

# 10

## ALTISTUMISEN MITTAUS JA LASKENTAMALLIT

Lauri Puranen

### SISÄLLYSLUETTELO

10.1	Johdanto .....	456
10.2	Sähkökentän ja magneettikentän mittausperiaatteet .....	456
10.3	Sähkömagneettisten kenttien mittalaitteet .....	474
10.4	Kehon sisäisten virtojen mittaus .....	479
10.5	SAR-mittaukset .....	483
10.6	Kalibrointimenetelmät .....	486
10.7	Mittausten epävarmuus .....	496
10.8	Esimerkkejä laskentamalleista .....	497

## 10.1 | Johdanto

---

Sähkömagneettisille kentille altistumisen määrittäminen voi perustua laitteen teknisten tietojen perusteella tehtyihin laskuihin, mittauksiin tai monimutkaisiin numeerisiin simulointeihin. Suurin osa käytännön säteilyturvallisuusmittauksista on vapaassa tilassa kehon ulkopuolella tehtäviä sähkö- ja magneettikentän voimakkuuden mittauksia. Haluttaessa tarkkaa tietoa altistumisesta pitää määrittää taajuusalueesta riippuen joko virran tiheys tai SAR altistuvassa kehon osassa.

Kansainvälisissä standardointielimissä on tehty ja on tekeillä tarkkoja mittaushjeita tärkeimmistä säteilyturvallisuusmittauksista, kuten matkapuhelimien SAR-mittauksista ja matkapuhelimien tukiasemien kentän voimakkuusmittauksista. Altistumisstandardeja ja -rajoja on käsitelty luvussa 8 Altistumisen rajoittaminen. Liitteisiin 1–3 on koottu käytännössä hyviksi havaittuja laskentamalleja.

## 10.2 | Sähkökentän ja magneettikentän mittausperiaatteet

---

Sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuden määrittämiseen joudutaan käyttämään hyvinkin erilaisia mittaus- ja laskentamenetelmiä altistumistilanteesta riippuen. Tärkeä vaatimus on, että sähkö- ja magneettikenttää mitataan mahdollisimman pienikokoisella mittapäällä. Tällöin mittaus ei vaikuta liikaa mitattavaan kenttään. Sopivan menetelmän valintaan vaikuttavat myös seuraavat tekijät:

- kentän taajuus ja spektri
- kentän aaltomuoto
- etäisyys säteilyn lähteestä (lähi- vai kaukokenttä)
- altistumisen luonne (koko- vai osakehoaltistus)
- altistuvan henkilön vaikutus lähteen säteilyominaisuuksiin
- standardien esittämät vaatimukset.

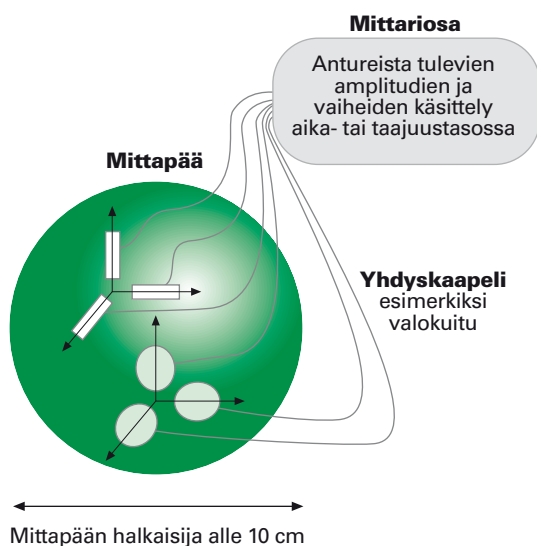
Sähkö- ja magneettikentän täydellinen määrittäminen mittaamalla on vaikea tehtävä. Se edellyttäisi sekä sähkö- ja magneettikentän osalta amplitudien ja vaiheiden samanaikaista mittausta kolmessa ortogonaalisessa suunnassa eli jokaisella taajuudella olisi määritettävä 12 mittausrvoa, katso kuva 10.1. Altistumismittaukset tapahtuvat yleensä monimutkaisesti jakautuneessa lähikentässä, jolloin määrittäminen on lisäksi tehtävä kymmenissä eri pisteissä. Kentän spektri ja amplitudi voivat myös vaihdella epäsäännöllisesti eri pisteissä. Lisäksi laajakaistaisessa kentässä voi olla tuhansia merkittäviä spektrikom-

ponentteja. Siksi on välttämätöntä rajata mittausdataa altistumisen kannalta tärkeisiin suureisiin ja käyttää kuhunkin altistumistilanteeseen sopivaa mittalaitetta ja -menetelmää. Tähän onkin joukko mahdollisuuksia:

- Mittalaitteen mittapäässä voi olla kolme toisiinsa nähden kohtisuoraa antennielementtiä, jotka mittaavat kentästä samanaikaisesti jokaisen kolmen ortogonaalisen kenttäkomponentin amplitudit, jotka lasketaan neliöllisesti yhteen. Tällaisen isotrooppisen eli asennosta riippumattoman mittapään summasignaali kuvaa altistumisen kannalta riittävän hyvin kokonaiskenttää, vaikka komponenttien vaiheita ei otetakaan huomioon.
- Yli 300 MHz taajuuksilla kokokehon altistumistilanne on niin lähellä kaukokenttä-olosuhteita, että altistumisen arviointiin riittää vain sähkökentän mittaaminen. Tämä on myös helpompaa kuin magneettikentän mittaaminen kyseisillä taajuuksilla. Kaukokentässä sähkö- ja magneettikentän suhde on vakio  $377 \Omega$  (vapaan tilan aaltoimpedanssi), jolloin sähkökentästä voidaan johtaa sekä magneettikentän voimakkuus että kentän tehotiheys.
- Kapeakaistainen kenttä: Radiotaajuusalueella käytettävät laajakaisetaiset mittarit näyttävät yleensä kentän voimakkuuden tehollisarvon tai vastaavan ekvivalenttisen tehotiheyden. Kentän taajuudet ovat useimmiten niin lähellä toisiaan, että mittaustulosta voidaan verrata suoraan tämän taajuusalueen viitearvoihin.
- Laajakaistainen kenttä: Mittausdataa käsittelemällä saadaan määritettyä sähkö- ja magneettikentän voimakkuuden tehollisarvo ja hetkellinen huippuarvo kullekin eri taajuudelle. Koska altistumisrajat (viitearvot ja perusrajat) muuttuvat taajuuden funktiona, kokonaistulosta ei voi suoraan verrata mihinkään viitearvoon. Täytyy laskea altistumissuhde, eli kullakin taajuudella määritetään mittaustuloksen ja viitearvojen osamäärä ja lasketaan ne yhteen (monitaajuussääntö, ICNIRP 1998). Vaihtoehtoisesti voidaan suoraan mitata biologisesti painotettu laajakaistaisen kentän huippuarvo käyttämällä suodatusta (painotettu huippuarvo, ICNIRP 2003). Tällöin painotettua huippuarvoa voidaan suoraan verrata erikseen johdettuun, laajakaistaisen kentän viitearvoon, kuten kohdassa 8.2 on esitetty.
- Pulssimainen mikroaaltosäteily: Mikroaaltolaitteista kuten mikroaaltouunista vuotavan mikroaaltosäteilyn hetkellinen tehotiheys voi olla

satojatuhansia kertoja suurempi kuin keskimääräinen tehotiheys, ja siten altistumisen arviointia varten on usein mitattava sekä hetkellinen pulssitehotiheys että keskimääräinen tehotiheys. Signaalin pulssimaisuus on otettava huomioon valittaessa mittauksiin sopiva mittapää.

- Vuotosäteily: Vuotosäteilyn tehotiheys pienenee nopeasti etäisyyden funktiona laitteesta. Vuotosäteily on mitattava hyvin lähellä laitetta, jolloin on käytettävä erityisiä vuotosäteilyn mittauksiin tarkoitettuja mittareita.

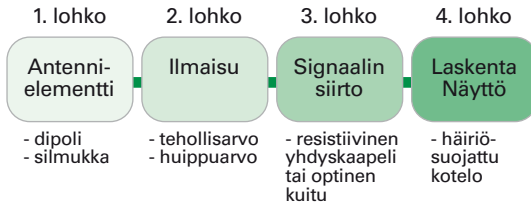


**Kuva 10.1** Ideaalinen sähkömagneettisen lähikentän mittari

Mittapää mittaa sekä sähkö- että magneettikentän samanaikaisesti samassa pisteessä. Dipoliliuskat esittävät sähkökentän antureita ja silmukat magneettikentän antureita.

Vapaan tilan sähkö- ja magneettikenttien mittauksissa käytettävien mittareiden toimintaperiaate on esitetty lohkokaavioina kuvassa 10.2. Ensimmäinen lohko sisältää sähkö- ja magneettikenttään reagoivan antennin. Lohko voi sisältää yhden tai useamman antennin. Sähkökentän antennina käytetään tyypillisesti dipolia, ja magneettikentän antennina silmukkaa, jota voi pienillä taajuuksilla nimittää myös kelaksi. Staattisen magneettikentän mittauksissa voidaan käyttää esimerkiksi Hall-ilmiöön perustuvaa anturia.

Lohko numero kaksi esittää signaalin ilmaisutapaa eli miten antenniin kytkeytynyt jännite tai virta muunnetaan helpommin siirrettäväksi sähköiseksi signaaliksi. Usein, ja radiotaajuuksilla lähes aina, signaali ilmaistaan jo antennielementtien yhteydessä. Mittaussignaali siirretään erilliseen mittariosaan siirtojohtoa pitkin, jota esittää lohko kolme. Siirtojohtoon suunnitteluun on kiinnitettävä huomiota, sillä kenttä ei saa merkittävästi kytkeytyä johtoon eikä johto saa häiritä kenttää. Optinen kuituyhteys suoraan mittariosalle on usein paras ratkaisu etenkin alle 1 MHz taajuisten sähkökentän tapauksessa. Lohko neljä esittää varsinaista mittariosaa, jossa antureilta tulevat mittaussignaalit käsitellään, mittaustulokselle tehdään esimerkiksi lineaarisuuskorjaus ja signaalit summataan. Lopputulos esitetään mittariosan näytössä.



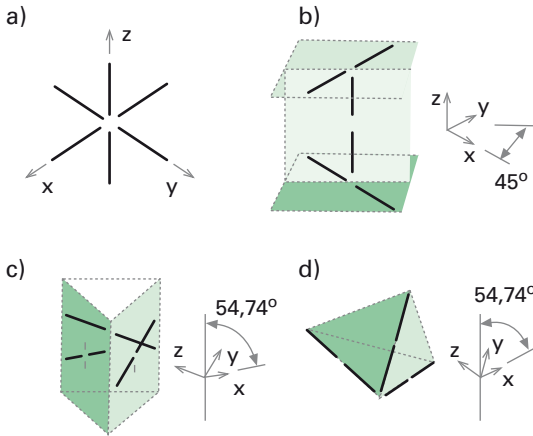
**Kuva 10.2 Sähkö- ja magneetikenttien mittareiden yleinen toimintaperiaate**

Radiotaajuuksilla signaali ilmaistaan jo antennielementtien yhteydessä. Pientaajuisilla alle 100 kHz kentillä ilmaisus suoritetaan mittariosassa, lohko 4.

Altistumismittauksissa käytettävän mittapään olisi hyvä olla isotrooppinen eli siihen indusoituvan jännitteen tulisi olla riippumaton säteilyn tulosuunnasta ja polarisaatiosta. Yhdellä dipolilla tai silmukalla tämä ei ole mahdollista, vaan tarvitaan ainakin kolme dipolia tai silmukkaa, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan. Kentänvoimakkuuden tehollisarvo saadaan summaamalla mitatut komponentit neliöllisesti yhteen.

Kuvassa 10.3 on esitetty erilaisia isotrooppisen sähkökentän mittapään rakenteita. Kuvassa 10.3a dipoleilla on yhteinen keskipiste, jolloin mittapään sähköinen keskipiste on samassa pisteessä kentän tulosuunnasta ja polarisaatiosta riippumatta. Tällainen rakenne on kuitenkin käytännössä vaikeampi toteuttaa kuin kuvissa 10.3b.–d. esitetyt rakenteet, joissa kyseisen pisteen paikka riippuu tulosuunnasta ja polarisaatiosta.

Isotrooppisen magneetikentän mittapään rakenteista on esitetty kaksi erilaista esimerkkiä kuvassa 10.4. Silmukoilla on yhteinen keskipiste

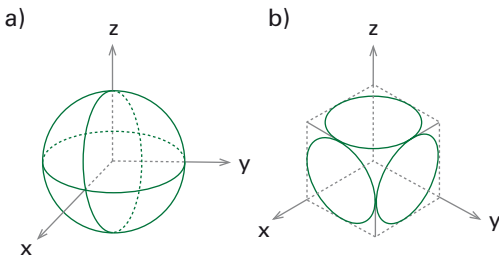


**Kuva 10.3 Isotrooppisen sähkökentän mittapään rakenteita**

- a) Dipoleilla yhteinen keskipiste  
 b–d) Dipolien keskipisteet eri kohdissa

a-kohdan rakenteessa eikä tehollisen keskipisteen paikka muutu aallon tulosuunnan tai polarisaation muuttuessa. Kuvan b-kohdassa silmukat ovat kohtisuorassa toisiaan vasten, mutta niillä on erilliset keskipisteet. Dipolien ja silmukoiden sijoittamisessa on otettava huomioon niiden väliset keskinäiskytkennät, jotka voivat huonontaa mittapään isotrooppisuutta. Dipoleihin verrattuna silmukoiden väliset kytkennät ovat suuremmat, joten silmukoiden aseteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota isotrooppista mittapäätä suunniteltaessa.

On myös kehitetty mittapäitä, joilla sähkö- ja magneettikenttä voidaan mitata samanaikaisesti. Tällaiset mittapäät voidaan koota erillisistä dipoleista ja sähkökentältä suojatuista silmukoista tai pelkästään suojaamattomista silmukoista, joista voidaan erottaa sähköisesti ja magneettisesti indusoituvat jännitteet tai virrat.



**Kuva 10.4 Isotrooppisen magneettikentän mittapään rakenteita**

- a) Sisäkkäiset silmukat, joilla on yhteinen keskipiste  
 b) Kohtisuorat silmukat erillisin keskipistein

## Staattinen ja pientaajuinen sähkökenttä

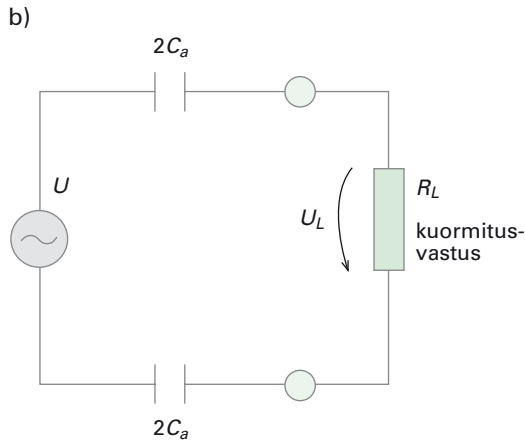
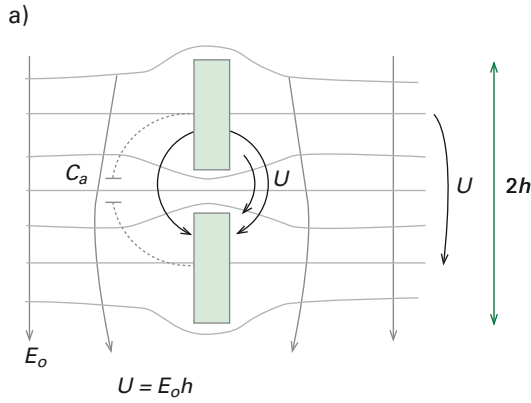
Staattiselle sähkökentälle asetetut altistumisrajat ovat varsin korkeat. Kansainvälisesti merkittävimpiä staattisen sähkökentän lähteitä ovat tasajännitteiset sähkönsiirtojohdot, sähköjunat, raitiovaunut ja näyttöpäätteet. Suomessa ei käytetä tasajännitteisiä siirtojohtoja eikä tasajännitteellä toimivia junia. Staattiset kentät ovat yleensä hyvin pieniä suhteessa suositusarvoihin. Staattisten sähkökenttien säteilyturvallisuusmittauksiin ei käytännössä ole tarvetta.

Altistumisen kannalta merkittäviä pientaajuisia sähkökenttiä on voima-johtojen ja sähköasemien läheisyydessä. Taajuusalue 50 Hz – 2 kHz on riittävä melkein kaikkiin pientaajuisten 50 Hz sähkökentän mittauksiin. Sähkönjakeluverkossa ei esiinny merkittävästi yliaaltoja yli 2 kHz taajuuksilla. Lisäksi sähkökenttä on useimmiten varsin puhdas, jolloin voi myös riittää, että mitataan vain 50 Hz komponentti.

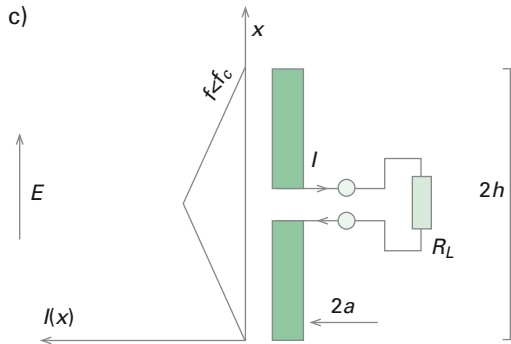
Pientaajuisten sähkökentän voimakkuutta mitataan kentän aallonpituuteen nähden lyhyellä dipolilla. Dipoliin indusoituva virta on verrannollinen ulkoisen sähkökentän voimakkuuteen ja riippuu dipolin rakenteesta. Dipoli on anisotrooppinen, ja kentän suunta täytyy määrittää kääntelemällä antennia. Suurin arvo saadaan silloin, kun dipoli on sähkökentän suuntainen, kuva 10.5. Kuvaan 10.5a on hahmotettu, miten johtavasta materiaalista valmistetun dipolin haarat vääristävät sähkökenttää. Kentän vääristymisen pienentämiseksi käytetään usein vähemmän johtavasta eli resistiivisestä materiaalista valmistettua dipolia, etenkin mikroaaltoalueella.

Kuvan 10.5b sijaiskytkennässä dipolia kuormitetaan vastuksella  $R_L$ . Suurilla taajuuksilla  $\omega \gg 1/(R_L C_a)$  piirin lähtöjännite ei riipu taajuudesta. Dipoliin indusoituvan virran jakauma on kolmiomainen. Virta on nolla dipolin päissä ja suurimmillaan dipolin keskellä olevan raon kohdalla, kuva 10.5c. Raon yli muodostuu jännite  $U = E_0 h$ , missä  $E_0$  on ulkoisen sähkökentän voimakkuus ja  $h$  on dipolin puolipituus. Lyhyen dipolin tehollinen pituus on siten puolet sen fysikaalisesta pituudesta.

Pientaajuisten sähkökentän mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pallodipolia, joka on esitetty kuvassa 10.6a. Pallodipoliin indusoituva virta määräytyy tarkasti pallon halkaisijasta eikä dipoliantennia tarvitse erikseen kalibroida. Pallodipolia käytetäänkin muiden anturien kalibrointiin ja sitä voidaan käyttää mittanormaalina.



Suurilla taajuuksilla  $\omega \gg \frac{1}{R_L C_a}$ ,  $U = E_0 h$



**Kuva 10.5 Lyhyt dipoli homogeenisessä sähkökentässä**

- a) Dipoli on sähkökentän suuntainen, jolloin dipoliin indusoituva virta on suurimmillaan.  
 b) Kuvan sijaiskytkennässä dipolia kuormitetaan vastuksella  $R_L$ . Vastuksen yli syntyvä jännite on taajuudesta riippumaton, jos vastuksen resistanssi  $R_L$  on paljon suurempi kuin  $1/(\omega C_a)$ , missä  $\omega$  on sähkökentän kulmataajuus ( $2\pi f$ ) ja  $C_a$  on dipolin antennikapasitanssi.  
 c) Dipolin virtajakauma



Pallodipoli koostuu kahdesta toisistaan eristetyistä puolipallosta, joiden väliin syntyvä virta riippuu ulkoisesta sähkökentästä  $E_0$  ja pallon säteestä  $r$  seuraavasti

$$I = 3\pi r^2 \omega \epsilon_0 E_0, \quad (10.1)$$

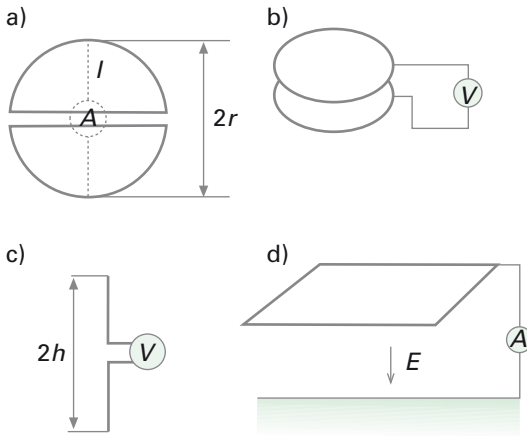
missä  $\omega$  on kentän kulmataajuus ( $2\pi f$ ) ja  $\epsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys.

Muunlaisten dipolien, esimerkiksi sylinterimäisen dipolin, virta riippuu ulkoisesta sähkökentästä seuraavasti

$$I = k\omega \epsilon_0 E_0, \quad (10.2)$$

missä  $k$  on antennivakio, joka on määritettävä kalibroimalla.

Pientaajuisten sähkökentän mittauksessa mittaajan on oltava kaukana mittapäästä, jotta mitattava kenttä ei häiriytyisi. Mittaussignaali on vietävä optisen yhteyden kautta anturista elektroniikkayksikölle tai koko elektroniikka ja näyttö on integroitava dipoliin.



**Kuva 10.6 Sähkökentän mittauseriaatteita**

a) Pallodipoli, jonka etuna on, että sitä ei tarvitse erikseen kalibroida. Ulkoisen sähkökentän synnyttämä virta riippuu täysin pallon halkaisijasta.

b) Levyelektrodi

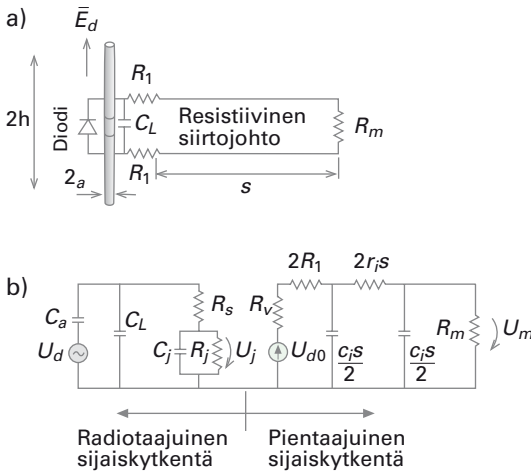
c) Dipoliantenni

d) Sähkökentän mittaus levyelektrodilla maan toimiessa referenssitasona.

## Radiotaajuinen sähkökenttä

Tyypillisiä radiotaajuisten sähkökentän lähteitä ovat matkapuhelimet ja niiden tukiasemat, radio- ja TV-asemat, tutkat ja suurtaajuuskuumentimet. Matkapuhelimille altistumisen mittaaminen on esitetty kohdassa 10.5 SAR-mittaukset.

Radiotaajuisten sähkökentän mittauksissa mittapään koon on oltava huomattavasti pienempi kuin pientaajuisten sähkökentän mittauksissa. Mittapää on yleensä isotrooppisia koostuen lyhyistä dipoliantureista. Lyhyen dipoliin indusoituva RF-jännite on hyvin pieni, joten se on ilmaistava dipolin yhteyteen kytketyllä RF-ilmaisimella. Ilmaistu pientaajuinen DC-signaali on huomattavasti helpompi siirtää mittarin näyttöyksikköön kuin RF-signaali. Ilmaistu jännite siirretään mittariosaan resistiivisistä eli suurohmista siirtojohtoa pitkin. Yksinkertaisen diodi-ilmaisimella varustetun radiotaajuisten sähkökentän mittapään ja siirtojohtojen rakenne sekä niiden radio- ja pientaajuinen sijaiskytkentä esitetään kuvassa 10.7. Dipoliin indusoituvaksi radiotaajuiseksi jännitteeksi saadaan edellä esitetyllä tavalla  $U_d = E_d h$ , missä  $h$  on dipolin puolipituus ja  $E_d$  on dipolin suuntaisen sähkökentän voimakkuus.



**Kuva 10.7 Yksinkertaisen radiotaajuisten sähkökentän mittapää ja siirtojohto**

Mittapää on varustettu diodi-ilmaisimella. Ilmaistu jännite siirretään mittariosaan suurohmista siirtojohtoa pitkin.

- a) Rakenne  
b) Radio- ja pientaajuinen sijaiskytkentä

Dipolin haarojen väliin kytketyn diodin radiotaajuiseen sijaiskytkentään kuuluvat häviöresistanssi  $R_s$ , liitosresistanssi  $R_j$  ja liitoskapasitanssi  $C_j$ . Pientaajuiseen sijaiskytkentään kuuluvat jännitelähde  $U_{d0}$  ja sen sisäinen (video) resistanssi  $R_v = R_j + R_s \approx R_j$ , koska  $R_s \ll R_j$ . Pienillä jännitetasoilla ( $< 10$  mV)  $U_{d0}$  voidaan laskea kaavasta

$$U_{d0} = \frac{\alpha}{2} U_j^2 \quad (10.3)$$

missä  $U_j$  on diodin liitosresistanssin yli vaikuttavan radiotaajuuden jännitteen tehollisarvo ja  $\alpha$  on diodin herkkyyskerroin, tyypillisesti  $25\text{--}40$  V<sup>-1</sup>.

Ilmaistu signaali siirretään suurohmista johtoa ( $s$  = pituus,  $r_i$  ja  $c_i$  = resistanssi ja kapasitanssi pituusyksikköä kohti) pitkin esivahvistimeen, jonka sisäänmenon impedanssia kuvaa sijaiskytkennässä resistanssi  $R_m$ . Johdon resistiivisyys on tyypillisesti  $100\text{--}1\,000$  kΩ/m. Suurohmisen johdon päätehtävänä on vähentää sähkökentästä johtoon kytkeytyviä virtoja, jotka vääristävät mitattavaa kenttää ja voivat kytkeytyä ilmaisimelle. Johto toimii myös alipäästösuodattimena, ja estää radiotaajuuden kentän kytkeytymisen esivahvistimelle. Suurohminen johto kuormittaa radiotaajuuksilla diodia, minkä estämiseksi dipolin haarojen ja johtimien väliin kytetään vastukset  $R_1$ .

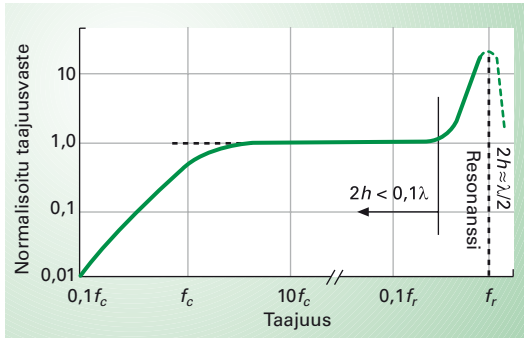
Kuvan 10.7 mukaisesta mittapäästä esivahvistimen sisäänmenoon tuleva normalisoitu jännite on esitetty taajuuden funktiona kuvassa 10.8. Tasaisen taajuusvasteen alueen alarajataajuus  $f_c$  saadaan kaavasta

$$f_c = \frac{I}{2\pi R_j (C_a + C_L)}, \quad (10.4)$$

missä  $C_L$  on diodia kuormittavan ulkoisen kondensaattorin kapasitanssi ja oletetaan paljon suuremmaksi kuin diodin liitoskapasitanssi  $C_j$ .  $C_a$  on dipolin antennikapasitanssi, joka voidaan laskea aallonpituuteen nähden lyhyelle dipolille kaavasta

$$C_a = \frac{\pi\epsilon h}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right) - 1}, \quad (10.5)$$

missä  $\epsilon$  on väliaineen permittiivisyys,  $2h$  on dipolin pituus ja  $2a$  sen paksuus. Kaavassa 10.5 on dipoli oletettu hyvin ohueksi ( $a \ll h$ ).



**Kuva 10.8** Diodi-ilmaisimella varustetun sähkökentän mittapään normalisoitu taajuusvaste

Taajuusvasteen tasainen alue riippuu dipolin pituudesta, kuormituskondensaattorista ja diodin lähtöresistanssista.

Dipoli menee resonanssiin taajuudella  $f_r$ , jolla dipolin pituus ( $2h \approx \lambda/2$ ) on puolet aallonpituudesta. Dipolianturin taajuusvaste alkaa nousta, kun dipolin pituus ( $2h \approx 0,1\lambda$ ) on kymmenesosa aallonpituudesta. Oletamalla esivahvistimen sisäänmeno-resistanssi  $R_m$  paljon suuremmaksi kuin resistiivisen johdon kokonaisresistanssin ja vastusten  $R_1$  resistanssin summa ( $2(r_s + R_1)$ ) voidaan taajuusvasteen tasaisella alueella ( $f_c < f < 0,2f_r$ ) mittapäästä esivahvistimelle saatava jännite  $U_m$  laskea kaavasta

$$U_m = \frac{\alpha}{2} \left( \frac{C_a}{C_a + C_L} \right)^2 \frac{h^2 E_d^2}{1 + \left( \frac{f_c}{f} \right)^2}, \quad (10.6)$$

missä  $E_d$  on dipolin akselin suuntaisen sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo ja  $f_c$  saadaan kaavasta 10.4. Tällaisella mittapäällä voidaan mitata sähkökenttää aina noin 1 GHz taajuudelle asti.

Sähkökentän mittapään kaistaa voidaan kasvattaa suuremmille taajuuksille noin 50 GHz asti valmistamalla dipolin haarat johtavan aineen sijasta suurohmisesta aineesta. Tällaisen dipolin virtajakauma on pienillä taajuuksilla kolmiomainen ja suurilla taajuuksilla lähes tasainen. Resisttiivisyys parantaa taajuusvastetta siten, että puolen aallonpituuden kohdalla tapahtuva resonanssi häviää.

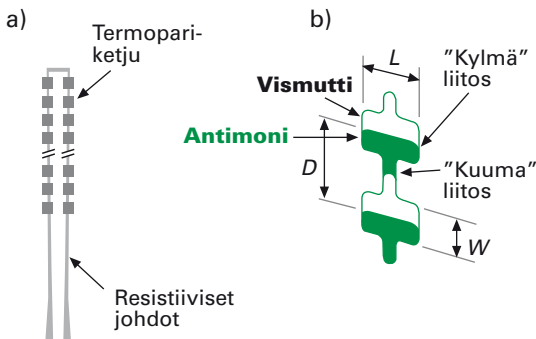
Sähkökentän mittapää voidaan valmistaa myös suurohmisesta termopari-riktetjusta. Termoparien käyttö radiotaajuisen tehon ilmaisuun perustuu

niiden kykyyn muuttaa absorboituva teho siihen verrannolliseksi tasajännitteeksi. Termoparit valmistetaan resistiivisestä ohuesta kalvosta, jossa on vuorotellen kahta eri metallia; antimonia ja vismuttia, jotka liitoskohdissa menevät osittain päällekkäin muodostaen lämpösähköisen liitoksen. Lisäksi rakenteessa on vuorotellen leveitä kylmiä ja kapeita kuumia osia. Kapeiden osien resistanssi on huomattavasti suurempi ja absorboituminen tapahtuu lähinnä niissä leveiden osien toimiessa jäädyttäjinä. Kuvassa 10.9 on esitetty termopareista muodostuvan mikroaaltosäteilymittarin mittapään rakenne. Lämpötilaeron vaikutuksesta syntyy potenti-aaliero, joka voidaan laskea kaavasta

$$U_{i0} = \tau(T_H - T_C) = \gamma_t P_t, \quad (10.7)$$

missä  $T_H$  on kuuman ja  $T_C$  kylmän liitoksen lämpötila. Seebeckin kerroin  $\tau$  riippuu liitoksen materiaaleista.  $P_t$  on liitokseen absorboituva teho ja  $\gamma_t$  on jänniteherkkyyserroin. Yhdessä liitoksessa syntyvä jännite on hyvin pieni (noin 1  $\mu\text{V}$ ), joten niiden kytkemisestä sarjaan on paljon hyötyä. Termoparin pituuden eli kylmien liitosten välimatkan tulee olla suurimmalla käyttötaajuudella korkeintaan neljäsosa aallonpituudesta, katso kuva 10.9a.

Termopariaketju muodostaa resistiivisen antennin, jossa ilmaistu jännite pysyy likimain vakiona laajalla taajuusalueella (tyypillisesti 300 MHz – 20 GHz). Laajakaistaisuus seuraa suuresta pintaresistiivisyydestä, jonka johdosta antenni ei vääristä sähkökenttää kuten hyvin johtava ja pienellä vastuksella kuormitettu dipoli.



**Kuva 10.9 Termopari-ilmaisim**

- a) Termopariaketjusta muodostuva mikroaaltosäteilymittarin mittapää ja siihen liittyvät resistiiviset johtimet.  
 b) Termoparin rakenne. Antimoni–vismutti -parin lisäksi käytetään ainakin vismutti–nikkeli-kromi -paria.

Termopari-ilmaisimen etuna diodi-ilmaisimeen nähden sen on kyky tuottaa modulaatiosta riippumatta kentänvoimakkuuden tehollisarvon neliöön tai keskimääräiseen tehotiheuteen verrannollinen tasajännite, joka voidaan helposti siirtää resistiivisen johdon kautta mittariosaan. Termoparien herkkyys muuttuu vähemmän ympäristön lämpötilan funktiona kuin diodien. Toisaalta, diodit ovat termopareihin verrattuina herkempiä ja kestävätkä ylikuormitusta huomattavasti paremmin.

## Staattinen magneettikenttä

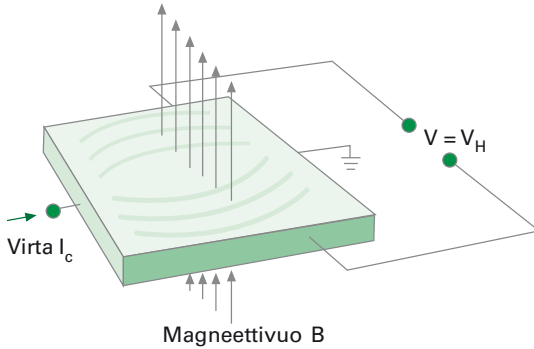
Staattisia magneettikenttiä voidaan mitata Hall-anturilla, vuoporttimagnetometrillä (flux-gate magnetometer), ydinmagneettiseen resonanssiin perustuvalla NMR-magnetometrillä ja SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) -magnetometrillä. Altistumisen kannalta merkityksellisten kenttien mittaamiseen soveltuvat Hall-anturi ja vuoporttimagnetometri. Muita edellä mainittuja laitteita käytetään tieteellisiin ja metrologisiin sovelluksiin. SQUID-magnetometrillä voidaan mitata äärimmäisen pieniä magneettikenttiä, ja sitä sovelletaan esimerkiksi aivojen magneettikenttien mittaamiseen MEG-kuvauksessa. NMR-magnetometriä käytetään erinomaisen tarkkuutensa ansiosta kalibrointeihin.

Hall-anturi soveltuu voimakkaiden staattisten ja pientaajuisten magneettikenttien mittauksiin. Sen toiminta perustuu Lorentzin voimaan, joka kohdistuu magneettikentässä liikkuviin varauksiin (katso kaava 4.7). Hall-anturi on tyypillisesti puolijohdemateriaalista valmistettu ohut levy, johon kohdistuva magneettikenttä kuljettaa enemmistövarauksen kuljettajat (elektronit tai positiiviset aukot) levyn toiselle reunalle synnyttäen Hall-jännitteen  $V_H$  (kuva 10.10). Jännite  $V_H$  saadaan kaavasta

$$V_H = \gamma_{IB} I_C B \sin \phi, \quad (10.8)$$

missä  $\gamma_{IB}$  on anturin paksuudesta ja materiaalista riippuva herkkyyskerroin ( $\text{mVmA}^{-1}\text{T}^{-1}$ ),  $I_C$  on anturin ohjausvirta,  $B$  on magneettivuon tiheys ja  $\phi$  on magneettivuon ja levyn tason välinen kulma. Herkkyyskerroin saadaan kaavasta  $\gamma_{IB} = 1/(ned)$ , missä  $n$  on varauksenkuljettajien tiheys,  $e$  on alkeisvaraus ja  $d$  on levyn paksuus.

Vuoporttimagnetometri koostuu ferromagneettisen sydämen ympärille käämitystä kahdesta kelasta, joista toinen on syöttö- ja toinen on mittauskela. Sen toiminta perustuu magneettiseen induktioon ja ferromagneettiseen materiaaliin liittyvään hystereesiin. Syöttökelaan syötetään sinimuo-



**Kuva 10.10 Hall-anturin toimintaperiaate**

Lorentzin voima kuljettaa enemmistövarauksenkuljettajat (elektronit tai positiiviset aukot) levyn toiselle reunalle synnyttäen Hall-jännitteen.

toinen virta, joka aiheuttaa sydämeen magneettivuon tiheyden  $B_d \cos \omega t$ , jolloin ferromagneettinen sydän menee jokaisella puolijaksolla kyllästystilaan. Sydämen aiheuttama magneettivastus eli reluktanssi vaihtelee jaksottaisesti; kyllästystilassa reluktanssi on suuri ja muutoin pieni. Ulkoisen magneettivuon  $B_{ext}$  tiheyden muutos havaitaan mittauskelan ulostulojännitteessä  $V_{out}$ , joka saadaan kaavasta

$$V_{out} = k(B_d \cos \omega t + B_{ext} \cos 2\omega t), \quad (10.9)$$

missä  $k$  on vakio. Ulkoinen magneettivuon tiheys näkyy siten mittauskelan syöttövirran taajuuden toisella harmonisella taajuudella  $2\omega$ , ja sen amplitudi on suoraan verrannollinen ulkoisen magneettivuon tiheyteen. Mittauskelan ulostulossignaalista suodatetaan toinen harmoninen ja tulos tasasuunnataan, jolloin saadaan ulkoisen magneettivuon tiheyteen verrannollinen lukema. Vuoporttimagnetometrillä voidaan mitata tarkasti vuontiheyksiä 0,1 nT – 10 mT taajuusalueella 0–10 kHz.

## Pientaajuinen ja radiotaajuinen magneettikenttä

Pientaajuinen ja radiotaajuinen magneettikentän lähteitä ovat muun muassa sähkömuuntamot, tasasuuntaajat, hitsaus, voimalinjat, induktiokuumentimet, tuotesuojaportit, metallinpaljastimet, magneettikuvauslaitteiden gradienttikentät ja sähkömagneettiset hermosimulaattorit. Muuttuvan magneettikentän voimakkuutta voidaan mitata aallonpituuteen nähden pienellä silmukalla. Silmukka voi olla yksikierroksinen tai herkkyyden

lisäämiseksi monikierroksinen kela. Silmukka on yleensä suojattava sähkökentältä staattisella suojalla.

Kuvassa 10.11 esitettyyn  $N$ -kierroksiseen silmukkaan indusoituva radiotaajuinen jännite saadaan Faradayn lain nojalla yhtälöstä

$$U_s = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (10.10)$$

missä  $\phi$  on silmukan lävistävä magneettivuo. Vuo voidaan laskea kaavasta

$$\phi = \int_A \bar{B} \cdot d\bar{A} \quad (10.11)$$

missä  $B = \mu H$  on magneettivuon tiheys ja  $A$  on silmukan pinta-ala, joka pyöreällä  $r$ -säteisellä silmukalla on  $\pi r^2$ . Jos  $B$  on sinimuotoinen ja vakio silmukan alueella sekä kohtisuorassa silmukan tasoa vastaan, kaavoista 10.10 ja 10.11 saadaan silmukkaan indusoituvaksi RF-jännitteeksi

$$U_s = -j\omega N \mu \pi r^2 H \quad (10.12)$$

missä  $\omega$  on kentän kulmataajuus,  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti ja  $H$  on magneettikentän voimakkuuden tehollisarvo.

Silmukan induktanssi saadaan kaavasta

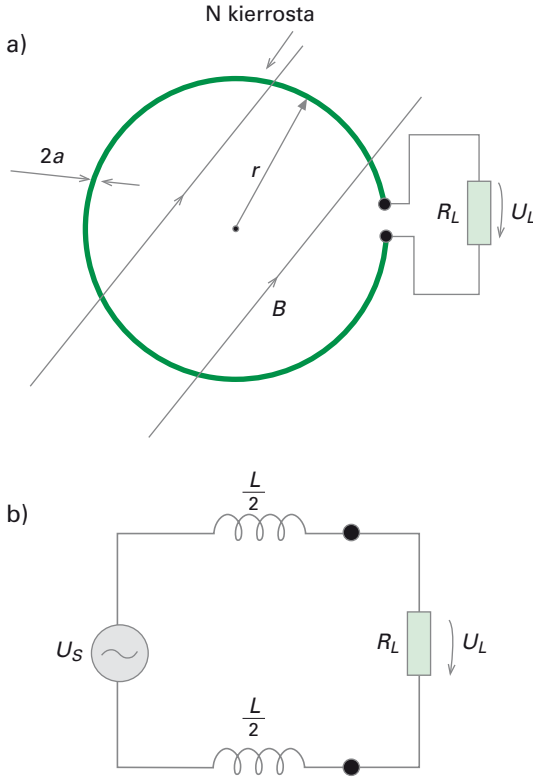
$$L = N^2 \mu r \left[ \ln \left( \frac{8r}{a} \right) - 2 \right] \quad (10.13)$$

missä  $N$  on silmukan kierrosten lukumäärä,  $r$  on silmukan säde ja  $a$  on kelan poikkileikkauksen säde.

- Suojaamaton silmukka, kaava 10.13: suojaamattomalla silmukalla  $2r$  on silmukan kierrosten keskimääräinen halkaisija ja  $2a$  kierroskimpun paksuus.
- Suojattu silmukka, kaava 10.13: radiotaajuuksilla  $2r$  on suojan keskimääräinen halkaisija ja  $2a$  suojan paksuus ja pienillä taajuuksilla  $2r$  on silmukan kierrosten keskimääräinen halkaisija ja  $2a$  kierroskimpun paksuus, katso kuva 10.13.

Silmukkaan indusoituva jännite kasvaa verrannollisena taajuuteen, joten taajuusvaste on tasattava kuormitusvastuksella  $R_L$ . Taajuusvasteen alarajakulmataajuus saadaan kaavasta





**Kuva 10.11 Pieni silmukka homogeenisessä magneettikentässä**

- a) Kun  $B$  on vakio silmukan alueella ja kohtisuorassa silmukan tasoa vastaan, silmukkaan indusoitunut jännite on suurimmillaan.  
 b) Kuvan sijaiskytkennässä silmukkaa kuormitetaan vastuksella  $R_L$ . Taajuusvaste on tasainen, kun  $\omega$  on paljon suurempi kuin  $R_L/L$ .

$$\omega_c = \frac{R_L}{L}. \quad (10.14)$$

Vastuksen yli syntyvä jännite kasvaa verrannollisena taajuuteen,  $U_L = N\pi r^2 \omega B_0$  ( $\omega B$ -mittari), kun  $\omega$  on paljon pienempi kuin  $R_L/L$  ja on vakio,  $U_L = N\pi r^2 B_0 R_L/L$  ( $B$ -mittari), kun  $\omega$  on paljon suurempi kuin  $R_L/L$ . Kuormitusvastus vaimentaa myös silmukan resonansseja radiotaajuuksilla. Pienillä taajuuksilla kuormitusvastuksen yli syntyvä jännite siirretään suojatulla kaapelilla mittariosaan käsittelyä varten. Mittaustulos voi olla magneettivuontiheys tai sen muutosnopeus yksitaajuisen sini-muotoisen magneettikentän tapauksessa. Laajakaistaisen magneettikentän tapauksessa mittaustulos voi olla myös taajuuden funktiona muuttuvan altistumisrajan mukaan painotettu huippuarvo, katso luku 8.

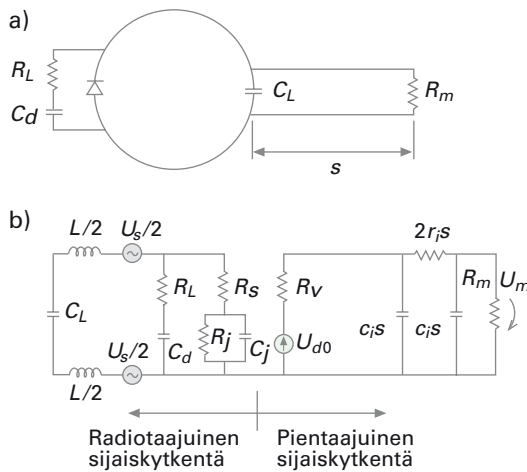
Radiotaajuuksilla RF-jännite on ilmaistava jo silmukassa. Yksinkertaisen radiotaajuisen magneettikentän mittapään ja siirtojohton rakenne sekä radio- ja pientaajuinen sijaiskytkentä esitetään kuvassa 10.12. Kondensaattorit  $C_d$  ja  $C_L$  estävät diodin ilmaiseman tasajännitteen oikosulkeutumisen silmukassa. Ilmaistu signaali siirretään suurohmisella johdolla ( $s$  = pituus,  $r_i$  ja  $c_i$  = resistanssi ja kapasitanssi pituusyksikköä kohti) mittariosan esivahvistimelle. Esivahvistimen sisäänmeno-resistanssiin  $R_m$  tuleva jännite  $U_m$  saadaan  $N$ -kierroksiselle ja  $r$ -säteiselle silmukalle likimääräisesti kaavasta

$$U_m = \frac{\alpha}{2} \left( \frac{N\mu\pi r^2 R_L}{L} \right)^2 H^2 \quad (10.15)$$

missä  $H$  on silmukan akselin suuntaisen magneettikentän voimakkuuden tehollisarvo. Radiotaajuisen magneettikentän mittaustulos ilmoitetaan magneettikentän voimakkuutena tai ekvivalenttisenä tehotiheytenä.

Sähkökentän kytkeytyminen silmukkaan kasvaa taajuuden funktiona. Sähkökentän indusoiman virran  $I_E$  suhde magneettikentän indusoimaan virtaan  $I_H$  voidaan laskea kaavasta

$$\frac{I_E}{I_H} = -j2kr, \quad (10.16)$$

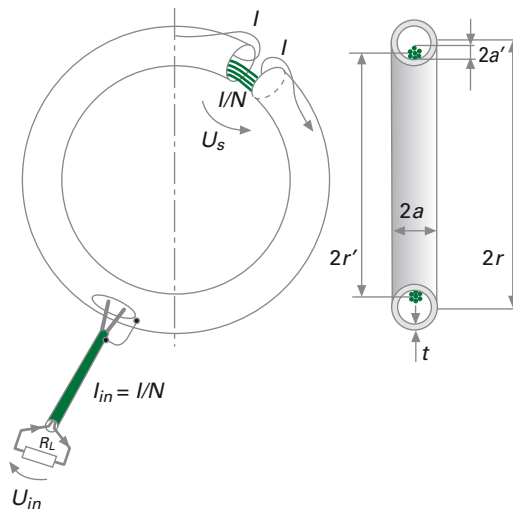


**Kuva 10.12** Yksinkertaisen radiotaajuisen magneettikentän mittapää ja siirtojohto

- a) rakenne
- b) radio- ja pientaajuinen sijaiskytkentä käytettäessä diodi-ilmaisinta

missä  $k = 2\pi/\lambda$  on aaltoluku ja  $r$  on silmukan säde. Jos sähkö- ja magneettikenttä ovat samanvaiheiset ja sähkökentän aiheuttama vaihtelu saa olla korkeintaan  $\pm 0,5$  dB, saadaan kaavasta 10.16 suurimmaksi säteeksi  $0,04\lambda$ . Jos kenttien vaihe-ero on  $90^\circ$ , silmukkaan indusoituvat virrat ovat samanvaiheiset ja vastaavasti säde on  $0,0046\lambda$ . Kovin pieniä magneettikentän antureita ei voida valmistaa, joten käytännössä magneettikenttää pystytään luotettavasti mittaamaan noin 300 MHz taajuudelle asti. Yli 300 MHz taajuuksilla altistuminen määritetään sähkökentän mittauksilla.

Silmukka on yleensä suojattava sähkökentältä staattisella suojalla. Suoja ympäröi silmukan joko kokonaan tai osittain johtavalla vaipalla, joka on katkaistu yhdestä kohdasta (kuva 10.13). Suojan tärkein tehtävä on estää pitkittäissuuntaisten häiriöjännitteiden kytkeytyminen silmukan ja signaalijohtimien väliin. Pienillä taajuuksilla mitattava magneettikenttä tunkeutuu esteettä suojan läpi. Radiotaajuuksillakaan suojan vaikutusta magneettiseen kytkentään ei juuri erota. Suoja toimii yksikierröksisenä silmukkana, jonka ulkopintaan magneettikenttä indusoi virran. Virta livahtaa raon kautta sisäpinnalle ja kytkeytyy sieltä silmukan kierroksiin. Rakenne toimii samalla muuntajana, joka pienentää virtaa ja nostaa jännitettä silmukan kierrosten määrämässä suhteessa. Lähtöjännite on siten sama kuin suojaamattoman silmukan jännite.



**Kuva 10.13** Monikierröksinen suojattu silmukka-anturi

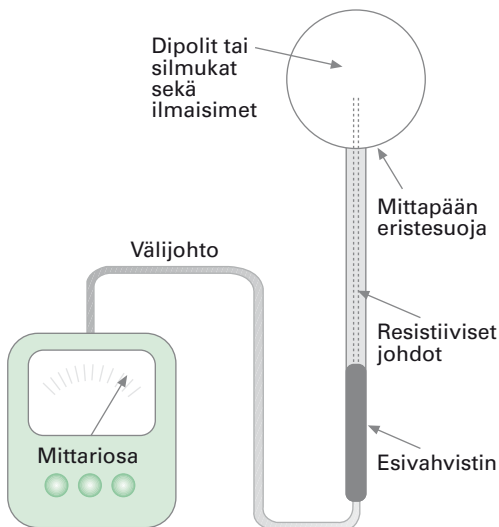
Staattisen sähkökentän suoja ympäröi silmukan kokonaan. Suoja on katkaistu yhdestä kohdasta. Radiotaajuuksilla  $2r$  on suojan keskimääräinen halkaisija ja  $2a$  suojan paksuus. Pienillä taajuuksilla  $2r'$  on silmukan kierrosten keskimääräinen halkaisija ja  $2a'$  kierroskimpun paksuus, katso kaava 10.13.

## 10.3 | Sähkömagneettisten kenttien mittalaitteet

### Laajakaistaiset radiotaajuisten kenttien mittalaitteet

Laajakaistaista radiotaajuisten kenttien mittaria voidaan käyttää tilanteissa, jossa altistuminen tapahtuu yhdellä taajuudella tai monella lähekkäin olevalla taajuudella eikä lähteen säteilyteho muutu merkittävästi ajan funktiona. Mittapäässä on yksi tai useampia sähkö- tai magneettikentän antureita, joissa on pieni antenni ja ilmaisimen antenniin indusoituvan radiotaajuisten jännitteiden muuntamiseksi amplitudimodulaation tahdissa sykkiviksi tasajännitteiksi. Ilmaisimet on yleensä integroitu antennin yhteyteen, koska ilmaistu pientaajuinen signaali on huomattavasti helpompi siirtää mittarin näyttöyksikköön kuin radiotaajuinen signaali. Tyypillinen mittari esitetään kuvassa 10.14.

Koska mittapäiden on oltava pienikokoisia ja mahdollisimman vähän kenttää häiritseviä, niitä ei käytännössä voida toteuttaa aktiivisilla komponenteilla. Siten mittapäiden ilmaisimina käytetään joko diodeja tai termopareja, joilla pyritään saamaan anturiin indusoituvan radiotaajuisten jännitteiden neliölliseen keskiarvoon verrannollinen tasajännite.



Kuva 10.14 Laajakaistainen isotrooppinen radiotaajuisten kenttien mittari

Mittapään anturien ympärillä on eristeestä valmistettu suoja, joka estää anturien joutumisen liian lähelle metallipintoja tai -johtimia. Lisäksi suojan pinnalla voi olla resistiivinen kalvo, joka vähentää staattisten ja pientaajuisten kenttien antureille aiheuttamia häiriöitä. Anturien taajuusvaste on mittarin toimintataajuusalueella lähes taajuudesta riippumaton. Signaalijohtimet ovat suurohmisia anturien lähellä eli käytännössä mittapään varren sisällä. Mittapään toisessa päässä voi olla esivahvistin. Mittariosa on akku- tai paristokäyttöinen ja varustettu analogisella osoitinnäytöllä tai nykyisin lähes poikkeuksetta digitaalisella numeronäytöllä. Tärkeimpiä vaatimuksia laajakaistaisille ja isotrooppisille radiotaajuuden sähkö- ja magneettikentän mittareille ovat seuraavat:

- taajuusalue vähintään kaksi dekadia
- ekvivalenttisen tehoitiheyden mitta-alue  $1\text{--}1\,000\text{ W/m}^2$  (sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo  $20\text{--}600\text{ V/m}$  ja magneettikentän voimakkuuden tehollisarvo  $0,05\text{--}1,6\text{ A/m}$ )
- mittapään halkaisija alle  $10\text{ cm}$
- epälineaarisuus alle  $\pm 0,5\text{ dB}$
- epäisotrooppisuus alle  $\pm 0,5\text{ dB}$
- mittapää ja yhdysjohto eivät saa häiritä mitattavaa kenttää
- hyvä häiriösuojaus
- hyvä ylikuormituksen kesto
- soveltuvuus kenttäkäyttöön (kevyt ja kestävä).

### **Mittaustilanteessa huomioitavia asioita**

Radiotaajuuden sähkö- tai magneettikentän mittarin vaste voi olla joissakin mittaustilanteissa virheellinen. Radiotaajuinen sähkö- tai magneettikenttä voi kytkeytyä anturin yhteydessä oleviin resistiivisiin johtoihin. Tämä on hyvinkin todennäköistä alle  $1\text{ MHz}$  taajuuksilla, jolloin dipolin impedanssi on suunnilleen yhtä suuri kuin siirtojohtoon resistiivisyys. Kentästä siirtojohtoon indusoituva RF-virta kulkee RF-ilmaisimelle lisäten mittarin lukemaa. Tämä ilmiö on mahdollinen myös kaukana säteilylähteestä.

Lähikenttämittauksissa lähteen sähköstaattinen kenttä voi edellä mainitun lisäksi kytkeytyä suoraan sähkökentän mittapähän. Mittaustilanteessa nämä kytkeytymiset voidaan todeta mittariosan ja yhdysjohtoon liikuttamisesta johtavana lukeman muutoksena, vaikka mittapää pysyykin paikallaan. Erittäin voimakkaassa lähikentässä, jossa sähkökentän voimakkuus on paljon suurempi kuin magneettikentän, resistiivinen johto voi kuumeta ja kuumentumiseen liittyvä lämpösähköinen ilmiö aiheuttaa jännitteen. Tämä ilmenee magneettikenttämittarin negatiivisena lukemana.

Mitattaessa lähellä metallipintoja lähteen pientaajuiset kentät (50 Hz) voivat kytkeytyä kapasitiivisesti tai induktiivisesti mittapähkään. Tämän estämiseksi mittausetäisyyden tulisi olla vähintään 20 cm.

Mittarin ja mittapään läheisyydessä olevan staattisen sähköön varauksen, esimerkiksi mittajaan vaatetuksen, aiheuttama staattinen kenttä voi vaikuttaa mittarin lukemaan. Mittapää on hyvä pinnoittaa heikosti johtavalla materiaalilla.

Mittattava sähkömagneettinen kenttä voi kytkeytyä myös mittariosaan puutteellisen RF-suojauksen vuoksi. Häiriön osoittaa mittarin nolasta poikkeama lukema ilman mittariosaan kytkeytyä mittapäätä tai yhdysjohtoa.

Mittapään tehollinen tilavuus eli tilavuus, josta mittapää mittaa kentänvoimakkuuden tai tehotiheyden keskiarvon, vaikuttaa mittaustulokseen yli 5 GHz taajuuksilla. Lyhyen aallonpituuden vuoksi kentänvoimakkuus tai tehotiheys voi muuttua mittapään alueella merkittävästi, esimerkiksi vuotosäteilykentissä tai seisovan aallon kentissä.

Jotkut mittapäät ovat hyvin epäisotrooppisia, vaikka niissä on kolme kohtisuorassa toisiaan vastaan olevaa dipolia tai silmukkaa. Epäsymmetrisesti asetetut antennit aiheuttavat keskinäisvaikutustensa vuoksi epäisotrooppisuutta. Eräässä magneettikentän mittapätyypissä mittarin lukema kasvaa 3 dB, kun magneettikentän suunta muuttuu vartta vastaan kohtisuorasta varren suuntaiseksi.

Radiotaajuisen sähkö- tai magneettikentän mittarin mittapäät voivat reagoida kenttiin, joiden taajuusalue on mittapäiden määritellyn taajuusalueen ulkopuolella. Sähkökentän mittapäillä voi olla vastetta määriteltyä pienemmille taajuuksille ja magneettikentän mittapäät voivat reagoida suuremmilla taajuuksilla sähkökenttään. Suurilla taajuuksilla magneettikentän anturin koko tulee merkittäväksi aallonpituuteen nähden, jolloin sähkökenttä voi kytkeytyä siihen, varsinkin resonansitaajuuksilla.

Diodi-ilmaisimin varustettuihin mittapäihin sisältyy monia virhevasteita. Diodit toimivat pienillä RF-signaaleilla neliöllisellä alueella eli niiden DC-ulostulojännite on verrannollinen kentänvoimakkuuden neliöön tai tehotiheyteen. Suurilla RF-signaaleilla diodit toimivat lineaarisella alueella, jolloin DC-jännite onkin verrannollinen kentänvoimakkuuteen tai tehotiheyden neliöjuureen. Elektronikalla on mahdollisuus tehdä neliöllisyyskorjaus suurille RF-signaaleille, mutta se toimii vain yksitaajui-

selle sinimuotoiselle signaalille. Käytännössä mitattavassa kentässä on aina jonkinlainen amplitudi- tai pulssimodulaatio ja joissakin tapauksissa mittapähän kohdistuu samanaikaisesti monta eritaajuista kenttää. Moduloidussa ja monitaajuuskentässä diodi-ilmaisimien ja alipäästösuodattimien toimiva RC-piiri toimivat jonkinlaisena huippuarvonilmaisimena, jolloin mittarin lukema on suurempi kuin tavoitteena oleva tehollisarvo. Diodi-ilmaisimet ovat lisäksi herkkiä valolle ja ympäristön lämpötilan muutoksille.

Termopari-ilmaisimet ovat diodeja parempia silloin, kun tehotiheyden hetkellinen huippuarvo on huomattavasti suurempi kuin keskiarvo, joka useimmiten halutaan mitata (6 minuutin aikakeskiarvo). Termopari-ilmaisimilla varustetut mittarit ovat erityisen tarpeellisia tutkien pulssimaisen mikroaaltosäteilyn mittauksissa, mutta myös mitattaessa matkapuhelimien tukiasemien antennien lähikenttiä, joissa voi olla hetkellisiä huippuarvoja eritaajusten läheteiden interferenssin ja amplitudimodulaation seurauksena. Termopari-ilmaisimien varustetut mittapäät mittaavat tehollisarvoa riippumatta kentän modulaatiosta. Niiden vaste ei riipu merkittävästi ympäristön lämpötilasta. Termoparit tuhoutuvat herkästi ylikuormitustilanteissa. Pienen herkkyuden vuoksi termopareja käytettäessä tarvitaan esivahvistin ja suuri impedanssitaso, mikä tekee mittapäät herkiksi ympäristön staattisille sähkövarauksille. Esivahvistimen vuoksi mittari ryömiä herkästi eli nollaus siirtyy.

## Selektiiviset radiotaajuisen kentän mittalaitteet

Altistuttaessa monelle eritaajuiselle lähteelle, joiden säteilyteho vaihtelee merkittävästi ajan funktiona, voi olla tarvetta mitata eri taajuuskomponenttien kentänvoimakkuus tai tehotiheys. Tällöin tarvitaan mittalaitetta, jolla voidaan valita halutun taajuuden ympäriltä suhteellisen kapea taajuuskaista. Tällainen mittalaite on spektrianalyysaattori tai kentänvoimakkuusmittari, johon on kytketty kalibroitu antenni. Alle 100 MHz taajuuksilla antennina käytetään aktiividipolia tai silmukka-antennia. Suuremmilla taajuuksilla käytetään dipoli- tai torviantenneja tai laajakais- taisia logperiodisia antennia. Tällaiset mittaukset suoritetaan yleensä kaukana antennista, jolloin riittää yksidimensioinen antenni.

Spektrianalyysaattori ja kentänvoimakkuusmittarit ovat painavia ja verkkovirtaa vaativia laitteita. Niitä käytetäänkin usein ajoneuvoihin asennettuina. Spektrianalyysaattori mittaa signaalin hetkellisen huippuarvon, kun taas kentänvoimakkuusmittarilla saa sen lisäksi tehollisen keskiarvon.

Spektrianalysointilla saa paljon monipuolisempaa tietoa signaalin modulaatiosta kuin kentänvoimakkuusmittarilla. Nykyisin on kaupallisesti saatavilla kannettavia ja akkukäyttöisiä spektrianalysointilaitteita, joihin saa myös kalibroidun isotrooppisen mittapään.

## Pulssimaisen mikroaaltosäteilyn mittalaitteet

Pulssimaisen mikroaaltosäteilyn keskimääräistä tehotiheyttä mitattaessa on käytettävä termopari-ilmaisimin varustettua laajakaistaista isotrooppista mittaria. Esimerkiksi keilaavan tutka-antennin mikroaaltosäteilyä mitattaessa hetkellinen pulssitehoisuus saattaa olla satojatuhsia kertoja suurempi kuin tehotiheyden keskiarvo keilausjakson ajalta, jolloin diodi-ilmaisimien ajautuu väistämättä lineaariselle alueelle. Neliöllinen ilmaisuus on välttämätön, koska resistiivinen johto integroi mittaussignaalia. Kentänvoimakkuuteen verrannollisen signaalin keskiarvoistaminen aiheuttaa huomattavan virheen.

Pulssitehoisuutta voidaan mitata spektrianalysointilaitteilla ja siihen kaapelilla kytketyllä kalibroidulla antennilla. Spektrianalysointilaitteen sijasta voidaan käyttää diodiin perustuvaa RF-ilmaisinta ja oskilloskooppia etenkin, jos halutaan tutkia pulssien ominaisuuksia. Kädessä pidettävää akkua tai paristokäyttöistä mittaria ei ole kaupallisesti saatavana tähän tarkoitukseen. Sellainen on kehitetty Säteilyturvakuksessa keilaavien tutka-antennien mikroaaltosäteilyn pulssitehoisuuden mittauksiin taajuuksilla 1–12 GHz. Sähkökentän mittapäänä käytetään laajakaistaista logperioodista antennia, joka mittaa vain yhden sähkökentän komponentin. Yksidimensioisuudesta ei ole haittaa, koska mittaukset tehdään yleensä kaukana antennista. Antennin taajuusvaste tasataan yksinkertaisella mikroliuskakondensaattorilla. RF-jännite muutetaan pientaajuiseksi pulsseiksi diodiin perustuvalla RF-ilmaisimella. Pulssien huippuarvo saadaan huippuarvonilmaisimella. Lisäksi ilmaistulle huippuarvolle tehdään elektroninen linearisointi.

## Vuotosäteilymittarit

Suurtehoisista mikroaaltolaitteista, kuten mikroaaltouuneista, voi vuotaa mikroaaltosäteilyä. Vuotosäteilymittarit ovat akku- tai paristokäyttöisiä kädessä pidettäviä mittareita, joissa on pienikokoinen sähkökentän mittapää. Se ei ole täysin isotrooppinen, vaan sisältää vain kaksi toisiaan vastaan kohtisuorassa olevaa dipolianturia, jotka ovat vartta vastaan kohti-



suorassa tasossa. Tällainen rakenne mahdollistaa vuotosäteilyn mittauksen nykyisten standardien määrittelemällä 5 cm etäisyydeltä vuotokohdasta. Käytännössä vuotosäteilymittarit soveltuvat parhaiten mikroaaltouunien vuotosäteilyn mittaukseen taajuudella 2 450 MHz. Teollisten sovellutusten vuotosäteilyn mittauksissa voidaan käyttää myös isotrooppisia laajakaistaisia mittareita, koska altistumismittauksissa ei ole tarvetta mitata alle 20 cm etäisyydellä vuotokohdasta.

## 10.4 | Kehon sisäisten virtojen mittaus

### Yleistä

Ulkoisen sähkö- ja magneettikentän mittaukset riittävät useimmiten altistumisen määrittämiseen. Kuitenkin on erikoisia altistumistilanteita, joissa säteilylähteen läheisyyden vuoksi kehoon kytkeytyy kapasitiivisesti RF-virtoja tai laitetta koskettaessa purkautuu kosketusvirtoja. Tällainen altistumistilanne on esimerkiksi 27 MHz taajuudella toimivan muovinsaumaimen käyttäjällä, (katso kappale 9.8). Raajoihin indusoituvat RF-virrat voivat aiheuttaa hyvinkin suuria paikallisia tehon absorptioita nilkassa ja ranteissa. Näitä ei ulkoisen kentän mittauksilla voida tarkasti arvioida, vaan tarvitaan virranmittauslaitteita. Kehoon indusoituvia virtoja voidaan luotettavasti mitata taajuuksilla 1–50 MHz.

Radiotaajuisten virtojen mittalaitteet voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin: levytyyppiseen jalkavirtamittariin (levymittari), virtamuuntajamittariin sekä kosketusvirtamittariin. Levymittareilla suoritettavassa mittauksessa seisotaan kahden pienohmisella vastuksella yhdistetyn metallilevyn päällä. Vastuksen yli syntyvä jännite mitataan RF-millivolttimittarilla, jonka lukema on suoraan verrannollinen molempien jalkojen kautta maahan kulkevaan virtaan, (katso kuva 10.15).

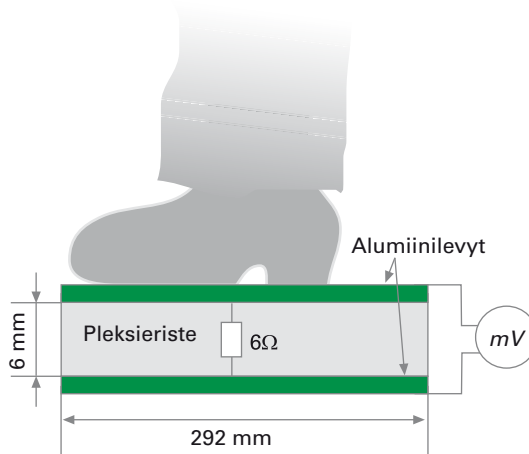
Kosketusvirtamittarilla kosketetaan mitattavaa kohtaa, joka voi olla laitteen suojakotelo tai materiaalin syöttöpöytä. Pienohmisen vastuksen kautta purkautuva virta ja syntyvä jännite mitataan samaan tapaan kuin levymittarissa.

Seuraavaksi käsitellään kehoon indusoituvien radiotaajuisten virtojen mittauksia selostamalla Säteilyturvakeskuksessa kehitettyjen mittarien toimintaa ja rakennetta.

## Levymittarit

Levymittari on yksinkertainen menetelmä mitata jalkojen kautta alustaan johtuva radiotaajuinen virta. Kuvassa 10.15 esitetään kahdesta neliömäisestä metallilevystä koostuva levymittari. Mittaustilanteessa seisotaan metallilevyn päällä ja mitataan jaloista maahan purkautuva virta. Mittari on ohut, jotta mittaustilanteessa henkilön ja alustan välinen etäisyys pysyy pienenä. Levyjen koko on myös rajoitettu (noin 30 x 30 cm), jotta niihin suoraan sähkökentästä indusoituva virta on mahdollisimman vähäinen. Metallilevyjen väliin kytketyn vastuksen yli syntyvä RF-jännite ilmaistaan diodilla ja ilmaistusta jännitteestä RF-jännite suodatetaan RC-piirillä. Diodi toimii lineaarisesti (lukema verrannollinen RF-virtaan) vain suurilla virroilla. Pienillä virroilla mittari näyttää liian vähän ja lukemaa on korjattava.

Diodin epälineaarisuuden vuoksi mittari näyttää tehollisarvosta poikkeavaa virran lukemaa amplitudimoduloituissa kentissä. Diodin sijasta on mahdollista käyttää termopari-ilmaisinta, joka antaa tehollisarvon modulaatiosta riippumatta. Pienohmisen vastuksen sijasta voidaan käyttää myös oikosulkuja, jolloin oikosulkuvirta mitataan johtimen ympärille asetetulla pienikokoisella virtamuuntajalla. Levymittari mittaa oikein vain sen



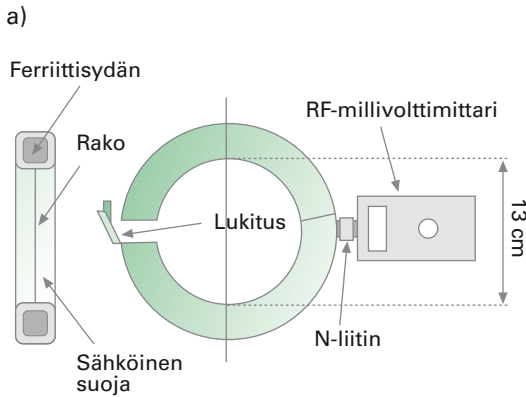
**Kuva 10.15** Levymittari jalkavirtojen mittauksiin

Levyjen välille on kytketty pieniohminen vastus, tyypillisesti 5–6 Ω. Levyjen välissä on muutama millimetrin paksuinen pleksieriste. Metallilevyjen väliin kytketyn vastuksen yli syntyvä RF-jännite ilmaistaan diodilla.

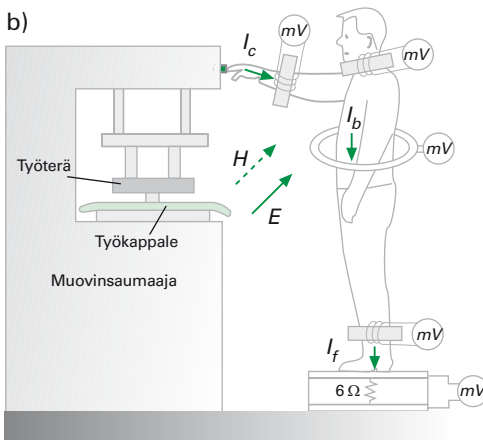
ollessa galvaanisessa kontaktissa täysin johtavaan alustaan. Muussa tapauksessa levymittari näyttää liian vähän, koska osa virrasta kytkeytyy kapasitiivisesti päällimmäisestä levystä alustaan.

## Virtamuuntajamittarit

Virtamuuntajamittarin käyttömahdollisuudet ovat paljon monipuolisempia kuin levymittarin. Virtamuuntaja voidaan asettaa nilkan, ranteen, käsi- ja olkavarren, kaulan ja jopa vatsan sekä rintakehän ympärille. Virtamuuntajalla voidaan siten mitata kaikkien altistumisen kannalta merkittävien kehon osien virrat. Lisäksi virtamuuntajalla voidaan mitata luotetavasti jalkavirrat kaikissa olosuhteissa.



**Kuva 10.16 Virtamuuntajamittari kehon eri osiin indusoituvien virtojen mittauksiin**



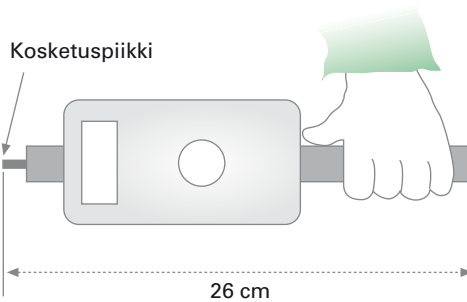
a) Ferriittisydämissen virtamuuntajan aukon halkaisija riippuu mitattavan kehon osan läpimitasta. Virtamuuntajan aukon sisähalkaisija voi olla noin 13 cm, jotta muuntajan paino, noin 3 kg, pysyy vielä kohtuullisena. Metallisuojan rako on välttämätön. Virta livahtaa raon kautta sisäpinnalle ja kytkeytyy sieltä muuntajan sydämeen.

b) Ferriittisydämissen muuntaja sopii muiden kehon osien paitsi rintakehän ja vatsan ympärille, mihin joudutaan käyttämään ilmasydämissä virtamuuntajaa.

Tyypillinen virtamuuntajamittari on kuvan 10.16a mukainen yhdistelmä, jossa ferriittisydämisen virtamuuntajan ulostuloon on kytketty RF-millivolttimittari. Mittaussignaali voidaan siirtää valokaapelilla häiriöttömämpään ympäristöön, esimerkiksi spektrianalysaattorilla tarkastelua varten. Virtamuuntajan aukon halkaisija riippuu mitattavan kehon osan läpimitasta. RF-millivolttimittari on häiriösuojatussa alumiinikotelossa. Virtamuuntajaa kuormitetaan  $50\ \Omega$  vastuksella, jonka yli syntyvä RF-jännite ilmaistaan diodilla ja ilmaistu signaali suodatetaan RC-piirillä. Ferriittisydämisen halkaisijaltaan noin 13 cm virtamuuntajan siirtoimpedanssi on tyypillisesti 5–6 ohmia taajuusalueella 1–50 MHz eli muuntajan aukon läpi kulkeva 100 mA RF-virta synnyttää  $50\ \Omega$  kuormitusvastuksen yli 500–600 mV RF-jännitteen. Kenttätesteauksissa ferriittisydämisen virtamuuntajan ei ole todettu merkittävästi häiriintyvän radiotaajuisessa kentässä alle 30 MHz taajuuksilla, mutta kylläkin yli 90 MHz taajuuksilla.

### Kosketusvirtamittarit

Kuva 10.17 esittää kädessä pidettävää kosketusvirtamittaria, jolla voidaan mitata sormikontaktissa purkautuvia virtoja. Mittari koostuu alumiinikotelosta, teräsputkesta ja kosketuspiikistä. Teräsputki on hyvässä kontaktissa alumiinikoteloon. Kosketuspiikin ja alumiinikotelon välillä on pieniohminen vastus, tyypillisesti  $5\ \Omega$ . Kun mittarin teräsputkesta pidetään kiinni ja kosketuspiikillä kosketetaan radiotaajuisessa kentässä metallikappaletta, purkautuva virta synnyttää  $5\ \Omega$  vastuksen yli RF-jännitteen. Kosketusvirta on mahdollista mitata myös sormen ympärille asetetulla pienikokoisella virtamuuntajamittarilla. Erityisen suuria kosketusvirtoja mitattaessa voidaan käyttää ihmisen kehon impedanssia simuloivaa vastuksista ja kondensaattoreista koostuvaa piiriä.



Kuva 10.17 Kosketusvirtamittari

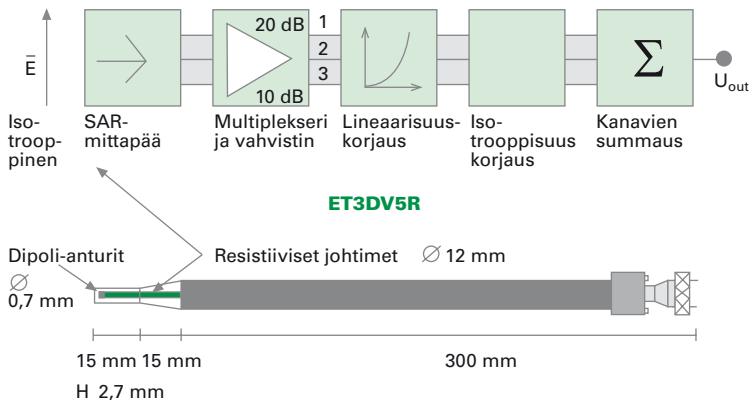
## 10.5 SAR-mittaukset

### Yleistä

Käytettäessä matkapuhelinta tai muuta radiolähetintä kehon lähellä paikallinen absorptio voi olla hyvinkin suuri koko kehon absorption jäädessä kuitenkin vähäiseksi. Sähkö- ja magneettikentän voimakkuuden viitearvot voivat ylittyä selvästi, mutta ominaisabsorptionopeuden eli SAR:in raja-arvot eivät välttämättä ylity. Koska SAR-mittaukset eivät ole mahdollisia elävän ihmisen sisältä, mittaukset on tehtävä ihmisen kehoa mahdollisimman hyvin jäljittelevän fantomin sisältä. Seuraavassa käsitellään erilaisia Säteilyturvakeskuksessa käytössä olevia mittausten menetelmiä SAR:in määrittämiseksi fantomista.

### SAR-mittapäät

Paikallinen SAR määräytyy kudokseen indusoituvasta radiotaajuisesta sähkökentästä, (kaava 10.17). Siten SAR voidaan määrittää mittaamalla sähkökenttä pienikokoisella isotrooppisella sähkökentän mittapäällä kudoksen sähköisiä ominaisuuksia jäljittelevässä nesteessä (kudosekvivalentti neste). SAR-mittapään rakenne esitetään kuvassa 10.18. Mitta-



**Kuva 10.18 SAR-mittapään rakenne (SPEAG ET3DV5R)**

Dipoleihin indusoituvaa RF-jännitettä ilmaistetaan diodilla ja ilmaistu signaali siirretään vahvistimelle.

pää koostuu kolmesta toisiaan vastaan kohtisuorassa olevasta 2–4 mm pituisesta identtisestä dipolianturista, jotka ovat tiiviin muovisuojan sisällä. Dipoleihin indusoituva RF-jännite ilmaistaan diodilla ja ilmaistu signaali siirretään SAR-mittapään varren pään liittimeen resistiivisiä johdotuksia pitkin. Varren päähän liitetään vahvistin, jonka ulostulosta kunkin anturin signaalit luetaan tietokoneelle jatkokäsittelyä varten. SAR-mittapäällä mitataan homogeenisella kudosekvivalentilla nesteellä täytetyn fantomin sisäisen sähkökentän kolmiulotteista jakaumaa. SAR-mittapäällä voidaan mitata SAR:ia noin 3 GHz taajuuteen asti. Suuremmilla taajuuksilla tulee virhettä sen johdosta, että SAR ei ole vakio mittapään kohdalla.

Kuvassa 10.19 esitetään tyypillinen SAR-mittausjärjestelmä. Siinä SAR-mittapäättä liikutellaan tietokoneen ohjaamalla robotilla kolmiulotteisessa mittauspisteiden verkossa, kudoksen (esimerkiksi aivojen) sähköisiä ominaisuuksia jäljittelevässä nestefantomissa, kolmeen kohtisuoraan suuntaan muutaman millin askelin (asettelutarkkuusvaatimus  $\pm 0,1$  mm). Samalla tietokoneelle luetaan kustakin pisteestä SAR-mittapään anturien mittaamat jännitteet. Anturien jännitteille tehdään lineaarisuuskorjaus ja ne summataan, jolloin saadaan kussakin mittauspisteessä nesteen sisäinen sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo  $E_i$ . Mitatusta sisäisen sähkökentän tehollisarvosta lasketaan ominaisabsorptionopeus SAR kaavasta

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho}, \quad (10.17)$$

missä  $\sigma$  on kudosekvivalentin nesteen johtavuus ja  $\rho$  on sen sähköinen johtavuus. Näistä pistemäisistä SAR-arvoista määritetään keskiarvoja SAR-arvoille 1 g tai 10 g painoisen kuution yli; jotta keskiarvoja voidaan laskea harvasta mittauspisteiden verkosta (gridistä) tulee vielä ensin interpoloida lisää pisteitä mittauspisteiden välille sekä ekstrapoloida pisteitä fantomin pinnalle. Näistä lasketuista SAR-keskiarvoista etsitään vielä maksimiarvo, jota voidaan verrata SAR-tasolle määritelyihin ohjearvoihin. Esimerkiksi väestölle asetettu enimmäisarvo on 2 W/kg 10 g keskiarvona.

## Lämpötila-anturit

Ominaisabsorptionopeus SAR voidaan määrittää myös mittaamalla lämpötilan nousu  $\Delta T$  tietyn pituiselta altistusajalta  $\Delta t$  ja laskemalla kaavasta

$$SAR = \frac{c\Delta T}{\Delta t}, \quad (10.18)$$

missä  $c$  on aineen ominaislämpökapasiteetti. Menetelmä edellyttää, että lämmönsiirtymistä ei tapahdu, jolloin altistumisajan tulee olla mahdollisimman lyhyt. Fantominesteen paikallinen SAR-määrittäminen vaatii samanlaisen mittauksen ja säteilytyksen, jolloin lämpötila-anturi ei saa häiritä nesteen sisäistä sähkökenttää. Tavallisin lämpötila-anturi on resistiivisiin johtoihin kytketty suurohminen termistorianturi, jonka läpimitta on noin 1 mm. Johtavissa kudosekvivalenteissa nesteissä anturi toimii hyvin, mutta häiriintyy ilmassa varsinkin silloin, kun johdot ovat sähkökentän suuntaisia. Käytössä on muullakin periaatteella toimivia, sähkökenttää häiritsemättömiä lämpötila-antureita, muun muassa jälkiloiste aikaan perustuvia valokuituun liitettviä kiteitä, mutta niiden erottelukyky on termistoria huonompi. Lämpötilan nousun mittaukseen perustuvat SAR-määrittäykset vievät enemmän aikaa, koska mitattavan aineen täytyy olla lämpötasapainossa ennen mittausta eli sen lämpötila ei saa olla muuttumassa. Lämpötila-anturin pienen koon ansiosta SAR-määrittäyksiä voidaan tehdä noin 6 GHz taajuudelle asti.

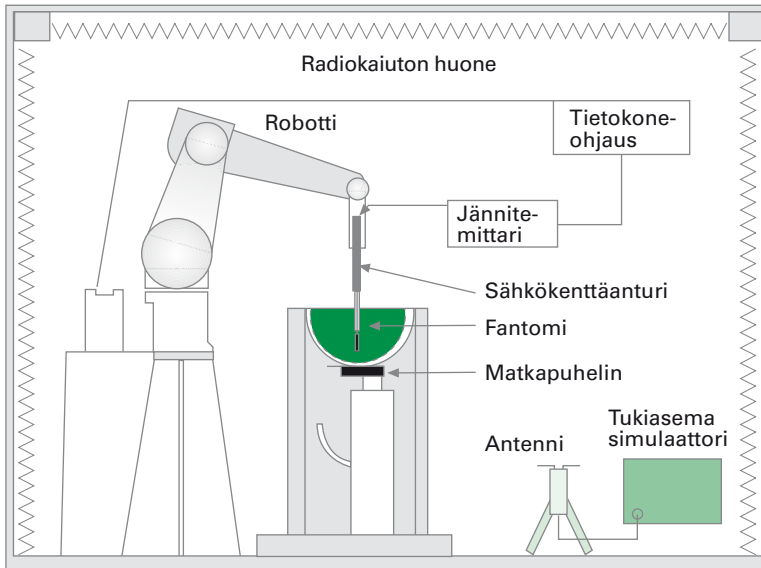
Lämpötilan nousun mittauksella voidaan määrittää myös nestefantomien keskimääräinen SAR. Lämpötasapainossa olevan fantomien lämpötila mitataan ennen säteilytystä, fantomia säteilytetään suurella vakioiteholla lyhyen aikaa. Säteilytyksen jälkeen fantomia heilutetaan, jotta nesteen lämpötilajakauma tulee tasaiseksi, ja mitataan loppulämpötila. Keskimääräinen SAR lasketaan kaavasta 10.18. Lämmönsiirtymisen estämiseksi fantomi on ympäriävä esimerkiksi styroksilla.

Säteilytettyjen kohteiden pintalämpötilan mittaukseen voidaan käyttää myös infrapunakameroita. Niillä on mahdollista määrittää kiinteiden fantomien poikkileikkauspintojen ja ulkopintojen kaksikulmainen SAR-jakauma. Menetelmän heikkoutena on epäherkkyys eli vain kohtuullisen suuria SAR-arvoja voidaan mitata. Periaatteessa pintalämpötiloja voidaan mitata 300 GHz taajuudelle asti.

## Fantomit

Fantomien tarkoituksena on jäljitellä ihmiskehon anatomisia ja sähköisiä ominaisuuksia niin hyvin kuin mahdollista. Altistumiskohteen mukaan tarvitaan joko osakeho- tai kokokehofantomi. Fantomilla mitatun SAR:n tulee olla vähintään yhtä suuri kuin todellisessa ihmisen kehossa. Sovel-

luksesta riippuen fantomi voi olla kiinteä, puolikiinteä tai nestemäinen. Kiinteällä ja puolikiinteällä fantomilla pystytään jäljittelemään useata eri kudostyyppiä, ja siten jäljittelemään paremmin kehon sähköisiä ominaisuuksia. Nestemäinen homogeeninen fantomi on kuitenkin käytännöllisin, jos on tarpeen määrittää kolmiulotteinen SAR-jakauma, katso kuva 10.19.



**Kuva 10.19 SAR-mittausjärjestelmä (SPEAG DASY 4)**

Kuvassa on Säteilyturvakeskukseen asennettu SAR-mittausjärjestelmä. SAR määritellään mittaamalla sähkökentän voimakkuus pienikokoisella sähkökentän mittapäällä (STUKissa SPEAG ET3DV5R) liikuttelulla sitä robotilla homogeenisessa nestefantomissa. Robotin liikuttelu ja mittaussignaalin talteenotto hoidetaan tietokoneohjauksella.

## 10.6 Kalibrointimenetelmät

### Yleistä

Säteilyturvallisuusmittauksissa käytettävät mittalaitteet on kalibroitava säännöllisesti luotettavien tulosten saamiseksi. Kalibroinnissa selvitetään mittausjärjestelmän vaste mitattavaan suureeseen sekä mahdollisiin häiriötekijöihin. Yksinkertaisen mittalaitteen kalibroinnissa tämä tehdään lähinnä vertaamalla näyttämää mitattavan suureen tunnettuun arvoon normaalia käyttötilannetta vastaavissa olosuhteissa. Monimutkaisempien mittausjärjestelyiden kalibroinneissa selvitetään, mittaako laite ylipää-



tään haluttua suuretta ja miten suureen arvo saadaan selvitettyä mittausjärjestelyn antamista signaaleista. Mikroaaltosäteilyn mittauslaitteiden kalibroinneissa tärkeimpiä selvitettäviä asioita ovat yleensä mittapäiden asennon vaikutus eli isotrooppisuus, tehovaste, taajuusvaste, aikavaste sekä modulaation vaikutus.

Kalibroinnit tehdään vertaamalla mittalaitetta mittanormaaliin, eli laitteeseen tai järjestelmään, jolla realisoidaan suureen mittayksikkö tai jokin referenssiarvo. Realisoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä tunnetun fysikaalisen suureen tuottamista luonnonlakien ja mittausten avulla havaittavaan muotoon. Kalibroitimet muodostuu eritasoisista mittanormaaleista ja päättyy lopulta primaarinormaaliin, eli mitattavan suureen realisointiin, joka ei perustu toiseen saman suureen mittanormaaliin. Primaarinormaaleissa käytetyt apusuureet johtavat kalibroitimetjun viime kädessä SI-perusyksiköiden kansainvälisiin realisointeihin, jotka perustuvat pelkästään johonkin luonnonlakiin. Esimerkiksi Josephson-liitokseen perustuvat sähkövirran ja -vastuksen realisoinnit perustuvat ainoastaan tunnettuun kvanttimekaniikan ilmiöön, joten ne ovat ylimmän tason primaarinormaaleja. Sen sijaan esimerkiksi mikroaaltotehomittarit ovat yleensä sekundaarinormaaleja, koska ne kalibroidaan toista mikroaaltotehon normaalia vastaan.

Sähkö- ja magneetikentän mittalaitteiden kalibroinnissa käytetään yleensä standardikenttämenetelmää tai standardimittapäämenetelmää, kuten pallodipolia. Standardikenttämenetelmässä luodaan mahdollisimman tasainen ja tarkasti tunnettu sähkö- tai magneetikenttä mittapään anturien kokoiseen tilaan. Kenttä määritetään sähkömagneettisen kenttäteorian sekä virran, jännitteen, tehon tai muun soveltuvan suureen mittausten avulla.

Standardikenttämenetelmällä kalibroitu luotettavaa mittalaitetta voidaan käyttää siirtonormalina. Kalibrointi tehdään tällöin kentässä, jonka suuruus tunnetaan ainoastaan siirtonormalilla tehdyn mittauksen perusteella. Siirtonormaaleja käytetään kalibroitilaboratorion ulkopuolella tehtäviin kalibrointeihin, koska primaarinormalien turhaa siirtelyä on syytä välttää.

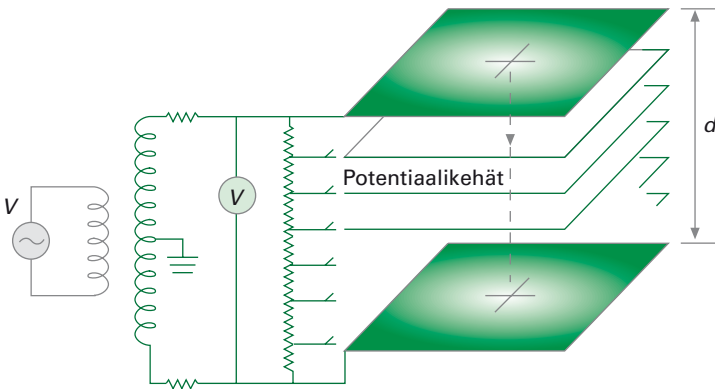
Standardikenttämenetelmä voi perustua pienillä taajuuksilla esimerkiksi yhdensuuntaisiin levyihin tai Helmholtzin keloihin. Suuremmilla taajuuksilla kentät voidaan tuottaa esimerkiksi TEM-kammioon ( $< 500$  MHz), suorakulmaiseen aaltoputkeen ( $500\text{--}2\ 500$  MHz) tai antennilla vapaata tilaa simuloivaan heijastuksettomaan huoneeseen ( $> 1$  GHz).

## Staattiset ja pientaajuiset sähkö- ja magneettikentät

Pientaajuiset sähkökentän mittapäät kalibroidaan kahden suurikokoisen yhdensuuntaisen metallilevyn välissä taajuuksilla 0–100 kHz. Tämän levykondensaattorimenetelmän periaatekuva esitetään kuvassa 10.20. Levyihin syötetään maahan nähden symmetrinen pientaajuinen jännite. Levyjen väliin syntyvän sähkökentän voimakkuus  $E$  lasketaan kaavasta

$$E = \frac{V}{d}, \quad (10.19)$$

missä  $V$  on levyjen välinen jännite ja  $d$  on levyjen välimatka. Levyjen välimatkan tulee olla alle puolet niiden pituudesta tai leveydestä hajakapasitanssin vaikutuksen minimoimiseksi. Mittapään läpimitan on oltava alle viidesosa levyjen välimatkasta, jotta kenttä ei häiriintyisi merkittävästi. Suuremmilla taajuuksilla levyt alkavat säteillä, mikä tekee levyjen välisen kentän epätasaiseksi ja epätarkaksi. Levyjen hajakenttää voidaan pienentää kuvassa 10.20 esitetyillä potentiaali-kehillä, jotka ovat metallilangasta valmistettuja suorakulmaisia silmu-koita. Kunkin potentiaali-kehän jännite riippuu sen sijainnista levyjen välillä. Ympäristön vaikutuksen vähentämiseksi levyt on sijoitettava pystyasentoon ainakin puolen metrin etäisyydelle seinistä, katosta ja lattiasta.



**Kuva 10.20** Levykondensaattorimenetelmä pientaajuisten sähkökentän mittapäiden kalibrointiin

Kalibroitavan mittapään läpimitan on oltava alle viidesosa levyjen välimatkasta, jotta kenttä ei häiriintyisi merkittävästi.

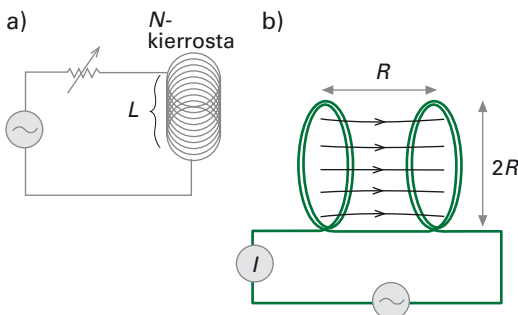
Yksinkertainen menetelmä magneettikentän mittapään kalibrointiin on kuvan 10.21a mukainen kela, jonka säde on  $R$  ja jonka pituudelle  $L$  on käämitty  $N$  kierrosta  $d$ -halkaisijaista poikkileikkaukseltaan pyöreää johdinta viereisten johdinten keskipisteiden ollessa etäisyydellä  $d$  toisistaan. Kelan sisälle syntyy akselin suuntainen tasainen magneettikenttä, jonka voimakkuus  $H_0$  lasketaan kaavasta

$$H_0 = \frac{NI}{L} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2R}{L}\right)^2 + 1}} \right]. \quad (10.20)$$

Magneettikenttä on tasaisimmillaan kelan keskellä ja pienenee reunoille päin. Menetelmän rajoituksena on mahdollisuus asettaa kalibroitava mittapään varsi vain magneettikentän suuntaiseksi.

Tasainen magneettikenttä saadaan aikaan myös Helmholtzin keloilla, kuva 10.21b. Kaksi identtistä yhdensuuntaista  $R$ -säteistä kelaa kytketään sarjaan samalle akselille etäisyydelle  $R$  toisistaan. Kelojen väliin syntyy tasainen kelojen akselin suuntainen magneettikenttä, jonka voimakkuus  $H_0$  voidaan likimääräisesti laskea kaavasta

$$H_0 = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R}, \quad (10.21)$$



**Kuva 10.21** Keloja staattisten- ja pientaajuisten magneettikentän mittapäiden kalibrointiin

- a) yksinkertainen kela
- b) Helmholtzin kela

missä  $N$  on kelan johtimien kierrosten lukumäärä,  $I$  on kelojen johtimissa kulkeva virta ja  $R$  on kelan säde. Kelamenetelmä toimii taajuuksilla 0–1 MHz. Staattinen magneettikenttä synnytetään syöttämällä keloihin tasavirtaa. Heikoilla magneettikentillä maan magneettikentän vaikutus on otettava huomioon, ja se voidaan eliminoida lisäkeloilla tai asettamalla akseli itä-länsi-suuntaan. Johtimien kuumeneminen suurilla virroilla rajoittaa kelojen käyttöä, ja suurille staattisille magneettikentille onkin standardikestomagneetteja kalibrointitarkoituksiin.

Pientaajuisten magneettikentän kalibrointitarkkuutta voi parantaa pienellä muutaman kierroksen vertailukelalla, jonka poikkipinta-ala tunnetaan tarkasti. Kela toimii standardimittapäänä, jonka jännitteestä voidaan laskea kentänvoimakkuus, kun taajuus tunnetaan, katso kaava 10.12. Vertailukela on käyttökelpoinen alle 100 kHz taajuuksilla. Vertailukelalla mitataan magneettikenttä Helmholtzin kelojen keskellä ja tulosta verrataan virtaan, jolla keloja syötetään. Vertailukelaan perustuvan mittanormaanin epävarmuus on erittäin pieni,  $\pm 2\%$  luottamustasolla 95 %.

## Radiotaajuiset sähkö- ja magneettikentät

### **TEM-kammio**

TEM-kammio on yleisimmin käytetty menetelmä radiotaajuisien sähkö- ja magneettikentän mittarien kalibrointiin taajuusalueella 10 kHz – 500 MHz. Kammion avulla saadaan suljettuun tilaan radiotaajuinen tasoaaltomainen sähkö- ja magneettikenttä. Lisäksi pienellä sisään menevällä teholla saadaan aikaan kohtuullisen suuret kentät. TEM-kammion rakenne esitetään kuvassa 10.22. Kammio on keskiosaltaan laajennettu ilmaeristetty koaksiaalijohto  $50\ \Omega$ , jonka ulkojohdin on suorakulmainen. Ylä- ja alalevyn puolivälissä oleva keskijohdin on levymainen. TEM-kammio on molemmista päistä taperoitu, jotta se voidaan liittää  $50\ \Omega$  koaksiaaliseen mittaussysteemiin. Taperointi eli päiden suipennus vähentää heijastuksia. TEM-kammion kentät pysyvät sen sisällä eikä erillistä häiriösuojaa tarvita. Sen rakenne on yksinkertainen ja se on erittäin stabiili myös pitkäaikaisessa käytössä. Lisäksi kammion rakentamis- tai hankintakustannukset ovat kohtuulliset.

Sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo TEM-kammiossa saadaan kaavasta

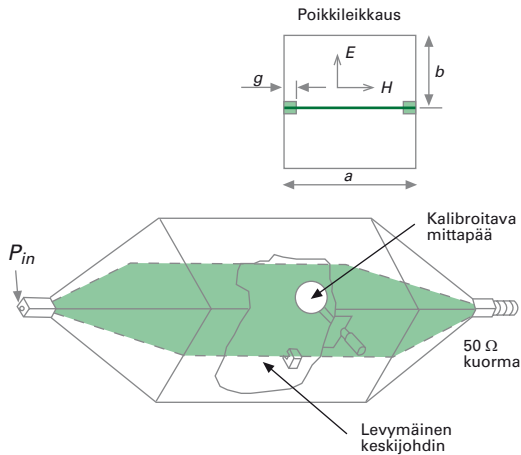
$$E = \frac{V}{b} = \frac{\sqrt{PZ_c}}{b}, \quad (10.22)$$

missä  $V$  on keski- ja ulkojohtimen välinen RF-jännitteen tehollisarvo,  $b$  on keski- ja ulkojohtimen välinen etäisyys,  $P$  on kammiossa etenevä teho ja  $Z_c$  on kammion ominaisimpedanssin reaaliosa (noin  $50 \Omega$ ). Magneettikentän voimakkuuden tehollisarvo saadaan jakamalla sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo vapaan tilan aaltoimpedanssilla eli  $H = E/Z_0$ . TEM-kammion ominaisimpedanssi lasketaan kaavasta

$$Z_c = \frac{Z_0}{4 \left( \frac{a-2g}{b} + \frac{2}{\pi} \ln(1 + \coth \frac{\pi g}{2b}) \right)}, \quad (10.23)$$

missä  $a$  on TEM-kammion leveys ja  $g$  on keskijohtimen reunan ja ulkojohtimen välinen etäisyys, katso kuva 10.22b.

Mittarikalibroinneissa on kammioon sisään menevä teho mitattava jäljittävällä kalibroidulla RF-tehomittarilla. Kammion ulostuloteho menee



**Kuva 10.22 TEM-kammion rakenne**

Aalto etenee kammion pituussuunnassa. Sähkö- ja magneettikenttä ovat kohtisuorassa toisiaan ja aallon etenemisuuntaa vastaan. Ulostulon  $50 \Omega$  kuorma on heijastusten minimoimiseksi.

ulostuloporttiin kytkettyyn  $50 \Omega$  kuormaan. Kalibroitava mittapää asetetaan usein keski- ja ulkojohtimen puoleen väliin siten, että mittapään varsi on kohtisuorassa sähkökenttää ja aallon etenemissuuntaa vastaan eli magneettikentän suuntainen.

Kammiossa etenee pelkästään TEM-aalto  $TE_{10}$ -aaltoisuuden alarajataajuuteen  $f_{c,10}$  asti. Rajataajuus saadaan likimääräisesti kaavasta

$$f_{c,10} = \frac{c_0}{2b}, \quad (10.24)$$

missä  $c_0$  on valon nopeus tyhjiössä. Kammiossa voi olla  $TE_{01}$ -muodon aiheuttamia resonansseja taajuuden  $f_{c,10}$  alapuolellakin. Nämä on selvittävä kammion sähkö- ja magneettikentän mittauksilla. Ylemmät aaltomuodot synnyttävät TEM-aaltomuodosta poikkeavia komponentteja. Kentänjakaumat muuttuvat eikä kalibrointipisteen kentänvoimakkuutta voida enää laskea kaavasta 10.22.

### Suorakulmainen aaltoputki

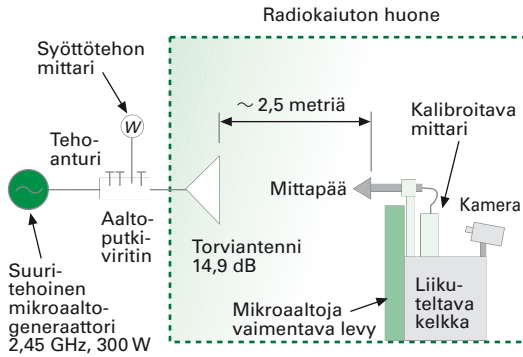
Suorakulmaista aaltoputkea voidaan käyttää pienikokoisten mittapäiden kalibrointiin taajuusalueella 500 MHz – 2,5 GHz. Kalibroinnissa käytetään perusaaltomuotoa  $TE_{10}$ . Tällä muodolla sähkökentällä on vain aaltoputken kapean sivun suuntainen komponentti. Sähkökentän jakauma on kapean sivun suunnassa tasainen ja leveän sivun suunnassa sinimuotoinen. Sähkökentän ekvivalenttinen tehotiheys aaltoputken poikkileikkauksen keskipisteessä lasketaan kaavasta

$$S = \frac{2P}{ab\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}, \quad (10.25)$$

missä  $P$  on aaltoputkessa etenevä teho (sisäänmenotehosta on vähennetty heijastuva teho),  $a$  on aaltoputken leveän sisäseinämän pituus,  $b$  on kapean sisäseinämän pituus ja  $\lambda_0$  on aallonpituus vapaassa tilassa.

### Vapaan tilan kalibrointi

Vapaan tilan kalibroinnissa synnytetään tarkasti tunnettu kenttä kalibroйдulla antennilla heijastuksettomaan huoneeseen. Antenni voi olla dipoli, log-periodinen antenni, torviantenni tai aaltoputken pää. Tyypillinen mit-



**Kuva 10.23** Vapaassa tilassa suoritettavan kalibroinnin mittauskytkentä STUKissa

tauskytkentä esitetään kuvassa 10.23. Säteilyn tehoitiheys etäisyydellä  $r$  antennin aukosta saadaan kaavasta

$$S = \frac{P_T G}{4\pi r^2}, \quad (10.26)$$

missä  $P_T$  on antennin säteilemä teho (sisäänmenotehosta on vähennetty heijastuva teho),  $G$  on antennin vahvistus etäisyydellä  $r$ . Merkittävimpiä virhelähteitä ovat heijastukset huoneen seinämistä ja mittarin sekä mittapään jalustasta, tehonmittaukseen virheet ja antennin vahvistuksen virhe. Mittapää kalibroidaan antennin lähikentässä, jossa antennin vahvistus on pienempi kuin niin sanotun kaukokentän vahvistus. Antennin lähikentän vahvistus voidaan kohtuullisella tarkkuudella laskea, mutta tarkempi tulos saadaan mittaamalla vahvistus kahden identtisen antennin menetelmällä, missä antennin vahvistus saadaan kaavasta

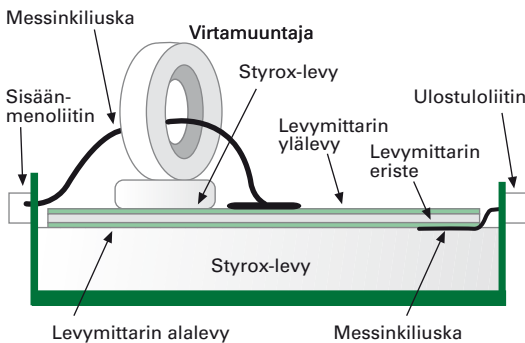
$$G_a = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_R}{P_T}}, \quad (10.27)$$

missä  $r$  on antennien aukkojen välinen etäisyys,  $\lambda$  on aallonpituus,  $P_R$  on vastaanottoteho ja  $P_T$  on lähetysteho. Vapaan tilan menetelmää käytetään yli 1 GHz taajuuksilla. Torviantenneja käytetään yleisesti yli 2 GHz taajuuksilla. Alemmilla taajuuksilla voidaan käyttää dipolia, log-periodista antennia tai aaltoputken päätä.

## Radiotaajuinen virta

Radiotaajuisen virran mittalaitteille ei ole vakiintuneita kalibrointimenetelmiä. Seuraavassa esitetään STUKissa testattua kalibrointijärjestelmää.

Levymittarin ja virtamuuntajamittarin kalibrointiin on rakennettu kuvan 10.24 mukainen kalibrointiteline. RF-vahvistimelta tuleva RF-teho johdetaan telineen sisäänmenoliittimen keskijohtimesta messinkiliuskaan, joka kulkee virtamuuntajan aukon läpi levymittarin ylälevylle ja edelleen levymittarin vastuksen ja alalevyn kautta telineen ulostuloliittimen keskijohtimeen liitettyyn messinkiliuskaan. Ulostuloliittimestä tuleva RF-teho mitataan vaimentimien kautta RF-tehomittarilla. Mitatusta RF-tehosta lasketaan virtamuuntajan ja levymittarin vastuksen kautta kulkeva RF-virta. Telineen alustana on alumiinilevy, joka on liitetty sisäänmeno- ja ulostuloliittimen ulkojohtimeen. Levymittarin alalevy on eristetty alumiinilevystä ja virtamuuntajamittari on eristetty levymittarin ylälevystä styrox-levyllä.



**Kuva 10.24** Levymittarien ja virtamuuntajamittarien kalibrointiteline

## SAR

SAR-mittapäät eli kudosekvivalentin nesteen sähkökenttää mittaavat sähkökentän mittapäät on kalibroitava samanlaisessa nesteessä, jossa SAR mitataan. Taajuusalueella 800–2 500 MHz voidaan kalibroinneissa käyttää kuvan 10.25 mukaista pystyasennossa olevaa suorakulmaista aaltoputkea, joka on kehitetty STUKissa. Sen alaosa on ilmatäytteinen ja yläosa on täytetty kudosekvivalentilla nesteellä. Välissä on tiivis muovista valmistettu sovituserkos, jonka ansiosta RF-teho siirtyy mahdol-

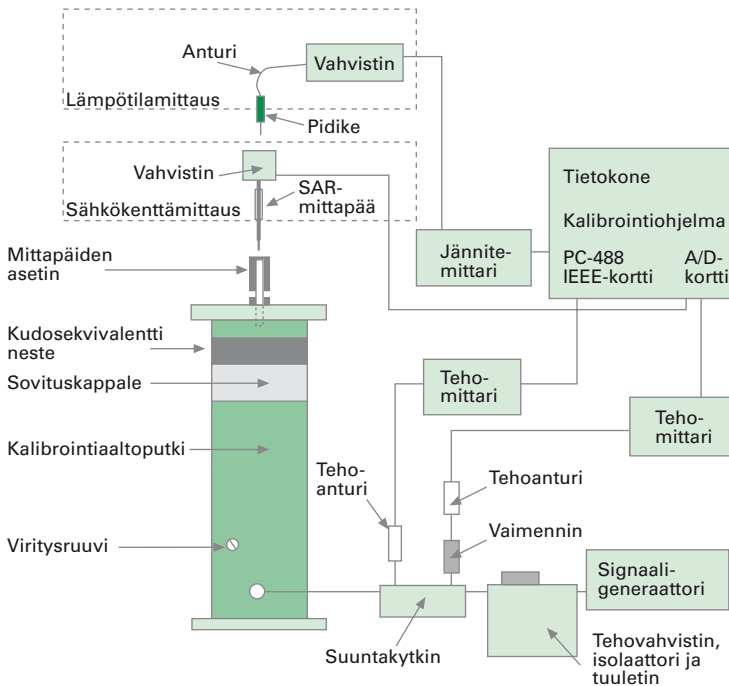


lisimman hyvin ilmatäytteisestä osasta nesteeseen. Nesteen sähkökenttä voidaan määrittää analyttisellä menetelmällä tai termisellä menetelmällä.

Analyttisessä menetelmässä aaltoputkessa nesteeseen tilavuusyksikköä kohti absorboituva teho  $SAR_V$  lasketaan kaavasta

$$SAR_V = \frac{4(P_{in} - P_{ref})}{ab\delta} \cos^2\left(\frac{\pi y}{a}\right) e^{\frac{-2z}{\delta}}, \quad (10.28)$$

missä  $P_{in}$  on aaltoputkeen menevä teho,  $P_{ref}$  on siitä heijastuva teho,  $a$  on aaltoputken leveän sisäseinämän pituus ja  $b$  on kapean sivuseinämän pituus,  $\delta$  on aallon tunkeutumissyvyys kudosekvivalenttiin nesteeseen,  $y$  on etäisyys aaltoputken pituusakselilta leveän sivun suunnassa ja  $z$  on etäisyys nestekerroksen pohjasta. Sähkökenttä vaimenee eksponentiaalisesti etäisyyden funktiona ja mitataan nestekerroksen pohjasta. Neste-



**Kuva 10.25 SAR-mittapäiden kalibrointi suorakulmaisessa aaltoputkessa, STUK**

Aaltoputken alaosa on ilmatäytteen ja yläosa on täytetty kudosekvivalentilla nesteellä.

kerroksen paksuuden on oltava vähintään kolme kertaa tasoallon tunkeutumissyvyys, jotta ilman ja nesteen rajapinnasta tapahtuvat heijastukset eivät häiritsisi sähkökentän jakaumaa mittauspisteessä. Aallon tunkeutumissyvyys on noin 40 mm taajuudella 900 MHz, kun käytetään aivoekvivalenttia nestettä.

Termisessä menetelmässä SAR määritetään mittaamalla lämpötilan nousu  $\Delta T$  aikavälillä  $\Delta t$ . Aaltoputken yläosa täytetään sopivan paksuisella nestekerroksella, jolloin kalibrointipisteeseen saadaan seisovaa aaltoa hyväksikäyttäen pituusakselin suunnassa tasainen sähkökenttä. Se vähentää merkittävästi mittapään asettelusta ja lämpötilagradientista aiheutuvaa epävarmuutta. Pienikokoisella sähkökenttää häiritsemättömällä termistorityyppisellä lämpötila-anturilla mitataan lämpötilan nousu, kun nesteeseen syötetään lyhyellä aikavälillä (noin 10 s) suuri teho (noin 30 W 900 MHz taajuudella). Kalibrointipisteen SAR saadaan laskettua kaavasta 10.18. Nesteen ominaislämpökapasiteetti ( $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ) mitataan kalorimetrillä. SAR-mittapään kalibroinnin epävarmuus on alle  $\pm 10\ %$  luottamusvälillä 95 %.

Yli 2 500 MHz taajuuksilla aaltoputket ovat liian pieniä, jolloin läheiset metalliseinämät vaikuttavat SAR-mittapään toimintaan. Toisaalta SAR-mittauksetkin ovat epäluotettavia suuren sähkökentän gradientin ja SAR-mittapään koon vuoksi. Alle 800 MHz taajuuksilla aaltoputket ovat epäkäytännöllisen ja sen seurauksena tarvittava nestemäärä on suuri. Alemmilla taajuuksilla voidaankin käyttää termistä menetelmää, kunhan saadaan tavalla tai toisella stabiili ja kohtuullisen homogeeninen sähkökenttä kudosekvivalenttiin nesteeseen.

## 10.7 | Mittausten epävarmuus

Kentänvoimakkuuden ja tehotiheyden mittauksen epävarmuus on parhaimmillaankin  $\pm 3\ dB$ . Siihen vaikuttavat mittaustilanteessa ympäristöstä ja mittaajasta tapahtuvat heijastukset. Kalibroinnin epävarmuus on tyypillisesti  $\pm 1\ dB$ . Epähomogeenisissä ja moduloiduissa lähikentissä suoritettujen mittausten arvioitu epävarmuus on  $\pm 5\ dB$ . Arvioon sisältyvät epävarmuustekijöiden lisäksi radiotaajuuden sähkö- ja magneettikentän mittarien virhevasteet. Spektrianalyysaattorilla suoritettujen tehotiheydsmittausten arvioitu epävarmuus on myös  $\pm 5\ dB$ .

Kehoon indusoituvien RF-virtojen mittauksen epävarmuus on  $\pm 2\ dB$ , josta kalibroinnin epävarmuus on  $\pm 1\ dB$ .

Testausstandardin mukaisten matkapuhelimien SAR-mittausten arvioitu epävarmuus on pienempi kuin  $\pm 30\%$ .

## 10.8 | Esimerkkejä laskentamalleista

Sähkömagneettisia kenttiä synnyttävien laitteiden ympärilleen säteilemä kenttä voi olla huomattavan monimutkainen. Vaikka laitteen rakenne tunnettaisiin melko hyvin, on mallin kehittäminen usein työlästä. Joissakin tapauksissa laskentamallin voidaan todeta antavan riittävän hyvän kuvan todellisista sähkö- ja magneetikentistä. Mallin toimivuuden todentaminen vaatii aina varmennusmittauksia. Liitteessä 1 on esitetty hyväksi todettuja ja varmennettuja laskentamalleja voimalinjoiden sähkö- ja magneetikentille. Laskentamalleja antennien synnyttämille radio- ja mikroaaltotaajuisille kentille on esitetty liitteissä 2 ja 3.

## KIRJALLISUUTTA

Aslan E. Broad-band isotropic electromagnetic radiation monitor. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 21(4): 421–424, 1972.

Balanis CA. *Antenna theory. Analysis and design*. Harper & Row, Publishers, Inc., New York, USA, 1982.

Bassen HJ, Smith GS. Electric field probes - A review. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 31(5): 710–718, 1983.

Jokela K, Puranen L, Gandhi OP. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Physics* 1994, 66: 237–244.

Jokela K. Puranen L. Theoretical and measured electric and magnetic field strengths around the dipole curtain antennas at the Pori short-wave station. In: Janiszewski J. Moron W. Sega W (eds). *Proceedings of the Ninth International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility*: 385–389, Wroclaw, Poland, 1988

Jokela K. Theoretical and measured power density in front of VHF/UHF broadcasting antennas. *Health Physics* 54: 533-543, 1988.

Kanda M. An electromagnetic near-field sensor for simultaneous electric and magnetic field measurements. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 26(3): 102-110, 1984.

Korpinen, L. Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 9/2000, 2000.

Lenz JE. A review of magnetic sensors. *Proceedings of the IEEE*, 78(6): 973- 989, 1990.

Lindell IV: *Antenniteoria* 848. Otakustantamo , Helsinki, 1987.

National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). A practical guide to the determination of human exposure to radiofrequency fields. NCRP Report No. 119, 1993.

Puranen L, Jokela K. Radiation hazard assessment of pulsed microwave

radars. *The Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 31: 165-177, 1996.

#### Kansainvälisiä standardeja

CENELEC, European Committee for Electrotechnical Standardization. Basic standard for the measurement of Specific Absorption Rate related to human exposure to electromagnetic fields from mobile phones (300 MHz - 3 GHz). European standard EN 50361, Brussels, 2001.

CENELEC, European Committee for Electrotechnical Standardization. Evaluation of human exposure to electromagnetic devices used in Electronic Article Surveillance (EAS), Radio Frequency Identification (RFID) and similar applications. European Standard EN 50357, Brussels, 2001.

IEEE Guide for the Measurement of Quasi-Static Magnetic and Electric Fields: 1460-1996, 1996.

IEEE. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. IEEE recommended practice for the measurement of potentially hazardous electromagnetic fields - RF and microwave. IEEE Std C95.3-1991, New York, USA, 1992.

International Electrotechnical Commission (IEC). Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings - Special requirements for instruments and guidance for measurements. IEC standard 61786, 1998.

#### Suomalaisia turvallisuusnormeja

Säteilyturvakeskus. Pulssitutkien säteilyturvallisuus. ST-ohje 9.2. Toinen, uudistettu painos. Helsinki, 2003.

Säteilyturvakeskus. ULA- ja TV-asemien mastotöiden säteilyturvallisuus. ST-ohje 9.3. Kolmas, uudistettu painos. Helsinki, 2003.

