

Niklas Poikkeus

# Matalataajuisien säteilevien emissioiden kenttämittaus PV-järjestelmässä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

21.9.2017

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Niklas Poikkeus Matalataajuisten säteilevien emissioiden kenttämittaus PV-järjestelmässä  34 sivua + 1 liite 21.9.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jukka Karppinen Principal Engineer Kari Ahlskog
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli suorittaa matalataajuisten säteilevien emissioiden mittaus PV-järjestelmässä käyttäen CISPR -standardissa määritettyjen In-situ-mittausten ohjeistuksen mukaisesti. Työn tilaaja oli ABB, Power Conversion, Solar Inverters- yksikkö.</p> <p>Työssä perehdyttiin EMC-ilmiöihin sekä EMC-direktiiviin ja standardeihin. Työn tavoitteena oli perehtyä säteilevien emissioiden mittaustapaan alle 30 MHz:in taajuusalueella ja suorittaa säteilevien emissioiden kenttä- ja laboratoriomittaus käyttäen CISPR-standardissa määritettyjen ohjeiden mukaisesti alle 30Mhz taajuusalueella.</p> <p>Työn tuloksena saatiin suoritettua matalataajuisten säteilevien emissioiden mittaukset In-situ ja laboratorio olosuhteissa EMC-standardien mukaisesti.</p>	
Avainsanat	EMC, Säteilevä emissio, LF, VLF, HF, CISPR

Author Title	Niklas Poikkeus In Situ Measurements of Low Frequency Radiated Emissions in the PV-System
Number of Pages Date	34 pages + 1 appendix 21 September 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor(s)	Jukka Karppinen, Senior Lecturer Kari Ahlskog, Principal Engineer
<p>The purpose of this study was to measure In-situ radiated emissions of VLF to HF frequency range in the PV-system using the guideline defined in CISPR standard. The study was made for ABB, Power Conversion, Solar Inverters unit.</p> <p>The focus of this study was on EMC phenomena, directive and standards. The purpose was to study the radiated emissions measurement method under 30 Mhz frequency range and perform the in-situ and laboratory measurement of radiated emissions under 30Mhz frequency range according to the measurement methods defined in CISPR standard.</p> <p>As a result of this thesis, measurements of VLF to HF frequency range radiated emissions were performed in a laboratory and in-situ environments according to the EMC standards.</p>	
Keywords	EMC, Radiated emissions, LF , VLF, HF. CISPR

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teoria	1
2.1	Maxwellin yhtälöt	1
2.2	Sähkömagneettiset kentät	2
3	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	3
3.1	Sähkömagneettinen häiriö	3
3.2.	Häiriöiltä suojautuminen	5
4	Direktiivit ja standardit	8
4.1	CISPR11-standardin vaatimukset	10
5	Sähkömagneettisten häiriöiden mittaaminen	13
5.1	Säteilevän sähkömagneettinen häiriön mittaaminen	13
5.2	Laboratoriomittaus	14
5.3	Kenttämittaus	15
6	Mittalaitteet	18
7	Mittaustulokset	19
7.1	Laboratoriomittaus	19
7.2.	Kenttämittaus	24
8	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

### Liitteet

Liite 1. Test report: Radiated emission 150 kHz – 30 MHz.

**Lyhenteet**

CISPR	International Special Committee on Radio Interference; Kansainvälinen erityiskomitea radiohäiriöistä
EMC	Electromagnetic Compatibility; Sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference; Sähkömagneettinen häiriö
EUT	Equipment under test; Testattava laite
LAS	Loop Antenna System; Silmukka-antenni järjestelmä
HF	High Frequency; Korkea taajuus
VLF	Very Low Frequency; Erittäin matala taajuus
LF	Low Frequency; Matala taajuus
RF	Radio Frequency; Radio taajuus

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on suorittaa matalataajuisien säteilevien emissioiden mittaus PV-järjestelmässä käyttäen standardissa CISPR16-2-5 määritettyjen In-situ-mittausten ohjeistuksen mukaisesti.

Työn tavoitteena on perehtyä EMC-ilmiöihin sekä EMC-direktiiviin ja standardeihin. Työn tavoitteena oli perehtyä säteilevien emissioiden mittaustapaan alle 30 MHz:in taajuusalueella ja suorittaa säteilevien emissioiden kenttämittaus sekä sitä simuloiva mittaus laboratorio-olosuhteissa EMC-standardien mukaisesti. Työssä perehdytään CISPR16-standardin määrittämiin mittausmenetelmiin, toimintatapoihin ja raja-arvoihin säteilevien emissioiden osalta.

## 2 Teoria

### 2.1 Maxwellin yhtälöt

Maxwellin yhtälöt kuvaavat sähköisten ja magneettisten kenttien käyttäytymistä ja vuorovaikutusta. Maxwellin yhtälöt kuvaavat sähkö- ja magnetismin perusominaisuuksia.

Maxwellin yhtälöt esitettynä differentiaalimuodossa (Radiotekniikan perusteet. 2011)

Maxwellin ensimmäinen yhtälö on Gaussin laki:

$$\vec{\nu} \cdot D = \rho$$

jossa  $D$  on sähkövuontiheys  $\left[ \frac{As}{m^2} \right]$  ja  $\rho$  on sähköinen varaustiheys

$$\left[ \frac{As}{m^3} \right].$$

Maxwellin toinen yhtälö on Gaussin laki magneettikentille:

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{B} = \rho$$

jossa B on magneettivuon tiheys  $\left[ \frac{Vs}{m^2} \right]$ .

Maxwellin kolmas yhtälö on Faradayn induktiolaki:

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus  $\left[ \frac{V}{m} \right]$ .

Maxwellin neljäs yhtälö on Ampere-Maxwellin laki:

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

jossa H on magneettikentän voimakkuus  $\left[ \frac{A}{m} \right]$  ja J on sähkövirran

tiheys  $\left[ \frac{A}{m^2} \right]$

## 2.2 Sähkömagneettiset kentät

Vaihtelevat jännitteet luovat säteileviä sähköisiä aaltoja, kun taas vaihtelevat virrat luovat magneettisia aaltoja. kuljettuaan noin 1-6 aallonpituuden verran molemmat muuttuvat sähkömagneettisiksi taso-aalloiksi. Aaltojen edetessä niiden voimakkuus vaihtelee luoden sähkömagneettisen kentän. Sähkömagneettiset aallot kulkeutuvat ilman, tyhjiön ja eristävien aineiden läpi. Elektroniset laitteet vuotavat näitä kenttiä tahattomasti tai laitteen toimiessa radiolähettimenä. (Armstrong, 5–7)

Sähkö- ja magneettikentän voimakkuuden suhdetta (E/H) kutsutaan aaltoimpedanssiksi ja se määräytyy lähteen ominaisuudesta ja etäisyydestä d.

Kaukokentässä  $d > \lambda/2\pi$ , aalto tunnetaan tasoaaltona ja sen impedanssi on yhtä suuri kuin vapaan tilan impedanssi, joka voidaan johtaa Maxwellin aaltoyhtälöistä:

$$Z_0 = \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\right)} = 120 \pi = 377 \Omega ,$$

jossa  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$  ja  $\varepsilon_0 = 8.84 * 10^{-12} \text{ F/m}$ .

Lähikentässä,  $d < \lambda/2\pi$  aaltoimpedanssi määräytyy lähteen ominaisuuksien mukaan. Heikkovirtainen ja suurjännitteinen säteilijä tuottaa pääsääntöisesti sähkökentän, jossa on suuri impedanssi, kun taas suurvirtainen ja pienjännitteinen säteilijä tuottaa magneettikentän, jossa on matala impedanssi.

### 3 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Euroopan unionin jäsenmailla on velvollisuus suojata radioliikennettä, sähkö- ja tietoliikenneverkkoja sekä niihin liittyviä laitteita sähkömagneettiselta häiriöltä. Sähkölaitteilta edellytetään EMC-direktiivin 2014/30/EU (EMC, electromagnetic compatibility) mukaista toimintakykyä niiden sähkömagneettisessa toimintaympäristössä. Sähkölaitteiden tulee toimia luotettavasti ja turvallisesti sekä toimia moitteettomasti muiden laitteiden kanssa niille tarkoitettussa toimintaympäristössä. Häiriötön toiminta käyttöympäristössä saadaan saavutettua laitteiden sähkömagneettisella yhteensopivuudella. (EMC Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

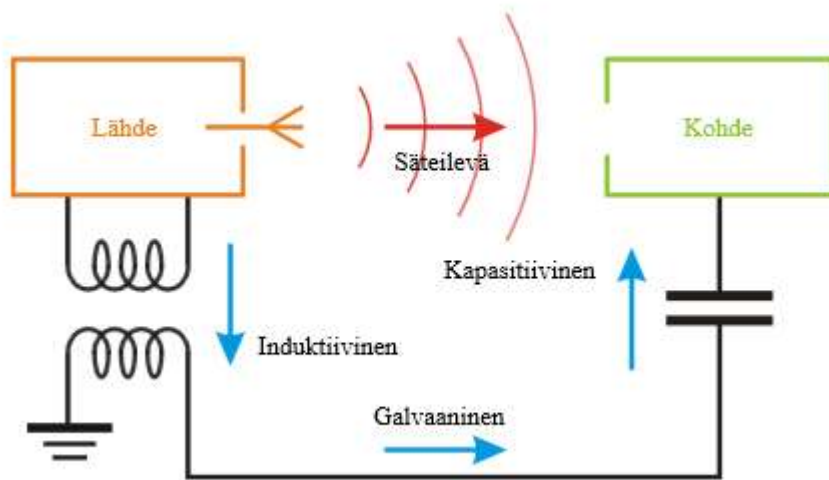
#### 3.1 Sähkömagneettinen häiriö

Sähkölaitteiden johdot, kaapelit, liittimet tai muut johtimet altistuvat sähkö-, magneetti- tai sähkömagneettisille kentille, virrat ja jännitteet indusoituvat niihin. Nämä virrat ja jännitteet ovat häiriöitä, jotka saattavat muuttaa sähkölaitteen toimintakykyä sen käyttöympäristössä. Kun indusoitunut sähköinen häiriö aiheuttaa laitteen toiminnassa

suuria muutoksia, sanotaan laitteen kärsivän sähkömagneettisista häiriöistä. Sähkömagneettinen häiriö voi kytkeytyä laitteeseen usealla eri tavalla. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Häiriöiden kytkeytyminen voidaan jakaa neljään päätyyppiin(Kuva 1):

- galvaaninen kytkeytyminen
- induktiivinen kytkeytyminen
- kapasitiivinen kytkeytyminen
- säteilevä kytkeytyminen



Kuva 1. Häiriöiden kytkeytyminen. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Galvaanisesti kytkeytyvät eli johtuvat häiriöt kytkeytyvät piiriin fyysisten reittien kautta. Johtuvat häiriöt jaetaan kytkeytymistavan mukaan eromuotoisiin (*differential mode*) ja yhteismuotoisiin (*common mode*) häiriöihin. Eromuotoinen häiriö kytkeytyy piiriin fyysisiä reittejä pitkin. Eromuotoinen häiriö mitataan johtimien välisenä virtana tai jännitteenä.. Yhteismuotoinen häiriö kytkeytyy piiriin kytkeytymistien kautta, joka ei ole signaalitie. Yhteismuotoinen häiriö voidaan mitata saman vaiheisena virtana tai jännitteenä signaalijohtimien ja maan välillä. Yhteismuotoinen häiriö ei välttämättä ole haitallista koska yhteismuotoinen häiriö etenee signaalijohtimissa saman vaiheisena eikä suoraan aiheuta johtimiin jännite-eroa. Käytännön johtimet eivät ole ideaalisia, joten häiriö voi muuttua eromuotoiseksi epäsymmetrisyyden tai ylimääräisten kytkeytymisteiden vaikutuksesta. Kasvattamalla kytkentätien impedanssia voidaan häiriötä vaimentaa. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Induktiivisella kytkeytymisellä tarkoitetaan johtimessa kulkevan sähkövirran muuttavan magneettikentän johdinsilmukkaan indusoimaa häiriöjännitettä. Ilmiö aiheuttaa ongelmia signaalien siirrossa sekä mittaustekniikan alueella heikkoja signaaleja mitattaessa. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Kapasitiivisellä kytkeytymisellä tarkoitetaan kapasitanssia, joka syntyy kahden johtimen välille. Syntynyt kapasitanssi voi kytkeä häiriövirran. Kapasitiiviset häiriöt aiheutuvat potentiaalierojen aiheuttamasta sähkökentästä, eikä niitä voi syntyä johtimien ollessa samassa potentiaalissa. Kapasitiivinen häiriö kytkeytyy helpoiten piirin impedanssin ollessa suurin. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Säteilevä kytkeytyminen tarkoittaa sähkömagneettisen säteilyn tai induktion tuottamaa häiriötä. Säteilevä kytkeytyminen tuottaa säteilevää RF-häiriötä. Lähteinä RF-häiriölle toimivat yleisesti korkeataajuuksista ja joissakin tapauksissa matalataajuuksista sähkövirtaa tai jännitettä sisältävät laitteet. RF-häiriöt heikentävät sähkölaitteiden toimivuutta ja aiheuttavat vikatiloja ja virheitä, joiden voimakkuus riippuu vastaanottavan piirin suojauksesta. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

### 3.2. Häiriöltä suojautuminen

Sähkömagneettisen säteilyn haitat aiheuttavat riskejä ja häiriöitä. Häiriöitä on välttämätöntä valvoa ja pyrkiä vähentämään, jotta haittoja esiintyisi mahdollisimman vähän. Jotta häiriöltä voidaan suojautua, täytyy selvittää häiriölähde, häiriön siirtotie ja häiriön vastaanottaja. Ensisijaisesti häiriöltä suojaudutaan poistamalla häiriölähde. Sähkömagneettiselta häiriöltä suojaudutaan erilaisin menetelmin esimerkiksi laitteiston johtojen ja komponenttien sijoittelulla, maadoituksella, laitteiston koteloinnilla. Myös kapasitiivista tai induktiivista suodatusta voidaan käyttää sähkömagneettisen häiriön vähentämiseksi. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Häiriöltä suojautuminen huomioidaan jo laitteiston suunnitteluvaiheessa. Suunnittelussa huomioidaan laitteiston johtojen ja komponenttien sijoittelu, laitteiston maadoitus ja laitteiston kotelointi. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

## Kaapelointi

Kaapelit ja johtimet toimivat antennina, joiden ominaistajuus riippuu johtimen pituudesta. Suurilla taajuuksilla jo lyhytkin johdin voi aiheuttaa häiriötä. Laitteiston kaapeloinnin suunnittelulla voidaan vähentää johtimien aiheuttamia ja vastaanottamia häiriöitä. Kaapeloinnin suunnittelussa tulee huomioida johtimien aiheuttama induktanssi ja kapasitiivinen kytketyminen. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Johtimissa ja kaapeleissa esiintyy induktanssia. Johtimien muodostaessa silmukoita voidaan niitä ajatella keloina. Muodostuvan kelan induktiiviset ominaisuudet riippuvat silmukoiden määrästä ja niiden pinta-alasta. Vaihtovirran taajuus vaikuttaa myös induktanssin määrään. Johtimien asento vaikuttaa induktanssin määrään. Magneettikentän vuon osuessa kohtisuorasti johtimeen on induktanssin vaikutus suurin. Vastaavasti johtimen kulkiessa magneettikentän vuon suuntaisesti ei induktanssia juurikaan aiheudu. Kaapeleiden välisellä etäisyydellä voidaan vaikuttaa induktanssin määrään. Syntyvän induktanssin määrä pienenee, kun kaapeleiden etäisyyttä kasvatetaan toisiinsa nähden. Kaapelit voidaan myös suojata materiaalilla, jolla on suuri permeabiliteetti induktanssin pienentämiseksi. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Sähkömagneettinen häiriö kytkeytyy järjestelmän johtimiin ja kaapeleihin kapasitiivisesti, jos kaapelit tai johtimet ovat toistensa sähkökenttien vaikutusalueella. Johtimien välille voi muodostua kapasitanssia johtimien tai kaapeleiden ollessa eri potentiaalissa. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Kapasitiivista kytketymistä voidaan estää johtamalla sähkökenttä esimerkiksi sähköä johtavaan kotelointiin. Johtimien ja kaapelien välistä etäisyyttä voidaan myös kasvattaa niin, että ne eivät ole enää toistensa sähkökenttien vaikutusalueella. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Sähkömagneettiselta häiriöltä voidaan myös suojautua kierretyn parin avulla, kaksi johdinta kierretään keskenään. Kierrettyssä parissa magneettikentän johtimiin ja indusoimat virrat ovat johtimen vastakkaisissa silmukoissa eri vaiheessa, jolloin ne kumoavat toisensa. Kierretty pari vähentää myös johtimen tai kaapelin ulospäin aiheuttaman häiriön määrää. Kiertäminen ei kuitenkaan suojaa johdinta tai sähkökentän aiheuttamilta häiriöiltä. Sähkökentän aiheuttamilta häiriöiltä voidaan suojautua suojavaipan avulla. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

## Maadoitus

Maadoitus on yksi ensisijaisista tavoista minimoida sähkömagneettista häiriötä. Maadoitus toimii piirin virtojen paluujohtimena, jossa on minimi-impedanssi. Maadoituksesta aiheutuu galvaanisesti kytkeytyvää häiriötä joko suoraan, induktiivisesti, kapasitiivisesti tai RF-säteilyn kautta. Maadoitusta suunniteltaessa häiriöiden minimointi ei kuitenkaan ole ainoa suunnittelun lähtökohta. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Kytettäessä useita piirejä samaan maadoitusjohtimeen syntyy yhteisimpedanssista häiriötä. Maadoitusjohtimen jännitehäviöt esiintyvät häiriöinä muissa samaan maadoitukseen kytkeytyissä piireissä. Korkea taajuinen häiriö aiheuttaa maajohtimen induktiivisesta reaktanssista häviöitä johtimeen. Maadoitusjohtimessa korkeilla taajuuksilla sekä jännitepiikkien aikana tämä reaktanssi on merkittävämpi kuin sen resistanssi. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

## Piirilevysuunnittelu

Laitteen EMC-häiriöherkkyyteen voidaan vaikuttaa piirilevy suunnittelulla. Virta- ja jännitelähteiden kytkentätaajuudet ovat yleisimpiä sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttajia. Piirilevysuunnittelulla häiriötä voidaan vähentää pitämällä kytkennän teho- ja signaalitiet mahdollisimman kaukana toisistaan piirilevyllä. Häiriöille herkimvät signaali- tai korkeataajuusosat voidaan myös suojata piirilevyllä erillisellä metallikotelolla tai sijoittamalla ne monikerrospiirilevyn eri kerroksiin. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Galvaanista kytkeytymistä piirilevyllä rajoitetaan katkaisemalla johtava linja optoerottimilla tai kondensaattoreilla. Kondensaattori suodattaa matalataajuisia häiriöitä. Minimoimalla johdinsilmukat ja sijoittamalla liittimet piirilevyn samalle sivulle vähennetään kytkennässä esiintyviä antenneja, jolloin häiriöiden kytkeytyminen sähkömagneettisena säteilynä vähenee. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Piirilevysuunnittelussa on myös huomioitava, että jokaisessa komponentissa on resistanssia, induktanssia ja kapasitanssia. Lisäksi piirilevysuunnittelussa on myös huomioitava kytkennän maadoitusreittien kulku, maapotentiaalit ja niiden aiheuttamat häiriöt. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

## Kotelointi

Koteloimalla laite ja laitteen sisäisiä komponentteja voidaan rajoittaa EMC-häiriöitä. Suojakotelointi suojaa sekä radiotaajuisilta häiriöiltä että sähkö- ja magneettikenttien kautta kytkeytyviltä häiriöiltä. Huonosti suunniteltu kotelo ottaa vastaan sekä aiheuttaa häiriöitä. Koteloinnissa on otettava huomioon häiriölähteen dimensiot esim. piirilevyt, ja kaapelointi, kaapeloinnin läpiviennit. Koteloinnin toimivuutta voidaan simuloida esimerkiksi Full-Wave-simulointityökalulla. Lopullinen toimivuus ilmenee kuitenkin vasta testaamalla valmista tuotetta. Sähkölaitteen kotelo kytketään usein maadoitukseen, jolloin se suojaa laitetta myös ulkopuolelta tulevilta sähköstaattisilta purkauksilta. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

Käyttämällä koteloinnissa ferromagneettisia materiaaleja voidaan suojautua sähkömagneettisilta häiriöiltä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi rauta, koboltti ja nikkeli sekä niiden monet yhdisteet. (Sähkömagneettinen yhteensopivuus, 2017)

## Suodatus

Yksi ennaltaehkäisevä menetelmä sähkömagneettisen häiriön vähentämiseksi on EMI-suodatin. EMI-suodatin on passiivinen laite, joka ei tukahduta häiriöpäästöjä vapaassa tilassa. Suodatin voidaan liittää laitteisiin rajoittamaan tai tukahduttamaan häiriöitä.

Alipäästösuodattimet mahdollistavat matalan tason taajuuksien kulun tietyn leikkauspisteen alapuolella. Ylipäästösuodattimet mahdollistavat korkeiden taajuuksien kulun tietyn leikkauspisteen yläpuolella. Bandpass-suodattimet sallivat tiettyjen taajuusalueiden signaalien kulkemisen piirin läpi. Band Stop-suodattimet sallivat kaikkien signaalien paitsi tietyn taajuusalueen kulkemisen piirin läpi.

Suodatin voidaan suunnitella joko kapasitiivisella tai induktiivisella tulolla. Induktiivisen tulon hyötynä on raja-arvo transienttien ja piikkien vaikutukselle linjalla. Induktiivisen tulon suodattimilla on kuitenkin yleensä suurempi Pass-Band-impedanssi kuin kapasitiivisen tulon suodattimilla.

## 4 Direktiivit ja standardit

Eurooppalaiset määräykset koostuvat direktiiveistä ja standardeista. Direktiivit ovat yleisiä lakisääteisiä vaatimuksia. Standardit ovat tapa noudattaa direktiivejä. Euroopan unionin jäsenmaat noudattavat EMC-direktiiviä 2014/30/EU.

EMC-direktiivi 2014/30/EU määrittää olennaiset vaatimukset sille, että laitetta voidaan markkinoida EU-alueella. EMC-direktiivin 2014/30/EU mukaan:

Laitteisto on suunniteltava ja valmistettava niin, että varmistetaan, että

1. Laitteiston aiheuttama sähkömagneettinen häiriö ei ylitä tasoa, jonka ylittyessä radio- ja telelaitteet tai muut laitteistot eivät voi toimia tarkoitetulla tavalla.
2. Laitteiston sille tarkoitetussa käytössä odotettavissa olevan sähkömagneettisen häiriön siedon taso on sellainen, että laitteisto toimii tarkoitetun käytön heikentymättä kohtuuttomasti.

Kiinteän asennuksen asentamisessa on noudatettava hyviä teknisiä käytäntöjä ja otettava huomioon komponenttien aiottua käyttötarkoitusta koskevat tiedot, jotta varmistetaan, että edellä esitetyt vaatimukset täyttyvät.(EMC-direktiivi 2014/30/EU, Liite I.)

Laitteiston valmistajan on suoritettava laitteen sähkömagneettisen yhteensopivuuden arviointi. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden arvioinnissa on otettava huomioon kaikki tavanomaiset tarkoitetut toimintaolosuhteet. Jos laitteella on eri konfiguraatioita, sähkömagneettisen yhteensopivuuden arvioinnin avulla on vahvistettava, että laite täyttää olennaiset vaatimukset kaikissa mahdollisissa konfiguraatioissa, jotka valmistaja on yksilöinyt laitteen käyttötarkoituksen kannalta edustaviksi. (EMC-direktiivi 2014/30/EU, Liite II.)

EMC-direktiivissä määritetään vain olennaiset vaatimukset ja ne voidaan osoittaa täytetyiksi noudattamalla yhdenmukaistettuja standardeja.

CISPR (Comite International Special des Perturbations Radioelectriques) on kansainvälinen komitea, joka keskittyy radiohäiriöihin. CISPR:n työ sisältää laitteita ja

menetelmiä häiriöiden mittaamiseksi, raja- arvojen asettamiseksi, immunitetin vaatimukset sekä immunitetin mittausmenetelmän. CISPR ottaa myös huomioon turvallisuusmääräysten vaikutukset sähkölaitteiden häiriösietoon. CISPR11-standardi koskee teollisuus-, tieteellisiä ja lääketieteellisiä sähkölaitteita, jotka toimivat taajuusalueella 0 Hz – 400 GHz ja kotitalous- ja vastaaville laitteille CISPR11-standardissa määritellään mittausmenetelmät, mittauslaitteet, raja-arvot ja rajauslinjojen käyttökelpoisuuden tulkinta. CISPR16-sarja standardeissa määritellään laitteet ja menetelmät häiriöiden ja immunitetin mittaamiseksi yli 9 kHz:n taajuuksilla.

#### 4.1 CISPR11-standardin vaatimukset

CISPR11:2015-standardissa laitetyyppien tunnistamisen helpottamiseksi elektroniset laitteistot on jaettu ryhmiin. Ryhmään 1 kuuluvat kaikki muut laitteet kuin ISM-laitteistot, jotka kuuluvat ryhmään 2. ISM-laitteistot ovat teollisia, tieteellisiä ja lääketieteellisiä laitteistoja.

CISPR11:2015-standardissa laitteistot jaetaan myös luokkiin A tai B niiden sähkömagneettisen käyttöympäristön mukaan. Luokan A laitteistot ovat laitteita, jotka soveltuvat käytettäväksi muissa paikoissa kuin asuinalueilla ja laitteistot jotka ovat liitetty suoraan pienjänniteverkkoon. Luokan B laitteistot ovat laitteita, jotka soveltuvat asuinalueille ja laitoksiin, jotka ovat liitetty suoraan pienjänniteverkkoon. Luokkien A ja B laitteilla on omat raja-arvonsa.

CISPR11:2015-standardissa on määritetty raja-arvot säteilevälle sähkömagneettiselle häiriölle. Testattavan laitteen on täytettävä näennäishuippuarvolle asetettu raja-arvo.

Ryhmän 1 laitteistoille taajuus alueelle 9 kHz – 30 MHz ei ole määritettyjä raja-arvoja. 30Mhz Ylittävällä taajuusalueella raja-arvo viittaa säteilevän sähkömagneettisen häiriön sähkökentän voimakkuuden komponenttiin. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty CISPR11:2015-standardin määrittämät raja-arvot säteilevälle sähkömagneettisella häiriölle luokan A ryhmän 1 ja luokan B ryhmän 1 laitteistoille.

Taulukko 1. CISPR11:2015-standardin mukaiset luokan A ryhmän 1 raja-arvot.

Frequency range MHz	10 m measuring distance rated power of		3 m measuring distance <sup>b</sup> rated power of	
	≤ 20 kVA <sup>c</sup>	> 20 kVA <sup>a, c</sup>	≤ 20 kVA <sup>c</sup>	> 20 kVA <sup>a, c</sup>
	Quasi-peak dB(μV/m)	Quasi-peak dB(μV/m)	Quasi-peak dB(μV/m)	Quasi-peak dB(μV/m)
30 – 230	40	50	50	60
230 – 1 000	47	50	57	60

Taulukko 2. CISPR11:2015-standardin mukaiset luokan B ryhmän 1 raja-arvot.

Frequency range MHz	10 m measuring distance	3 m measuring distance <sup>a</sup>
	Quasi-peak dB(μV/m)	Quasi-peak dB(μV/m)
30 – 230	30	40
230 – 1 000	37	47

Ryhmässä 2 testattavan laitteen tulee täyttää raja-arvot kun käytetään huippu-, näennäishuippu- ja keskiarvon ilmaisimia. Taajuus alueella 9 kHz – 150 kHz ei ole määritettyä raja-arvoa. Alle 30 Mhz:in taajuusalueella raja-arvot viittaavat säteilevän sähkömagneettisen häiriön magneettiseen komponenttiin. Yli 30 MHz:in taajuusalueella raja-arvot viittaavat säteilevän sähkömagneettisen häiriön sähkökentän voimakkuuden komponenttiin. Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty CISPR11:2015-standardin määrittämät raja-arvot säteilevälle sähkömagneettisella häiriöllä luokan A ryhmän 2 ja luokan B ryhmän 2 laitteistoille.

Taulukko 3. CISPR11:2015-standardin mukaiset luokan A ryhmän 2 raja-arvot.

Frequency range MHz	Limits for a measuring distance $D$ in m					
	On a test site $D = 30$ m from the equipment		On a test site $D = 10$ m from the equipment		On a test site $D = 3$ m from the equipment <sup>a</sup>	
	Electric field	Magnetic field	Electric field	Magnetic field	Electric field	Magnetic field
	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Quasi-peak dB( $\mu$ A/m)	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Quasi-peak dB( $\mu$ A/m)	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Quasi-peak dB( $\mu$ A/m)
0,15 – 0,49	–	33,5	–	57,5	–	82
0,49 – 1,705	–	23,5	–	47,5	–	72
1,705 – 2,194	–	28,5	–	52,5	–	77
2,194 – 3,95	–	23,5	–	43,5	–	68
3,95 – 11	–	8,5	–	18,5	–	43,5 decreasing linearly with logarithm of frequency to 28,5
11 – 20	–	8,5	–	18,5	–	28,5
20 – 30	–	-1,5	–	8,5	–	18,5
30 – 47	58	–	68	–	78	–
47 – 53,91	40	–	50	–	60	–
53,91 – 54,56	40	–	50	–	60	–
54,56 – 68	40	–	50	–	60	–
68 – 80,872	53	–	63	–	73	–
80,872 – 81,848	68	–	78	–	88	–
81,848 – 87	53	–	63	–	73	–
87 – 134,786	50	–	60	–	70	–
134,786 – 136,414	60	–	70	–	80	–
136,414 – 156	50	–	60	–	70	–
156 – 174	64	–	74	–	84	–
174 – 188,7	40	–	50	–	60	–
188,7 – 190,979	50	–	60	–	70	–
190,979 – 230	40	–	50	–	60	–
230 – 400	50	–	60	–	70	–
400 – 470	53	–	63	–	73	–
470 – 1 000	50	–	60	–	70	–

Taulukko 4. CISPR11:2015-standardin mukaiset luokan B ryhmän 2 raja-arvot.

Frequency range MHz	Limits for a measuring distance $D$ in m				
	Electric field				Magnetic field $D = 3$ m
	$D = 10$ m		$D = 3$ m <sup>b</sup>		
	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Average <sup>a</sup>	Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Average <sup>a</sup>	Quasi-peak dB( $\mu$ A/m)
0,15 – 30	–	–	–	–	39 Decreasing linearly with the logarithm of frequency to 3
30 – 80,872	30	25	40	35	–
80,872 – 81,848	50	45	60	55	–
81,848 – 134,786	30	25	40	35	–
134,786 – 136,414	50	45	60	55	–
136,414 – 230	30	25	40	35	–
230 – 1 000	37	32	47	42	–

Luokan A laitteistoille suoritetaan tarvittaessa säteilevän sähkömagneettisen häiriön In-Situ-mittaus. Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty CISPR11:2015-standardin määrittämät In-Situ-mittausmenetelmän raja-arvot säteilevälle sähkömagneettisella häiriöllä luokan A ryhmän 2 ja luokan B ryhmän 2 laitteistoille.

Taulukko 5. CISPR11:2015-standardin mukaiset luokan A ryhmän 1 In-Situ-raja-arvot.

Frequency range MHz	Limits with measuring distance 30 m from the outer face of the exterior wall of the building in which the equipment is situated	
	Electric field Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Magnetic field Quasi-peak <sup>a</sup> dB( $\mu$ A/m)
0,15 – 0,49	–	13,5
0,49 – 3,95	–	3,5
3,95 – 20	–	–11,5
20 – 30	–	–21,5
30 – 230	30	–
230 – 1 000	37	–

Taulukko 6. CISPR11:2015-standardin mukaiset luokan A ryhmän 2 In-Situ-raja-arvot.

Frequency range MHz	Limits for a measuring distance of $D$ in m from the exterior wall of the building	
	Electric field Quasi-peak dB( $\mu$ V/m)	Magnetic field Quasi-peak dB( $\mu$ A/m)
0,15 – 0,49	–	23,5
0,49 – 1,705	–	13,5
1,705 – 2,194	–	18,5
2,194 – 3,95	–	13,5
3,95 – 20	–	–1,5
20 – 30	–	–11,5
30 – 47	48	–
47 – 53,91	30	–
53,91 – 54,56	30	–
54,56 – 68	30	–
68 – 80,872	43	–
80,872 – 81,848	58	–
81,848 – 87	43	–
87 – 134,786	40	–
134,786-136,414	50	–
136,414 – 156	40	–
156 – 174	54	–
174 – 188,7	30	–
188,7 – 190,979	40	–
190,979 – 230	30	–
230 – 400	40	–
400 – 470	43	–
470 – 1000	40	–

## 5 Sähkömagneettisten häiriöiden mittaaminen

### 5.1 Säteilävän sähkömagneettinen häiriön mittaaminen

Yleinen kokemus säteilyhäiriöiden mittaamisesta ei ole niin laaja kuin jännitemittauksista. Säteilyhäiriöiden mittausten menetelmät ovat siksi avoimia korjauksille ja laajennuksille tiedon ja kokemuksen lisääntyessä. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota EUT:hen liittyvien johtimien ja kaapeleiden vaikutukseen. (CISPR16-2-3, 2010)

Joissakin tapauksissa saattaa olla tarpeen mitata säteilyn päästöjen sähköisiä, magneettisia tai molempia komponentteja. Yleensä mittaukset tulee tehdä sekä häiriön vaakasuuntaisista että pystysuuntaisista komponenteista suhteessa

vertailumaatasoon. Sähköisten tai magneettisten komponenttien mittaustulokset voidaan ilmaista joko huippu-, näennäishuippu-, keskiverto- tai rms-arvona. (CISPR16-2-3, 2010)

Häiriön magneettinen komponentti mitataan normaalisti 30MHz:iin asti.

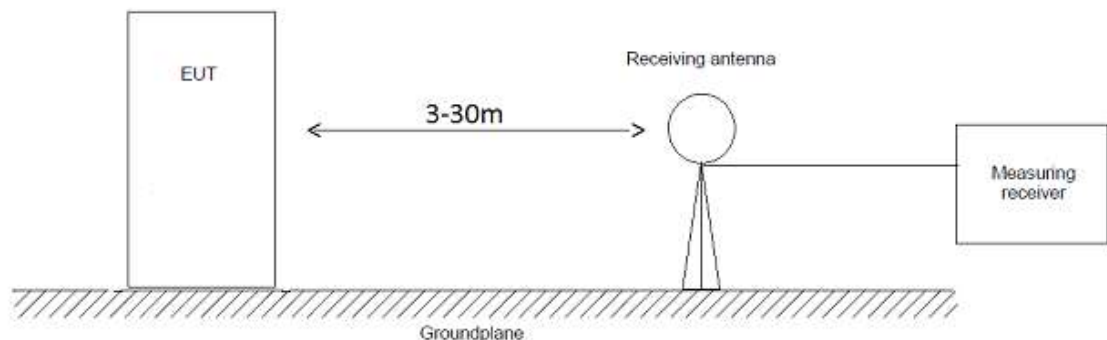
Magneettikentän mittauksissa vain kentän vaakakomponentti vastaanottavan antennin kohdalla mitataan, kun käytetään etäistä antennimenetelmää. Jos käytetään silmukka-antennijärjestelmää, mitataan EUT:n kolme ortogonaalista magneettista dipoli momenttia. (CISPR16-2-3, 2010)

Silmukka-antennijärjestelmä sopii sisätiloissa tehtäville mittauksille, kun mitataan yhden EUT:n magneettikentän voimakkuutta taajuusalueella 9 kHz–30 MHz.

Magneettikentän voimakkuus määritetään silmukka-antennijärjestelmään indusoituvista virroista, jotka EUT:n magneettinen häiriökenttä tuottaa. (CISPR16-2-3, 2010)

## 5.2 Laboriomittaus

Laboriomittaus voidaan suorittaa joko avoimessa tilassa tai puolikaiuttomassa huoneessa tehtävässä mittauksella. Mittaus suoritetaan silmukka-antennijärjestelmällä, jonka korkeutta ja sijaintia pystytään helposti säätämään, mitataan laitteen lähettämiä häiriösignaaleja eri suunnilla laitetta. Häiriöitä testataan tyypillisesti kolmen, kymmenen ja kolmenkymmenen metrin etäisyydeltä laitteesta kuvan 2 osoittamalla tavalla. Tämä takaa, että lähikentän ja kaukokentän signaalien vahvuudet tulevat mitatuksi. (CISPR16-2-3, 2010)



Kuva 2. Laboriomittauksen havainnekuva.

### 5.3 Kenttämittaus

Kentällä tehtävä mittaus suoritetaan CISPR16-2-5-standardin In-Situ-määräyksen mukaisesti. In-Situ-mittaus suoritetaan yleensä kahdesta syystä, joko häiriöongelman tutkimiseksi paikalla tai teknisten vaatimusten noudattamisen arviointia varten. Riippuen todellisesta syystä joidenkin mittaolosuhteiden mukaiset olosuhteet voivat poiketa toisistaan. (CISPR16-2-5, 2008)

Jos häiriö johtuu suuresta asennuksesta, mitataan häiritsevän kentän voimakkuus häiriön uhrin välittömässä läheisyydessä. (CISPR16-2-5, 2008)

Vaatimustenmukaisuuden testauksessa on käytettävä standardin määrittämää mitta-etaisyyttä sovellettavasta tuotteesta. Jos tämä ei ole mahdollista asennuksellisten tekijöiden takia voidaan vasta tällöin harkita muita mitta-etaisyyksiä. (CISPR16-2-5, 2008)

Säteilevän sähkömagneettisen häiriön mittaus suositellaan tehtäväksi tietyllä referenssi-etaisyydellä. Tämä mahdollistaa helpon pääsyn sovellettaviin rajoihin. Jos tämä ei ole mahdollista ulkoisten ja turvallisuus tekijöiden vuoksi, voidaan mittaukset suorittaa poikkeavilla etäisyyksillä. Jos kyseessä on häiriötilanteiden selvittäminen, referenssimatkojen käyttö ei välttämättä ole kaikkein sopivin vaihtoehto. Tarkoituksenmukaisempaa tässä tilanteessa on käyttää mitta-etaisyyttä joka heijastaa häiriötilanteen tilaa. (CISPR16-2-5, 2008)

Käytettäessä muita etäisyyksiä kuin referenssietaisyyksiä mitatun kentän voimakkuus tulee muuntaa vastaamaan referenssietaisyyttä. Jos testattava laite on asennettu korkealle, mittaus etäisyys määrittyy testattavan laitteen ja vastaanottavan antennin sijainnin mukaan. Tässä tapauksessa voidaan mitta-etaisyys laskea seuraavan kaavan avulla:

$$d_{\text{mea}} = \sqrt{r^2 + h^2} \quad ,$$

missä  $r$  on vaakasuora etäisyys testattavan laitteen ja antennin välillä ja  $h$  korkeus ero testattavan laitteen ja antennin välillä. (CISPR16-2-5, 2008)

Jos testattavan laitteen kytkeminen pois päältä ei ole mahdollista voidaan muita menettelyjä soveltaa. Esimerkiksi antennin suuntaavuutta hyödyntämällä voidaan määrittää testattavan laitteen maksimi- ja minimihäiriö. (CISPR16-2-5, 2008)

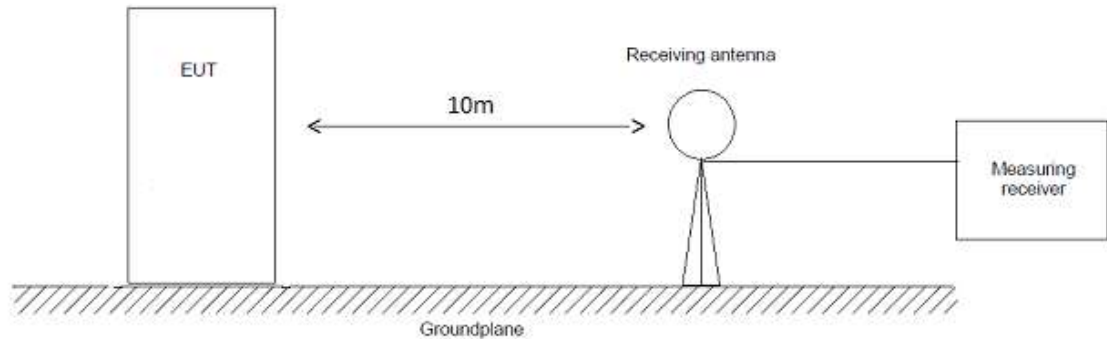
#### Mittausolosuhteet

Sääolosuhteilla on iso vaikutus mittaustulokseen. Sääolosuhteiden minimoimiseksi tulisi mittaus suorittaa kuivalla ilmalla sekä lämpötilan ollessa enemmän kuin 5 C° ja tuulen nopeuden ollessa alle 10 m/s. Mittauksen suorittamisen suunnittelulla voidaan vaikuttaa sääolosuhteisiin. Jos sääolosuhteet eivät kuitenkaan vastaa tavoite tilaa, niin tulee sääolosuhteet mittauksen aikana kirjata mittaustuloksiin. (CISPR16-2-5, 2008)

#### Mittausmenetelmä

In-Situ-mittausta suorittaessa tulee huomioida antennin korkeus, sijainti, suuntaus ja mahdollinen kääntyminen. Antennin korkeutta tulisi pystyä säätämään, 10 metrin mittausetäisyydellä tulisi käyttää antennia, jonka korkeutta voidaan säätää 1–4 metrin välillä ja 30 metrin etäisyydellä antennin korkeutta tulisi pystyä säätämään 2–6 metrin välillä mahdollisuuksien mukaan. (CISPR16-2-5, 2008)

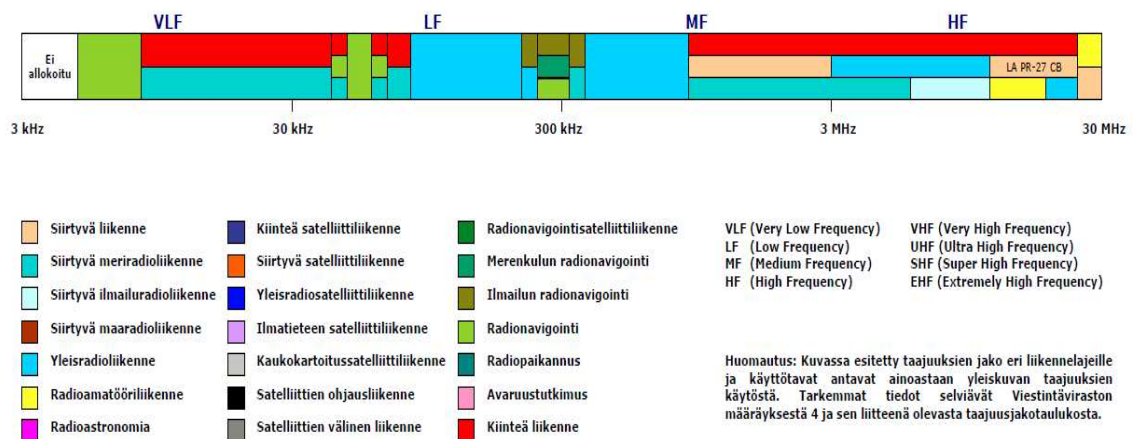
Jos mitattava taajuusalue on alle 30MHz. Mittaus suoritetaan silmukka-antennilla, joka on 1 metrin korkeudella maatasosta ja etäisyys testattavasta laitteesta 10 metriä, kuvan 3 osoittamalla tavalla. Mitattavan kentän suurin arvo tulee määrittää kääntelemällä silmukka-antennin kulmaa testattavaan laitteeseen nähden. (CISPR16-2-5, 2008)



Kuva 3. Kenttämittauksen havainnekuva.

### Kenttämittauksen ongelmat

Radioliikenteestä ja muista sähköisistä laitteistoista syntyvät taustahäiriöt vaikuttavat avoimella alueella tehtyjen mittausten tarkkuuteen. Suomessa alle 30 MHz alueella on käytössä esimerkiksi radioliikennettä. Alla oleva kuvan mukaan alle 30MHz alueella on käytössä useita eri radioliikenteen toimintoja. (Radiotaajuusmääräys 4, 2017)



Kuva 4. Radioliikenne alle 30MHz taajuusalueella Suomessa. (Radiotaajuuksien käyttö, 2009)

Viestintäviraston uusi radiotaajuusmääräys 4 on otettu käyttöön 1.1.2017. Määräystä sovelletaan 9 kHz – 400 GHz:n radiotaajuuspektriin, ja siinä määrätään eri

radiotaajuuksien, taajuuskaistojen ja osakaistojen jakamisesta eri käyttötarkoituksiin. Määräys sisältää myös vaatimukset lähetys- ja vastaanottotaajuuksista, kanavaväleistä, lähetteen leveydestä, duplexiväleistä, lähetystehoista ja muista vastaavista radio-ominaisuuksista. (Radiotaajuusmääräys 4, 2017)

Määräys koskee myös tieteelliseen, teolliseen, lääkinnälliseen tai muuhun vastaavaan tarkoitukseen käytettäviä sähkölaitteita, jotka on tarkoitettu kehittämään radioaaltoja. (Radiotaajuusmääräys 4, 2017)

Radioliikenteen lisäksi testattavan laitteen läheisyydessä olevat muut sähköiset laitteistot tuottavat ympäristöönsä säteilevää sähkömagneettista häiriötä.

Testattavan laitteen asennus tapa ja paikka voi rajoittaa kenttämittauksen suorittamista oleellisesti. Aurinkosähköjärjestelmä voi olla rakennettu hankalasti päästävään paikkaan esimerkiksi rakennuksen katolle. Aurinkopaneelien sijoittelu voi vaikuttaa halutun mittaus etäisyyden saavuttamiseen. Aurinkosähköjärjestelmän toimintatila voi myös tuottaa rajoitteita mittauksen suorittamiseen turvallisesti.

## 6 Mittalaitteet

, missä  $D$  on säteilylähteen suurin dimensio. Rayleighin kriteeriä käytetään, kun säteilylähte on liian suuri pistemäiseksi lähteeksi. Lähikentässä aaltoimpedanssi määritetään säteilylähteen ominaisuuksien mukaan. Yleensä lähikentässä toinen kenttätyypeistä on vallitseva ja säteilylähteen tyyppi määrittää syntyvän kentän tyyppin. Etäisyyden kasvaessa vallitseva kenttäkomponentti vaimenee nopeammin. Säteilylähteen energia on varastoitunut lähikenttään, jolloin kenttä häviää, kun säteilylähte sammutetaan. Kaukokentässä aalto etenee tasoaaltona, jolloin sähkö- ja magneettikenttäkomponentit vaimenevat samassa tahdissa ja aaltoimpedanssi on vakio. EMI-vastaanotin

EMI-Vastaanottimet on suunniteltu noudattamaan radiohäiriöiden mittausstandardien laitteistovaatimuksia. EMI-Vastaanottimille on määritelty IF-kaistanleveydet, tyypillisesti 200 Hz, 9 kHz, 120 kHz ja 1 MHz. EMI-Vastaanottimilla on standardoidut ilmaisimet Peak, Quasi-Peak, Average ja RMS.

Tässä työssä mittaukset suoritetaan Rohde & Schwarz ESRP-3 EMI-vastaanottimella, jonka mittaus taajuusalue on 9 kHz – 3,6 GHz.

, missä  $D$  on säteilylähteen suurin dimensio. Rayleighin kriteeriä käytetään, kun säteilylähde on liian suuri pistemäiseksi lähteeksi. Lähikentässä aaltoimpedanssi määritetään säteilylähteen ominaisuuksien mukaan. Yleensä lähikentässä toinen kenttätyypeistä on vallitseva ja säteilylähteen tyyppi määrittää syntyvän kentän tyyppin. Etäisyyden kasvaessa vallitseva kenttäkomponentti vaimenee nopeammin. Säteilylähteen energia on varastoitunut lähikenttään, jolloin kenttä häviää, kun säteilylähde sammutetaan. Kaukokentässä aalto etenee tasoaaltona, jolloin sähkö- ja magneettikenttäkomponentit vaimenevat samassa tahdissa ja aaltoimpedanssi on vakio. Silmukka-antenni

Mittaukset suoritetaan silmukka-antennilla. Silmukka-antenni on radioantenni, joka koostuu langasta, putkesta tai muusta sähköjohtimesta, jonka päät on liitetty tasapainotettuun voimajohtoon tai mahdollisesti balunille. On olemassa kaksi erillistä antennimallia: pieni silmukka-antenni, jonka koko on pienempi kuin aallonpituus ja suurempi resonanssi silmukka-antenni, jonka ympärysmitta vastaa lähes sen käyttötarkoituksen aallonpituutta. Mitattaessa VLF ja LF taajuuksia käytetään pientä silmukka-antennia. (Antenna factor, 2017)

Magneettikenttää mitattaessa antennin kentän voimakkuus on A/m-yksikössä ja tuloksena oleva antennikerroin on A/Vm-yksikössä

$$AF = \frac{\sqrt{377P_D}}{\sqrt{50P_D A_e}} = \frac{2.75}{\sqrt{A_e}} = \frac{9.73}{\lambda\sqrt{G}}$$

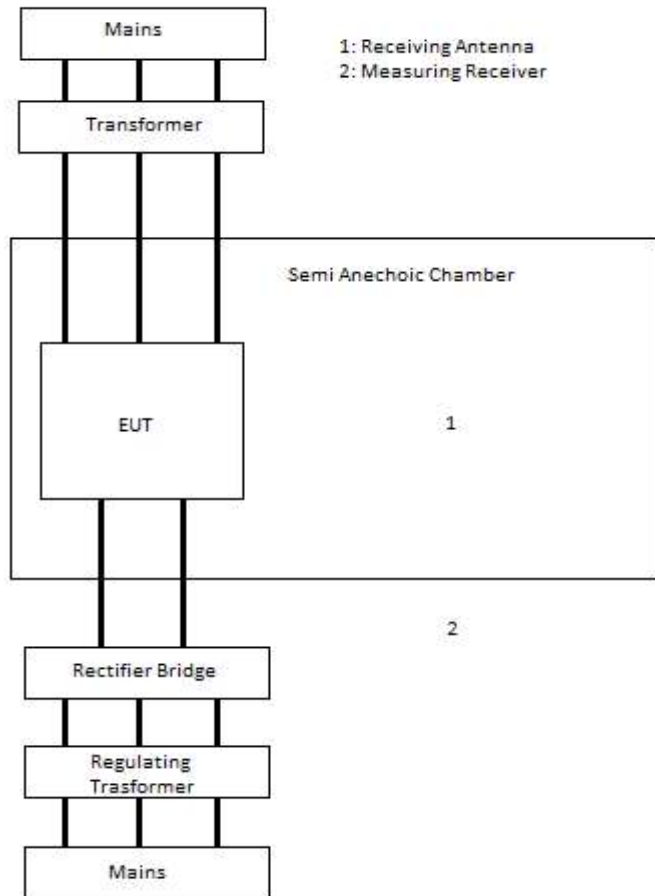
jossa  $A_e$  on antennin tehokas aukko,  $P_D$  on tehon tiheys,  $P_r$  on vastaanottimen esittämä kuormitus resistanssi ja  $G$  on antennivahvistus. (Antenna factor, 2017)

## 7 Mittaustulokset

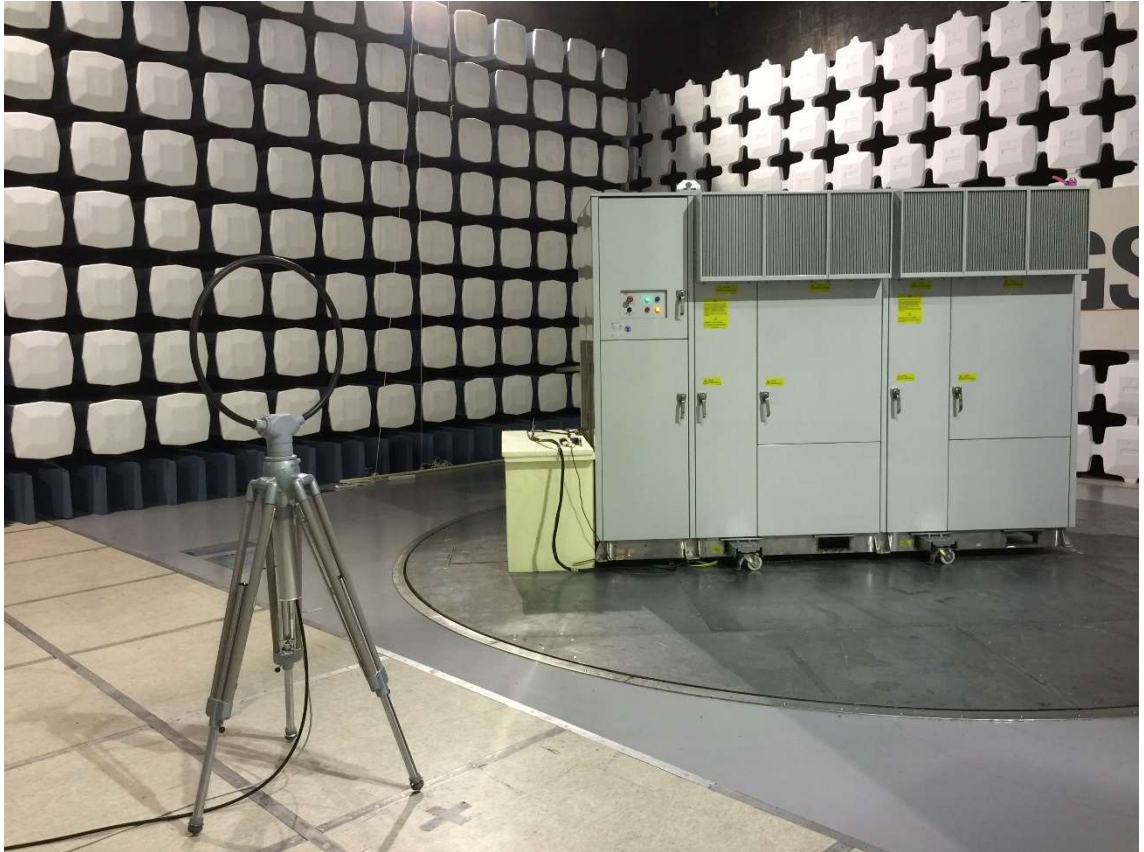
, missä  $D$  on säteilylähteen suurin dimensio. Rayleighin kriteeriä käytetään, kun säteilylähde on liian suuri pistemäiseksi lähteeksi. Lähikentässä aaltoimpedanssi määritetään säteilylähteen ominaisuuksien mukaan. Yleensä lähikentässä toinen kenttätyypeistä on vallitseva ja säteilylähteen tyyppi määrittää syntyvän kentän tyyppin. Etäisyyden kasvaessa vallitseva kenttäkomponentti vaimenee nopeammin. Säteilylähteen energia on varastoitunut lähikenttään, jolloin kenttä häviää, kun säteilylähde sammutetaan. Kaukokentässä aalto etenee tasoaaltona, jolloin sähkö- ja magneettikenttäkomponentit vaimenevat samassa tahdissa ja aaltoimpedanssi on vakio. 7.1 Laboratoriomittaus

Laboratoriomittauksessa on tarkoituksena mitata aurinkosähköjärjestelmän tuottamaa säteilevää sähkömagneettista häiriötä taajuusalueella 9 kHz–30 MHz. Mitattavan taajuusalueen ollessa alle 30 Mhz mitataan mittauksissa säteilevän sähkömagneettisen häiriön magneettista komponenttia. PV-Järjestelmät luokitellaan CISPR11:2015-standardin luokkaan A ja ryhmään 1. Mittaukset suoritetaan silmukka-antennijärjestelmällä taulukon 3 raja-arvojen mukaisesti. Mittaus suoritetaan samalla mittalaitteistolla kuin kenttämittaus.

Laboratoriomittaus suoritetaan alla olevan kuvan 5 mukaisella testijärjestelyllä. Testattavalle laitteelle luodaan DC-jänniteverkko säätömuuntajan ja tasasuuntaussillan avulla. Testattavan laitteen tuottama AC-jännite muunnetaan muuntajan avulla käytössä olevan AC-jänniteverkon tasoiseksi.



Kuva 5. Laboriomittauksen testijärjestely.



Kuva 6. Silmukka-antennin etäisyys 3m testattavasta laitteesta.

#### Laboriomittauksen suorittaminen

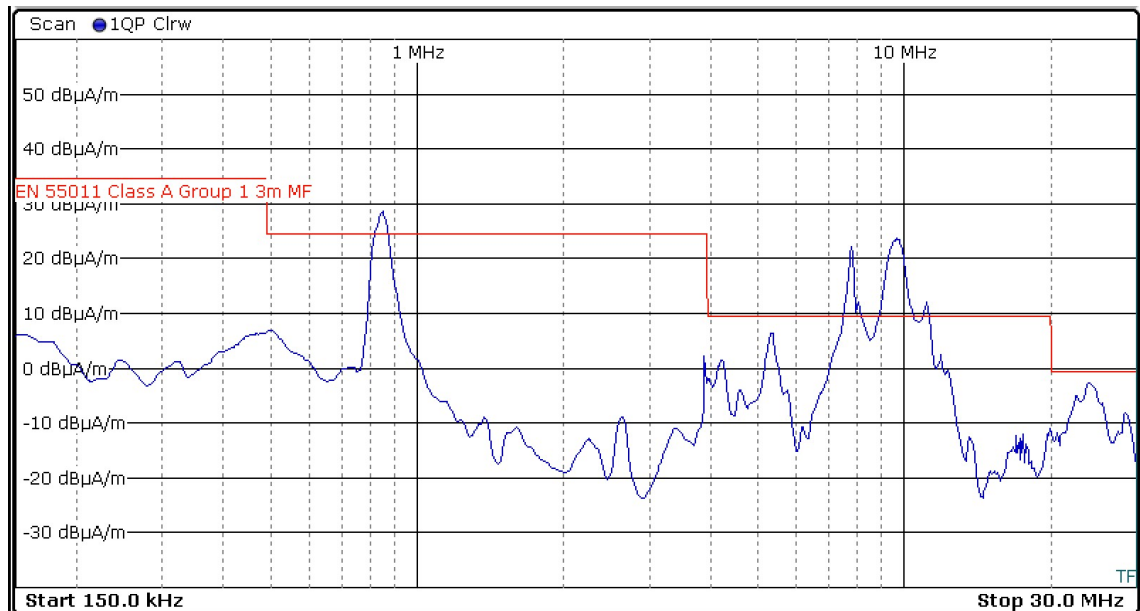
Laboriomittaus suoritettiin puolikaiuttomassa huoneessa EMC-testilaboratoriossa. Testattava laite laboriomittauksissa oli ABB:n valmistama PVS980-keskusinvertteri. Mittaukset suoritettiin testattavan laitteen jokaiselta sivulta kolmen ja kymmenen metrin etäisyydeltä. Mittauksissa silmukka-antennin korkeus oli metrin maatasosta ja kulma mittauksien aikana oli  $90^\circ$  ja  $0^\circ$  testattavaan laitteeseen nähden. Mittaus suoritettiin kuvan 5 mukaisen testijärjestelyn mukaisesti.

Mittauksissa suoritettiin käyttäen Rohde & Schwartz ESRP-3 EMI-vastaanotinta. Mittauksessa EMI-vastaanottimella mitattiin taajuusalueita 150 kHz–30 Mhz Quasi-Peak-ilmaisimella.

Testattavalle laitteelle luotiin testin aikana DC-jänniteverkko säätömuuntajan ja tasasuuntaussillan avulla ja testattavan laitteen tuottama 600 V AC-jännite muunnettiin 400 V AC-jänniteverkkoon sopivaksi muuntajan avulla.

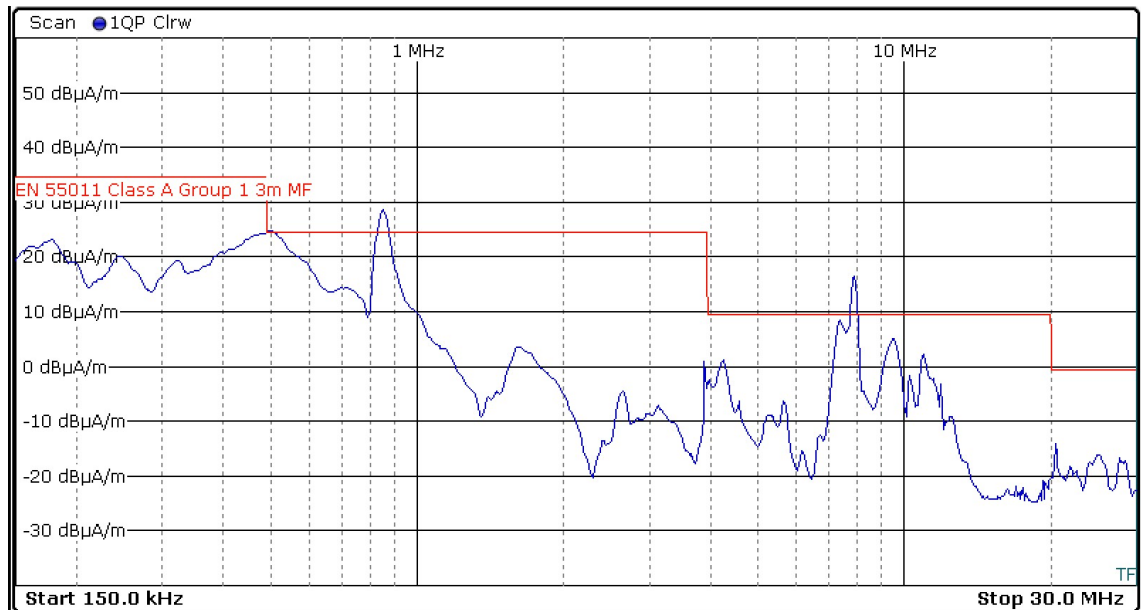
### 7.1.2 Mittaustulos

Mittaukset suoritettiin silmukka-antennijärjestelmällä. Mittauksissa silmukka-antennin etäisyys oli 3 ja 10 m testattavasta laitteesta ja korkeus oli metrin maatasosta. Mittaukset suoritettiin silmukka-antennin kulmilla 90° ja 0° testattavaan PV-järjestelmään nähden. Mittaukset suoritettiin käyttäen Rohde & Schwartz ESRP-3 EMI-vastaanotinta. Mittauksessa EMI-vastaanottimella mitattiin taajuusalue 150 kHz– 30 Mhz Quasi-Peak-ilmaisimella.



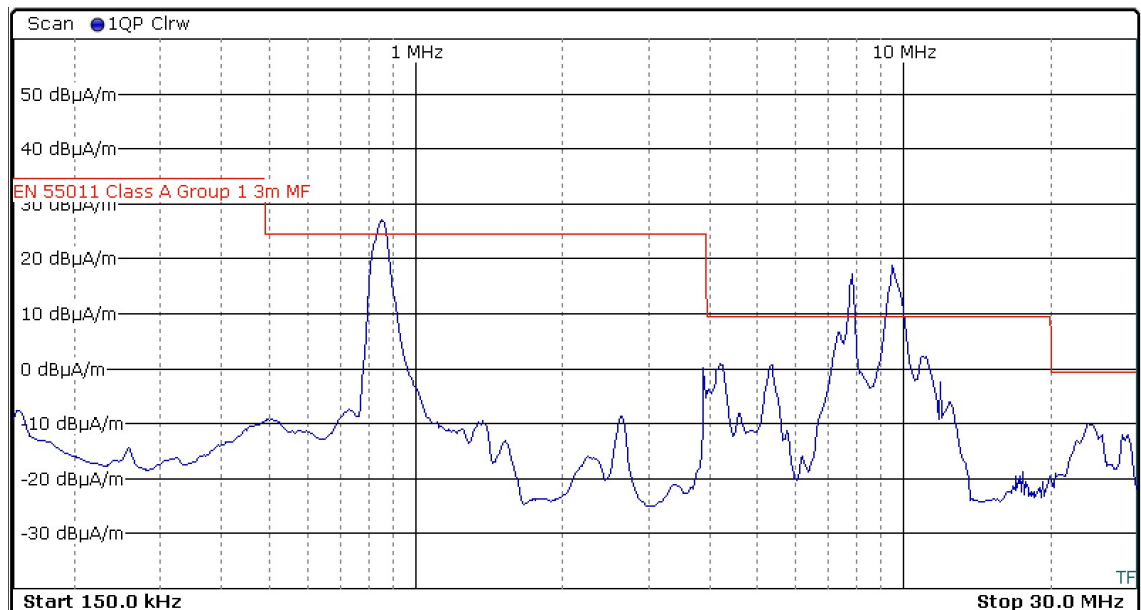
Kuva 7. Mittaustulos 1, 3 metrin etäisyys, 0° kulma.

Kuvassa 1 on esitetty mittaustulos 3 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 0°.



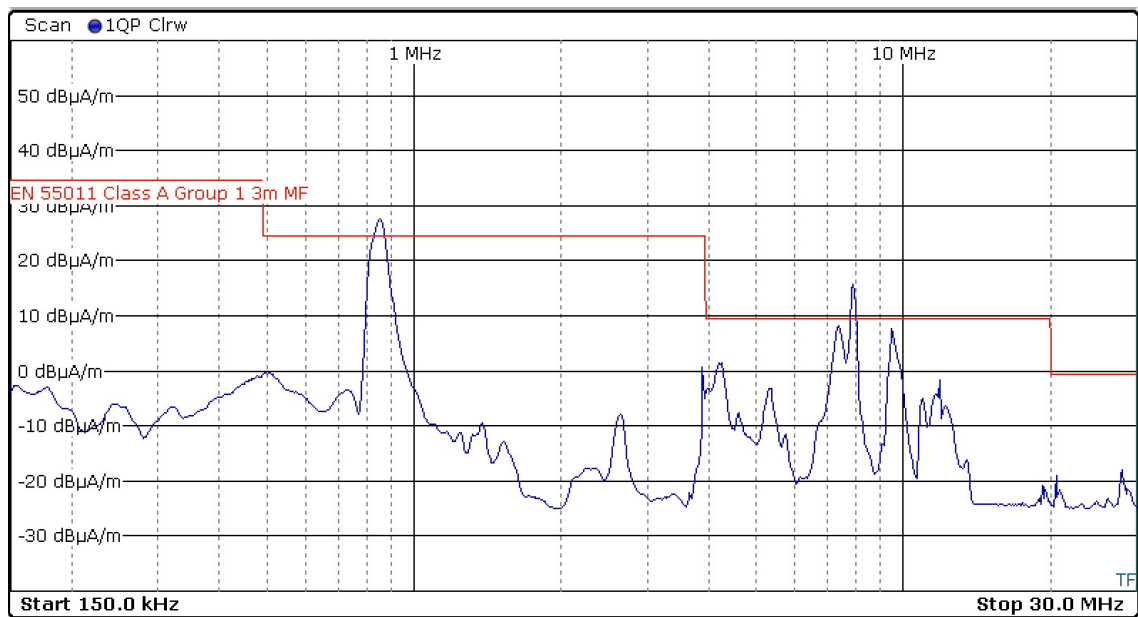
Kuva 8. Mittaustulos 2, 3 metrin etäisyys, 90° kulma

Kuvassa 8 on esitettyä saatu mittaustulos 3 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 90°.



Kuva 9. Mittaustulos 3, 10 metrin etäisyys, 0° kulma.

Kuvassa 9 on esitettyä saatu mittaustulos 10 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 0°.



Kuva 10 Mittaustulos 4, 10 metrin etäisyys, 90° kulma.

Kuvassa 10 on esitettyä saatu mittaustulos 10 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 90°.

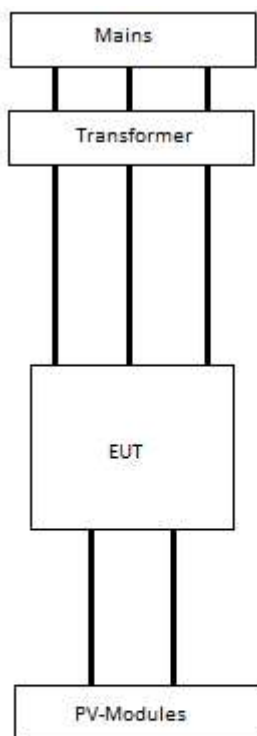
Laboratoriomittauksen mittaustuloksista voidaan todeta, että mitattava laite tuottaa lähikenttäänsä ja kaukokenttäänsä säteilevää sähkömagneettista häiriötä. Luokan A ryhmän 1 laitteille ei ole kuitenkaan määritettyä raja-arvoa.

Laboratoriomittauksen tarkoituksena on verifioida, että laitteen tuottama sähkömagneettinen häiriö täyttää määritetyn raja-arvon. Laboratoriomittauksen avulla voidaan määrittää mahdollisia ongelma-alueita. Mittauksen perusteella voidaan testattavan laitteen tuottaman sähkömagneettisen säteilyn vähentämiseksi tehdä toimenpiteitä.

, missä  $D$  on säteilylähteen suurin dimensio. Rayleighin kriteeriä käytetään, kun säteilylähde on liian suuri pistemäiseksi lähteeksi. Lähikentässä aaltoimpedanssi määritetään säteilylähteen ominaisuuksien mukaan. Yleensä lähikentässä toinen kenttätyypeistä on vallitseva ja säteilylähteen tyyppi määrittää syntyvän kentän tyyppin. Etäisyyden kasvaessa vallitseva kenttäkomponentti vaimenee nopeammin. Säteilylähteen energia on varastoitunut lähikenttään, jolloin kenttä häviää, kun säteilylähde sammutetaan. Kaukokentässä aalto etenee tasoaaltona, jolloin sähkö- ja magneettikenttäkomponentit vaimenevat samassa tahdissa ja aaltoimpedanssi on vakio. 7.2. Kenttämittaus

Tässä työssä kenttämittauksessa on tarkoituksena mitata PV-järjestelmän tuottamaa säteilevää sähkömagneettista häiriötä taajuusalueella 9kHz-30MHz. Mitattavan taajuusalueen ollessa alle 30 Mhz mitataan mittauksissa säteilevän sähkömagneettisen häiriön magneettista komponenttia. PV-Järjestelmät luokitellaan CISPR11:2015 luokkaan A ja ryhmään 1. Kentällä tehtävät mittaukset ovat In-Situ-mittauksia, joten mittaus suoritetaan silmukka-antennijärjestelmällä käyttäen taulukon 5 raja-arvoja.

Kenttämittaus suoritetaan kuvan 11 mukaisella testijärjestelyllä. Aurinkosähköjärjestelmässä invertteri muuntaa PV-paneelien tuottaman DC-jänniteverkon AC-jännitteeksi. Syötettävästä verkosta riippuen invertterin tuottama AC-jännite saattaa täytyä muuntaa syötettävän AC-jänniteverkon tasoiseksi muuntajan avulla.



1 & 2

1: Receiving Antenna  
2: Measuring Receiver

Kuva 11. Kenttämittauksen testijärjestely.

### Kenttämittauksen suorittaminen

Kenttämittaus suoritettiin käytössä olevalla PV-järjestelmällä. Testattava PV-järjestelmä sijaitsi rakennuksen katolla, joten rajoitettu tilan määrä rajoitti erilaisten mittausjärjestelyjen toteuttamisen mahdollisuutta. Testattavan PV-järjestelmän välittömässä läheisyydessä oli muita sähköisiä laitteistoja. Tämän vuoksi mittaus suoritettiin PV-järjestelmän ollessa päällä ja tämän jälkeen mittaus toistettiin PV-järjestelmän ollessa pois päältä. Mittaus suoritettiin Kuvan 11 mukaisen testijärjestelyn mukaisesti.

Rajoitetun tilan takia mittaus pystyttiin suorittamaan mitattavan PV-järjestelmän yhdeltä sivulta. Mittaus suoritettiin silmukka-antennijärjestelmällä kymmenen metrin etäisyydeltä testattavasta PV-järjestelmästä. Sääolosuhteet mittauksien aikana täyttivät CISPR11:2015-standardin vaatimat kriteerit.

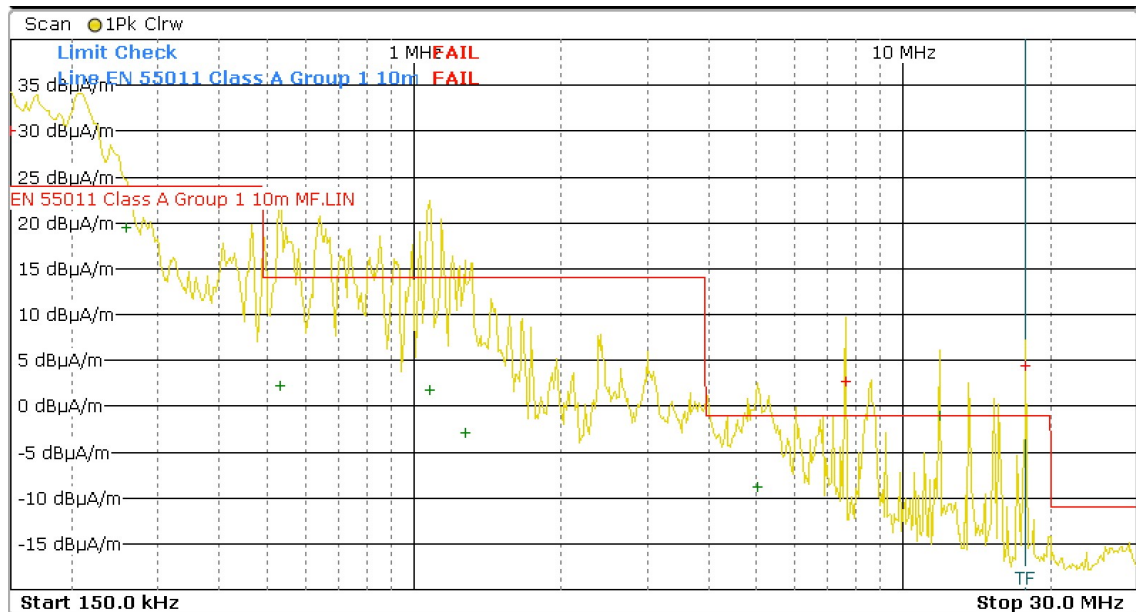


Kuva 12 Silmukka-antennin sijainti mittauksen aikana.

Kuvassa 12 on esitetty silmukka-antennijärjestelmän sijainti mittauksien aikana mitattavaan laitteistoon nähden.

### 7.2.2 Mittaustulos

Mittaukset suoritettiin silmukka-antennijärjestelmällä. Mittauksissa silmukka-antennin etäisyys oli 10 metriä testattavasta laitteistosta ja korkeus oli metrin maatasosta. Mittaukset suoritettiin kahdella eri silmukka-antennin kulmilla  $90^{\circ}$  ja  $0^{\circ}$  testattavaan PV-järjestelmään nähden. Mittaukset suoritettiin käyttäen Rohde & Schwartz ESRP-3 EMI-vastaanotinta. Mittauksessa EMI-vastaanottimella mitattiin taajuusaluetta 150 kHz–30 Mhz Quasi-Peak-ilmaisimella.

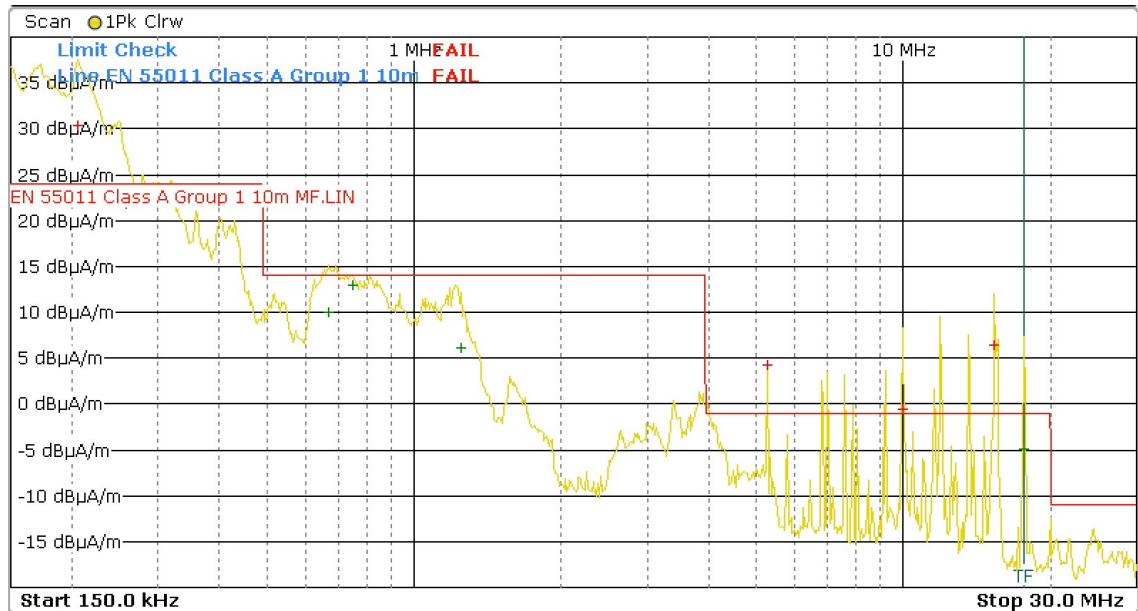


Kuva 13 Mittaus 1 10 metrin etäisyys, 0° kulma

Kuvassa 13 on esitettyä saatu mittaustulos 10 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 0°. Taulukossa 7 on esitettyä EMI-vastaanottimesta saadut mittauserot.

Taulukko 7. EMI-vastaanottimen mittaustulos mittauksesta 1.XDetector	Frequency	Level dBµA/m	Delta Limit
Quasi-Peak	150000	30.01	6.01
Quasi-Peak	258000	19.41	-4.59
Quasi-Peak	532500	2.18	-11.82
Quasi-Peak	1074750	1.71	-12.29
Quasi-Peak	1270500	-2.9	-16.9
Quasi-Peak	5030250	-8.85	-7.85
Quasi-Peak	7649250	2.65	3.65

Quasi-Peak	11854500	-1.01	-0.01
Quasi-Peak	17740500	4.45	5.45



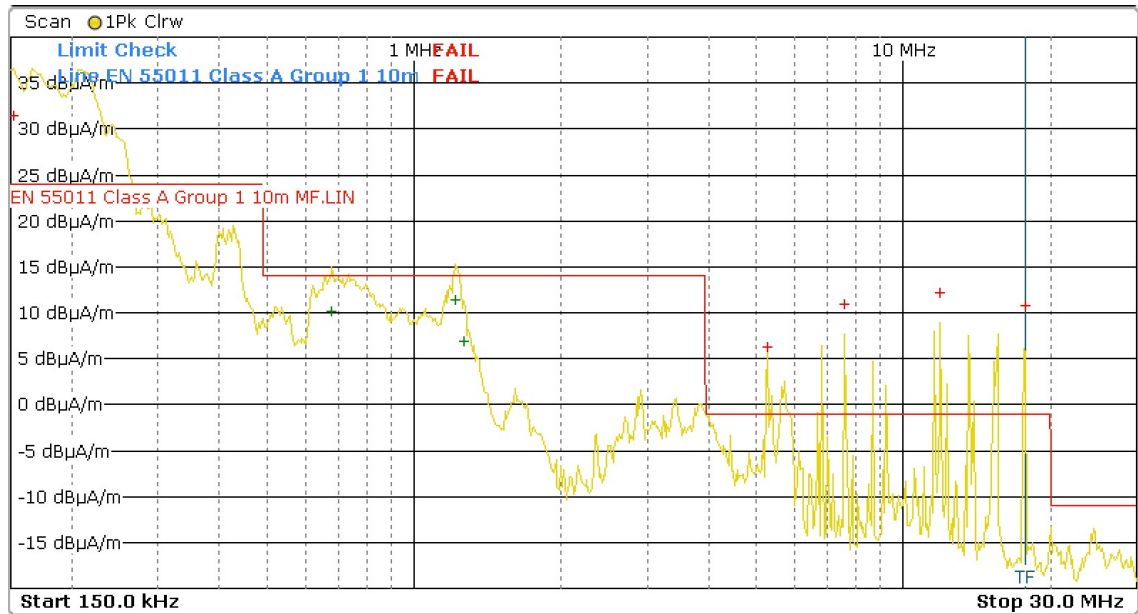
Kuva 14. Mittaus 2, 10 metrin etäisyys, 90° kulma.

Kuvassa 14 on esitettyä saatu mittaustulos 10 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 90°. Taulukossa 8 on esitettyä EMI-vastaanottimesta saadut mittausravot.

Taulukko 8. EMI-vastaanottimen mittaustulos mittauksesta 2.

Detector	Frequency	Level dBµA/m	Delta Limit
Quasi-Peak	206250	30.43	6.43
Quasi-Peak	258000	21.74	-2.26
Quasi-Peak	669750	9.93	-4.07
Quasi-Peak	750750	12.92	-1.08
Quasi-Peak	1250250	6.13	-7.87

Quasi-Peak	5282250	4.31	5.31
Quasi-Peak	9957750	-0.53	0.47
Quasi-Peak	15380250	6.45	7.45
Quasi-Peak	17670750	-4.99	-3.99



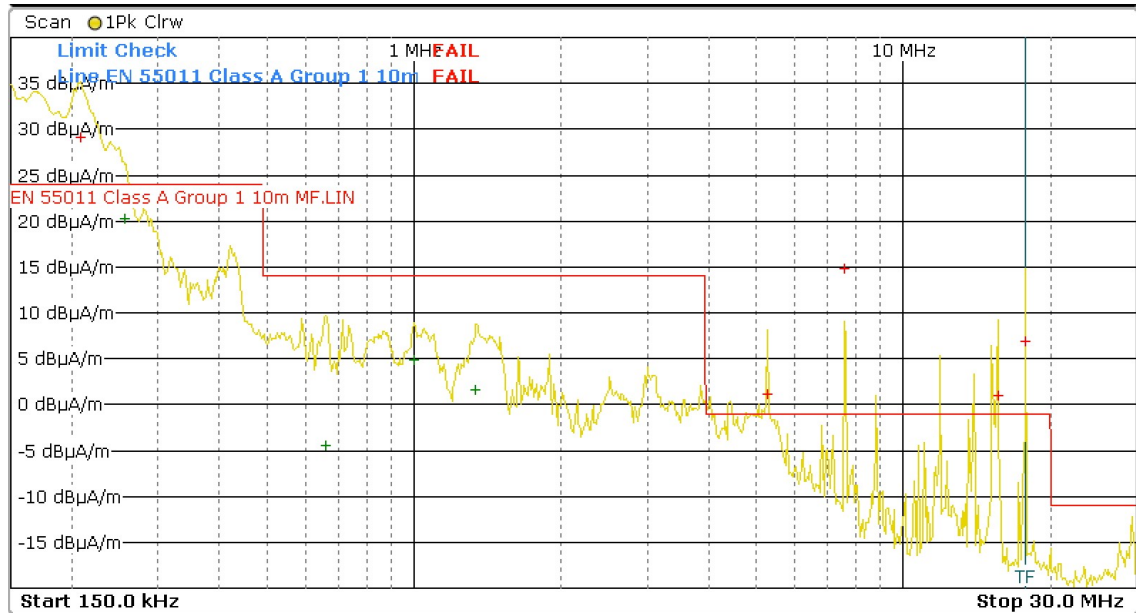
Kuva 15. Mittaus 3, 10 metrin etäisyys, 0°kulma.

Kuvassa 15 on esitettyä saatu mittaustulos 10 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 0°. PV-järjestelmä oli kytkettyä pois päältä mittauksen 3 aikana. Taulukossa 9 on esitettyä EMI-vastaanottimesta saadut mittausravot mittauksesta 3.

Taulukko 9. EMI-vastaanottimen mittausravot mittauksesta 3.

Detector	Frequency	Level dBµA/m	Delta Limit
Quasi-Peak	152250	31.49	7.49
Quasi-Peak	255750	21.94	-2.06
Quasi-Peak	678750	10.13	-3.87
Quasi-Peak	1216500	11.35	-2.65

Quasi-Peak	1263750	6.92	-7.08
Quasi-Peak	5282250	6.24	7.24
Quasi-Peak	7611000	10.89	11.89
Quasi-Peak	11924250	12.24	13.24
Quasi-Peak	17740500	10.81	11.81



Kuva 16. Mittaus 4. 10m etäisyys 90° kulma.

Kuvassa 16 on esitettyä saatu mittaustulos 10 metrin etäisyydeltä testattavasta laitteesta. Mittauksen aikana silmukka-antennin kulma testattavaan laitteeseen nähden oli 0°. PV-järjestelmä oli kytkettyä pois päältä mittauksen 4 aikana. Taulukossa 10 on esitettyä EMI-vastaanottimesta saadut mittausravot mittauksesta 4.

Taulukko 10 EMI-vastaanottimen mittaustulos mittauksesta 4.

Detector	Frequency	Level dBµA/m	Delta Limit
Quasi-Peak	208500	29.06	5.06
Quasi-Peak	255750	20.28	-3.72
Quasi-Peak	660750	-4.5	-18.5

Quasi-Peak	1002750	4.94	-9.06
Quasi-Peak	1338000	1.58	-12.42
Quasi-Peak	5282250	1.18	2.18
Quasi-Peak	7611000	14.86	15.86
Quasi-Peak	15666000	0.99	1.99
Quasi-Peak	17740500	6.94	7.94

Mittaukset 1 ja 2 suoritettiin PV-järjestelmän ollessa päällä ja mittaukset 3 ja 4 PV-järjestelmän ollessa pois päältä. Näin saatiin määritettyä PV-järjestelmän tuottama maksimaalinen ja minimaalinen sähkömagneettinen häiriö sen toimintaympäristössä.

Kun verrataan mittauksia 1 ja 3 toisiinsa (kuvat 13 ja 15), huomataan että mitattu säteilevä sähkömagneettinen häiriö väheni huomattavasti laitteiston toimintaympäristössä. Molemmissa mittauksissa tapahtuu kuitenkin CISPR11:2015-standardin määrittämien raja-arvojen ylityksiä In-Situ-mittauksille. (taulukot 7 ja 9).

Kun verrataan mittauksia 2 ja 4 toisiinsa (Kuvat 14 ja 16), huomataan että mitattu säteilevä sähkömagneettinen häiriö väheni hieman laitteiston toimintaympäristössä. Molemmissa mittauksissa tapahtuu kuitenkin CISPR-standardin määrittämien raja-arvojen ylityksiä In-Situ-mittauksille. (Taulukot 8 ja 10).

Täytyy kuitenkin huomioida, että tehdyt mittaukset ovat yksittäisiä hetkellisiä mittauksia. Yksittäisten hetkellisten mittauksien perusteella ei voida tarkalleen määrittää laitteiston toimintaympäristönsä tuottamaa säteilevän sähkömagneettisen häiriön määrää. Mittaustulos on tässä tapauksessa suuntaa-antava, jonka perusteella voidaan tarvittaessa aloittaa laitteiston toimintaympäristönsä tuottaman säteilevän häiriön laajempi kartoitus. Laajempien mittauksien tuloksen perusteella voidaan tarvittaessa aloittaa toimenpiteet säteilevän häiriön vähentämiseksi laitteiston toimintaympäristössä.

## 8 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli perehtyä matalataajuisien säteilevien emissioiden mittaamenetelmiin laboratorio ja kenttä olosuhteissa ja niihin koskeviin standardeihin. Tässä työssä suoritettiin CISPR11:2015-standardin määrittämien toimintatapojen ja

raja-arvojen mukaiset määritys mittaukset matalataajuiselle säteilevälle emissioille laboratorio ja kenttäolosuhteissa.

Laboratorio-olosuhteissa tehtävien mittauksien mittausmenetelmät, raja-arvo vaatimukset ja mittausolosuhteet eroavat kenttäolosuhteissa tehtävistä mittauksista.

Laboratorio-olosuhteissa tehtävissä mittauksissa ei ole testattavan laitteen välittömässä läheisyydessä muita sähkömagneettisen häiriön tuottajia, kun taas kenttäolosuhteissa testattavan laitteiston välittömässä läheisyydessä voi olla muita sähkömagneettisen häiriön tuottajia. Laboratorio-olosuhteissa käytetään säteilevälle sähkömagneettiselle säteilylle eri raja-arvoja kuin kenttä olosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa tehtävien mittauksien raja-arvot säteilevälle sähkömagneettiselle häiriölle on esitetty taulukossa 3 riippuen laitteen luokasta ja ryhmästä ja kenttäolosuhteissa tehtävien mittauksien raja-arvot on esitetty taulukossa 5 riippuen laitteen luokasta ja ryhmästä. Laboratorio-olosuhteissa on mahdollista suorittaa mittaukset monella eri mittausjärjestelmällä, kun taas kenttäolosuhteissa ei voida välttämättä suorittaa mittauksia eri mittausjärjestelmillä.

Laboratoriossa tehtävien mittauksien tavoitteena on määrittää testattavan laitteen tuottaman sähkömagneettisen häiriön määrä. Laboratoriomittauksien perusteella testattavalle laitteelle myönnetään hyväksyntä laitteen täyttäessä standardeissa määrätyt raja-arvot

Jos laitteiston toimintaympäristössä havaitaan ongelmia sähkömagneettisen häiriön määrästä, voidaan tarvittaessa suorittaa kenttämittaus. Kentällä tehtävän mittauksen tavoitteena onkin yleensä selvittää tarvittaessa, onko testattava sähköinen laitteisto häiriötekijä toimintaympäristössään.

Työssä mittaukset suoritettiin laboratorio- ja kenttäolosuhteissa samalla mittausjärjestelmällä. Laboratoriossa tehdyt mittaukset eivät ole kuitenkaan vertailukelpoisia kentällä tehtyihin mittauksiin, koska mittauksissa olleet laitteistot eivät ole samoja. Laboratoriossa mittaukset suoritettiin PVS980-keskusinvertterillä ja kentällä mittaukset suoritettiin käytössä olevalla PV-järjestelmällä, jossa käytössä ollut PV-invertteri oli PVS800-keskusinvertteri.



## Lähteet

Antenna Factor. Wikipedia. 2.5.2017. [https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_factor)

CISPR11. Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. Edition 6. 2015-06. Geneva: International Electrotechnical Commission.

CISPR 16-2-3. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-3 : Methods of measurement of disturbances and immunity – Radiated disturbance measurements. Edition 3.1, 2010-08. Geneva: International Electrotechnical Commission.

CISPR 16-2-5. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 2-5 : In situ measurement of disturbing emissions by physically large equipment. Edition 1.0, 2008-07. Geneva: International Electrotechnical Commission.

Direktiivi 2014/30/EU. Euroopan Parlamentti ja Neuvosto, 26.2.2014.

EMC sähkömagneettinen yhteensopivuus. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 29.7.2016: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuus/>.

Measuring Radiated Emission. Armstrong, K. A Practical Guide for EN 55022 and EN 55011. REO UK LTD: [www.reo.co.uk/files/handbook\\_7\\_-\\_55022\\_and\\_11.pdf](http://www.reo.co.uk/files/handbook_7_-_55022_and_11.pdf)

Radiotekniikan perusteet. Räisänen, A & Lehto, A. 2011. Helsinki: Otatieto

Radiotaajuus määräys 4. Viestintävirasto. 13.06.2017: <https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/laitmaarayksetpaatokset/maaraykset/radiotaajuusmaarays4.html>

Radiotaajuuksien käyttö. Viestintävirasto. 12.8.2009. [https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Radiotaajuuksien\\_kaytto.pdf](https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Radiotaajuuksien_kaytto.pdf)

Sähkömagneettinen yhteensopivuus. Wikipedia. 30.1.2017. [https://fi.wikipedia.org/wiki/sähkömagneettinen\\_yhteensopivuus](https://fi.wikipedia.org/wiki/sähkömagneettinen_yhteensopivuus).

## **Test report: Radiated emission 150 kHz – 30 MHz.**

### Contents

Test 1: Radiated emission 150kHz-30MHz

3

Test Results for Radiated Emission measurement	4
Test 2: Radiated emission 150kHz-30MHz In-Situ	13
Test Results for Radiated Emissions In-Situ 150 kHz-30 MHz	14

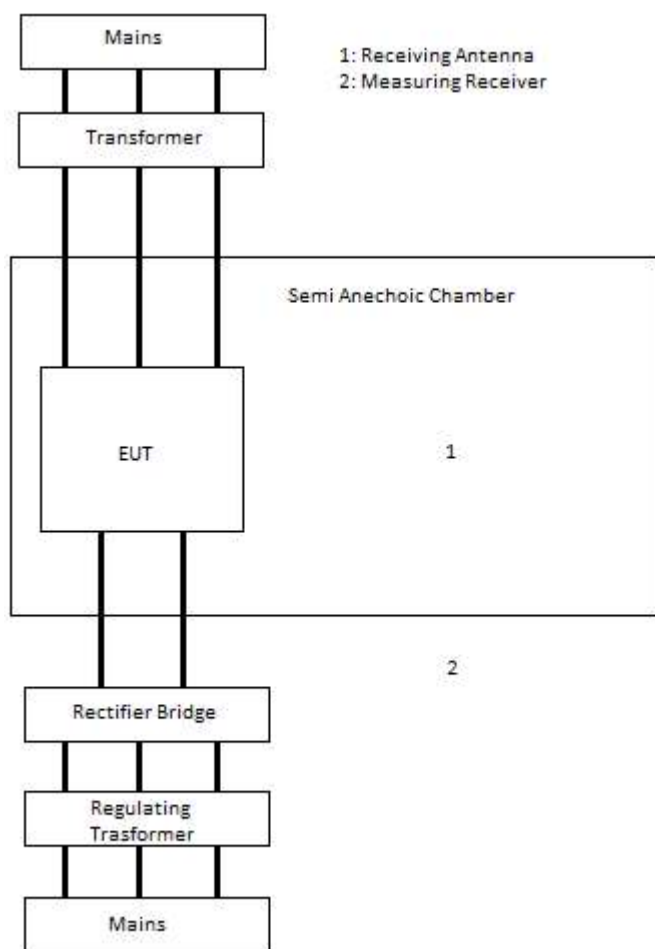
## 1 Test 1: Radiated emission 150 kHz-30 MHz

### Purpose of the test

The purpose of this test is to measure radiated emission 150 kHz – 30 MHz.

### Test setup

Use accurate EMI-receiver and Loop antenna system. Normal electrical network and powerful enough dc power can be used.



### Test procedure

Measure radiated emission of EUT. Measurements are performed using a loop antenna system. For measurements, the distance between the loop antenna is 3 and 10m from the device to be tested and the height is one meter from the ground plane. The measurements are carried out at two angles of the loop antenna 90 ° and 0 ° with

respect to the PV system to be tested. In the measurement, the EMI receiver measures the frequency range of a 150 kHz-30 Mhz Quasi-Peak detector

### Test Results for Radiated Emission measurement

#### EUT information

EUT	PVS980
Additional info	

#### Test setup information

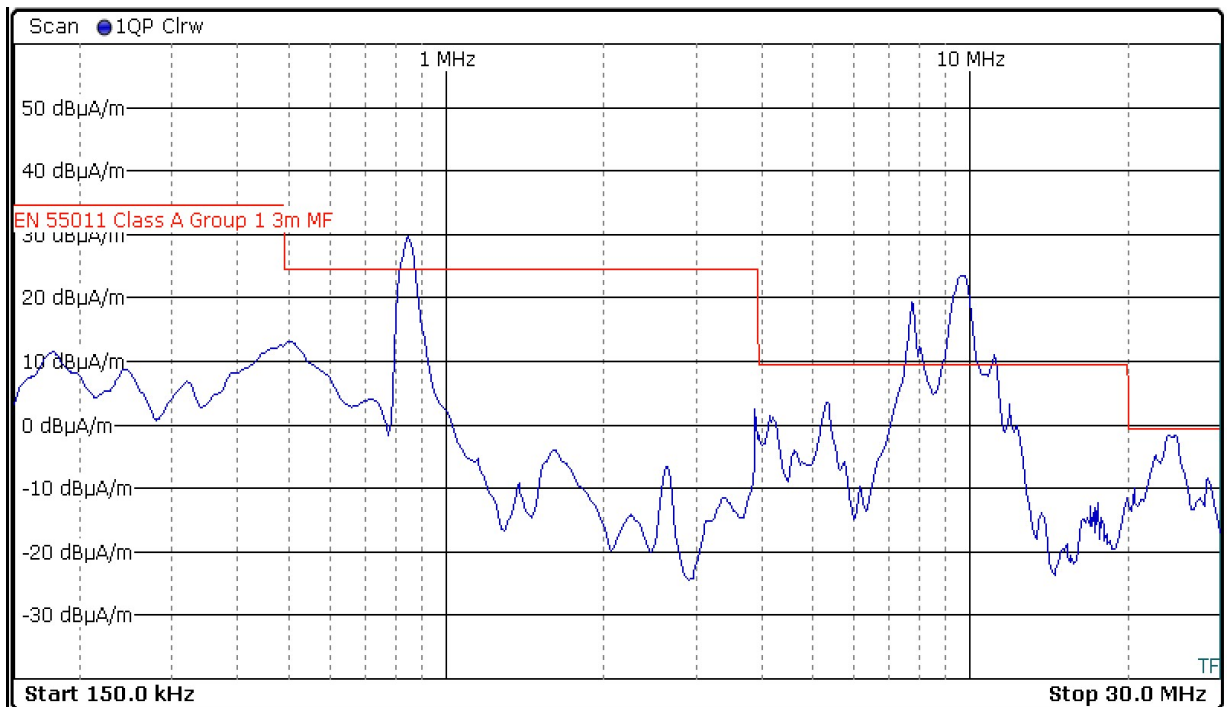
Test laboratory	Semi Anechoic Chamber
Test engineer	Niklas Poikkeus
Test date	18.10.2016
Test duration	1 day
Additional info	

#### Measurement equipment information

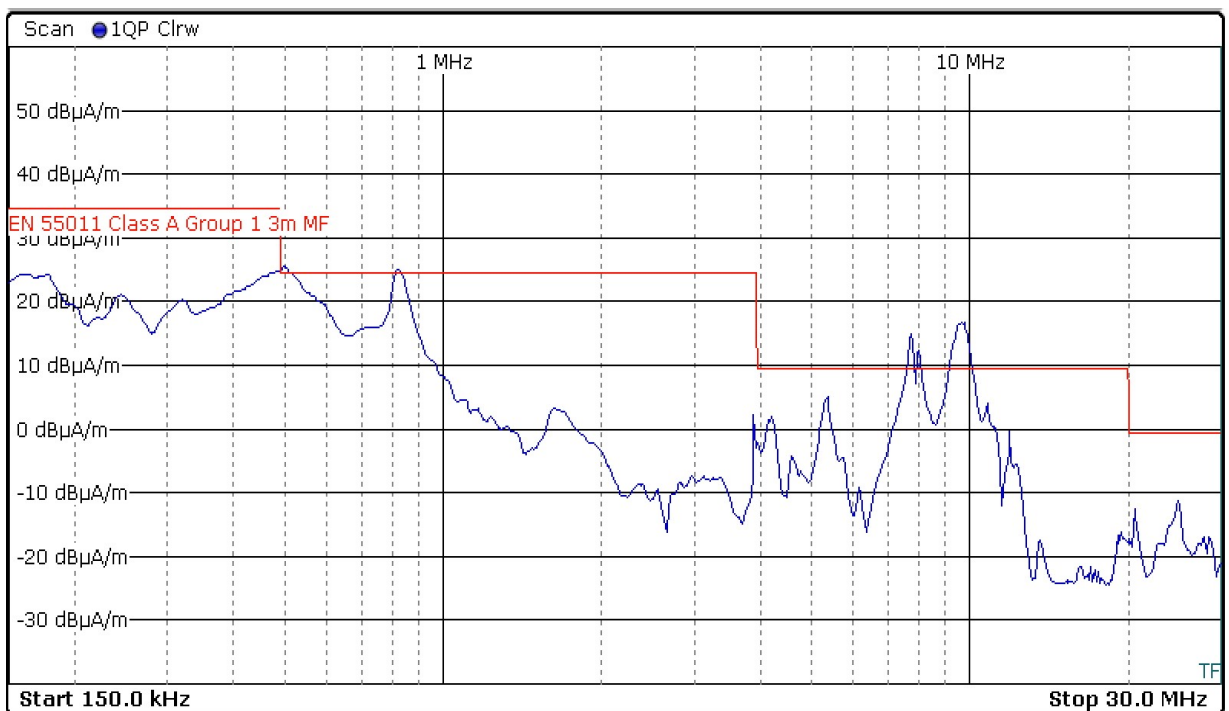
Type	Model
EMI-Receiver	Rohde & Schwartz ESRP-3
Loop Antenna	

#### Test results

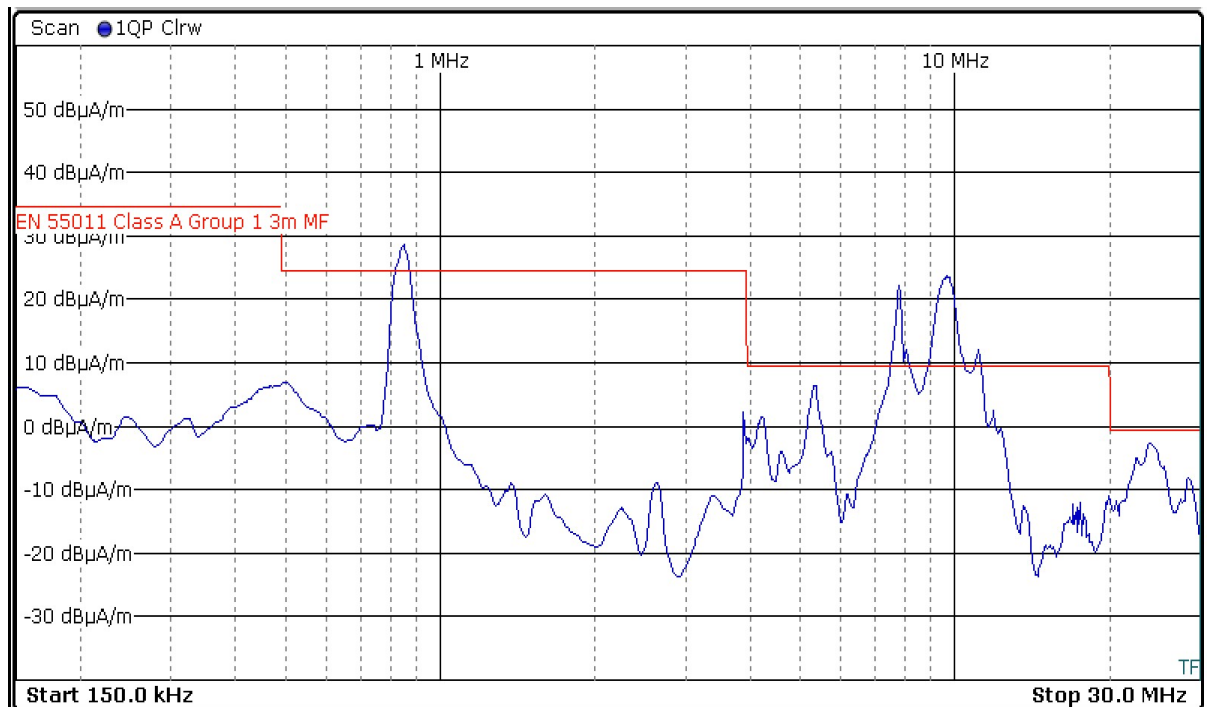
Measurement result: Measuring distance 3m, 0° angle. EUT Front side.



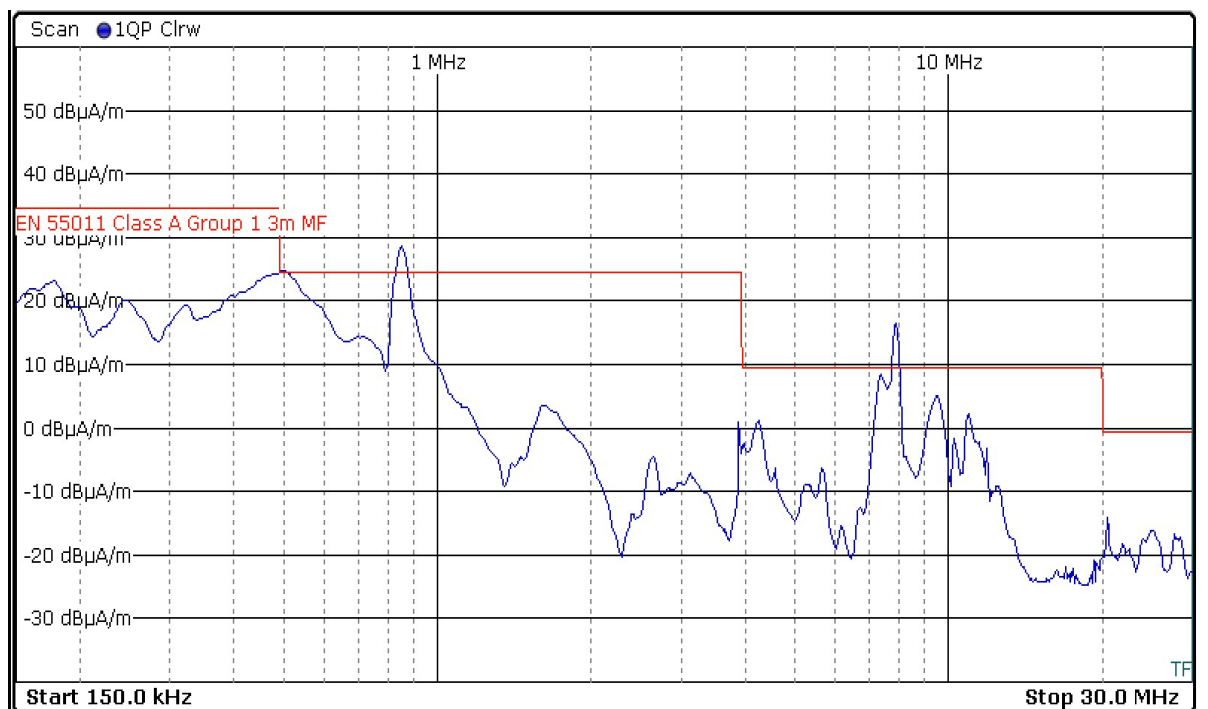
Measurement result: Measuring distance 3m, 90° angle. EUT Front side.



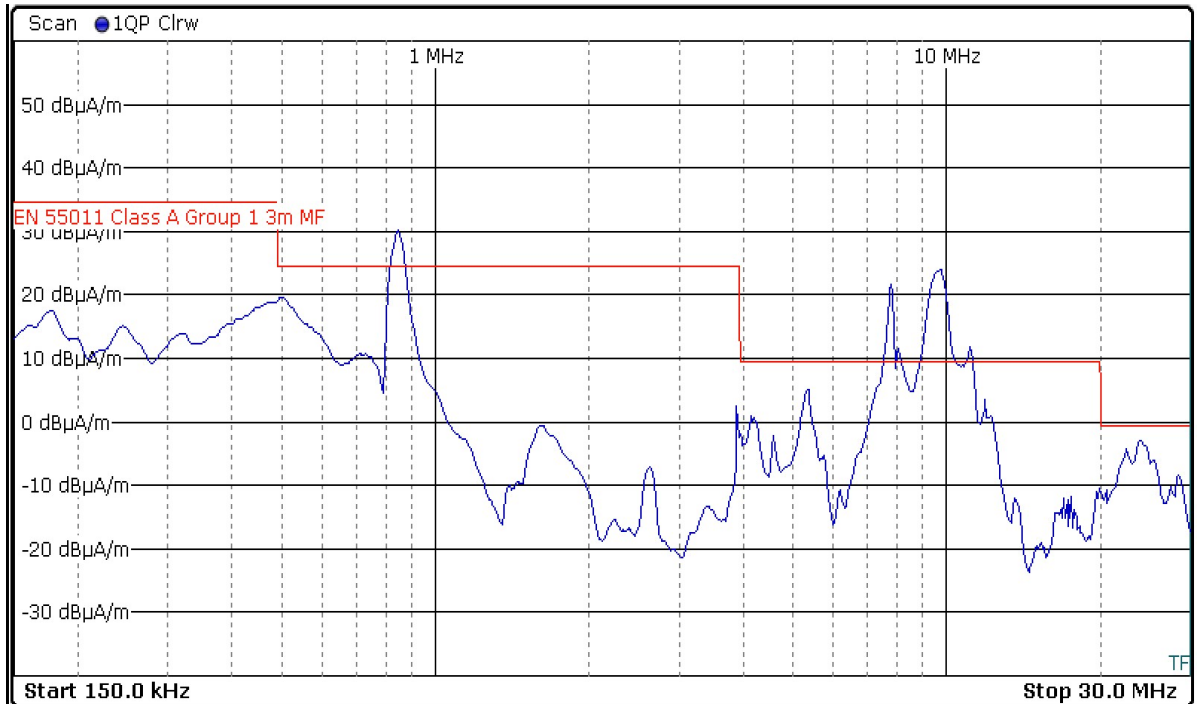
Measurement result: Measuring distance 3m, 0° angle. EUT Right side.



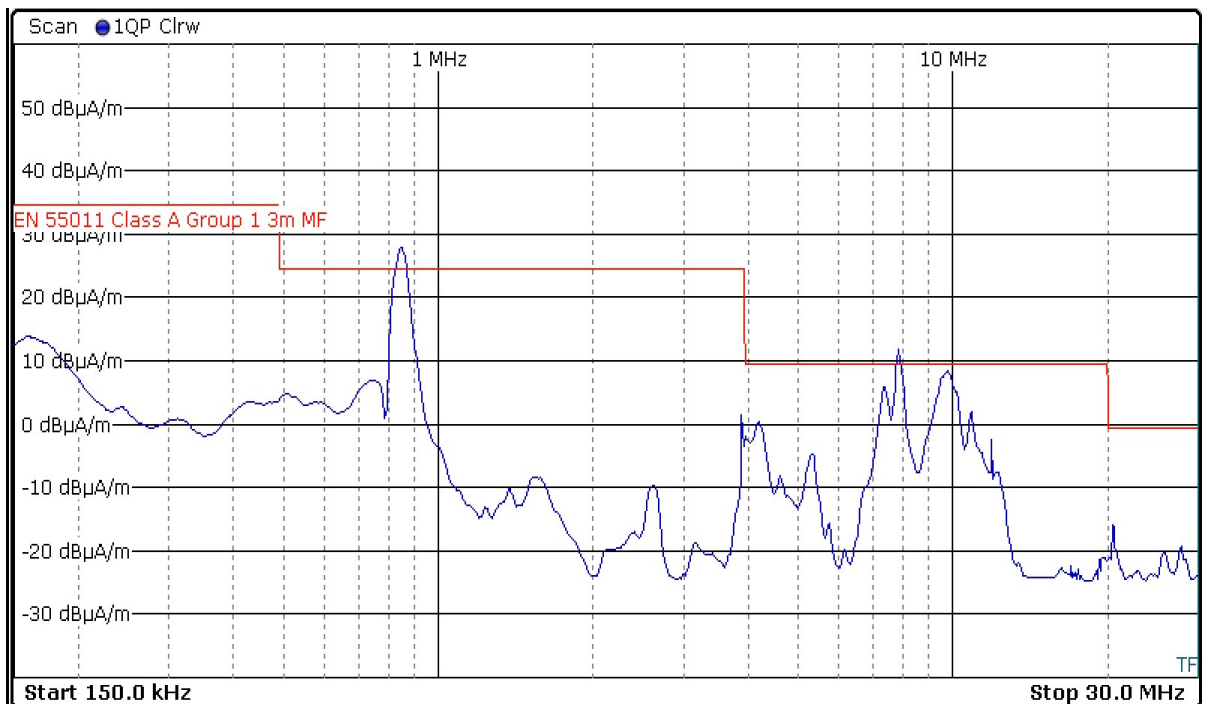
Measurement result: Measuring distance 3m, 90° angle. EUT Right side.



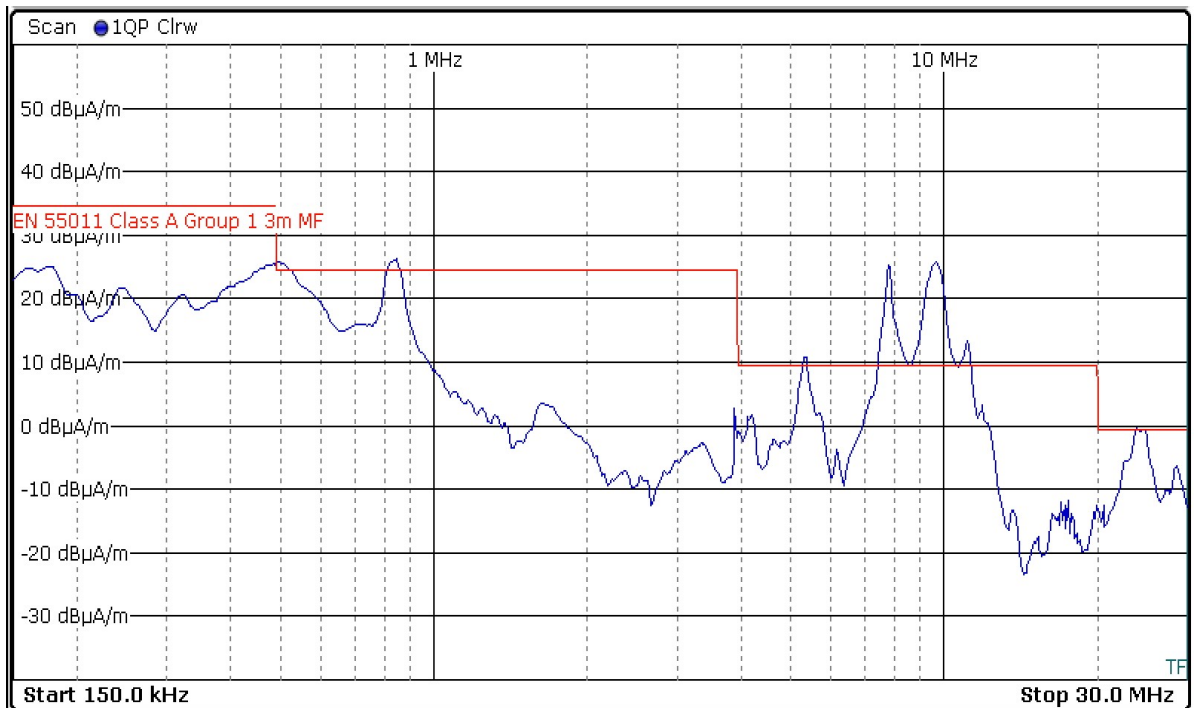
Measurement result: Measuring distance 3m, 0° angle. EUT Rear side.



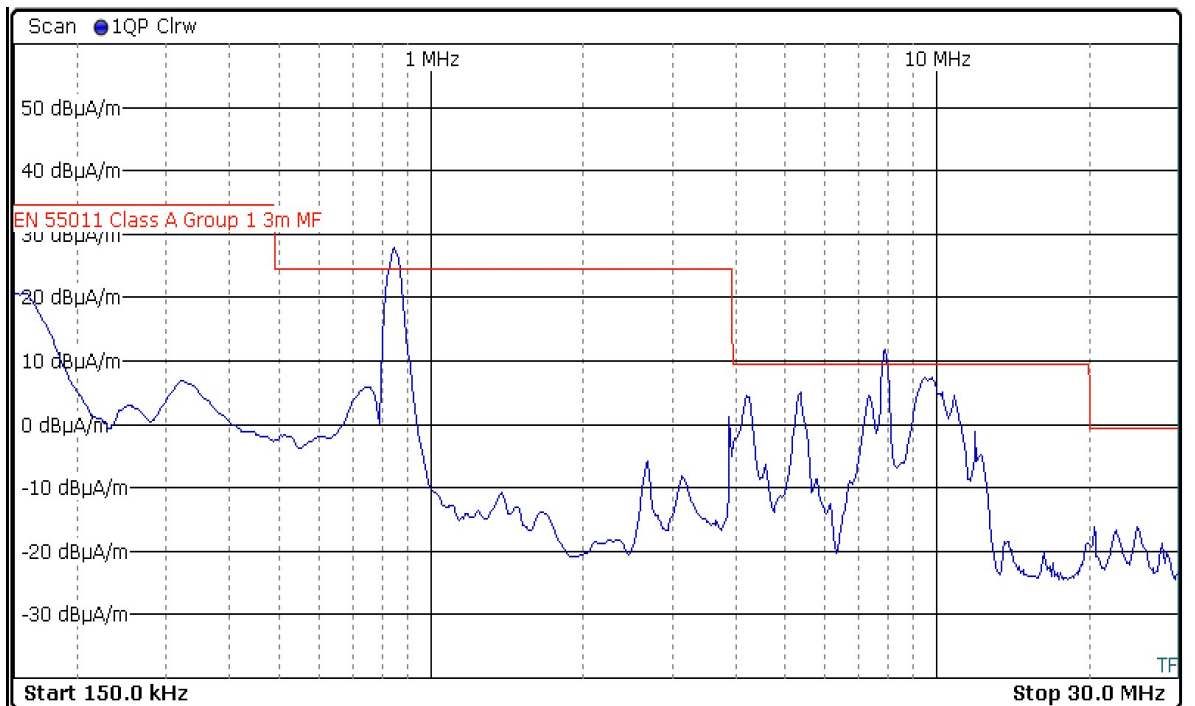
Measurement result: Measuring distance 3m, 90° angle. EUT Rear side.



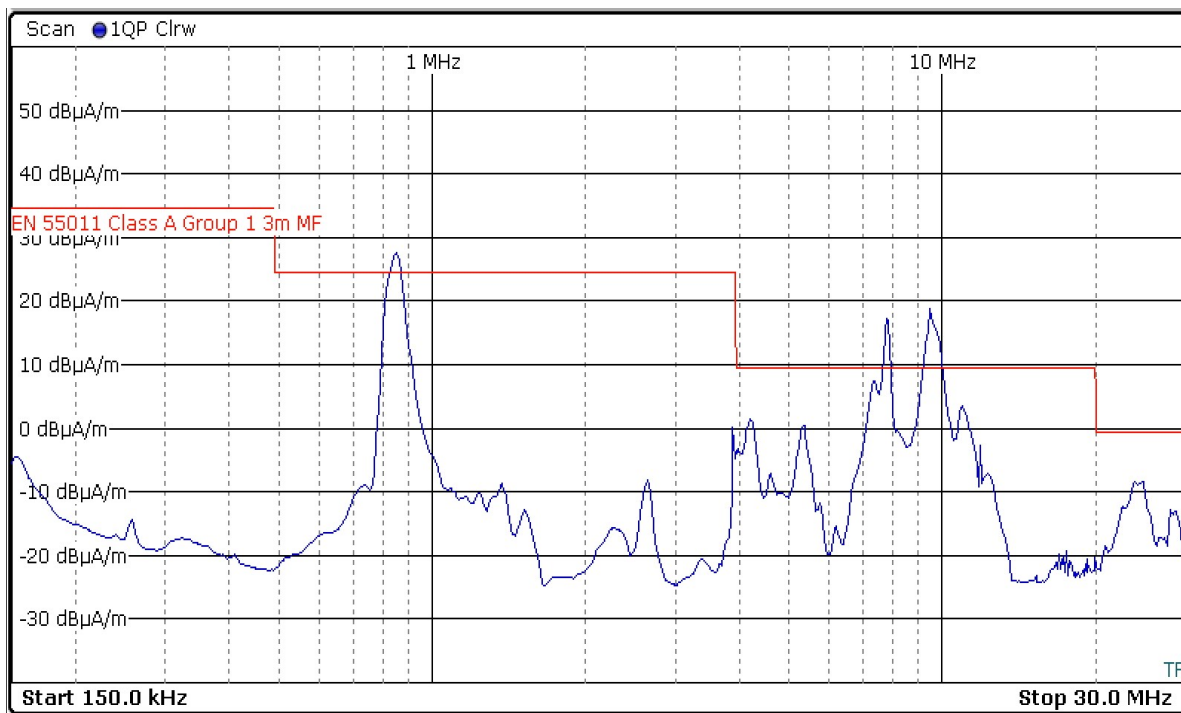
Measurement result: Measuring distance 3m, 0° angle. EUT Left side.



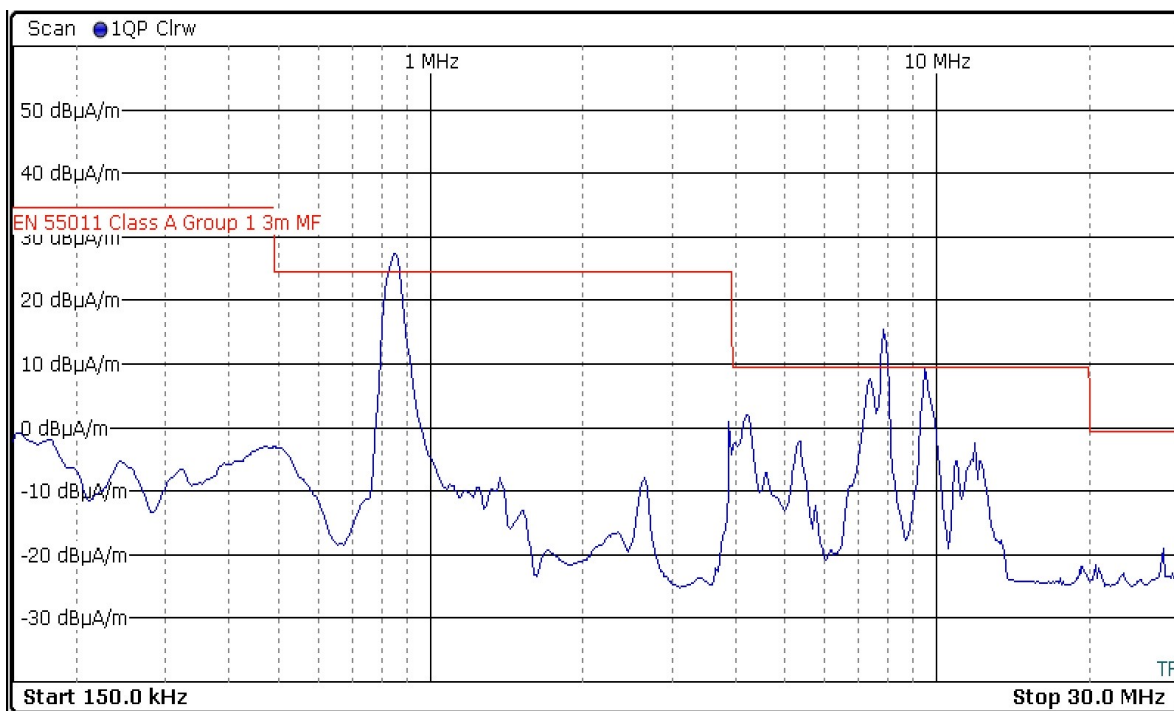
Measurement result: Measuring distance 3m, 90° angle. EUT Left side.



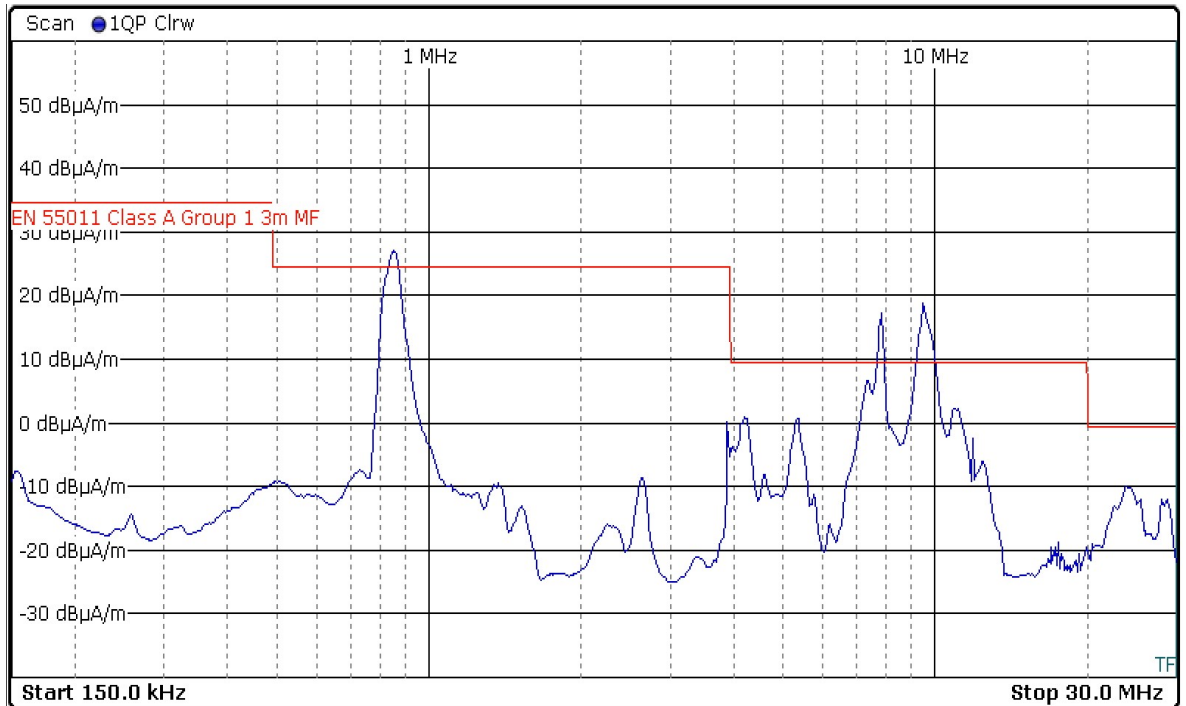
Measurement result: Measuring distance 10m, 0° angle. EUT Front side.



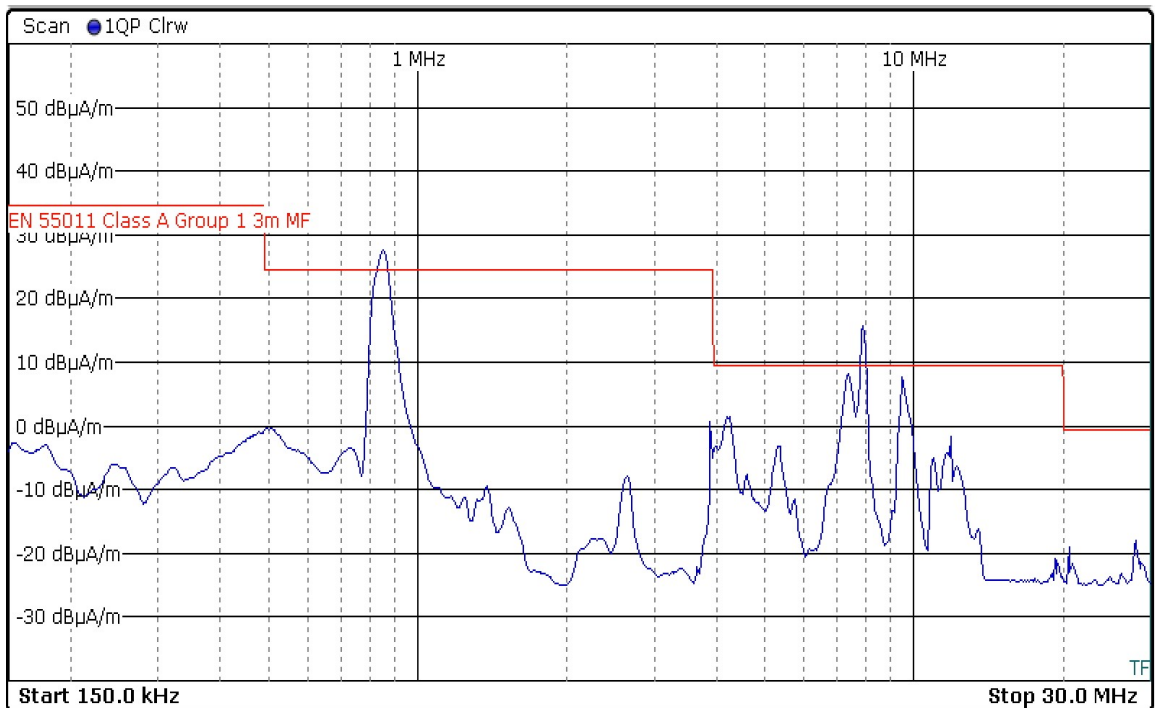
Measurement result: Measuring distance 10m, 90° angle. EUT Front side.



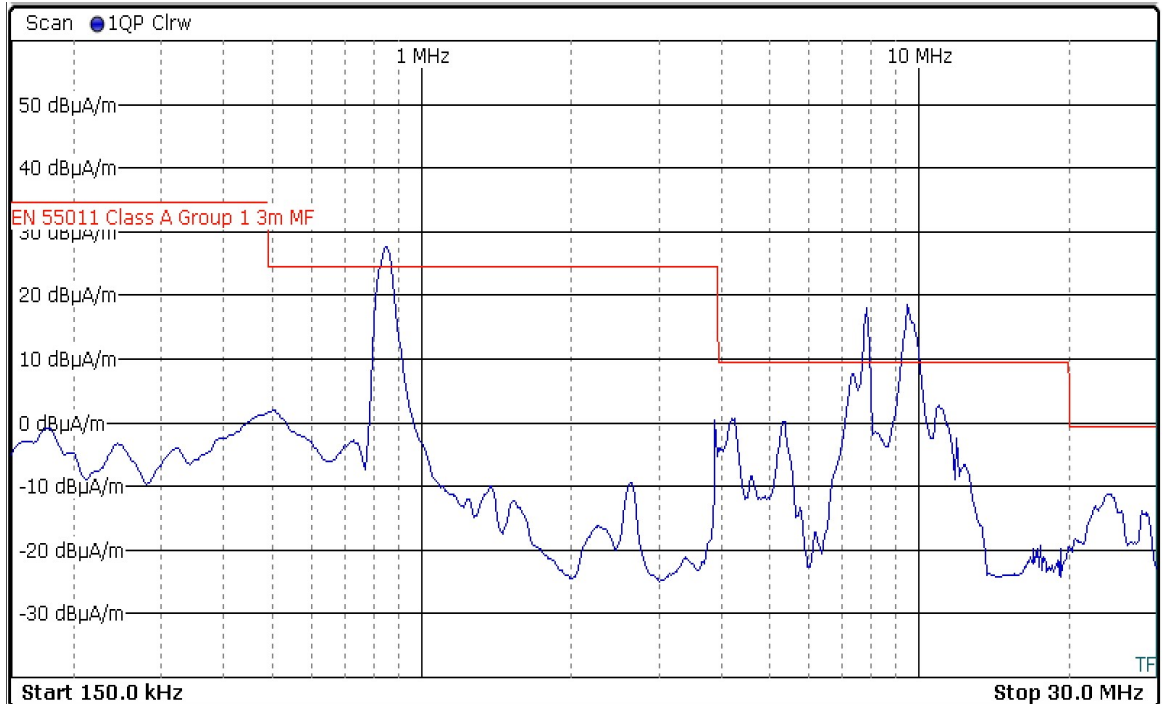
Measurement result: Measuring distance 10m, 0° angle. EUT Right side.



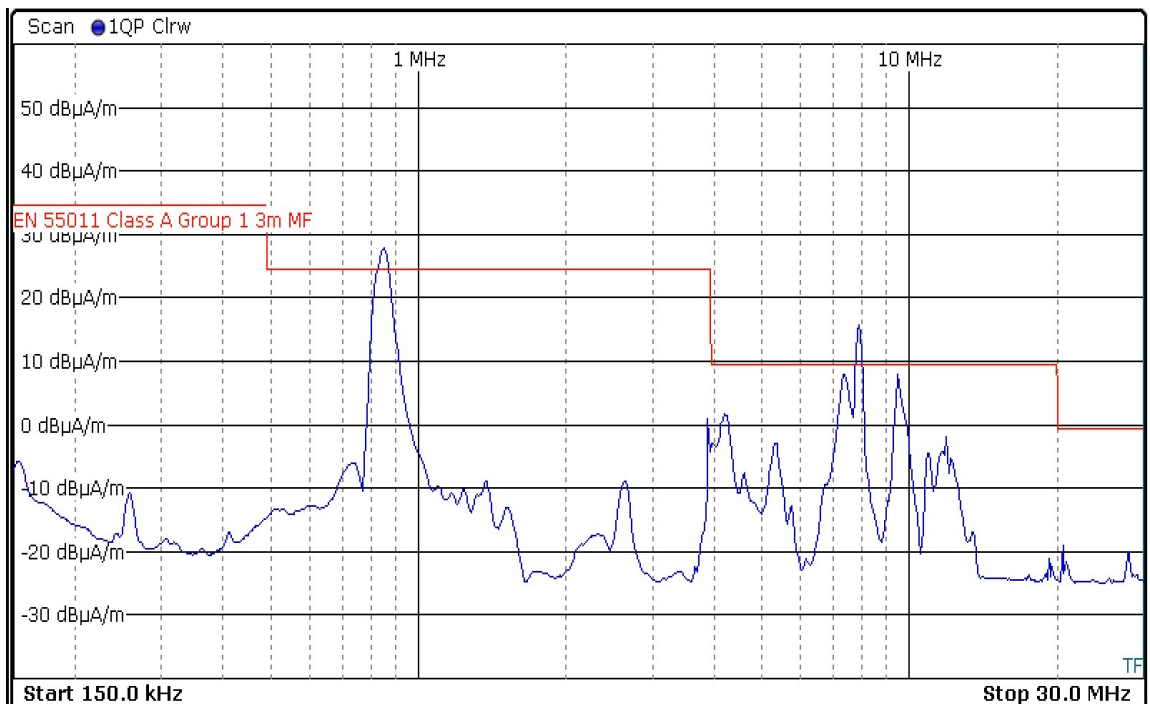
Measurement result: Measuring distance 10m, 90° angle. EUT Right side.



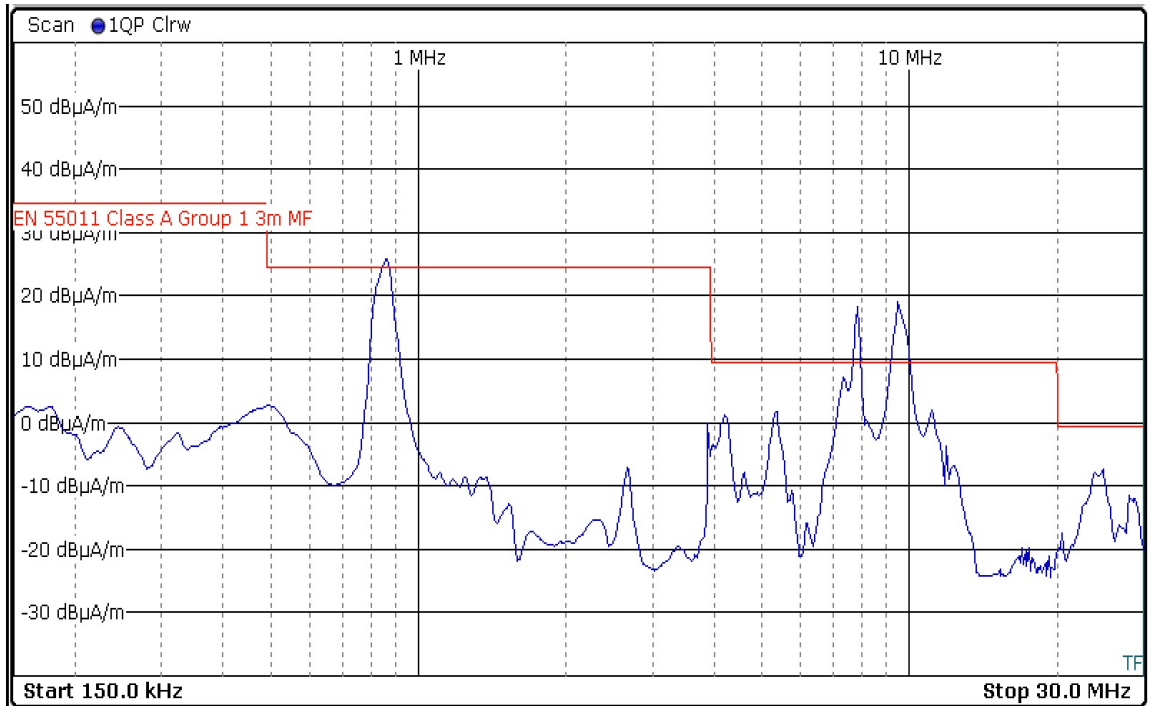
Measurement result: Measuring distance 10m, 0° angle. EUT Rear side.



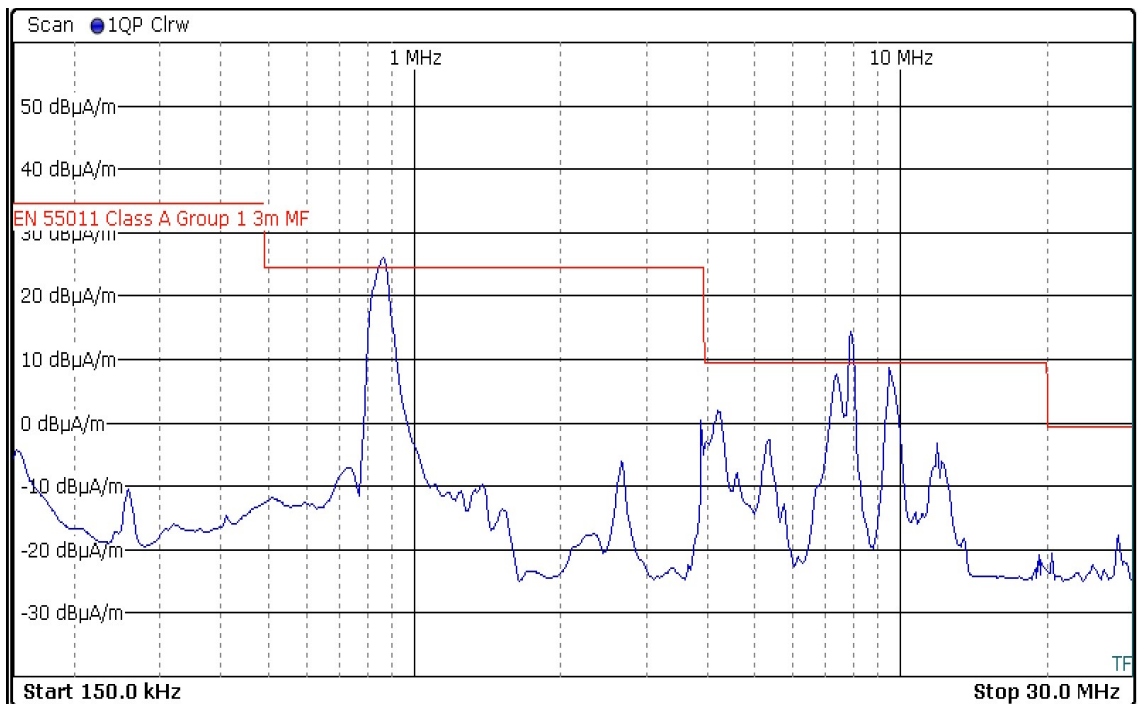
Measurement result: Measuring distance 10m, 90° angle. EUT Rear side.



Measurement result: Measuring distance 10m, 0° angle. EUT Left side.



Measurement result: Measuring distance 10m, 90° angle. EUT Left side.



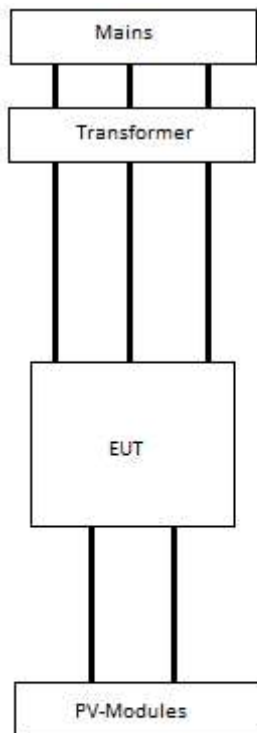
## Test 2: Radiated emission 150kHz-30MHz In-Situ

### Purpose of the test

The purpose of this test is to measure radiated emission 150 kHz – 30 MHz In-Situ.

### Test setup

Use accurate EMI-receiver and Loop antenna system. Normal operating PV-system is measured.



1 & 2

1: Receiving Antenna  
2: Measuring Receiver

### Test procedure

Measure radiated emission of EUT. Measurements are performed using a loop antenna system. For measurements, the distance between the loop antenna is 10m of the equipment to be tested and the height is one meter from the ground plane. The measurements are carried out at two angles of the loop antenna 90 ° and 0 ° with respect to the PV system to be tested. In the measurement, the EMI receiver measures the frequency range by a 150 kHz-30 MHz Quasi-Peak detector.

### Test Results for Radiated Emissions In-Situ 150 kHz-30 MHz

#### EUT information

EUT	PVS800
Additional info	Temperature 12 C <sup>0</sup> ,

#### Test setup information

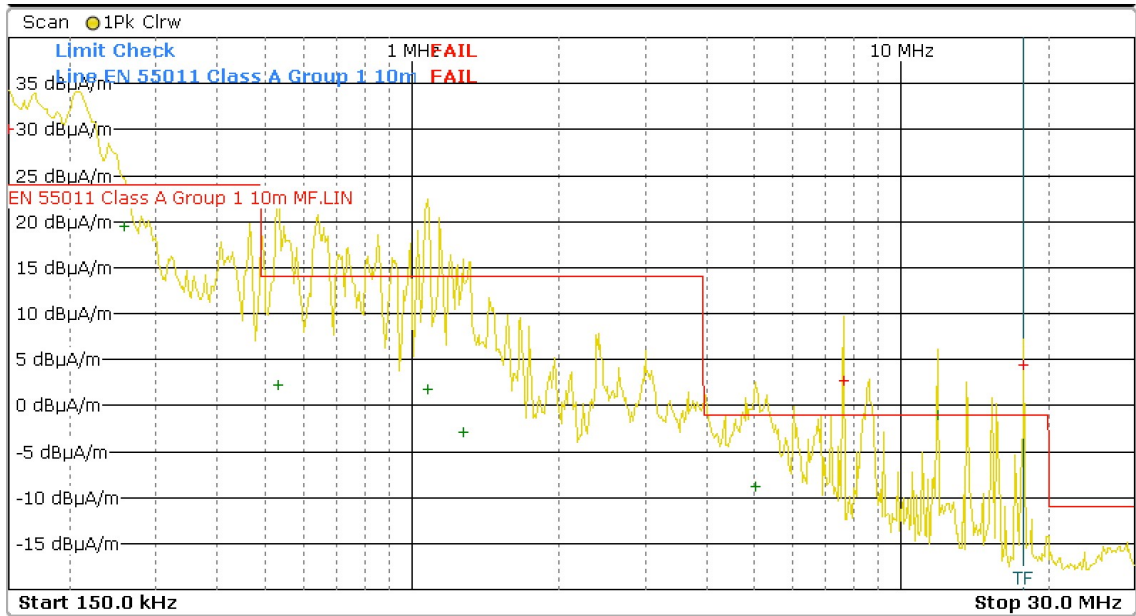
Test laboratory	PV-System
Test engineer	Niklas Poikkeus, Kari Ahlskog
Test date	3.5.2017
Test duration	1 day
Additional info	

#### Measurement equipment information

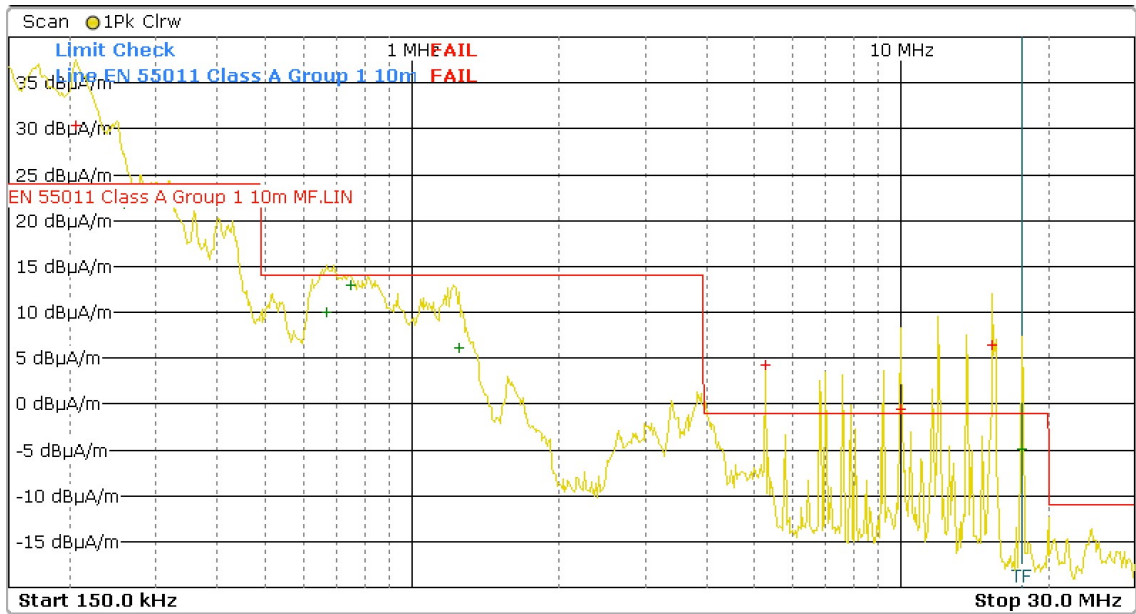
Type	Model
EMI-Receiver	Rohde & Schwartz ESRP-3
Loop Antenna	

#### Test results

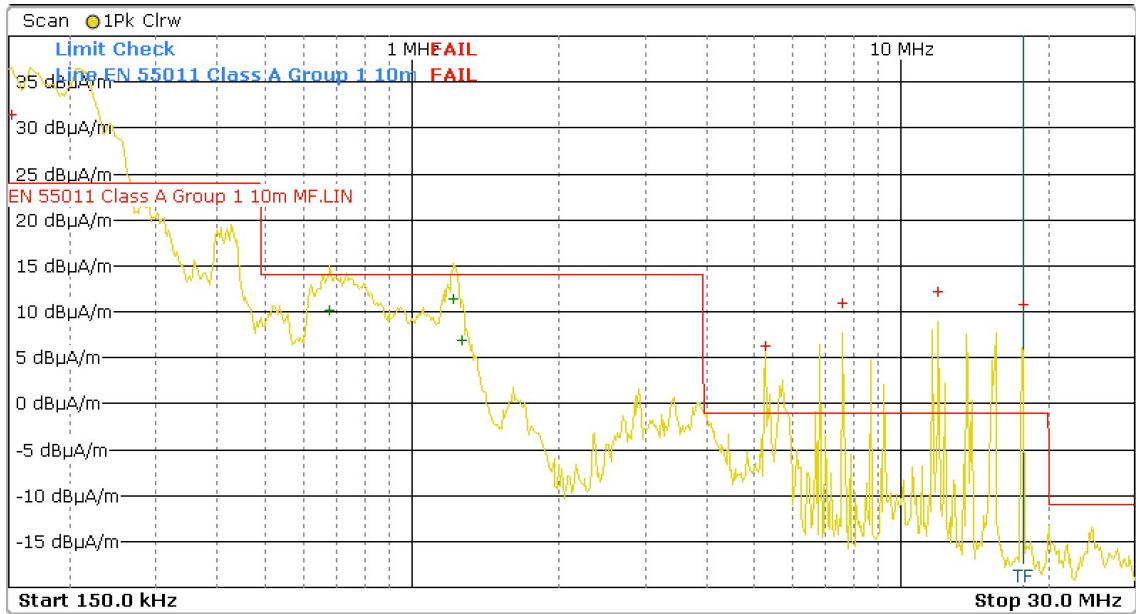
Measurement result: Measuring distance 10m, 0<sup>0</sup> angle. EUT Status On.



Measurement result: Measuring distance 10m, 90° angle. EUT Status On.



Measurement result: Measuring distance 10m, 0° angle. EUT Status Off.



Measurement result: Measuring distance 10m, 90° angle. EUT Status Off.

