun. Salamaniskun virta ja sen aiheuttama sähkökentän äkillinen purkaus luovat laaja-alaisen sähkömagneettisen spektrin, joka kattaa kaiken aina erittäin matalataajuisesta (DC-tasoisesta) säteilystä radio- ja mikroaalloille, sekä edelleen näkyvälle valolle ja jopa ultraviolettialueelle. (Cesidio Bianchi, 2007)

3.2 Salamanisku, sen paikantaminen ja Vaisalan LS7002

Käydään tässä osiossa läpi salamaniskun aiheuttamia elektromagneettisia ilmiöitä ja Vaisalan LS7002-salamanpaikanninanturin toimintaperiaatetta sen aistinpintojen näkökulmasta. Tarkoituksena on pohjustaa sitä, millaisia sähkömagneettisia signaaleja salamanisku synnyttää ja miten näitä signaaleja havaitaan LS7002:lla.

Vaisalan LS7002-salamanpaikanninanturi mittaa sähkö- ja magneettikentän muutoksia VLF ja LF taajuusalueilla. Vaisalan LS7002 salamanpaikanninanturi on esitetty kokonaisuutena alla kuvassa 6.

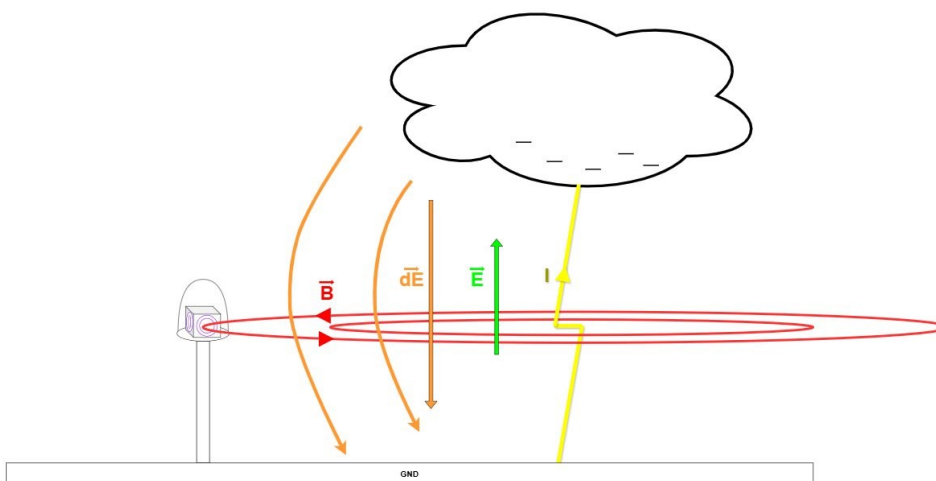
Kuva 6. Advanced Lightning Sensor LS7002 (Vaisala Oyj, n.d.).



Tarkasteltaessa salamaniskua LS7002-anturin näkökulmasta matalilla taajuusalueilla, voidaan ilmiötä yksinkertaistetusti mallintaa johtimena, jossa kulkee virta. Amperen lain mukaisesti tämä salamaniskua kuvaava, virtaa kuljettava johdin, muodostaa magneettikentän ympärilleen, jonka voimakkuus on suoraan verrannollinen salamaniskun kuljettamaan sähkövirtaan. Salamaniskussa kulkevan sähkövirran kuljettaessa sähkövarauksia maan ja pilven välillä, tiedetään myös Gaussin lain mukaan, että maan ja pilven välisen sähkökentän täytyy heikentyä.

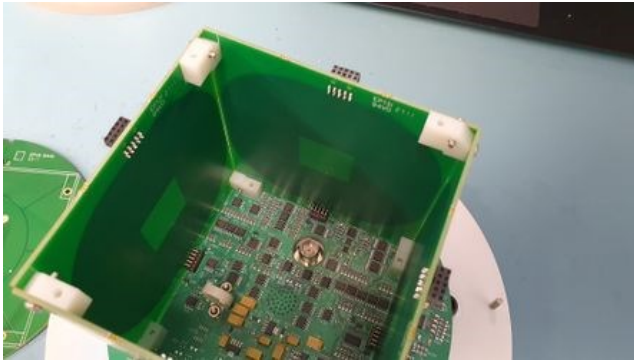
Alla kuvassa 7 on esitetty negatiivisesti varautuneen ukkospilven muodostaman salamaniskun aiheuttamaa muutosta sähkö- ja magneettikenttään, jonka vaikutusalueella on Vaisalan LS7002-salamanpaikanninanturi.

Kuva 7. Salamaniskun sähkömagnetismi



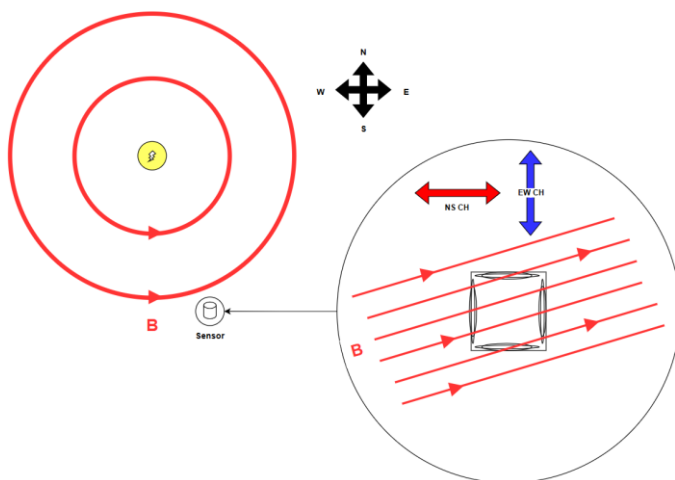
Kuvan 7 esitetyn mallin avulla voidaan huomata, kuinka salamaniskun sähkövirran aiheuttama magneettikenttä ja varausten purkauksen aiheuttama sähkökentän muutos saavuttaa salama-anturin. Magneettikentän muutoksien mittausta varten Vaisalan LS7002-salamanpaikanninanturi on varustettu silmukkapareilla, joista toinen pari on suunnattu pohjois-etelä akselin ja toinen itä-länsi akselin myötäisesti. LS7002-salamanpaikanninanturin antennielementin silmukka-antennit ovat esitetty kuvassa 8.

Kuva 8. LS7002:n silmukka-antennit.



Tietäen, että magneettivuon tiheys on vektorisuure, jolla on siis suuruus ja suunta, sekä tämän muutoksen idusoivan jännitteen silmukoihin Faradayn induktiolain mukaisesti, voidaan tarkastelemalla pohjois-etelä ja itä-länsi akselien silmukkapareihin indusoituneiden jännitteiden amplitudien avulla määrittää salamaniskun suunta suhteessa anturiin. Salamanisku ja sen muodostamaa magneettikenttää suhteessa salamanpaikanninanturiin on havainnollistettu kuvassa 9.

Kuva 9. Salamaniskun magneettikenttä ja LS7002.



Kuvassa 9 esitetyn havainnollistamisen perusteella voidaan todeta, että anturin silmukka-antennien pinta-alan projektiio magneettivuon suuntaan muuttuu magneettikentän suunnan ja siten myös salamaniskun maantieteellisen suunnan mukaan suhteessa anturiin. Koska silmukka-antennien läpi indusoituva jännite on verrannollinen muuttuvan magneettivuon leikkaamaan projektiopinta-alaan, voidaan salamaniskun maantieteellinen suunta suhteessa anturiin määrittää silmukkaparien muodostamilta kanavilta mitattujen amplitudien perustella, hyödyntäen trigonometriaa kaavan 7 mukaisesti.

Kaava 7. Salamaniskun suunta.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{U_{NS}}{U_{EW}}\right)$$

, jossa NS on pohjois-etelä kanavalta mitatun signaalin amplitudi ja EW on itä-länsi kanavalta mitatun signaalin amplitudi.

On huomioitavaa, että kuvassa 5 esitetyt ”NS” (North-South) ja ”EW” (East-West) akselit esittävät salamaniskun suunnalle vaikuttavia kanavia, eivätkä niiden silmukoiden maantieteellistä suuntaa, sillä pohjoisessa iskevä salama aiheuttaa magneettivuon tiheyden muutoksen itä-länsi akselille asetettujen silmukoiden läpi. Nimellisen pohjois-etelä kanavan silmukat on asetettu siis itä-länsi akselille ja toisinpäin.

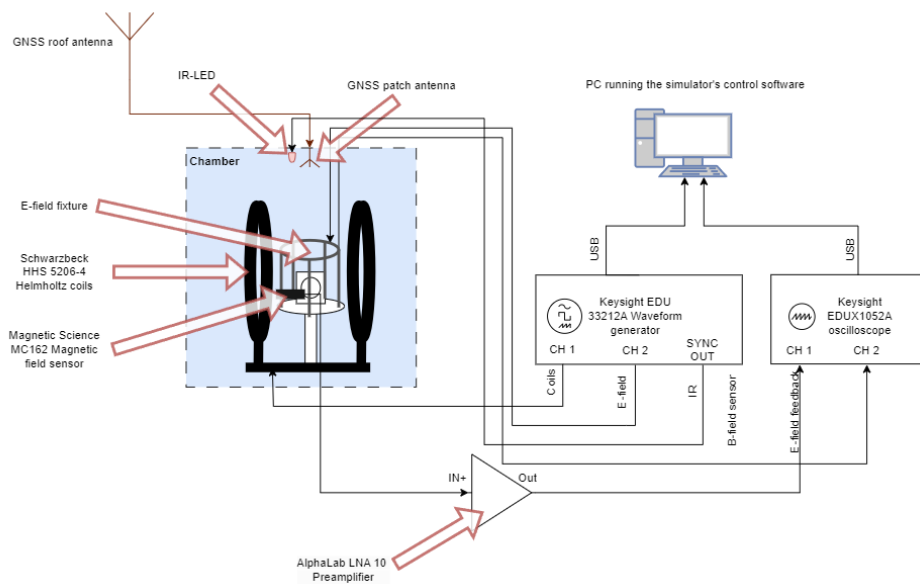
Huomattakoon myös, että ainoastaan tarkkailemalla magneettikentän muutoksia saamme salaman suunnalle anturin läpäisevän akselin, josta on perustasolla mahdotonta selvittää, kummassa suunnassa salamanisku on tapahtunut, sillä salamaniskun aiheuttaman magneettivuon tiheyden muutoksen polariteetti vaihtuu salamaniskun aiheuttaman virran ja niin edelleen salamaniskun suunnan muuttuessa.

Tietääksemme kummalla suunnalla akselia salama on, täytyy myös tietää, onko salamaiskun virran suunta ollut maasta pilveen vai pilvestä maahan. Tarkastelemalla salamaniskun aikaisen sähkökentän muutoksen polariteettia voidaan arvioida, onko virran kulkusuunta ollut pilvestä maahan vai maasta pilveen. Positiivisen varauksen purkautuessa sähkökenttä muuttuu suhteessa maahan negatiiviseen suuntaan, kun taas negatiivisen varauksen purkautuessa sähkökenttä muuttuu positiiviseen suuntaan. Sähkökentässä tapahtuvat muutokset havaitaan Vaisalan LS7002-salamanpaikannusanturin anturielementtiin integroiduilla kampamaisilla johtoradoilla, jotka toimivat sähkökenttäantennina.

4 Testausasema

Tässä kappaleessa perehdytään testausasemassa sovellettuun teoriaan ja sen käytännön toteutukseen. Käsittely painottuu testausaseman laitteiston ja toimintaperiaatteiden esittelyyn ja siihen, miten teoriasta on siirrytty toimivaan tekniseen toteutukseen. Alla kuvassa 10 on esitetty testausaseman lohkokaavio ja kuvassa 11 testausasema kokonaisuudessaan.

Kuva 10. Testausaseman lohkokaavio.



Kuva 11. Testausasema



4.1 Aaltomuotogeneraattori

Testausaseman aaltomuotogeneraattorina toimii Keysight EDU33212A. EDU33212A-aaltomuotogeneraattori tukee VISA ohjelmistorajapintaa, jonka kautta sitä voidaan ohjata ohjelmallisesti SCPI-komennoilla USB-liitännän kautta. Aaltomuotogeneraattori mahdollistaa ohjelmallisesti ladattavien, vapaasti määriteltävien jänniteaaltomuotojen toiston. Laitteessa on kaksi itsenäisesti ohjattavaa lähtökanavaa, joista kumpaakin voidaan käyttää erillisten signaalien tuottamiseen.

4.2 Oskilloskooppi ja magneettikenttäanturi

Testausasemaan kuuluu Keysightin EDUX105A oskilloskooppi, jonka avulla luetaan tähän liitetyn magneettikenttäanturin signaalia ja voidaan suorittaa luvussa 4.6 esitettyjen eri kalibrointivaiheiden vaatimia mittauksia ohjelmallisesti. Aaltomuotogeneraattorin tavoin EDUX105A tukee VISA-ohjelmistorajapintaa, joka mahdollistaa sen, että tätä voidaan ohjelmallisesti käyttää SCPI-komennoilla sen USB-liitännän kautta.

Magneettikenttäanturina toimii Magnetic Science:n MC162, jonka mukana toimitetun kalibrointisertifikaatin perusteella voidaan määrittää suhde sinimuotoisen magneettivuon (B-kentän) ja anturista mitatun jänniteamplitudin välille. Magneettikenttäanturi on asetettu testausaseman Helmholtz-kelaparien väliin, mahdollisimman lähelle niiden yhteistä keskiakselia.

4.3 Kammion EMI-suojaus

Nykyajan toimistot ovat teknologisesti tiiviitä ympäristöjä, joissa erilaiset laitteet aiheuttavat merkittäviä sähkömagneettisia häiriöitä. Testausasema toteutettiin Vaisalan LS7002-salamanpaikanninturin pohjalta, joka mittaa sähkö- ja magneettikentän muutoksia taajuuksilla DC – 500 kHz. Näillä taajuuksilla toimistotiloista löytyy paljon häiriönlähteitä, joista tyypillisimpiä ovat muun muassa rakennuksen sähköverkko ja elektroniikkalaitteiden virtalähteet.

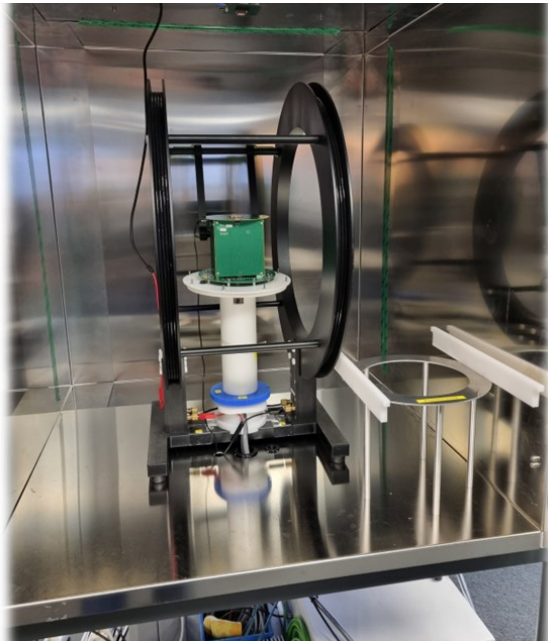
Testausasemalla tulee kuitenkin voida suorittaa häiriövapaita mittauksia häiriöisessä toimistoympäristössä, jonka vuoksi testausasema rakentuu teräsrunkoisesta, kuution muotoisesta kammioista, jonka sisäpinnat on vuorattu nikkelin ja raudan seoksesta koostuvilla levyillä, jotka omaavat korkean permeabiliteetin. Maadoittamalla teräsrunkoinen kammio, muodostuu siitä Faradayn häkki, joka estää ulkoisten sähkökenttähäiriöiden pääsyn

kammion sisään, luomalla jatkuva, johtava ja maadoitettu pinta, joka kerää ja ohjaa ympäröivän sähkökentän aiheuttamat varaukset maahan. Korkean permeabiliteetin levyt ohjaavat normaalisti kammion läpi kulkevat magneettivuot seinämien myötäisesti, tarjoamalla niille helpomman kulkureitin levyjä pitkin, luoden kammion sisälle magneettisesti hiljaisen tilan.

4.4 Magneettikenttä Helmholtz-keloilla

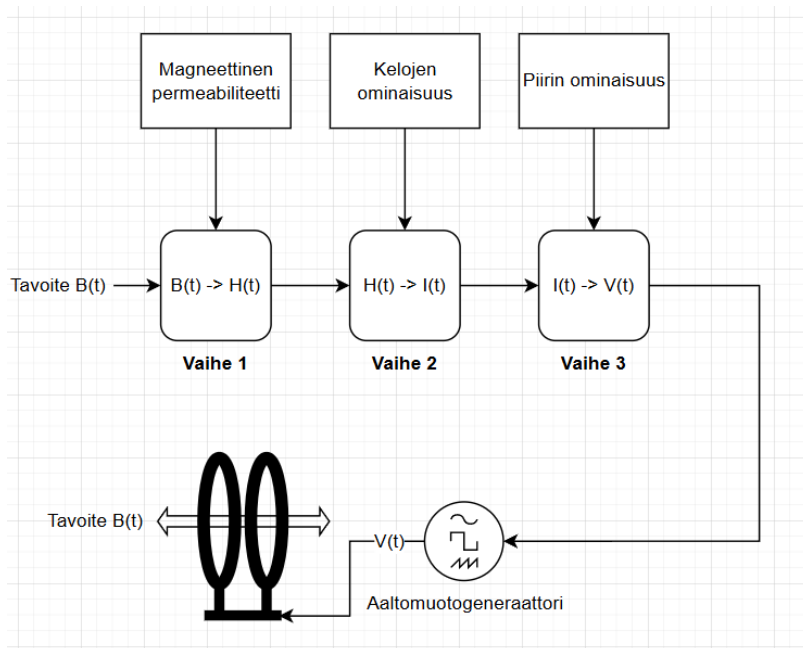
Testausasemassa anturin aistinpinnoille luodaan magneettikenttä saksalaisvalmisteisilla Schwarzbeck Mess-Elektronikin HHS 5206-4 -Helmholtz-keloilla. Tavoitteena on tuottaa käyttäjän määrittelemiä, mielivaltaisia magneettivuon tiheyden aaltomuotoja syöttämällä keloihin sellainen jänniteaaltomuoto, joka saa kelojen keskiakselille aikaan tavoitetta vastaavan magneettivuon tiheyden aaltomuodon. Testausaseman Helmholtz-kelat asetettuna kammion sisälle on esitetty kuvassa 12.

Kuva 12. HHS 5206-4 Helmholtz-kelapari testikammiossa.



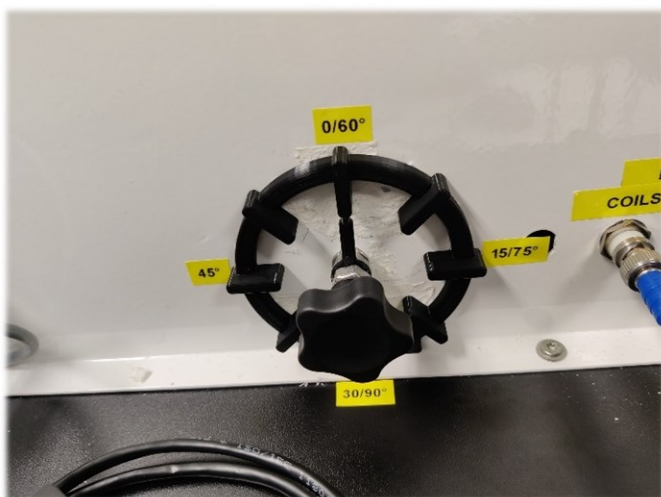
Halutun magneettivuon tiheyden aaltomuodon tuottaminen edellyttää, että tavoiteaaltomuoto kulkee useiden käsittelyvaiheiden läpi, ennen kuin siitä muodostetaan sellainen jänniteaaltomuoto, joka saa aikaan tavoitetta vastaavan magneettivuon tiheyden aaltomuodon Helmholtz-keloilla. Signaaliketjun yleiskuvaus on esitetty lohkokaaavana kuvassa 13.

Kuva 13. Kelojen signaaliketju



Magneettikentän suuntaa suhteessa salamanpaikannanturiin voidaan säätää kammion kyljestä löytyvällä kiertosäätimellä. Kiertosäädin kiittää salamanpaikannanturin antennielementtiä, eikä siis muuta magneettikentän suuntaa, vaan anturin suuntaa suhteessa magneettikenttään. Anturia voidaan kiittää yhteensä 90 asetetta. Koska magneettikentän polariteetti voidaan ohjelmallisesti kääntää, mahdollistaa tämä yhdessä mekaanisen kierron kanssa anturin altistamisen magneettikentälle kaikista eri suunnista. Kiertosäädin on esitetty kuvassa 14.

Kuva 14. Anturin kiertosäädin.



4.4.1 Vaihe 1: Magneettivuon tiheys ja magneettikentän voimakkuus

Kelojen keskiakselin ollessa ilmaa, joka on magneettisilta ominaisuuksiltaan tyhjiön kaltainen, voidaan kelojen keskiakselille muodostuneen magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden suhdetta pitää yhtenevänä tyhjiön permeabiliteettiin μ_0 .

Voimme siis suoraan laskea magneettikentän voimakkuuden aaltomuoto magneettivuon tiheyden aaltomuodosta aikatasossa alla esitetyn kaavan 8 tavoin.

Kaava 8. Magneettikentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys.

$$H(t) = \frac{B(t)}{\mu_0}$$

4.4.2 Vaihe 2: Magneettikentän voimakkuus ja virta

Kelojen valmistajan suorittaman kelojen kalibroinnin ansiosta tiedämme kelojen läpi kulkevan virran ja sen keskiakselille muodostuvan magneettikentän voimakkuuden suhteen.

Valmistajan suorittaman kalibroinnin tuloksena on määritetty magneettikentän voimakkuus (A/m) kelojen läpi kulkevaa virran yksikköä (A) kohden. Kalibroinnin tulos magneettikentän voimakkuuden ja kelojen läpi kulkevan virran yhteytenä voidaan esittää kertoimena k , jolloin voidaan keloille tarvittava virta-aaltomuoto tavoite H-kentän aaltomuodolle laskea kaavan 9 mukaisesti.

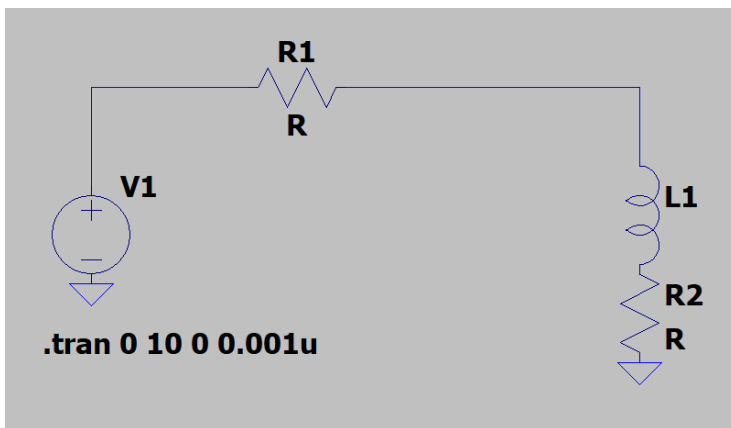
Kaava 9. Virta ja magneettikentän voimakkuus aikatasossa.

$$I(t) = H(t) k$$

4.4.3 Vaihe 3: Kelojen virta ja piirin jännite

Kelojen piiri voidaan esittää RL-piirinä, jossa resistiivinen komponentti R muodostuu kelojen, sekä sen piirin johtimien ja aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssista. Piirin kokonaisinduktanssi L koostuu kelojen ja sen johtimien induktanssista. Kuvassa 15 on esitetty kelojen piirin sijaiskytkentä, jossa R1 kuvaa aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssia, R2 kuvaa kelojen piirin resistanssia ja L1 kelojen impedanssia.

Kuva 15. Kelojen piirin sijaiskytkentä



Koska kelojen piiri muodostaa RL-tyyppisen kuorman, ei sen yli johdettu jännite ja sen läpi kulkeva virta ole suoraan verrannollisia. Induktiivisen kuorman vastustaessa virran muutosta, tulee jänniteaaltomuodon laskennassa ottaa huomioon paitsi virran hetkellinen arvo, myös virran aikaderivaatta ja piirin induktanssi. Vaihe 3 voidaan esittää kaavan 10 yhtälön mukaisesti.

Kaava 10. Jänniteaaltomuoto virran aaltomuodolle.

$$U(t) = R I(t) + L \frac{dI(t)}{dt}$$

, jossa R on kelojen piirin resistiivinen komponentti, $I(t)$ on virran aaltomuoto, L on kelojen piirin induktanssi ja $\frac{dI(t)}{dt}$ on virran aikaderivaatta.

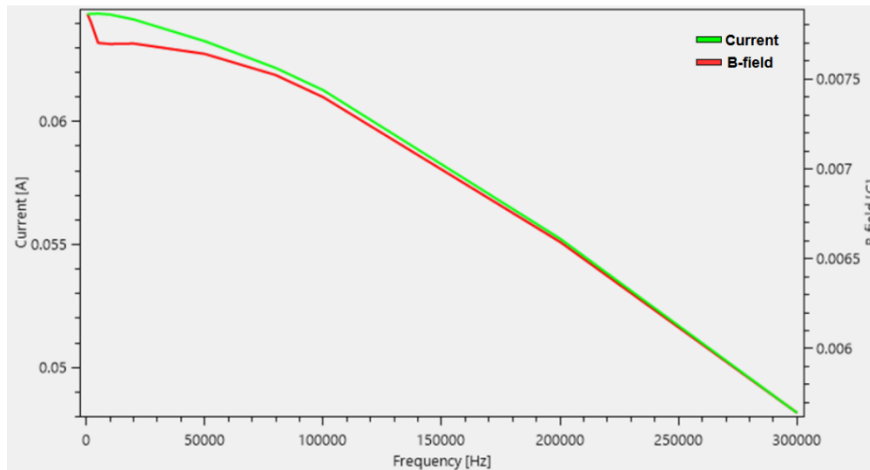
4.5 Testikammion ja sen EMI-suojauksen vaikutus magneettikenttään

Testausaseman kehityksen aikana huomattiin testikammion vaikuttavan kelojen magneettikenttään odottamattomalla tavalla. Kelojen sen keskiakselille muodostaman magneettivuon tiheyden B ja suoraan virtaan verrannollisen magneettikentän voimakkuuden H välille syntyi taajuusriippuvuus.

Aiemmin tehdyn perustavan tarkastelun mukaan, kelojen keskiakselin väliaineen ollessa magneettisesti tyhjiön kaltainen, oletettiin virralla muodostetun H -kentän olevan suoraan verrannollinen sen muodostamaan B -kenttään. Tarkastelu pitääkin paikkansa, kun tarkastellaan kelojen läpi kulkevan virran ja sen muodostaman magneettivuon tiheyden yhteyttä, kun kelat ovat asetettu kammion ulkopuolella. Kuvassa 16 on esitetty kuvaajana

mittaustulokset testistä, jossa keloihin ajettiin vakioamplitudinen jännite eri taajuuksilla ja mitattiin kelojen läpi kulkevaa virtaa ja sen muodostamaa magneettivuon tiheyden amplitudia, kun kelat ovat asetettuna kammion ulkopuolelle.

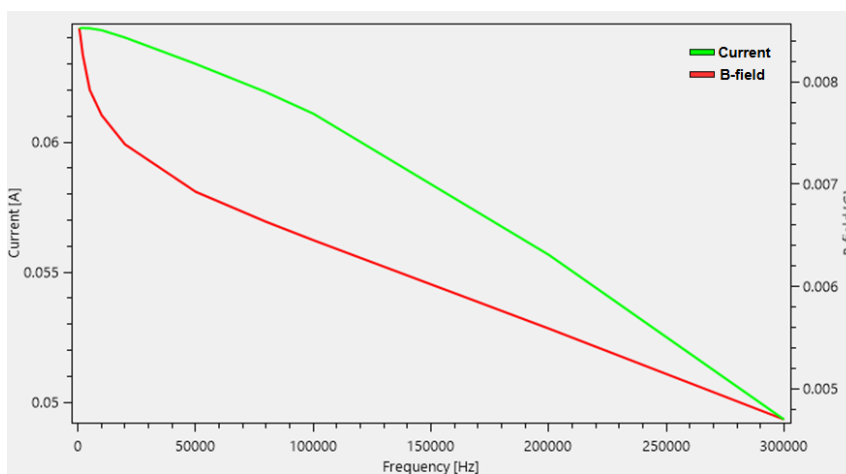
Kuva 16. B-kenttä ja kelojen virta. Kelat kammion ulkopuolella.



Kuva 16 esitetystä kuvaajasta huomataan kelojen induktanssin vaikuttavan kelojen läpi kulkevan virran amplitudiin taajuuden muuttuessa. Huomataan kuvaajasta myös B-kentän amplitudin muuttuvan, mutta pysyvän verrannollisena kelojen läpi kulkevaan virtaan.

Asettaessa kelat testikammioon ja toistaessa saman mittauksen, huomataan kelojen muodostaman magneettivuon tiheyden ja sen läpi kulkevan virran verrannollisuuden rikkoutuvan. Mittaus toistettuna kammion sisällä on esitetty alla kuvassa 17.

Kuva 17. B-kenttä ja kelojen virta. Kelat kammion sisällä.



Kammion sisällä toistetusta mittauksesta voidaan siis todeta kammion seinämien materiaalin vaikuttavan kelojen muodostamaan magneettikenttään. Suoraan virtaan verrannollisen ja

ympäristöstä riippumattoman H -kentän ja sen muodostaman B -kentän suhde ei siis ole aiemman tarkastelun mukaisesti vakio, vaan on taajuusriippuvainen, kun kelat asetetaan kammion sisälle.

4.5.1 Kammion materiaalin permeabiliteetin taajuusriippuvuus

Aiemman perustavan tarkastelun pohjalta voidaan todettua ilmiötä selittää magneettivuon tiheyteen vaikuttavan permeabiliteetin taajuusriippuvuutena. Kelojen ympärillä olevan materiaalin permeabiliteetti, eli kyky johtaa magneettivuota muuttuu siis magneettivuon taajuuden mukaan. Kelojen ympärillä olevan materiaalin permeabiliteetti vaikuttaa siis myös kelojen keskiakselin magneetikenttään, kun osa magneettivuon polusta kulkee seinämien materiaalin läpi ja tätä pitkin sulkeutuakseen. Tarkastellessa EMI-suojausmateriaalin datalehteä, voidaan huomata vuorauslevyjen olevan todellakin taajuusriippuvainen, sillä valmistaja on antanut materiaalin suhteelliselle permeabiliteetille arvon DC taajuudella $>400\ 000$ ja 60 Hz taajuudella $>75\ 000$.

4.5.2 Taajuusriippuvuuden kompensointi

Tiedetään voivamme esittää minkä tahansa mielivaltaisen aikatason aaltomuodon koostuvan – näytetaajuuden mukaan – äärellisen määrän siniaallon komponenteista. Voidaan siis annettu aikatason aaltomuoto esittää eri taajuuksien ja amplitudisten siniaaltojen summana. Aikatason aaltomuoto voidaan muuntaa taajuustasolle Fourier-muunnoksella, jolla saadaan aikatason aaltomuodolle Fourier-sarja, joka kuvaa aikatason aaltomuotoa siniaaltokomponentteina.

Taajuustasolla voidaan nyt taajuuskompensoida aikatason aaltomuoto muuntamalla Fourier-sarjan taajuuskomponenttien amplitudin arvoa todetun taajuusriippuvuuden mukaan. Jokaista taajuuskomponenttia muunnetaan mitatun taajuusriippuvuuden aiheuttaman B -kentän virheen mukaisen korjauskertoimen mukaan. Mittauspisteiden väliin jääville taajuuskomponenteille lasketaan lineaarisesti mittauspisteiden väliä komponentin taajuutta vastaava uusi korjauskerroin. Taajuustason kompensoinnin jälkeen aaltomuoto muunnetaan takaisin aikatasolle Fourier-käänteismuunnoksella, jolloin saadaan taajuuskompensoitu aikatason aaltomuoto.

Aaltomuodon palautuessa aikatasolle huomattiin siihen muodostuvan vääristymiä, etenkin sen loppu- ja alkupäihin. Loppu ja alkupäiden vääristymät aiheuttivat aaltomuodoille niiden jatkumon rikkoutumisen, mikä estää aaltomuotojen jatkuvan toistamisen ilman epäjatkuvuuksia. Kompensoinnissa päädyttiin lopulta yksinkertaiseen ratkaisuun, jossa

käyttäjä voi siniaaltoista magneettikenttää toistaessa ottaa tälle käyttöön kompensoinnin, jolloin siniaallon aaltomuotomallille annetun taajuuden perusteella muutetaan siniaallon amplitudia korjauskertoimien mukaan. Muille kuin siniaallon aaltomuotomalleille ei siis ole lopullisessa ratkaisussa taajuusriippuvuuden kompensointia käytettävissä. Kompensoinnista ja korjauskertoimien määrittämisestä on kerrottu lisää kappaleessa 4.6.4.

4.6 Kelojen piirin kalibrointimittaus

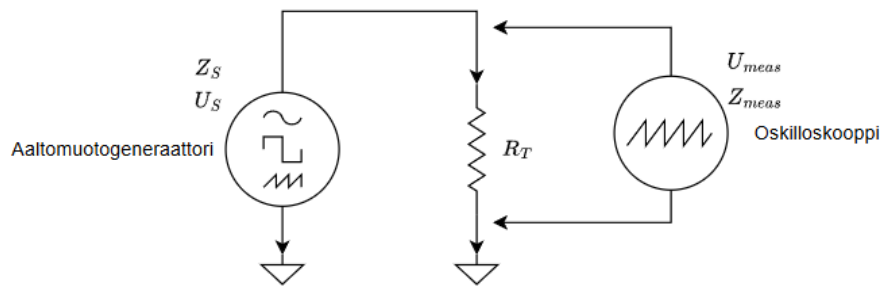
Helmholtz-kehojen valmistajalta saatiin kalibrointisertifikaatti, jossa kehoille on selvitetty sen induktanssi, resistanssi ja sen tuottaman H-kentän suuruus virran yksikköä kohden. Kuten jo aiemmin todettiin, kehojen ympäristö aiheuttaa kehojen sähköisille ja magneettisille ominaisuuksille epävarmuuksia. Epävarmuuksia aiheuttaa myös mm. testiaseman kaapelit, jotka voivat kasvattaa kehojen piirin induktanssia jopa 370 nH kaapelimetriä kohden. Nämä epävarmuudet päätettiin ratkaista kehittämällä testiaseman kehojen piirille kalibrointiprosessi. Kalibrointi sisältää yhteensä 4 vaihetta, jotka käsitellään tässä kappaleessa.

Kalibrointi on automatisoitu siten, että käyttäjän tarvitsee ainoastaan tehdä kalibrointivaiheille tarvittavat kytkennät. Piirin mittaus ja analysointi tapahtuu siis ohjelmallisesti. Kalibrointi käyttäjän näkökulmasta on esitetty kappaleessa 5.2.5.

4.6.1 Kalibrointivaihe 1: Aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssi

Aaltomuotogeneraattorin todellinen lähtöimpedanssi määritetään mittaamalla jännitettä tunnetun resistanssin yli, kun aaltomuotogeneraattorin kanavalta asetetaan tietty DC jännite. Tunnettuna resistanssina aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssina toimii 50 ohmin BNC-päätevastus. Päätevastuksen yli vaikuttavan jännitteen mittaus tapahtuu liittämällä oskilloskooppi, päätevastus ja aaltomuotogeneraattori samaan BNC T-liittimeen. Lähtöimpedanssin mittauspiiri on esitetty kuvassa 18.

Kuva 18. Lähtöimpedanssin mittaussiipi.



Aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssi lasketaan johtaen Ohmin ja Kirchoffin lakeja, jolloin saadaan aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssille kaavan 11 mukainen yhtälö. Lähtöimpedanssia laskettaessa on otettu huomioon oskilloskoopin 1 megaohmin tuloimpedanssi.

Kaava 11. Lähtöimpedanssimittauksen kaava.

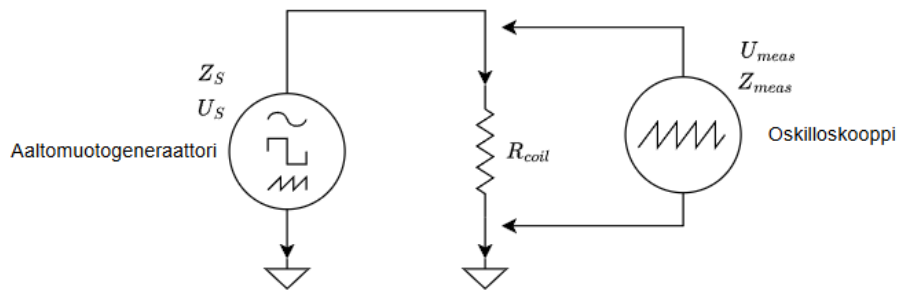
$$Z_s = \frac{(U_s - U_{meas}) Z_{meas} R_T}{U_{meas} (Z_{meas} + R_T)}$$

, missä Z_s on aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssi, U_s on aaltomuotogeneraattorista asetettu lähtöjännite, U_{meas} on oskilloskoopilla mitattu jännite, Z_{meas} on oskilloskoopin tuloimpedanssi ja R_T päätevastuksen resistanssi.

4.6.2 Kalibrintivaihe 2: Kelojen piirin resistanssi

Kalibrintivaiheessa 2 selvitetään kelojen piirin resistanssi, johon kuuluu kelojen oma resistanssi ja niiden kaapeloinnista aiheutuva resistanssi. Kelojen resistanssin mittauksessa käytetään samankaltaista mittauskytettä kuin vaiheessa 1, mutta nyt päätevastuksen tilalla BNC T-liittimessä on kelat. Kelojen resistanssin mittauskytettä on esitetty kuvassa 19.

Kuva 19. Kelojen piirin resistanssin mittaussiiri.



Kelojen piirin resistanssin kaava johdetaan, kuten vaiheessa 2, Ohmin ja Kirchoffin laeista hyödyntäen jännitejakolakea, kaavan 12 mukaisesti.

Kaava 12. Kelojen piirin resistanssin mittauksen yhtälö.

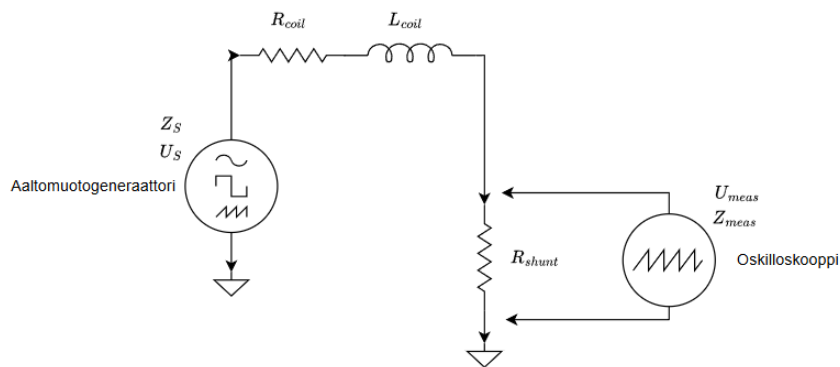
$$R_{coil} = \frac{U_{meas}}{\frac{U_s - U_{meas}}{Z_s} - \frac{U_{meas}}{Z_{meas}}}$$

, missä R_{coil} on kelojen piirin resistanssi, U_{meas} on oskilloskoopilla mitattu jännite, U_s on aaltomuotogeneraattorista asetettu DC lähtöjännite, Z_s on kalibroituvaiheessa 1 määritetty aaltomuotogeneraattorin lähtöjännite ja Z_{meas} on oskilloskoopin tuloimpedanssi.

4.6.3 Kalibroituvaihe 3: Kelojen piirin induktanssi

Kalibroituvaiheen 3 tarkoituksena on selvittää kelojen piirin induktanssi. Piirin induktanssin määrittäminen tapahtuu tarkkailemalla kelojen piirin läpi kulkevan virran amplitudia eri taajuuksilla, kun piirin yli vaikuttavan jännitteen amplitudi pidetään vakiona. Piirin läpi kulkevan virran amplitudi määritetään mittaamalla kelojen piirin kanssa sarjaan asetetun shunttivastuksen yli vaikuttavaa jännitettä. Kalibroituvaiheen 3 mittaussiiri on esitetty kuvassa 20.

Kuva 20. Kelojen piirin induktanssin kalibroitipiiri.



Shunttivastus on integroitu 3D-tulostettuun rasiaan, jossa on kolme BNC-liitintä. Kotelo kytketään kelojen ja aaltomuotogeneraattorin väliin, jolloin voidaan kolmannelta BNC-liittimestä mitata shunttivastuksen yli vaikuttavaa jännitettä. Shunttivastus on sijoitettu mahdollisimman lähelle aaltomuotogeneraattorin maareferenssiä, eli paluuvirran juureen, jolloin sen yli vaikuttava jännite on käytännössä täysin samassa vaiheessa, kuin sen läpi kulkeva virta. Shunttivastusrasia on esitetty kuvassa 21.

Kuva 21. Shunttivastusrasia.



Ennen varsinaisia kalibroitimittauksia määritetään shunttivastuksen todellinen resistanssi. Shunttivastuksen resistanssi määritetään mittaamalla sen yli vaikuttava jännite, kun mittauspäiriin syötetään DC jännite. Vastuksen todellinen resistanssi voidaan määrittää mitatun jännitteen perusteella, kun tunnetaan aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssi ja kelojen piirin resistanssi, sekä tiedetään, että ne ovat sarjassa shunttivastuksen kanssa. Shunttivastuksen resistanssin laskukaava on esitetty kaavassa 13.

Kaava 13. Shunttivastuksen resistanssin laskukaava.

$$R_{shunt} = \frac{U_{meas}}{\frac{U_s - U_{meas}}{Z_s + R_{coil}} - \frac{U_{meas}}{Z_{meas}}}$$

, missä R_{shunt} on shunttivastuksen resistanssi, U_{meas} on oskilloskoopilla mitattu DC jännite, U_s on aaltomuotogeneraattorilta asetettu DC jännite, Z_s on aaltomuotogeneraattorin lähtöjännite, R_{coil} on kelojen piirin resistanssi ja Z_{meas} on oskilloskoopin tuloimpedanssi.

Kun shunttivastuksen todellinen resistanssi on määritetty, voidaan siirtyä mittaamaan kelojen piirissä kulkevan virran amplitudia eri taajuuksilla. Piirin läpi kulkevan virran amplitudi lasketaan shunttivastuksen yli vaikuttavasta jännitteestä ohmin lain avulla, kaavan 14 mukaisesti.

Kaava 14. Piirin virran amplitudi.

$$I = \frac{U_{shunt}}{R_{shunt}}$$

, missä I on kelojen kalibrointipiirissä kulkeva virta, U_{shunt} on shunttivastuksen yli vaikuttava jännite ja R_{shunt} on shunttivastukselle todettu resistanssi.

Kelojen kalibrointipiiri voidaan mallintaa tyypilliseksi RL-piiriksi, jonka resistanssi koostuu aaltomuotogeneraattorin lähtöimpedanssista, sekä kelojen piirin ja shunttivastuksen resistanssista. Tällöin piirissä kulkevan virran ja piirin yli vaikuttavan jännitteen, taajuuden, resistanssin ja induktanssin välinen yhteys voidaan esittää kaavan 15 mukaisesti.

Kaava 15. RL-piirin virran yhtälö.

$$I = \frac{U}{\sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2}}$$

Aaltomuotogeneraattorilla syötetään piiriin vakioamplitudinen jännite, jonka taajuutta nostetaan askelittain. Kullakin taajuusaskeleella mitataan piirin läpi kulkeva virta, jolloin saadaan mittausaineisto, joka koostuu mittauspisteistä I_i ja f_i . Näillä mittauspisteillä voidaan nyt määrittää mittausaineistoa parhaiten vastaava induktanssin arvo L , hyödyntäen pienimmän neliösumman menetelmää.

Tietäen, että jänniteamplitudi ja piirin resistanssi pysyvät vakioina, voidaan piirin virralle määrittää teoreettinen malli kaavan 16 mukaisesti.

Kaava 16. Kelojen piirin virran teoreettinen malli.

$$I_{malli}(f; L) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}}$$

Koska mittausaineiston suureina on virta I ja taajuus f , määritellään residuaali kullekin mittauspisteelle kaavan 17 mukaisesti. Mitä pienempi residuaalin itseisarvo on, sitä paremmin induktanssin arvio vastaa kyseisen mittauspisteen tuloksia.

Kaava 17. Mittauspisteen residuaali.

$$r_i = I_i - I_{malli}(f_i; L)$$

Halutaan löytää sellainen induktanssin arvo L , joka parhaiten vastaa koko mittausaineiston kaikkia mittauspisteitä. Tämä tehdään laskemalla mittauspisteiden residuaalien neliösumma annetulla induktanssin arviolla kaavan 18 esittämällä tavalla ja tarkastamalla neliösumman suuruus. Mitä pienempi neliösumma, sitä paremmin induktanssin arvio vastaa mittausaineistoa.

Kaava 18. Residuaalien neliösumman kaava.

$$S(L) = \sum_{i=1}^N (r_i)^2$$

Induktanssin ensimmäisenä arviona käytetään kelojen valmistajan antamaa kelojen induktanssia. Tätä arviota lähdetään muuttamaan riittävän pienin askelin sellaiseen suuntaan, että neliösumma pienenee. Kun neliösummaa ei saada annetulla askelluksella enää pienemmäksi, voidaan todeta mittausaineistoa parhaiten vastaavan induktanssin löytyneeksi.

4.6.4 Kalibrointivaihe 4: Kelojen H- ja B-kentän suhteen korjaustaulukko

Kammion EMI-suojauksessa käytettyjen materiaalien aiheuttaessa taajuusriippuvuuden keloilla tuotetun magneettikentän voimakkuuden H ja salamanpaikanninanturille

muodostetun magneettivuon tiheyden B välille, määritellään tässä kalibroitivaiheessa tälle korjauskerrointalukko.

Tiedetään magneettikentän voimakkuuden H amplitudin olevan suoraan verrannollinen kelojen läpi kulkevan virran amplitudiin, eikä se riipu väliaineesta. Magneettianturi on asetettu kelojen muodostaman magneettikentän homogeeniselle alueelle, jossa väliaineena on ilma, jonka permeabiliteetti vastaa tyhjiötä. Voidaan näin ollen tuotetun magneettikentän voimakkuuden amplitudin perusteella määrittää odotettu magneettivuontiheyden amplitudi. Tässä kalibroitivaiheessa kelojen piirin sähköiset ominaisuudet, kuten sen resistanssi ja induktanssi ovat jo tunnetut. Voidaan odotettu magneettivuon tiheys täten määrittää piirille syötetyn jännitteen amplitudin ja taajuuden funktiona kaavan 19 mukaisesti.

Kaava 19. Odotettu magneettivuon tiheys.

$$B_{odotettu}(U, f) = \frac{U k \mu_0}{\sqrt{(2\pi f L)^2 + R^2}}$$

, jossa U on aaltomuotogeneraattorilla kelojen piirille syötetty jännite, k on kelojen valmistajalta saatu kelojen tuottaman magneettikentän voimakkuus virtaa kohden (A/m), μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, f on aaltomuotogeneraattorilla syötetyn jännitteen taajuus, L on kelojen piirin induktanssi ja R kelojen piirin resistiivinen komponentti.

Korjauskerrointalukkuun määritetään ne taajuuspisteet, joille magneettianturin valmistajalta on saatu kalibroititodistus. Todistuksessa on ilmoitettu magneettivuon tiheyden amplitudi suhteessa magneettianturilta mitattuun jänniteamplitudiin, kullakin annetulla taajuudella. Kullekin taajuudelle f_i määritetään oma korjauskerroin, joka lasketaan odotetun ja mitatun magneettivuon tiheyden perusteella kaavan 20 mukaisesti.

Kaava 20. Magneettivuon tiheyden korjauskerroin.

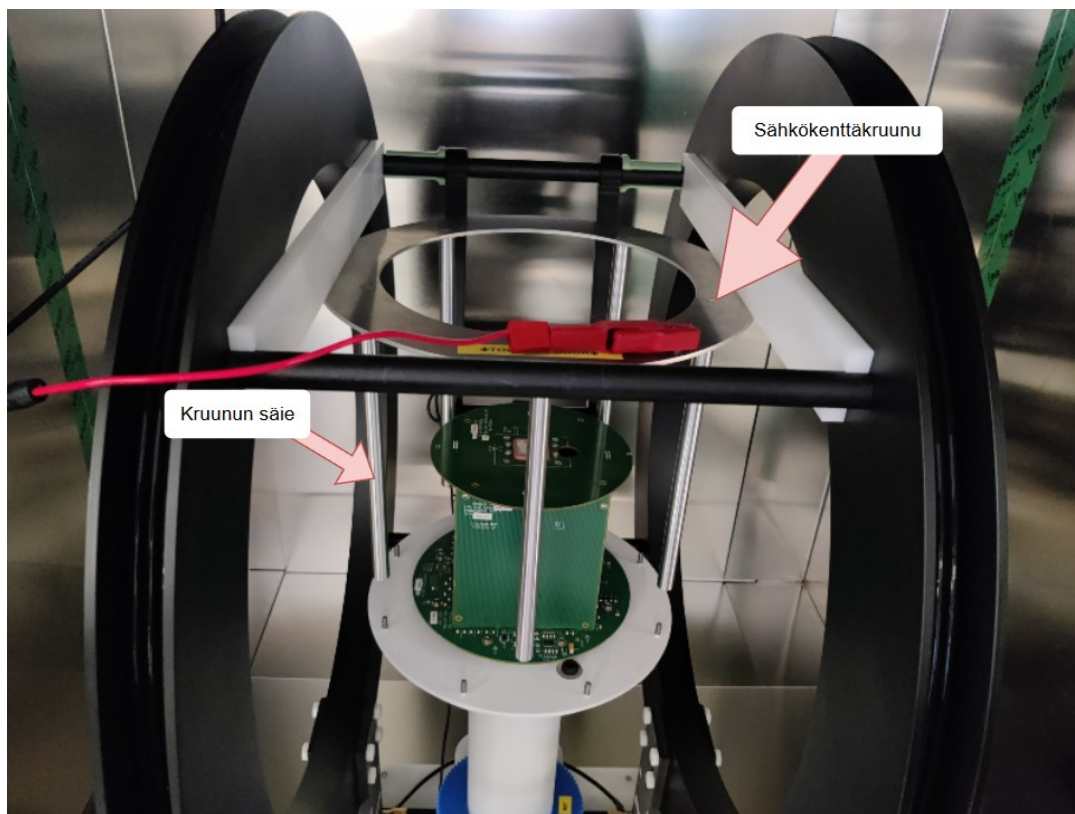
$$K_B(f_i) = \frac{B_{odotettu}(f_i)}{B_{mitattu}}$$

Voidaan nyt määritetyillä korjauskertoimilla skaalata siniaaltomuotoisen magneettivuon tiheyden amplitudi kompensoimaan testikammion vuorausmateriaalin vaikutus. Huomattavaa on, että skaalaus on mahdollista vain sinimuotoiselle aaltomuotomallille, eikä korjauskertoimet täten vaikuta testausaseman muihin aaltomuotomalleihin.

4.7 Sähkökenttä ja sähkökenttäkruunu

Anturin aistinpinnoille luodaan sähkökenttä tätä tarkoitusta varten suunnitellulla, kruunua muistuttavalla, teräksestä valmistetulla esineellä eli *sähkökenttäkruunulla*. Kruunu asetetaan anturin ympärille siten, että etäisyys anturin aistinpintojen ja kruunun säikeiden välillä olisi yhtäläinen koko anturin ympärillä. Sähkökenttä aiheutetaan johtamalla jännite jänniteaaltomuotogeneraattorilla sähkökenttäkruunuun, jolloin anturin aistinpintojen ja kruunun välille syntyy kruunuun johdettuun jännitteeseen suoraan verrannollinen sähkökenttä. Kuvassa 22 on esitetty sähkökenttäkruunu asetettuna testausasemaan LS7002-salamanpaikanninanturin ympärille.

Kuva 22. Sähkökenttäkruunu ja LS7002



4.7.1 Magneettikentän ja sähkökentän suhde

Sähkömagneettisen aallon sähkökentän E ja magneettivuon tiheyden B suhde perustuu Maxwellin yhtälöihin ja valonnopeuden määritelmään. Valonnopeus tyhjiössä määritellään kaavan 21 mukaisesti sähkövakion ϵ_0 ja magneettivakion μ_0 avulla.

Kaava 21. Valonnopeuden määritelmä

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Kun testiaseman ilma oletetaan magneettisilta ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan käytännössä tyhjiön kaltaiseksi, voidaan hyödyntää valonnopeutta laskennassa, joka kuvaa sähkömagneettisen aallon ominaisuuksia anturin vallitsevassa ympäristössä. Tämä mahdollistaa Maxwellin yhtälöistä johdetun yksinkertaistetun kaavan soveltamisen, joka yhdistää magneettivuon tiheyden ja sähkökentän. Voidaan täten laskea sähkökentän aaltomuoto magneettikentän aaltomuodosta aikatasossa kaavan 21 mukaisesti.

Kaava 22. Vastaava sähkökentän aaltomuoto magneettikentän aaltomuodolle.

$$E(t) = B(t) c$$

4.7.2 Sähkökentän muodostaminen

Tarvittava jännite kruunulle voidaan johtaa Coulombin laista, jolloin saamme jänniteaaltomuodon sähkökentän aaltomuodolle kaavan 23 mukaisesti, jossa tarvittava jännite on suoraan verrannollinen sähkökentän suuruuteen ja anturin sähkökenttäantennien etäisyyteen kruunusta.

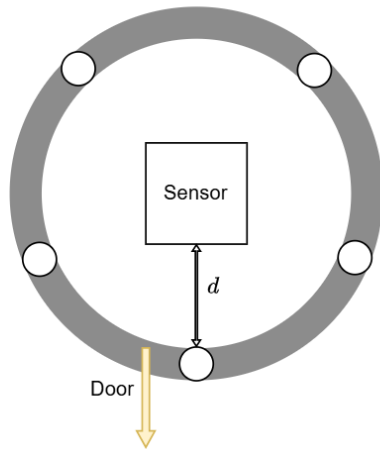
Kaava 23. Jänniteaaltomuoto sähkökentän aaltomuodolle.

$$V(t) = E(t) d$$

Koska salamanpaikanninanturin ja sähkökenttäkruunun geometria on vaikeasti mallinnettavissa, pysytään etäisyyden määrittämisessä yksinkertaisessa ratkaisussa. Salamanpaikanninanturin sähkökentän muutosten mittaustarkkuus on anturin toiminnan kannalta toissijainen, joten yksinkertaistettua lähestymistapaa voidaan pitää perusteltuna ratkaisuna. Salamanpaikanninanturin etäisyydeksi sähkökenttäkruunuun määritettiin testikammion ovea lähimpänä olevan kruunun säikeen ja anturin sähkökenttäantennin välinen etäisyys. Etäisyyden määrittäminen on havainnollistettu kuvassa 23.

Kuva 23. Sähkökenttäkruunun etäisyyden määrittäminen

Top view:



Voidaan nyt yhdistää esitetyt kaavat ja johtaa sähkökenttäkruunun jänniteaaltomuodolle magneettikentän aaltomuodosta kaavan 24 mukaisesti.

Kaava 24. Vastaava kruunun jänniteaaltomuoto magneettikentän aaltomuodolle.

$$V(t) = B(t) c d$$

5 Testausaseman ohjelmisto

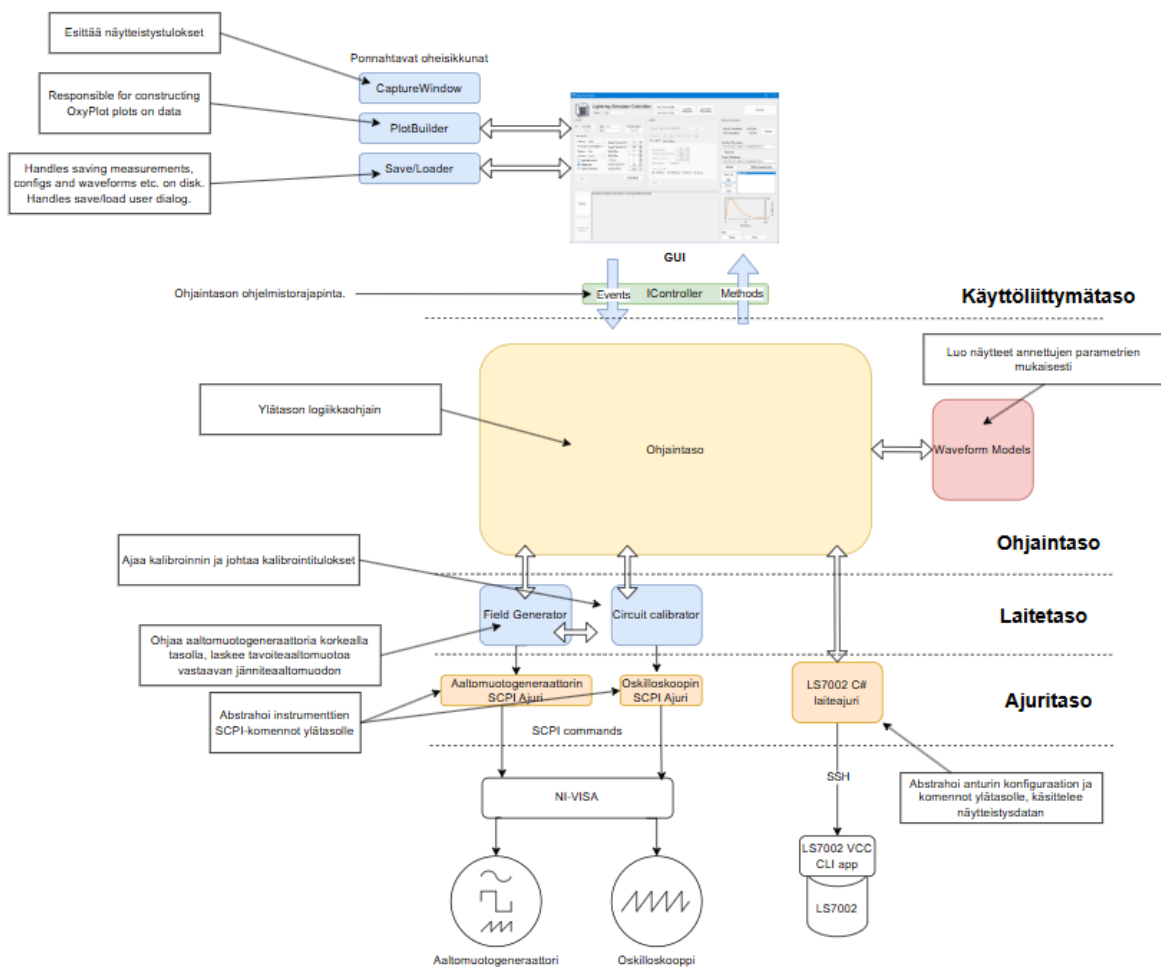
Testausasemaa varten kehitetty tietokonesovellus vastaa aseman kokonaisvaltaisesta ohjauksesta, johon kuuluu testausaseman instrumenttien ja salama-anturin konfigurointi ja komentaminen. Testausaseman tietokonesovelluksen lopullisena tarkoituksena on tuoda käyttäjälle yksinkertainen graafinen käyttöliittymä. Käyttäjän näkökulmasta testausasema tuottaa haluttuja sähkömagneettisia aaltomuotoja, joita käsitellään B-kenttänä. Tuotettuja aaltomuotoja voidaan siten salama-anturilta näytteistää ja tarkastella näytteistyksen tuloksia samaisesta käyttöliittymästä.

Testiaseman ohjelmisto on toteutettu Visual Studio -kehitysympäristössä .NET Framework-ohjelmistokehyksellä käyttäen C#-ohjelmointikieltä. Kielivalinta tehtiin, koska C# tarjoaa erinomaisen tasapainon nopean kehitystahdin ja joustavan muokattavuuden välillä, joista muokattavuus korostuu erityisesti näin laitelähtöisessä sovelluksessa. Graafisen käyttöliittymän kehitykseen .NET Frameworkiin sisältyvä WinForms-käyttöliittymäkirjasto tuo helppoutta ja suoraviivaisuutta yhdistettynä Visual Studioon, jossa voidaan WinForms ikkunoihin asettaa käyttöliittymäelementtejä vedä-ja-pudota tyyllisesti.

5.1 Ohjelmiston rakenne

Tässä kappaleessa käydään läpi testausaseman ohjelmiston rakenne. Ohjainohjelmistoa tarkastellaan ylätasolla, keskittyen sen pääkomponentteihin ja niiden väliseen vuorovaikutukseen. Tavoitteena on antaa yleiskuva ohjelmiston arkkitehtuurista ja sen toiminnallisesta jaosta. Testausaseman ohjelmiston rakenne on esitetty lohkokaaviona kuvassa 24.

Kuva 24. Testiaseman ohjelmiston rakenne.



5.1.1 Käyttöliittymätaso

Käyttöliittymän ohjelmistotason tehtävänä on suorittaa käyttöliittymän logiikka. Käyttöliittymän logiikkaan kuuluu käyttäjältä saapuvan syötteen käsittely ja käyttöliittymäelementtien aktivointi testiaseman tilan perusteella. Käyttäjän syöte testiaseman sovelluksessa voisi olla esimerkiksi instrumenttien ja anturin osoite ja yhdistämiskäskey, valitun aaltomuodon vaihtuminen, aaltomuodon toistokäskey ja anturin näytteistyskäskey. Käyttöliittymäelementtien

aktivointi ja deaktivointi ohjaa käyttäjää tekemään oikeat ratkaisut testiaseman tilan perusteella, parantaen käyttäjäkokemusta. Esimerkiksi anturin ollessa yhdistämätön on anturin konfiguraatiopaneeli deaktivoituna, jolloin käyttäjä herkemmin kiinnittää huomionsa anturin yhdistämispaneeliin. Käyttöliittymäelementtien deaktivointi ilmaisee yksinkertaisesti testiaseman tilan perusteella, mitkä toiminnot ovat mahdollisia. Käyttöliittymäelementtien deaktivoinnin ei kuitenkaan ole tapa estää ohjelmiston ennalta määrittämättömiä käyttäytymisiä, vaan sallimattomat operaatiot käsitellään ohjaintasolla.

5.1.2 Aaltomuotomallit

Aaltomuotomallintaja koostuu algoritmeista, jotka luovat aikataason näytteitä annettujen parametrien perusteella. Aaltomuotomallintaja tarjoaa ennalta määritettyjä malleja, jolle annetuilla parametreilla voidaan muokata aaltomuodon ominaisuuksia, esim. siniaallon parametrejä voisivat olla taajuus, amplitudi, vaihe ja jaksojen lukumäärä. Simulaattorin ohjelmistolle valmiita aaltomuotomalleja luotiin 4, joista yksi on CSV-jäsenenmalli, joka muuntaen lataa tekstipohjaisen näytteistykseen ohjelmistolle. CSV-jäsentimellä voidaan ladata simulaattorin ohjelmistolle täysin mielivaltaisia aaltomuotoja tarjottujen mallien ulkopuolelta.

5.1.3 Ohjaintaso

Ohjaintason tarkoitus on suorittaa sovelluksen korkean tason logiikka. Testiaseman sovelluksen tapauksessa korkean tason logiikalla tarkoitetaan esimerkiksi anturin näytteistystä, jossa ohjaintasolla käsketään anturin laiteajuria käynnistämään näytteistys ja jäädään odottamaan tuloksia laiteajurilta tai vaihtoehtoisesti käskettäessä toistaa tietty aaltomuoto, virittää se aaltomuodon käyttäen aaltomuotogeneraattorin laiteajuria ja liipaisee aaltomuodon. Ohjaintason tarkoitus on siis paloitella tehtävät pienempiin osiin ja käsitellä mahdolliset virhetilanteet, kuten anturin yhteyden katkeaminen. Ohjaintaso mahdollistaa käyttöliittymän erottamisen ohjelmiston toiminnoista, jolloin käyttöliittymätasolla voidaan keskittyä käyttöliittymän ohjaukseen ja jättää toiminnallinen ohjaus ohjaintason tehtäväksi. Ohjaintason rajapinta määrittää siis sen, kuinka toiminnallista ohjelmistoa on tarkoitus käyttää. Voimme tämän erotuksen ansiosta mm. jättää käyttöliittymän kokonaan pois ja automatisoida toimintoja tai luoda testiasemalle sovelluksen, jonka käyttöliittymänä toimii komentorivi tai verkkosivu.

Ohjaintason ei kuitenkaan kuulu tuntea esimerkiksi testiaseman Helmholtz-kehojen piirin ominaisuuksia. Ohjaintaso siis yksinkertaisesti käskää laitteita ohjaavaa, alemmaa tasoa esimerkiksi toistamaan tietyn aaltomuodon, eikä sen tarvitse käyttää tavoiteaaltomuotoa signaaliketjun lävitse.

5.1.4 Laitetaso

Laitetasoa ohjataan ohjaintasolta ja laitetaso puolestaan ohjaa laiteajureita. Laitteella tarkoitetaan tässä kontekstissa siis esimerkiksi Helmholtz-kehoista ja aaltomuotogeneraattorista tai oskilloskoopista ja magneettianturista koostuvasta kokonaisuudesta. Laitetaso esittää siis muun muassa Helmholtz-kehoita ja aaltomuotogeneraattorin yhtenä magneettikenttiä tuottavana oliona, sekä oskilloskoopin magneettiantureineen kalibrointituloksia tuottavana oliona.

Laitetaso tarjoaa ohjaintasolle ennalta määritettyjä toimintoja, kuten aaltomuodon viritys ja liipaisu huolehtien siitä, että tuotettu aaltomuoto vastaa tavoitetta. Tällä laitetasolla siis mm. käytetään tavoiteaaltomuoto signaaliketjun lävitse ja ladataan tätä vastaavat jänniteaaltomuodot aaltomuotogeneraattorille käyttäen laiteajureita.

5.1.5 Ajuritaso

Ajuritason avulla käännetään instrumenttien SCPI-rajapinnan C# luokkiin metodeiksi ja ominaisuuksiksi. Täten voidaan laitetasolla keskittyä instrumenttien ohjaamiseen, eikä operaatioiden vaatimiin välivaiheisiin ja SCPI-komentojen syntaksiin. Esimerkiksi aaltomuotogeneraattorin ajuritasolle voidaan syöttää jänniteaaltomuoto, jolloin sen ajuritaso huolehtii aaltomuodon lataamisesta annetulle kanavalle. Aaltomuotogeneraattorin ajuritaso ei siis tarvitse tietää piirien ominaisuuksia tai mistä aaltomuoto on lähtöisin, vaan se käsittelee aaltomuotoja ainoastaan jännitteenä. Jänniteaaltomuoto saadaan laitetasolta, joka on ajuritasolle saapuessa laskettu tavoitemagneettikenttäaaltomuodon perusteella. Aaltomuotogeneraattorin ajuritaso huolehtii myös aaltomuotojen välimuistituksesta, joka on esitetty luvussa 5.3.3.

5.2 Käyttöliittymä ja ohjelmiston käyttö

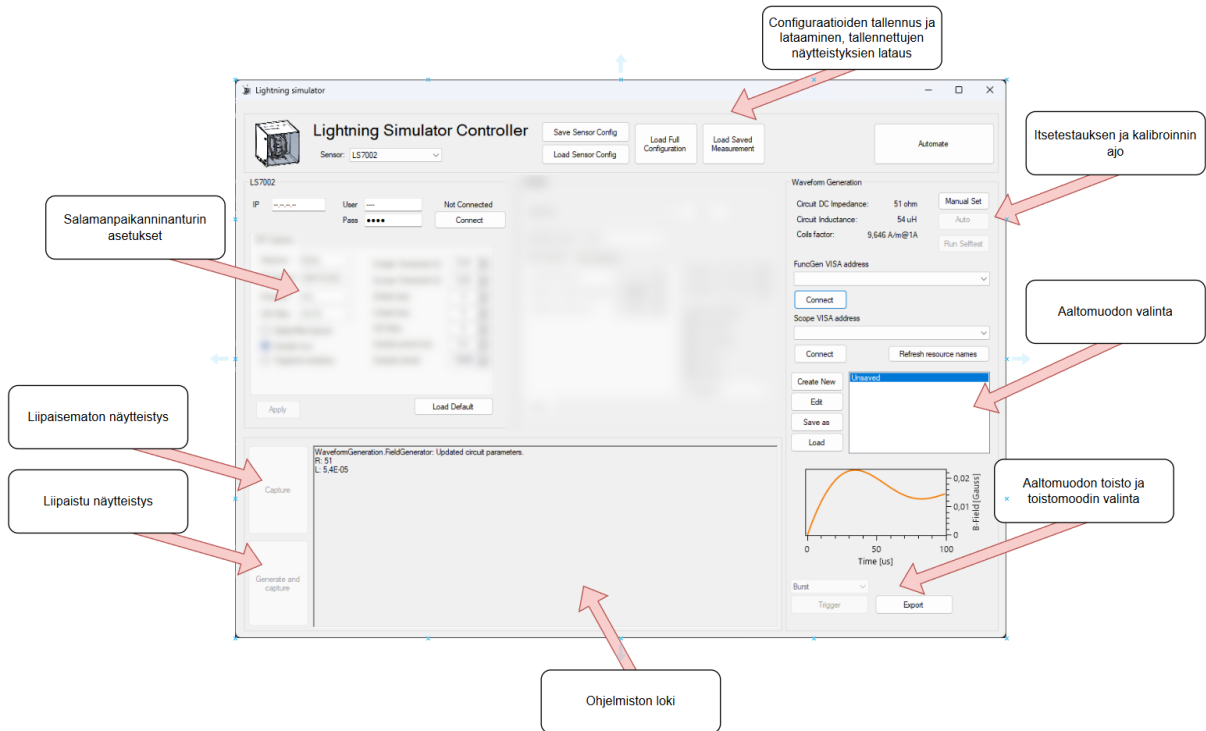
Tässä kappaleessa perehdytään testausaseman ohjelmiston käyttöön. Testausaseman käyttöä käydään läpi lyhyesti käyttäjän näkökulmasta graafiselta käyttöliittymältä.

5.2.1 Pääikkuna

Pääikkuna avautuu testausaseman ohjainohjelmiston käynnistyessä. Pääikkunasta voidaan muun muassa yhdistää laitteet, kuten salamanpaikanninanturi ja aaltomuotogeneraattori, muuttaa salamanpaikanninanturin asetuksia, valita ja toistaa aaltomuotoja, käynnistää

liipaistu ja liipaisematon näytteistys salamanpaikanninturilla ja avata tallennettuja näytteistysksiä. Pääikkuna on esitetty kuvassa 25.

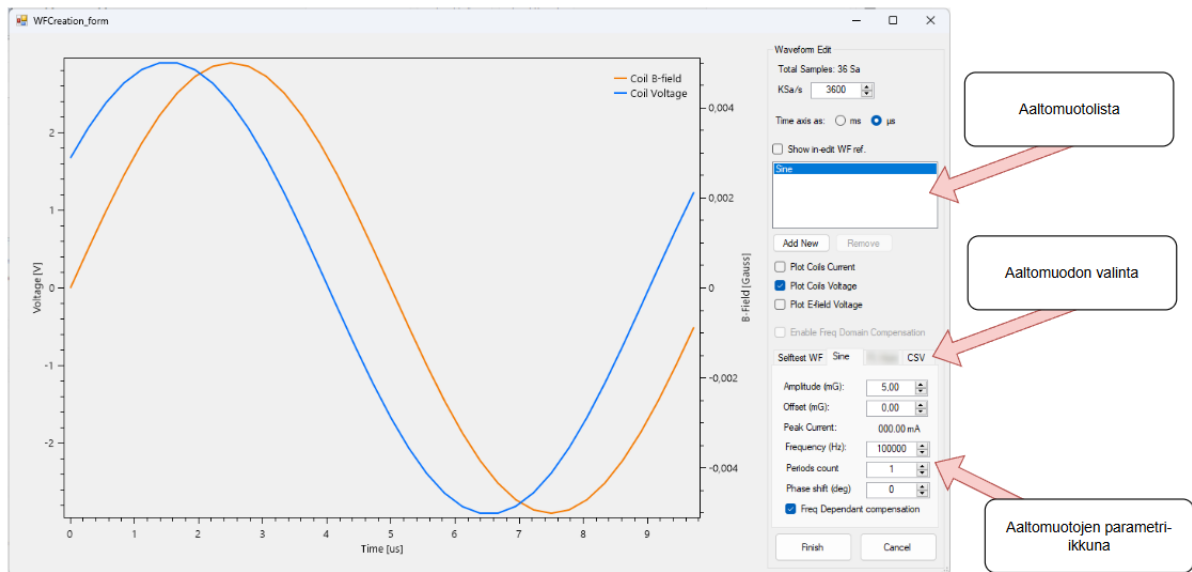
Kuva 25. Pääikkuna.



5.2.2 Aaltomuotojen luominen ja luomisikkuna

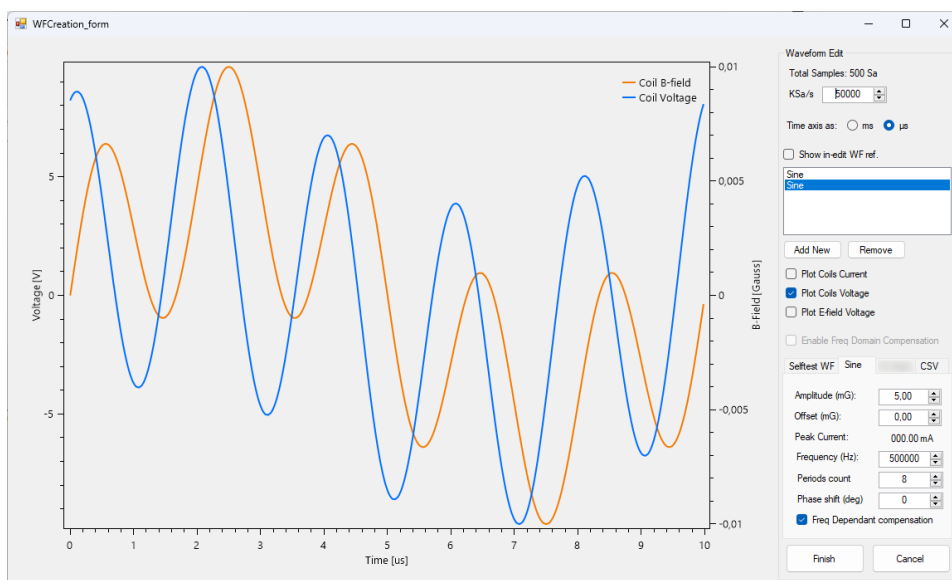
Ennen aaltomuotojen toistamista täytyy aaltomuoto luoda käyttäen aaltomuotojen luomisikkunaa. Aaltomuotojen luomisikkuna avautuu painamalla pääikkunan aaltomuotopaneelista *Create New*. Aaltomuotoikkuna on esitetty kuvassa 26.

Kuva 26. Aaltomuotojen luomisikkuna.



Aaltomuotoikkunassa voidaan valita aaltomuotomalli, jota muokataan annetuilla parametreilla. Aaltomuotoa ja tätä vastaavaa kelojen jänniteaaltomuotoa voidaan tarkastella aaltomuotojen luomisikkunan kuvaajasta. Painamalla *Add New* nykyinen aaltomuoto tallennetaan aaltomuotolistaan, jolloin tämän päälle voidaan summata uusia aaltumuotoja. Kuvassa 27 on aaltomuotojen luomisikkunassa summattu 100 kHz ja 500 kHz siniaalto.

Kuva 27. Aaltomuotoikkuna ja aaltomuotojen summaus.



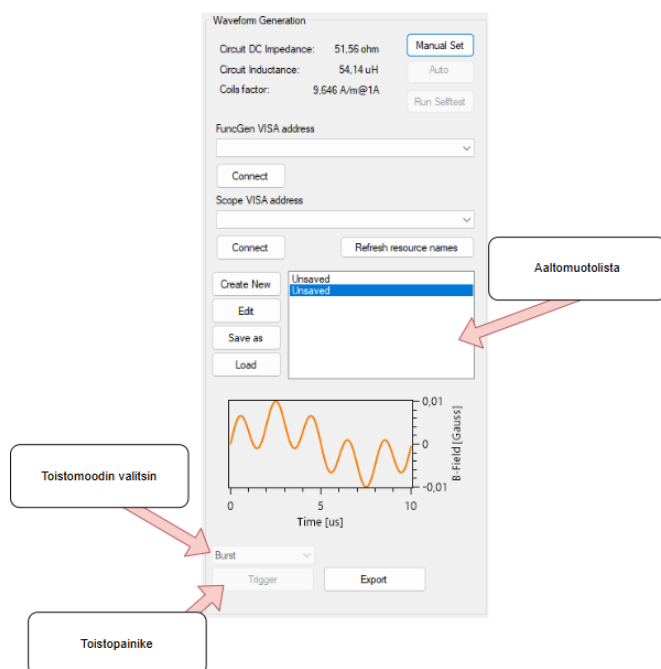
Täysin mielivaltaisia aaltumuotoja voidaan tuoda aaltumuotojen luomisikkunaan valitsemalla aaltomuotomalliksi CSV ja tiputtamalla parametri-ikkunaan CSV-tiedosto. Aaltomuodon

muokkaaminen voidaan lopettaa painamalla luomisikkunan alakulmasta *Finish*, jolloin aaltomuoto tuodaan pääikkunan aaltomuotolistaan.

5.2.3 Aaltomuotojen toistaminen

Kun pääikkunaan on tuotu aaltomuoto, voidaan aaltomuotoa toistaa valitsemalla aaltomuoto pääikkunan aaltomuotopaneelin aaltomuotolistasta. Aaltomuotopaneeli on esitetty kuvassa 28.

Kuva 28. Pääikkunan aaltomuotopaneeli.



Toistomoodin valitsimesta voidaan valita, kuinka aaltomuotoa toistetaan toistopainiketta painettaessa. Toistomodeja on yhteensä kolme, jotka ovat *Burst*, *Repeat*, ja *External Trigger*. Toistomoodit ovat selitettynä alla.

- **Burst:** Toistaa aaltomuodon yhden kerran toistopainiketta painettaessa.
- **Repeat:** Aaltomuoto toistuu jatkuvasti, kunnes käyttäjä pysäyttää toiston toistopainikkeella.
- **External Trigger:** Aaltomuoto toistetaan kerran aaltomuotogeneraattorin *External Trigger*-tulokanavan nousevalla reunalla.

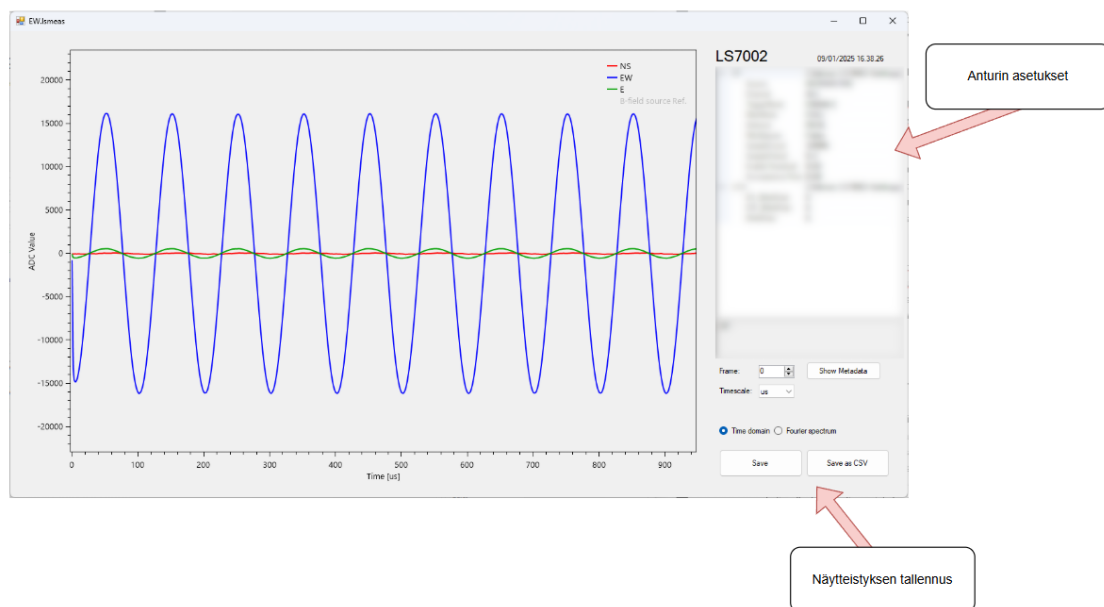
5.2.4 Salamanpaikanninanturilla näytteistäminen

Salamanpaikanninanturilla näytteistys tapahtuu pääikkunan näytteistyspainikkeilla. Näytteistyspainikkeita on kaksi: *Capture* ja *Generate and Capture*. *Generate and Capture*-painiketta painettaessa ladataan aaltomuotogeneraattorille aaltomuotolistasta valittu aaltomuoto, aloitetaan salamanpaikanninanturilla liipaistu näytteistys ja toistetaan aaltomuoto kerran. *Generate and Capture*lla saadaan lyhytkin aaltomuoto kokonaisuudessaan näytteistettyä salamanpaikanninanturilla. *Capture*-painikkeella aloitetaan vain salamanpaikanninanturilla näytteistys, riippumatta muiden testausaseman laitteiden tilasta. *Capture*lla voidaan siis näytteistää salama-anturilla ilman kokonaista testausasemaakin.

Näytteistyksen päättyessä avautuu näytteistystulosikkuna ponnahtaen.

Näytteistystulosikkunassa on kuvaajan avulla esitetty suoritettu näytteistys, josta voidaan tarkastella eri kanavien mittaustuloksia. Näytteistyksen aikana voimassa olevat anturin asetukset näkyvät näytteistysikkunan oikeassa laidassa. Näytteistystulosikkunasta voidaan näytteistystulos tallentaa testausaseman tukemassa muodossa *Save*-painikkeesta tai tallentaa näytteistys CSV-muodossa painamalla *Save as CSV*. Näytteistystulosikkuna on esitetty kuvassa 29.

Kuva 29. Näytteistystulosikkuna.

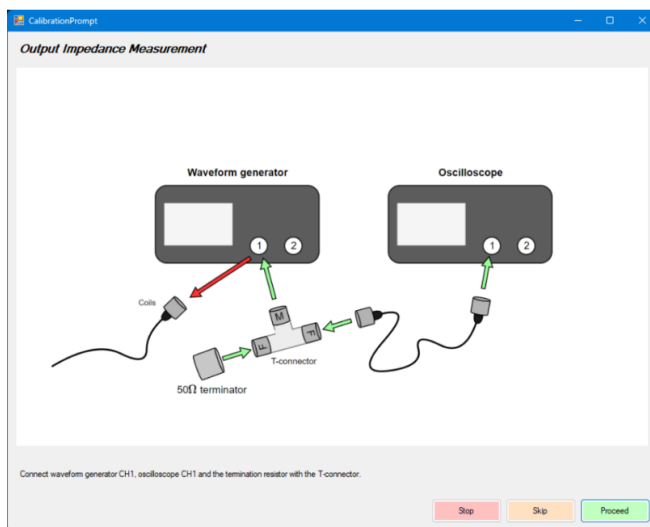


5.2.5 Kalibrointi

Testausaseman kalibrointi aloitetaan pääikkunan aaltomuotopaneelista painamalla *Auto Calibrate*. Tämän jälkeen kalibrointi käydään ponnausikkunoilla käyttäjää ohjeistaen läpi. Ennen jokaista kalibrointivaiheen ajamista, käyttäjää ohjeistetaan sanallisesti ja kuvin tekemään tarvittavat kalibrointikytkennät. Jokaisessa kalibrointiponnausikkunassa on kolme painiketta, jotka ovat *Stop*, *Skip* ja *Proceed*. *Stop*-painikkeella voidaan kalibrointi pysäyttää palaten kalibrointia edeltäviin arvoihin. *Skip*-painikkeella ohitetaan tämän kalibrointivaiheen suorittaminen ja käytetään tälle vaiheelle tuloksena kalibrointia edeltävää vastaavan kalibrointivaiheen arvoa. *Proceed*-painikkeella käyttäjä vahvistaa tehneensä ohjeistetut kytkennät ja siirtyään kalibrointivaiheen suorittamiseen. Kalibrointivaiheiden ponnausikkunat ovat esitettynä alla.

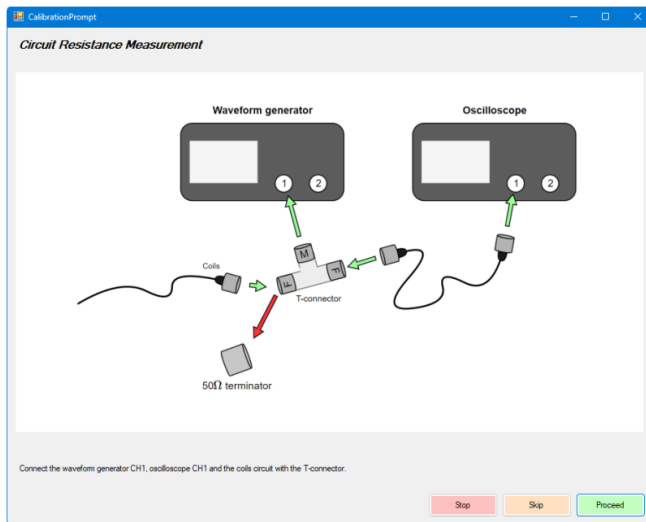
1. Lähtöimpedanssin mittauksen ponnausikkuna (Kuva 30)

Kuva 30. Lähtöimpedanssimittauksen ohjeikkuna



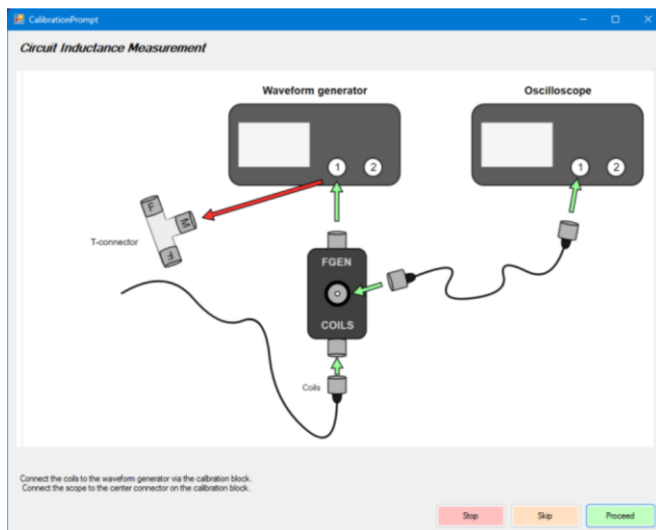
2. Kelojen piirin vastusmittaus (Kuva 31)

Kuva 31. Kelojen piirin vastusmittauksen ohjeikkuna.



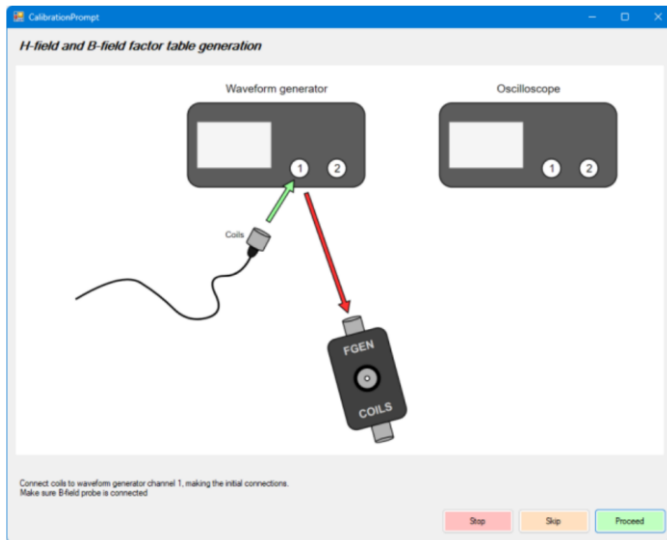
3. Kelojen piirin induktanssimittaus (Kuva 32)

Kuva 32. Kelojen piirin induktanssimittauksen ohjeikkuna.



4. Kelojen H- ja B-kentän muunnostaulukon luonti. (Kuva 33)

Kuva 33. Kelojen H- ja B-kentän munnostaulukon luonnin ohjeikkuna.



5.3 Aaltomuotogeneraattorin aaltomuotojen tietomuoto ja välimuistitus

Tässä kappaleessa perehdytään siihen, miten aaltomuotogeneraattorille ladataan ja miten sille esitetään haluttu aaltomuoto ja kuinka niiden tallennus onnistuu aaltomuotogeneraattorin tukemassa muodossa. Kappaleessa oivalletaan aaltomuotogeneraattorivalinnan asettamia rajoituksia ja kuinka näitä rajoituksia onnistuttiin kiertämään. Kappaleessa käsitellyt ohjelmointia vaativat ominaisuudet ovat toteutettu ohjelmistossa aaltomuotogeneraattorin ajuritasolla, jossa aaltumuotoja käsitellään jännitteinä ja aaltomuotogeneraattorille annettavina näytteinä.

5.3.1 Aaltomuotojen tietomuoto

Aaltomuotogeneraattori käsittelee aaltumuotoja näytteinä, jotka koostuvat 16 bittisistä etumerkillisistä kokonaisluvuista, jolloin yhden näytteen suurin mahdollinen luku desimaalimuodossa on 32767 ja pienin -32768. Näytteiden arvo ei suoran vastaa jännitettä, vaan näytteen arvoa vastaava jännite skaalautuu aaltomuotogeneraattoriin asetetun jänniteasetuksien perusteella.

Annettu jänniteaaltomuoto täytyy siis muuntaa 16 bittiseksi etumerkilliseksi kokonaisluvuiksi ja aaltomuotogeneraattorin kanavalle asetettavaksi jänniteasetukseksi. Jänniteaaltomuodon jännitenäytteen muunto aaltomuotogeneraattorille annettaviksi näytteeksi tapahtuu kuten esitetty kaavassa 25.

Kaava 25. Aaltomuotogeneraattorin näyte jännitenäytteen funktiona.

$$DAC_{näyte}(U) = \frac{U}{U_{max} 2^{15} - 1}$$

, jossa U_{max} on annetun jänniteaaltomuodon näytteiden suurin itseisarvoinen poikkeama nolasta.

Näytteet annetaan aaltomuotogeneraattorille ASCII muodossa SCPI-rajapinnan kautta. Aaltomuotogeneraattorille asetetaan näytetaajuudeksi sama näytetaajuus kuin annetulla jänniteaaltomuodolla.

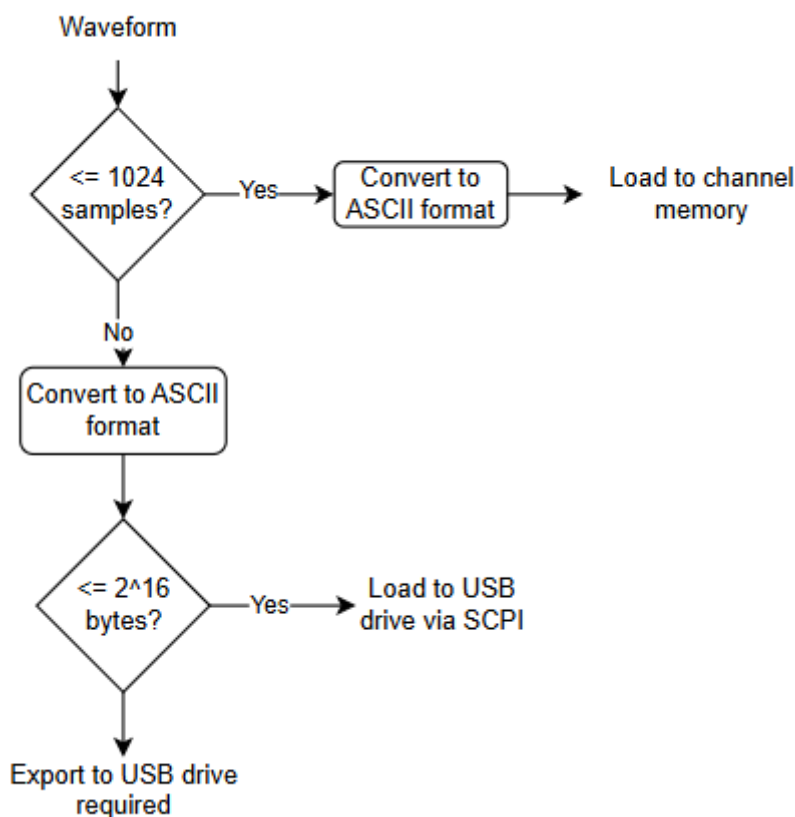
5.3.2 Aaltomuotogeneraattorin muisti ja aaltomuotojen lataushierarkia

EDU33212A-aaltomuotogeneraattorilla aaltomuotojen toistaminen tapahtuu siten, että kanavan muistiin ladattu aaltomuoto valitaan aktiiviseksi, jonka jälkeen se voidaan toistaa annetuilla parametreilla ja asetuksilla. Kanavien muistiin voidaan kirjoittaa aaltomuoto näytteistä koostuvana, pilkuin erotettuna merkkijonona suoraan SCPI-rajapinnan kautta, tai vaihtoehtoisesti ladata aaltomuoto etupaneelin muistitikulta .arb tiedostosta, jossa näytteet ovat merkkijonoina rivinvaihdoin erotettuna.

Suoraan kanavan muistiin kirjoitus on hyvin nopeaa, mutta mahdollista vain, jos aaltomuoto koostuu enintään 1024 näytteestä. Jos aaltomuoto koostuu enemmän kuin 1024 näytteestä, sitä ei voi ladata SCPI-rajapinnan kautta suoraan kanavan muistiin. Tämä rajoitus voidaan kuitenkin kiertää tallentamalla aaltomuodon näytteet aaltomuotogeneraattorin etupaneeliin kytketylle USB-muistitikulle tiedostona. Aaltomuoto voidaan tämän jälkeen ladata kanavan muistiin USB-muistitikulle tallennetusta tiedostosta. Aaltomuotogeneraattorin etupaneeliin kytketyltä USB-muistitikulta aaltomuotojen lataaminen kanavan muistiin on kuitenkin hidasta ja voi viedä jopa kymmeniä sekunteja. Aaltomuotogeneraattorin SCPI-rajapinnan rajoituksena on kuitenkin se, ettei sen kautta ole mahdollista ladata USB-muistitikulle tiedostoa, jonka pituus ylittää 2^{16} eli 32768 tavua. Suuren näytemäärän aaltomuodot joudutaan siis kirjoittamaan muistitikulle testiohjelmaa ajavan PC:n omasta USB-portista.

Aaltomuodon näytteiden lukumäärän tai sen ASCII-muunnoksen jälkeisen merkkijonon pituuden perusteella tulee siis valita nopein ja käyttäjän näkökulmasta vaivattomin tapa ladata aaltomuoto kanavan muistiin. Näin tavoille ladata aaltomuoto aaltomuotogeneraattorin kanavien muistiin syntyy hierarkia, joka on esitetty lohkokaaaviona kuvassa 34.

Kuva 34. Aaltomuotojen lataushierarkia.



5.3.3 Aaltomuotojen välimuistitus

Aaltomuotojen lataus aaltomuotogeneraattorin kanavien muistiin voi viedä hyvinkin paljon aikaa tapauksissa, joissa aaltomuoto tulee kirjoittaa ensin SCPI-rajapinnan kautta aaltomuotogeneraattorin USB-muistitikulle tai jos tiedostomuotoinen aaltomuoto on aaltomuotogeneraattorin SCPI-rajapinnalle liian suuri ja se joudutaan kirjoittamaan muistitikulle PC:n omasta USB-portista. Kun samaa aaltomuotoa tai aiemmin toistettua aaltomuotoa halutaan toistaa uudestaan, tulee siis välttää sitä, että lataamme aaltomuodon kokonaisuudessaan uudelleen aaltomuotogeneraattorille.

Halutaan siis tunnistaa aaltomuodon jo olevan aktiivisena kanavalla, jo ladattuna kanavan muistiin tai löytyvän tiedostona aaltomuotogeneraattorin kanavan muistista. Jos käyttäjältä on vaadittu aaltomuodon lataus USB-tikulle käyttäen testiaseman ohjainohjelmistoa ajavan PC:n omaa USB-porttia, tarvitsemme tähän samaista keinoa tunnistaa kyseisen

aaltomuodon tiedoston olemassaolo aaltomuotogeneraattorin etupaneeliin liitettyllä USB-muistitikulla.

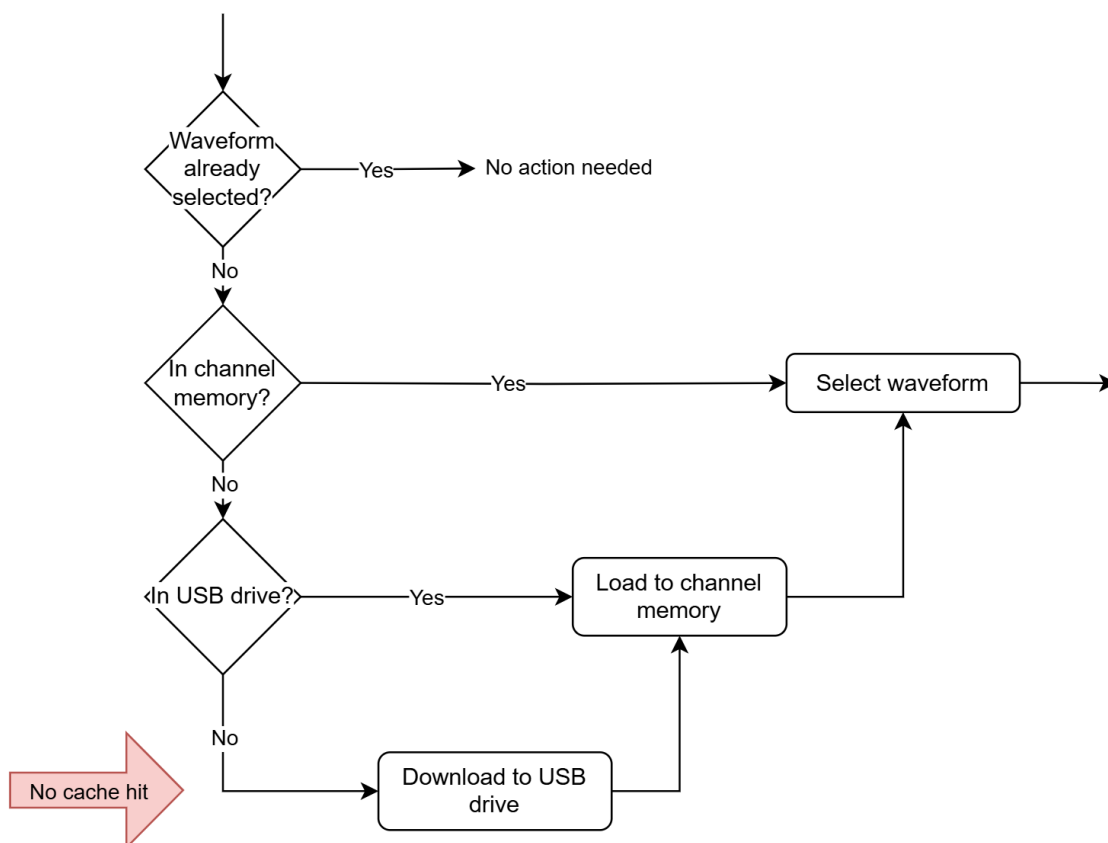
Aaltomuotogeneraattorin kanavien muistiin ja USB-muistitikulle kirjoitetuille aaltomuodoille voidaan antaa nimi, joka halutaan nyt vastaavan sen sisältämiä näytteitä. Aaltomuodon nimeäminen täytyy tehdä siten, että voidaan myöhemmin aaltomuotoa ladatessa ensin tarkistaa, jos identtinen aaltomuoto löytyykin jo esimerkiksi kanavan muistista tai USB-muistitikulta.

Aaltomuotojen tunnistusta varten aaltomuotogeneraattorille annettavien näytteiden perusteella luodaan MD5-hajautusalgoritmilla yksilöllinen tunniste, jonka tuloksena syntyy 16-tavuinen tiiviste. Aaltomuotogeneraattorin kanavien muistiin ladatuille aaltomuodoille voidaan kuitenkin antaa korkeintaan 12 merkkiä pitkä nimi, eikä se saa sisältää lainkaan numeroita. Aaltomuotojen nimeäminen toteutettiin MD5-tiivisteeseen 6 ensimmäisen tavun aakkoskoodauksena, jolloin tiivisteeseen puolikkaan tavun desimaaliarvo 0 vastaa merkkiä a, arvo 1 merkkiä b ja niin edelleen.

Näin voidaan ennen aaltomuodon latausta aaltomuotogeneraattorille tarkistaa, löytyykö näytteiden MD5-tiivisteeseen aakkoskoodausta vastaava aaltomuoto jo aaltomuotogeneraattorilta pyytämällä tältä kaikki kanavien muistiin ladattujen ja USB-muistitikulle tallennettujen aaltomuotojen nimet.

Aaltomuodon etsiminen alkaa tarkastamalla aktiivisen aaltomuodon nimi. Jos vastaava aaltomuoto löytyy jo aktiivisena/valittuna tavoitellulta kanavalta, voidaan aaltomuodon lataus keskeyttää. Jos aaltomuoto ei ole valittuna, mutta löytyy kanavan muistista, voidaan se valita aktiiviseksi ilman latausta. Jos aaltomuotoa ei löydy kanavan muistista, kysytään aaltomuotogeneraattorilta USB-muistitikulla olevien tiedostojen nimet. Jos USB-muistitikultakaan ei löydy vastaavaa aaltomuotoa, välimuistiosumaa ei tapahtunut ja siirrytään lataamaan aaltomuoto kappaleessa 5.3.2 mainitulla tavalla. Välimuistin tarkastus ja sen mukaiset operaatiot on esitetty lohkoaviona kuvassa 35.

Kuva 35. Aaltomuotojen välimuistitus.



6 Testausaseman suorituskyky

Testausaseman suorituskykyä tarkasteltiin kahdesta eri näkökulmasta: testausasemalla suoritettujen mittausten toistettavuus ja sen luomien ilmiöiden tarkkuus. Tässä kappaleessa käydään läpi, miten testausaseman suorituskykyä verifioitiin.

6.1 Tuotetun magneettikentän verifiointi

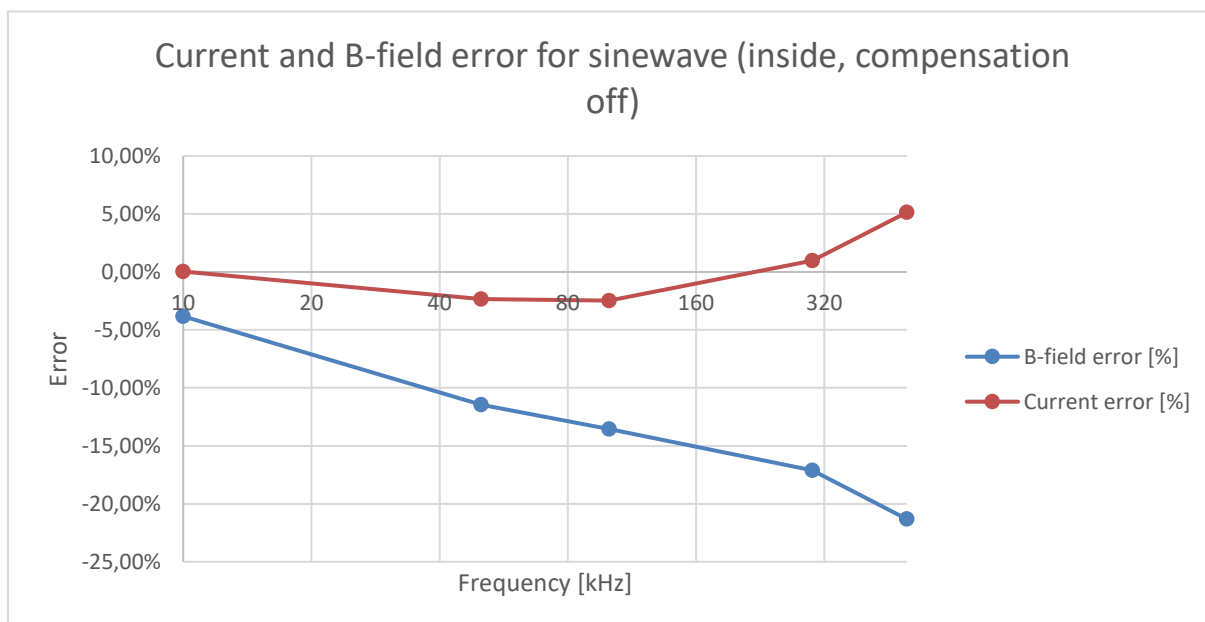
Testausaseman verifiointimittauksissa mittapäätteenä toimi Keysight DSOS054A oskilloskooppi, jolla mitattiin tähän liitetyn Keysight N7026A -virtaprobein avulla kelojen piiriin virtaa. Magneettikentän amplitudia mitattiin samaiseen oskilloskooppiin kytketyllä testausaseman omalla MC162 magneettikenttäanturilla. Suorituskykymittalaitteet olivat kalibroituja ja näiden kalibrointitodistukset voimassa mittahetkellä. Näin varmistettiin mittausten luotettavuus ja jäljitettävyys kansallisiin mittanormaalijärjestelmiin.

MC162-magneettikenttäanturille on määritetty jännitevaste sinimuotoisen magneettikentän amplitudiin valmistajan määrittämässä kalibrointipisteissä. Kalibrointitodistuksessa on

ilmoitettu taulukko, jossa annetuille kalibrointipisteelle on määritetty magneettikentän taajuus ja magneettianturilta mitatun jänniteamplitudin arvo magneettivuon tiheyden yksikköä kohden. Magneettianturilla voidaan siis mitata vain sinimuotoista magneettikenttää. Siniaaltomuotoisia magneettikenttiä toistettaessa, aaltomuotoa käsitellään signaaliketjussa täysin mielivaltaisena, joten voidaan sinimuotoisella aaltomuodolla todeta tarkkuus myös mielivaltaisille aaltomuodoille, kun sinimuotoisen aaltomuodon taajuuskompensointi on asetettu pois päältä.

Alla kuvassa 36 on esitetty kuvaajan avulla mitatun B-kentän ja virran amplitudin virhe taajuuden funktiona.

Kuva 36. Magneettikentän ja virran virhe.

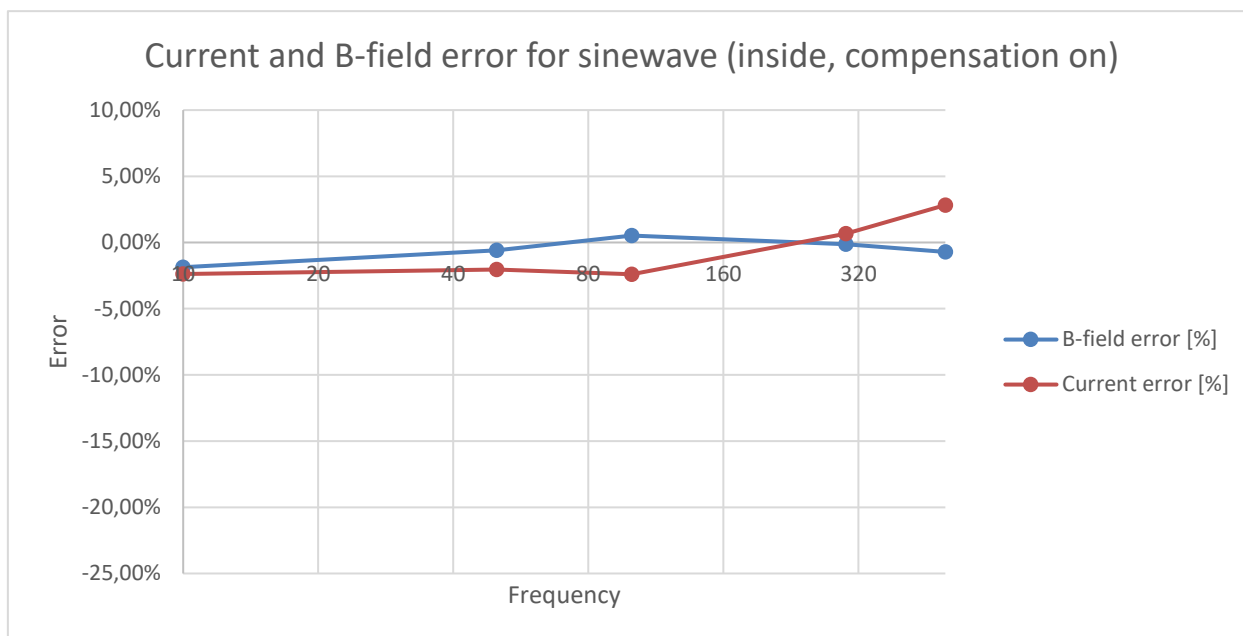


Huomataan esitetyistä mittauksista virran virheen pysyvän maltillisena, mutta kasvaessa korkeammilla taajuuksilla. Korkeilla taajuuksilla kelojen loiskapanssi alkaa vaikuttaa merkittävästi kelojen piirin läpi näennäisesti kulkevaan virtaan. Loiskapanssin aiheuttama virran kasvu ei tuota magneettikenttää, koska virta ei kulje käämin silmukoiden läpi vaan kytkeytyy silmukoiden välisen kapasitiivisen vuodon kautta. Signaaliketju on rakennettu toimimaan puhdasta RL-piiriä vastaten, joka ei ota huomioon piirin kapasitanssia.

Pääasiallinen B-kentän virhe taajuuskompensoitomalle aaltomuodolle aiheutuu kuitenkin kammion rakenne- ja suojausmateriaalien aiheuttamista magneettikentän häviöistä ja epävarmuuksista, kuten esitetty kappaleessa 4.5. Mielivaltaisia aaltomuotoja toistettaessa voidaan testausaseman epätarkkuutena pitää taajuuskompensoitomalle aaltomuodolle tehtyjä mittauksia, jotka riippuvat aaltomuodon muutosnopeudesta.

Alla kuvassa 37 on esitetty mittaus toistettuna, kun toistetun siniaallon taajuuskompensointi on kytketty päälle.

Kuva 37. Virran ja magneettikentän virhe, taajuuskompensoitu.



Huomataan kompensoidun siniaallon mittauksesta, että virran virhe pysyy suurimmilta osin samana, kuin kompensoimattomassa mittauksessa, mutta B-kentän virhe on mitätön. Tulee kuitenkin huomauttaa, että taajuuskompensoinnin korjauskerrointaulukko on määritetty samalla magneettikenttäanturilla, kuin verifiointimittauksessa on käytetty, vaikkakin anturin jänniteamplitudia mittaava oskilloskooppi on eri. Magneettikentän epävarmuuteen voidaan määrittää lisättäväksi magneettikenttäanturin epävarmuus.

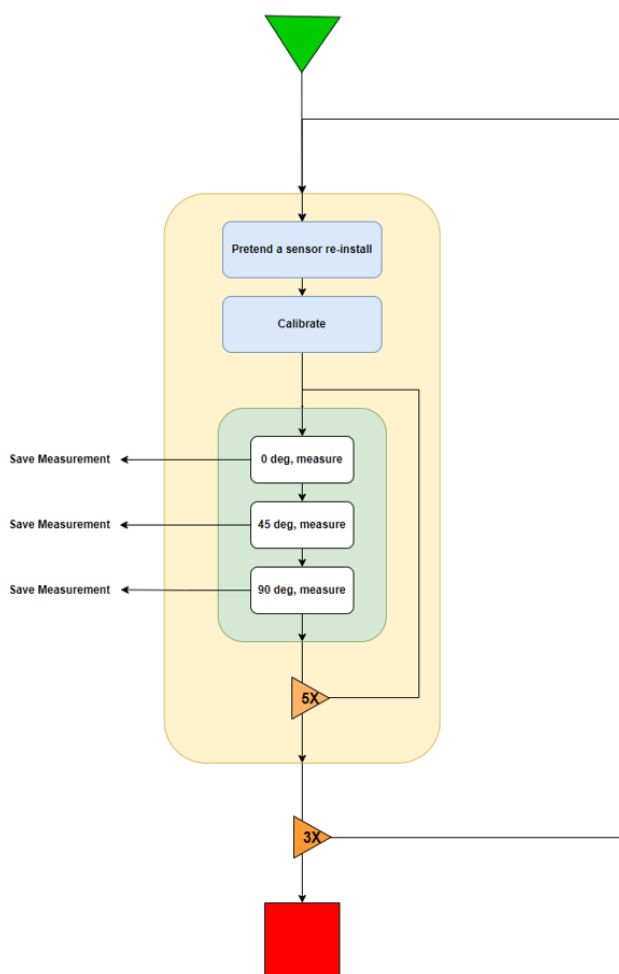
6.2 Mittausten toistettavuus

Testausasemalla suoritettavien mittausten toistettavuus on keskeinen tekijä testausaseman suorituskyvyn arvioinnissa, sillä ilman toistettavia mittauksia esimerkiksi anturien keskinäisten eroavaisuuksien luotettava määrittely ei ole mahdollista. Toistettavuuteen vaikuttavat sekä käyttäjälähtöiset epävarmuudet (esim. anturin asento ja kiertosäätimen asetukset) että testausaseman tekninen luotettavuus, kuten kalibroinnin tarkkuus ja magneettikentän varma muodostus.

Toistettavuutta mitattiin kahdella käyttäjällä, eli operaattorilla. Operaattorien tehtävänä oli suorittaa täsmälleen samat mittaukset, käyttäen samaa LS7002-salamanpaikanninanturia. Toistettavuustestin magneettikentän aaltomuotona toimi 10 kHz 1 mG siniaalto. Operaattorit

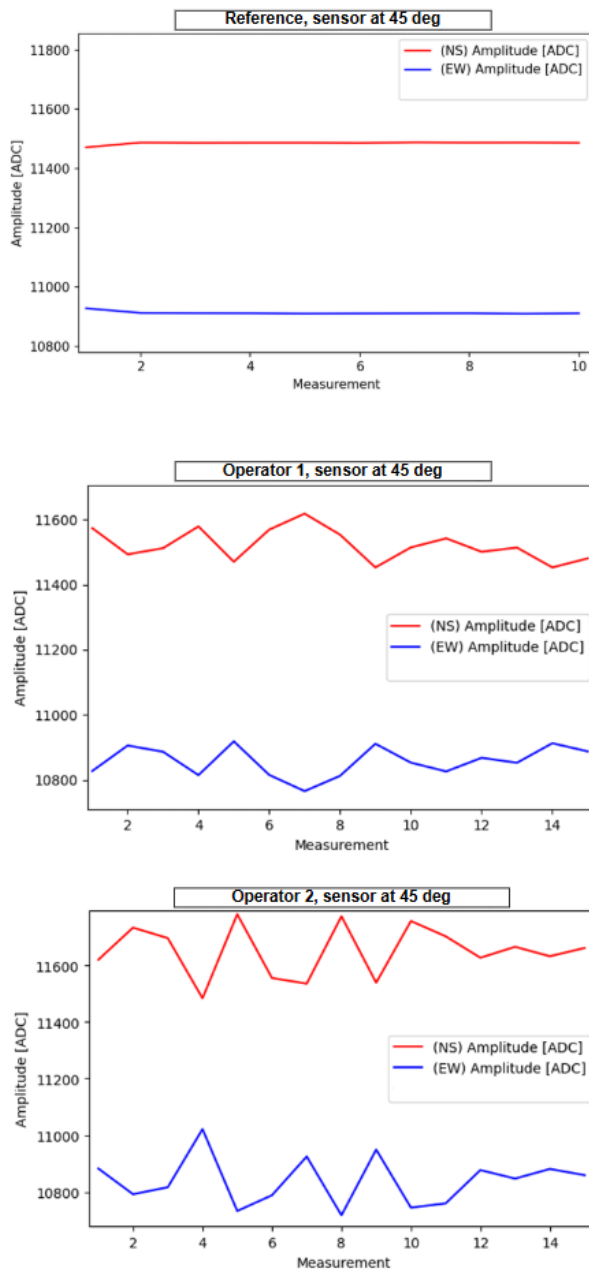
suorittivat mittauksia eri asennoissa säätäen anturin asentoa kiersäätimellä. Toistettavuustestin aikana operaattorit simuloivat anturin uudelleenasennusta testausasemaan, jotta testausaseman mekaaninen väljyys ja asennustavasta aiheutuvien tekijöiden vaikutus mittaustuloksiin tulisivat ilmi. Toistettavuustestiin kuului myös kolme kalibrointia, jotka suoritettiin tasavälein testin aikana. Toistettavuustestin proseduuri on esitetty lohkokaaviona alla kuvassa 38.

Kuva 38. Toistettavuustestin proseduurin lohkokaavio.



Toistettavuustestin mittarina käytettiin niitä mittauksia, jossa anturi on asetettu 45 asteen kulmaan. 45 asteen kulman mittaukset ovat toistettavuuden kannalta kriittisiä, sillä tässä anturin asennossa anturin kulman muutos tuo suurimman vaikutuksen anturilla mitattuun amplitudiin. Toistettavuustestiä varten suoritettiin referenssinä 10 mittausta peräjäälkeen 45 asteen kulmassa anturia kääntämättä, jolla todennettiin anturin soveltuvan toistettavuustestiin. Referenssimittauksen tuloksena todettiin mitatun amplitudin pysyvän muuttumattomana, joten voitiin tällä edetä toistettavuustestiin. Alla kuvassa 39 on esitetty toistettavuustestin tulokset referenssimittauksineen.

Kuva 39. Toistettavuustestin tulokset.



Operaattorien suorittamien mittausten NS kanavan amplitudien keskiarvojen eroksi saatiin 1,11 %. Keskiahajonta operaattorin 1 suorittamilla mittauksilla oli NS kanavalle 49.5 ADC (0.43 %) ja operaattorin 2 92.28 ADC (0.79 %). Voidaan mittaustuloksista myös huomata, että joka viiden mittauksen jälkeen tehdyn anturin uudelleenasetus ja testausaseman kalibrointi ei erotu mittaustuloksista. Voidaan siis todeta testausasemalla tehtyjen mittausten olevan erinomaisen toistettavia.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli kehittää Vaisalan salamanpaikanninanturien tuotekehitykselle annetun laitteiston pohjalta testausasema, jolla voidaan suorittaa antureilla toiminnallisia testejä, sekä määrittää näiden suorituskykyä toimitiloissa. Testausasemalla tulisi voida toistaa anturin oikeassa toimintaympäristössä mitattavia suureita ja ilmiöitä.

Minulla oli entuudestaan jonkun verran kokemusta C#-ohjelmoinnista, mutta instrumenttien ohjauksesta ja SCPI rajapinnoista ei lainkaan. Opin siis työtä tehdessä paljon mm. instrumenttien ohjelmallisesta käytöstä. Työtä tehdessä pääsin perehtymään syvällisemmin myös sähkö- ja magneettikenttien teoriaan, joka toimi koko työn perustana.

Suurien muutosnopeuksien omaavien mielivaltaisten aaltomuotojen toistotarkkuus jäi suhteellisen epätarkaksi kammion materiaalien vaikutuksesta. Ongelman korjaaminen saattaa vaatia merkittäviä muutoksia kammion rakenteeseen tai edellyttää syvällisempää tutkimusta suojausmateriaalien vaikutuksesta magneettikenttään. Koko järjestelmä toimii kuitenkin vankkana pohjana jatkokehitykselle.

Testausasema on saanut käyttöönoton jälkeen hyvää palautetta mm. ohjelmiston käyttäjäystävällisyydestä ja toimii nyt merkittävänä osana Vaisalan salamanpaikanninanturien tuotekehitysprosessia. Testausaseman ohjainohjelmisto on tänä päivänä siirtynyt tuotekehitystiimin ylläpidettäväksi ja jatkokehittäväksi. Ohjelmiston ylläpidon siirto onnistui helposti, joka kertoo onnistumisesta ohjainohjelmiston koodin luettavuuden ja rakenteen kannalta.

Työ oli kokonaisuutena erittäin positiivinen ja opettavainen kokemus, jonka aikana syvensin osaamistani erityisesti ohjelmoinnissa, sähkömagnetismin ilmiöissä sekä mittalaitteiden ja instrumentoinnin käytössä. Työ tarjosi konkreettisia haasteita ja käytännönläheistä oppimista, jotka vahvistivat teknistä ajattelua ja ongelmanratkaisutaitoja. Kokemus tukee vahvasti ammatillista kehittymistäni ja antaa hyvän pohjan tuleville haasteille.

Lähteet

- Biral. (n.d.). *The Importance of Lightning Strike Detection and How It Works*
<https://www.biral.com/the-importance-of-lightning-strike-detection-and-how-it-works/>
- Cesidio Bianchi, A. M. (2007). *Natural and man-made terrestrial electromagnetic noise: an outlook*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Dexin Mag. (n.d.). *Introduction To The Principle And Application Of Helmholtz Coils*.
<https://www.xmdexing.cn/index/knowledge/knowledgedetails/id/98>
- Hanks, A. (2024). *Right Hand Rule* [kuva]. <https://www.pasco.com/resources/articles/right-hand-rule?srsId=AfmBOorLboUePisK-8dL29Ln4C4-zW2fMUyQtTQnVJHQ3YF31ZItBslH>
- Herres, D. (2022). *The magnetic field lines of a Helmholtz coil setup* [kuva].
<https://www.testandmeasurementtips.com/whats-all-this-helmholtz-coil-stuff-faq/>
- Insurance Information Institute. (2023). *Facts + Statistics: Lightning*. <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-lightning>
- Martin, R. D., Neary, E., Rinaldo, J., & Woodman, O. (n.d.-a). 22.3: *Ampere's Law*.
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Introductory_Physics_-_Building_Models_to_Describe_Our_World_\(Martin_Neary_Rinaldo_and_Woodman\)/22%3A_Source_of_Magnetic_Field/22.03%3A_Amperes_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Introductory_Physics_-_Building_Models_to_Describe_Our_World_(Martin_Neary_Rinaldo_and_Woodman)/22%3A_Source_of_Magnetic_Field/22.03%3A_Amperes_Law)
- Martin, R. D., Neary, E., Rinaldo, J., & Woodman, O. (n.d.-b). 22.1: *The Biot-Savart Law*.
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Introductory_Physics_-_Building_Models_to_Describe_Our_World_\(Martin_Neary_Rinaldo_and_Woodman\)/22%3A_Source_of_Magnetic_Field/22.01%3A_The_Biot-Savart_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Introductory_Physics_-_Building_Models_to_Describe_Our_World_(Martin_Neary_Rinaldo_and_Woodman)/22%3A_Source_of_Magnetic_Field/22.01%3A_The_Biot-Savart_Law)
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *How Lightning is Created*.
<https://www.noaa.gov/jetstream/lightning/how-lightning-is-created>
- Tatum, J. (n.d.). 6.4: *The Biot-Savart Law*.
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electricity_and_Magnetism_\(Tatum\)/06%3A_The_Magnetic_Effect_of_an_Electric_Current/6.04%3A_The_Biot-Savart_Law](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Electricity_and_Magnetism/Electricity_and_Magnetism_(Tatum)/06%3A_The_Magnetic_Effect_of_an_Electric_Current/6.04%3A_The_Biot-Savart_Law)
- Vaisala Oyj. (n.d.). *Advanced Lightning Sensor LS7002* [kuva].
<https://www.vaisala.com/en/products/advanced-lightning-sensor-ls7002>
- Vaisala Oyj. (n.d.). *Tietoa meistä*. <https://www.vaisala.com/fi/vaisala-company>

Vaisala Oyj. (2002). *Global Atmospherics Inc. joins Vaisala.*

https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VN59_Global_Atmospherics_Inc_joins_Vaisala.pdf

Wikimedia Commons. (2006). Right Hand Rule

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Right_hand_rule.png

Zurek, S. (2023). *Helmholtz coil* [kuva]. [https://www.e-](https://www.e-magnetica.pl/doku.php/file/helmholtz_coils_magnetica_png)

[magnetica.pl/doku.php/file/helmholtz_coils_magnetica_png](https://www.e-magnetica.pl/doku.php/file/helmholtz_coils_magnetica_png)

Zurek, S. (2023a). *Magnetic Field*. https://e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_field

Zurek, S. (2023b). *E-magnetica. Magnetic permeability*. [https://e-](https://e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_permeability)

[magnetica.pl/doku.php/magnetic_permeability](https://e-magnetica.pl/doku.php/magnetic_permeability)