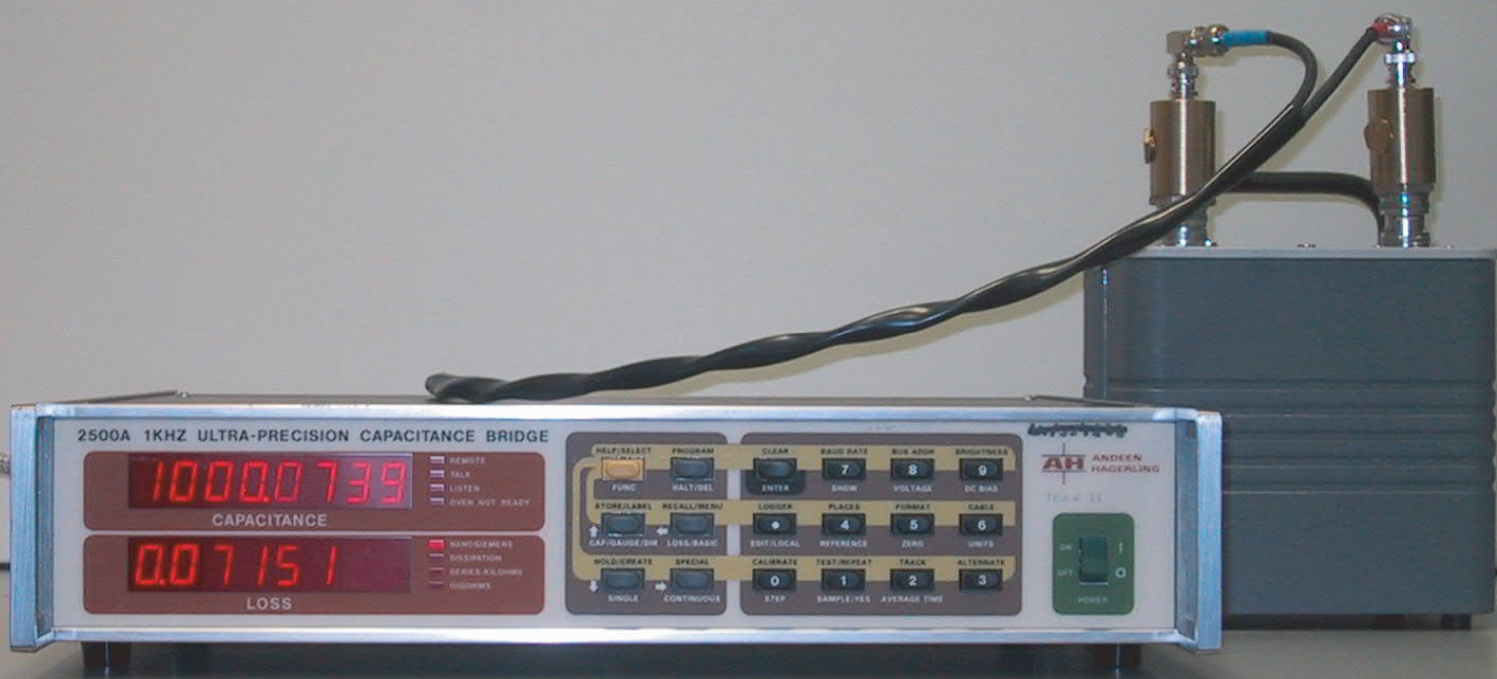


Kalibrointipalvelut

Sähkö, akustiikka,
aika ja taajuus

VTT MIKES





Copyright © VTT MIKES 2022

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
PL 1000 (Vuorimiehentie 3, Espoo), 02044 VTT
Puh. 020 722 111
www.vttresearch.com/fi

VTT MIKES

Sähkö, akustiikka ja aika

Tasajännite.....	4
Tasavirta	5
Vaihtovirta, vaihtojännite, yleismittarit ja kalibraattorit	6
Kapasitanssit ja induktanssit.....	7
Resistanssi.....	8
Oskilloskoopit ja oskilloskooppikalibraattorit	9
Teholähteet ja elektroniset kuormat	10
Verkkotaajuisen tehon ja energian kalibroinnit.....	11
RF- ja mikroaaltokalibroinnit	13
Suurjännite- ja suurvirtasuureet	15
Akustiikka- ja värähtelysuureiden kalibroinnit.....	17
Ajan, aikavälin ja taajuuden kalibrointi.....	19

Tasajännite

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

Lähes kaikkien sähkösuureiden mittausrakenteiden tarkkuus perustuu, resistanssin ohella, tasajännitteen jäljitettävyyteen. VTT MIKES ylläpitää Suomessa tasajännitteen kansallisia mittanormaaleita. Tasajännitteen yksikkö, voltti, määritetään erittäin tarkasti (suhteellinen epävarmuus jopa 10^{-10}) Josephson-jännitteenormaalien avulla. Josephson-normaalista voltti siirretään Zener-käyttönormaaleihin ja niistä edelleen kalibraattoreihin ja yleismittareihin. Mittausalueen laajentaminen 10 V yläpuolelle toteutetaan resistiivisen jännitteenjakajan avulla.



Kuva 1. Tasajännitteen jäljitettävyyden perustuu nesteheliumissa jäähdytettävään Josephson-normaaliiin.

Kalibrointipalvelut

Tasajännitealueen tärkeimpiä kalibrointikohteita ovat tasajännitteenormaalit, tasajännite- ja yleiskalibraattorit sekä tarkkuusyleismittarit. Lisäksi kalibroidaan mm. tasajännitejakajia ja nanovolttimittareita. Kalibroitavaa tasajännitteenormaalista seurataan yleensä parin viikon ajan vertaamalla sitä käyttönormaaleihin. Pienempiä mittauserävarmuuksia tarvittaessa Zener-normaali voidaan kalibroida suoraan MIKESin Josephson-normaalilla. Samoin yleismittareiden ja kalibraattoreiden tasajännitealueet voidaan tilauksesta kalibroida suoraan Josephson- ja Zener-normaalien sekä resistiivisen jännitteenjakajan avulla. Resisttiiviset jännitteenjakajat kalibroidaan vertaamalla niitä referenssijakajaan tai Josephson-normaaliiin.

Esimerkkejä kalibroitavista laitemalleista:

- Zener-tasajännitteenormaalit: Fluke 732A, 732B, 732C, 7000
- Jännitejakajat: Fluke 752A (suurjännitejakajat: ks. suurjännitekalibrointien esite)
- Nanovolttimittarit: Keithley 181, 182, 2182, Fluke 845, Keysight 34420A



Kuva 2. Zener-tasajännitteenormaali.

Taulukko 1. Yleisimpien tasajännitekalibrointien pienimpiä mittauserävarmuuksia. Erikoismenetelmin on mahdollista saavuttaa huomattavastikin pienempiä kalibrointiepävarmuuksia.

Jännite (V)	Zener-normaali			Kalibraattori tai yleismittari		
	1	1,018	10	0 ... 10	10 ... 100	100 ... 1000
Epävarmuus (µV)	0,2	0,2	2	0,3 ... 20	70 ... 610	1000 ... 10000

Tasavirta

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

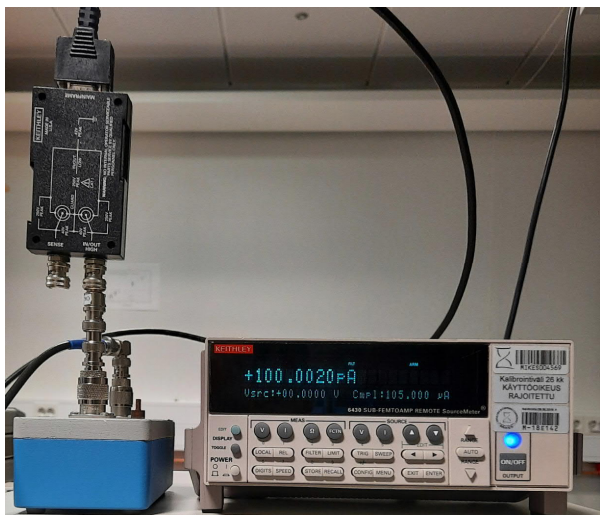
Tasavirran jäljitettävyyden perustuu käytännössä tasajännitteeseen ja resistanssiin sekä Ohmin lakiin. Tarkkoja tasavirtamittauksia voidaan tehdä myös nol-lavuomuuntimilla.

Kalibrointipalvelut

MIKESin tasavirtakalibroinnit kattavat hyvin laajan alueen 1 fA (10^{-15} A) tasolta aina 500 A tasolle ja kat-tavat sekä virtalähteet että virtamittarit.

Pienimmissä virroissa (fA – nA alueet) kohdelaitteita ovat elektrometrit ja pienten virtojen kalibraattorit. Vir-tojen lisäksi joillakin elektrometreillä voidaan mitata myös sähkövarausta.

Keskialueilla (nA – A alueet) yleisimpiä kohdelaitteita ovat pelkästään tai pääasiallisesti virtaa mittaavien tai tuottavien laitteiden sijasta yleiskalibraattorit ja -mittarit, joita käsitellään tarkemmin toisessa esitteessä.



Kuva 1. Pientä 100 pA:n tasavirtaa mittaava elektrometri.

Suurissa virroissa (>20 A) virtaa mittaavia kohdelait-teita ovat nol-lavuomuuntimet ja virtapihdit sekä elekt-roniset kuormat (ks. erillinen esite). Suurta virtaa tuot-tavia laitteita ovat erilaiset virta- ja tehollähteet.

Esimerkkejä kalibroitavista laitemalleista:

- Pienet virrat 1 fA – 100 μ A
 - Elektrometrit: Keithley 6517A, 6517B, 6430...
 - Pienten virtojen lähteet/kalibraattorit: yleisim-pinä Keithley 263
- Keskialueen virrat 100 μ A – 20 A
 - Yleismittarit ja kalibraattorit (ks. toinen esite)
- Suuret virrat 20 A – 600 A
 - Nol-lavuomuuntimet: Lem, DaniSense, PM Special Measurement Systems (aiemmin Hitec)
 - Hitsausvirtalähteiden kalibroinneissa käytetyt mittarit
 - Perinteiset ja flex-silmukalla varustetut pihti-mittarit: yleisimpänä Fluken eri mallit
 - Elektroniset kuormat: Array, Tenma, Keysight ym. (ks. toinen esite)



Kuva 2. Pihtivirtamittari 50 kierroksen kalibrointikelassa mittaa suurta 500 A tasavirtaa.

Vaihtovirta, vaihtojännite, yleismittarit ja kalibraattorit

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

VTT MIKESin tarkimpien referenssiyleismittareiden ja -kalibraattoreiden jäljitettävyys saadaan tasajännitteen, tasavirran ja resistanssin osalta vertaamalla niitä VTT MIKESin omiin tarkempiin, yleensä yksittäisen pistearvon tuottaviin normaaleihin (resistanssionormaalit, tasajännitenormaalit jne.) Vaihtojännitteen ja vaihtovirran jäljitettävyys saadaan Ruotsista RISE:ltä.

Kun näiden eri suureiden jäljitettävyys kootaan yksittäisiin yleismittareihin ja kalibraattoreihin, saadaan toimintoiltaan erittäin monipuoliset sähkösuureiden jäljitettävään mittaamiseen ja tuottamiseen soveltuvat laitteet, joilla voidaan tietokoneohjatusi tehdä tehokkaasti laajoja kalibrointeja asiakkaiden laitteille.



Kuva 1. Kalibraattoreita, yleismittari ja muita sähkösuureiden mittalaitteita.

Kalibrointipalvelut

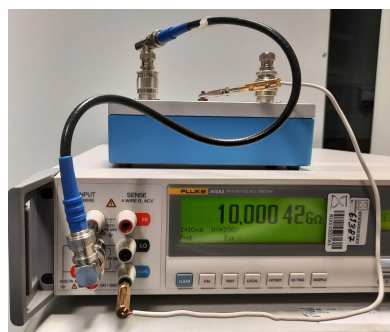
Yleismittareilla ja -kalibraattoreilla voidaan laitemallista riippuen kalibroida ainakin:

- tasajännite 1 mV – 1000 V
- vaihtojännite 1 mV – 1000 V
- tasavirta 100 nA – 20 A
- vaihtovirta 1 mA – 20 A
- resistanssi 1 Ω – 20 GΩ
- kapasitanssi
- simuloitu lämpötila: resistiivinen anturi tai termopari
- taajuus.

Mittauskyky mahdollistaa joillakin suureilla myös laajempia alueita. Tässä annetut alueet ovat enemminkin kohdelaitteiden tyyppillisten alueiden rajoittamat.

Esimerkkejä kalibroitavista laitemalleista:

- kalibraattorit, esim. Keithley, Beamex, Fluke 5500 ja 5700 -sarjat, myös oskilloskooppioptiot
- yleismittarit, kaikki 3–8 numeron mittarit, esim. Fluke 8508A, Keysight 3458A, Keithley 2000
- testerit, esim. Sefelec 2804, testerikalibraattorit, esim. Fluke 5320A
- vaihe-eromittarit, esim. Clarke-Hess 6000A, North Atlantic Industries 2250A.



Kuva 2. Yleismittarin kalibrointi resistanssionormalin avulla.

Kapasitanssi ja induktanssi

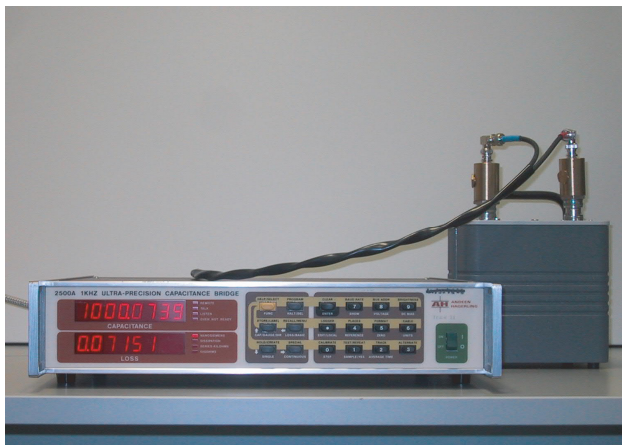
Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

VTT MIKESissä kapasitanssin jäljitettävyys perustuu BIPM:llä ja RISE:llä tehtäviin 10 pF – 1 µF referenssikondensaattoreiden kalibrointeihin. Induktanssit ovat jäljitettäviä VTT MIKESin resistanssinormaaleihin.

[BIPM](#), International Bureau of Weights and Measures
[RISE](#), Research Institutes of Sweden



Kuva 1. AH2500A-mittasilta ja kalibroitava 1 nF kapasitanssinormaali.

Kalibrointipalvelut

VTT MIKES kalibroi kapasitanssi- ja induktanssinormaaleja sekä LCR-mittareita ensisijaisesti taajuudella 1 kHz, mutta rajoitetusti myös muilla taajuuksilla.

Esimerkkejä kalibroitavista laitteista:

- kapasitanssinormaalit ja kapasitanssidekadit 0,1 pF – 1 µF taajuudella 1 kHz
- kapasitanssit yli 1 kV jännitteillä, 10 pF – 100 µF taajuudella 45 Hz – 60 Hz (ks. suurjännite- ja suurvirtasuureet)
- kalibraattoreiden simuloidut kapasitanssit
- induktanssinormaalit 100 µH – 100 mH taajuudella 50 Hz – 1 kHz (2 kHz)
- LCR-mittarit referenssinormaalien kattamalla pistearvoilla, taajuudella 1 kHz, rajoitetusti myös muilla taajuuksilla.



Kuva 2. Induktanssidekadi.

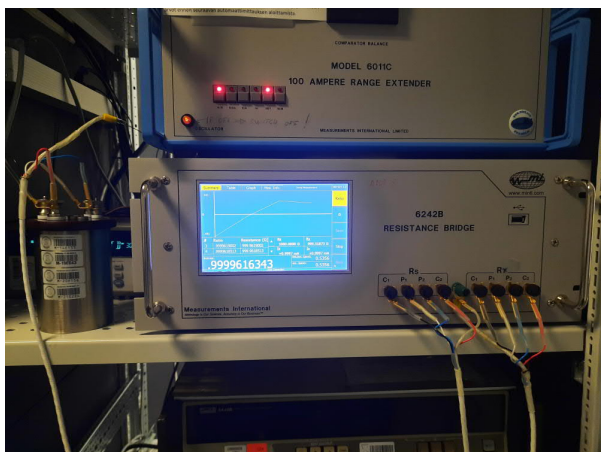
Resistanssi

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

Resistanssi on tasajännitteen ohella sähkömittausten tärkein perussuure, jota tarvitaan suoran resistanssi-kalibroinnin lisäksi monien muiden sähkösuureiden jäljitettävyyden toteuttamiseksi. VTT MIKES on resistanssin kansallinen mittanormaallaboratorio. VTT MIKESissä resistanssin jäljitettävyys perustuu omaan kvantti-Hall-normaaliin, jonka avulla resistanssin yksikkö saadaan sidotuksi luonnonvakioiden arvoihin noin 10^{-8} suhteellisella epävarmuustasolla.



Kuva 1. Resistanssilta vertailee kahta $1\text{ k}\Omega$ resistanssinormaalia.

Kalibrointipalvelut

Resistanssien kalibrointialue VTT MIKESissä on erittäin laaja, $10\ \mu\Omega - 100\ \text{T}\Omega$ ($10^{14}\ \Omega$). Tarvittaessa mitauskyky ulottuu kohteesta riippuen vieläkin laajemmalle. Tarkimmat kalibroinnit tehdään luonnollisesti alueen keskiosissa ja alle $10\ \text{mW}$ tehoilla. Myös suuritehoisia kalibrointeja voidaan tehdä, tietyillä ehdoilla jopa $2\ \text{kW}$ saakka. Resistanssien lämpötila- ja teho-riippuvuuksia sekä AC/DC-eroja voidaan mitata.

Resistanssin (yksikkö Ω) lisäksi on tehty mittauksia myös materiaalien resistiivisyydelle (yksikkö Ωm).

Esimerkkejä kalibroitavista laitteista:

- resistanssinormaalit, shuntit ja resistanssidekadit $100\ \mu\Omega - 100\ \text{T}\Omega$
- eristysvastusmittarit, esim. Fluke 1555, Megger MIT, Chroma 11210
- milliohmimittarit, esim. Agilent, GW Instek
- yleismittarit ja yleiskalibraattorit (ks. toinen esite)
- metalliseosten resistiivisyys

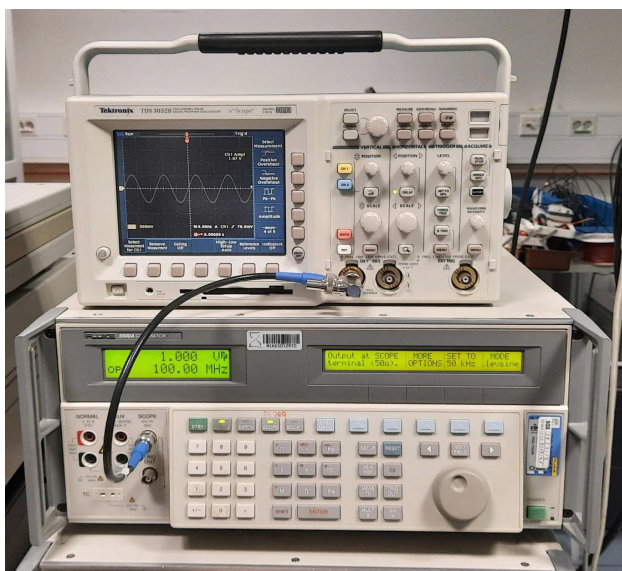
Oskilloskoopit ja oskilloskooppikalibraattorit

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

VTT MIKESin oskilloskooppikalibraattorin jäljittevyys perustuu tasajännitteen, vaihtojännitteen, resistanssin, aikavälin, taajuuden ja RF-tehon mitta-normaaleihin. Joitain oskilloskooppien toimintoja kalibroidaan varsinaisen oskilloskooppikalibraattorin lisäksi myös muilla referenssilaitteilla kuten taajuuslas-kurilla, yleismittarilla ja yleiskalibraattorilla.



Kuva 1. Oskilloskooppikalibraattori syöttää 100 MHz:n si-nisignaalia kalibroitavalle oskilloskoopille.

Kalibrointipalvelut

VTT MIKES kalibroi oskilloskooppeja Fluke 5500A -yleiskalibraattorin SC300-oskilloskooppioptiolla 300 MHz taajuudelle saakka. Vastaavasti kalibroimme asiakkaiden kalibraattoreiden oskilloskooppioptioita. Kalibroitavia ominaisuuksia ovat laitemallista riip-puen mm:

- sisäänmenoimpedanssi
- DC-jännitetasot
- taajuuskaista
- taajuuskaistan rajoitustoimintojen taajuusvaste
- taajuus
- liipaisun herkkyys
- horisontaaliviiveen tarkkuus
- signaalin nousuaika
- lisäksi teemme valmistajan suosittelemat toimin-nalliset testit.

Esimerkkejä kalibroitavista laitteista:

- oskilloskoopit 300 MHz:iin saakka, esim. Tektronix, Keysight, Tenma
- Fluken kalibraattoreiden oskilloskooppioptiot SC300, SC600.

Teholähteet ja elektroniset kuormat

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Metrologinen tausta

Teholähteiden ja elektronisten kuormien kalibrointien jäljitettävyys perustuu VTT MIKESin tasavirran, tasajännitteen ja resistanssin mittanormaaleihin.



Kuva 1. Teholähde, kuorma ja virran referenssiarvoa näyttävä yleismittari.

Kalibrointipalvelut

Elektroniset kuormat voidaan mallista riippuen asettaa simuloimaan erityyppistä sähköistä kuormaa:

- vakioresistanssimoodi (CR)
- vakiojännitemoodi (CV)
- vakiotehomoodi (CP)
- vakiovirtamoodi (CC).

Teholähteitä voidaan yleensä käyttää kahdessa eri moodissa:

- vakiojännitemoodi (CV)
- vakiovirtamoodi (CC).

VTT MIKESissä voidaan kalibroida kaikkia näitä malleja eli verrata laitteen omaa näyttämää referenssilaitteilla määritettyyn arvoon.

Esimerkkejä kalibroitivista laitteista:

- DC-teholähteet tyypillisesti 2 kW saakka, esim. Keysight, Keithley, TTI
- elektroniset DC-kuormat tyypillisesti 2 kW saakka, esim. Keithley, Tenma, Chroma.

Verkkotaajuisen tehon ja energian kalibroinnit

Esa-Pekka Suomalainen
Erik.tutkija, Puh. 050 382 2463
esa-pekka.suomalainen@vtt.fi

Tapio Lehtonen, Tutkija
Puh. 050 511 0037
tapio.lehtonen@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo,
Puh. 020 722 111

Sähköenergian kulutuksen mittauksella on hyvin suuri taloudellinen merkitys. Sähkömarkkinoiden kehityksen myötä on mittaustarkkuuden ja mittausten jäljitettävyyden merkitys korostunut edelleen. Energiamittareiden kalibrointiin tarvitaan tarkkoja tehonormaaleita. VTT MIKESissä 50 Hz sähkötehon mittaukset jäljitetään näytteistävän tehonormalin avulla. Kalibroinnit tehdään joko yksi- tai kolmivaiheisesti ja tyyppisiä kalibroituja laitteita ovat esim. tehomittarit ja muuntimet.

VTT MIKESin teholaboratoriossa 50 Hz sähkötehon jäljitettävyys palautuu Josephson-normalista saatavaan tasajännitteeseen ja kvantti-Hall-laitteistolla toteutettuun resistanssiin. Näytteistävään tehonormaliin kuuluu kaksi 8 ½ numeron jännitemittaria, jotka on synkronoitu tarkasti keskenään. Alle 20 A virtasignaali muutetaan jännitteeksi erikoisrakenteisilla sivuvirtavastuksilla, joiden resistanssiarvot jäljitetään kvantti-Hall-normaliin. Yhdessä Rogowskin kelaan perustuvan virta-anturin kanssa samaa laitteistoa käytetään suurten virtojen ja virtasuhteiden mittaamiseen aina 8000 A:iin asti. VTT MIKESin referenssilaitteiden tehon mittausepävarmuus on parhaimmillaan 0,005 %.

Laboration menetelmät ja mittalaitteet edustavat kansainvälistä huippuluokkaa. Mittausten korkea taso varmennetaan osallistumalla kansainvälisiin vertailumittauksiin muiden maiden kansallisten mittanormaalilaboratorioiden kanssa. VTT MIKES on mukana kansainvälisessä metrologiatoiminnassa myös aktiivisena sähkömetrologian asiantuntijaryhmien jäsenenä ja osallistuu sekä kotimaisiin että kansainvälisiin tutkimusyhteistyöhankkeisiin.

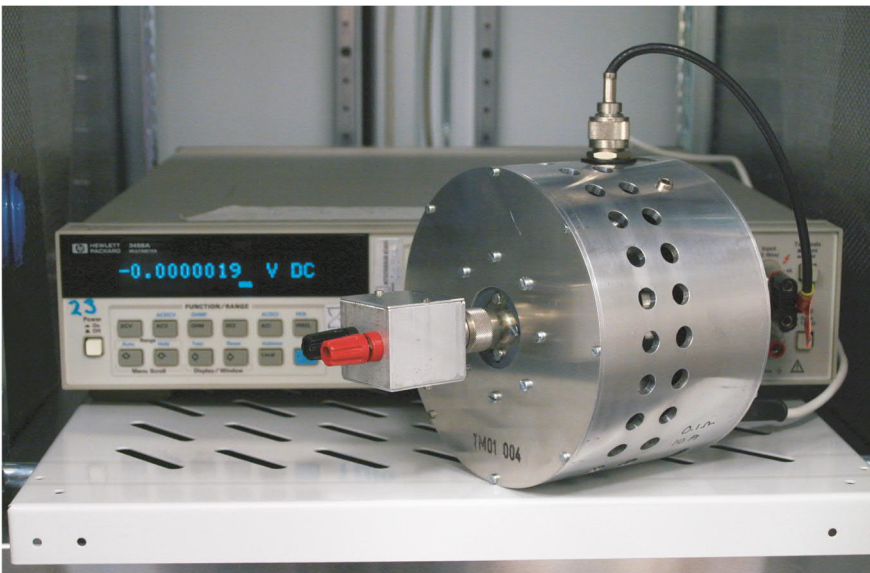


Kuva 1. Kuusikanavainen mittanormaali tehokalibrointeihin. Tämän avulla voidaan kalibroida myös tehon harmonisia ja IEC 61850-9-2 LE ja IEC 61869-9 mukaisia digitaalisia mittalaitteita.

Kalibrointipalvelut

Kalibroimme erityisesti parasta mittaustarkkuutta vaativien asiakkaiden referenssinormaaleita, kuten tehokomparaattoreita ja -muuntimia. Kalibroinnit tehdään kytkemällä samat virta- ja jännitesignaalit kalibroitavaan laitteeseen ja VTT MIKESin referenssimittariin. Tarvittaessa käytettävän tehonlähteen epästabiiliuden vaikutus mittausepävarmuuteen minimoidaan tahdistamalla mittarit keskenään. Kalibroinneissa käytetään referenssimittarina joko yksivaiheista näytteistävää tehonormaalia tai kolmivaiheista tehokomparaattoria.

Tehonormaalien lisäksi kalibroimme myös virta- ja jännitemuuntajia ja -muuntimia 200 kV:n jännitteeseen ja 8 kA:n virtaan saakka. Toteutamme sähkötehon ja -energian sekä sähkön laadun mittaamiseen liittyviä erikoistoimeksiantoja sekä osallistumme alan kehitys- ja tutkimusyhteistyöhankkeisiin. Lisäksi järjestämme alaan liittyviä koulutustilaisuuksia sekä asiakkaan tarpeisiin räätälöityä koulutusta.



Kuva 2. Näytteistävän tehonormaalin koaksiaalinen sivuvastus.

Taulukko 1. MIKESin mittausalueet ja pienimmät kalibrointiepävarmuudet teho- ja energiakalibroinneille.

Mitattava suure	Laajennettu suhteellinen epävarmuus ($k = 2$)
1-vaihe, 50 Hz, 30 V – 500 V, 5 mA – 40 A	
Pätöteho	50 μ W/VA
Loisteho	100 μ var/VA
1-vaihe, 400 Hz – 10 kHz, 1 V – 500 V, 5 mA – 10 A	
Pätöteho	120 – 400 μ W/VA
Loisteho	120 – 400 μ var/VA
Harmoniset, 50 Hz – 2,5 kHz, 1 V – 500 V, 5 mA – 10 A	
Jännite, 1 V – 500 V	100 μ V/V
Virta, 5 mA – 10 A	100 μ A/A
3-vaihe, 50 Hz, 50 V – 350 V, 5 mA – 12 A	
Pätöteho	120 μ W/VA
Loisteho	250 μ var/VA
Pätöenergia	120 μ Wh/VAh
Loisenergia	250 μ varh/VAh

RF- ja mikroaaltokalibroinnit

Kari Ojasalo, Tutkija
Puh. 050 410 5557
kari.ojasalo@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

RF- ja mikroaaltoalueen sovellusten määrä kasvaa jatkuvasti ja sen myötä mittauksen luotettavuuden merkitys korostuu. VTT MIKES toimii tällä alueella kansallisena mittanormaallaboratoriona ja tarjoaa jäljitettävyyden kansainvälisesti hyväksytyihin mittanormaaleihin pienillä epävarmuuksilla RF- ja mikroaaltoalueen tehomittauksissa sekä S-parametrimittauksissa (heijastuskertoimet ja vaimennus). Kalibroimme mm. tehoantureita ja vaimentimia.

Kalibrointilaitteistomme on varustettu tarkkuus-N-liittimillä, joten taajuusalueemme ulottuu 18 GHz:iin. Mittaukset ja tulosten analysointi on pitkälle automatisoitu. Mittaukset suoritetaan tarkkuussäädetyssä 23 °C:een lämpötilassa sähkömagneettisesti suojatuissa tiloissa.

Mittausten korkea taso varmennetaan osallistumalla kansainvälisiin vertailumittauksiin muiden maiden kansallisten mittanormaallaboratorioiden kanssa. Kalibrointien jäljitettävyyden kansainvälisiin mittanormaaleihin perustuu Iso-Britannian kansallisessa metrologialaitoksessa (National Physical Laboratory, NPL) suoritettuihin tehon ja vaimennuksen kalibrointeihin sekä VTT MIKESin omiin primäärisiin mittanormaaleihin.



Kuva 1. Tehoantureiden mittaus.

Kalibrointipalvelut

Teho

Anturien kalibroitikertoimet määritetään tehonjakajaan perustuvalla mittalaitteistolla. Heijastuskerronmittaus vektoripiirianalysaattoreilla kuuluu antureiden kalibrointiin. Tyypillinen kalibrointi aika anturille on viisi työpäivää. Tehomittarirungon tehereferenssin absoluuttisen tehon kalibrointi tehdään termopari- ja dioditehoantureille. Lähteen heijastuskerron määritetään samalla.

Vaimennus

Vaimennuskalibroinnit suoritetaan jäljitettävillä vektoripiirianalysaattorimittauksilla. Heijastuskertoimien määrittäminen kuuluu vaimentimien kalibrointiin. Kalibroimme sekä kiinteitä vaimentimia että askelvaimentimia. Askelvaimentimia voidaan ohjata GPIB-väylän, RS-232-liittymän tai suoraan Agilentin 11713A askelvaimentimen ohjaimen välityksellä.

Heijastuskerron

Jäljitettävät heijastuskerronmittaukset toteutetaan vektoripiirianalysaattoreilla. Mittauksiin käytettävien impedanssinormaalien impedanssi määritetään VTT MIKESissä tarkoin dimensiomittauksin. N-tyyppin ilma-lijnoiden dimensiomittauspalvelua tarjotaan myös asiakkaille.

Muut palvelut

VTT MIKES tarjoaa myös konsultointia suurtaajuus- ja EMC-asioihin liittyen. Lisäksi järjestämme alaan liittyviä koulutustilaisuuksia ja seminaareja sekä asiakkaan tarpeisiin räätälöityä koulutusta.



Kuva 2. Tehoanturien mittausasetelma.



Kuva 3. Referenssiaskelvaimentimen mittaus.

Taulukko 1. Mittausalueet ja -epävarmuudet.

Suure	Mittausalue	Mittauksen taajuusalue	Epävarmuus
Tehoanturien kalibroitikertoimet	1 mW	10 MHz – 18 GHz ⁽¹⁾	0,4 % – 1,1 % ($k=2$) ⁽²⁾
Absoluuttinen teho	1 mW	10 MHz – 18 GHz ⁽¹⁾	4 mW/W – 11 mW/W ($k=2$)
Vaimennus	0 dB – 80 dB	300 kHz – 6 GHz	0,02 dB – 0,17 dB ($k=2$)
Vaimennus	0 dB – 60 dB	6 GHz – 18 GHz	0,05 dB – 0,18 dB ($k=2$)
Heijastuskerron (reaali- ja imaginääriosat)	-1 ja 1 välillä	10 MHz – 18 GHz	0,013 – 0,024 ($k=2,45$) ⁽³⁾

- 1) Tehon kalibrointitaajuudet ovat: 10, 30, 50, 100, 300, 500 MHz, 1 GHz, 1,5 GHz, 2 GHz – 18 GHz 1 GHz askelin.
- 2) Heijastuskertoimen itseisarvo $\leq 0,08$
- 3) Kompleksimuuttujan kompleksiselle epävarmuudelle 95 %:n kattavuus saadaan, kun $k=2,45$.

Suurjännite- ja suurvirtasuureet

Esa-Pekka Suomalainen, Erikoistutkija
Puh. 050 382 2463
esa-pekka.suomalainen@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Suurjännitemittaukset

Suurjännitemittausten tärkeys on korostunut avautuneiden sähkömarkkinoiden myötä. Sähkön laatu, siirtohäviöt ja viimekädessä sähkön myynti teollisuudelle ja yksityistalouksille ovat tulleet yhä tärkeämmiksi mitaus- ja seurantakohteiksi. Suurjännitteiden kuluttajia löytyy sähkö-, elektroniikka- ja tietoteollisuuden lisäksi lähes kaikilta teollisuuden aloilta. MIKESin suurjännitemetrologia on arvostettu kansainvälisesti ja toteuttaa jäljitettävyysspalveluja myös käyttäjän tiloissa kautta maan ja kautta maailman.

Jäljitettävyys

Suurjännitemittausten jäljitettävyys saadaan MIKESin kapasitansseista, vastuksista ja jännitteistä, jotka pohjautuvat MIKESin kvanttimekaanisiin perusnormaaleihin: Josephson-jännitenormaaliin ja kvantti-Hall-vastusnormaaliin. Laboratorio on menestynyt hyvin suurjännitemetrologian kansainvälissä vertailuissa ja toiminut menestyksellä myös vertailujen koordinaattorina. Viimeksi mainitusta esimerkkinä laajojen euroopan- ja maailmanlaajuisten salama-syöksyjännitteen vertailumittausten koordinointi.



Kalibrointipalvelut

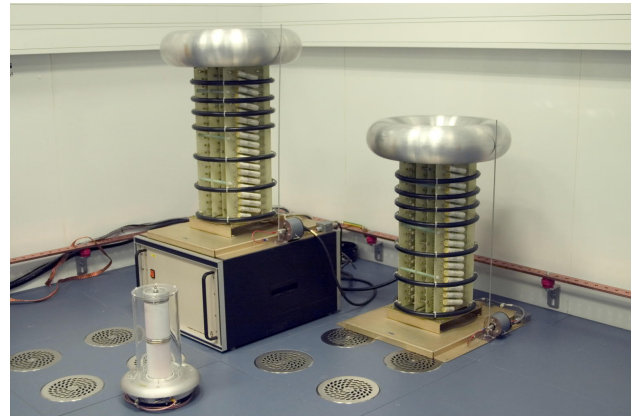
VTT MIKES tarjoaa kalibrointipalveluja lähes kaikille suurjännitesuureille ja -mittausjärjestelmille aina 2000 kV:n jännitteeseen asti. Vaihtovirtakalibrointien alue ylittää 8 kA:iin asti. Pulssisuureiden osalta palvelu kattaa jännitealueen millivolteista megavolteihin ja virrat kymmeniin kiloampeereihin saakka. Asiantuntijapalvelu kattaa mittausjärjestelmien kalibrointeihin ja kalibrointivuuteen liittyviä kysymyksiä. Asiakkaan mittausjärjestelmää arvioidaan haluttaessa ja modifioidaan tarkemmaksi ja stabiilimmaksi tarvittaessa. Tulevaisuudessa pätevyysalue laajenee sähkölaatu-mittauksiin liittyviin kalibrointeihin.

Paras kalibrointitarkkuus saavutetaan kohteen ollessa VTT MIKESin laboratoriossa, mutta kalibrointeja tehdään myös asiakkaan tiloissa. Mittausjärjestelmä voidaan kalibroida käyttö- paikalla mm. jännite-tason, järjestelmän koon, maadoitusolojen tai läheisyyksivaikutusten sitä vaatiessa.

Kalibrointikohteet

Kalibroitavia laitteita ovat mm.

- jännitejakajat
- jännite- ja virtamuuntajat
- mittapäät, jännite- ja virta-anturit sekä virtashuntit
- suurjännitekuristimet ja -kondensaattorit
- transienttialentimet, huippujännitemittarit
- surge-, EFT- ja ESD- testilaitteet
- jännitetesterit
- pulssikalibraattorit
- osittaispurkauskalibraattorit



Taulukko 1. Suurjännitteen kalibrointipalvelut

Suure	Mittausalue	Epävarmuus ($k=2$)
Tasajännite, jännitesuhde	1 kV – 1000 kV	0,0005 – 0,01 %
Tasavirta, virtasuhde	100 A – 600 A	0,002 %
Vaihtojännite	1 kV – 200 kV	0,005 %
– jännitesuhde	1 kV – 200 kV	0,002 – 0,005 %
– kulmavirhe	0 – 100 mrad	0,02 mrad
Vaihtovirta	1 A – 8 kA	0,005 %
– virtasuhde	1 A – 8 kA	0,0025 %
– kulmavirhe	0 – π rad	0,05 mrad
Kapasitanssi	1 – 200 kV / 10 pF – 100 μ F	0,002 – 0,02 %
– häviökerroin $\tan \delta$	$1 \cdot 10^{-5}$ – 2	1 % ($1 \cdot 10^{-5}$ abs)
Induktanssi / häviöt	1 μ H – 10 H	0,03 % / 0,2 mrad
Salamasyöksyjännite	50 mV – 400 kV	0,1 – 0,5 %
KytKentäsyöksyjännite	1 V – 400 kV	0,1 – 0,2 %
Muut jännitepulssit (esim. surge)	1 V – 400 kV	0,1 – 0,5 %
Virtapulssit	1 A – 10 kA	3 %
ESD-pulssi	1 A – 50 A	5 %
Pulssien aikaparametrit	0,7 ns – 100 ms	0,5 – 5 %
Pulssin varaus (osittaispurkaus)	0.01 pC – 10 nC	1 – 5 %

Akustiikka- ja värähtelysuureiden kalibroinnit

Kari Ojasalo, Tutkija
Puh. 050 410 5557
kari.ojasalo@vtt.fi

Jussi Hämäläinen, Tutkija
Puh. 050 410 5518
jussi.hamalainen@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Tarve tarkkoihin akustisiin mittauksiin on kasvussa mm. uusien melupäästöjä ja värinäaltistusta koskevien säännösten takia. Hyvä mittaustarkkuus edellyttää korkealaatuisten mittalaitteiden lisäksi säännöllistä, jäljitettävää kalibrointia. Suomessa akustiikan perussuureiden, äänenpaineen ja kiihtyvyyden, jäljitettävyydestä vastaa VTT MIKES.

Äänenpaine muunnetaan sähköiseksi signaaliksi tarkoilla kondensaattorimikrofoneilla, joiden primäärikalibrointilaitteisto on käytössä VTT MIKESissä. Kondensaattorimikrofoneja käytetään edelleen äänitasokalibraattoreiden kalibrointiin. Äänenpaineen jäljitettävyyden tuottava mittausketju alkaa laboratoriomikrofonien resiprookkikalibroinnista, jolla saadaan selville mikrofonien jännite-paineherkkyydet. Menetelmä on kuvattu standardissa IEC 61094-2 (1992-3) ja se on käytössä useiden muidenkin maiden kansallisilla mittanormaalilaboratorioilla.

Kiihtyvyyssanturi tuottaa mekaanisen liikkeen kiihtyvyyteen verrannollisen signaalin, tyypillisesti tietyn jännitteen tai varauksen. Näin ollen kiihtyvyyssanturin kalibrointi tarkoittaa sen herkkyyden (tyypillisesti mV/(m/s²) tai pC/(m/s²)) määrittämistä taajuuden funktiona. MIKES kalibroi kiihtyvyyssanturin vertaamalla sen näyttämää tunnettuun värähtelyyn, joka tuotetaan tärstimellä. Värähtelyn oikea kiihtyvyyssamplitudi ja taajuus mitataan samanaikaisesti referenssianturilla. Menetelmä on kuvattu standardissa ISO 16063-21:2003.



Kuva 1. Mikrofonien resiprookkikalibrointi alkamassa äänieristetyssä laboratoriossa.

Kalibrointipalvelut

Mikrofonit

Kalibroimme IEC-standardin IEC 61094-1 mukaisia ½- (LS2P) ja 1- (LS1P) tuuman kondensaattorimikrofoneja (taulukko 1). Kalibrointitapa riippuu asiakkaan tarvitsemasta mittaustarkkuudesta. Pienimmät kalibrointiepävarmuudet saadaan resiprookkimenetelmällä. Monissa tapauksissa riittää vertailu referenssimikrofoniin äänitasokalibraattorin avulla.

Taulukko 1. Mittausmikrofonien kalibrointiepävarmuudet.

Mikrofonin tyyppi	Taajuus [kHz]	Epävarmuus [dB]
LS 1	0,0315	0,06
	0,063 ... 2	0,04
	4	0,05
	5	0,06
	8	0,08
	10	0,10
LS 2	0,0315	0,08
	0,063	0,06
	0,125 ... 8	0,05
	10	0,06
	12,5	0,08
	16	0,10
	20	0,14

Äänitasokalibraattorit

Äänitasokalibraattorit ja mäntä-äänilähteet ovat VTT MIKESin akustiikkalaboratorion suurin yksittäinen kalibroitava laiteryhmä. Kalibroimme äänitasokalibraattoreiden äänenpainetasot pistetaajuuksilla. Samalla mitataan äänilähteen särö ja taajuus (taulukko 2).

Taulukko 2. Äänitasokalibraattoreiden kalibrointialueet ja -epävarmuudet. Mittausmikrofonin tyyppi on LS2P.

Kalibraattorin tyyppi	Taajuus (Hz)	Äänitaso [dB re 20 µPa]	Epävarmuus [dB]
Yksitaajuinen	125 – 1000	70 – 130	0,08
Monitaajuinen	31,5	94 – 114	0,15
	63 – 4000	94 – 114	0,15
	8000 – 12500	94 – 114	0,15

Kiihtyvyyssanturit ja värähtelysuureiden kalibroinnit

Kalibroimme kiihtyvyyssantureita, värähtelysuureita ja värähtelymittauslaitteistoja taajuusalueella 1 Hz – 10 kHz. Tyypillinen nimelliskiihtyvyys on 10 m/s². Kalibroinnin tuloksena saadaan kiihtyvyyssanturin herkkyyden magnitudi ja vaihe. Kalibroinnin epävarmuus riippuu kalibroitavasta anturista mutta tyypillisesti epävarmuudet ovat magnitudille 1 – 2 % (taulukko 3) ja vaiheelle 1° – 2° taajuudesta riippuen.

Taulukko 3: Värähtelysuureiden kalibrointipalvelut ja tyypilliset mittausepävarmuudet. (*) Taajuusalue ei sisälly MRA-sopimukseen.

Kalibroitava laite	Taajuus (Hz)	Tyypillinen epävarmuus (%)
Kiihtyvyyssanturi	10 – 10 000	0,8 – 2
Kiihtyvyyssanturi	1 – 100 (*)	0,5 – 1
Värähtelysuureiden kalibraattori	10 – 10 000	1,5
Värähtelysuureiden kalibraattori	10 – 10 000	1,5

Ajan, aikavälin ja taajuuden kalibrointi

Ilkka Iisakka, Tutkija
Puh. 050 410 5519
ilkka.iisakka@vtt.fi

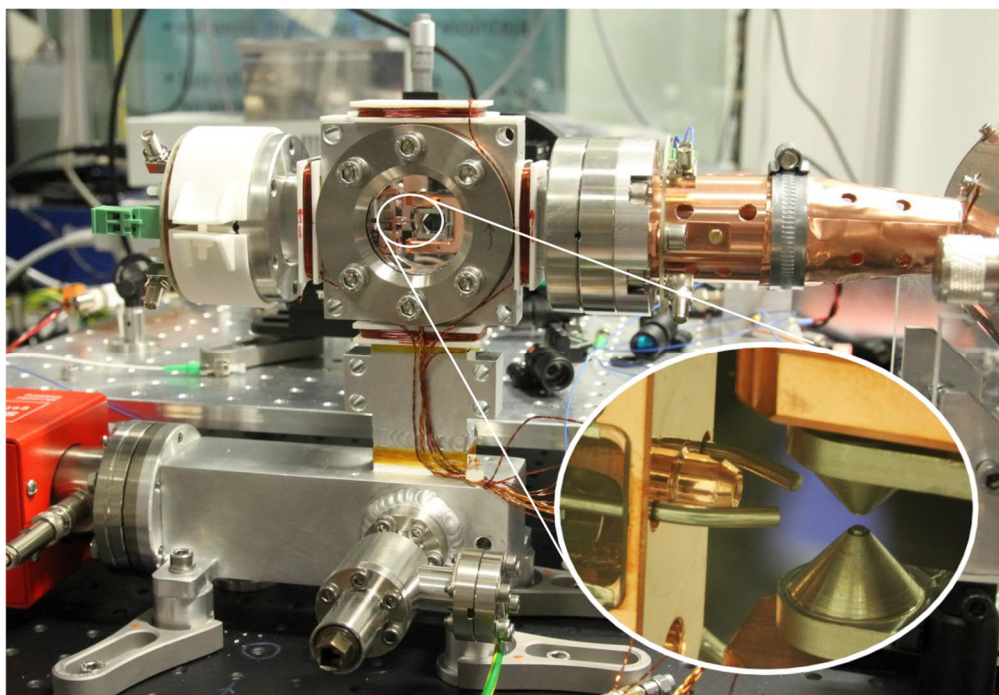
Anders Wallin, Erikoistutkija
Puh. 050 415 5975
anders.wallin@vtt.fi

VTT MIKES,
Tekniikantie 1, 02150 Espoo
Puh. 020 722 111

Taajuuden ja aikavälin mittaamista tarvitaan erittäin monissa suorissa ja välillisissä mittauksissa esimerkiksi tietoliikennesovellutuksissa. Siksi taajuuden ja aikavälin tarkka ja jäljitettävä mittaaminen on kansallisesti tärkeää. Myös tarkan absoluuttiajan merkitys on kasvamassa (esim. NTP, aikaleimat).

VTT MIKES vastaa Suomen kansallisen ajan, aikavälin ja taajuuden jäljitettävyydestä. Aikalaboratorio

ylläpitää kansallista aikaa 10 ns:n epävarmuudella ($k=1$) suhteessa kansainväliseen aikaan (UTC, koordinoitu yleisaika) sekä kansallista taajuutta $1 \cdot 10^{-13}$ suhteellisella epävarmuudella. Ajan ja taajuuden referenssinormaaleina on yksi cesium-atomikello, neljä vetymaseria ja useita GPS-vastaanottimia. Suomi osallistuu myös UTC:n ylläpitoon viidellä referenssinormaalillaan GPS-satelliitteihin perustuvan aikaverailun kautta.



Kuva 1. VTT MIKES kehittää optista primääritaajuusnormaalia perustuen 445 THz spektriviivaan laser-jäähdytetyssä $^{88}\text{Sr}^+$ ionissa. On todennäköistä, että SI-sekunnin määritelmä tulevaisuudessa perustuu vastaavaan ns. optiseen atomikelloon.

Kalibrointipalvelut

Kalibroimme mm. GPS-vastaanottimia (aika, taajuus), oskillaattoreita, aikavälimittareita, sekuntikelloja, stroboskooppeja ja optisia kierroslukumittareita. Taajuuden mitta-alueemme on 1 mHz ... 5 GHz. Aikavälimittauksia teemme asiakkaiden tarpeiden mukaan, alarajana on noin nanosekunti. Lisäksi VTT MIKESillä on aikakoodia ja tarkkaa 25 MHz taajuutta lähettävä normaalitaajuuslähetin, joka palvelee pääkaupunkiseudun läheisyydessä olevia tarkan ajan ja taajuuden tarvitsijoita.

Kalibrointitoiminnan lisäksi toteutamme myös ajan ja taajuuden mittaamiseen liittyviä erikoistoimeksiantoja sekä osallistumme alan kehitys- ja tutkimusyhteistyöhankkeisiin.

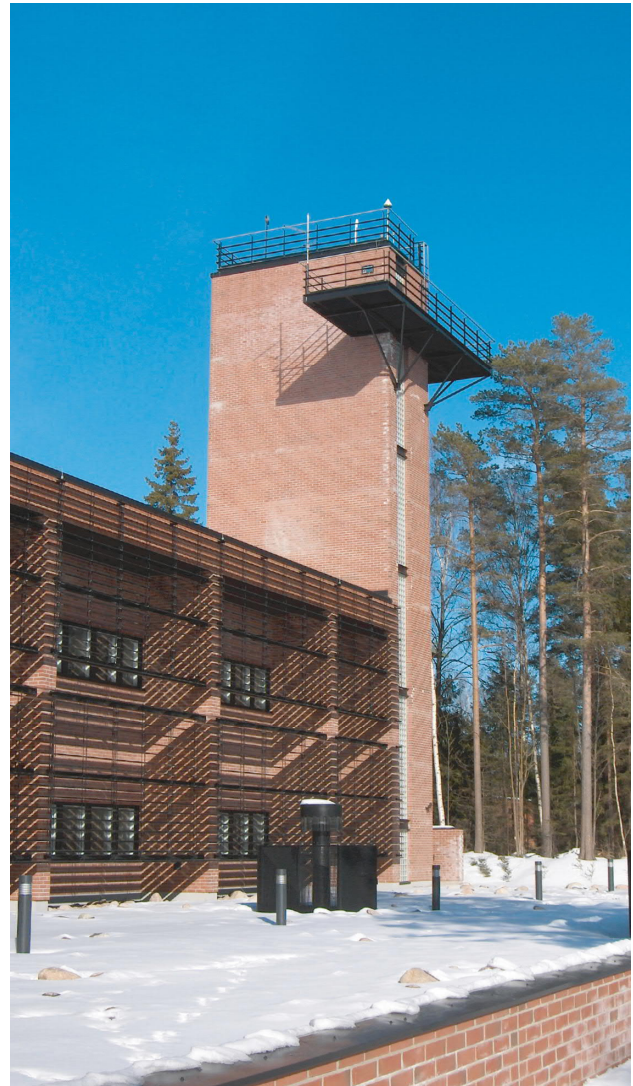
NTP-verkkoaikapalvelu

Tietokoneiden kellot voidaan tahdistaa VTT MIKESin ylläpitämään Suomen kansalliseen aikaan NTP-verkkoaikapalvelun (Network Time Protocol) avulla. Saavutettava epävarmuus riippuu verkkoyhteyksistä, mutta on parhaimmillaan millisekunnin luokkaa. VTT MIKES ylläpitää virasto-, laitos- ja yrityskäyttöön tarkoitettuja maksullisia NTP-palvelimia. Näitä korkeimman eli Stratum 1 -tason palvelimia on neljä Otaniemessä ja yksi Kajaanissa. Maksullisen palvelun lisäksi tarjolla on matalamman Stratum 2-tason palvelimien ilmainen NTP-palvelu.

<https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/suomen-aika-ntp-palvelu>

PTP-aikapalvelu

Tarkempaa aikaa vaativiin käyttötarpeisiin tarjoamme PTP-aikapalvelua joka yleensä toteutetaan VTT MIKESin ja asiakkaan välisen valokuituyhteyden avulla. Saavutettu ajan epävarmuus voi olla 10 ns tai alle, riippuen toteutuksesta. Tarjolla on yleisimmät PTP (IEEE1588-2019) profiilit eri sovelluskohteisiin (tietoliikenne, sähköasemat, mediatuotanto, jne). Pienin epävarmuus saavutetaan PTP-WR (White Rabbit) päätelaitteilla yhden kuidun valokuituyhteyksillä.



Kuva 2. VTT MIKES osallistuu UTC:n ylläpitoon GPS-satelliitteihin perustuvan aikavertailun kautta.

bey⁰nd

the obvious