

Niko Kotsalo

# TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien kalibrointi ja impedanssikäyrien mittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikka

Opinnäytetyö

13.5.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Niko Kotsalo TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien kalibrointi ja impedanssikäyrien mittaukset 43 sivua + 5 liitettä 13.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Ohjaajat	EUR. ING. Heikki Svanström yliopettaja Matti Fischer
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena parantaa Murata Electronics Oy:n EMC-laboratorion säteilevien häiriöiden immunitettimittauksissa käytettävien TEM- ja GTEM-kammioiden kentänvoimakkuuksien säätöä. Kentänvoimakkuuden säätöä oli tarkoitus parantaa siten, että mahdollinen 6 dB:n vaihtelu TEM- ja GTEM-kammioiden kentänvoimakkuuksissa taajuusalueen yli saadaan lähes merkityksettömäksi ja vältetään mitattavien tuotteiden mahdollinen ylitestaus.</p> <p>Työssä valmistettiin TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittauksia ja kalibrointia varten IEC 62132 - 2 -standardin ohjeiden mukaisesti monopoli- ja loop-antenni. Antennit mitattiin ja niiden mittaustuloksia tulkittiin standardin ohjeiden mukaisesti.</p> <p>Valmistetuilla antenneilla mitattiin TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet taajuusalueella 1 MHz - 1 GHz. TEM- ja GTEM-kammioiden ominaisimpedanssikäyrät mitattiin piirianalysointilaitteella taajuusalueella 300 kHz - 2 GHz.</p> <p>Insinööriyön aikataulun sisällä ei ehditty kehittämään tarvittavaa testausohjelmaa TEM- ja GTEM-kammioiden kalibrointikäyrän toteutusta ja testausta varten. Kalibrointia varten tarvittavat mittaustulokset ehdittiin mitata ja antennit ehdittiin valmistaa aikataulun mukaisesti.</p>	
Avainsanat	TEM-kammio, GTEM-kammio, EMC, kalibrointi, ominaisimpedanssi

Author Title Number of Pages Date	Niko Kotsalo Electric And Magnetic Field Strength Calibration And Characteristic Impedance Measurement of TEM- and GTEM-Cells 43 pages + 5 appendices 13 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructors	Heikki Svanström, EUR. ING. Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The objective of this thesis was to improve radiated susceptibility EMC testing of TEM- and GTEM-cells in Murata Electronics Oy EMC laboratory, to adjust the electric and magnetic field strengths that are formed inside TEM- and GTEM-cells. The adjustment of the field strengths are intended to disprove the potential 6 dB variation in field strength over the test frequency range in the cells should be rendered almost meaningless. In this way it is possible to avoid over testing.</p> <p>In this thesis a monopole antenna and a loop antenna were built according to the instructions given in IEC 62132 - 2 standard for the electric and magnetic field strength characterization in the TEM- and GTEM-cell. The antennas were measured and the results were considered almost identical within the standard parameters. Antennas were used in field strength characterization measurements of the TEM- and GTEM-cells from one megahertz up to one gigahertz. Characteristic impedance of the cells was measured from three hundred kilohertz to two gigahertz.</p> <p>Although all the required measurements and antennas were ready within the predetermined schedule there was no time to perform the electric and magnetic field strength calibration tests for TEM- and GTEM-cells due to the absence of the testing program.</p>	
Keywords	TEM-cell, GTEM-cell, EMC, Calibration, Characteristic impedance

# Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	2
2.1	Häiriölähteet	2
2.1.1	Luonnolliset häiriöt	3
2.1.2	Keinotekoiset häiriöt	4
2.2	Häiriöiden kytkeytyminen	4
2.2.1	Johtumalla kytkeytyminen	5
2.2.2	Kapasitiivinen kytkeytyminen	6
2.2.3	Induktiivinen kytkeytyminen	7
2.2.4	Säteilemällä tapahtuva kytkeytymien	9
2.3	Säteilevien häiriöiden EMC-mittaukset	11
3	Kalibrointimittalaitteisto	13
3.1	TEM-kammio	13
3.2	GTEM-kammio	15
3.3	Vektoripiirianalysointilaite	17
4	TEM- ja GTEM-kammioiden impedanssimittaukset	19
4.1	TEM-kammion impedanssimittaus	19
4.2	GTEM-kammion impedanssimittaus	21
4.3	EMC-laboratorion kaapeleiden heijastus- ja impedanssimittaus	23
5	TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittaukset	25
5.1	Kalibrointiantennit	25
5.1.1	Monopoli-antenni	25
5.1.2	Loop-antenni	27
5.2	Kalibrointiantennien testimittaukset	28
5.2.1	Monopoli-antennin mittaus	28

5.2.2	Loop-antennin mittaus	31
5.3	Kammioden sähkö- ja magneettikenttien mittausten mittausjärjestely	34
5.4	Sähkö- ja magneettikenttien mittaustulokset	35
6	Komponentin kotelon korkeuden vaikutus kentänvoimakkuuteen	39
7	Yhteenveto	41
	Lähteet	43
	Liitteet	
	Liite 1. TEM-kammion datalehti	
	Liite 2. Kaapelin 26 impedanssikäyrä	
	Liite 3. Loop-antenni ja monopoliantenni	
	Liite 4. Standardissa esitetyt antennien $S_{21}$ kuvaajat	
	Liite 5. Häiriönsietotestausasetelma TEM-kammiolle	

## Lyhenteet ja käsitteet

DUT	Device Under Test; testattava laite
EMC	Electromagnetic Compatibility; sähkömagneettinen yhteensopivuus
ESD	Electrostatic Discharge; sähköstaattinen purkaus
EUT	Equipment Under Test; testattava laite
GTEM-cell	Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode-cell; yksiporttinen TEM-kammio, jolla pystytään tekemään mittauksia jopa useiden GHz:n taajuuksiin asti
IEC	International Electrotechnical Commission; sähköalan kansainvälinen standardisointijärjestö
MEMS	Microelectromechanical System; mikrosysteemi
OATS	Open Area Test Site; avoimen tilan mittapaikka
RF	Radio Frequency; radiotaajuus
Septum	TEM- tai GTEM-kammion keskijohdin
TEM	Transverse Electromagnetic Mode; sähkömagneettisen kentän etenemismuoto
TEM-cell	Transverse Electromagnetic Mode-cell; kaksiporttinen TEM-kammio, jota käytetään EMC-testauksessa ja jonka sisällä on TEM-aaltomuoto

## 1 Johdanto

Murata Electronics Oy (MFI) on nykyisin yksi maailman johtavista piimikromekaanisten (MEMS) anturien kehittäjistä ja valmistajista. Antureilla mitataan mm. kiihtyvyyttä, liikettä, kallistusta ja kulmanopeutta. Anturisovelluksien tärkeimpiä alueita ovat autoteollisuus, terveysteknologia, kuljetusvälineet, erilaiset teolliset käyttökohteet ja kulutuselektroniikka. Murata Electronics Oy on globaali markkinajohtaja autoteollisuuden pienkiihtyvyyssanturien sekä sydämentahdistimien toimittajana.

Japanilainen komponenttivalmistaja Murata osti entisen VTI Technologies Oy:n (VTI) koko osakekannan tammikuussa 2012, jolloin VTI siirtyi Muratan omistukseen. Yhtiön nimi muutettiin Murata Electronics Oy:ksi toukokuussa 2012.

VTI perustettiin vuonna 1991 Vaisala Oyj:n, Yhdysvaltalaisen United Technologies Corporationin (UTC) ja Sitran yhteisyrityksenä. VTI siirtyi vuonna 1995 kokonaisuudessaan yhdysvaltalaisen autoalalla toimineen Breed Technologiesin (Breed) omistukseen. Breed myi vuonna 2002 koko VTI:n osakekannan ja liiketoiminnan EQT Northern Europe liiketoiminnan pääomarahastolle (EQT). Kaupan taustalla oli Breedin halu keskittyä ydinliiketoimintaansa. Vuonna 2012 VTI siirtyi EQT:n omistuksesta Muratalle.

Tässä insinööriyössä kehitetään kiihtyvyyssantureiden sähkömagneettista häiriöttestausta (EMC). Komponenttien validointitestaukseen kuuluu EMC-testaus, jolla varmistetaan, että tuote täyttää häiriönsietovaatimukset. EMC-testauksessa käytetään TEM- ja GTEM-kammioita säteilevien häiriöiden immuniteettitestaukseen. Testissä tuotteet altistetaan voimakkaalle, jopa 1 kV/m:n sähkökentälle. TEM- ja GTEM-kammioiden epäideaalisuuksien takia kentänvoimakkuudessa esiintyy 6 dB:n vaihtelua taajuusalueen yli. Testistandardi hyväksyy 6 dB:n vaihtelun, mutta vaihtelu on tällöin merkittävä mittausepävarmuuden lähde. Mikäli testausjännitteen taso vaihtelun seurauksena nousee 6 dB, kammion jännite kaksinkertaistuu, jolloin sen sisällä oleva kenttä kaksinkertaistuu. Tästä seuraa, että tietyillä taajuusalueilla tuotteita ylitestataan.

Työn tavoitteena on kehittää TEM- ja GTEM-kammioiden kentänvoimakkuuksien säätöä, jotta kentänvoimakkuuksien vaihtelu jää merkityksettömäksi. Työssä noudatetaan IEC 62132 - 1 ja IEC 62132 - 2 -standardien ohjeita.

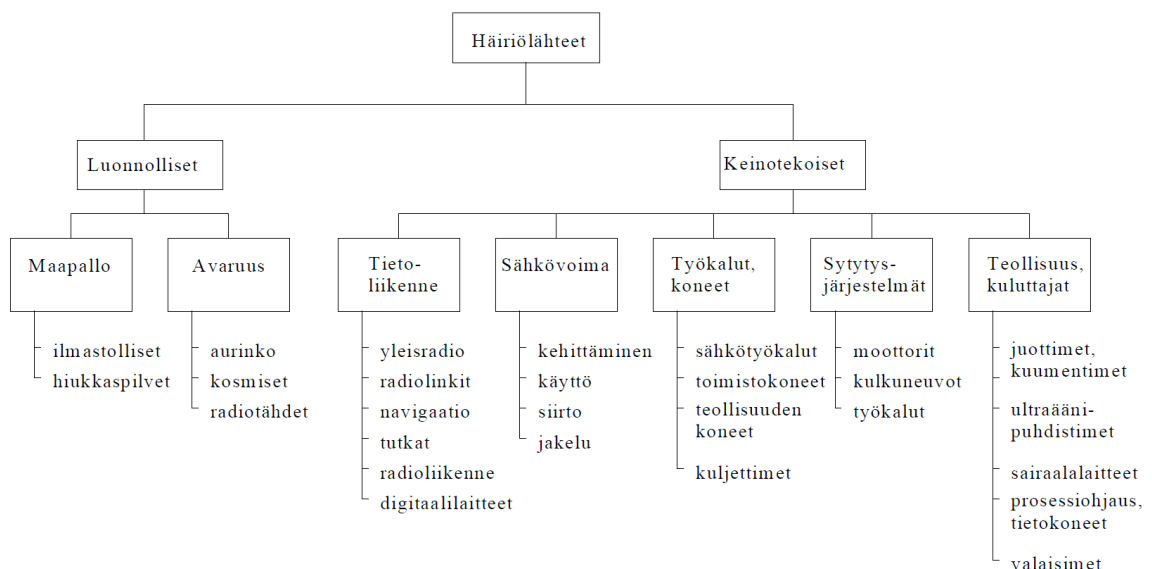
## 2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkölaitteelta ja -järjestelmältä edellytetään moitteetonta toimintaa muiden laitteiden kanssa sille tarkoitetussa toimintaympäristössä. Häiriöttömän toiminnan takaa samaan käyttöympäristöön suunniteltujen ja tarkoitettujen laitteiden sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC.

Sähkömagneettinen yhteensopivuus koostuu laitteiden lähettämien häiriöiden rajoittamisesta ja laitteiden kyvystä sietää häiriöitä. Hyvin suunniteltu sähkölaite ei häiritse kohtuuttomasti muita sähkölaitteita ympärillään ja toimii tyydyttävästi sähkömagneettisessa ympäristössään muiden laitteiden häiritsemättä sitä. [1, s. 4 - 5; 2, s. 197 - 198; 3, s. 15 - 16.]

### 2.1 Häiriölähteet

Sähkömagneettiset häiriölähteet voidaan jakaa kahteen ryhmään: keinotekoiisiin häiriöihin ja luonnossa esiintyviin häiriöihin. Luonnossa esiintyviä häiriöitä aiheuttaa esimerkiksi ukkonen. Keinotekoiset häiriöt syntyvät ihmisen rakentamista laitteista, kuten esimerkiksi matkapuhelimista. Kuvassa 1 esitetään eri tavoin eteneviä ja vaikuttavia häiriölähteitä. [3, s. 17 - 19; 4, s. 4 - 5.]

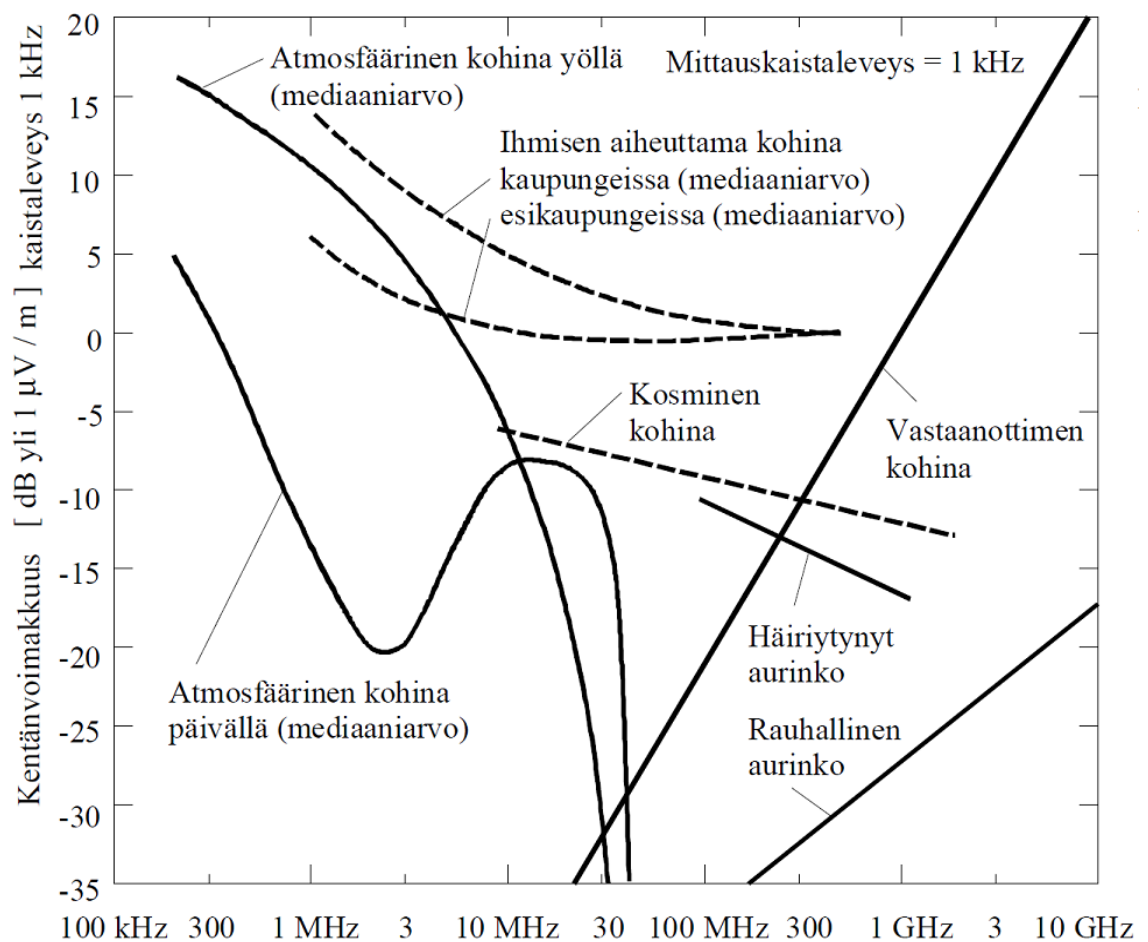


Kuva 1. Luonnollisia ja keinotekoisia häiriölähteitä [4]



### 2.1.1 Luonnolliset häiriöt

Ukkonen on merkittävin luonnossa esiintyvä häiriölähde. Ukkospilven läheisyydessä maan pinnalla voi olla jopa 1 - 10 kV/m:n suuruinen sähkökenttä. Salamaniskun yhteydessä syntyvät voimakkaat nopeasti muuttuvat sähkö- ja magneettikentät saattavat indusoida jännitteitä johdinsilmukoihin ja aiheuttaa jännite-eroja eri johtimien välille ja näin vaurioittaa suojaamattomia sähkölaitteita. Salamanisku emittoi radiotaajuisia häiriöitä tyypillisesti 50 - 100 MHz:n kaistanleveydellä. Erilaisien säteilemällä leviävien sähköisten häiriöiden voimakkuuksia voidaan tarkastella kuvasta 2 kentän voimakkuuksina taajuusalueen yli. [3, s. 17 - 19; 4, s. 4 - 6; 5, s. 33.]



Kuva 2. Erilaisten säteilemällä leviävien sähköisten häiriöiden voimakkuuksia [4]

Auringosta peräisin oleva kosminen säteily on toinen merkittävä luonnon aiheuttama häiriölähde. Auringon aiheuttama säteily vaikuttaa yläilmakehän heijastusominaisuuksiin 2 - 30 MHz:n kaistalla. Auringon kosmiset häiriöt aiheuttavat ongelmia esimerkiksi

satelliittien välisissä kommunikoinnissa. Muualta kuin auringosta tuleva kosminen säteily aiheuttaa yleensä taustakohinaa 100 - 1 000 MHz:n kaistalla. [3, s. 18; 5, s. 33.]

### 2.1.2 Keinotekoiset häiriöt

Ihmisen aiheuttamat staattisen sähkön purkaukset ovat usein sähkölaitteille haitallisia häiriöitä. Kuivissa olosuhteissa, esimerkiksi tietyntyylisen vaatamateriaalin tai väliaineen hankaaminen voi aiheuttaa ihmiseen jopa 10 - 25 kV:n suuruisen sähköstaattisen jännitteen. Sähköstaattinen varaus purkautuu henkilön koskettaessa, esimerkiksi metallisella työkalulla, sähkölaitteen metalloitua koteloa tai liitinruuveja. Tällöin varaus purkautuu laitteeseen ja puhutaan staattisen sähkön purkauksesta (ESD-purkaus). Purkausjännite vastaa suuruusluokaltaan henkilön kehoon varautunutta staattista jännitettä. ESD-purkauksen takia laite saattaa vaurioitua välittömästi, tai siihen voi syntyä piileviä vikoja, jotka voivat tulla ilmi myöhemmin laitteen ikääntyessä.

Suurin osa tavallisimmista keinotekoisista häiriöistä syntyy sähkölaitteissa ja sähköverkossa. Uusimpien digitaalisten laitteiden ja järjestelmien prosessorit värähtelevät suurilla taajuuksilla. Nopeat digitaaliset pulssit aiheuttavat nopeita sähkö- ja magneettikenttien muutoksia ja synnyttävät näin sähkömagneettisia aaltoja sekä häiriöitä ympäristöönsä. Sähköverkossa tapahtuu jatkuvasti jännitteiden muutoksia erilaisten kuormien kytkeytymisen yhteydessä. Hetkelliset, jopa kilovolttien suuruiset, jännitepiikit saattavat myös olla mahdollisia. [3, s. 18 - 19; 5, s. 34.]

## 2.2 Häiriöiden kytkeytyminen

Sähkömagneettiset häiriöt voivat kytkeytyä usealla eri tavalla, joista tärkeimmät ovat

- johtumalla tapahtuva kytkeytyminen
- kapasitiivinen eli sähkökentän kautta tapahtuva kytkeytyminen
- induktiivinen eli magneettikentän kautta kytkeytyminen
- säteilemällä sähkömagneettisten kenttien kautta tapahtuva kytkeytyminen.

Häiriöt syntyvät usein sähkölaitteen käyttöympäristössä, eli tilassa, johon käyttäjä asentaa laitteen. Laitteen suunnitteluvaiheessa on usein hyvin vaikeaa ottaa huomioon ympäristöolosuhteita, joissa laitetta käytetään. Tätä suunnittelun osa-aluetta voidaan

parantaa tutkimalla ja määrittämällä laitteen tuleva käyttöympäristö mahdollisimman tarkasti.

Mahdollinen häiriö ei välttämättä aiheuta sähkölaitteen toiminnalle ongelmaa, jos kuvassa 3 esitettävä kytkeytymisketju sähkölaitteeseen päästään katkaisemaan esimerkiksi koteloinnilla tai oikeanlaisella maadoituksella. [4, s. 7 - 12; 5, s. 34 - 37.]

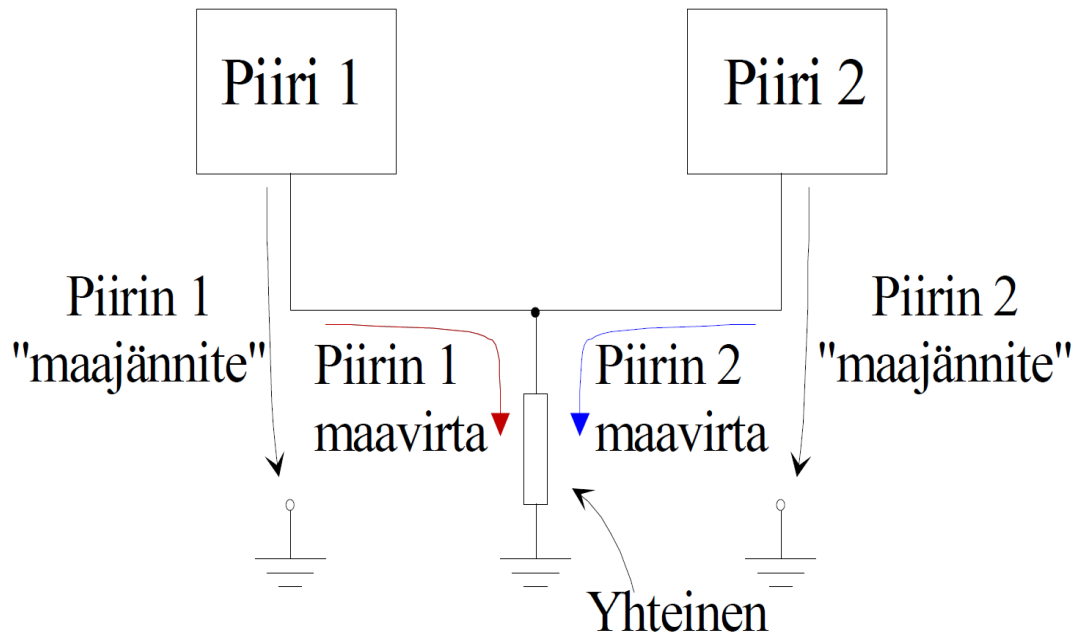


Kuva 3. Häiriöiden kytkeytymisketju [3]

### 2.2.1 Johtumalla kytkeytyminen

Johtumalla kytkeytyvien häiriöiden tapauksessa tavallisin syy on, että häiriö kytkeytyy esimerkiksi kahden laitteen välillä johtimia pitkin. Signaalihohtimen kulkiessa häiriöisesä ympäristössä johdin voi altistua häiriöille, jotka johdin siirtää paikasta toiseen. Häiriöiden kulkeminen johtumalla voidaan estää asianmukaisella suodatuksella ja valitsemalla sellaiset signaalikaapelit, joilla on pieni maadoitusimpedanssi.

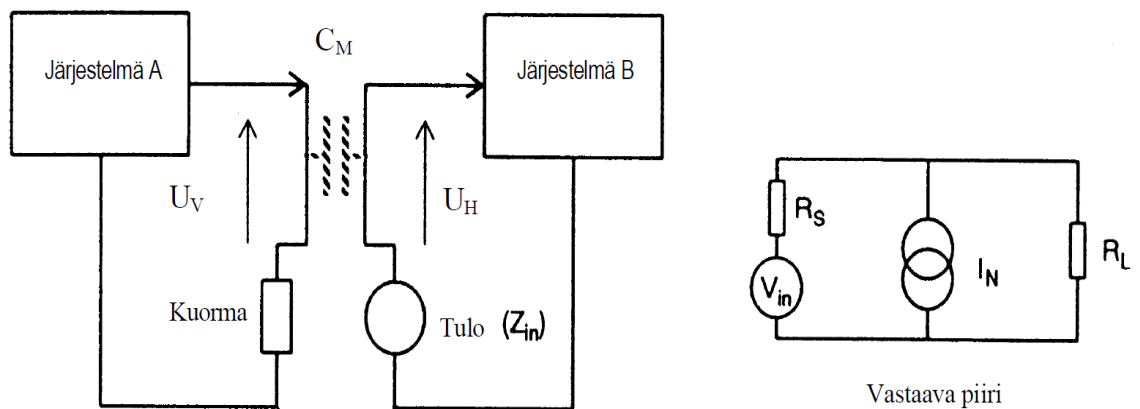
Yhteisen impedanssin kautta kytkeytyvien häiriöiden tapauksessa tyypillinen esimerkki on tilanne, jossa kahden piirin maadoitus on suoritettu samalla johtimella. Kuvassa 4 nähdään, että piirien 1 ja 2 maadoitus on toteutettu samalla johtimella, ja piirit jakavat yhteisen impedanssin, maavirrat kulkeutuvat saman maadoitusimpedanssin kautta. Tarkasteltaessa piirin 1 maajännitettä huomataan, että maajännite muuttuu ajallisesti piirin 2 maavirran mukaisesti. Sama tilanne pätee päinvastoin, kun tarkasteltaessa piirin 2 maajännitettä. Tässä tapauksessa häiriöt pääsevät kytkeytymään piiristä toiseen yhteisen maaimpedanssin avulla. [3, s. 21 - 27; 5, s. 33 - 37; 6.]



Kuva 4. Piirien 1 ja 2 maadoitus kulkee yhteisen impedanssin kautta [6]

### 2.2.2 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kahden eri potentiaalissa olevan pisteen välillä on aina sähkökenttä. Kun kaksi eri potentiaalissa olevaa johdinta kulkee vierekkäin, niiden välille syntyy tahattomasti kondensaattorin tapainen kytkentä. Tällä tavalla toisesta johtimesta voi kapasitiivisesti sähkökentän kautta kytkeytyä toiseen johtimeen häiriöjännitteitä. Kuvassa 5 esitetään kapasitiivinen kytkeytyminen kahden johtimen ja piirin välillä. [1, s. 222 - 226; 3, s. 21 - 25; 4, s. 7 - 12.]



Kuva 5. Kapasitiivinen kytkeytyminen kahden eri järjestelmän välillä [3]

Kapasitiivisesti kytkeytynyttä jännitettä voidaan kuvata kaavalla 1 seuraavasti:

$$U_H = \frac{R}{j2\pi f C_M + R} U_V \quad (1)$$

$U_H$  on kapasitiivisesti kytkeytynyt jännite [V]  
 $C_M$  on johtojen välinen keskinäiskapasitanssi [F]  
 $U_V$  on häiritsevän johdon jännite [V]  
 $f$  on kytkeytyneen häiriön taajuus [Hz]  
 $R$  on signaalijohdon vastus [ $\Omega$ ]  
 $\pi$  on pii  $\approx 3,1415$ .

Kun keskinäiskapasitanssin  $C_M$  reaktanssi on häiriön taajuudella suurempi kuin signaalijohdon vastus  $R$ , kaava yksinkertaistuu seuraavanlaiseksi:

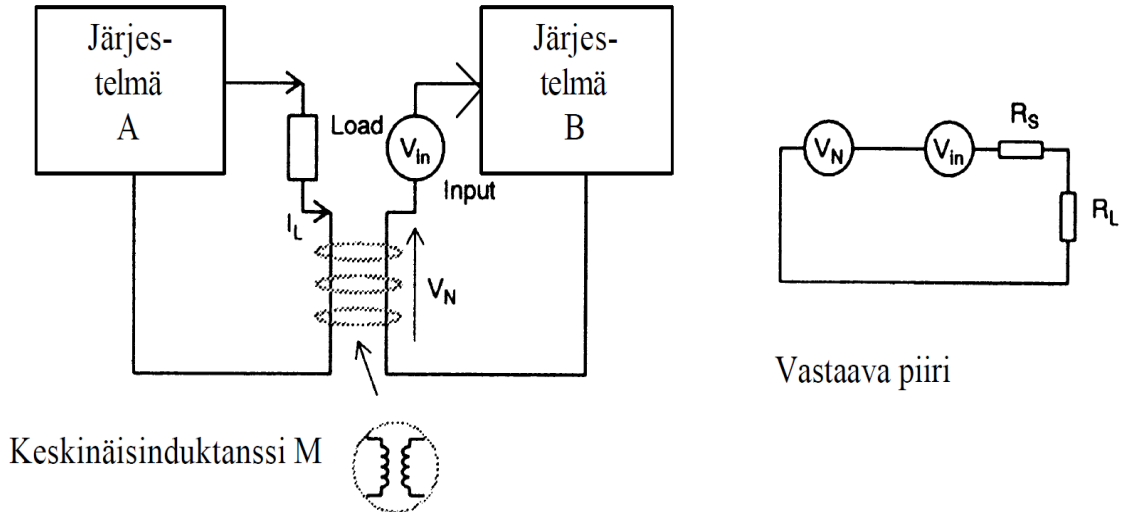
$$|U_H| = 2\pi f R C_M U_V \quad (2)$$

Kaavasta 2 nähdään, että kytkeytynyt häiriöjännite  $U_H$  on riippuvainen taajuudesta  $f$ , signaalijohdon vastuksesta  $R$ , johtimien välillä olevasta keskinäiskapasitanssista  $C_M$  ja häiritsevän johdon jännitteestä  $U_V$ .

Kapasitiivista kytkeytymistä eri järjestelmien välillä ei pystytä kokonaan poistamaan. Kytkeytymisen voimakkuuteen pystytään kuitenkin vaikuttamaan esimerkiksi johtimien etäisyyksiä ja suuntaa muuttamalla, metallikoteloinnilla ja sijoittamalla johtimet lähelle maatasoa. [1, s.222 - 226; 3, s. 21 - 25; 4, s. 7 - 21.]

### 2.2.3 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu magneettikentän vaikutuksesta. Kuvassa 6 esitetään induktiivinen kytkeytyminen kahden piirin välillä keskinäisinduktanssin kautta. Kun johtimessa kulkee sähkövirtaa, se synnyttää ympärilleen magneettikentän. Magneettikenttä on huomattavasti voimakkaampi johdon ulkopuolella kuin sisäpuolella. Johtimen muodostama magneettikenttä indusoi häiriöjännitteen läheisiin virtapiireihin ja johtimiin lävistäessään niiden muodostamia johdinsilmukoita. Mitä suurempi on kokonaisuuden muodostama johdinsilmukka, sitä paremmin häiriöt kytkeytyvät. [1, s. 222 - 241; 3, s. 21 - 25; 4, s. 7 - 12; 7.]



Kuva 6. Induktiivinen kytkeytyminen [3]

Sähkövirtaa johtavan johtimen muodostama magneettikenttä saadaan laskettua kaavalla 3:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3)$$

$H$  on magneettikentän voimakkuus [A/m]  
 $I$  on häiritsevässä johtimessa kulkeva virta [A]  
 $r$  on häiriötä tuottavan ja vastaanottavan piirin etäisyys toisistaan [m].

Johtimeen tai piiriin indusoitunut häiriöjännite saadaan kaavasta 4:

$$u = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot \vec{dA} = -\mu A \frac{dH}{dt} = -\frac{\mu A}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

$u$  on indusoituneen jännitteen suuruus [V]  
 $A$  on johdinsilmukan pinta-ala [m<sup>2</sup>]  
 $B$  on magneettivuon tiheys [T/m<sup>2</sup>]  
 $\mu$  on tyhjiön permeabiliteetti [Vs/Am]  
 $H$  on magneettikentän voimakkuus [A/m]  
 $\frac{dI}{dt}$  on häiritsevän virran muutosnopeus.

Piiriin indusoitunut jännite voidaan esittää myös kaavan 5 mukaisesti käyttämällä keskinäisinduktanssia  $L_m$ :

$$u = \omega L_m \cdot I = L_m \cdot \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

$L_m$  on keskinäisinduktanssi [H]

$\omega$  on kulmataajuus [Hz]

$I$  on virta [A].

Induktiivisesti kytkeytyviä häiriöitä pystytään vaimentamaan käyttämällä esimerkiksi kierrettyä parikaapelia, välttämällä yhdensuuntaisia johdotuksia, kasvattamalla häiritsevän ja häiriintyvän johdon keskinäistä etäisyyttä ja asettelemalla johtimet asentoon, missä magneettikenttä ei lävistä laitteen häiriöherkkiä osia ja magneettivuon ja silmukan välinen kulma on nolla. Kuitenkin on syytä ottaa huomioon, että kapasitiivinen ja induktiivinen kytkeytyminen liittyvät toisiinsa. Esimerkiksi kierrettäessä johtimia toistensa ympäri induktiivisten häiriöiden todennäköisyys pienenee, mutta samalla kapasitiivisen kytkeytymisen riski kasvaa. [1, s. 222 - 241; 3, s. 21 - 25; 4, s. 7 - 12; 7.]

#### 2.2.4 Säteilemällä tapahtuva kytkeytymien

Säteilevä sähkömagneettinen häiriö etenee ilmassa sähkömagneettisina aaltoina. Radiotaajuiset RF-häiriöt saattavat saapua jopa maapallon toiselta puolelta, kytkeytyä sähkölaitteisiin ja häiritä niitä. Ulkoinen sähkömagneettinen kenttä voi kytkeytyä suoraan sähkölaitteen sisäisiin johdinsilmukoihin tai sähkölaitteen ulkoiset liityntäjohdot voivat toimia myös säteilevien häiriöiden kytkeytymispisteenä. [3, s. 20 - 26; 4, s. 11 - 12.]

Käsitteet kauko- ja lähikenttä määritellään häiriölähteen etäisyyden perusteella. Kauko- ja lähikenttä voidaan määritellä kahdella tavalla. Maxwellin kriteerin mukaan tai Rayleighin kriteerin mukaan.

Maxwellin kriteeri on seuraava: kun ollaan noin  $1/6 \lambda$ :n etäisyydellä häiriölähteestä, niin ollaan kaukokentässä

$$d > \frac{\lambda}{2\pi} \quad (6)$$

$d$  on häiriölähteen etäisyys [m]

$\lambda$  on aallonpituus [m]

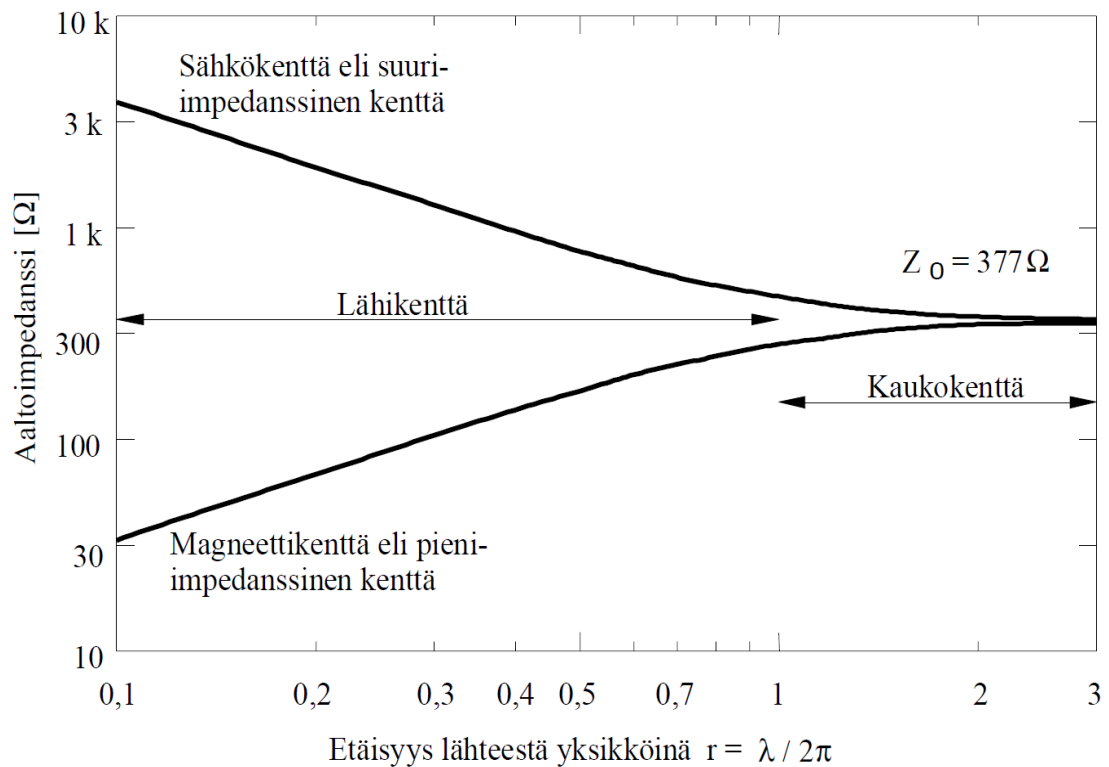
$\pi$  on pii  $\approx 3,1415$ .

Rayleighin kriteerin mukaisesti ollaan kaukokentässä, kun

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (7)$$

$d$  on häiriölähteen etäisyys [m]  
 $\lambda$  on aallonpituus [m]  
 $D$  on antennin maksimimitta [m].

Sähkö- ja magneettikentän suhdetta kutsutaan aaltoimpedanssiksi. Kauko- ja lähikentän aaltoimpedanssit eroavat toisistaan kuvan 7 esittämällä tavalla. Aaltoimpedanssi on avainasemassa, kun tarkastellaan aallon kytkeytymistä johonkin johtavaan rakenteeseen tai suunniteltaessa suojausta aaltojen kytkeytymiseltä. [1, s. 228 - 233.]



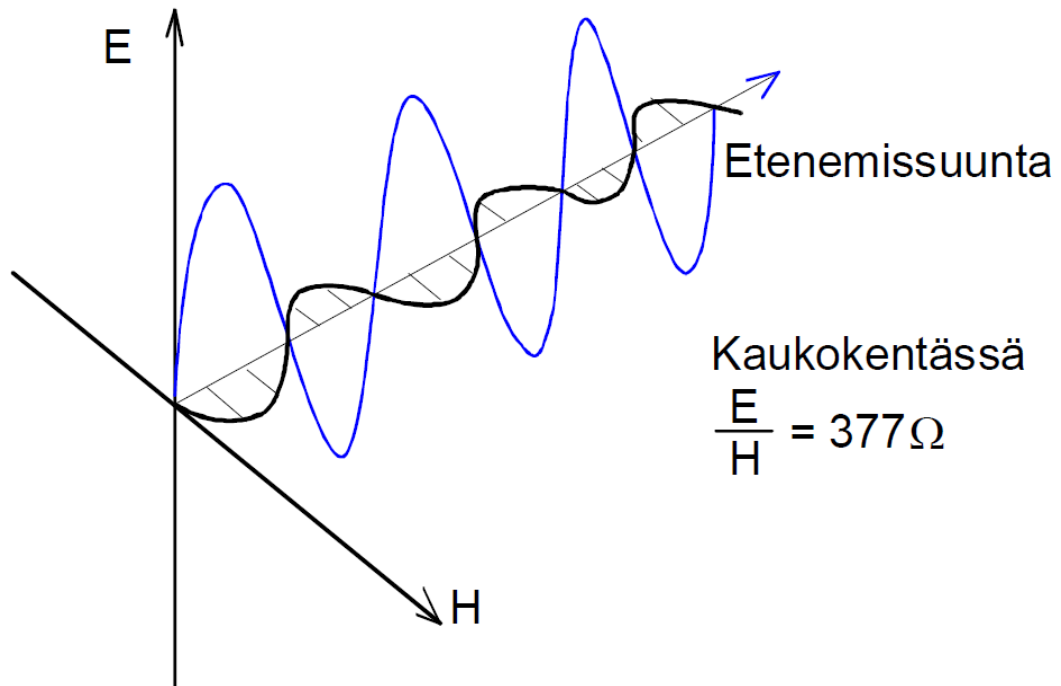
Kuva 7. Aaltoimpedanssi lähi- ja kaukokentässä [4]

Kaukokentässä aalto on aina tasoaaltona. Sähkö- ja magneettikenttä vaimenevat samaa tahtia etäisyyden kasvaessa. Kuvasta 7 voidaan havaita, että kaukokentässä sähkö- ja magneettikentän aaltoimpedanssi on vakio ja yhtä suuri kuin vapaan tilan aaltoimpedanssi  $Z_0$ .



$$Z_0 = \frac{E}{H} = 120\pi = 377 \Omega \quad (8)$$

$Z_0$  on aaltoimpedanssi [ $\Omega$ ]  
 $E$  on sähkökentän voimakkuus [V/m]  
 $H$  on magneettikentän voimakkuus [A/m].



Kuva 8. Tasoaalto [10]

Tasoaallon syntyminen lähikentässä on myös mahdollista, jos aaltoimpedanssi  $Z_0$  on  $377 \Omega$ . Kuvassa 8 on esitetty tasoaalto. Lähikentässä aaltoimpedanssi määrittyy häiriölähteen ominaisuuksien perusteella. Lähikentässä sähkö- ja magneettikenttä on syytä käsitellä erikseen. Esimerkiksi matalavirtainen, korkeajännitteinen säteilijä, kuten dipoliantenni synnyttää ympäristöönsä korkeaimpedanssisen sähkökentän. Vastaavasti korkeavirtainen, matalajännitteinen säteilijä, kuten loop-antenni synnyttää ympäristöönsä pieni-impedanssisen magneettikentän. [1, s.228 - 233.]

### 2.3 Säteilevien häiriöiden EMC-mittaukset

Säteilevien häiriöiden EMC-mittaukset tehdään yleensä avoimella mitta paikalla (OATS) tai häiriösuojatussa mittaushuoneessa. Säteilevien häiriöiden mittauksia tehdään tavallisesti 30 MHz - 1 000 MHz taajuusalueella. Säteilevien häiriöiden immunitaettimittaukset ja emissiomittaukset voidaan molemmat suorittaa näissä tiloissa lähes samanlaisilla

mittauskalustoilla. Mittaukset tehdään yleensä kaukokentässä, joten avoimen mittapaikan ja häiriösuojatun mittaushuoneen on oltava riittävän suuria, jotta kaukokenttäolosuhteet saavutetaan koko mitattavalla taajuusalueella.

Avoimen mittapaikan ja häiriösuojatun mittaushuoneen lisäksi on kehitetty TEM- ja GTEM-kammio, jotka ovat vähemmän tilaa vieviä ja halvempia ratkaisuja tehdä säteilevien häiriöiden EMC-mittauksia. TEM- ja GTEM-kammioiden rajoituksena on niiden pieni koko, minkä takia niillä ei pystytä tekemään EMC-mittauksia kovinkaan suurilla laitteilla.

Avoimella mittauspaikalla ja häiriösuojatussa huoneessa tehtävissä emissiomittauksissa testattavan elektroniikkalaitteen lähettämiä häiriötä mitataan antennilla, jonka ulostulosta saadaan tutkittua millaisia häiriöitä mitattava laite säteilee ympäristöönsä. Mittauskalustona tavallisesti käytetään antennia vastaanottamaan elektroniikkalaitteen lähettämiä häiriötä ja spektrianalysointia lukemaan antennilta siihen indusoituneita jännitteitä.

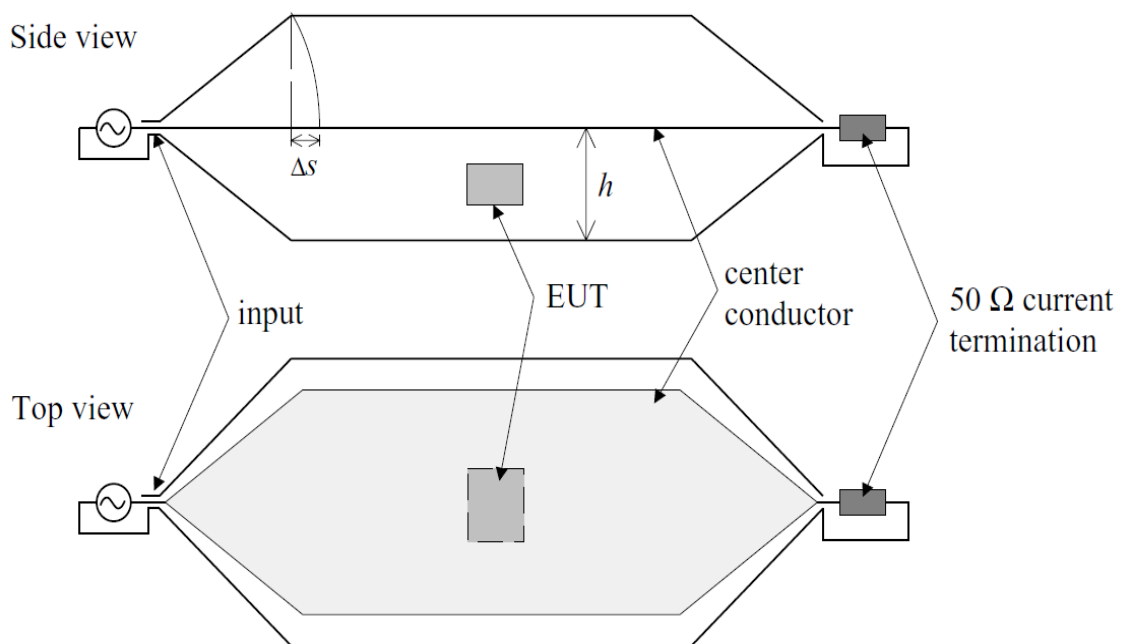
Avoimella mittauspaikalla ja häiriösuojatussa huoneessa tehtävissä immunitaettimittauksissa mittauskalustona käytetään yleensä EMC-mittauksiin soveltuvaa antennia, signaaligeneraattoria, laajakaistaista tehovahvistinta ja mittausmonitoria testattavan laitteen toimintojen tarkkailuun. Antennilla lähetetään häiriösignaaleja, joka kohdistetaan testattavaa laitetta kohti. Häiriösignaaleja lähetetään eri voimakkuuksilla taajuusalueen yli. Mitattavan laitteen toimintoja tarkastellaan ja tutkitaan vaikuttavatko ne sen toimintaan häiritsevästi. [1, s. 140 - 145, s. 164 - 176; 3, s. 28 - 32.]

### 3 Kalibrointimittalaitteisto

#### 3.1 TEM-kammio

TEM-kammio koostuu pääasiassa suorakaiteen muotoisesta koaksiaalisesta siirtolinjasta, jonka keskellä kulkee tasainen ja leveä keskijohdin (Septum). Kammion suippe-neviin pyramidin muotoisiin päihin on lisätty  $50 \Omega$  impedansseiltaan olevat liittimet. Heijastuksien ja seisovanaallon suhteen vähentämiseksi kammion ominaisimpedanssi on  $50 \Omega$ :a koko pituutensa läpi.

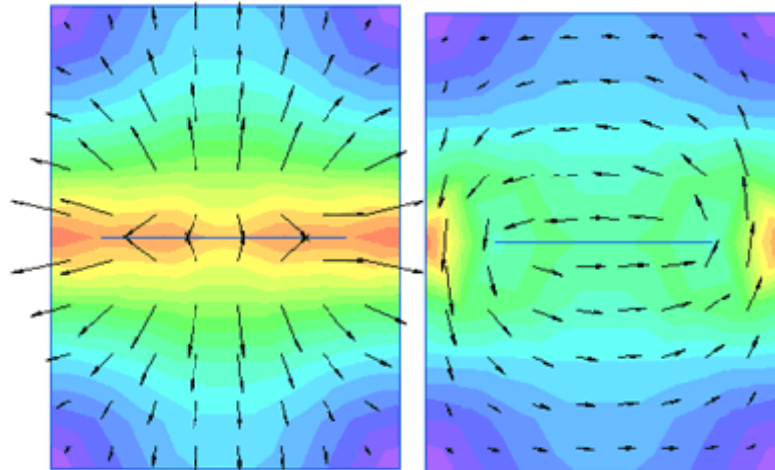
Kammion ulkokuori ja septumi ovat materiaaleiltaan alumiinia. Metallisen koteloinnin ansiosta TEM-kammio on hyvin eristetty, eli se ei säteile häiriötä ympärilleen merkittävästi ja ulkoiset häiriöt eivät haittaa kammion mittaustuloksia häiritsevissä määrin. TEM-kammiolla tehtäviä mittauksia ei tarvitse tehdä kaiuttomassa huoneessa tai eristetyssä tilassa. Kuvassa 9 esitetään TEM-kammion kaaviokuva. [1, s.170 - 172; 8, s. 3 - 5; 9; 14, s. 21.]



Kuva 9. Kaaviokuva TEM-kammion rakenteesta [8]

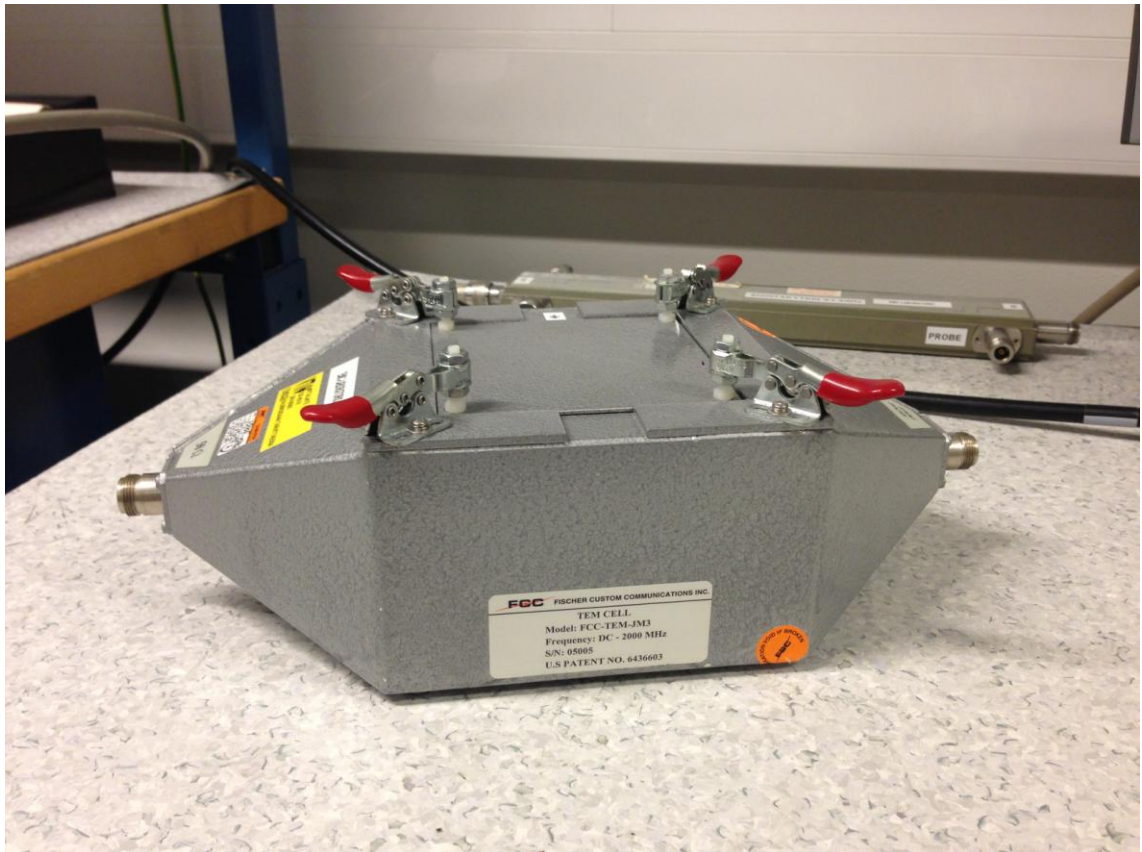
TEM-kammiota voidaan käyttää vain pienikokoisten laitteiden, kuten elektroniikkakomponenttien testauksessa. Testattavan komponentin korkeus on rajoitettu kolmasosaan

septumin ja kammion seinämän välisestä korkeudesta, koska sähkömagneettinen kenttä on tällä alueella homogeeninen, saadaan tasaisia mittaustuloksia. Kuvassa 10 esitetään TEM-kammion sisälle mittauksen aikana muodostuvat magneetti- ja sähkökentät. Kuvan 10 värit havainnollistavat kentänvoimakkuutta kammion sisällä eri alueilla. Mitä punaisempi alue on, sitä vahvempi kenttä vaikuttaa alueella, ja mitä sinisempi alue on, sitä heikempi kenttä vaikuttaa alueella. [1, s.170 - 172; 8, s. 3 - 5; 9.]



Kuva 10. TEM-kammion sähkökenttä (vas.) ja magneettikenttä (oik.) [9]

Tämän insinööriyön mittauksissa käytetään Murata Electronics Oy:n EMC-laboratorion Fisher Custom Communications, Inc. valmistamaa FCC-TEM-JM3 TEM-kammiota. Kuvassa 11 esitetään EMC-laboratorion TEM-kammio. Liittessä 1 esitetään TEM-kammion datalehti. [1, s.170 - 172; 8, s. 3 - 5; 9; 14, s. 21.]

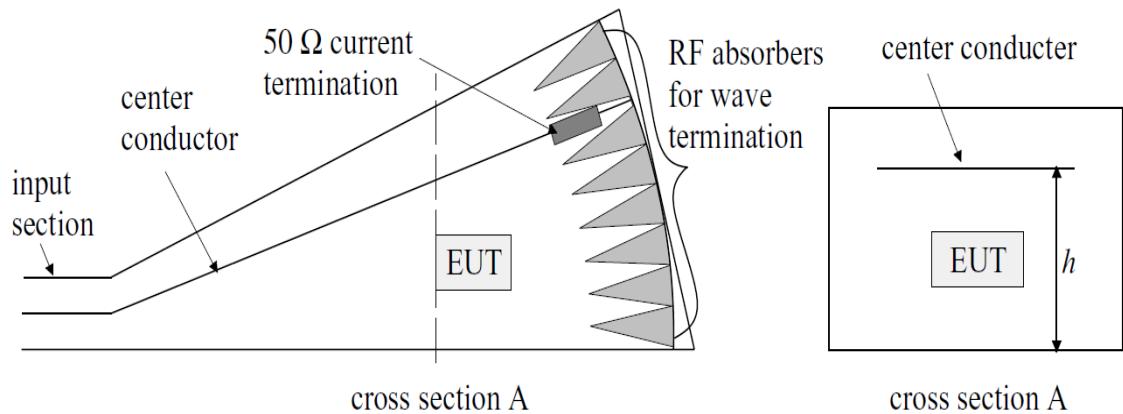


Kuva 11. Mittauksissa käytetty FCC-TEM-JM3-mallinen TEM-kammio. Kammion päällä näkyy paikka, johon testilevy asetetaan testauksen ajaksi.

### 3.2 GTEM-kammio

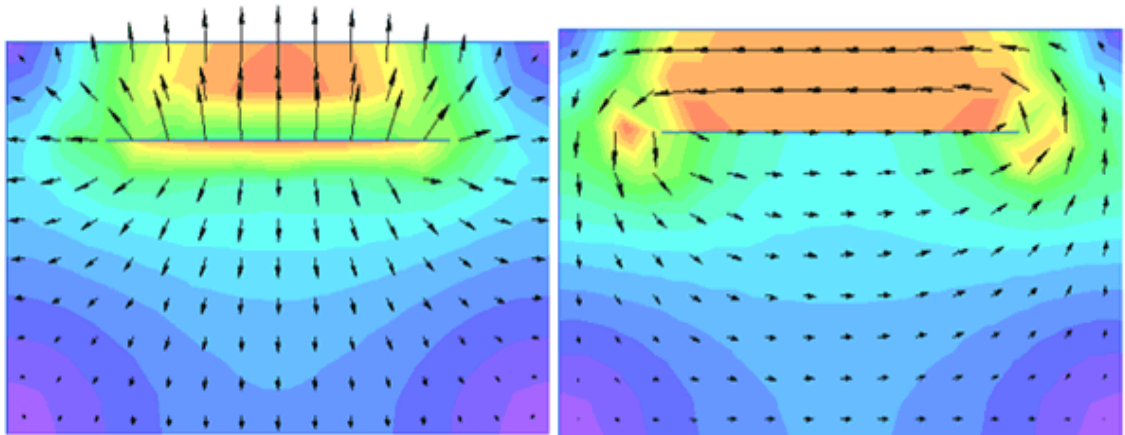
GTEM-kammio on yksinkertaistettuna laajennettu siirtolinja, joka muodostaa sisälleen TEM-aaltomuodossa kulkevan aallon, kuten TEM-kammiokin. GTEM-kammio on ulko­näöltään venytetyn pyramidin muotoinen, jonka terävässä kärjessä on kaapelin kytkentää varten 50  $\Omega$ :n liitin.

GTEM-kammiossa on samantapainen septumi kuin TEM-kammiossa, joka kulkee koko kammion läpi sen pituudeltaan ja leveydeltään ja on sovitettu 50  $\Omega$ :iin. Keskijohdin on päätetty 50  $\Omega$ :iin heijastuksien vähentämiseksi. Kammion pohjaan sijoitettujen RF-vaimentimien ja ferriittilevyjen tarkoituksena on vähentää heijastuksien ja seisovanaal­lon syntymistä eri taajuuksilla. Kuvassa 12 esitetään GTEM-kammion kaaviokuva.



Kuva 12. GTEM-kammion kaaviokuva [8]

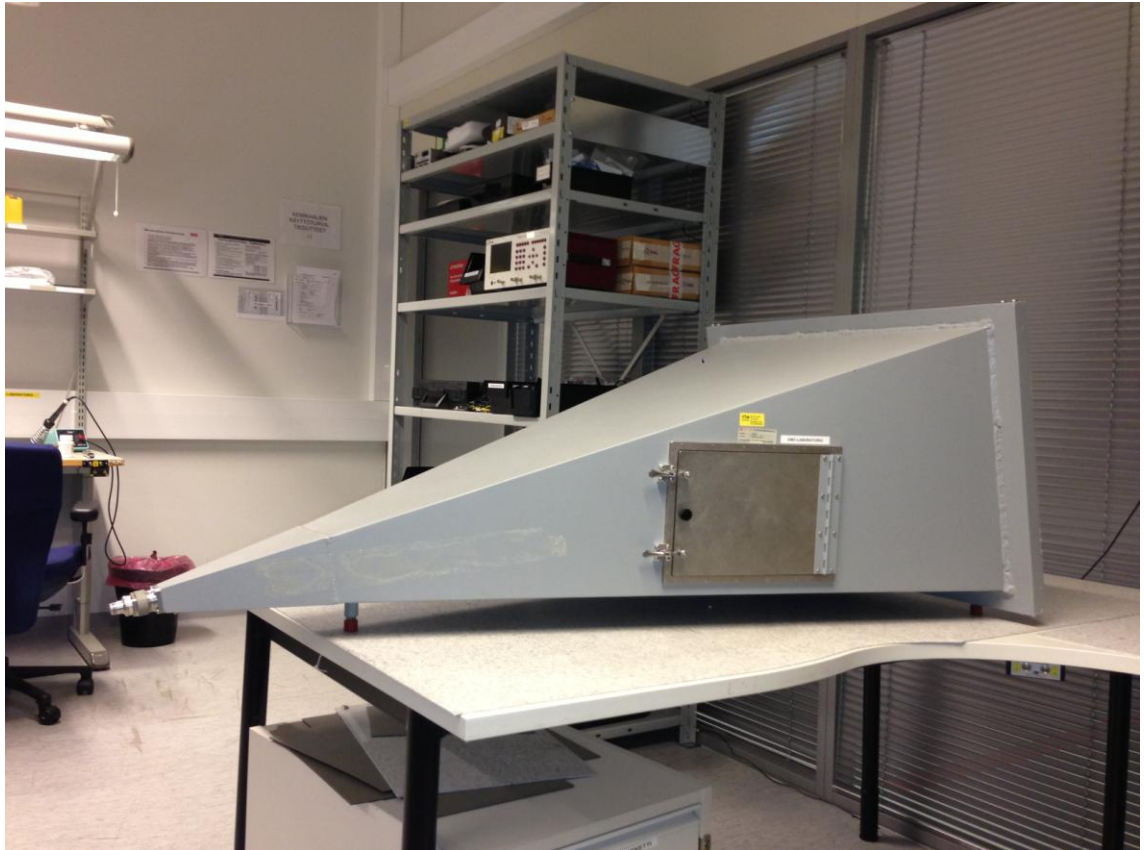
GTEM-kammio soveltuu käytettäväksi standardien mukaisissa häiriöiden sieto- ja emissiotesteissä. GTEM-kammion suunnittelun lähtökohtana on ollut päästä eroon TEM-kammion haittakohdista, kuten sen kulmikkaista fyysisistä mitoista, jotka vaikuttavat sen käyttötaajuuden kaistanleveyteen, jolla mittauksia tehdään. Näiden korjauksien ansiosta GTEM-kammiolla pystytään tekemään häiriöiden sietomittauksia taajuusalueella DC - 18 GHz, ja emissiomittauksia taajuusalueella 30 MHz - 1 GHz. [1, s. 140, s.170 - 172; 8, s. 3 - 5; 9; 11, s. 2 - 10; 14, s. 21.]



Kuva 13. GTEM-kammion sähkökenttä (vas.) ja magneettikenttä (oik.) [9]

GTEM-kammiolla mitattavan tuotteen koolle pätevät samat rajoitukset kuin TEM-kammiolle. Mitattavan tuotteen korkeus saa olla korkeintaan noin kolmasosa septumin ja kammion seinämän välisestä korkeudesta. Jos tuote on liian korkea, testattava tuote saattaa altistua liian voimakkaalle kentälle, joka ei ole tarpeeksi homogeeninen. Tällä

tavalla mittaustuloksiin saattaa syntyä vääristymiä, joita epähomogeeninen kenttä tyyppillisesti aiheuttaa. Valmistajan antamat rajat sähkökentän yhdenmuotoisuudelle taajuusalueen yli ovat: 0 - 1 GHz  $\pm$  4 dB, 1 - 4 GHz  $\pm$  5 dB ja 4 - 18 GHz  $\pm$  8 dB. Kuvassa 13 on havainnollistettu GTEM-kammion sisällä mittauksen aikana vallitsevat sähkö- ja magneettikentät. Kuvassa 13 punaisempi alue tarkoittaa voimakkaampaa kenttää ja sinisempi heikompaa kenttää. [1, s. 140, s.170 - 172; 8, s. 3 - 5; 9; 11, s. 2 - 10; 14, s. 21.]



Kuva 14. EMC-laboratorion GTEM-kammio

Tässä insinööriyössä käytetään Murata Electronics Oy:n EMC-laboratorion kuvassa 14 esitettyä The Electro-Mechanics Companyn valmistamaa Model 5302 GTEM-kammiota.

### 3.3 Vektoripiirianalysaattori

Tässä Insinööriyössä käytetään HP 8752C -vektoripiirianalysaattoria. Piirianalysaattorilla mitataan TEM- ja GTEM-kammioden impedanssikäyrät, kentänvoimakkuuksien

mittaamista varten valmistettavien antennien impedanssit, kapasitanssit, induktanssit, EMC-laboratorion testikaapeliin heijastusmittaukset ja TEM- ja GTEM- kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittaukset.

TEM- ja GTEM-kammioiden impedanssikäyrien mittaukset ja kaapeliin impedanssien ja heijastuksien mittaukset tehdään taajuusalueella 300 kHz:stä 2 GHz:iin. Valmistettavien antennien mittaukset tehdään piirianalysaattorilla taajuusalueella 300 kHz:stä 1 GHz:iin. TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittaukset tehdään taajuusalueella 300 kHz:stä 1 GHz:iin.

HP 8752C -piirianalysaattorilla pystytään tekemään mittauksia 300 kHz:stä 6 GHz:iin asti. Piirianalysaattorin virheenkorjauksen kalibroinnissa käytetään tilannekohtaisesti 3,5 mm:n liittimillä varustettua HP 85033D -kalibroitsettiä ja N-liittimillä varustettua HP 85032E -kalibroitsettiä. [12; 13.]



## 4 TEM- ja GTEM-kammioiden impedanssimittaukset

Tässä insinööriyössä mitatut TEM- ja GTEM-kammiot ovat molemmat impedansseiltaan  $50 \Omega$ . Teoriassa kammioiden septumin impedanssi on laskettu  $50 \Omega$ :iin, mutta käytännössä impedanssitaso aaltoilee  $50 \Omega$  ympäristössä taajuusalueen yli. Impedanssin aaltoilu johtuu kammioiden erilaisista epäideaalisuuksista, kuten sen rakenteiden muodoista ja materiaaleista, joista saattaa muodostua erilaisia heijastumia.

Kammioiden impedanssikäyrien mittauksella saadaan tietoa siitä, miten suuri teho kammiolle pitää käytännössä syöttää, jotta saataisiin halutun suuruinen sähkö- tai magneettikenttä muodostettua kammion sisälle tietyllä halutulla taajuudella. Esimerkiksi, jos mitataan sähkökentän voimakkuutta TEM-kammiolla 200 MHz:n taajuudella ja impedanssi on tällä taajuudella myös tunnettu, voidaan helposti laskea kammiolle syötettävä teho. Kun teho saadaan laskettua ja tiedetään tarkasti, millainen kentänvoimakkuus kammion sisällä on, saadaan kammiolla tehtäviä mittaustuloksia tarkemmiksi ja vältetään mahdollinen ylitestaus. IEC 62132 - 2 -standardin mukaan 6 dB:n poikkeama kentänvoimakkuudessa on sallittu. Tämä tarkoittaa käytännössä jännitteen kaksinkertaistumista.

TEM- ja GTEM-kammioiden impedanssikäyrien mittauksissa käytetään HP 8752C -piirianalysaattoria. Impedanssikäyrien mittaukset tehdään 300 kHz - 2 GHz taajuusalueella. Standardin mukaan kalibroitimittaukset tulisi tehdä jo 150 kHz:stä lähtien. Piirianalysaattorin alin taajuus, jolla mittaus voidaan tehdä on 300 kHz. Mittauksissa joudutaan tekemään tässä kohtaa poikkeus. Impedanssimittauksissa piirianalysaattorin kalibroimiseen käytetään HP 85032E -kalibroitsettia. [1, s.168 - 172; 11, s. 6 - 10; 14, s. 13 - 20.]

### 4.1 TEM-kammion impedanssimittaus

TEM-kammion impedanssikäyrän mittaus tehtiin piirianalysaattorilla. Mittaus tehtiin piirianalysaattorin *reflection*-mittauksella eli heijastusmittauksella. Piirianalysaattori kalibroitiin niin, että kalibroinnin aikana siihen oli kytkettynä kaikki mittauksessa käytettävät kaapelit, jotta kaapeleiden mahdollisten heijastuksien aiheuttamat virheet ja epäideaalisuudet saadaan poistettua ja näin eivät aiheuta vääristymiä TEM-kammion mittaustulokseen. TEM-kammion mittauksessa käytettiin EMC-laboratorion kaapeleita

8 ja 13. Kaapelit olivat pituudeltaan 1 metrin pituisia, ja heijastus ja impedanssimittaukset osoittivat niiden soveltuvan impedanssimittaukseen ja EMC-mittauksiin.

Ennen kalibrointia piirianalysaattorille syötettiin taajuusväli, jolla mittaukset tehdään ja yhden pyyhkäisyn aikana käytettävien mittapisteiden määrä. Taajuusväli asetettiin 300 kHz - 2 GHz ja mittapisteiden määrä asetettiin 1601 mittapisteeseen.

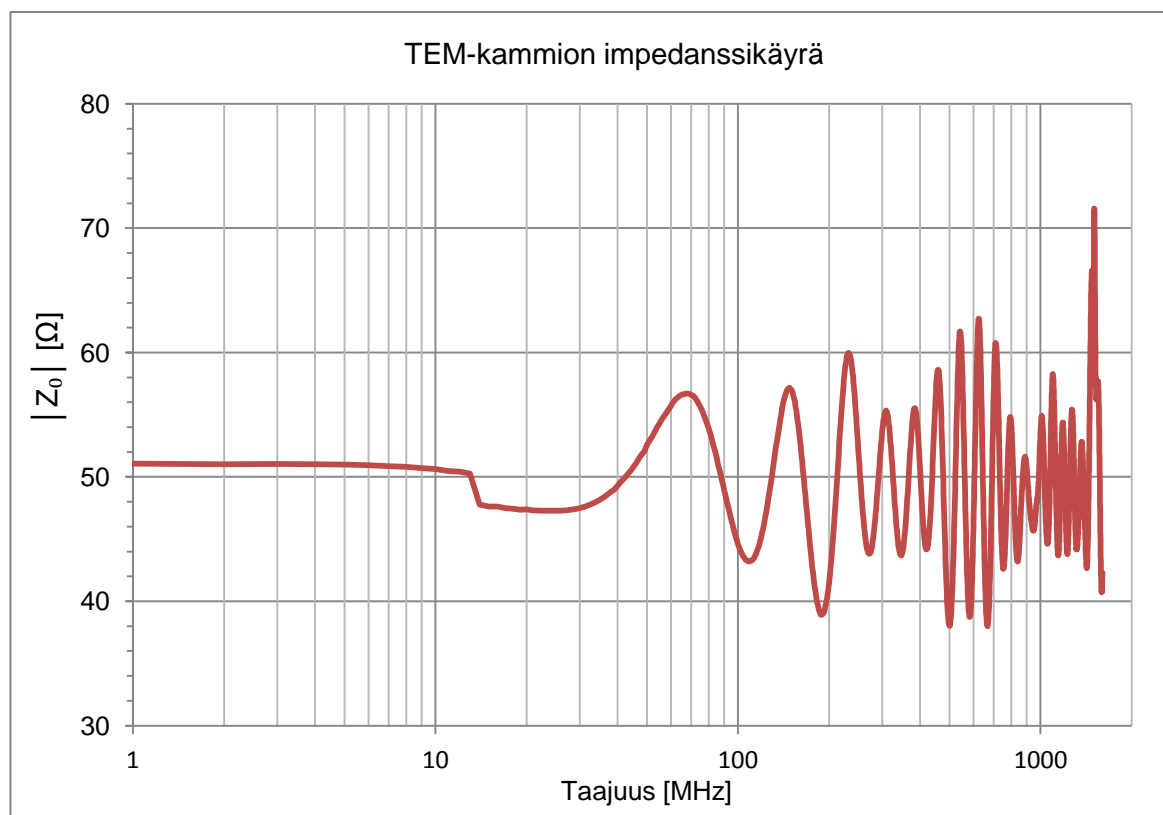
Piirianalysaattorin kalibroinnin jälkeen TEM-kammio liitettiin piirianalysaattoriin siten, että piirianalysaattorin *reflection test port* kytkettiin TEM-kammion *signal in* -liittimeen. Impedanssimittauksen ajaksi TEM-kammion poistettiin 50  $\Omega$ :n pääte ja TEM-kammio kytkettiin portista piirianalysaattorin *transmission test port* -liittimeen. Kuvassa 15 esitetään TEM-kammion impedanssimittauksen mittausjärjestely:



Kuva 15. TEM-kammion impedanssimittauksen mittausjärjestely

Piirianalysaattorin kalibroinnin ja TEM-kammion kytkemisen jälkeen piirianalysaattori asetettiin impedanssin mittaustilaan. Tämän jälkeen suoritettiin mittaus. Tulokset kerättiin piirianalysaattorilta kytkemällä piirianalysaattori tietokoneeseen sen GPIB-väylän kautta GPIB-kaapelilla. Tietokoneelle ohjelmoitiin mittapisteiden lukua varten *labview* ohjelmointiympäristössä pieni ohjelma, jolla mittaustulokset saatiin luettua piirianalysaattorilta tietokoneelle tekstitiedostoksi. Tekstitiedostosta mittaustulokset siirrettiin Microsoft Excel ohjelmaan, jolla mittaustuloksia saatiin helposti käsiteltäväksi. Mittaustuloksista otettiin itseisarvo, jolloin saatiin jokaisesta mittapisteestä ominaisimpedanssi taajuuden yli. Kuvassa 16 esitetään impedanssimittaustuloksista piirretty TEM-kammion

ominaisimpedanssikäyrä taajuusalueen yli. Mitattu ominaisimpedanssi  $|Z_0|$  esitetään y-akselilla ohmeina, ja x-akselilla esitetään taajuus  $f$  MHz:inä.



Kuva 16. TEM-kammion ominaisimpedanssikäyrä

Mittaustuloksesta nähdään, että TEM-kammion ominaisimpedanssi vaihtelee 50  $\Omega$ :n ympärillä ja on keskimäärin noin 50  $\Omega$ . Erikoisena poikkeamana ominaisimpedanssikäyrässä voidaan huomata 1 800 MHz - 1 900 MHz välillä esiintyvä heitto 70  $\Omega$ :n tietämille.

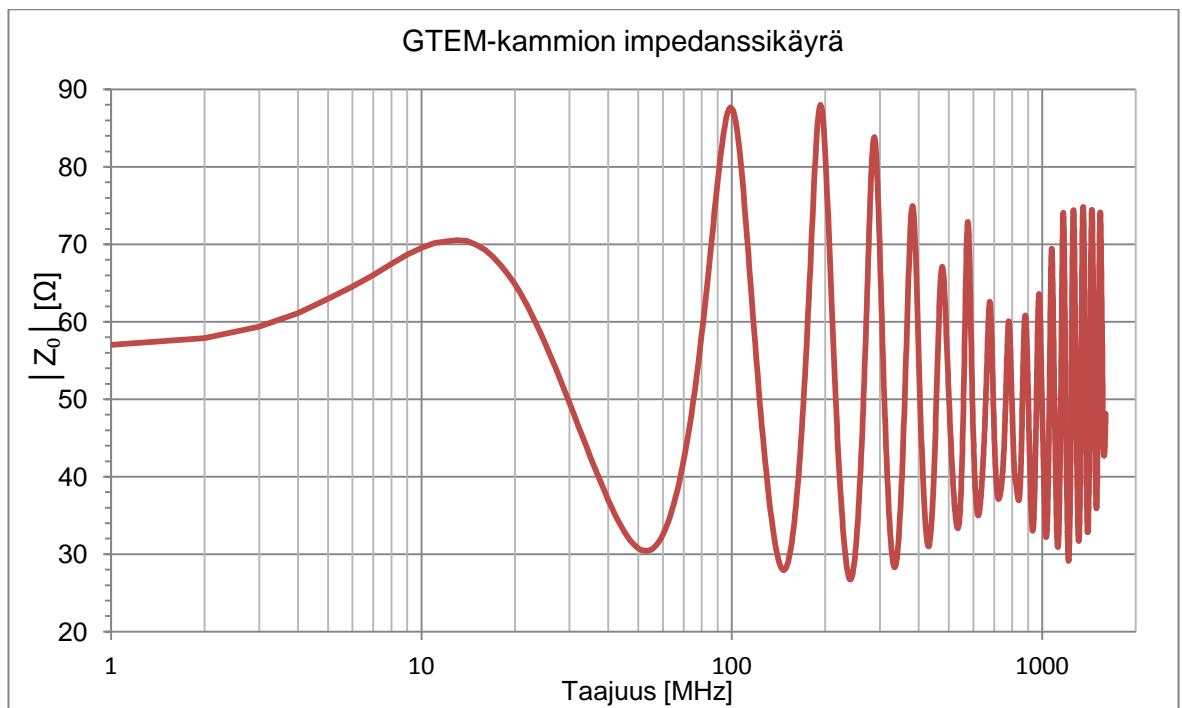
#### 4.2 GTEM-kammion impedanssimittaus

GTEM-kammion impedanssikäyrän mittaus suoritettiin lähes samalla tavalla kuin TEM-kammion impedanssikäyrän mittaus. Mittaukset suoritettiin piirianalysaattorin *reflection*-mittaustoiminnolla eli heijastusmittauksena. Ennen mittausta piirianalysaattori kalibroitiin niin, että siihen on kalibroinnin ajaksi liitetty mittauksessa käytettävät kaapelit, jotta mittaustuloksesta saadaan poistettua kaapelien mahdolliset heijastukset, jotka voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Mittauksessa käytettiin EMC-laboratorion EMC-mittaus kaapeleita. Mittauksessa käytettiin kaapelia numero 20. Kaapelin pituus on 2 m.



Kuva 17. GTEM-kammion mittausjärjestely

Kuvassa 17 on esitetty GTEM-kammion mittausjärjestely. GTEM-kammion mittaukset tehtiin taajuusalueella 300 kHz - 2 GHz. Näytteenottopisteiden määrä asetettiin 1601 pisteeseen. GTEM-kammion mittausjärjestely poikkeaa TEM-kammion mittausjärjestelystä siten, että mittaus tehtiin yksiporttimittauksella. GTEM-kammio kytkettiin impedanssien mittausta varten piirianalysaattorin *reflection test porttiin*.



Kuva 18. GTEM-kammion ominaisimpedanssikäyrä

Kun mittaus oli suoritettu, luettiin mittauspisteiden tulokset piirianalysaattorilta tietokoneelle ja käsiteltiin Microsoft Excel -ohjelmalla. Mittaustuloksista otettiin itseisarvo ja

niistä piirrettiin samanlainen kuvaaja kuin TEM-kammion tuloksista. Kuvassa 18 on esitetty GTEM-kammion ominaisimpedanssikäyrä.

GTEM-kammion impedanssikäyrästä nähdään, että sen impedanssien arvot vaihtelevat huomattavasti laajemmin kuin TEM-kammiolla. Impedanssi vaihtelee noin 28  $\Omega$ :sta lähes 90  $\Omega$ :iin, etenkin 10 MHz - 500 MHz taajuusalueella, minkä jälkeen impedanssin vaihtelu pienenee. Impedanssien voimakas vaihtelu ei tullut yllätyksenä, koska valmistajan manuaalissa annettujen tietojen mukaan GTEM-kammion impedanssi saattaa vaihdella voimakkaasti riippuen taajuusalueesta. Käyrästä voitiin todeta, että keskiarvoisesti kammion impedanssi on noin 50  $\Omega$ .

#### 4.3 EMC-laboratorion kaapeleiden heijastus- ja impedanssimittaus

EMC-laboratorion kaikki kaapelit mitattiin piirianalysaattorilla *reflection*-mittauksella. Kaapeleista mitattiin niiden impedanssien ja heijastuksien maksimi- ja minimiarvot. Mittaus tehtiin taajuusalueella 300 kHz - 2 GHz. Taulukossa 1 listataan kaikkien mitattujen EMC-kaapeleiden mittaustulokset.

Taulukko 1. EMC-laboratorion kaapelien mittaustulokset

kaapelin numero	pituus [m]	impedanssi [ $\Omega$ ]	heijastus [dB]
1	0,5	45,67 - 54,35	-50,88 ... -24,43
2	0,5	47,26 - 52,72	-51,66 ... -28,76
3	0,5	46,63 - 54,01	-48,52 ... -24,29
4	0,5	45,07 - 53,92	-51,14 ... -22,88
5	0,5	44,52 - 56,26	-44,68 ... -21,78
6	0,5	46,26 - 55,10	-57,62 ... -24,18
7	0,5	46,14 - 53,86	-51,00 ... -24,91
8	1	45,99 - 51,80	-56,32 ... 26,98
9	1	46,31 - 52,42	-53,74 ... -25,87
10	1	46,06 - 53,20	- 55,79 ... -27,62
11	1	46,64 - 53,18	-58,89 ... -27,52
12	1	46,39 - 52,10	-45,54 ... -26,77
13	1	46,44 - 54,26	-58,36 ... -26,40
14	1	45,73 - 51,65	-54,84 ... -26,74
15	1,2	47,20 - 59,38	-40,65 ... -20,50
16	2	46,46 - 52,34	-49,02 ... -24,82
17	2	46,33 - 53,02	-48,874 ... -28,10
18	2	46,08 - 53,34	-48,69 ... -26,36
19	2	46,50 - 52,32	-50,922 ... -27,92

20	2	46,60 - 53,64	-49,56 ... -27,80
21	3	46,71 - 54,13	-49,29 ... -23,82
22	3	46,02 - 52,51	-53,70 ... -26,23
23	3	46,67 - 52,75	-53,06 ... -25,86
24	3	46,36 - 52,17	-51,42 ... -26,76
25	3	46,29 - 52,52	-49,11 ... -27,13
26	3	47,43 - 60,25	-48,35 ... -20,38
27	5	46,37 - 51,90	-56,23 ... -27,67
28	5	45,97 - 53,24	-66,28 ... -25,21
29	5	46,65 - 51,88	-51,01 ... -28,15
30	5	45,56 - 52,11	-55,21 ... -27,02
31	5	46,69 - 53,00	-56,40 ... -26,59

Kaapelien heijastukset ja impedanssit olivat odotettujen rajojen sisällä. Kaikki kaapelit soveltuvat käytettäviksi EMC-mittauksissa.

Kaapelista numero 26 kerättiin impedanssien tiedot talteen, koska sen heijastukset ja impedanssi vaihtelivat huomattavasti suurimmalla alueella verrattuna muihin kaapeleihin. Liitteessä 2 esitetään kaapelin 26 impedansseista piirretty ominaisimpedanssikäyrä taajuusalueella 300 kHz - 2 GHz.

## 5 TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittaukset

TEM- ja GTEM-kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittaukset tehdään IEC 62132 - 2 -standardin ohjeiden mukaisesti. Standardissa on annettu ohjeet kahden antennin valmistukseen, joilla sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet mitataan. Nämä antenit valmistettiin standardin ohjeen mukaan ja kenttien mittaukset suoritettiin niillä.

Kalibroitimittaukseen määrätty testiasetus on lähestulkoon samanlainen kuin säteilevien häiriöidensietomittauksissa käytettävä testiasetus. Ainoana huomattavana erona häiriöiden sietomittauksiin on, että testattavan komponentin paikalla käytetään kenttien kalibroitimittauksia varten valmistettuja antenneja ja mittaustuloksien monitorointiin voidaan standardin mukaan käyttää volttimittaria, spektrianalysointia tai piirianalysointia. Piirianalysointia saa standardin mukaan käyttää kalibroitimittauksissa silloin, kun sitä käytetään RF-lähteenä. [14, s. 13 - 20.]

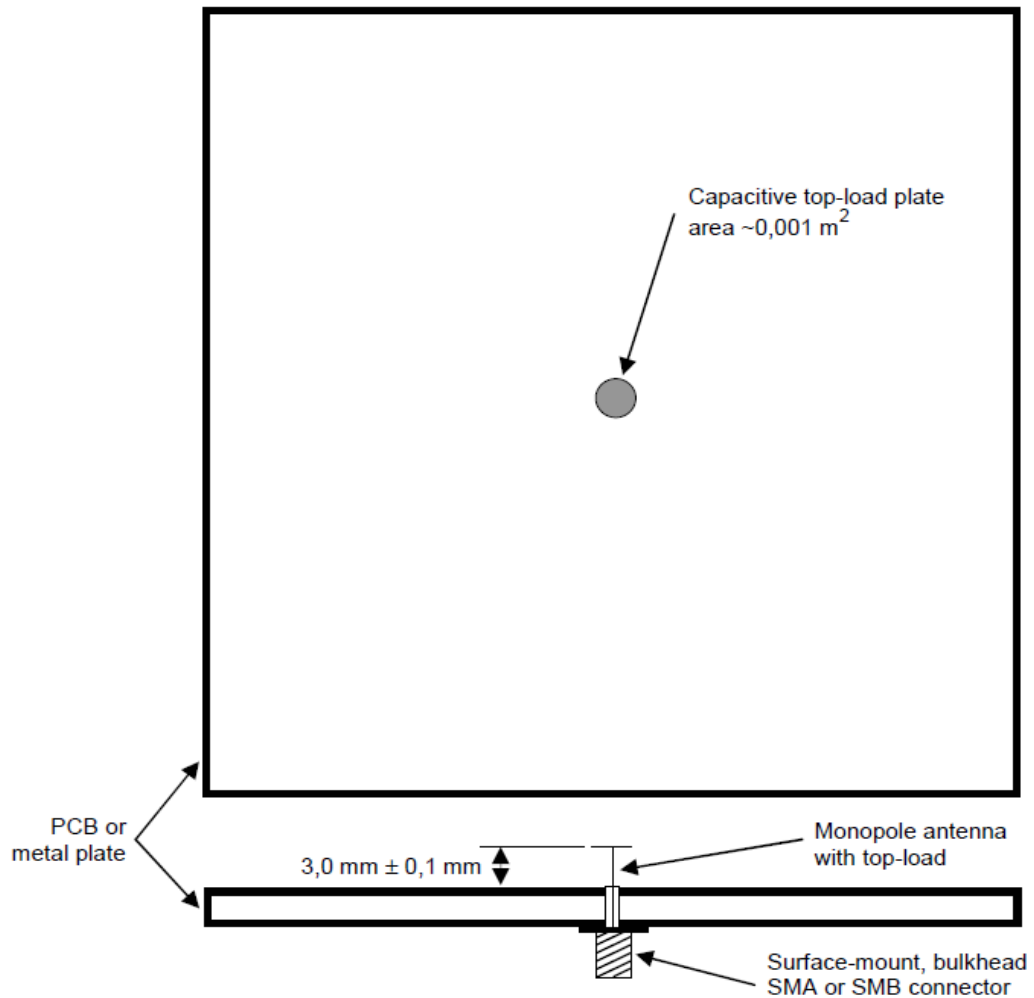
### 5.1 Kalibroitiantennit

IEC 62132 - 2 -standardissa on annettu valmistusohjeet kahdelle antennille, joilla pystytään mittaamaan sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet TEM- ja GTEM-kammioiden sisällä. Sähkökentän kalibroitimittauksiin rakennetaan pieni monopoliantenni, jonka huipulle asennetaan kapasitiivinen levy, ja magneettikentän kalibroitimittauksiin valmistetaan pieni loop-antenni. [14, s. 13 - 20.]

#### 5.1.1 Monopoliantenni

Standardissa on annettu monopoliantennia varten ohjeeksi valmistaa 100 mm x 100 mm kokoinen piirilevy tai metallilevy, jonka keskelle  $\pm 0,1$  mm:n tarkkuudella valmistettava monopoliantenni asetetaan. Kuvassa 19 esitetään monopoliantennin kaaviokuva. Monopoliantennin korkeudeksi on määrätty standardissa  $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  piirilevyn maatason pinnasta. Antennin huipulle tulee sijoittaa noin  $10 \text{ cm}^2$  pinta-alaltaan oleva pyöreä tai neliömuotoinen kapasitanssilevy, jonka tarkoituksena on lisätä antennin kapasitiivisuutta. Antennin liittimenä tulee käyttää  $50 \Omega$ :sta pintaliitos tai *bulkhead*-mallista SMA- tai SMB-liitintä, jonka keskijohtimesta monopoliantenni nousee piirilevyn yläpuolelle.

Monopoli antennin levy valmistettiin yhdeltä puolelta kuparoidusta piirilevystä. Levy piirrettiin ja suunniteltiin *pads layout* -ohjelmalla, jonka jälkeen levy jyrsittiin yhdeltä puolelta kuparoidusta piirilevymateriaalista piirilevyjyrsimellä. Kapasitanssilevy leikattiin ohuesta kuparilevystä. Levyn pienen koon vuoksi päädyttiin leikkaamaan neliönmuotoinen levy, jonka sivunpituudeksi laskettiin 3,16 cm.



Kuva 19. Monopoli antennin kaaviokuva [14]

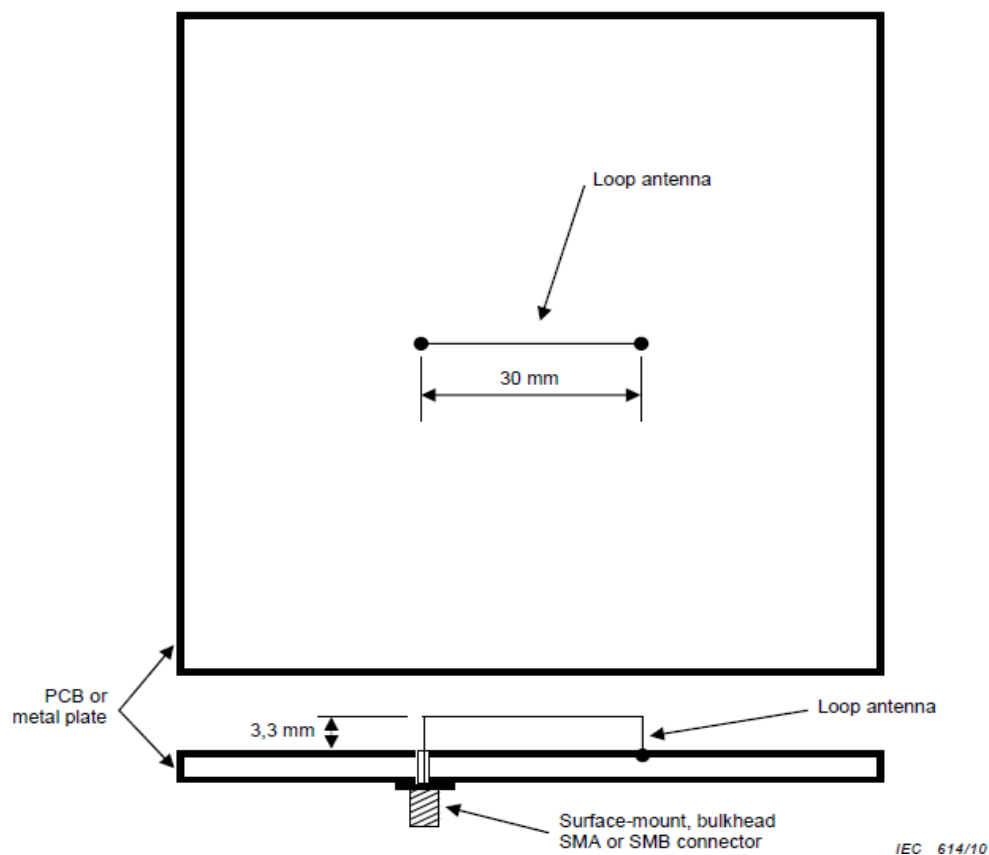
Antennin matalan korkeuden vuoksi todettiin, että liittimen valitseminen kannattaa suorittaa tarkasti. Antennin liittimeksi valittiin *bulkhead*-mallinen SMA-liitin. Liitin valittiin sen piirilevyn kuparipinnan ja kapasitiivisen levyn väliin tulevan liitosruuvin pienen korkeuden perusteella, jotta sen vaikutus maatasen nousuun kapasitiivisesta levystä katsottuna jäisi mahdollisimman pieneksi ja ei vaikuttaisi huomattavasti antennin fyysiseen pituuteen tai sen kapasitiivisuuteen. Liittimen valinnan yhteydessä huomioitiin myös keskijohdinten pituus. Valitun liittimen keskijohdin nousi noin 2,9 mm korkeudelle piirilevyn



kuparoidusta pinnasta. Tästä seurauksena kapasitiivinen levy voitiin suoraan juottaa liittimen keskijohtimeen, koska keskijohtimen korkeus on tällöin standardin rajoissa. Monopoli antennin korkeudeksi tuli 3 mm ja kapasitiivisen levyn mitaksi noin  $10 \text{ cm}^2$ . Liitteessä 3 on esitetty kuva valmistetusta monopoli antennista. [14, s. 13 - 20.]

### 5.1.2 Loop-antenni

IEC 62132 - 2 -standardissa on annettu ohjeet loop-antennin valmistamista varten. Loop-antenni rakennetaan  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  metallilevylle tai piirilevylle. Antenni pitää sijoitella levylle siten, että pintaliitos tai *bulkhead* SMA- tai SMB-liittimelle porataan levyyn sopivankokoinen reikä noin  $15 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  piirilevyn keskiosasta. Antennin pitää olla  $3,3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  korkeudeltaan, pituudeltaan  $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  pitkä ja se pitää rakentaa noin  $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  halkaisijaltaan paksusta johdinlangasta. Loop-antennin johdinsilmukan pinta-alan tulee olla noin  $99 \text{ mm}^2$ . Kuvassa 20 esitetään standardissa esitetty loop-antennin kaaviokuva.



Kuva 20. Loop-antennin kaaviokuva [14]

Antenni valmistettiin yhdeltä puolelta kuparoidusta piirilevystä, joka piirrettiin *pads layout* -ohjelmalla. Komponentiksi valittiin samanlainen *bulkead*-mallinen SMA-liitin, kuin monopoliantennille. Levy leikattiin oikeaan kokoonsa ja siihen porattiin tarvittavat reiät piirilevyjyrsimellä. Yhden millimetrin paksuisesta kuparilangasta leikattu johdinsilmukan toinen pää juotettiin kiinni SMA-liittimeen ja toinen pää piirilevyn kuparoituun pintaan noin  $15 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  piirilevyn keskiosasta. Liitteessä 3 on esitetty kuva valmistetusta loop-antennista. [14, s. 13 - 20.]

## 5.2 Kalibrointiantennien testimittaukset

Standardissa on määrätty, että valmistetut antennit täytyy mitata valmistuksen jälkeen, jotta varmistuttaisiin siitä, että niiden sähköiset mitat ovat standardin mukaiset ja soveltuvat mittauksiin. Samalla mittauksella suoritetaan antennien impedanssimittaus.

Antennit mitattiin HP 8752C -piirianalysoitsijalla. Piirianalysoitsijan kalibroinnissa käytettiin 3,5 mm:stä HP 85033D -kalibrointisettiä. Mittaukset tehdään taajuusalueella 1 MHz:tä - 1 GHz:iin *reflection*-mittauksena, missä mitattava antenni on liitettynä piirianalysoitsijan *reflection* porttiin. Kummallekin valmistetulle antennille mitataan ja lasketaan samanlaiset  $S_{21}$  parametrin kuvaajat, kuten standardissa antennille on tehty. Näiden arvojen laskemiseen on annettu standardissa kaavat molemmille antennille erikseen. [14, s. 13 - 20.]

### 5.2.1 Monopoliantennin mittaus

Monopoliantennille on standardissa määritelty, että sen tulee olla kapasitanssiltaan noin 3 pF, kun mittaus suoritetaan 10 MHz:n taajuudella. Mittaus tehdään kahdella eri tavalla standardissa ilmenneen ristiriitaisuuden vuoksi, miten antennin mittaus tulisi suorittaa.

Ensimmäinen mittaus suoritettiin siten, että monopoliantenni oli irrotettuna piirilevystä. Käytännössä mitattiin vain antennin kapasitiivisen levyn kapasitanssi. Tällä tavalla antennin kapasitanssiksi 10 MHz:llä saatiin mitattua 3,11 pF, mikä on hyvin lähellä standardissa ohjeistettua tulosta.

Toinen mittausta tehtiin mittaamalla antenni kiinnitettynä piirilevyyn. Tällä samalla tavalla myös tehtiin antennille teoreettinen  $S_{21}$  parametrien mittausta. Mittausta suoritettiin niin, että antenni oli asetettuna TEM-kammioon, jotta mahdolliset ulkoiset häiriöt saataisiin poistettua mittaustuloksesta. Monopoli-antennin kapasitanssiksi saatiin tällä tavalla 10 MHz:llä 5,5 pF. Kapasitanssia yritettiin saada lähemmäs 3 pF lisäämällä tähtiprikka antennin SMA-liittimen rungon ja piirilevyn maatasoon väliin. Tähtiprikalla yritettiin parantaa antennin kontaktia piirilevyn maatasoon. Prikan lisäyksen johdosta antennin korkeus maatasoon nousi noin 1 mm:n. Kun priikka oli kiinnitettynä piirilevyyn, antennin kapasitanssiksi mitattiin 10 MHz:llä noin 4,73 pF. Kapasitanssin aleneminen on yhteydessä mahdollisesti tähtiprikan lisäyksen johdosta tapahtuneeseen kontaktin paranemiseen piirilevyn maatasoon ja SMA-liittimen rungon välillä. Antennin 1 mm:n fyysisen mitan kasvulla saattaa olla vaikutusta antennin mittaustarkkuuteen ja kapasitanssin alenemiseen. Antennin lopulliseksi korkeudeksi saatiin 4 mm.

$S_{21}$  parametrin laskemiseksi monopoli-antennille standardissa on ilmoitettu kaava

$$S_{21} = \frac{V_{ant}}{V_{tem}} = \frac{h_{ant}}{h_{sep}} \times \frac{50}{\sqrt{(50)^2 + |Z_{ant}|^2}} \quad (9)$$

$V_{ant}$  on antennilta mitattu jännite [V]

$V_{tem}$  on TEM-kammion syötetty jännite [V]

$h_{ant}$  on antennin korkeus [m]

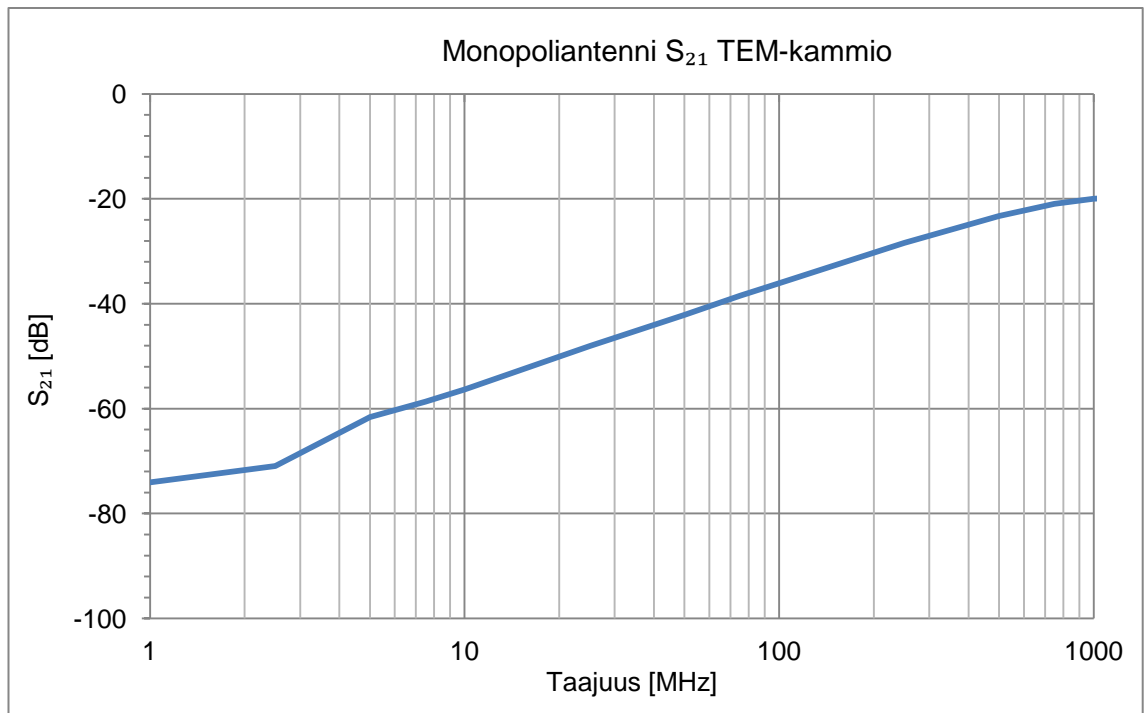
$h_{sep}$  on TEM- tai GTEM-kammion septumin korkeuden ja antennin korkeuden välinen erotus [m]

$|Z_{ant}|$  on antennin impedanssi [ $\Omega$ ].

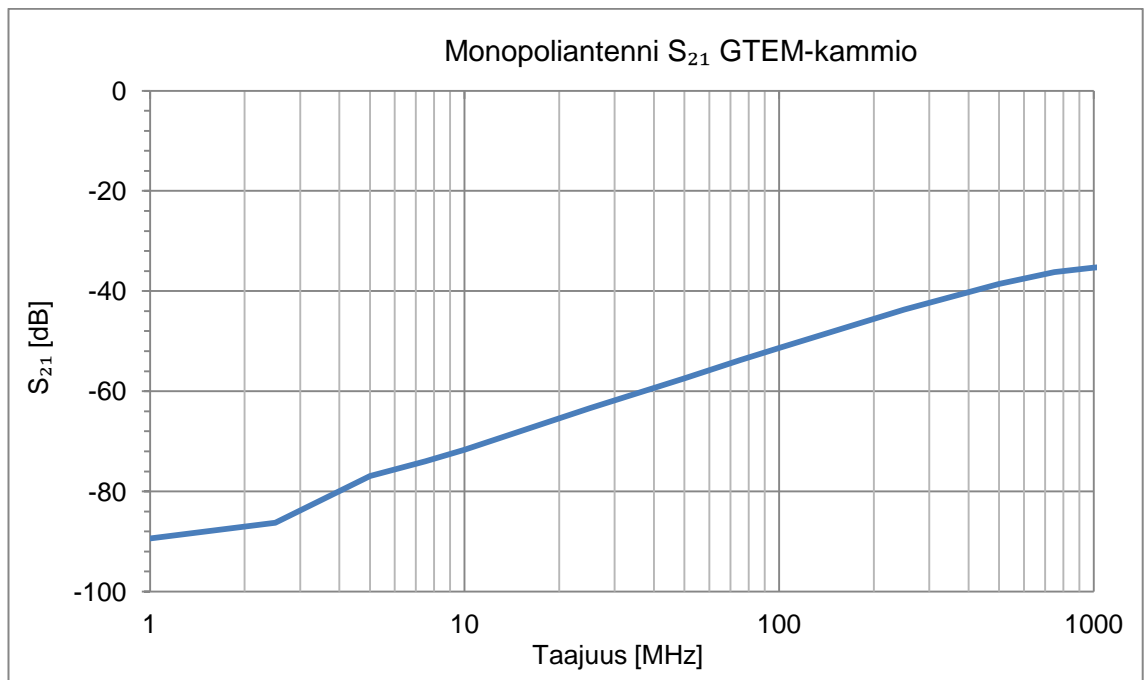
Kaavassa 9 esiintyvä lukuarvo 50 on käytetyn kammion impedanssi.  $S_{21}$  parametrin laskemista varten ja oikeanlaisen kuvaajan tuottamista varten antennin impedanssit oli mitattava käytetyn taajuusalueen yli. Impedanssit mitattiin taajuusalueella 1 MHz - 1 GHz niin, että otettiin viisi näytettä yhtä dekadia kohden, koska antennin kuvaajasta oli odotettavissa lähes lineaarinen suora. Näytteenottoväliä pienennetään, jos mittaustuloksissa alkaa esiintyä poikkeamia lineaarisuudesta. Kuvassa 21 ja 22 esitetään monopoli-antennille lasketut teoreettiset  $S_{21}$  arvot esitettynä logaritmisena taajuusasteikon kuvaajassa.

Kummallekin kammionleveydelle laskettiin omat  $S_{21}$  kuvaajat, koska kammionleveydet ovat eri korkeuksilla verrattuna maatasoon. Septumin etäisyydellä maatasosta on vaikutus kentänvoimakkuuteen mitattavalla alueella. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä suurempi

etäisyys septumin ja maatasen välillä on, sitä pienempi vallitseva kentänvoimakkuus on. [14, s. 13 - 20.]



Kuva 21. TEM-kammion sähkökentän mittauksiin laskettu teoreettinen  $S_{21}$  kuvaaja monopoliantennille



Kuva 22. GTEM-kammion sähkökentän mittauksiin laskettu teoreettinen  $S_{21}$  kuvaaja monopoliantennille

Kuvaajien erona voitiin huomata, että GTEM-kammiolla antennin vaimennus on suurempi koko taajuusalueen läpi. Tämä johtuu siitä, että GTEM-kammion septumin korkeus on huomattavasti suurempi kuin TEM-kammion. Tästä syystä antenniin kohdistuva kentänvoimakkuus on pienempi ja näin antennille indusoituu pienempi jännite.

Monopoliantennin mitatuilla impedansseilla laskettu teoreettinen kuvaaja on hieman erilainen verrattuna standardin monopoliantennille laskettuun kuvaajaan. Standardissa esitetyn monopoliantennin  $S_{21}$  parametrin kuvaaja esitetään liitteessä 4. Tässä työssä valmistetun monopoliantennin  $S_{21}$  kuvaaja ja standardissa esitetyn antennin  $S_{21}$  kuvaajan erona on, että valmistetun antennin kuvaajassa on pieni notkahdus 1 MHz - 10 MHz välillä. Standardissa esitetty kuvaaja on suora tällä välillä. Lisäksi erona standardin kuvaajaan on, että valmistetun antennin vaimennus on mitatun taajuusalueen läpi keskimäärin noin 7 dB pienempi kuin standardissa annetun antennin.

Standardissa käytetty TEM-kammio on erilainen kuin tässä työssä käytetty TEM-kammio. Työssä käytetyn TEM-kammion septumin etäisyys maatasosta on 43 mm, kun taas standardissa käytetyssä kammiossa etäisyys oli 45 mm. Vertailun vuoksi laskettiin valmistetun antennin vaimennus sovitettuna standardissa käytetyn TEM-kammion mittoihin. Tulokseksi saatiin, että 10 MHz taajuudella valmistetun antennin vaimennus on noin -36,80 dB. Standardissa antennin vaimennus samalla taajuudella on -63,43 dB. Tästä voidaan todeta, että valmistetun monopoliantennin vaimennus on pienempi mitatulla taajuusalueella. Pienemmästä vaimennuksesta aiheutuu, että antenniin indusoituu suurempi jännite. [14, s. 13 - 16.]

### 5.2.2 Loop-antennin mittaus

Loop-antennin induktanssiksi ei ole määritelty standardin tekstissä samanlaista tarkkaa arvoa, kuten monopoliantennille on määritelty tarkka kapasitanssiarvo. Loop-antennin impedanssin esimerkkilaskussa on käytetty 10 MHz:llä 73 nH:n arvoa. Loop-antennin induktanssi ja impedanssi mitattiin taajuusalueen yli piirianalysointorilla samanlaisella mittausjärjestelyllä, kuin monopoliantennin impedanssit mitattiin.

Loop-antennin induktanssiksi 10 MHz:llä laskettiin 22,37 nH. Antennin kontaktia piirilevyn maatasoon yritettiin parantaa samalla tavalla kuin monopoliantennin kontaktia, laittamalla tähtiprikka piirilevyn kuparoidulle puolelle liittimen rungon ja maatason väliin. Tähtiprikka ei parantanut huomattavasti antennin ominaisuuksia, mutta se päätettiin

jättää paikoilleen, koska liitinrunko kytkeytyy maatasoon paremmin sen kautta. Loop-antennin lopulliseksi korkeudeksi prikan kanssa tuli noin 3,9 mm.

Loop-antennin  $S_{21}$  parametrin teoreettisen arvon laskemista varten standardissa on ilmoitettu kaava

$$S_{21} = \frac{V_{ant}}{V_{tem}} = \frac{\mu_0 A_{loop} 2\pi f}{h_{sep} Z_0} \times \frac{50}{\sqrt{(50)^2 + |Z_{ant}|^2}} \quad (10)$$

$V_{ant}$  on antennilta mitattu jännite [V]

$V_{tem}$  on TEM-kammion syötetty jännite [V]

$\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti

$A_{loop}$  on loop-antennin pinta-ala [m<sup>2</sup>]

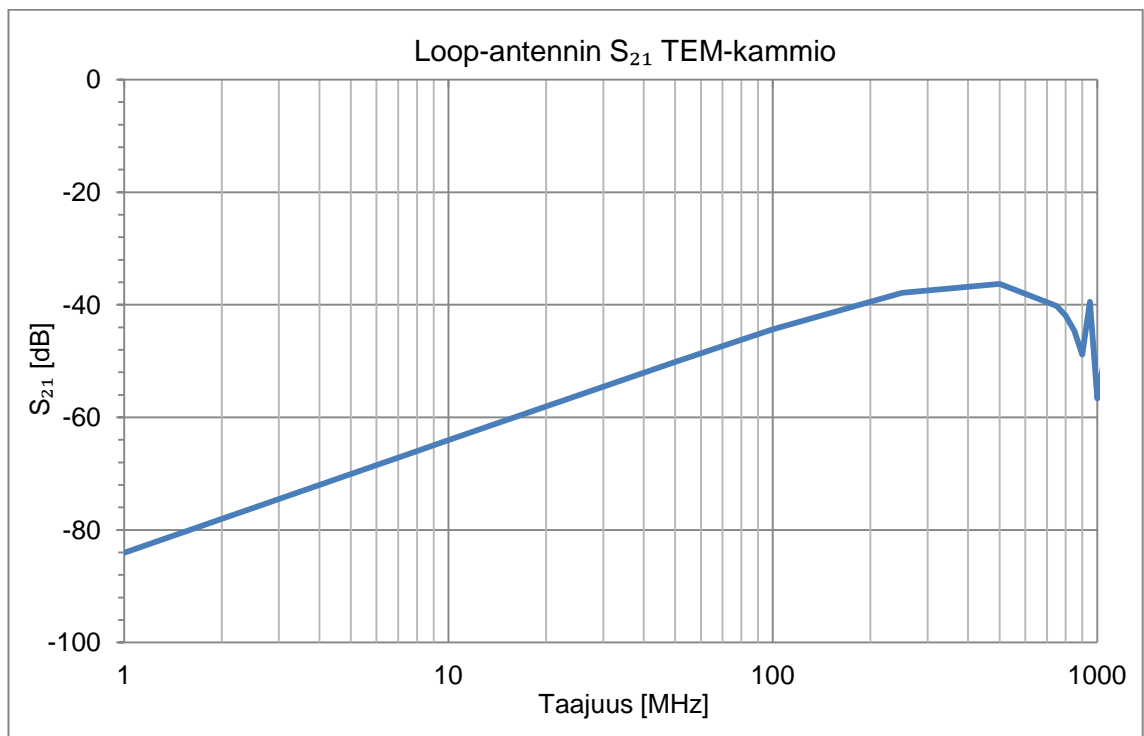
$\pi$  on pii  $\approx 3,1415$

$f$  on taajuus [Hz]

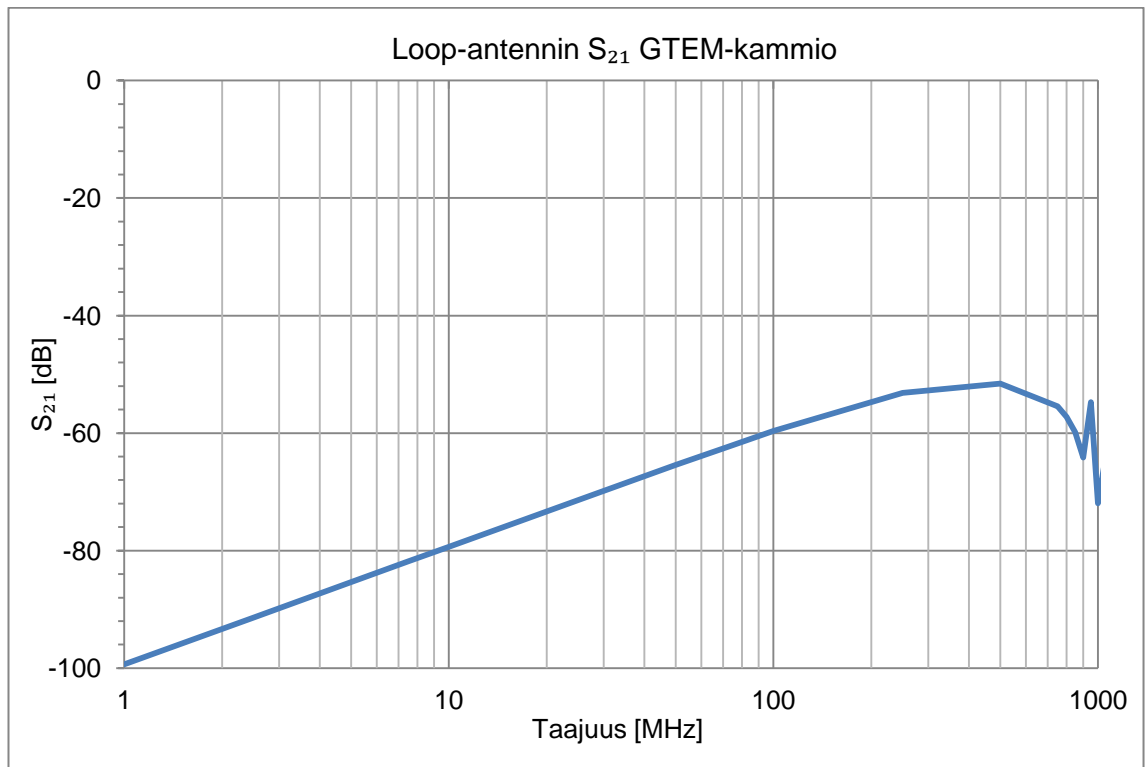
$|Z_{ant}|$  on antennin impedanssi [ $\Omega$ ]

$Z_0$  on vapaantilan aaltoimpedanssi  $\approx 120\pi \approx 377 \Omega$

Loop-antennin impedanssit mitattiin koko tarkasteltavan taajuusalueen läpi. Mittaus tehtiin taajuusalueella 1 MHz - 1 GHz. Kummallekin kammiolle laskettiin omat teoreettiset arvot, joista piirrettiin kuvaajat. Kuvissa 23 ja 24 on esitetty antennien impedanssien mittauksista ja laskuista tuloksena saadut kuvaajat. [14, s. 13 - 20.]



Kuva 23. TEM-kammion magneettikentän mittauksiin laskettu teoreettinen  $S_{21}$  kuvaaja loop-antennille



Kuva 24. GTEM-kammion magneettikentän mittauksiin laskettu teorettinen  $S_{21}$  kuvaaja loop-antennille

Kuvista 23 ja 24 voitiin huomata samanlainen ero kammioiden kohdalla kuten monopoli-antennilla lasketuista tuloksista. GTEM-kammiolla vaimennus on suurempi kuin TEM-kammiolla koko mitatun taajuusalueen läpi. Tämä johtuu GTEM-kammion septumin suuremmasta etäisyydestä maatasoon, alueeseen, millä mittaukset suoritetaan.

Valmistetun loop-antennin kuvaaja poikkeaa standardissa esitetystä loop-antennin kuvaajasta siten, että valmistetun loop-antennin kuvaajassa esiintyy voimakas muutos taajuusalueella 600 MHz - 1 000 MHz. Antennin vaimennus kasvaa suhteellisen voimakkaasti noin 600 MHz:n kohdalla ja jatkaa kasvamistaan taajuuskaistan loppua kohden. Liitteessä 3 esitettyä standardin kuvaajaa tarkasteltaessa voidaan huomata, että vaimennus tasaantuu, mutta ei kuitenkaan ala kasvamaan lisää, kuten valmistetun antennin tapauksessa.

Kun verrataan standardissa esitetyn loop-antennin ja tässä työssä valmistetun loop-antennin vaimennuksia mitatun taajuuskaistan yli, voidaan huomata, että valmistetun antennin vaimennus on 10 MHz:n kohdalla noin 2 dB pienempi. Kun verrataan työssä

valmistetun ja standardissa annetun loop-antennien vaimennuksia keskenään standardin TEM-kammion mittojen mukaan 10 MHz:n taajuudella, saadaan laskettua valmistetun antennin vaimennukseksi -64,5 dB. Standardissa laskettu arvo on -66,11 dB. Näiden tuloksien perusteella voidaan todeta, että valmistettu loop-antenni on vaimennuksen suhteen lähellä standardissa annettuja ohjearvoja lukuun ottamatta 600 MHz:n jälkeen tapahtuvaa vaimennuksen kasvua. Vaimennuksen kasvaminen saattaisi johtua loop-antennin epäideaalisista mitoista, mikä aiheuttaa sen, että se ei sovellu hyvin korkeammilla taajuuksilla tehtäviin mittauksiin. [14, s. 16 - 20.]

### 5.3 Kammioiden sähkö- ja magneettikenttien mittausten mittausjärjestely

TEM- ja GTEM-kammioiden mittaukset tehtiin HP 8752C -piirianalysoitsijalla. Piirianalysoitsijan taajuusalueen rajoituksesta johtuen kalibrointimittaukset tehdään taajuusalueella 300 kHz:stä 1 GHz:iin ja mittaustuloksia tarkastellaan taajuusalueella 1 MHz:stä 1 GHz:iin.

Standardin mukaan mittauksissa saa käyttää piirianalysoitsijaa vain, jos sitä käytetään kammiolle syötettävän RF-häiriön muodostamiseen ja samalla antennille indusoituneen jännitteen mittaamiseen. Liitteessä 5 esitetään kaaviokuva standardien mukaisesta häiriönsietomittausasetelmasta TEM-kammiolla.

Mittausjärjestely piirianalysoitsijalle asetettiin niin, että kammion sisääntulo liitetään piirianalysoitsijan *reflection test porttiin* ja antennin ulostulo liitettiin piirianalysoitsijan *transmission test porttiin*. Mittauksessa käytetään piirianalysoitsijan kumpaakin kanavaa, koska on samanaikaisesti mitattava kammion sisääntulon heijastusta ja antennille indusoitunutta jännitettä. Kammion heijastusta halutaan mitata, jotta saataisiin mahdollisimman tarkka tieto siitä, kuinka suuri kammion sisääntulojännite todellisuudessa on.

Kanava 1 asetettiin *transmission*-mittaustilaan, missä mitataan antennille indusoituvaa jännitettä desibeleinä. Kanava 2 asetettiin *reflection*-mittaustilaan, missä mitataan kammion heijastamaa jännitettä desibeleinä.

Seuraavaksi piirianalysoitsijalle syötettiin mittauksessa käytettävät asetukset. Taajuusväli asetettiin 300 kHz - 1 GHz, mittapisteiden määrä 1601 pisteeseen ja syötettävä teho 18 dBm:iin, mikä on jännitteenä 1,776 V<sub>RMS</sub>. Mittauksen asetusten syöttämisen jälkeen kummatkin portit ja kanavat kalibroitiin. Portteihin liitettiin mittauksissa käytetyt



kaapelit ja liittimet. Mittauksissa käytettiin EMC-laboratorion kaapelia numero 20 ja SMA-liittimillä varustettua kaapelia numero 161.

Ennen kentänvoimakkuuksien mittauksia monopoliantennilla tehtiin neljässä mahdollisessa asennossa testimittaukset, joilla kokeiltiin vaikuttaako antennin asento merkittävästi mittaustulokseen. Huomattiin, että antennin asennon vaihtamisella ei ollut suurta vaikutusta mittaustulokseen, joten päätettiin, että mittaus tehdään vain yhdessä tietystä asennossa. Piirilevyn pohjaan merkittiin pienellä nuolimerkillä, missä asennossa antennimittaukset on suoritettu. Tämä tehtiin, jotta mittauksia voidaan toistaa vastaisuudessa. TEM-kammiota mitattaessa monopoliantennilla pitää piirilevyn pohjaan piirretyn nuolimerkin osoittaa kammion päälle piirrettyä nuolta kohti. GTEM-kammiota mitattaessa pitää monopoliantennin nuolen osoittaa kammion sisääntuloporttia kohden.

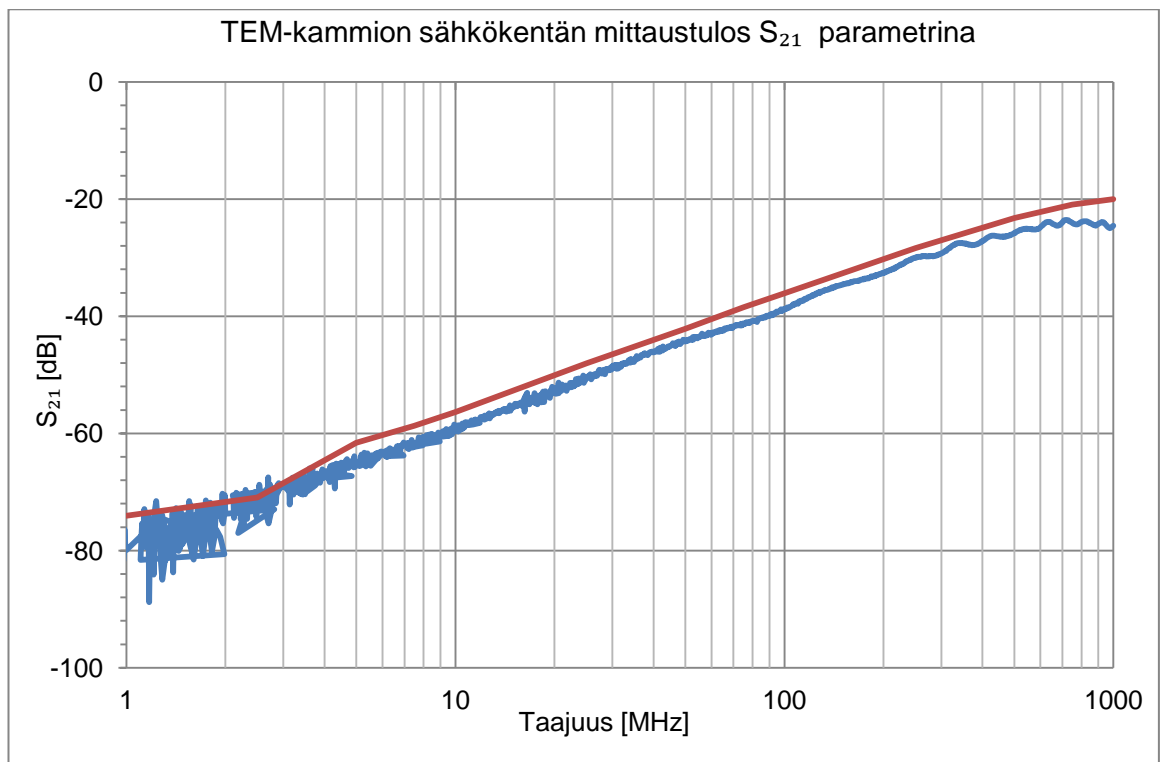
Loop-antennilla tehtiin samat testimittaukset, millä selvitettiin, missä asennossa mittaukset suoritetaan. Loop-antennilla on vain kaksi mahdollista asentoa, jossa mittaukset voidaan suorittaa, koska antennin silmukan pitää olla kohtisuorassa kammion sisään muodostuvaa magneettikenttää kohden, jotta kammion sisällä vallitseva magneettikenttä lävistää antennin silmukan ja indusoituu siihen jännitteenä. Testimittauksissa huomattiin, että kahden asennon välillä ei ollut merkittävää vaihtelua. Piirilevyn pohjaan merkittiin mahdollisia toistomittauksia varten nuolimerkki, joka osoittaa missä asennossa loop-antennin on oltava, kun sillä suoritetaan mittauksia. TEM-kammiota mitattaessa piirilevyn pohjaan piirretyn nuolen pitää osoittaa TEM-kammion päälle piirrettyä nuolta kohden. GTEM-kammiota mitattaessa nuolen pitää osoittaa sitä kylkeä kohden, jolla ei ole sivuluukkuja. [13; 14, s. 13 - 20.]

#### 5.4 Sähkö- ja magneettikenttien mittaustulokset

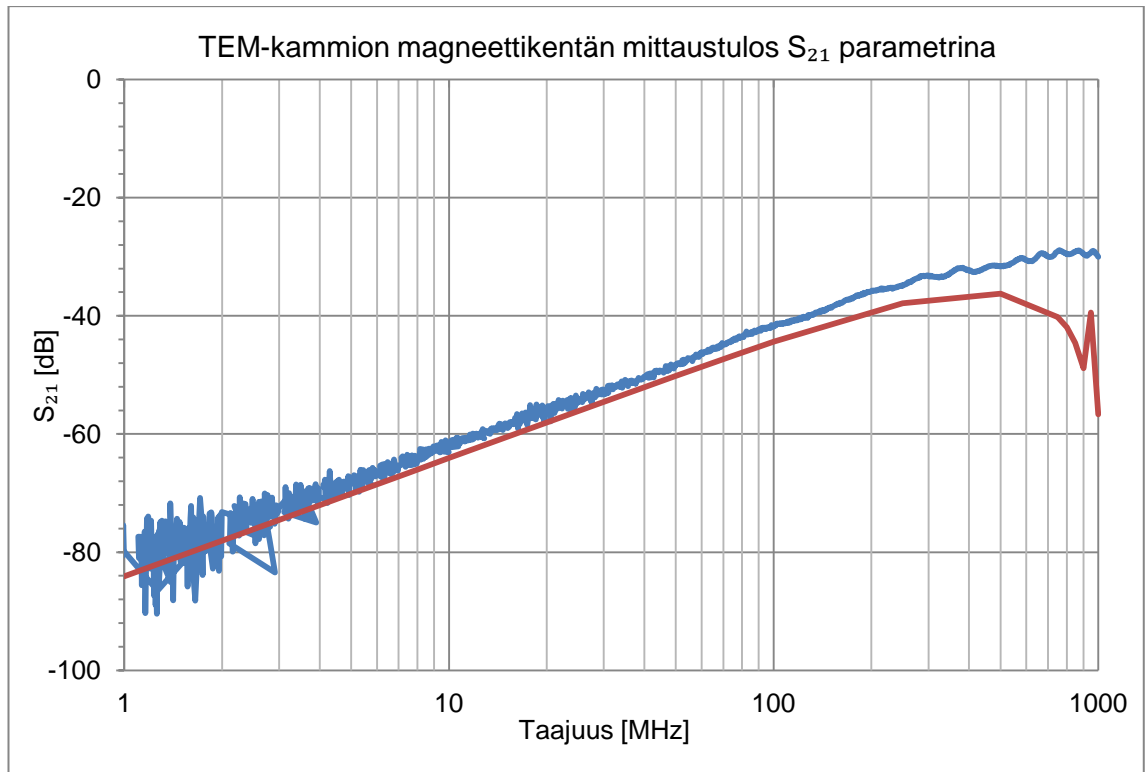
Sähkö- ja magneettikenttien mittaus suoritettiin antennille määritetyissä asennoissa TEM- ja GTEM kammiossa määrättyllä testaus paikalla. Mittauksien tulokset kerättiin piirianalysointilaitteesta tietokoneelle, ja ne käsiteltiin Microsoft Excel -ohjelmassa. Mittaustuloksista laskettiin  $S_{21}$  parametrit, mikä tarkoittaa sitä, että verrattiin kammion sisään-tulon jännitettä  $V_{tem}$  antennille indusoituneeseen jännitteeseen  $V_{ant}$ , kuten kaavoissa 9 (ks. s. 28) ja 10 (ks. s. 31) on esitetty. TEM- ja GTEM-kammioiden sisäänmenoheijastukset vähennettiin piirianalysointilaitteesta syötetystä tehosta, jolloin mittaustuloksiin saatiin korjattua tarkempi sisäänmenojännite. Antennille indusoituneen jännitteen ja kammion

sisäänmenojännitteen suhde muutettiin desibeleiksi, ja niistä piirrettiin samanlaiset kuvaajat, kuten antennien teoreettisista mittauksista on piirretty.

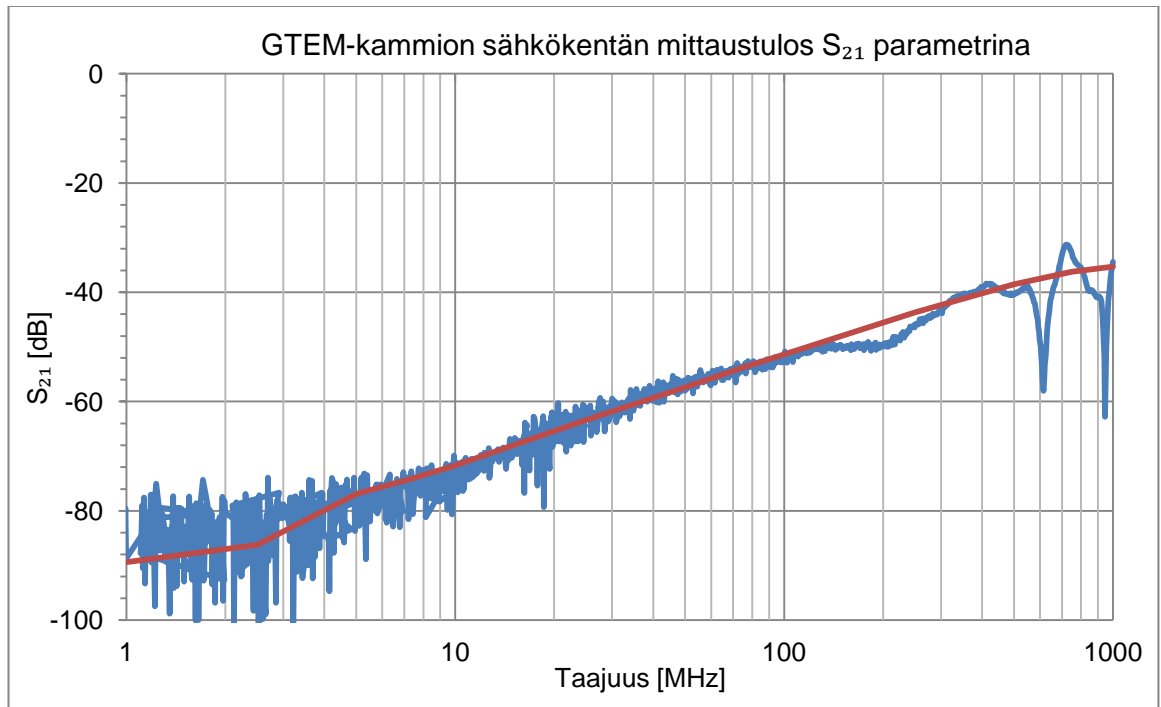
Kuvassa 25 esitetään TEM-kammion sähkökentän mittauksien tulos ja kuvassa 26 esitetään TEM-kammion magneettikentän mittauksien tulos. Kuvassa 27 esitetään GTEM-kammion sähkökentän mittauksen tulos ja kuvassa 28 esitetään GTEM-kammion magneettikentän mittauksen tulos. Mittaustulokset esitetään desibeleinä 1 MHz - 1 GHz taajuusalueella. Kuvissa sininen viiva esittää mitattua tulosta, ja punainen viiva esittää teoreettisesti laskettua tulosta.



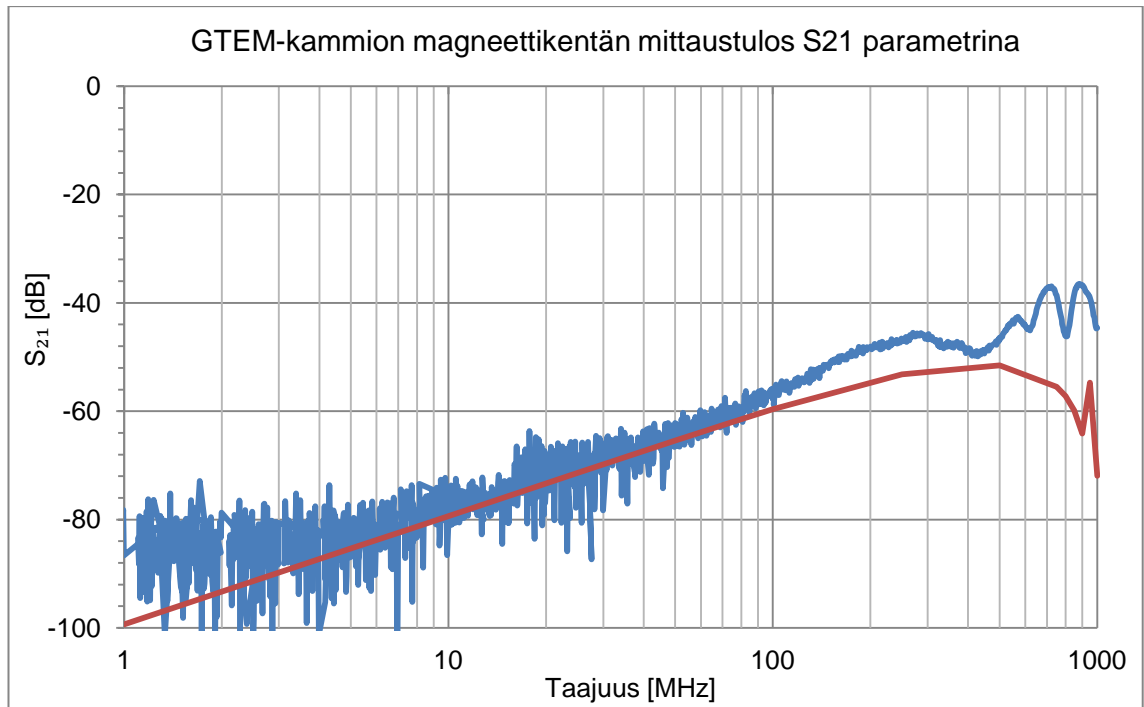
Kuva 25. TEM-kammion sähkökentän voimakkuus mitattuna monopoli-antennille indusoituneen jännitteen ja kammiolle syötetyn sisääntulojännitteen suhteena



Kuva 26. TEM-kammion magneettikentän voimakkuus mitattuna loop-antennille indusoituneen jännitteen ja kammiolle syötetyn sisääntulojännitteen suhteena



Kuva 27. GTEM-kammion sähkökentän voimakkuus mitattuna monopoli-antennille indusoituneen jännitteen ja kammiolle syötetyn sisääntulojännitteen suhteena



Kuva 28. GTEM-kammion magneettikentän voimakkuus mitattuna loop-antennille indusoituneen jännitteen ja kammiolle syötetyn sisääntulojännitteen suhteena

Kuvista 25, 26, 27 ja 28 voidaan huomata, että matalilla taajuuksilla tapahtuu paljon jännitteiden vaihtelua. Tämä voi johtua valmistettujen antennien muotojen ja mittojen epäideaalisuuksista, joita ovat esimerkiksi monopoli-antennin kapasitanssilevyn epätasainen asento tai loop-antennin epätasainen korkeus pituutensa läpi. Osasyynä jännitteen vaihteluun matalilla taajuuksilla voi olla antennien pieni mitta, mikä aiheuttaa sen, että antennit eivät sovellu kovin hyvin matalilla taajuuksilla tehtäviin mittauksiin. Kuvista 25, 26, 27 ja 28 nähdään, kun päästään korkeammille taajuuksille ja aallonpituuden pienentyessä jännitteiden voimakas vaihtelu alkaa tasaantua.

Lisäksi syynä mitattujen jännitteiden voimakkaaseen vaihteluun saattaa olla kammiolle syötetty pieni teho, minkä seurauksena kammion sisälle ei saatu muodostettua kovinkaan suuria kentänvoimakkuuksia. Kun TEM-kammiolle syötettiin 18 dBm:n teho laskettiin, että sen sisälle muodostuu noin 45 V/m suuruinen sähkökenttä septumin ja maatason väliin. GTEM-kammiolle samalla teholla syntyy vain 7,5 V/m suuruinen sähkökenttä. GTEM-kammiolla syntyy pienempi kenttä, koska sen septumin etäisyys maatasoon ja alueeseen missä mittaukset tehdään, on suurempi. Jos mittaukset tehtäisiin suuremmalla teholla, saatettaisiin antenneilla saada mitattua tasaisempia tuloksia. [13; 14, s. 13 - 20.]

## 6 Komponentin kotelon korkeuden vaikutus kentänvoimakkuuteen

IEC 62132 - 2 -standardissa on annettu ohjeet, miten ottaa huomioon häiriönsietoteissa mitattavan komponentin kotelon korkeus, ja miten tehdä sen vaikutuksesta tarvittava virhekorjaus kentänvoimakkuuteen. TEM- tai GTEM-kammion sisällä sijaitsevalla alueella, missä mittausta suoritetaan, oletetaan kentänvoimakkuuden olevan homogeeninen. Kun testattava komponentti on TEM- tai GTEM-kammion sisällä mitattavana, se on juotettuna mittausta varten suunniteltuun testilevyyn. Testilevy on puristettuna reunoistaan TEM- tai GTEM-kammion seinämään ja näin ne ovat samassa maatasossa. Komponentin korkeuden ja septumin etäisyyden välinen muutos saattaa aiheuttaa pieniä muutoksia kentänvoimakkuudessa.

Kun TEM ja GTEM-kammion septumin ja mitattavan komponentin korkeuden välinen ero on pienempi kuin septumin ja maatason välinen ero, pitää komponentin korkeuden vaikutus TEM- ja GTEM-kammioiden sisälle muodostuviin kentänvoimakkuuksiin ottaa huomioon ja korjata. Standardissa on ilmoitettu kaava tätä virhekorjausta varten.

$$E - \text{field correction} = \text{Septum height} / (\text{Septum height} - \text{Diepad height}) \quad (11)$$

*E - field correction* on sähkökentän korjaus [%]

*Septum height* on septumin korkeus [m]

*Diepad height* on komponentin korkeus [m]

Taulukko 2. Sähkökentän korjaus eri komponenteille TEM-kammiossa

Tuote	Komponentin korkeus [mm]	Korjaus [%]	Korjaus [dB]
SCC 1300	4,5	12	0,96
SCA 1000	5,08	13	1,09
SCA 830	3,3	8	0,69

Taulukko 3. Sähkökentän korjaus eri komponenteilla GTEM-kammiossa

Tuote	Komponentin korkeus [mm]	Korjaus [%]	Korjaus [dB]
SCC 1300	4,5	2	0,17
SCA 1000	5,08	2	0,20
SCA 830	3,3	1	0,13

Kaavalla 11 laskettiin sähkökentän korjaukset muutamalle Murata Electronics Oy:n kiihtyvyyssanturille TEM- ja GTEM-kammioilla mitattaessa. Taulukossa 2 ja 3 on esitetty

SCC 1300-, SCA 1000- ja SCA 830 -tuoteperheiden komponenteille kotelon korkeuden aiheuttama sähkökentän korjaus TEM-kammiossa ja GTEM-kammioissa häiriönsietotestejä varten prosentteina ja desibeleinä. [14, s. 20.]

## 7 Yhteenveto

Insinööriyössä oli tavoitteena tutkia Murata Electronics Oy:n EMC-laboratorion EMC-validointitesteissä käytettävien TEM- ja GTEM-kammioiden muodostamien sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksia. Tavoitteena oli TEM- ja GTEM-kammioiden impedanssikäyrien mittauksien ja IEC 62132 - 2 -standardin mukaisien sähkö- ja magneettikenttien mittaussantennien avulla parantaa kammioiden muodostamien kentänvoimakkuuksien vaihtelua niin, että kentänvoimakkuuden 6 dB vaihtelu saadaan pienennettyä lähes merkityksettömäksi.

Aluksi mitattiin TEM- ja GTEM-kammioiden impedanssikäyrät EMC-mittauksissa käytetyn taajuusalueen yli. Impedanssikäyrien avulla pystyttiin tarkentamaan kammiolle syötetävän tehon suuruutta, millä saatiin säädettyä kentän vaihtelua taajuusalueen yli halutulle tasolle. Kun kentän voimakkuuden vaihtelut saadaan tasaiseksi, pienentyy epävarmuus kentänvoimakkuudesta kammion sisällä ja vältetään mahdollinen ylitestaus.

Seuraavaksi valmistettiin IEC 62132 - 2 -standardissa annettujen ohjeiden mukaiset antennit sähkö- ja magneettikenttien mittauksia varten. Valmistettujen antennien impedanssit mitattiin. Antennien impedanssien avulla laskettiin standardin mukaisesti antennien aiheuttama vaimennus TEM- ja GTEM-kammioiden kentänvoimakkuusmittauksia varten. Antenneilla suoritettiin TEM- ja GTEM-kammioiden kentänvoimakkuuksien mittaukset ja mittaustuloksia verrattiin laskettuihin teoreettisiin arvoihin sekä standardissa käytettyjen antennien arvoihin.

Insinööriyön tavoitteena ollut kentänvoimakkuuksien kalibrointia ei kuitenkaan ehditty tekemään työn aikataulun mukaisesti, koska tarvittavaa ohjelmistoa kalibrointimittauksien suorittamiseen ei saatu ajoissa. Insinööriyössä saatiin mitattua ja tarkasteltua kaikki kalibrointimittauksien suorittamiseen tarvittava tieto TEM- ja GTEM-kammioista, ja valmistetuista antenneista.

Työtä tehtäessä törmättiin joihinkin epäkohtiin IEC 62132 - 2 -standardin ohjeissa. Standardissa huomattiin olevan ristiriitoja ja kohtia, joissa oli tulkinnanvaraa. Esimerkkinä mainittakoon standardin ohjeissa esiintynyt ristiriitaisuus siitä, pitääkö antennin piirilevyn olla yksi- vai kaksipuoleinen. Standardin ohjeissa mainittiin, kun antenni valmistetaan piirilevylle, yhdeltä puolelta kuparoitu piirilevy riittää, mutta kuvatekstissä

mainitaan piirilevyn kuparoinnin kaksipuoleisuus pakolliseksi. Edellisen maininnan lisäksi standardissa oli antennien valmistusohjeiden ohessa joitakin pieniä huomautustekstejä, joissa mainittiin joidenkin antennien mittojen toleranssien olevan vielä työn alla. Tämä aiheutti pientä epävarmuutta ja herätti samalla ajatuksia standardin ohjeiden keskeneräisyydestä, sekä menetelmän luotettavuudesta.



## Lähteet

- 1 Williams, Tim. 2007. EMC for Product Designers fourth edition. Great Britain: Newnes.
- 2 Lehto, Arto, Räisänen, Antti. 2001. Mikroaaltomittaustekniikka. Helsinki: Otatieto.
- 3 Rajamäki, Jyri. 6/2000. EMC- direktiivin ensimmäiset kymmenen vuotta. Verkkodokumentti.< <http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/6-2000.pdf> >. Luettu 1.3.2013
- 4 Häkkinen, Esa, Fallström, Kim, Haapalinna, Atte & Kärhä, Petri. 1999. Häiriöt mittauksissa. Verkkodokumentti. < <http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/hairmit.pdf> >. Luettu 1.3.2013
- 5 Björkman, Michael, et al. 2008. EMC ja rakennusten sähkötekniikka. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 6 Kuisma, M. Johtuvat häiriöt. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti. <<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0200/luennot/l4-johtuvat.pdf>>. Luettu 11.3.2013
- 7 Kuisma, M. EMC ja sähkömagnetismi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti. <[https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0200/luennot/l2\\_smg\\_osa\\_1.pdf](https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0200/luennot/l2_smg_osa_1.pdf)>. Luettu 13.3.2013
- 8 Clemens, Icheln. 1995. The construction and application of a GTEM cell. Diplomityö. Verkkodokumentti.< [http://users.tkk.fi/icheln/dip\\_icheln.pdf](http://users.tkk.fi/icheln/dip_icheln.pdf)>. Luettu 25.3.2013
- 9 Kresimir, Malerie. 2001. Electromagnetic-compatibility analysis using TEM cells. Verkkodokumentti.< <http://eetimes.com/electronics-news/4196997/Electromagnetic-Compatibility-Analysis-Using-TEM-Cells>>. Luettu 25.3.2013
- 10 Häiriöt kaukokentässä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.< <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0200/luennot/l3kaukokentta.pdf>>. Luettu 25.3.2013
- 11 GTEM!<sup>TM</sup> Hardware software manual. Emco, 1993
- 12 HP 8752C and HP8753D Network Analyzers Technical Specifications. Verkkodokumentti. <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5962-9770E.pdf>>. Luettu 24.4.2013
- 13 HP 8752C Network Analyzers User's Guide. Verkkodokumentti. <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/08752-90135.pdf>>. Luettu 24.4.2013
- 14 IEC 62132-2: Integrated circuits - Measurements of electromagnetic immunity - Part 2: Measurement of radiated immunity - TEM cell and wideband TEM cell method. 2010. Switzerland: International Electrotechnical Commission.

TEM-kammion datalehti



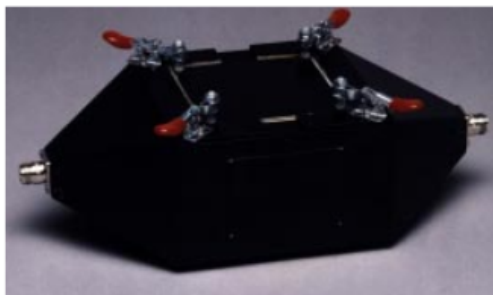
**Fischer Custom Communications, Inc.**

Fischer Custom Communications, Inc. offers a family of Transverse Electromagnetic (TEM) cells that can be used for both emissions and immunity testing.

The patented septum design offers broad frequency response, excellent field uniformity, low VSWR, and low insertion loss.

Models FCC-TEMfJM1, FCC-TEMfJM2 and FCC-TEMfJMB are ideal for radiated emission testing of semiconductor devices according to SAE1752/3.

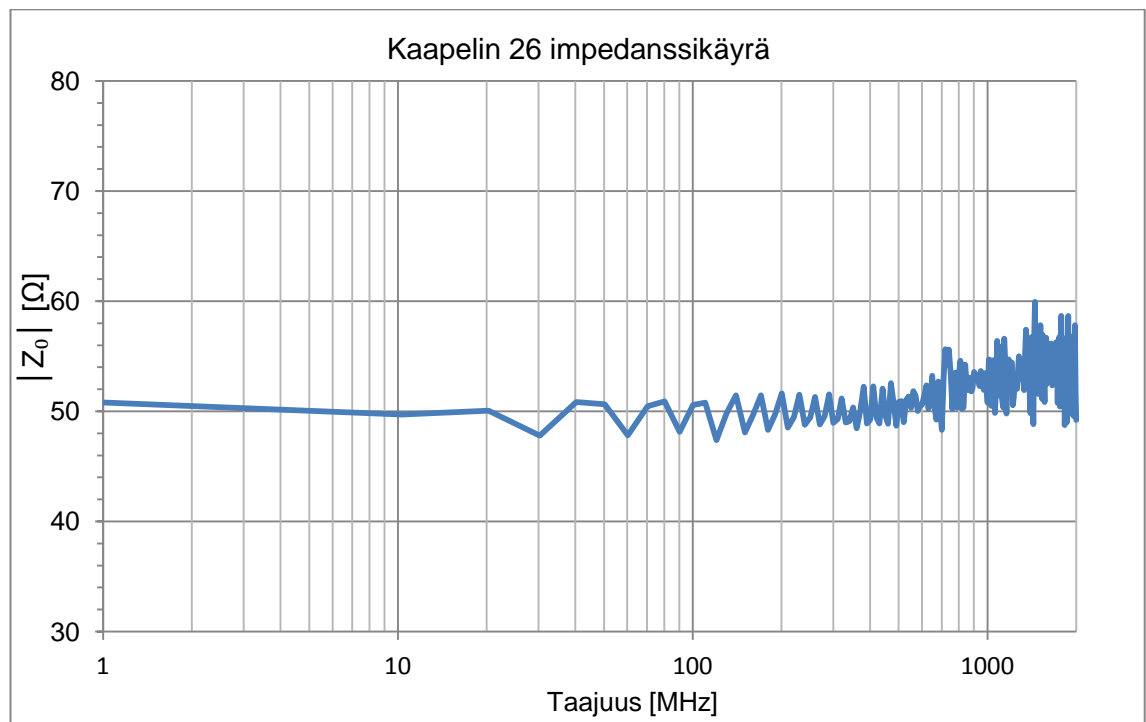
The FCC-TEMfJM1, FCC-TEMfJM2 and the FCC-TEMfJMB can be used for immunity testing and require less than 3.7 milliwatts input power to achieve a 10 volt per meter Electric Field and 37 watts to achieve 1000 volt per meter Electric Field



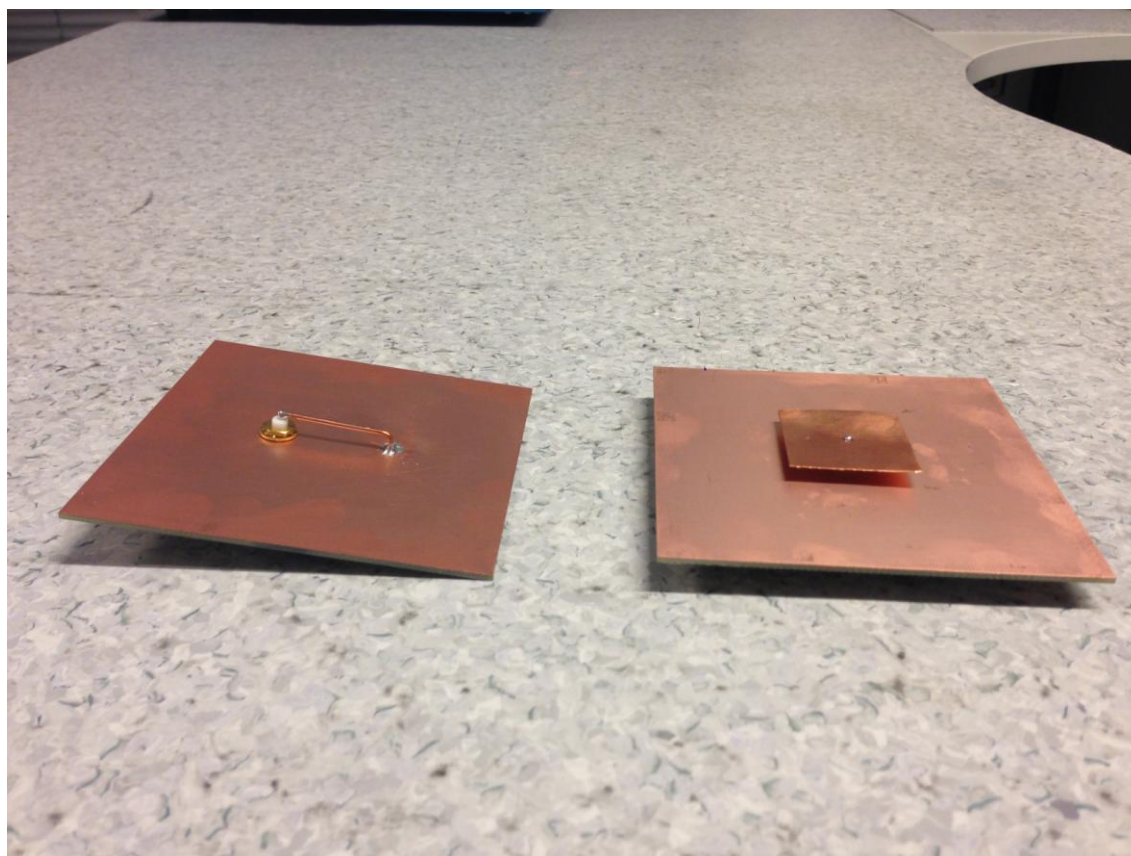
TEM  
CELLS

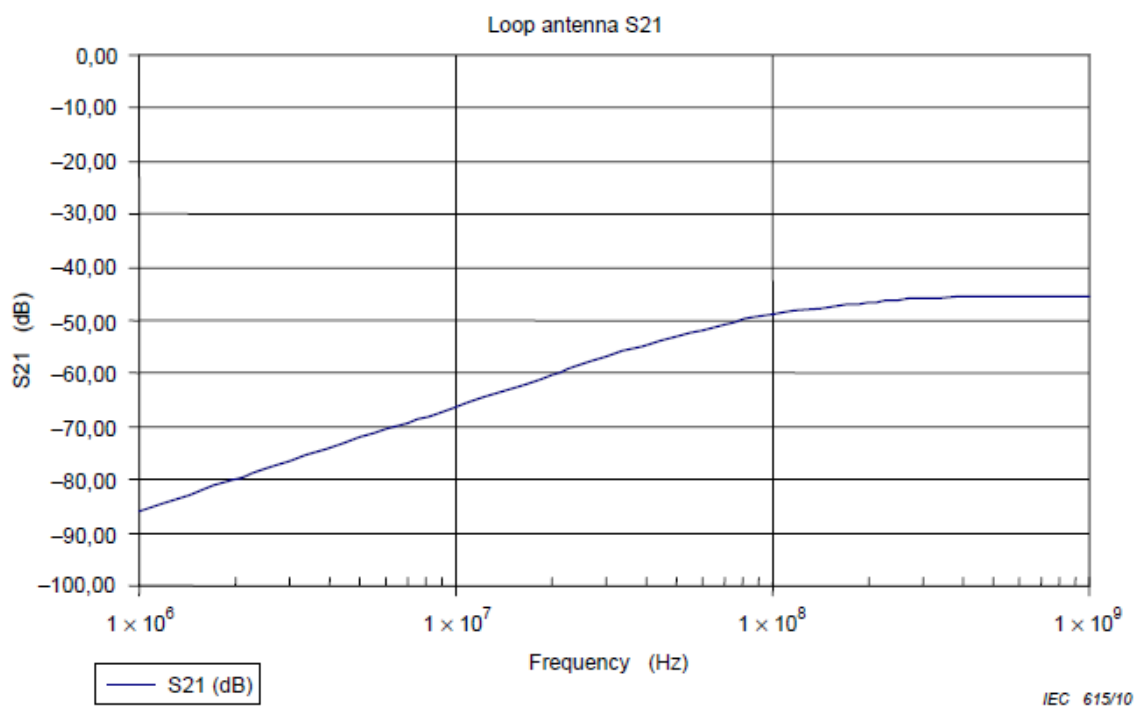
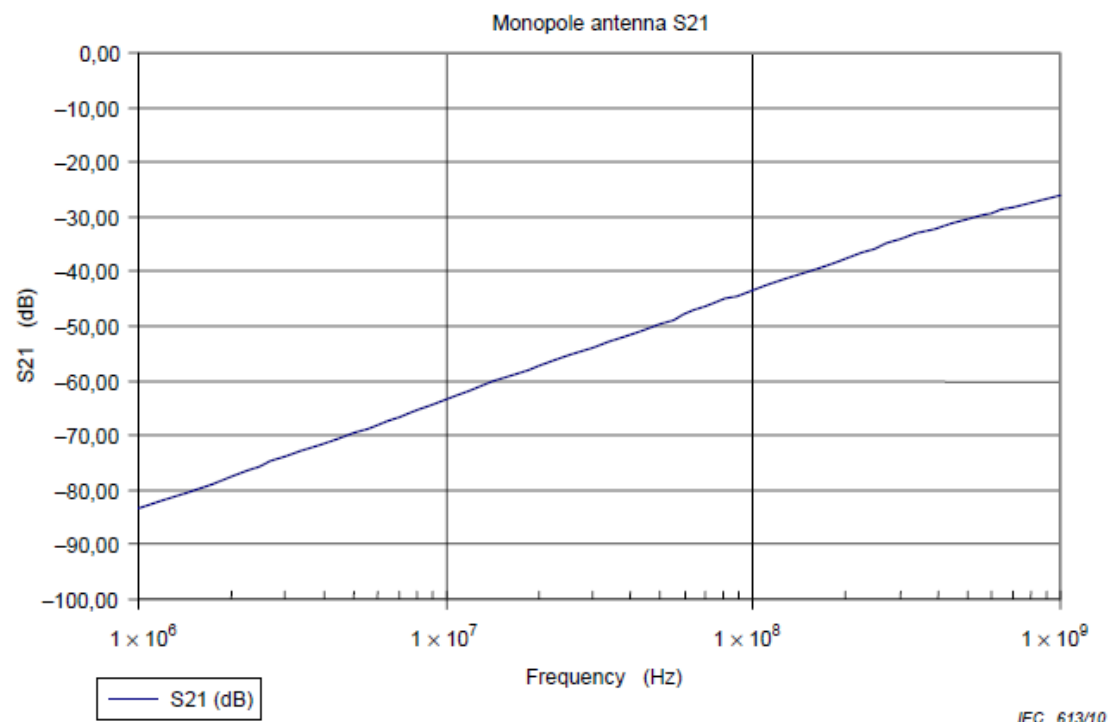
Specifications	FCC-TEMfJM1	FCC-TEMfJM2	FCC-TEMfJMB
Frequency range	DC- 1,200 MHz	DC- 1,600 MHz	DC- 2,000 MHz
Maximum EUT dimensions (cm)	6 x 6 x 1	6 x 6 x 1	6 x 6 x 1
Maximum VSWR	1.2:1	1.2:1	1.25:1
RF connector	N	N	N
Maximum input power	500 watts	500 watts	500 watts
EUT port dimensions (cm)	9.1 x 9.1	9.1 x 9.1	9.1 x 9.1
Dimensions (cm)	15.2 x 9.9 x 33.8	15.2 x 9.9 x 33.8	15.2 x 9.9 x 33.8

*Contact the applications engineers at Fischer Custom Communications, Inc. to discuss your requirements for emissions and immunity EMC testing.*

**Kaapelin 26 impedanssikäyrä**

## Loop-antenni ja monopoliantenni



Standardissa esitetyt antennien  $S_{21}$  kuvaajat

## Häiriönsietotestausasetelma TEM-kammiolla

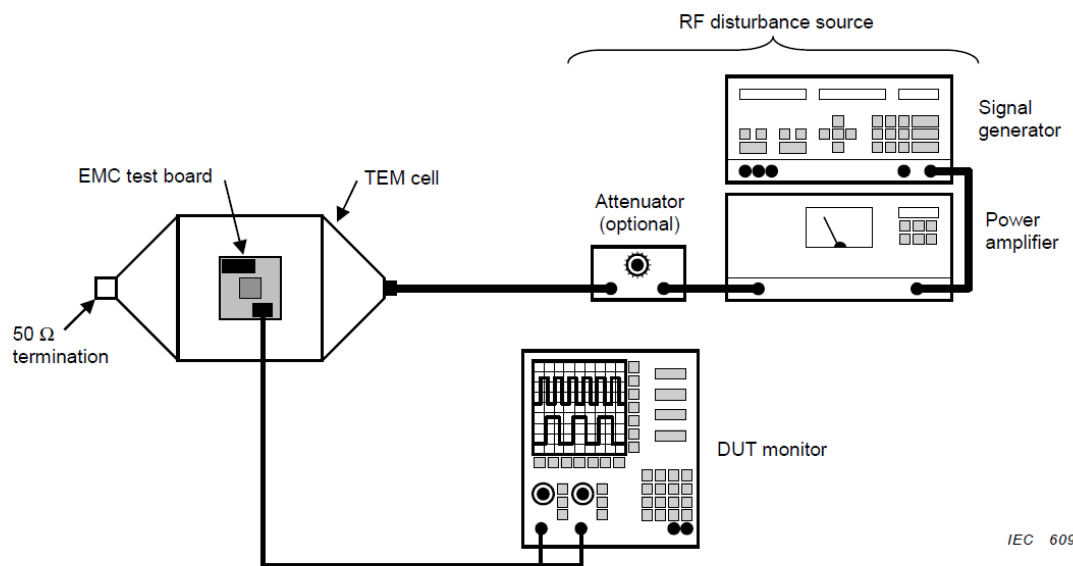


Figure 2 – TEM cell test set-up