

EMRP:n tarkoituksena on integroida eurooppalainen metrologian tutkimus yhteisten päämäärien toteuttamiseen. EMRP tarjoaa eurooppalaiset resurssit mittauksiin liittyvien haasteiden ratkaisemiseksi yhteisprojekteissa. Erilaisten mittaushaasteiden ja -ongelmien ratkaisemiseksi hakuja järjestetään kohdistetuille alueille.

Hakuprosessi on useampivaiheinen:

1. Ensin etsitään potentiaalisia tutkimusaiheita (Call for Potential Research Topics, PRTs) määritellyltä tutkimusalueelta. Tässä vaiheessa kuka tahansa, yritys, organisaatio tai yksityinen henkilö, voi esittää mittauksiin liittyviä tutkimusaiheita tai mittaongelmia yhteisprojektein ratkaistavaksi.
2. Saapuneista tutkimusaiheista priorisoidaan ja valitaan tärkeimmät (Selected Research Topics, SRTs) ja niille pyydetään yhteistutkimusprojekti ehdotuksia (Call for proposals for Joint Research Projects, JRP). Projektit toteutetaan pääasiassa kansallisten metrologialaitosten toimesta, mutta hakemuksiin on mahdollista sisällyttää ehdotuksia kaikille avoimiksi Research Excellence Grants:eiksi (REGs). Tätä määrärahaa voi saada organisaatio tai yksilö, jolla on tärkeä panos projektin onnistumisen kannalta. Organisaatiot voivat osallistua tutkimushankkeisiin myös omilla resursseillaan. Referee-arvioinnilla projektiehdotuksista valitaan toteutettavat tutkimusprojektit JRP:t.
3. Research Excellence Grants ja Researcher Mobility Grants - rahoitusta voi hakea viimeisessä vaiheessa myös toteutettavaksi valittuihin projekteihin.

Hakuprosessiin kuuluu käytännössä noin vuosi: ensimmäisen vaiheen haku (PRT-haku) on avoinna helmikuun alkupuolelta maaliskuun loppupuolelle ja toisen vaiheen haku (JRP-haku) on avoinna kesäkuun puolivälistä lokakuun alkuun. Päätökset rahoitettavista projekteista tulevat yleensä joulukuussa. Kolmannen vaiheen REG-haku on seuraavan vuoden huhtikuussa.

Parhaimmillaan yritys tai organisaatio voi saada EMRP-ohjelman avulla ratkaisun mittaongelmaansa. Tällöin ongelma on tyypillisesti vaikuttavuudeltaan laaja ja sen ratkaisemista on ehdotettu useammalta taholta. Kannattaakin olla aktiivinen tutkimusaiheiden ehdotusvaiheessa. Tulosten hyödyntämisvaiheessa voidaan suomalaisen yrityksen sovellutusintressit kytkeä EMRP-projektiin TEKESin tai Cleen Oy:n rahoittaman rinnakkaishankkeen kautta.

Vuosina 2008-2011 toteutettiin ensimmäiset 3-vuotiset ERA-NET Plus -alkuvaiheen EMRP-projektit. Projektien aihealueina olivat pituusmetrologia, sähkömetrologia, terveys ja metrologian suuret haasteet. Toteutettavia hankkeita oli kaikkiaan 21, joista MIKES osallistui jäljempänä kuvattaviin 9 projektiin.



MIKES on menestynyt hyvin myös alkuvaihetta seuranneissa hauissa. Jäljempänä on kuvattu ne rahoitetut projektit, joissa MIKES on mukana.

EMRP:n laajuus on 7 vuotta ja rahoitus 400 M€. Komission rahoitusosuus on 50 % ja toisen puolen rahoittavat osallistujamaat. Suomi on sitoutunut ohjelmaan 4 % rahoitusosuudella. Ohjelmaa hallinnoi EURAMET e.V. (European Association of National Metrology Institutes).

EMRP on Euroopan metrologian tutkimus- ja kehitysohjelma, joka perustuu EY:n perustamissopimuksen nykyiseen Artiklaan 185 (aiemmin Artikla 169). Ohjelma on rinnakkainen EU:n 7. puiteohjelmalle. Ohjelmaan on sitoutunut yli 20 Euroopan maata.

Lisätietoa EMRP-ohjelmasta ja tulevista hauista löytyy [www.emrponline.eu](http://www.emrponline.eu) ja [www.euramet.org](http://www.euramet.org).

#### MIKESIN yhteyshenkilöt EMRP-hakuihin liittyen:

Tutkimusprofessori

Erkki Ikonen, puh. 029 5054 406 tai 050 550 2283

Johtaja Heikki Isotalo, puh. 029 5054 400

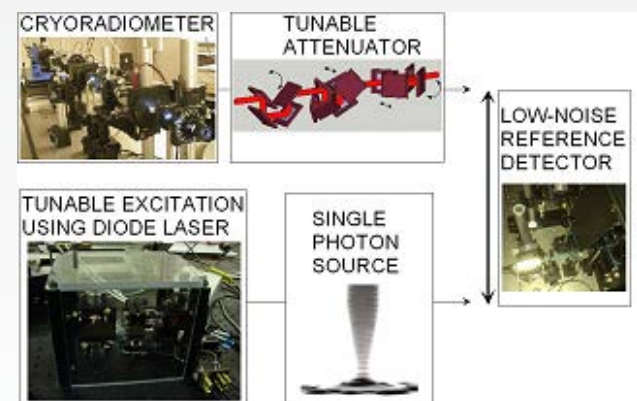
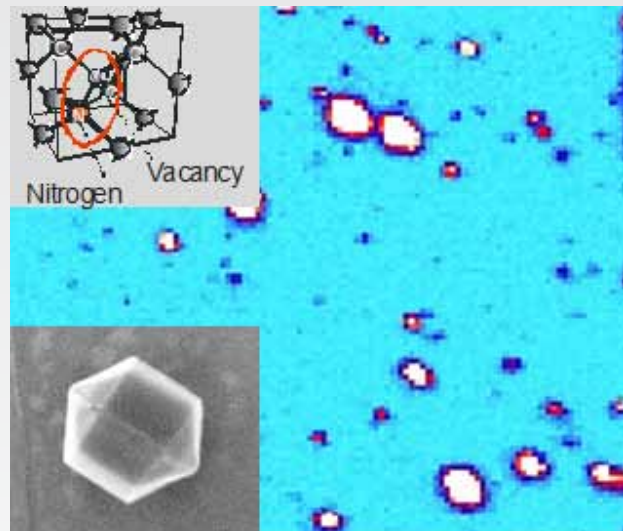
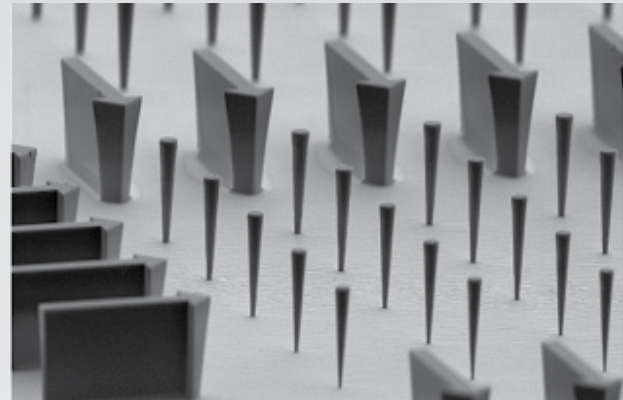
# SIQUTE YKSITTÄISIÄ FOTONEJA KVANTTISOVELLUKSIIN

OPEN EXCELLENCE 2013 - 2016

Viime vuosina suuren mielenkiinnon kohteena on ollut yksifotonilähteiden kehitys eri sovelluksiin. Kuitenkaan yksikään näistä lähteistä ei vielä täytä kaikkia kvanttikommunikaation, kvanttilaskennan ja kvanttimetrologian niille asettamia tieteellisiä ja teknisiä vaatimuksia. Kvanttialauksessa salausavaimen jakelussa tarvitaan todellisia yksifotonilähteitä nykyisten haavoittuvien pseudoyksi-fotonilähteiden sijaan. Kvanttilaskennassa ja -tietojenkäsittelyssä on kehitteillä useita erityyppisiä tekniikoita mutta fotonien käyttöön perustuvilla tekniikoilla on etuna nopeus (fotonit kulkevat valonnopeudella), fotonien heikko vuorovaikutus ympäristön kanssa ja niiden helppo ohjaus tavallisella optiikalla. Kvanttilaskenta fotonien avulla onkin mahdollista toteuttaa käyttäen vain lineaarisia optisia komponentteja ja valodetektoreita. Fotoneihin perustuvassa kvanttilaskennassa tarvitaan kuitenkin täydellisiä yksifotonilähteitä. Yksifotonilähteitä tarvitaan myös optisissa kvanttimittauksissa, joissa käytetään hyväksi kvanttimekaniikan tekniikoita kuten tilojen lomittumista ja ei-klassisten tilojen korrelaatioita parantamaan mittausten herkkyyttä ja tarkkuutta. Lisäksi radiometriassa uuden lähdennormaalien kehittäminen hyvin pienille fotonivoille edesauttaisi yksifotoni-ilmaisimien metrologian kehittämistä.

Projektin tavoitteena on kehittää kompakteja ja tehokkaita yksifotonilähteitä kvanttioptiikan ja metrologian sovelluksiin, jotta mittauskkykyä saadaan parannettua ja siten mahdollistaa uusia tieteellisiä innovaatioita näillä aloilla. Projektissa kehitettävät ja karakterisoitavat yksifotonilähteet perustuvat kvanttipisteisiin, tyhjiin hilapisteisiin nanotimanteissa ja aaltojohdetekniikoihin. Saavutettavan fotonivuon tavoitteena on 107 fotonia sekunnissa. Kehitetään menetelmä, jolla jäljitettäviä fotonivuomittauksia suurilla fotoninopeuksilla voidaan soveltaa hyvin pienten fotonivoiden mittauksiin. Lisäksi demonstroidaan lähteiden soveltuvuus erilaisiin kvanttimekaanisiin lomittumiskokeisiin.

MIKESin kehittää projektissa siirtonormaalina toimivan jäljitettävän fotonilähteen, joka kykenee mittaamaan fotonivuonopeuksia 50 fW :sta 3 pW:iin 1 % epävarmuudella. Lisäksi MIKES kehittää ja toteuttaa ohjauselektronikan alle nanosekunnin pituisia pulsseja tuottaville diodilasereille ja vaihtelevaan toistotaajuuteen kykenevään optisen viritysmenetelmän nanotimantteihin perustuvien yksifotonilähteiden virittämiseen.



Konsortio: PTB + MIKES, CMI, INRIM, Metrocert, NPL, UMD, CEA, DTU, FAU ja Uds

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Albert Manninen

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 460

# MICROPHOTON YKSITTÄISTEN FOTONIEN TUOTTAMINEN JA HAVAINNOINTI MIKROAALTOALUEELLA

OPEN EXCELLENCE 2013 - 2016

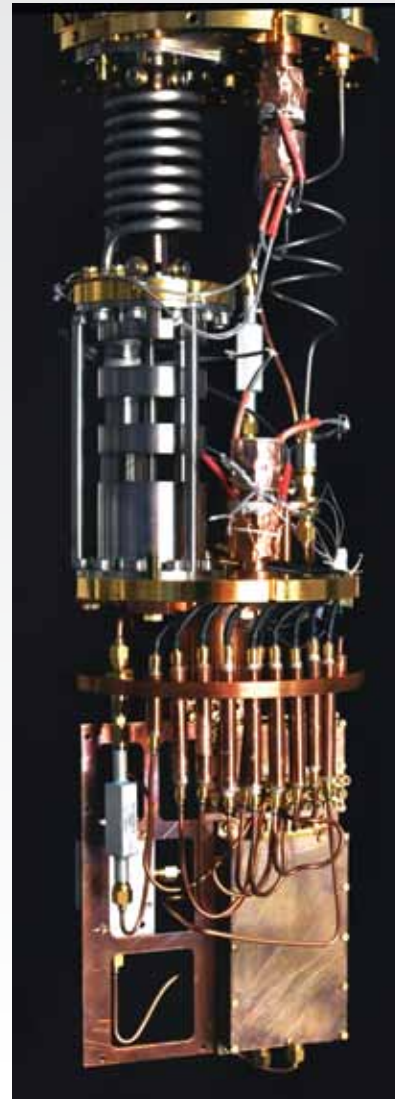
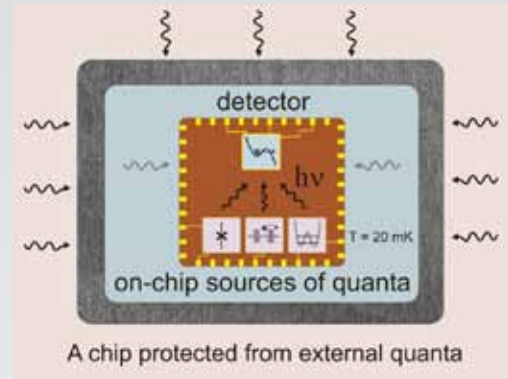
Sähkömagnetismi on mielenkiintoisessa murroksessa, kun suprajohdavan kvanttielektronikan kehittyminen on mahdollistanut kvanttisähködynamiikan (QED) ilmiöiden toteuttamisen suoraan mikrosiruissa. Intensiivisen tutkimuksen kohteena on mikropiiri-QED eli vuorovaikutukset mikroaaltofotonien ja suprajohdteiden elektronien välillä. Näillä vuorovaikutuksilla on sovelluksia erityisesti kvantti-informaation käsittelyssä ja kvanttikommunikaatiotekniikoissa. Sähkömagneettisen säteilyn metrologia mikroaaltotaajuuksilla on kuitenkin vielä melko kehittymätöntä varsinkin hyvin pienillä signaalitasoilla. Yksittäisten fotonien havainnointi ja tuottaminen on kuitenkin oleellista monissa kvanttisovelluksissa, esimerkiksi kvanttilaskennassa mikroaaltofotoneilla. Toisaalta useat monet suprajohdavan kvanttielektronikan laitteet ovat äärimmäisen herkkiä mustan kappaleen säteilytaustan, jopa yksittäisten mikroaaltofotonien aiheuttamille häiriöille. Tällä hetkellä mikroaaltoalueelle ei ole kuitenkaan ilmaisimia, jotka voisivat luotettavasti havaita yksittäisen fotonin. Ilmaisimien kehittämisen vaikeutena on fotonin pieni energia sekä mustan kappaleen säteilytausta.

MICROPHOTON-projektissa kehitetään ilmaisimia ja lähteitä, joilla pystytään havainnoimaan ja tuottamaan yksittäisiä fotoneja sekä parannetaan kryogeenisten kvanttilaitteiden suorituskykyä tutkimalla ja eliminomalla taustamikroaaltosäteilyn haitallisia vaikutuksia. MIKES keskittyy projektissa selvittämään taustamikroaaltosäteilyn vaikutuksia kvanttimekaniikkaan perustuviin nanotekniikan laitteisiin. Tutkimuksia varten kehitetään ultrahiljainen kryogeeninen ympäristö, jotta ympäristön saataisiin eliminointua mahdollisimman hyvin. Tavoitteena on mikroaaltosäteilyltään hiljaisin ympäristö maailmankaikkeudessa. Lisäksi MIKES kehittää mikroaaltoilmaisimia, jotka perustuvat ns. SINIS-SET-rakenteisiin (SINIS-SET = superconductor-insulator-normal metal-insulator-superconductor single electron tunneling).

Konsortio: MIKES + INRIM, NPL, PTB, Aalto, LanU ja RHUL

Lisätietoja:

Projektikoordinaattori Antti Manninen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 416





# XD REFLECT MONI- ULOTTEISTA REFLECTOMETRIA TEOLLISUUDELLE

TEOLLISUUS 2013 - 2016

Samanmuotoiset kappaleet voidaan identifioida visuaalisten pintaominaisuuksien perusteella kuten värin, kiillon, tekstuurin, läpinäkyvyyden, rakeisuuden ja kimalluksen. Näiden visuaalisten ominaisuuksien yhdistelmä muodostaa pinnan ulkonäön. Tuotteen ulkonäöllä on suuri merkitys monilla teollisuuden aloilla esimerkiksi auto-, kosmetiikka-, paperi-, paino-, pakkaus-, pinnoite-, muovi- ja terästeollisuudessa, koska se on usein yksi tärkeimmistä tekijöistä kuluttajan tehdessä ostopäätöstä. Tämän vuoksi valmistajat ovat jo vuosia panostaneet tuotekehityksessään uusien hienostuneiden visuaalisten tehosteiden aikaansaamiseksi kuten metallihohtovärien, syvien mattapintojen, irisoivien (sateenkaaren väreissä kimaltelevien) pintojen, välkehtivien pintojen, jne.

Projekti tuottaa validoituja, luotettavia ja SI-yksiköihin jäljitettäviä optisia mittauksia ja mittausmenetelmiä moniulotteisiin heijastusmittauksiin. Tavoitteena on vastata teollisuuden vaatimukseen modernien pintojen makroskooppisen ulkonäön kuvaamiseen kehittämällä ja parantamalla mittausmenetelmiä, jotka suoraan korreloivat visuaalisen aistihavainnon kanssa. Projektissa tutkitaan erityisesti pintojen kiiltoa, irisointia ja fluoresenssiominaisuuksia.

MIKES jatkokehittää goniofluorometriä soveltuvaksi projektin vaatimiin mittauksiin, tutkii uusiksi diffuuseiksi heijastusnormaaleiksi soveltuvia fluoresoivia keraamisia materiaaleja, mittaa artefaktinormaalien läpäisevyyttä, kiiltoa ja fluoresenssia sekä kehittää fluoresoivien värinormaalien mittauksille menetelmiä validointiin ja jäljitettävyyteen.

Konsortio: CNAM + MIKES, CMI, CSIC, INRIM, PTB, SP, IRL, KAHO ja UA

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Priit Jaanson  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 XYZ

# T I M JÄLJITETTÄVYYS P R O S E S S I N AIKAIISIIN DIMENSIOMITTAUKSIIN

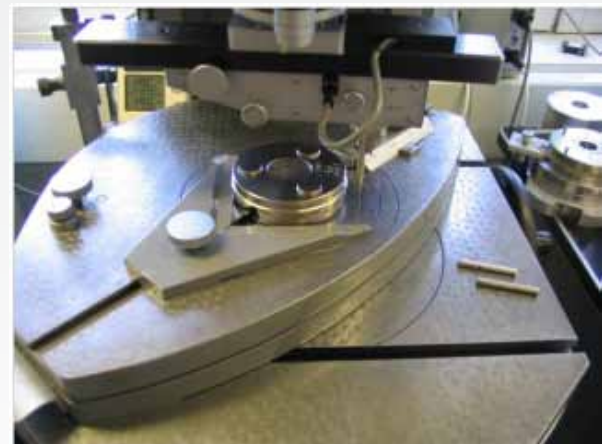
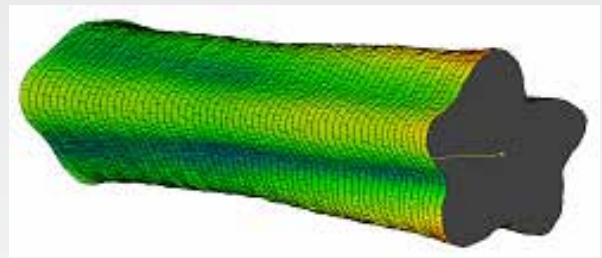
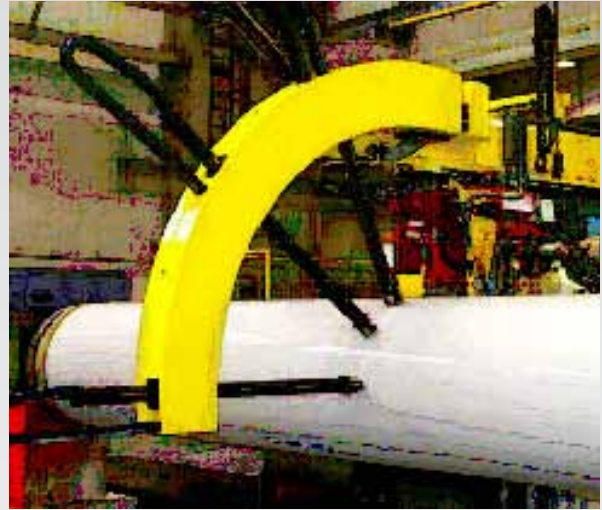
TEOLLISUUS 2013 - 2016

Työstökoneiden tarkkuuteen vaikuttavat monimutkaiset dynaamiset muutokset koneen ympäristön olosuhteissa, värähtely, melu, äänet ja valaistus sekä laitteiden omat mittaavoimat. Nykyiset työstökoneiden kalibrointimenetelmät eivät ole riittävän kehittyneitä karakterisoimaan ja lieventämään koneen todellisen mittausympäristön asettamia rajoitteita. Mittausvoimat ja -kuormat tuottavat lämpöä koneiden ollessa käytössä, mikä estää niiden työstökoneiden käytön jäljitettävänä ja luotettavana mittalaitteina. Lasereihin perustuvat kalibrointimenetelmät eivät ota huomioon mittaavoimien ja lämmön vaikutuksia mittaustapahtumaan. Sopivien menettelytapojen vähäisyys työstökoneiden dimensiomittausten epävarmuuksien määrittämiseen estää prosessin aikaisiin mittaustuloksiin luottamisen, mikä johtaa pidentyneisiin tuotantoaikoihin ja lisääntyneisiin tuotantokustannuksiin.

Jäljitettävät prosessin aikaiset työstökoneiden dimensiomittaukset mahdollistaisivat paremman tuotteiden laadun, pienemmät tuotantokustannukset, suuremman tuottavuuden sekä välittömän ja luotettavan arvioinnin tuotteen laadusta.

Projektin tavoitteena on parantaa tuotantoprosessin aikaisten dimensiomittausten tarkkuutta luomalla standardeja ja toimintatapoja mittaustarkkuuden parantamiseksi sekä parantaa jäljitettävyyttä ja luotettavuutta toimittamalla stabiileja monikäyttöisiä materiaalinormaaleja. Nämä lämpöinvariantit materiaalinormaalit auttavat myös koneiden lämpötilan muutosten aiheuttamien lämpömekaanisten virheiden hallinnassa. Lisäksi kehitetään työstökoneiden virhearviotekniikoita, jotka eivät ole rajoittuneita vain stationaarisiiin vakioympäristöolosuhteisiin sekä innovatiivinen liikuttava kammio muuttuvien konepajaolosuhteiden simulointiin.

MIKESin pääasiallinen tehtävä projektissa on kehittää uusi ympyrämuotoisuusnormaali optisille mittalaitteille, jotka soveltuvat telamittauksiin sekä laatia käsikirja, jossa kuvataan ympyrämuotoisuusnormaalin valmistustoleranssit, tekniset vaatimukset, kuvataan ohjeet sen käsittelylle, kuljetukselle, mittauksille ja kalibroinnille. Lisäksi MIKES kehittää virhearviomenetelmiä ympyrämuotoisuuden mittaukselle telan valmistuksessa.



Konsortio: PTB + MIKES, CEM, CMI, LNE, Metroser, NPL, UM, Alwaid, Daimler, EMO, GEOMNIA, GO-RENJE, IK4-TEKNIKER, MAG, Mitutoyo, RRI, Solid-Vision, TOPMES, UNIZAR, Veplas, VUOS, Aalto ja KIT

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Björn Hemming  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 403

# Met AMC MENETELMIÄ EPÄPUHTAUSMOLEKYYLIEN MITTAUKSEEN TEOLLISUUSYMPÄRISTÖISSÄ

TEOLLISUUS 2013 - 2016

Ympäröivässä ilmassa olevat kemialliset epäpuhtaudet kuten erilaiset kaasut ja aerosolit voivat vaikuttaa haitallisesti valmistettaviin tuotteisiin, valmistusprosesseihin ja -laitteisiin; esimerkiksi ne ruostuttavat metallipintoja mikrosirujen valmistuksessa ja muodostavat epäpuhtauskerroksia optiikan ja piikiekkujen pintoihin. Eryityisesti epäpuhtauksien aiheuttamat ongelmat korostuvat pyrittäessä valmistamaan yhä pienempiä puolijohde- ja nanokomponentteja. Näillä aloilla onkin selkeä tarve epäpuhtausmolekyylien jatkuvalle reaaliaikaiselle mittaamiselle ja valvonnalle, jotta valmistusprosessit voidaan optimoida ja siten tuotteiden laatua parannettua ja hävittää pienennettyä. Tällä hetkellä näiden hyvin moninaisten epäpuhtausmolekyylien synnystä ja käyttäytymisestä teollisessa tuotannossa tiedetään hyvin vähän.

Viime aikoina kvantitatiivisen molekyyli-spektroskopian menetelmien mittausherkyys on tutkimuslaboratorioissa saavuttanut tason, jolla voidaan havaita näitä ilmassa olevia erittäin pieninä pitoisuuksina (~ppb) esiintyviä epäpuhtausmolekyylejä. Eryityisesti lasereihin perustuvat tekniikat ovat jo niin kehittyneitä, että niiden vieni teollisuusympäristöihin on tullut mahdolliseksi. Yhtenä ongelmana kuitenkin on vielä tyyppisten epäpuhtausmolekyylien erittäin pienten pitoisuuksien lisäksi se, että ne ovat hyvin reaktiivisia ja tarttuvat herkästi kaikkiin pintoihin. Tämä luo haasteita käytettävälle mittaustekniikalle ja luotettavien mittausten tekemiseksi vaadittavien kalibrointikaasujen generoinnille ja kuljetukselle.

MetAMC-projektissa kehitetään lasermenetelmiä näiden erittäin pieninä pitoisuuksina esiintyvien epäpuhtausmolekyylien jatkuvaan lähes reaaliaikaiseen mittaamiseen teollisuusympäristöissä, kehitetään reaktiiviselle adsorboituville kaasuille sopivia käytännöllisiä

näytteenottotekniikoita sekä rakennetaan kuljetettava referenssikaasugeneraattori pienien näytekäasupitoisuuksien generointiin kehitettyjen mittausten menetelmien kalibroimiseksi.

MIKES kehittää fotoakustiseen spektroskopiaan perustuvan hivenkaasujen mittalaitteen, joka soveltuu käytettäväksi teollisuusympäristössä ja jonka herkkyys riittää epäpuhtauskaasujen mittaamiseen. Laite karakterisoidaan ja testataan todellisessa käyttöympäristössä eli puhdistiloissa ja sen suorituskykyä verrataan projektissa kehitettyihin muihin laitteisiin sekä kaupallisiin analysaattoreihin.

Konsortio: MIKES (koordinaattori), CMI, INRIM, NPL, PTB, VSL, HCP ja POLITICO (REG)

Lisätietoja:  
Projektikoordinaattori Tuomas Hieta  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 458





# GraphOhm

GRAFEENIIN  
PERUSTUVA  
KVANTTIRESISTANSSIMETROLOGIA



EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Sähköyksiköillä on tärkeä merkitys teollisuuden, tieteiden ja tekniikan eri sovelluksissa, koska lähes kaikkien muiden suureiden mittauksiin jossain vaiheessa liittyy sähköisiä mittauksia. Sähköyksiköt ovat jäljitettävissä jännitteen (Josephsonin ilmiö) ja resistanssin (kvantti-Hall-ilmiö) kvanttinormaaleihin. Jännitteen kvanttinormaalit ovat laajalle levinneitä ja helposti kuljetettavia kun taas resistanssin nykyiset kvanttinormaalilaitteistot ovat hyvin monimutkaisia, kalliita ja niiden käyttö vaatii suurta asiantuntemusta. Tämän vuoksi laitteita on käytössä lähes pelkästään kansallisissa mittanormaallaboratorioissa eikä edes kaikissa niissä. Kalibroitien jäljitettävyyssketjuista tulee pitkiä, mikä kasvattaa epävarmuutta, koska jokainen kalibrointivaihe heikentää tarkkuutta. Tämä johtaa myös ajan ja rahan hukkaan, koska joudutaan kalibroimaan useita sekundaari- ja siirtonormaaleja.

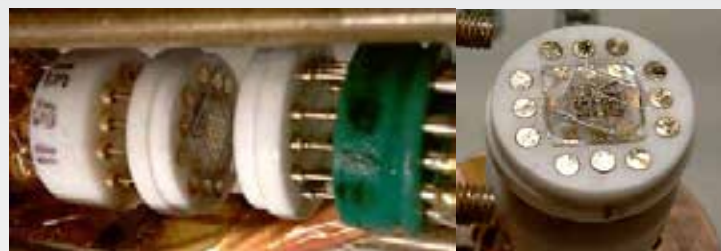
Projektissa kehitetään kvantti-Hall-ilmiöön perustuvia uudentyyppisiä vakaita, kestäviä ja käyttäjäystävällisiä resistanssin kvanttinormaaleja, jotka käyttävät hyväkseen grafeenimateriaalin erityisominaisuuksia: grafeenissa kvantti-Hall-ilmiö on mahdollista toteuttaa pienemmällä magneettikentällä ja korkeammassa lämpötiloissa kuin millään muulla tunnetulla materiaalilla. Yksinkertaisemmat, helposti kuljetettavat resistanssin kvanttinormaalit mahdollistavat laajemman käyttäjäkunnan, lyhentävät resistanssin jäljitettävyyssketjua SI-yksiköstä loppukäyttäjälle oleellisesti sekä pienentävät kalibrointikustannuksia.

Kvanttinormaalien toteuttaminen edellyttää grafeenin materiaalitutkimusta, valmistusmenetelmien optimoimista täyttämään metrologiset vaatimukset mm. homogeenisuuden, kontaktiresistanssin, kokovariaation, jne. suhteen sekä kemiallisten ja fysikaalisten testausmenetelmien kehittämistä grafeenin ja grafeeniin perustuvien laitteiden karakterisointiin. Toteutettujen laitteiden rajoituksia testataan kvantti-Hall-ilmiön tarkkuusmittauksilla erilaisilla magneettikentän ja lämpötilan arvoilla. Lisäksi tutkitaan grafeenilaitteiden ac-häviöitä, jotta voidaan arvioida niiden soveltuvuutta impedanssinormaaleiksi.

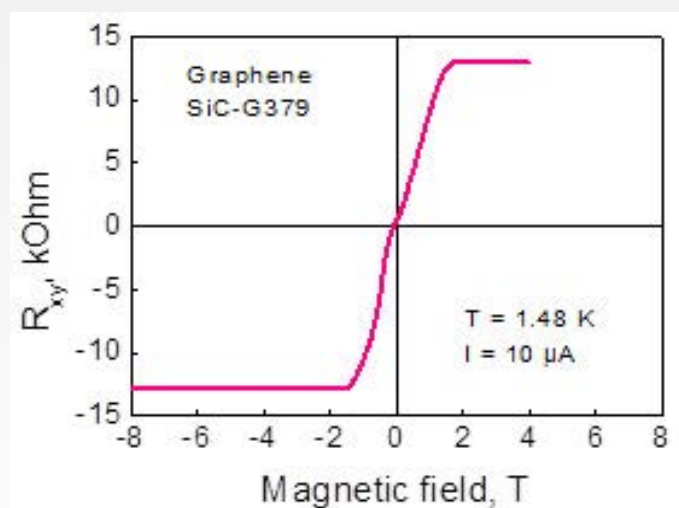
MIKESin päätehtävänä on kehittää tarkkuusvirtavertailija, karakterisoida se ja tehdä sille vertailumittauksia. Lisäksi MIKES tekee grafeenin tarkkuusmittauksia huoneenlämpötilassa kehitetyllä virtavertailijalla sekä projektissa kehitettyjen resistanssin kvanttinormaalien tarkkuusmittauksia kryogeenisissä lämpötiloissa.

Konsortio: PTB + MIKES, CMI, EJPD, LNE, NPL, SMU, SP, KRIS, LiU ja Chalmers

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Alexandre Satrapinski  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 431



Kuva 1. SiC-Graphene sample.



Kuva 2. Hall plateau, SiC-Graphene

# AIM QuTE AUTOMATISOITU METROLOGIA Kvanttinormaalien avulla IMPEDANSSI-

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Impedanssia käytetään suoraan passiivisten elektronisten komponenttien valmistuksessa ja epäsuorasti monissa sovelluksissa esimerkiksi resistanssin mittaamiseen perustuvassa lämpötilan määrittämisessä, sähkökemiallisessa impedanssispektroskopiassa, ionisoivan säteilyn dosimetriassa, ääni- ja värähtelyinstrumenteissa sekä kosketusnäytöissä.

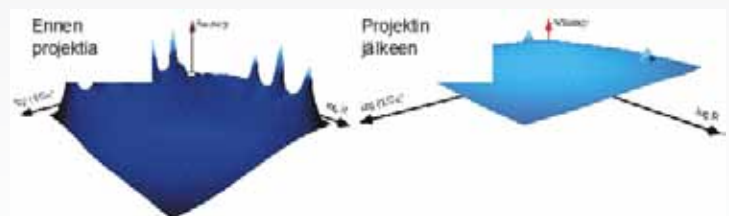
Sekä mittalaitteiden käyttäjät että valmistajat ovat todenneet mittaustarkkuuden parantamisen tarpeen. Tällä hetkellä pienimmät epävarmuudet impedanssin kalibroinneille ovat rajoittuneet tietyille ennalta määrättyille impedanssisuhteille ja vaihekulmille. Kalibroinnit tehdään vertaamalla tunnettuun impedanssiin muuntajiin perustuvilla koaksiaalisilla mittaussilloilla. Parhaimmillaan vertailu voidaan suorittaa 10–8 suhteellisella epävarmuudella rajoitetulla taajuualueella (500 Hz ... 5 kHz) tietyille yksittäisille impedanssiarvoille. Jokainen eri impedanssisuhteen mittaaminen vaatii oman muuntajansa. Kaikki nämä mittaukset tehdään yhdellä taajuudella ja siltat pitää aina erikseen kalibroida jokaiselle impedanssidekadille. Mittanormaallaboratoriot ylläpitävät useita erilaisia impedanssinormaaleja, jotta laaja impedanssialue saadaan katettua. Koaksiaaliset sillat on yleensä toteutettu joukolla kiinteitä ja säädettäviä muuntajia sekä induktiivisia jännitteenjakajia. Yritykset automatisoida näitä siltoja johtaa väistämättä suuriin epävarmuuksiin, niiden sisäisten rajoitusten vuoksi. Lisäksi siltojen tasapainottaminen kalibroinnissa vaatii koulutettua ja asiantuntevaa käyttäjää.

Projekti tähtää mittaustarkkuuden parantamiseen laajalla impedanssialueella kehittämällä Josephsonin ilmiöön perustuvia impedanssisilloja mielivaltaisten impedanssisuhteiden mittaamiseen mielivaltaisilla vaihekulmilla.

MIKES rakentaa uudentyyppisiä mittaussilloja käyttäen pulssituubikryojäähdyttimiä (pulse tube cryocooler) sekä kehittää digitaali-analogiamuuntimiin perustuvia tarkkuusjännitelähteitä.

Konsortio: PTB + MIKES, CEM, CMI, INRIM, LNE, METAS, MG, SP, Tescal, TUBITAK, esz AG, SUT ja UZG

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Jaani Nissilä  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 421





# ITOC KANSAINVÄLISET AIKA-ASTEIKOT OPTISILLA ATOMIKELLOILLA

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

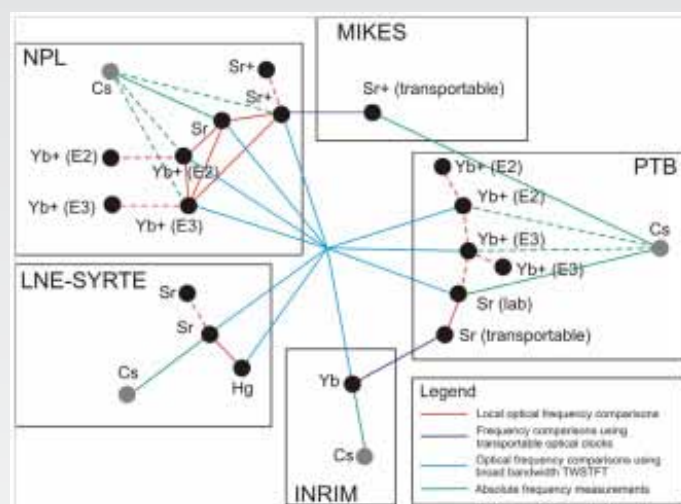
Nykyään SI-järjestelmän ajan yksikkö sekunti määritetään cesium 133-atomin perustilan ylihienorakenteen kahden energiatason mikroaaltosiirtymänä. Kehittyneimpien optisilla taajuuksilla toimivien kellojen tarkkuus ja stabiilius on jo yli kertaluokan parempi kuin mikroaaltoalueen primaarisilla cesiumatomikelloilla. Tämän seurauksena SI-sekunnin uudelleenmäärittys tulee perustumaan optisten transitioiden taajuuteen. Lähes kaikki tieto optisten kellojen toistettavuudesta tulee yksittäisten kellojen absoluuttitaajuusmittauksista eri laboratorioissa. Näitä kaikkia mittauksia rajoittaa siten vertailuna käytettyjen primäärinormaalien eli cesiumatomikellojen epävarmuus. Täten ennen sekunnin uudelleen määrittystä tarvitaan eri laboratorioissa ympäri Eurooppaa rakennettujen optisten kellojen keskinäistä laajamittaista vertailua, jotta kellojen todellinen suorituskyky ja luotettavuus saadaan selville.

Projektissa selvitetään optisten atomikellojen todellinen suorituskyky vertaamalla samassa metrologiainstituutissa kehitettyjä kelloja paikallisesti keskenään sekä eri instituuteissa rakennettuja kelloja käyttäen apuna kuljetettavaa optista atomikelloa sekä laajakaisaisia satelliittilinkkejä. Lisäksi mitataan optisten atomikellojen absoluuttitaajuuksia mahdollisimman pienellä epävarmuudella vertaamalla niitä maailman parhaimpiin primäärinormaaleihin eli cesiumatomisuihkukelloihin. Projektissa laaditaan vielä kaikki tarpeelliset relativistiset ilmiöt huomioonottava epävarmuuslaskelma kellojen vertailuun  $10^{-18}$  suhteellisella tarkkuudella.

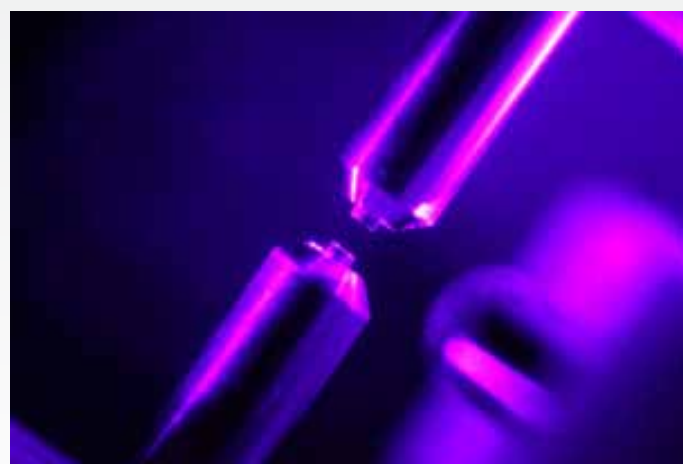
MIKES päätehtävä projektissa on kehittää ja rakentaa siirrettävä optinen atomikello, joka perustuu lasereiden avulla jäädytetyn ja radiotaajuusloukkuun vangitun yksittäisen strontium-ionin optiseen siirtymään. Lisäksi MIKES mittaa tämän kellon absoluuttitaajuuden käyttäen referenssinä jossain toisessa Euroopan maassa sijaitsevaa cesiumatomisuihkukelloa. Mittaus suoritetaan tarkkoja satelliittipohjaisia ajansiirtotekniikoita käyttäen.

Konsortio: NPL + MIKES, CMI, INRIM, LNE, OBSPARIS, PTB ja LUH

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Mikko Merimaa  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419



Kuva 1. Projektissa toteutettavaksi suunniteltu kellojen vertailuohjelma.



# NEWSTAR UUSIA PRIMAARI- NORMAALEJA JA JÄLJITETTÄVYYTTÄ RADIOMETRIAAN

## EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Tätä vuosisataa pidetään optiikan ja fotonikan vuosisatana. Optiikalla on johtava rooli monilla tärkeillä tekniikan aloilla ja sovelluksissa: informaatio- ja tietotekniikassa, valmistuksessa, terveydenhuollossa, biotieteissä, valaistuksessa, näytöissä, maapallon tilan seurannassa, kaukokartoituksessa, jne. Kaikilla näillä aloilla optiikan tarjoamat edut perustuvat siihen, että on olemassa ilmaisimia, jotka tehokkaasti havaitsevat valoa ja valon muutoksia.

Historiallisesti optisen tehon mittanormaalit on kehitetty hehkulamppujen mittauksiin. Uudet kiinteän olomuodon valolähteet kuten LEDit ovat tuoneet uusia haasteita optisen tehon mittauksiin ja jäljitettävyyteen. On ilmennyt tarve kehittää SI-järjestelmää ja sen foto- ja radiometrian yksiköiden jäljitettävyyttä ja välittämistä edelleen teollisuudelle. Tämä edellyttää huomattavaa tutkimuspanostusta foto- ja radiometrian perus- ja soveltavalle metrologialle.

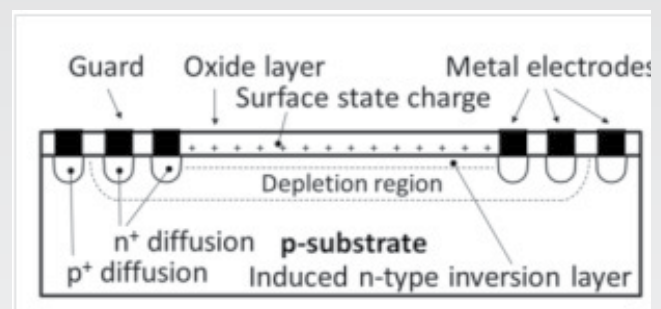
Monilla aloilla tavoitteena on ollut lisätä ilmaisimen herkkyyttä entisestään. Kuitenkin joillakin alueilla fyysiset rajoitteet ovat tulleet jo vastaan, jolloin mittaustehokkuuden parantamiseksi täytyy kehittää täysin uudentyypisten valoilmaisimia mittausherkeyden parantamiseksi. Lisäksi näiden ilmaisimien pitäisi mielellään olla helppokäyttöisiä, huoltovapaita ja SI-yksiköihin helposti jäljitettäviä.

Projekti keskittyy nykyisten radiometrian primäärinormaalien herkkyyttä ja mittauserävarmuutta rajoittavien tekijöiden poistamiseen kehittämällä uusia laitteita ja tekniikoita sekä toteuttamalla uusia käytännöllisiä primäärinormaaleja ja tarkempia radiometrian ja säteilylämpötilan kalibrointimenetelmiä.

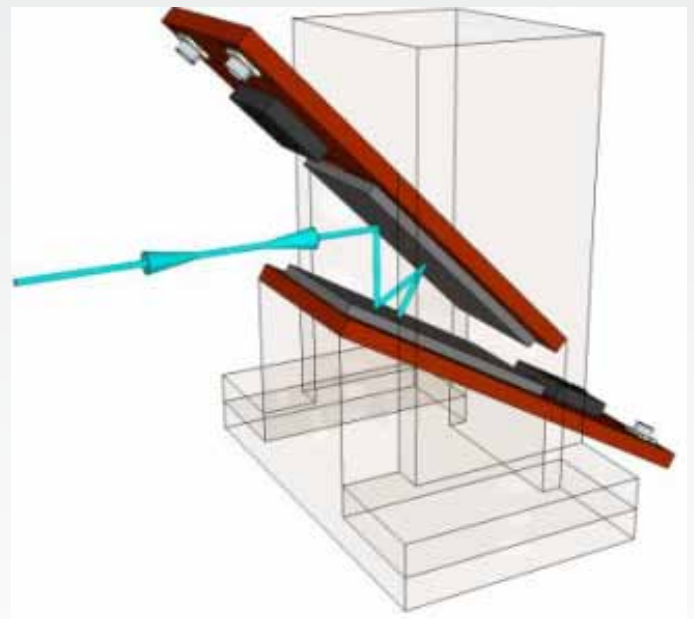
MIKESin päätehtävänä on suunnitella, rakentaa ja validoida uudentyypisiä ns. PQED-valoilmaisimia (Predictable Quantum Efficient Detector) primäärinormaaliksi absoluuttiradiometriaan. Tavoitteena on 1 ppm:n epävarmuus kryogeenisissä lämpötiloissa ja 100 ppm:n huoneenlämpötilassa.

Konsortio: INRIM + MIKES, CMI, CNAM, CSIC, JV, LNE, Metroser, MKEH, PTB, Fitecom, INMETRO, IRL, KRIS, TUT ja UiO

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Mikko Merimaa  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419



Kuva 1. Valodiodin poikkileikkaus.



Kuva 2. Valodiodit on järjestetty valoasiappaavaan geometriaan, jolloin heijastushäviöt minimoituvat.

# Angles

K U L M A -  
METROLOGIAA  
TEOLLISUUDELLE JA TUTKIMUKSELLE

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Monilla teollisuuden ja tieteen aloilla tarvitaan yhä tarkempaa kulman mittausskykyä ja kulmamittausten kehittämistarve ulottuukin kauas metrologiayhteisön ulkopuolelle. Kulmametrologia onkin mahdollistava tekniikka ja uusien huipputason kulmamittauslaitteiden ja -menetelmien kehittämisestä hyötyvät mm. tarkkuus-muodonmittaus (esim. synkrotronisuihkujen ohjausoptiikka) tarkkuuskonetekniikka (geometristen virheiden mittaus), teollisuussovellukset (auto- ja lentokonetekniikka, teollisuusrobotit, pitkien etäisyyksien tarkka mittaus, suurten tilavuuksien mittaus, valmistus -ja tuotantomenetelmät, jne.) sekä tieteellinen tutkimus (röntgensäteiden ohjausoptiikan kulma-aseointi). Vaatimukset mittaustarkkuuden parantamiseksi edellyttävät näissä sovelluksissa käytettävien kulma-anturien tarkkuuden ja kalibroinnin kehittämistä.

Tämän projektin tavoitteena on varmistaa kulman SI-yksikön radiaanin käytännön realisointi ja siirtäminen eri tarkkuusvaatimusten omaaville mittaauksille teollisista sovelluksista aina korkeatasoiseen tieteelliseen tutkimukseen kehittämällä kulmamittalaitteita ja niiden kalibrointitekniikoita. Erityisesti tavoitteena on kehittää autokollimaattoreita ja niihin pohjautuvia kulman mittausten menetelmiä erittäin haasteellisiin mittaolosuhteisiin, kulma-antureita erilaisilla lukupäillä ja näiden antureiden uusia kalibrointitekniikoita, pienten kulmien generaattoreita alle nanoradiaanin herkkyydellä sekä tarkkoja, kuljetettavia ja edullisia pienten kulmien generaattoreita autokollimaattoreiden paikan päällä tapahtuvaan kalibrointiin.

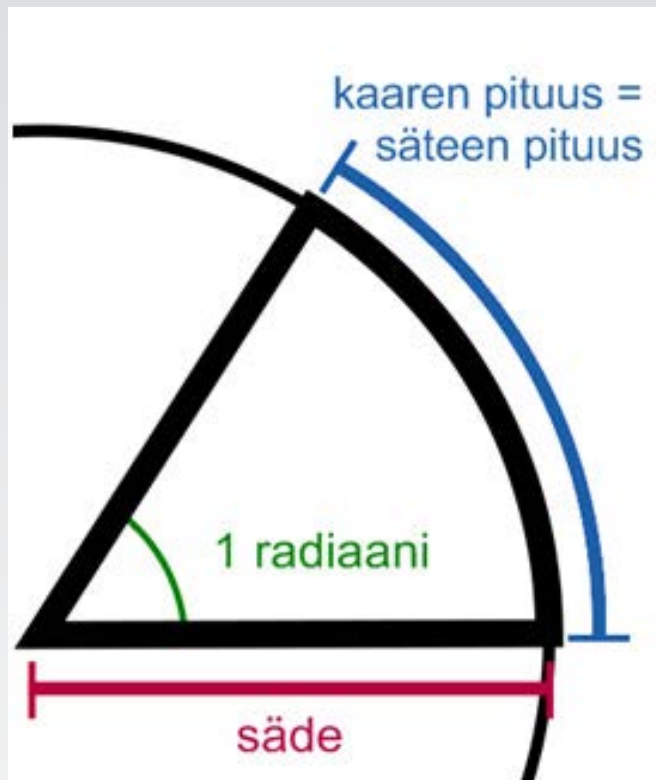
MIKESin pääasiallisena tehtävänä projektissa on autokollimaattoreiden suorituskyvyn parantaminen sekä erityisesti interferometrisen kaksiakselisen kalibrointimenetelmän kehittäminen autokollimaattoreille.

Konsortio: TUBITAK + MIKES, CEM, CMI, INRIM, IPQ, LNE, MG, PTB, SMD, AIST, FAGOR AUTOMATION, IK4-TEKNIKER, KRISS, MWO ja HZB

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Ilkka Palosuo

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 424





# Q-Wave K V A N T T I - N O R M A A L I NÄYTTEISTÄVILLE SÄHKÖISILLE MITTAUKSILLE

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Digitaalinen metrologiaa tarvitaan, koska mittauksissa yhä enenemässä määrin käytetään näytteistäviä instrumentteja ja antureita, joissa mitattava signaali muutetaan analogisesta digitaalisiksi. Esimerkkeinä mainittakoon dynaamiset mittaukset, joissa anturin sähköiset signaalit ensin digitoidaan ja sitten prosessoidaan digitaalisia algoritmeja käyttäen palauttamaan mitatut parametrit sekä harmonisia sisältävän sähköisen tehon mittaukset, joissa signaalinkäsittelyn avulla saadaan selville mitattu sähköteho.

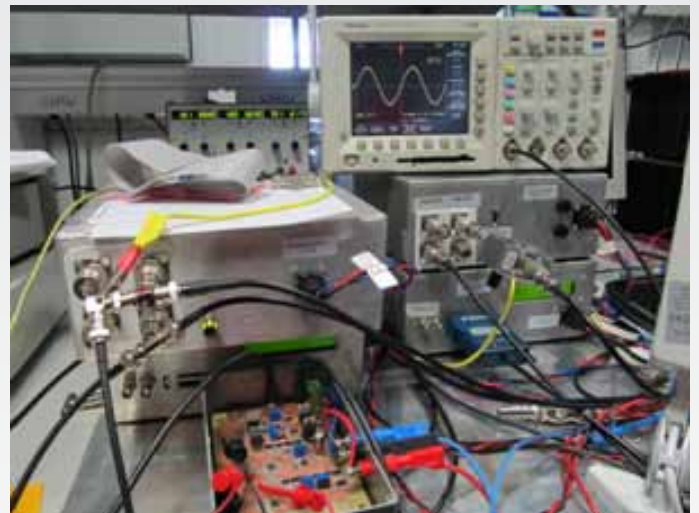
Integroitujen piirien ja mittauslaitteiden viimeaikainen kehitys on johtanut hyppäksenomaiseen muutokseen näytteenottonopeudessa ja saavutettavissa olevassa tarkkuudessa. Erityisesti puolijohdeteollisuuden nopea kehitys on aikaansaanut yhä suuremman näytteenottonopeuden omaavia ja tarkempia analogia-digitaalimuuntimia (ADC) sekä digitaal-analogiamuuntimia (DAC). Nykyiset mittausmenetelmät eivät kuitenkaan sovellu ei-stationaaristen ja vaihtelevien aaltomuotojen (AC) jäljittämiseen jännitteen SI-yksikkö volttiin, koska ne perustuvat tasa- (DC) ja vaihtovirran (AC) vastaavuuteen termisen siirtonormaan välityksellä ja siten pitävät näitä erillisinä suureina. Toisin kuin AC-mittaukset DC-mittaukset ovat jo vuosia perustuneet kvantti-ilmiöihin. Lisäksi termisiin siirtomenetelmiin pohjautuvat AC-mittaukset ottavat huomioon vain yhden taajuuden aaltomuodot, jolloin aaltojen harmoniset ja vaihe jäävät huomiotta.

Josephsonin ilmiöön perustuvat kvanttijännitteenormaalit takaavat tasajännitteiden ja pienten vaihtojännitteiden jäljitettävyyden. Projektin tavoitteena on taata suora ja tehokas jäljitettävyyden SI-volttiin aina 10 MHz:n taajuuteen asti toimiville AD- ja DA-muuntimille mielivaltaisille aaltomuodoille. Erityisesti toteutetaan Josephsonin ilmiöön perustuva mittausjärjestelmä analogia-digitaalimuuntimien dynaamiseen kalibrointiin sekä kehitetään jäljitettävyyden välitysmenetelmiä ja parannetaan digitaalisia signaalinkäsittelymenetelmiä ja tutkitaan niiden vaikutusta mittausepävarmuuteen.

MIKES kehittää projektissa digitaal-analogiamuuntimiin perustuvia tarkkuusjännitelähteitä käytännöllisiksi siirtonormaleiksi 50 kHz:n taajuuksille asti sekä kehittää neste-elohopeareleisiin perustuvan jännitteen askel-generaattorin.

Konsortio: PTB + MIKES, CEM, CMI, INRIM, JV, ME-TAS, NPL, SIQ, SP, TUBITAK ja VSL

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Jaani Nissilä  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 421



# Surveying

## PITKIEN ETÄISYYKSIEN MITTAUS

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Monilla tieteen ja tekniikan aloilla tarvitaan pitkien etäisyyksien mittauksia pienemmillä epävarmuuksilla, mihin nykyisin käytössä olevat menetelmät kykenevät. Esimerkiksi maanmittauksessa ja geotieteissä on usein tarve mitata etäisyyksiä sadoista metreistä aina kilometreihin asti alle millimetrin tarkkuudella. Tähän tarkoitukseen käytetään yleisesti kahta eri mittaustekniikkaa: optiseen etäisyydenmittaukseen perustuvaa ja satelliittisignaalien vastaanottamiseen ja analysointiin perustuvaa. Kumpikaan näistä menetelmistä ei tällä hetkellä kuitenkaan ole jäljitettävissä millimetrin epävarmuudella pituuden SI-yksikkö metriin näillä pitkillä etäisyyksillä. Optisten etäisyyksimittauksien tarkkuutta rajoittaa se, että ilman taitekerrointa ei tunneta riittävällä tarkkuudella koko mittaustavalla. Satelliittipohjaisten menetelmien tarkkuutta puolestaan rajoittaa useat eri tekijät.

Tarkkoja pitkien etäisyyksien mittauksia tarvitaan erityisesti mittaustavkoissa, joita Euroopassa käytetään monissa kriittisissä kohteissa havainnoimaan maaperän paikallista stabiiliutta. Tavoitteena on ennakoita mahdollisten maanvyyrymien, vajoamien sekä maankuoren pienten liikkeiden aiheuttamia riskejä väestölle ja teollisuuslaitoksille. Tällaiset mittaustavkostot sijoitetaan yleensä entisten kaivosten sekä asutettujen vuoristojen alueille mutta myös ydinvoimaloiden ja ydinjätteiden loppusijoituspaikkojen ympäristöön. Vain millimetrin kymmenesosien suuruiset maan liikkeen muutokset pitäisi kyetä havaitsemaan. Lisäksi tietoja täytyisi voida kerätä ja keskiarvoistaa useiden vuosien yli.

Projektin tavoitteena on yhdistää metrologien, maanmittaajien sekä geotieteilijöiden osaaminen pitkien etäisyyksien metrologian parantamiseksi kehittämällä uusia menetelmiä ja laitteita parantamaan jäljitettävyyttä ja pienentämään epävarmuutta. Erityisesti projektissa kehitetään menetelmiä ilman taitekerrointen määrittämiseen ja kompensointiin koko säteen kulkumatkalta optisessa etäisyyden mittauksessa aina kilometrin etäisyyksiin asti. Laaditaan satelliittipohjaisille etäisyyksimittauksille epävarmuusmalleja, joiden avulla mittausten epävarmuutta saadaan pienennettyä aina millimetriin. Kehitetään femtosekuntilasereihin perustuvia interferometrisia menetelmiä etäisyyksimittauksiin.

MIKESin pääasiallisena tehtävänä projektissa on kehittää spektroskooppista mittaustekniikkaa ilman keskimääräisen lämpötilan määrittämiseen pitkillä etäisyyksillä. Tätä lämpötilaa tarvitaan ilman taitekerrointen määrittämiseen koko mittaustavalla. Referenssinä käytettiin Geodeettisen laitoksen Nummelan 864 m perusviivaa, jolla hyvissä olosuhteissa 0,1 mm mittaustekniikka on saavutettavissa.

Konsortio: PTB + MIKES, CNAM, FGI, INRIM, IPQ, NSCIM, SP, VSL, LUH, TUBS ja UBO

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Mikko Merimaa  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419







# Force

## JÄLJITETTÄVYYS SUURILLE VOIMILLE

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Koneenrakennuksessa, ilmailuteollisuudessa, energia-teollisuudessa, rakennusteollisuudessa, turvateknika-ssa ja testauksessa mitataan yleisesti voimia, joiden nimellisuuruus on yli 15 MN. Voimanmittauslaitteiden normaali käyttö voi poiketa oleellisesti niiden kalibroinnista. Pääsialliset syyt tähän ovat erilaiset kiinnitysolosuhteet, erilainen voimanvälitys, kuormituksen jaksoitus ja kuormituksen ajoitus. Sopivien vertailunormaalien jäljitettävät kalibroinnit parantaisivat oleellisesti suurten voimien mittausta teollisuussovelluksissa. Jotta voimanmittauksen epävarmuutta käytännön sovelluksissa voitaisiin parantaa, täytyy todellisten kuormitusmenetelmiin liittyvät häiriötekijät ja niihin liittyvät voimakomponentit ottaa oikein huomioon. Lisäksi teollisuudessa esiintyy yhä voimakkaampi tarve laajentaa jäljitettävien voimamittausten aluetta nykyisestä alle 15 NM nimellisvoimien mittauksista suuremmille voimille; aina 30 MN:iin asti ja lähitulevaisuudessa jopa 50 MN:iin.

Projektissa kehitetään uusia SI-yksiköihin jäljitettäviä vertailunormaaleja suurille voimille, 1 MN ... 30 MN (50 MN), tutkitaan erilaisten kuormitusolosuhteiden ja häiriötekijöiden vaikutusta mittauksiin sekä kehitetään nämä ilmiöt huomioonottavia malleja epävarmuuslaskentaan, kun laitteita käytetään normaalissa teollisuusympäristössä. Tavoitearvona epävarmuuksille on 0.002 % alle 2 MN:n voimille, 0.01 % 15 MN:iin asti, ja 0.05 % 30 MN:iin. Lisäksi laaditaan toimintaohjeita ja teknisiä oppaita suurten voimien kalibrointiin ja mittauksiin, jotta voiman jäljitettävyys saataisiin paremmin todennettua SI-yksiköistä kalibrointipalveluihin ja testauslaboratorioihin.

MIKES tutkii ja kehittää uusia kalibrointimenetelmiä voima-anturien mekaanisten välitysosien käyttäytymistä ja niistä aiheutuvien, mittaukseen vaikuttavien erisuuntaisten voimien ja taivutusmomenttien vaikutuksia "build up" järjestelmissä. Tarkoituksena on selvittää mittaukseen käytetyn ajan ja kuormittavan voiman suhdetta, jotta ymmärretään paremmin ajan ja kuormituksen välinen suhde erityyppisissä voimaantureissa. Mittausaika kalibroinnin ja käytännössä tapahtuvan mittauksen välillä vaihtelee suuresti. Tämä saattaa aiheuttaa merkitseviä mittausvirheitä ja tästä syystä teollisissa mittauksissa näiden vaikutusten tutkiminen ja virheiden vähentäminen on jäljitettävyyden kannalta olennaista. Tavoite on vähentää mittause-

pävarmuutta ja lisätä mittausten luotettavuutta ottamalla huomioon edellä mainitut tekijät.

Konsortio: PTB + MIKES, BAM, CEM, CMI, INRIM, LNE, METAS, MG, NPL ja TUBITAK

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Petri Koponen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 453



# M E T e f n e t

## MATERIAALIEN KOSTEUSMITTAUKSET

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2013 - 2016

Monien kiinteiden materiaalien valmistusominaisuudet riippuvat merkittävästi niiden sisältämästä kosteudesta. Tällaisia ovat mm. lääkeaineet, hiilikuitukomposiitit, polymeerit, ruokajauheet, selluloosapohjainen aktiivinen paperi ja biomassa. Kosteuden määrittämisen ja kontrolloinnin virheet teollisissa prosesseissa johtavat alentuneeseen prosessin läpimenoahtiin, aiheuttavat raaka-aineiden haaskausta, lyhentävät biomateriaalien kestävyttä, lisäävät kuivatuksen energiantuhlausta sekä lisäävät pienhiukkaspäästöjä biomassan poltossa. Jopa 70 % kaikesta valmistusteollisuudesta käyttää kuivatusta veden tai muun liuottimen poistoon tuotteistaan. Kuitenkin suoria kosteusmittauksia käytetään hyvin vähän kuivatusprosessien säätöparametreina mittausten epäluotettavuuden ja jäljitettävyyden puutteen vuoksi. Luotettavat kiinteiden aineiden suorat kosteusmittaukset ovat hyvin haasteellisia ja sisältävät vielä useita ratkaisemattomia ongelmia.

METefnet-projektin päätavoitteena on luoda edellytykset todelliselle SI-jäljitettävyydelle teollisuuden kosteusmittauksissa. Materiaalin kosteuden määrittämää mittaussuureena täsmennetään nykyisin laajasti käytössä olevan määrittelyn monikäsitteisyyden poistamiseksi. Tätä varten tarvitaan laajaa tutkimusta erilaisilla menetelmillä ja materiaaleilla. Käytännön edellytykset jäljitettävyydelle luodaan kehittämällä uusia tarkoituksenmukaisia ja tehokkaita menetelmiä SI-yksiköiden toteuttamiseen ja välittämiseen kalibrointien ja referenssimateriaalien kautta. Samalla luodaan metrologinen infrastruktuuri materiaalien kosteusmittauksille. Projektissa kehitetään mm. uusia primaarinormaaleja veden massaosuudelle, jäljitettäviä referenssimateriaaleja, siirtonormaaleja, kalibrointimenetelmä pintakosteusmittareille, menetelmiä kvantifioida näytteen kuljetuksen ja käsittelyn vaikutus mittauserävarmuuteen sekä käytännöllisiä epävarmuuden määrittämenetelmiä valikoiduille teollisuuden sovelluksille.

MIKES kehittää referenssijärjestelmän kosteuden määrittämiseksi SI-jäljitettävästi biomassasta ja puupohjaisten materiaalinäytteistä (näytekooko 5 g – 400 g). Lisäksi MIKES tutkii näytteen käsittelyssä ja kulje-

tuksessa vallitsevien erilaisten olosuhteiden ja pakkausmenetelmien vaikutusta kokonaisepävarmuuteen prosessoidun puun ja biomateriaalien osalta.

Konsortio: MIKES + BRML, CETIAT, CMI, DTI, INRIM, NPL, TUBITAK, UL, UT ja UNICLAM

Lisätietoja:

Projektikoordinaattori Martti Heinonen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 402





# InK UUDEN KELVININ TOTEUTTAMINEN

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2012 – 2015

Lämpötilametrologiassa on tapahtumassa suuria muutoksia tulevina vuosina. Lämpötilan yksikkö kelvin tullaan määrittelemään jatkossa Boltzmannin vakioon pohjautuen veden kolmoispuheen sijaan. Tämä muutos avaa mahdollisuuksia kehittää lämpötilan mittaamisen käytäntöjä ja samalla parantaa mittaamisen tarkkuutta erityisesti hyvin matalissa ( $< -272\text{ °C}$ ) ja toisaalta hyvin korkeissa ( $> 1000\text{ °C}$ ) lämpötiloissa.

InK-projektissa kehitetään useita primäärisiä menetelmiä termodynaamisen lämpötilan määrittämiseen. Eri menetelmiä tullaan vertaamaan toisiinsa niiden käyttökelpoisuuden ja luotettavuuden tutkimiseksi. Samalla kerätään entistä tarkempaa tietoa siitä, kuinka tarkasti ja millaisella epävarmuudella maailmanlaajuisesti käytössä olevat lämpötila-asteikot ITS-90 ja PLTS-2000 vastaavat termodynaamista lämpötilaa.

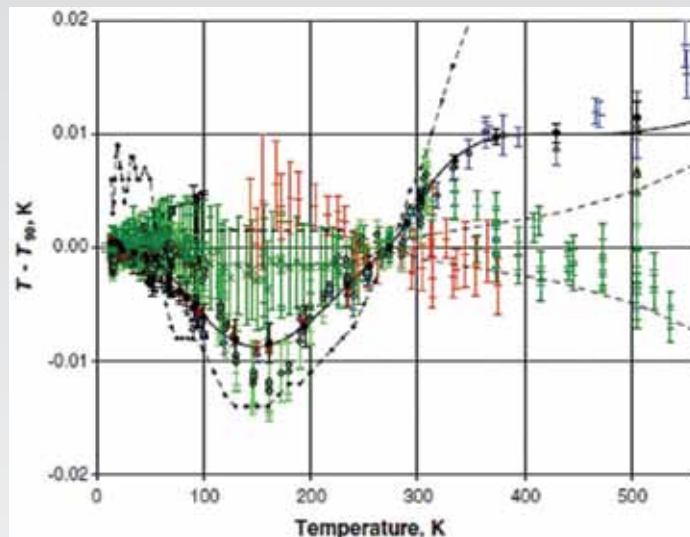
MIKESin tehtävänä InK-projektissa on kehittää ja testata Coulombin saartoon ja yksielektroni-ilmiöihin perustuvia primäärisiä CBT-antureita (Coulomb Blockade Thermometer) matalien lämpötilojen jäljitettävään mittaamiseen. Tavoitteena on parantaa CBT-antureiden mittaustarkkuutta erityisesti lämpötila-alueella  $10\text{ mK} - 1\text{ K}$ , jossa anturien epäideaalisuudet, heikko termalisoituminen mitattavaan kohteeseen sekä mittaussympäristön aiheuttama kohina heikentävät mittausten luotettavuutta. Lisäksi MIKES osallistuu projektin puitteissa kansainväliseen korkeiden lämpötilojen säteilylämpötilavertailuun, jonka tuloksia tullaan hyödyntämään termodynaamisen lämpötilan toteutusmenetelmien kehittämisessä yli  $1000\text{ °C}$  lämpötiloissa.

Konsortio: NPL + MIKES, CEM, CNAM, CSIC, INRIM, LNE, PTB, TUBITAK, DIISR, NIM, UVa, VNIIOFI, RHUL

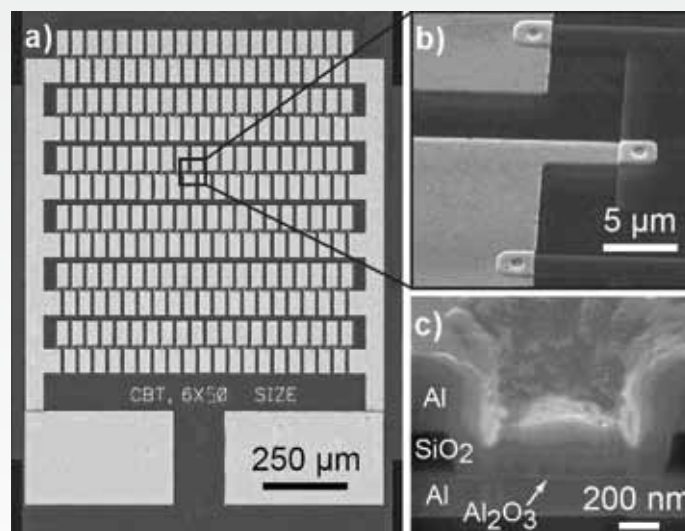
Lisätietoja:

Projektipäällikkö Ossi Hahtela

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 443



Kuva 1. Termodynaamisen lämpötilan,  $T$ , ja kansainvälisen lämpötila-asteikon (ITS-90) mukaisen lämpötilan,  $T_{90}$ , välinen vastaavuus halutaan selvittää aiempaa tarkemmin. Eri värit kuvaavat tuloksia eri tutkimuksista.



Kuva 2. CBT-anturilla voidaan mitata primäärisesti matalia lämpötiloja ( $10\text{ mK} - 70\text{ K}$ ).



# NeatTF TARKKA AJAN JA TAAJUUDEN VERTAILU JA VÄLITTÄMINEN OPTISISSA TIETOLIIKENNEVERKOISSA

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2012 – 2015

Optisten kellojen taajuuden suhteellinen epävarmuus on suuruusluokkaa  $10^{-17}$  ja ne päihittävät cesium-atomikellot sekä tarkkuudessa että stabiiliudessa. Erinomainen suorituskyky tekee optisista kelloista paitsi ihanteellisen välineen fysiikan lakien testeihin, myös ehdokkaan SI-sekunnin uudelleenmäärittelyyn.

Kellojen perinteisen satelliittipohjaisen vertailumenetelmän epävarmuus ei kuitenkaan riitä optisten kellojen vertailuun. NeatTF-projektin tavoitteena onkin luoda perusta uusille ajan ja taajuuden välitysmenetelmille käyttäen olemassa olevaa optisen tietoliikenteen kuituinfrastruktuuria.

NeatTF-projektissa kehitetään uusia tekniikoita optisten kellojen vaihekoherenttiin vertailuun 1500 km etäisyyksiin asti. Tavoitteen saavuttamiseksi projektissa selvitetään optisten referenssitaajuuksien siirrossa saavutettavan stabiiliuden ja tarkkuuden rajat käytettäessä optisia verkkoja. Pyrkimyksenä on pienentää siir-

tolinkin suhteellinen epävarmuus taajuuden vertailussa merkittävästi kellojen epävarmuutta alhaisemmaksi.

Optisten taajuuksien vertailun ohella hankkeessa tutkitaan uusia tekniikoita ajan siirtoon ja vertailuun optisia tietoliikenneverkkoja käyttäen. Tavoitteena on kehittää järjestelmä, jossa ajoitusignaalin epävarmuus saadaan pienemmäksi kuin tällä hetkellä on mahdollista saavuttaa GPS-vastaanottimien avulla.

MIKES tutkii hankkeessa tarkkaa ajan siirtoa ja ajan siirron epävarmuuden rajoituksia kuituverkossa yhteistyössä SP:n kanssa.

Konsortio: PTB + MIKES, BEV/PTP, INRIM, NPL, OBSPARIS, SP, UFE, VSL, CESNET

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Mikko Merimaa

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419



Kuva: Harald Schnatz, PTB

# IonClock

ERITTÄIN  
TARKAT  
OPTISET IONIKELLOT

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2012 – 2015

Atomikellot muodostavat perustan kansainvälisen ajan ylläpidolle ja niitä käytetään laajasti myös navigoinnissa, viestinnässä ja tietoverkkojen hallinnassa. Aikayksikön toteutuksella on keskeinen asema SI-mittayksikköjärjestelmässä, johtuen sen vertaansa vailla olevasta tarkkuudesta sekä sen käytöstä muiden mittayksiköiden, kuten metrin ja sähkösuureiden, toteutuksessa. Kehittyneimmät optiset kellot ovat nyt saavuttaneet toistettavuuden, joka on yli kertaluokkaa primäärisiä cesiumatomikelloja parempi.

IonClock-projektissa kehitetään erittäin tarkkoja laserjähdytettyihin ja loukutettuihin ioneihin perustuvia optisia kelloja. Yhdistelmä laserjähdytyksestä ja ioniloukusta tarjoaa ihanteellisen spektroskopisen järjestelmän, joka sallii atomin lähes häiriöttömien taajuuksien havainnoimisen ja erittäin tarkkojen atomikellojen kehittämisen.

IonClock-projekti tähtää optisten ionikellojen toiminnan parantamiseen kehittämällä systemaattisesti suorituskyvyn avaintekijöitä. Projektissa kehitetään mm. usean ionin loukkuarkkitehtuureja, jotta signaalikohina-suhdetta ja sitä kautta kellon stabiiliutta voitaisiin parantaa. Kellolaserin lyhyen aikavälin stabiiliuden parantaminen puolestaan johtaa sen viivanleveyyden kapenemiseen joka, paitsi parantaa kellon vakautta, sallii pienten systemaattisten taajuusmuutosten herkemman karakterisoinnin. Tutkittavista systemaattisista epävarmuustekijöistä tärkeimmät aiheutuvat sähkö- ja magneettikenttien vuorovaikutuksesta ionien kanssa, sisältäen mustan kappaleen säteilyn. Hankkeessa pyritään myös parantamaan ionikellojen toiminnan luotettavuutta parantamalla komponenttien ja osajärjestelmien toimintaa.



Kuva 1. MIKESin ioniloukku.

Konsortio: PTB + MIKES, NPL ja CMI.

REG: Aalto University, Laser Zentrum Hannover e.V., University of Siegen

Collaborators: BIPM Time Department, ESA ESTEC, QUEST, Clarendon Laboratory at Oxford University, Institute for National Measurement Standards in Canada, Institute of Laser Physics of the Russian Academy of Sciences.

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Mikko Merimaa

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419

# NewKILO KILOGRAMMAN U U D E N MÄÄRITELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2012 – 2015

Kilogramman määritelmä tullaan todennäköisesti uusiin vuonna 2014. Uusi määritelmä tulee perustumaan Planckin vakioon, jonka arvo kiinnitetään. Tällöin kilogramma realisoidaan joko wattivaa'an tai piiatomin massan avulla. Wattivaa'assa punnuksesta aiheutuvaa gravitaatiovoimaa verrataan kelan ja magneettikentän avulla generoituun sähköiseen voimaan. Piiatomin massa määritetään puhtaasta, isotooppirikastetusta piikiteestä valmistetusta pallosta, jonka massa, tilavuus, yksikkökopin koko ja isotooppikoostumus tunnetaan. Molemmissa toteuttamistavoissa massa määritetään tyhjöissä.

Uusi kilogramma realisoidaan joko wattivaa'an tai piipallon avulla. Niistä kilogramma pitää siirtää muihin punnusnormaaleihin. Tähän siirtoon ja eri realisointien vertailuun liittyy useita ongelmia. NewKILO projektissa pyritään yhdistämään eri realisoinneista saadut tulokset sekä minimoimaan siirroista ja säilytyksestä aiheutuvat epävarmuudet. Projektissa kartoitetaan eri punnusmateriaaleja ja erityisesti niiden soveltuvuutta käytettäväksi wattivaa'assa. Suuri osa projektista on pintatutkimusta eri punnusmateriaaleilla. Erityisesti tutkitaan punnusten stabiiliutta kun punnuksia siirretään ilmasta tyhjööön ja takaisin, lisäksi tutkitaan stabiiliutta kun punnuksia säilytetään eri ympäristöissä. Lisäksi projektissa pyritään löytämään parhaimmat puhdistusmenetelmät. Yhtenä tavoitteena on korvata platina-iridium prototyyppien nykyinen "nettoyage-lavage" puhdistusmenetelmä vähemmän puhdistajasta riippuvalla menetelmällä. Projektin kuuluu myös siirroista, säilytyksestä ja uuden määritelmän mukaisesta kilogramman realisoinnista aiheutuvien epävarmuuksien määrittäminen.

MIKESin osuutena on uusien materiaalien pintatutkimus, punnusnäytteiden tyhjö - ilma siirroista ja puhdistuksesta aiheutuvien pinta/massa muutosten tutkiminen sekä osallistuminen tyhjöpunnitustutkimukseen. Tärkeimpinä tutkimusvälineinä tulevat olemaan AFM, uv-puhdistuslaitteisto, vaa'at, QCM, SEM ja plasmapuhdistuslaitteisto.

Konsortio: NPL + MIKES, CEM, CMI, CNAM-LCM, DFM, EJPD-METAS, MGRT-MIRS, PTB, SMU, TUBITAK-UME, INRIM, NRC

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Kari Riski

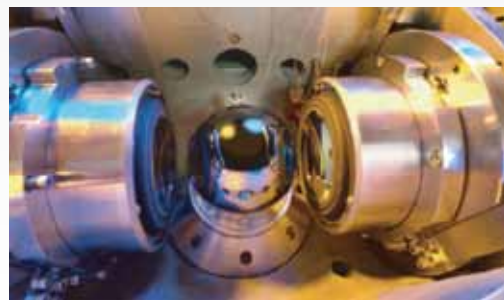
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 429



Kuva 1. Kilogramman prototyyppi.



Kuva 2. NPL Mark II wattivaa'ka (Ref. Metrologia 49, 113, 2012).



Kuva 3. Piipallo PTB:n Fizeau interferometrissä (Ref. Eur. Phys. J. Special Topics 172, 343, 2009).



# Qu-ampere

## KVANTTI-AMPEERI: UUDEN SI-AMPEERIN TOTEUTTAMINEN

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2012 – 2015

Sähkömetrologien pitkäaikainen haave eli ampeerin määrittelemisen elektronin varaukselle sovittavan vakioarvon avulla on toteutumassa, kun SI-järjestelmää uudistetaan lähivuosina. Tämä tuo kvanttinormaalien avulla toteutettavat sähkösuureiden mittayksiköt virallisten SI-määritelmien mukaisiksi. Jännitteen ja resistanssin kvanttinormaalit ovat olleet rutiinikäytössä jo pitkään, mutta sähkövirran kvanttinormaali on vielä tutkimuksen ja kehityksen kohteena. Qu-ampere-projektin tavoitteena on yksittäisten elektronien kontrolloituun pumppaukseen perustuvan sähkövirran kvanttinormaalien kehittäminen sellaiselle tasolle, jota tarvitaan uuden määritelmän mukaisen ampeerin toteuttamisessa.

Qu-ampere-projektissa kehitetään kolmea erilaista vaihtoehtoa yli 100 pA:n virran tuottamiseen elektroneja pumppaamalla alle 0,1 miljoonasosan suhteellisella epävarmuustasolla. Vuosina 2008 – 2011 toteutetussa REUNIAM-projektissa lupaavimmiksi osoittautuneiden kvanttivirtalähteiden, GaAs-puolijohdepumpun ja Suomessa keksityn SINIS-portin, lisäksi kolmantena vaihtoehtona kehitetään piipohjaiseen SOI-CMOS-nanorakenteeseen perustuvaa ratkaisua. Tärkeä osa työstä on elektronien siirrossa tapahtuvien virheiden havaitseminen ja niiden vaikutuksen eliminointi lopputuloksesta. Projektissa kehitetään myös ratkaisuja, joilla kvanttinormaalien tuottama virta voidaan vahvistaa riittävällä tarkkuudella ainakin 10 000 -kertaiseksi, noin mikroampeerin tasolle.

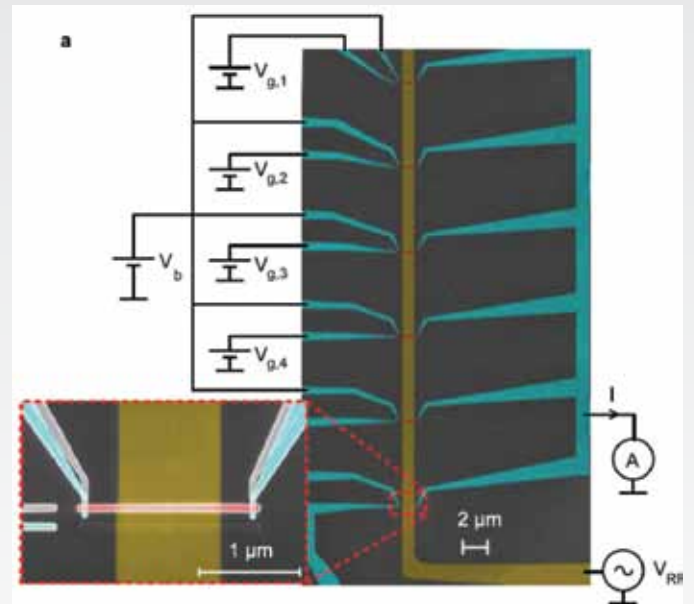
MIKESin osuutena Qu-ampere-projektissa on suprajohdeesta ja normaalimetallista valmistetun nanoelektronisen SINIS-portin tuottaman virran nostaminen 100 pA:n tasolle kytkemällä komponentteja rinnakkain pumppauksen tarkkuuden kärsimättä. Kymmenen rinnankytketyn SINIS-portin toiminta on jo pystytty osoittamaan käytännössä, mutta haasteena on alle 0,1 miljoonasosan suhteellisen epävarmuuden saavuttaminen. Se edellyttää esimerkiksi elektronien siirrossa tapahtuvien virheiden havaitsemista yhden elektronin tarkkuudella. Suomessa tutkimukseen osallistuu läheisessä yhteistyössä myös Aalto-yliopiston O.V. Lounasmaa -laboratorio.

Konsortio: PTB + MIKES, LNE, NPL, CEA, UCAM

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Antti Manninen

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 416



Kuva 1. Kuudesta rinnankytketystä SINIS-portista muodostuva kvanttivirtalähde.

# SubnanoPITUUS - MITTAUSTEN JÄLJITETTÄVYYS PIKOMETRITASOLLE

EMRP SI-JÄRJESTELMÄ 2012 – 2015

Modernit tarkimmat pituusmittaukset hyödyntävät laserinterferometriä. Laserinterferometriassa mittausten jäljitettävyys tulee laservalon taajuuden eli tyhjiöaallonpituuden kautta. Käytännön mittauksissa laservalon aaltorintama on aina kaareva ja tarkimmissa mittauksissa tämä kaarevuus olisi pystyttävä määrittelemään ja korjaamaan. Toinen yleisesti käytetty pienten etäisyyksien mittaamenetelmä on kapasitiivinen etäisyysmittaus.

Hankkeessa parannetaan interferometrinen ja kapasitiivisten mittausten tarkkuutta ja jäljitettävyttä. Erityisesti interferometrisiä mittauksia varten kehitetään menetelmä aaltorintaman virheiden ja kaarevuuden mittaamiseen. Erityyppisille interferometreille ja kapa-

sitiivisille etäisyysmittareille suoritetaan validointi vertailemalla.

MIKES osallistuu kaksisuuntaisen mittapalainterferometriian kehittämiseen ja tarvittavien korjausten karakterisointimenetelmien kehittämiseen.

Konsortio: PTB + MIKES, CMI, NPL, TUBITAK, VSL, INRIM, REGS: Technische Universiteit Delft, Università di Torino

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Antti Lassila

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 413



## Avogadro project

Interferometric measurement of sphere diameter



## Watt balance



Interferometric Position, velocity and acceleration measurements

$\lambda = c / f$   
only valid for plane waves;  
high accuracy demands  
consideration of  
wavefront curvature!

# MechProNO NANO-KOMPO- NENTTIEN MEKAANISET OMINAISUUDET

EMRP UUDET TEKNOLOGIAT 2012 – 2015

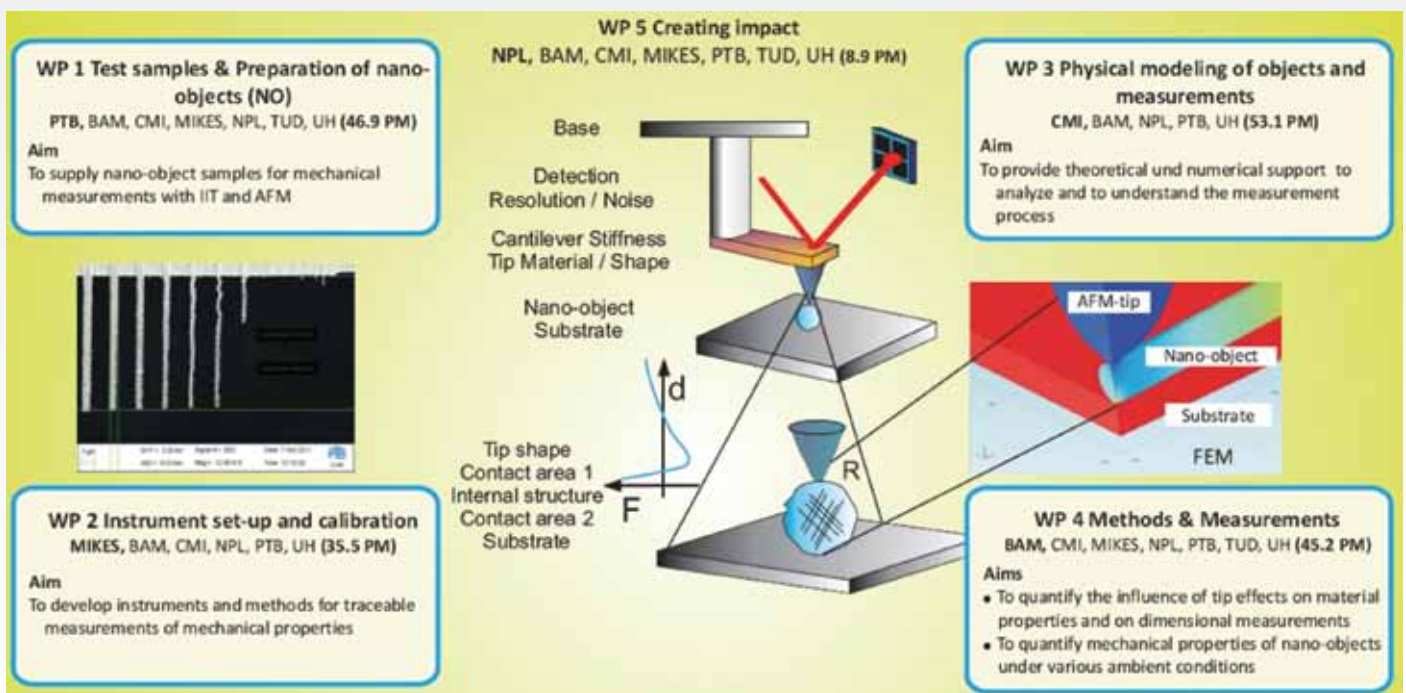
Nanoteknologiassa hyödynnetään uusia ominaisuuksiltaan ennen kokemattomia nanorakenteita uudentyyppisiin tarkoituksiin ja pyritään optimoimaan niiden ominaisuudet. Nanorakenteiden mekaanisten ominaisuuksien tarkka ja jäljitettävä mittaaminen on edellytys tutkimukselle ja tuotekehitykselle.

Hankkeessa kehitetään menetelmiä nanopartikkelien, -lankojen ja -rakenteiden sekä nanokomposiittien mekaanisten ominaisuuksien jäljitettävään mittaamiseen. Tavoite vaatii mm. testirakenteiden valmistusta eri materiaaleista, AFM-kärkien jäykkyyden jäljitettävän mittauksen kehittämistä, nanorakenteiden geometristen ominaisuuksien karakterisointitekniikoiden kehittämistä, molekyylitason mallinnusta nanorakenteiden ominaisuuksista.

MIKES keskittyy kehittämään jäljitettäviä nanolankojen mekaanisten ominaisuuksien mittausta ja ilman kosteuden vaikutuksen tutkimiseen AFM-mittauksissa.

Konsortio: PTB + MIKES, BAM, CMI, NPL,  
REGs: TUD, UH

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Antti Lassila  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 413





# MetNEMS

## NEMS - METROLOGIA

EMRP UUDET TEKNOLOGIAT 2012 – 2015

Nanoelektromekaaniset järjestelmät (NEMS) muodostavat teknologian, joka todennäköisesti mullistaa käsityksemme teknologian mahdollisuuksista. Kuten mikropiirien jatkuva kutistaminen on johtanut elektroniikan nopeaa kehitystä, tuo nanoelektromekaanisten järjestelmien kutistaminen nanomittakaavaan uusia mahdollisuuksia tietojenkäsittelystä fyysikaalisiin sensoreihin ja biologisiin sovelluksiin.

Tähän asti NEMS-järjestelmien mittaamiseen metrologiaa on kehitetty erittäin vähän. MetNEMS –hankeessa kehitetään sekä uusia nanomittakaavan mekaanisia resonaattoreita että näiden heräte- ja mittaustekniikoita.

Osahankkeissa tutkitaan niin erilaisten materiaalien soveltuvuutta kuin esimerkiksi mikroaaltojen lähikentän hyödyntämistä mittauksessa, sekä lämpötilamittausta.

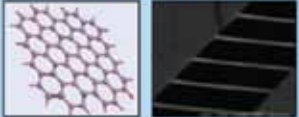
Hankkeessa MIKES yhdessä Helsingin yliopiston kanssa kehittää erityisesti stroboskooppista valkoisen valon pyyhkäisyinterferenssimikroskopiaa (SSWLIM, Stroboscopic Scanning White Light Interference Microscopy) menetelmäksi, jolla voidaan mitata tarkasti NEMS-resonaattoreita. MIKES vastaa erityisesti mittausten jäljitettävyydestä hyödyntäen interferometrisiä ja mikroskooppisia menetelmiä, sekä mm. testinäytteiden tuottamisesta. Lisäksi MIKES tutkii MEMS/NEMS-rakenteiden sovelluksia sähkömetrologiassa keskittyen erityisesti jännitereferenssin ja varausvahvistimen kehittämiseen.

Konsortio: NPL + MIKES, PTB, INRIM, UH, MAG.  
REGs: IC ja RHUL

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Antti Lassila  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 413

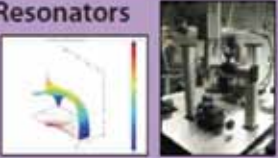
**WP 1: Novel Materials for High Performance NEMS**

- Graphene (high strength, low mass, low loss)
- MgB<sub>2</sub> (metallic high T<sub>c</sub>)
- HfTi barrier Josephson junctions



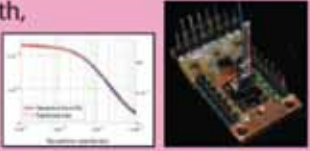
**WP 2: Novel Methods for NEMS Resonators**

- Near-field microwave gives nanoscale resolution at 10GHz
- SSWLIM gives real-time dynamic measurement of displacement



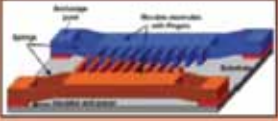
**WP3: Traceable Electromagnetic Metrology**

- Traceable measurements of length, mass and force, internal and external dimensions
- Novel single photon detector using MgB<sub>2</sub>




**WP 4: Beyond Classical Limits**

- Sideband cooling beyond classical
- Graphene NEMS for low mass detection
- On-chip electrical standards, charge detection



**WP 5: SQUID-NEMS combinations close to the Quantum Limits**

- Approaching the quantum limit with nanoSQUIDs
- Noise thermometry at mK with NEMS
- Nanoscale noise thermometry



# METCO SÄHKÖTERMINEN KYTKENTÄ UUSILLE FUNKTIONAALISILLE MATERIAALEILLE

EMRP UUDET TEKNOLOGIAT 2012 – 2015

Kehitteillä olevat uudet teknologiat ja uudet funktionaaliset materiaalit mahdollistavat säästöjä energiankulutuksessa ja parannuksia luotettavuudessa ja tehokkuudessa auto-, energia-, prosessi- sekä lääketieteellisyydessä. Toimintalämpötilat ulottuvat 1000 °C saakka. Nämä sovelluskohteet käyttävät hyväksi aktuaatio-, tunnistus- ja jäähdyttämislmiöitä ferroelektrisissä materiaaleissa. Materiaaleille on ominaista vahva kytkentä sähköisten, termisten ja mekaanisten ominaisuuksien välillä. Materiaalien ominaisuuksien degradaatio korkeissa lämpötiloissa rajoittaa tällä hetkellä niiden sovelluskohteet alle 200 °C lämpötiloihin. Uudet funktionaaliset materiaalitekhnologiat ovat kehityksessä korkeiden lämpötilojen sovelluskohteisiin. Metrologiset mittaukset tällä alueella ovat kehityksessä ja toisaalta tarkkoja mittauksia tarvitaan teknologioiden ja materiaalien parantamiseksi. Sähkö-termo-mekaanisen kytkennän metrologinen mittaaminen korkeissa lämpötiloissa on projektin haaste.

METCO projektissa kehitetään metrologista infrastruktuuria ja osaamista Euroopassa sähkö-termo-mekaanisen kytkennän jäljitettävälle mittauksille korkeissa lämpötiloissa ja sähkökentässä. Projektissa kehitetään uusia tekniikoita sähkö-mekaanisen, termo-elastisen ja sähkö-termisen kytkennän mittaamiseen. MIKESin tehtävä projektissa on tutkia uusien pietsomateriaalien optisia ominaisuuksia 1000 °C asti, kehittää optinen lämpötilan mittaustekniikka korkean lämpötilan interferometriin, sekä johtaa korkean lämpötilan termofyysisten ominaisuuksien mittausten työpakettia.

Konsortio: NPL + MIKES, CMI, LNE, PTB, aixACCT, ULE

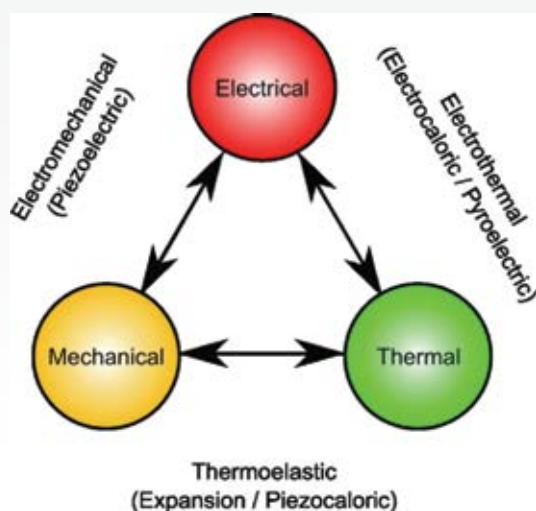
Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Maksim Shpak  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 000



Kuva 1. Yli 500 °C:n venttiilit ja aktuaattorit lento- ja autoteollisuuteen.



Kuva 2. Ultraääni NDE anturit energia- ja prosessiteollisuuteen yli 750 °C olosuhteisiin.



# DYNAMIC

## DYNAAMISTEN MITTAUSTEN JÄLJITETTÄVYYS

EMRP TEOLLISUUS 2011 – 2014

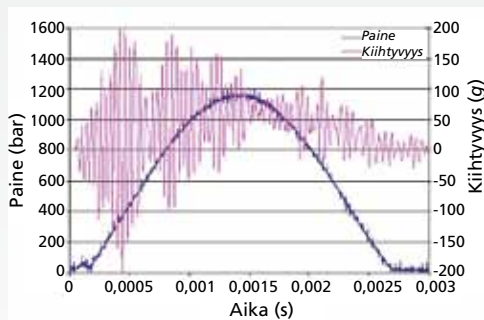
Tälläkin hetkellä mm. avaruustekniikassa, lääketeollisuudessa, tuotantotekniikassa, autoteollisuudessa, prosessiohjauksessa ja puolustusvälineiteollisuudessa tehdään dynaamisia mittauksia antureilla, jotka usein on kalibroitu vain staattisesti. Tällöin jäljitettävyysetkju katkeaa ja mittausten luotettavuutta ei voida taata: antureiden todellinen käyttäytyminen dynaamisissa olosuhteissa ei tule esille. Uusien mittausmenetelmien ja mittanormaalien kehittäminen on välttämätöntä, jotta turha epävarmuus näissä kriittisissä mittauksissa voidaan poistaa. Ennen tätä projektia asia on kuitenkin kehittynyt vain vähäisesti viime vuosikymmenten aikana. Esimerkiksi dynaamisen paineen kalibraattorit perustuvat referenssiantureihin, jotka on kalibroitu staattisesti.

DYNAMIC-projektin tavoitteena on luoda jäljitettävyys dynaamisille paineen, voiman ja vääntömomentin mittauksille, sisältäen anturien dynaamisen vasteen ja mittausjärjestelmän sähköisten osien jäljitettävyyden. Projektissa kehitetään mittanormaaleja, kalibrointimenetelmiä, mallinnusta ja mittausepävarmuusarviointia.

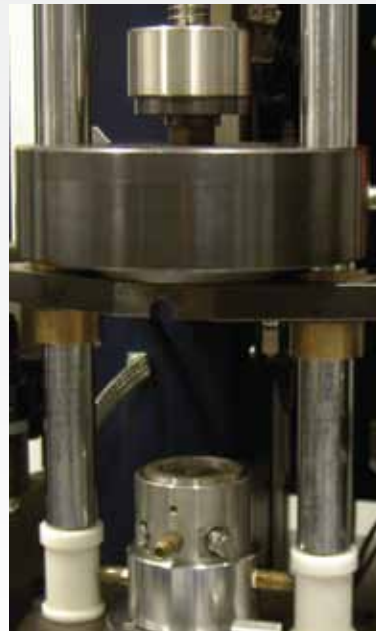
MIKES kehittää DYNAMIC-projektissa dynaamisen paineen primaaritason mittanormalin. Sen suunniteltu pääasiallinen toiminta-alue on noin 100 MPa ... 500 MPa. Mittanormaali perustuu putoavan punnuksen -menetelmään: tunnetun massan annetaan pudota tietyltä korkeudelta männän päälle. Mäntä välittää siihen kohdistuvan voiman suljetussa kammiossa olevaan väliaineeseen paineiskuna, jonka kesto on noin 2,5 millisekuntia. Massan, kiihtyvyyden ja pinta-alan lisäksi avaintekijöitä jäljitettävyyden aikaansaamiseksi tavoitellulla epävarmuustasolla ovat kammion tilavuus, väliaineen kokoonpuristuvuus ja lämpötila sekä paineiskunaikaiset nopeat muutokset näissä. Lisäksi on mallinnettava paineiskun eteneminen kammiossa.

Konsortio: PTB + MIKES, CEM, CMI, INRIM, LNE, NPL, SP, TUBITAK UME, VSL, HBM, SPEKTRA, Porche, VW, AEP, SCANDURA, Simea

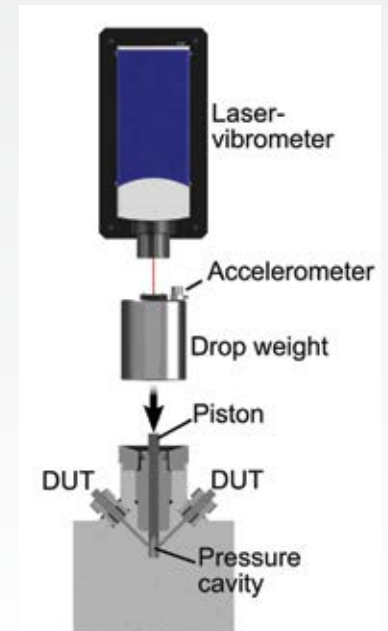
Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Sari Saxholm  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 432



Kuva 1. Paineen ja kiihtyvyyden tyypillinen käyttäytyminen paineiskun aikana, raakadata.



Kuva 2. Mittapää, mäntä ja punnus valmiina pudotukseen.



Kuva 3. Dynaamisen paineen mittanormalin toimintaperiaate (kuva T. Bruns / PTB).



# MADES TOIMINNALLISTEN PINTOJEN TESTAAMISEN METROLOGIA

EMRP TEOLLISUUS 2011 – 2014

Kitkan ja kulumisen hallinta on tärkeää monilla sektoreilla. On arvioitu, että 30 % - 50 % teollistuneiden maiden energiasta kuluu kitkan voittamiseen. Liikkuvien koneiden kulumisen ymmärtäminen ja hallinta on edellytys myös turvallisuudelle energian tuotannossa ja liikenteessä.

Tribologia on tieteenala, joka tutkii kitkaa ja kulumista. Tribologiassa on keskeistä koetoiminta, jossa tutkitaan kahden pinnan välistä kitkaa ja kulumista laboratoriossa. Kokeissa mitataan kitkavoimaa, lämpötiloja, viskositeettejä sekä kulumistilavuuksia. Mittauksien luotettavuus heijastuu suoraan tribologisten päätelmien luotettavuuteen. Koesarjassa mitattu kulumisuran syvyys voi olla 1 µm suuruusluokkaa, joten merkityksellisten erojen löytäminen edellyttää toistettavuutta sekä kertaluokkaa tarkempia mittauksia.

Viime vuosien aikana on ilmennyt, että tutkittavien materiaalien kehittyessä käytettävissä oleva mittausmekaniikka ei enää riitä. Voi jopa sanoa, että puutteet ja rajoitukset mittaustekniikassa ja mittaustekniikassa haittaavat uusien pitkäikäisten ja pienikitkaisten materiaalien kehitystä.

MADES-projektin tavoitteena on kehittää ja parantaa tribologisessa testauksessa käytettävien mittaustekniikoiden luotettavuutta seuraavilla alueilla:

- Pienten kulumistilavuuksien mittaaminen
- Kitkavoiman mittaaminen
- Kulumiskontaktin lämpötilan mittaaminen
- Kosketuksen kemialliset mittaukset

MIKESin vastuulla on pienten kulumistilavuuksien mittaaminen. Tässä työssä käytetään kromaattista konfokaalianturia, jolla instrumentoidaan VTT:n tribologiaa koelaitteita.

Konsortio: NPL + MIKES, PTB, NPL, INRIM, VTT, CNAM, DTI, BAM, QFM, Alicona

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Björn Hemming  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 403



Kuva 1. Kitkan ja kulumisen hallinta on tärkeää monilla sektoreilla.

# Frequency UUDEN SUKUPOLVEN TEOLLISET TAAJUUSNORMAALIT

EMRP TEOLLISUUS 2011 – 2014

Monet teknologia-alueet kuten tietoliikenne, ilmaväli ja navigointi tarvitsevat tarkkoja aika- ja taajuusnormaaleja. Nykyiset atomikellot ylittävät riittävälle tasolle tarkoin kontrolloiduissa olosuhteissa. Eurooppalaiset metrologialaitokset ovat vuosia kehittäneet sekä mikroaallo- että optisen alueen taajuusnormaaleja jotka ylittävät  $10^{-15}$  suhteelliselle tarkkuustasolle, mikä on enemmän kuin riittävästi moniin sovelluksiin. Nämä taajuusnormaalit ovat kuitenkin suurikokoisia, hankalasti liikuteltavia, sähköä kuluttavia ja niitä pystyvät käyttämään vain laitteeseen huolellisesti perehtyneet tutkijat.

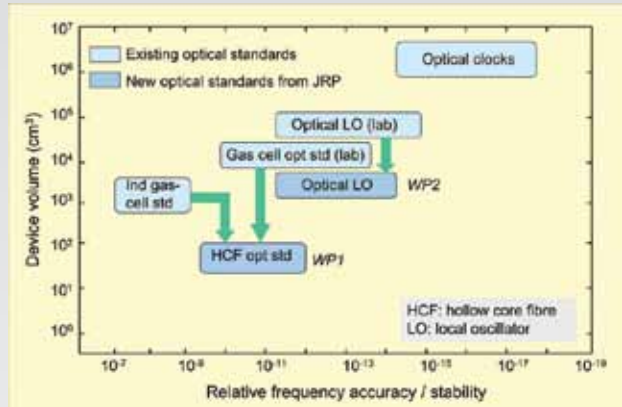
Frequency-projektissa kehitetään teollisessa ympäristössä toimivia tarkkoja taajuusnormaaleja. Tarkoituksena on kehittää kompakteja taajuslähteitä jotka toimivat pitkiä aikoja ympäristöissä, joissa esimerkiksi värinä ja lämpötilavaihtelut ovat selvästi suurempia kuin laboratoriolosuhteissa. Menetelminä ovat mm. kaasutäytteisten valokuitujen spektroskopia ja optiset resonaattorit. Projektissa tutkitaan myös mikroaaltosignaalin tuottamista optiseen taajuuskampaan lukitulla taajuudella, ja tämän lähestymistavan soveltuvuutta kompaktin mikroaaltoreferenssin rakentamiseen.

MIKESin tehtävänä projektissa on rakentaa lähi-infrapuna-alueen / tietoliikennealueen taajuusgeneraattori, jonka taajuus lukitaan valokuituun suljetun asetyleenikaasun absorptiospektriin.

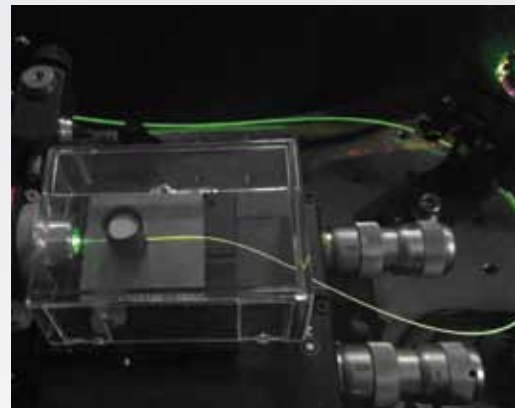
Tätä varten erityyppisten onttojen fotonikidekuitujen vaikutus kaasun spektriviivoihin tutkitaan muuntamalla lasikennoa käyttävä asetyleenispektroskopia- ja taajuusgeneraattorilaitteisto kaasutäytteisiä kuituja mittaavaksi. Taajuusreferenssinä käytetään atomikellon signaaliin lukittua optista taajuuskampaa.

Konsortio: NPL + MIKES, CSIC, DFM, EJPD, INRIM, LNE, OBSPARIS, PTB, Agilent, Chylas, USTAN, CNRS

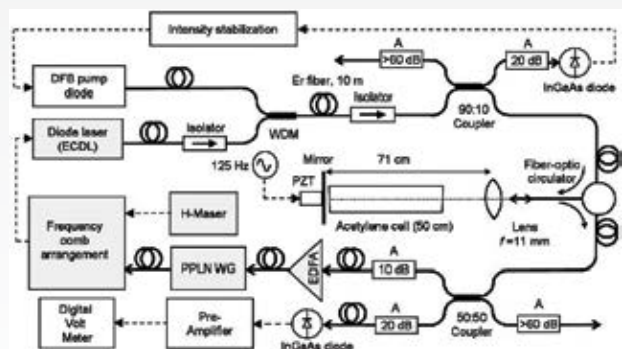
Lisätietoja:  
 Projektipäällikkö Jeremias Seppä  
 etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 465



Kuva 1. Optiset taajuusnormaalit, koko ja tarkkuus./ State of the art.



Kuva 2. Fotonikidekuitua käytetään spektrin leventämiseen.



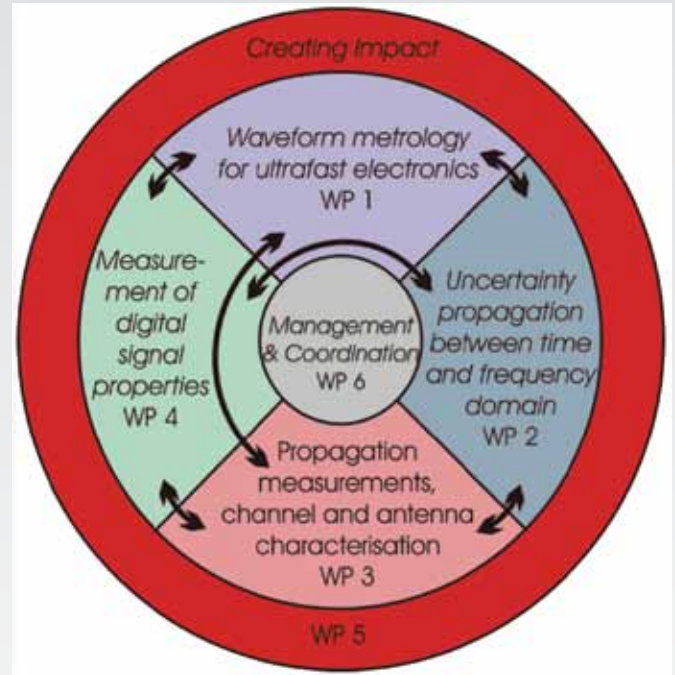
Kuva 3. Kaavio MIKESin infrapunasyntetisaattorilaitteistosta.

# Ultrafast METROLOGIAA ERITTÄIN NOPEAAN ELEKTRONIIKKAAN JA SUURNOPEUKSISEEN TIEDONSIIRTOON

EMRP TEOLLISUUS 2011 – 2014

Kaistanleveyden jatkuva kasvu uusissa tietoliikenne- sekä kaukokartoitussovelluksissa parantaa jatkuvasti ihmisten elämän laatua ympäri maailman. Silti tämä kehitys kohtaa ratkaisemattomia haasteita metrologiassa: suurtaajuisten signaalien tarkan amplitudin ja vaiheen mittauksessa, epävarmuuden etenemisessä aika- ja taajuusalueiden välillä, suurtaajuisten radiolinkkien käyttämien kanavien ja antennien ominaisuuksien karakterisoinnissa sekä digitaalisignaalien tarkassa mittauksessa. Nämä epäkohdat jarruttavat uusien suuritaajuisten laitteiden kehitystä Euroopassa. Tämä tutkimusprojekti tarjoaa ratkaisumalleja näihin haasteisiin tähdäten eurooppalaisen teollisuuden johtavaan rooliin suuritaajuisessa elektroniikassa ja suuren kaistanleveyden omaavassa tietoliikennetekniikassa, koskien niin nykyistä kuin seuraavien sukupolvien teknologiaa.

Tämä projekti pyrkii osaltaan selkeyttämään suurtaajuisten signaalien jäljitettävyyttä aina loppukäyttäjille saakka. Optoelektroniset mittaukset, jotka perustuvat femtosekuntilasereihin, tulevat toimimaan suurinopeuksisten ja suuritaajuisten mittalaitteiden jäljitettävyyden perustana. Jäljitettävyyden siirtymisen kalibrointiketjussa takaa kattava ohjelmistokirjasto, jolla saadaan toteutettua jäljitettävyyttä aika- ja taajuusalueiden välillä ja jolla voidaan käsitellä pitkiä aikasarjoja. Tämä ohjelmisto tulee olemaan vapaasti saatavilla kaikille osallistujille. Projektissa kehitetään myös antenni- ja kanavaominaisuuksien mittauksia millimetrialloilla ja myös sitä lyhyemmällä aallonpituuksilla. Tällä parannetaan tarkkuutta tarjolla olevalla taajuusalueella sekä nykyisillä että tulevaisuuden kommunikaatiolinkeillä. Digitaalisten signaalien mittalaitteita varten kehitetään digitaalisignaalien jäljitettävää mittausta ja laaditaan yleinen ohjeistus siitä.



MIKESin pääasiallinen tehtävä tässä projektissa on tuottaa ohjelmakirjasto, jonka avulla voidaan toteuttaa jäljitettävien aaltomuotomittausten laskentaa. Itse laskenta-algoritmikehitys tehdään pääosin muiden konsortion jäsenten toimesta.

Konsortio: PTB + MIKES, CMI, INTA, LNE, NPL, VSL, Agilent

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Kari Ojasalo  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 423



# Scatterometry

PIENTEN ELEKTRONISTEN JA OPTISTEN KOMPONENTTIEN METROLOGIAA

EMRP TEOLLISUUS 2011 – 2014

Pienten rakenteiden dimensionaalinen metrologia on erittäin tärkeää puolijohdeteollisuudessa ja optiikan alalla. Rakenteiden jatkuva pienentyminen asettaa kuitenkin merkittäviä haasteita niiden luotettavaan mittaamiseen. Skatterometriä on lupaava menetelmä pienten jaksollisten rakenteiden tulevaisuuden mittaustarpeisiin.

Skatterometriä on optinen menetelmä, jossa pinnasta sironnutta valoa mittaamalla saadaan määritettyä pintarakenteiden geometriaa ja optisia parametrejä. Skatterometriä hyödynnetään yleisesti puolijohdeteollisuudessa prosessien valvontaan, mutta mittaukset ovat aina suhteellisia sillä yleisiä standardeja skatterometreille ei ole.

Optiikan teollisuudessa diffraktiivinen optiikka on tulossa koko ajan yhä tärkeämmäksi. Diffraktiivisilla komponenteilla voidaan toteuttaa yksinkertaisia toimintoja tai monipuolisemmilla rakenteilla korvata jopa useita perinteisiä optiikan komponentteja, mikä edesauttaa laitteiden miniaturisointia. Skatterometrillä saadaan suoraan mitattua rakenteesta diffraktoitunut kenttä. Mittaustuloksista voidaan käänteis-laskennan avulla selvittää myös useita mikroskooppiseen rakenteeseen liittyviä parametreja. Diffraktiivisten komponenttien valmistukselle ei kuitenkaan ole olemassa luotettavaa laadunvalvontamenetelmää.

SCATTEROMETRY-projektin tavoitteena on kehittää ja laajentaa skatterometriä vastaamaan puolijohdeteollisuuden ja optiikan alan tarpeisiin nyt ja tulevaisuudessa. Projektin päämääränä on luoda jäljitettävät standardit skatterometriin mittauksiin.

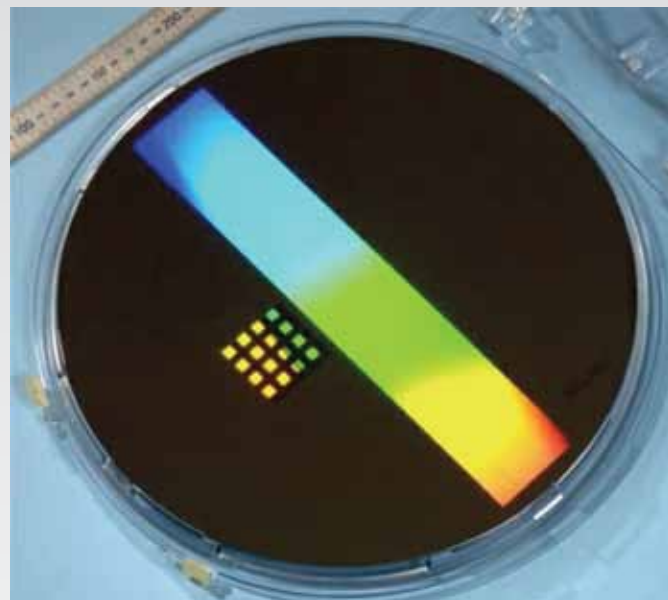
MIKESin vastuulla on suunnitella ja rakentaa diffraktiivisten optisten elementtien mittaamiseen tarkoitettu skatterometri, jolla tehtävien mittausten sekä mallinuksen avulla voidaan selvittää pintarakenteiden geometriaa. Projektissa tutkitaan myös eri rakenneparametrien vaikutusta diffraktoituneeseen kenttään. Projektin tavoitteena on kehittää jäljitettävä laadunvalvontamenetelmä teollisuuden tarpeisiin.

Konsortio: PTB + MIKES, CMI, DFM, NPL, VSL, Nanocomp, JCM, UEF

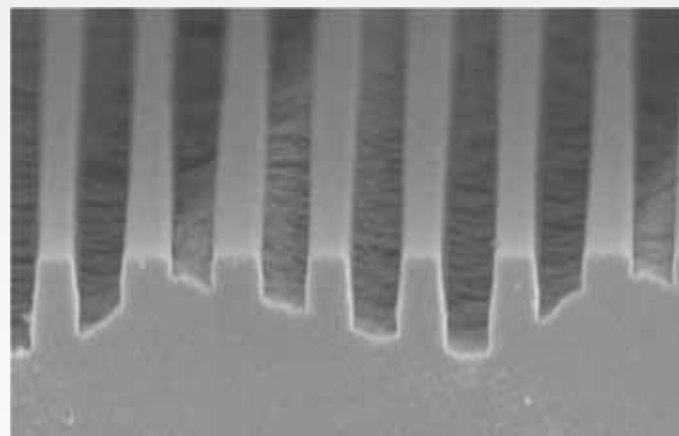
Lisätietoja:

Projektipäällikkö Hannu Husu

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 461



Kuva 1. Diffraktiivisia elementtejä.



Kuva 2. Hilarakenne kaarevalla pinnalla.



Kuva 3. MIKESin skatterometrin hahmotelma.

# MIQC

## KVANTTIKOMMUNIKAATION METROLOGIAA

EMRP TEOLLISUUS 2011 – 2014

MIQC-hankkeen tarkoituksena on luoda metrologiset puitteet kvanttikommunikaation teolliseen kehittämiseen ja kaupallistamiseen Euroopassa.

Internetin kasvaneen käytön myötä tietoturvan vaarantuminen on suurempi riski kuin koskaan aiemmin. Esimerkkejä tietoturvan kannalta kriittisistä sovelluksista internetissä ovat pankkitoimeksiannot, terveystietojen välitys ja varastointi sekä patenttien ja muiden tekijänoikeuksien alaisten dokumenttien siirto. Nykyisin tiedon salaukseen ja suojaukseen käytetään pääosin perinteisiä salausmenetelmiä, mutta niiden suojauskykyä uhkaa tietokoneiden laskentatehon nopea kasvu. Tämä on luonut kaupallisen tarpeen kvanttikryptografian kehittämiseksi.

Kvanttikryptografiaa voidaan käyttää vaihdettaessa salausavaimia ehdottoman turvallisesti. Se tapahtuu käyttämällä hyväksi yksittäisten fotonien kvanttitiloja, joita ei voi salakuunnella vaikuttamatta itse tilaan. Hankkeessa tutkitaan pääasiassa kvanttiavainten välityksen metrologiaa, sillä tällä tekniikalla on kaupallisia sovelluksia. Kvanttiavainten välitykseen on saatavissa kaupallisia laitteistoja, joiden valmistuksessa EU on johtavassa asemassa. Tästä huolimatta alalle ei ole kehitetty valmistajista riippumattomia mittanormaleja tai määritelmätilanne, jonka MIQC-hanke pyrkii korjaamaan.

Konsortio: INRiM + MIKES, Aalto, CMI, Metroserf, NPL, PTB, AIT, IDQ, KRIS

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Mikko Merimaa

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419



# MACPOLL ILMAN- LAADUN MITTAUSTEN METROLOGIA

EMRP YMPÄRISTÖ 2011 – 2014

Ilmansaasteilla on välitön vaikutus ihmisten terveyteen ja elinympäristöön, ja siksi EU onkin asettanut ulkoilman epäpuhtauksille raja-arvoja: EU Air Quality Directive (2008/50/EC, sulphur dioxides, nitrogen oxides, carbon monoxides, benzene and ozone). Sisäilman osalta samanlaisia EU-alueelle yhteisiä laatuvaatimuksia ei ole vielä toistaiseksi ole, vaikka onkin hyvin tiedossa että myös sisäilman epäpuhtauksilla on ihmisten terveyden ja viihtyvyyden kannalta suuri merkitys.

MACPOLL-hankkeessa keskitytään ulko- ja sisäilman laadun mittaamiseen liittyviin moninaisiin haasteisiin, ennen kaikkea mittaustulosten jäljitettävyyteen. Lisäksi hankkeessa tutkitaan uusia ilmanlaadun mittausten kannalta tärkeitä anturitekniikoita. MIKES osallistuu hankkeeseen usein eri tavoin: Eräs tehtävistämme liittyy kaasuanalysaattoreiden kalibroinnissa käytettävien ns. nollakaasunormaalien epäpuhtauksien karakterisointiin, toisaalta kehitämme menetelmiä analysaattoreiden mittausepävarmuuksien pienentämiseksi. MIKESin vastuulla on myös uusien grafeenipohjaisten kaasuantureiden tutkimus. Työssä selvitetään pienikoisten grafeeniantureiden ominaisuuksia ja näiden antureiden soveltuvuutta ilmassa olevien kaasumaisten epäpuhtauksien mittaamiseen.

Konsortio: VSL + MIKES, BAM, EJPD, IL, INRIM, JRC, LNE, NPL, PTB, SMU, UBA

REG: Helsingin Yliopisto, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Markku Vainio

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 445





# PartEmission

## AUTOJEN PAKOKAASUPÄÄSTÖT

EMRP YMPÄRISTÖ 2011 – 2014

Lukuiset tutkimukset osoittavat ilmansaasteiden haitallisen vaikutuksen ihmisten terveyteen. Tästä syystä Eurooppaan on rakennettu ilmanlaadun mittausverkosto, jolla EU-direktiivin nojalla valvotaan jäsenvaltioiden ilmanlaatua. Ilmanlaadun parantamiseksi on tunnistettava päästöjen lähteet, sekä pystyttävä luotettavasti mittaamaan ja lopuksi sääntelemään lähteistä peräisin olevia päästöjä. Tämä on mahdollista vain jäljitettävien mittausten kautta käyttäen yhteisesti sovitua käytäntöjä.

Autot ovat merkittävin ilman laatua heikentävä tekijä, koska niiden tuottamat pakokaasut sisältävät runsaasti hääkää, typen ja rikin oksideja sekä hiilivetyjä. Bensiniautojen pakokaasut sisältävät lisäksi lukuisia epäorgaanisia yhdisteitä kuten elohopeaa, jota esiintyy luonnostaan fossiilisissa polttoaineissa. Pakokaasuissa on myös katalysaattorista peräisin olevia platinayhdisteitä ja, erityisesti dieselautoissa, nanometriluokan hiuk-

kasia. Jotta näiden päästöjen riskit voidaan arvioida, täytyy niitä pystyä luotettavasti ja jäljitettävästi mittaamaan.

PartEmission-projektissa kehitetään mittaus- ja kalibrointimenetelmiä autojen pakokaasujen elohopean, platinayhdisteiden ja hiukkasten mittaamiseen. MIKES kehittää, yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) kanssa, kalibrointimenetelmää autojen hiukkaspitoisuutta mittaaville laitteille. Lisäksi MIKES ja TTY tutkivat uudenlaisten hiukkasmittalaitteiden soveltuvuutta autojen katsastuksen päästömittaukseen.

Konsortio: PTB + MIKES, BAM, JRC, LNE, EJPD, IJS, NPL, VSL, DFM, IfT

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Martti Heinonen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 402



Kuva 1. Hiukkasten lukumäärätiheyden mittanormaali perustuen hiukkasten varaamiseen ja sähköiseen havaitsemiseen.



# EUMETRISPEC SPEKTROSKOPIA-TIETOKANNAT ILMAKEHÄTIETEIDEN TUEKSI

EMRP YMPÄRISTÖ 2011 – 2014

Ilmakehän koostumuksen tarkat mittaukset tuottavat arvokasta tietoa ympäristömme tilasta ja ilmastomutoksesta, sekä luovat kokeellisen pohjan ilmastomallien kehittämiseksi. Käytännössä nämä mittaukset – joita tehdään satelliiteista, lentokoneista ja maa-asemilta – perustuvat spektroskopiaan, eli siihen kuinka ilmassa olevat eri molekyylit absorboivat sähkömagneettista säteilyä eri aallonpituuksilla. Mitattuja absorptiospektrejä verrataan spektroskopiakirjastoihin, jotka sisältävät yksityiskohtaista tietoa kymmenien eri molekyylien absorptioviivoista. Suurimpiin tietokantoihin on kerätty tiedot yhteensä miljoonista eri absorptioviivoista. Kaksi merkittävintä tietokantaa ovat HITRAN ja GEISA. Ilmakehämittausten tarkkuus riippuu ennen kaikkea käytettävien spektrikirjastojen laadusta ja luotettavuudesta.

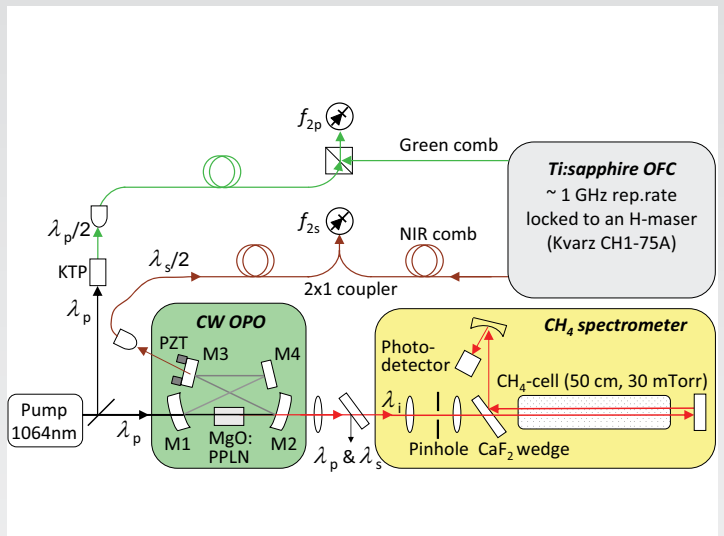
EUMETRISPEC-hankkeen tavoitteena on parantaa olemassa olevien spektrikirjastojen laatua kehittämällä jäljitettäviä mittauksia molekyylien absorptioparametrien määrittämiseksi. Hankkeessa keskitytään ilmakehätieteiden ja ilmastomallien kannalta tärkeimpiin molekyyliin. Tarkoitusta varten rakennetussa keskuslaboratoriossa tehtävien mittausten jäljitettävyys ja laatu varmistetaan satelliittiorganisaatioissa suoritettavien laseravusteisten mittausten avulla. MIKESin vastuulla on absorptioviivojen absoluuttisuuksien ja painesiirtymien mittaaminen. Nämä toteutetaan tarkoitusta varten kehitetyllä uudella laserlaitteistolla, joka mahdollistaa jäljitettävät taajuusmittaukset ilmakehätieteiden kannalta kaikkein tärkeimmällä keski-infrapuna-alueella.

Konsortio: PTB + MIKES, LNE, CNAM, VSL, DFM, SMU

Lisätietoja:

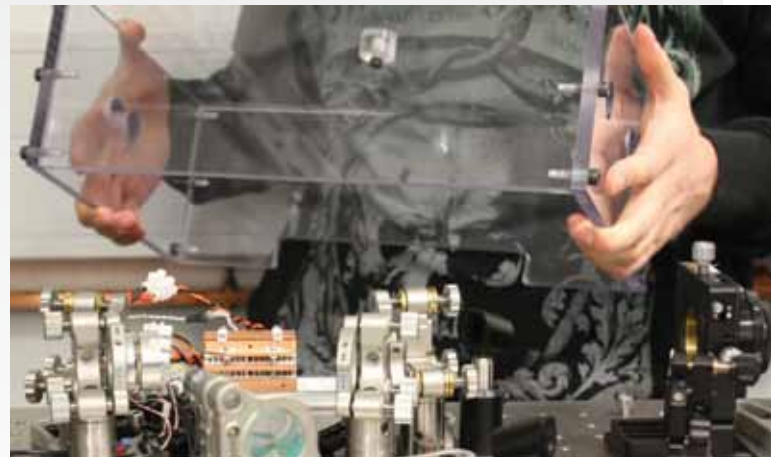
Projektipäällikkö Markku Vainio

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 445



Kuva 1. Molekyylisen absorptioviivojen tarkkoihin infrapuna-alueen taajuusmittauksiin MIKESissä kehitetty laitteiston periaatekuva.

(Optics Letters, Vol. 36, Issue 21, pp. 4122-4124 (2011) <http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.004122>)



Kuva 2. Valokuva laitteiston tärkeimmästä osasta, ns. optisesta parametrisesta oskillaattorista (OPO), joka tuottaa aallonpituudeltaan säädettävää keski-infrapuna-alueen laservaloa.

Ilmastomuutoksen erittäin laajojen vaikutusten vuoksi sää- ja ilmasto-olosuhteita pyritään tutkimaan ja ennustamaan entistä tarkemmin. Havaintotoiminnassa pyritään tuottamaan laadultaan entistä parempia mittaustuloksia ja varmistamaan, että kerätyt tulokset sisältävät myös tiedon niiden luotettavuudesta. Ilmastomuutoksen arvioinnin kannalta on oleellista, että vuosikymmenien ja vuosisatojen aikana kerätyt tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

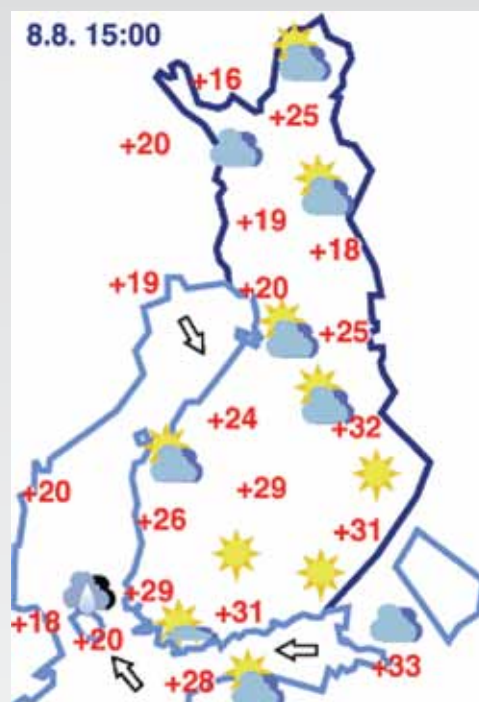
MeteoMet-hankkeen tavoitteena on parantaa säähavaintojen luotettavuutta metrologian keinoin. Tässä keskeisenä osana on uusien mittaus- ja kalibrointimenetelmien kehittäminen kohteisiin, joissa SI-jäljittävyyttä ei tähän asti ole voitu toteuttaa. Toisaalta hankkeessa myös tutkitaan historiallisten lämpötilahavaintojen luotettavuutta ilmastonmuutos-analyyysien tueksi. Laaja eurooppalainen osallistuminen hankkeessa sekä kiinteä yhteistyö meteorologian laitosten ja muiden toimijoiden kanssa varmistaa hankkeen tulosten vaikuttavuuden. Se antaa myös hyvän pohjan ylläpitää ja kehittää metrologian ja meteorologian keskinäistä verkostoitumista tulevaisuudessa.

MIKES kehittää MeteoMet-hankkeessa laitteiston yläilmakehän havaintoihin käytettävien radiosondien kalibrointiin ja tutkii sääasemien kalibrointimenetelmiä. Laitteistolla voidaan kalibroida radiosondien kosteus- ja lämpötilamittaukset huoneen lämpötilasta aina 80 °C:een saakka. Toteutuessaan MIKESin tutkimus tuottaa merkittävän edistysaskeleen kohti maailmanlaajuisen GRUAN-referenssihavaintoverkon tarkkuusvaatimuksia.

Konsortio: INRIM + MIKES, CEM, CETIAT, CMI, CNAM, DTI, INTA, INTiBS, JV, MG, MIRS/UL-FE/LMK, NPL, PTB, SMD, SMU, SP, TUBITAK UME, Univ. Århus, Chalmers, Wrocław Univ., EV-K2-CNR, KIT

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Martti Heinonen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 402



Kuva 1. Simuloitu virtausprofiili mittauskammiossa.





# MetroRWM

## METROLOGIAA YDINJÄTEHUOLLOLLE

EMRP YMPÄRISTÖ 2011 – 2014

Ydinvoimaloiden käyttö ja käytöstä poistaminen on tehtävä ympäristövaikutukset minimoiden. Tämä tavoite voidaan saavuttaa vain, jos käytössä on standardoituja ja jäljitettäviä mittaamenetelmiä jätteen ja ympäristön radionuklidien aktiivisuuden mittaamiseen.

Tavoitteen saavuttamiseksi hankkeessa kehitetään jäljitettäviä mittaamenetelmiä kiinteän radioaktiivisen jätteen aktiivisuuden mittauksiin (joko loppusijoitusta tai jätteiden käsittelysuunnitelmasta vapauttamista varten) sekä laitteita varastoidun jätteen kaasumaisten päästöjen monitorointiin. Lisäksi kehitetään vertailumateriaaleja hankkeessa syntyvien mittalaitteiden kalibrointiin ja mitataan pitkäikäisten radionuklidien puoliintumisaikoja aiempaa pienemmällä epävarmuudella.

MIKES kehittää hankkeessa optista cavity ring-down-periaatteeseen perustuvaa hiilidioksidin isotooppianalyysiaattoria jätteen kaasumaisten päästöjen monitorointiin.

Konsortio: CMI + MIKES, BEV/PTP, CEA, CIEMAT, ENEA, IJS, JRC, MKEH, NPL, PO-LATOM, PTB, SMU, ENVINET

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Mikko Merimaa

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419



# MetEOC METROLOGIAA ILMASTON JA MAAPALLON HAVAINNOINTIIN

EMRP YMPÄRISTÖ 2011 – 2014

Maapallon tilan kaukokartoitus on erittäin tärkeää ympäristön hoidon vuoksi. Sitä tarvitaan ennen kaikkea luotettavien tietojen antamiseen poliittisille päättäjille ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. Tähän tarvitaan maailmanlaajuisista havainnointia mm. satelliiteilla. Tällä hetkellä mittauksien käytettävyyttä rajoittaa liian suuri mittausepävarmuus. Mittausepävarmuuden pienentäminen sekä kauko- ja lähimittausten yhdistämistarve ovat suurella painolla GEO-yhteisön (Group on Earth Observation) startegiapapereissa.

MetEOC-hankkeessa kehitetään uusia siirtonormaaleja ja menetelmiä jäljitettävään kaukokartoitusmittauksiin, parannetaan optisten ja mikroaaltokameroiden kalibrointeja sekä laboratoriossa että käytön aikana ja lisäksi kehitetään uusia malleja ja algoritmeja. Tavoitteena on saavuttaa riittävä jäljitettävä mittauskky maailmanlaajuisen ilmastoseurantajärjestelmän tarpeisiin.

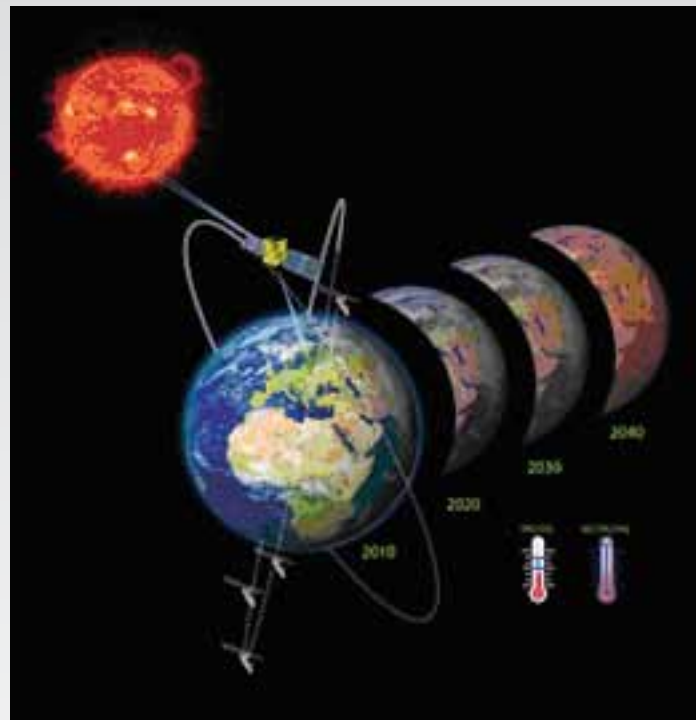
MIKES osallistuu kalibrointien kehittämisessä tarvittavien optisten testikohteiden suunnitteluun sekä dimensionaaliseen ja optiseen karakterisointiin.

Konsortio: NPL + MIKES, MIKES-Aalto, INRIM, JRC, LNE, MIKES, PTB, SFI-Davos, BUW, DLR, FGI, FZJ, ZINIR, UZH

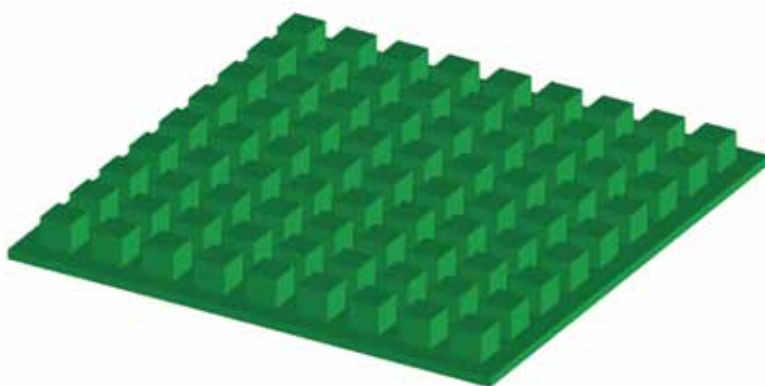
Lisätietoja:

Projektipäällikkö Antti Lassila

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 02950 54413



Kuva 1. Testikohde, joka koostuu hiekkapuhalletuista 12 mm:n alumiinikuutioista. Kuutiot on eloksoitu vihreiksi, jotta ne vastaavat metsien vihreää väriä.



# GAS ENERGIA- KAASUJEN KARAKTERISOINTI

EMRP ENERGIA 2010 - 2013

Maakaasun merkitys Euroopan energiataloudessa on kasvanut jatkuvasti viime vuosikymmeninä. Toisaalta kaasuvarantojen rajallisuus ja tarve tehostaa ilmaston muutosta vastustavia toimenpiteitä lisäävät muiden kaasujen – kuten biokaasujen – käyttöä energian tuotannossa. Euroopan unioni haluaa varmistaa mahdollisimman tehokkaan energiakaasujen jakelun yhteisillä jakeluverkoilla riippumatta kaasulähteestä. Tämä on mahdollista vain, jos varmistetaan kaikkialta verkkoon syötettävien kaasujen laatu.



Energiakaupan kannalta merkittävintä on saada luotettavaa tietoa kaasun lämpöarvosta eri kohdissa jakeluverkkoja. Toimitusvarmuuden sekä turvallisuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää monitoroida jakeluverkkoon syötettävän kaasun kosteutta. Liian suuri kaasun kosteus kasvattaa merkittävästi putki- ja venttiilirikkojen todennäköisyyttä ja siten lisää onnettomuusriskiä sekä katkoksia kaasun jakelussa.

GAS-hankkeessa kehitetään mittaus- ja kalibrointimenetelmiä energiakaasujen koostumuksen ja kosteuden mittausta varten. Tavoitteena on luoda keinot, joilla voidaan varmistaa kaasuista tehtävien mittausten laatu tehokkaan kaasun jakelun edellyttämällä tasolla. MIKES tutkii hankkeessa vesihöyryn käyttäytymistä metaanikaasussa ja kehittää laitteiston, jolla voidaan tutkia kosteusmittausten luotettavuutta energiakaasuissa painealueella 0,1 MPa ... 7 MPa lämpötilan ollessa välillä -50 °C ... +15 °C.

Konsortio: NPL + MIKES, BAM, BEV/E+E, BRML-INM, CMI, CEM, INRIM, INTA, LNE, MKEH, PTB, SMU, SP, TUBITAK-MAM



MIKESin laboratorio energiakaasujen mittaukseen.

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Martti Heinonen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 402



# HVDC SUUR- JÄNNITTEISET TASASÄHKÖSIIRTOLINJAT

EMRP ENERGIA 2010 - 2013

PÄÄTTYNEET PROJEKTIT

Sähkösiihtoverkko on välttämätön nykyajan yhteiskunnalle, koska sähkön tuotanto sijaitsee tyypillisesti etäällä kulutuksesta. Erityisesti Euroopan sähkösiihton pohjois-eteläsuuntainen "selkäranka" on kapasiteettinsa rajoilla. Sähkön siirron kokonaishäviöt ovat jopa 10 % luokkaa ja siten häviöiden vähentämisellä on mahdollisuus saavuttaa merkittäviä säästöjä.

Suunnitellut uudet energialähteet – esimerkiksi Desertec-projekti, jonka tarkoituksena on tuoda aurinkovoimalla tuotettua sähköä Pohjois-Afrikasta Eurooppaan – ovat yhä kauempana sitä tarvitsevista kuluttajista. Siirtohäviöiden pienentäminen ja yhä pitempien perinteisten siirtolinjojen samanaikainen käyttöönotto ei ole mahdollista. Tasajännitesiihtolinjan häviöt ovat merkittävästi vastaavaa vaihtojännitelinjaa pienemmät pitkällä siirtoetäisyyksillä. Toinen tasasähköteknologian mukanaan tuoma etu on mahdollisuus kontrolloida linjalla siirrettävän sähkön suuntaa ja määrää.

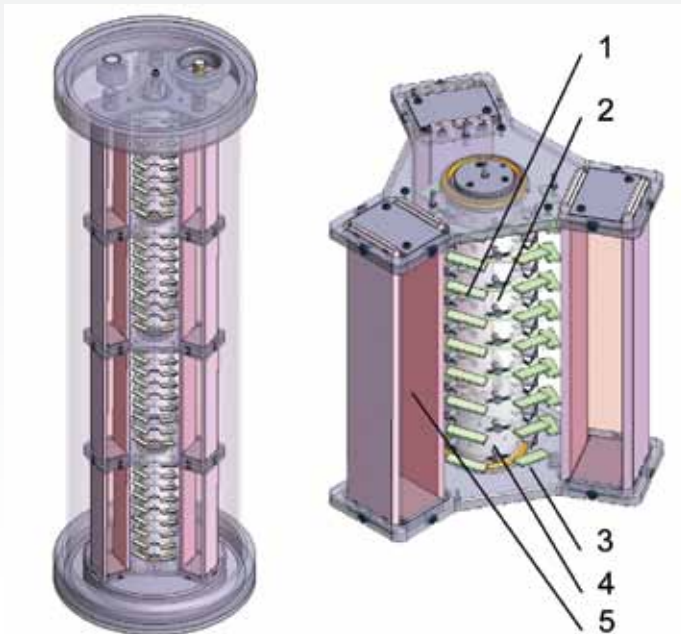
HVDC-projektissa kehitetään tasajännitetechnologiaa tukevia mittaus- ja kalibrointimenetelmiä erityisesti suurilla jännitteillä. Tavoitteena on kehittää menetelmiä mm. häviöiden sekä siirtyvän energian määrän ja sähkön laadun mittaamiseen tasajännitesiihtolinjoilla. MIKESin vastuulla projektissa on koordinoita 1000 kV modulaarisen tasajännitejakajan suunnittelua ja toteutusta.



Konsortio: SP + MIKES, INRIM, NPL, PTB, TUBITAK UME, VSL, TUBS, Trench

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Jari Hällström  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 441

Kuva 1. Suunniteltu 200 kV jakaja (vasemmalla) ja lähikuvasen 50 kV modulista (oikealla). 1: tarkkuusvastus, 2: keraaminen runko, 3: alumiinituki, 4: juotosposti, 5: kentänohjauskondensaattori (3 kpl).



# SMARTGRID

## ÄLYKKÄÄT SÄHKÖVERKOT

EMRP ENERGIA 2010 - 2013

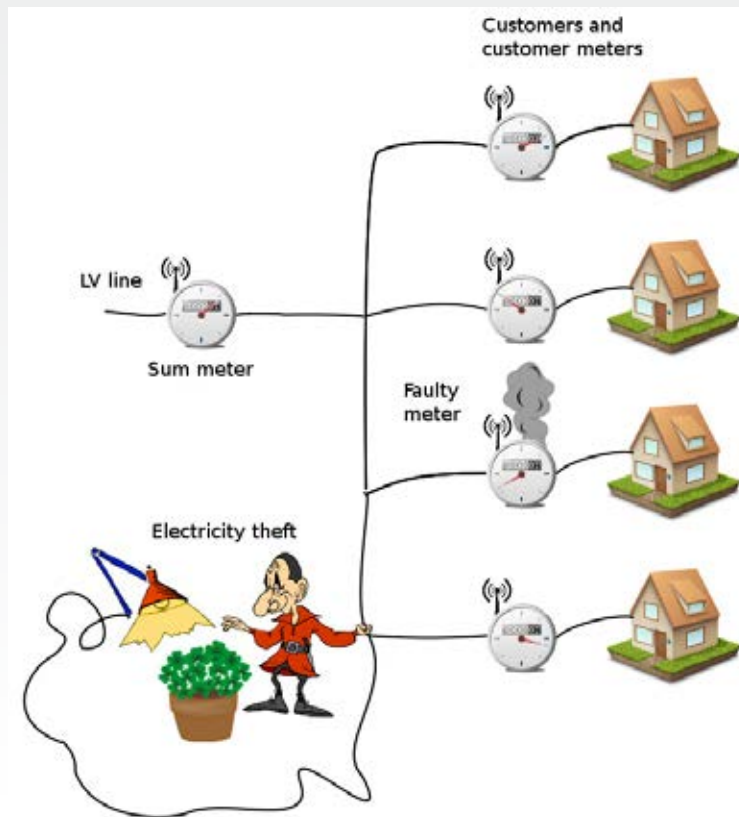
Hajautettu energiantuotanto asettaa uusia haasteita sähköverkolle, joka on suunniteltu yksisuuntaista, keskitetyiltä voimalaitoksilta kuluttajille suuntautuvaa energiavirtaa siirtämään. Tulevaisuudessa sähköverkkoon kytketään yhä useampia pienimuotoisia tuotantolähteitä, esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimaloita. Sähköverkon on muututtava merkittävästi, jotta se pystyy hallitsemaan sekä hajautetun tuotannon että kuluttajien katkottoman sähköntoimituksen tarpeen asettamat haasteet.

Perinteinen keskitetty sähköverkon hallintamalli voidaan nähdä yksisuuntaisena suurta energiavirtaa jakavana järjestelmänä vastakohtanaan älykäs sähköverkko, jossa asiakkaat tilanteen mukaan ovat joko kuluttajia tai tuottajia. Hajautettu tuotanto tuo mukanaan haasteita, joista ei tulla selviämään ilman uusien mittausmenetelmien ja hallintastrategioiden käyttöön-ottoa.

SmartGrid-projektissa kehitetään älykkäiden sähköverkkojen kehittämisessä tarvittavia mittaus- ja kalibrointimenetelmiä. Tavoitteena on tukea mm. verkon kuormituksen hallintaan liittyvien menetelmien ja mittausten kehitystä, automaattisen mittarinluennan sovellusmahdollisuuksia ja sähkönlaadun hallintaa. MIKES tutkii projektissa automaattisen mittarinluennan soveltamista verkossa olevan mittarikannan kalibrointiin.

Konsortio: VSL + MIKES, CEM, CMI, INM, INRIM, FFII, LNE, EJPD, NPL, PTB, SIQ, SMD, SMU, SP, Trescal, TUBITAK UME, EFZN, EIM, TUBS, AUTH, STRAT

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Jari Hällström  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 441



# POWERPLANT VOIMA- LAITOSTEN TEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

EMRP ENERGIA 2010 - 2013

PÄÄTTYNEET PROJEKTIT

Uusiutuvan energian huimasta kasvusta huolimatta suurin osa lämmöstä ja sähköstä tuotetaan edelleen perinteisillä menetelmillä, jotka pohjautuvat joko ydinenergiaan tai fossiilisten polttoaineiden polttamiseen. Jo pienikin muutos esim. hiili- ja kaasuvoimaloiden tehokkuudessa pienentää hiilidioksidipäästöjä ja tuo kustannussäästöjä. Hankkeessa pyritään 2–3 % energiatehokkuuden parantamiseen tärkeimpien säätöparametrien mittauserpävarmuuksia pienentämällä sekä käyttölämpötiloja kasvattamalla. Höyryvoimaloiden lämpötilaa voidaan kasvattaa nykyisestä maksimilämpötilasta 500 °C lämpötilaan 700 °C. Edellytyksenä on riittävän tarkkojen ja stabiilien lämpömittareiden kehittäminen. Vastaavasti kaasuturbiinien lämpötilaa voidaan nostaa nykyisestä maksimilämpötilasta 1300 °C lämpötilaan 1500 °C, jos turbiinisiipien lämpötila pystytään mittaamaan riittävän luotettavasti ja turbiinien lämpötekniiset ominaisuudet ovat tiedossa. Myös virtaus- ja sähköenergian mittauksia voidaan kehittää.

POWERPLANT-hankkeessa kehitetään uudentyyppisiä platinavastuslämpömittareita, joiden tulisi olla riittävän stabiileja ( $\pm 1$  K/vuosi) voimalaitosolosuhteissa sekä kaasuturbiinien säteilylämpötilan on-line kalibrointimenetelmiä. Tämä edellyttää lämpömittareissa ja turbiineissa käytettyjen materiaalien lämpöteknillisten ominaisuuksien tutkimista. Virtausmittauksen mittauserpävarmuus lämpötilassa 220 °C pyritään pienentämään arvoon 0,3 % esim. karakterisoimalla erityyppisiä virtausmittareita ja mallintamalla virtausta. Hankkeessa kehitetään aiempaa tarkempi (epävarmuustavoite 0,1 %) ja nopeampi kolmivaihesähkötehon on-line mittaustilaitteisto.

Konsortio: PTB + MIKES, BEV/PTP, CMI, DTI, LNE, NPL, SP ja VSL

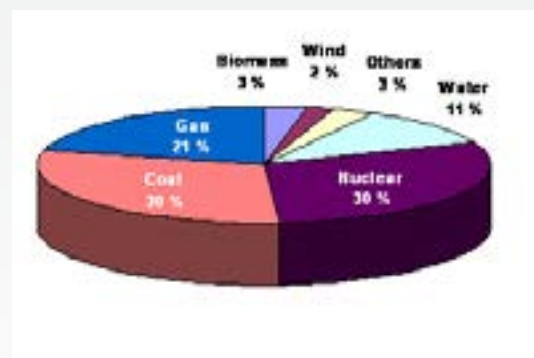
Lisätietoja:

Projektipäällikkö Kari Riski

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 429



<http://www.power-plant-efficiency.de>





# HARVESTING

## SÄHKÖÄ HUKKAENERGIASTA

EMRP ENERGIA 2010 - 2013

Tuotantolaitokset, koneet ja prosessit hukkaavat suuren osan käyttämästään energiasta esimerkiksi lämpönä tai mekaanisena värinä. Mikäli pienikin osa tästä hukkaenergiasta saadaan kerättyä talteen ja muutettua sähköenergiaksi, olisi sillä suuri vaikutus mm. hiilidioksidipäästöjen pienentämisessä. Toisaalta luontoa kuormittavien akkujen ja paristojen tarve vähenisi merkittävästi, mikäli erilaiset sähkölaitteet, anturit ja lähettimet voisivat tuottaa tarvitsemansa sähkön suoraan toimintaympäristönsä hukkaenergiasta.

Hukkaenergian talteenotossa käytettäviä pienikokoisia lämpö- ja pietsosähkögeneraattoreita on alettu tutkia ja kehittää viime vuosina aktiivisesti, mutta laitteiden ja käytettyjen materiaalien luotettava vertailu on ollut vaikeaa jäljitettävien mittausten menetelmien ja referenssimateriaalien puuttumisen takia. Harvesting-projektin tavoitteena onkin kehittää mittaustekniikkaa ja -menetelmiä sekä materiaaleja, joiden avulla voidaan tehostaa ja nopeuttaa hukkaenergian talteenotossa käytettävien teknologioiden kehitystyötä.

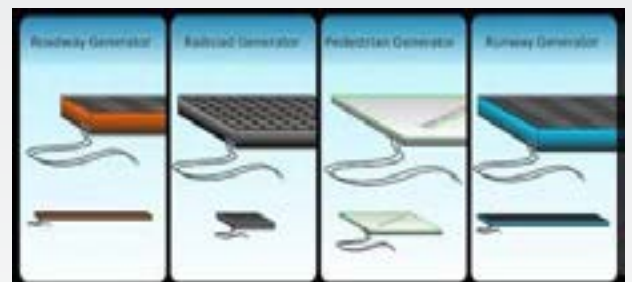
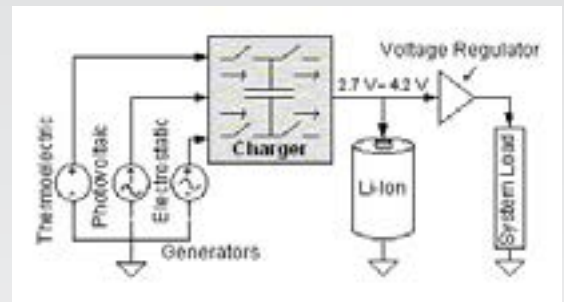
MIKESin pääasiallinen tehtävä tässä projektissa on kehittää mittausteollisuus, jolla voidaan mitata jäljitettävästi lämpösähköisten materiaalien lämmönjohtavuutta lämpötila-alueella 25 °C – 650 °C. Lämmönjohtavuuden luotettava mittaaminen onkin tärkeää, sillä se on yksi olennainen parametri arvioitaessa lämpösähköisten materiaalien hyvyttä ja sopivuutta sähköntuotantoon.

Konsortio: PTB + MIKES, CMI, INRIM, LNE, NPL, SIQ

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Ossi Hahtela

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 443



Energiaa maantiestä.

<http://www.emrp-metrology-for-energy-harvesting.blogspot.com/2011/02/energy-harvesting-roads-in-israel.html>

# SSL SEURAAVAN SUKUPOLVEN ENERGIANSÄÄSTÖ- LAMPPUJEN MITTAUSTEKNIKKAA

EMRP ENERGIA 2010 - 2013

PÄÄTTYNEET PROJEKTIT

Projektissa kehitetään mittaustekniikkaa uusille LEDeihin pohjautuville valaistusratkaisuille. LEDit ovat uusinta valaistustekniikkaa ja syrjäyttävät lähitulevaisuudessa nykyisin käytettävät loisteputkiin perustuvat energiansäästölamput.

LEDit poikkeavat perinteisistä hehkulampuista huomattavasti. Spektrit ovat täysin erilaisia, mikä täytyy huomioida. LEDien valo on suunnattua, mikä johtaa helposti geometriavirheisiin. LEDien ajamiseen käytettävät hakkuriteholähteet aiheuttavat haasteita sähkötehon mittaamiseen.

MIKES-Aalto kehittää kaksikanavaisen luminanssimittarin, jolla voidaan mitata tievalaistusta. Lisäksi kehitetään menetelmä, jolla voidaan määrittää valaisimien odotettavissa oleva elinikä nopeammin kuin perinteisillä menetelmillä.

Konsortio: VSL + MIKES-Aalto, CMI, CSIC, EJPD, INRIM, IPQ, LNE, MKEH, NPL

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Petri Kärhä

MIKES-Aalto Mittaustekniikka

etunimi.sukunimi@aalto.fi, puh. 09 470 22289



# NANOPARTICLES

## NANOPARTIKKELIEN JÄLJITETTÄVÄ KARAKTERISOINTI

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

Ilman pienhiukkaset aiheuttavat sydän- ja verisuonitauteja sekä hengityselinsairauksia. Mitä pienempi on hiukkasen koko, sitä syvemmälle se kulkeutuu ihmisen elimistöön ja sitä haitallisempi se on terveydelle. Pienten hiukkasten lukumääräpitoisuuden mittaamiseen on jo olemassa laitteita, mutta jäljitettävyydetun rakentaminen laitteen näyttämistä mittayksikön määrittelyyn on osoittautunut ongelmalliseksi. Autojen pakokaasupäästöille asetetut Euro 5 ja 6 -standardit tulevat sisältämään rajoituksia hiukkasten lukumääräpitoisuudelle. Tästä seuraa vaatimus hiukkaslaskureiden jäljitettävyydelle, joka saavutetaan ainoastaan kalibroinnin avulla.

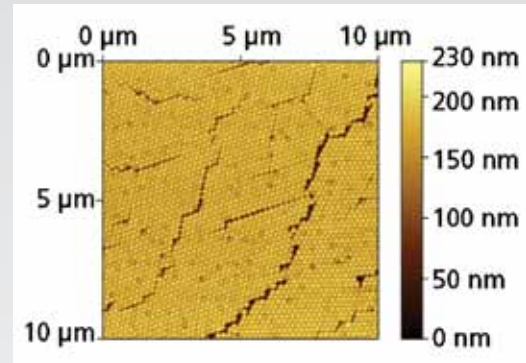
Projektissa MIKES kehitti yhdessä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) kanssa hiukkasten sähköiseen varaamiseen perustuvan mittanormaalin nanometrikokoluokan hiukkasille (kuva 1). TTY:n kehittämään laitteistoon kuuluva hiukkasgeneraattori tuottaa kokojakaumaltaan tunnettuja hiukkasia, joilla jokaisella on yksi alkeisvaraus. Hiukkasten lukumääräpitoisuus saadaan määritettyä mittaamalla hiukkasten indusoima sähkövirta ja kaasun tilavuusvirta. Menetelmän suurimpia



Kuva 1. Mittanormaali hiukkasten lukumääräpitoisuudelle.

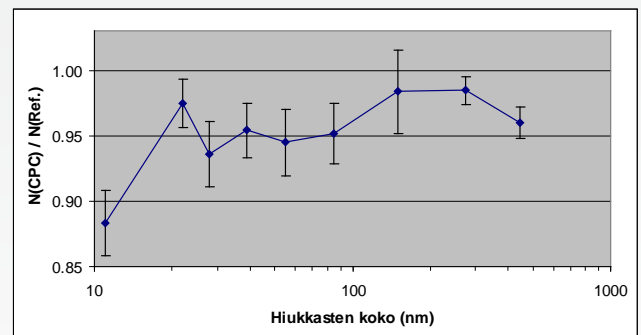
haasteita ovat hiukkasten varaustiheyden mittauksen luotettavuus, sillä mitatut sähkövirrat ovat ainoastaan 10–100 fA, sekä hiukkasten lukumäärätiheyden epäsymmetria näytteenotossa. Projektissa saavutettiin huomattavaa kehitystä hiukkasten varaustiheyden mittauksen osalta. MIKESissä kehitettiin pienten sähkövirtojen kalibrointiin tarkoitettu tasavirtalähde, jolla saavutettiin merkittävä parannus virran mittauksen epävarmuuteen. Kalibrointimenetelmän luotettavuus varmistettiin kahdenkeskisellä vertailulla Saksan metrologialaitoksen (PTB) kanssa. Jäljitettävyyden generoitujen hiukkasten koolle saatiin atomivoimamikroskoopin (AFM) avulla.

Yhdessä muiden eurooppalaisten metrologian tutkimuslaitosten kanssa tutkittiin eri menetelmiä nanopartikkeleiden koon mittaamiseksi (kuva 2).



Kuva 2. AFM-kuva 200 nm lateksipartikkeleista.

Projektissa kehitetyllä hiukkasten lukumääräpitoisuuden mittanormaalilla voidaan jäljitettävästi kalibroida hiukkaslaskureita (kuva 3) hiukkaskoolle 10–500 nm ja pitoisuuksille 5000–40 000 hiukkas/cm<sup>3</sup>. Mittanormaalien suhteellinen epävarmuus ( $k=2$ ) lukumäärätiheydelle on alle 5 % koko mittausalueelle. Kehitettävällä laitteistolla on myös kaupallista potentiaalia.



Kuva 3. Hiukkaslaskurin (CPC) havainnointitehokkuus (CPC:n hiukkasipitoisuus jaettuna mittanormaalien hiukkasipitoisuudella).

Konsortio: NPL + MIKES, PTB, INM, CMI, METAS, INRIM, CEM ja TTY.

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Martti Heinonen

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 402



# NANOTRACE UUSIA JÄLJITETTÄVYYSREITTEJÄ NANOMETROLOGIAAN

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

Tarkat dimensiomittaukset ovat tärkeitä modernin elämän useimmilla alueilla ja kasvussa etenkin ICT-alalla sekä nanoteknologiassa.

Puolijohteiden valmistuksessa laserinterferometrit ovat välttämättömiä valomaskien sekä piikiekkoskanereiden paikoitusmittauksissa. Maskimetrologiassa mittalaitteiden toistettavuudelta vaaditaan jo 0,3 nm ( $3\sigma$ ) tarkkuutta. Käytettäviltä interferometreiltä vaaditaan reilusti alle 0,1 nm tarkkuustasoa. Interferometreille tämä tarkkuustaso on haastava, sillä se on vain murto-osa käytettävän laservalon aallonpituudesta.

Tässä tutkimushankkeessa tavoitteena oli 10 pikometrin tarkkuustason saavuttaminen kehitettävien uusien interferometrinen tekniikoiden avulla. Tavoitetaso oli yhtä suuruusluokkaa parempi kuin silloinen paras mittauskyky. NANOTRACE-projekti loi tulevaisuuden laitteille atomimittakaavan jäljitettävyyttä. Kehitetyt uudet menetelmät testattiin röntgensädeinterferometriä vastaan laboratoriossa ja toisaalta kehitettiin mittausalueelle sopiva siirtonormaali.

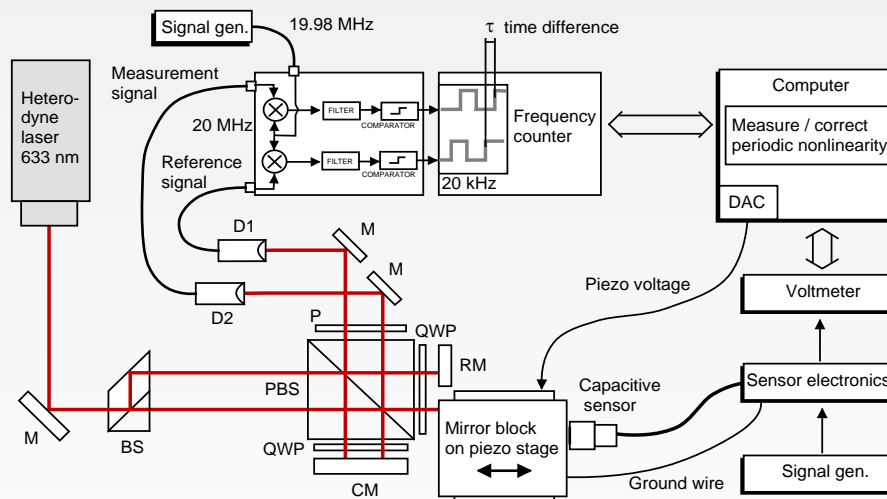
MIKES kehitti hankkeessa interferenssisignaalin aikaeromittauksen ja kapasitiivisen anturin käyttöön perustuvan jaksollisen epälinearisuuden eliminointimenetelmän [1]. Menetelmän etuna on yksinkertaisuus ja edullisuus. Jaksollisen epälinearisuuden määrittäminen voidaan tarvittaessa tehdä vaikka "online". Menetelmää testattiin vertaamalla NPL:n röntgeninterferometriin, jonka asteikon 192 pikometrin jaksollisuus perustuu piin hilavakioon. Tulosten mukaan MIKESin menetelmä saavutti 10–20 pm lineaarisuusvirhetason. Hankkeen tulokset hyödyntävät mm. tarkkojen litografialaitteiden sekä nanometriskaalan mittalaitteiden valmistajia.

Konsortio: INRIM + MIKES, BEV, CMI, NPL, PTB ja UME

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Antti Lassila

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 413



Kuva 1. Kehitetyn menetelmän testauskokoontalo.

[1] J. Seppä, V. Korpelainen, M. Merimaa, G. B. Picotto and A. Lassila, A method for linearization of laser interferometer down to picometre level with a capacitive sensor, Measurement Science and Technology, 22 094027 (2011).

# LONGDISTA PITKIEN ETÄISYYKSIEN MITTAUS ILMASSA

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

Valmistava teollisuus, ydinvoimateollisuus sekä geodesia tarvitsevat mittalaitteita, joilla 10 m – 1 km etäisyyksien pituusmittaukset olisi mahdollista tehdä noin  $10^{-7}$  suhteellisella epävarmuudella. Esimerkiksi ilmailuteollisuudelle on tärkeää tietää tarkasti lentokoneen siipien asento, koska tämä vaikuttaa lentokoneen polttoainetalouteen.

Ydinvoimateollisuus taas on kiinnostunut ydinjätteen loppusijoituspaikan kallioperän yhtenäisyydestä ja vakaudesta, joista saadaan tietoa mm. mittaamalla maankuoren pieniä liikkeitä loppusijoituspaikan ympäristössä. Pienemmästä epävarmuudesta on hyötyä myös muissa geodeettisissa mittauksissa, esimerkiksi maankuoren muodon tarkassa seurannassa maanjäristysten ja vulkaanisen toiminnan ennustamiseksi sekä tarkan satelliittipaikannuksen virheiden tutkimuksessa.

Käytännöllisiä mittalaitteita, joilla tavoiteltu 0,1 mm mittausepävarmuus 1 km matkalla olisi mahdollista saavuttaa ulkoilmassa tai teollisuusolosuhteissa, ei kuitenkaan ole vielä olemassa. Pitkien etäisyyksien mittauksia varten projektissa kehitettiin synteettisiin aallonpituuksiin perustuvaa interferometriä. Koko projektin kannalta oleellista oli ilman taitekertoimen

mittaus ja vastaava korjaus interferometrin lukemaan. Projektissa taitekertoimen määrittämiseen liittyvät ongelmat pyrittiin ratkaisemaan moniaallonpituusinterferometrian ja spektroskopian keinoin.

MIKES osallistui hankkeeseen kehittämällä spektroskooppista mittausmenetelmää keskimääräisen ilman taitekertoimen mittaamiseen pitkillä etäisyyksillä. Referenssinä käytettiin Geodeettisen laitoksen Nummelan 864 m perusviivaa, jolla hyvissä olosuhteissa 0,1 mm mittausepävarmuus on saavutettavissa. Perusviivalla mittausmenetelmä perustuu 50-luvulta peräisin olevaan mutta edelleen huipputarkkaan Väisälä-interferometriin.

MIKESin ohella Nummelassa ovat vierailleet Saksan ja Ranskan metrologialaitokset (PTB ja LNE). PTB on myös vierailut MIKESin tiloissa Espoossa. Nummelan perusviivan lisäksi MIKES on tehnyt mittauksia Itävallan 1080 m mittaisella perusviivalla Innsbruckissa (Kuva 1).

Spektroskopiaan perustuvalla mittausmenetelmällä MIKES on saavuttanut lämpötila- ja ilmankosteusmittauksissa tarkkuudet, joilla ilman keskimääräinen taitekerroin voidaan määrittää  $10^{-7}$  suhteellisella tarkkuudella, mikä puolestaan mahdollistaa vastaavan tarkkuuden saavuttamista interferometrisissä pituusmittauksissa. Lisäksi MIKES on saavuttanut 7 mK lämpötilaresoluution 67 m matkalla, mikä on tähän saakka tarkin julkaistu spektroskopiaan perustuva lämpötilanmittaus.

Konsortio: LNE + MIKES, BEV, CEM, CMI, INRIM, NMI VSL, PTB ja Geodeettinen laitos.

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Mikko Merimaa  
etunimi.sukunimi@mikes.fi  
puh. 029 5054 419

Viitteet:  
T. Hieta, M. Merimaa, M. Vainio, S. Seppä, and A. Lassila, "High-precision diode-laser-based temperature measurement for air refractive index compensation", Appl. Opt. 50, 5990-5998 (2011).  
T. Hieta, M. Merimaa, "Spectroscopic Measurement of air Temperature", Int. J. Thermophys. 31, 1710 (2010).



Kuva 1. MIKES Innsbruckin 1080 m viivalla.

# qu-CANDELA K O H T I POHJAISTA FOTONIEN MITTANORMAALIA

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

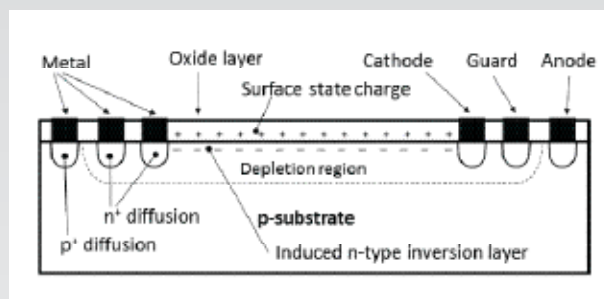
Yksi SI-mittayksikköjärjestelmän perussuureista on kandela, joka kuvaa ihmissilmän näkemän valon määrää. Projektissa toteutettiin uusia, jäljitettäviä mittausten menetelmiä valon määrälle tehotasolta muutama fotoni sekunnissa tasolle  $10^{14}$  fotonia sekunnissa (100  $\mu\text{W}$ ).

MIKES johti projektissa työpakettia, jossa saavutettiin merkittävä parannus optisen tehon mittaustarkkuudessa kuvien 1 ja 2 erikoisrakenteisen pii-fotodiodin avulla (Predictable Quantum Efficient Detector, PQED). Fotodiodit on tehty erittäin puhtaasta p-tyyppin puolijohteesta, minkä ansiosta varauksenkuljettajien häviömekanismit on saatu eliminoitua lähes täysin. Kehitetty PQED on ensimmäinen detektori, jonka kvanttiyhötysuhde on ennustettava ja tasanyksi huoneenlämpötilassa 80 ppm:n (ppm=miljoonasosa) standardiepävarmuudella [1]. PQED-detektorilla (kuva 3) saavutetaan näin pieni mittausepävarmuus koko näkyvällä aallonpituusalueella, kun fotodiodien yli on kytketty 5 V:n estosuuntainen jännite. Aikaisemmin vastaavaan tarkkuuteen on päästy suuritöisillä mittauksilla vain  $-250$  °C:een lämpötilaan jäädytetyn kryogeenisen radiometrin avulla. Tässä projektissa PTB kehitti kryogeeniseen radiometriin perustuvan laitteiston, jolla voitiin todentaa PQED:n mittausepävarmuus huoneenlämpötilassa.

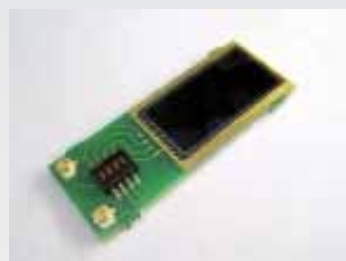
Kun PQED jäädytettiin nestetyypen lämpötilaan (noin  $-200$  °C), saavutettiin jopa ilman estosuuntaista jännitettä sama kvanttiyhötysuhde kuin huoneenlämpötilassa. Matalassa lämpötilassa toimimisesta on se etu, että fotodiodien kvanttiyhötysuhde voidaan määrittää laskennallisesti alle 10 ppm:n mittausepävarmuudella. Tulevan tutkimustyön haasteeksi jää todentaa PQED:n mittausepävarmuus matalissa lämpötiloissa.

Suomalainen mittaustekniikka-alan yritys Fitecom Oy (www.fitecom.com) tuo huoneenlämpötilassa toimivan PQED:n myyntiin. PQED:n etuna primäärinormaalina on, että se mahdollistaa optisen tehon yksikön reaalisoinnin helposti operoitavan huoneenlämpötiladetektorin avulla ilman nesteheliumin lämpötilaan jäädytettävää kryogeenista radiometriä.

[1] J. Gran, T. Kübarsepp, M. Sildoja, F. Manoocheri, E. Ikonen, and I. Müller, Simulations of a Predictable Quantum Efficient Detector with PC1D, Metrologia 49, S130-S134 (2012).



Kuva 1. VTT:n valmistaman fotodiodin poikkileikkaus.



Kuva 2. Fotodiodin mitat ovat 22 mm x 1 mm.



Kuva 3. PQED:n rakenne. Ulosheijastuvan säteen teho on noin 50 ppm sisäänmenevästä.

Konsortio: INRIM + MIKES, PTB, NPL, JV, Metroser, CMI ja Aalto-yliopisto

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Farshid Manoocheri  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 050 5902 483



# REUNIAM AMPEERIN UDELLEENMÄÄRITTELY

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

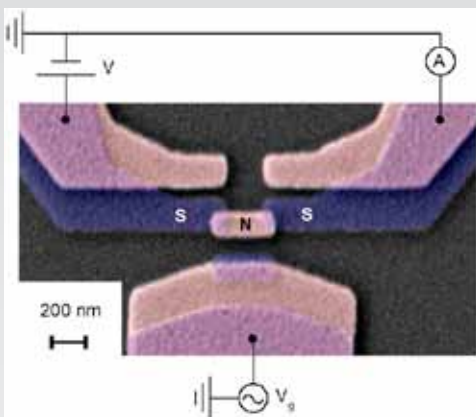
PÄÄTTYNEET PROJEKTIT

SI-mittayksikköjärjestelmän perusteita uudistetaan lähivuosina ampeerin osalta. Ampeeria ei enää tulevaisuudessa määritellä sähkövirtaa kuljettavien johtimien välisen voiman avulla, vaan elektronin varukselle sovittavan vakioarvon kautta.

REUNIAM-hankkeessa tutkittiin kolmea tapaa pumpata elektroneita yksitellen, jolloin sähkövirta saadaan elektronin varauksen ja pumpaustajuuden tulona. Jännitteen Josephson-normaalien ja resistanssin kvantti-Hall-normaalien rinnalle siis kehitettiin kolmea kvanttinormaalialia, jollaisten avulla sähkösuureiden mittayksiköt voi sitoa luonnonvakioiden arvoihin. Kaksi vaihtoehtoa, suprajohde-normaalimetallin nanorakenteeseen perustuva SINIS-käntöportti sekä puolijohdenanorakenteeseen perustuva virtapumppu, osoittautuivat tarkkuuden, maksimivirran ja toteuttamiskelpoisuuden kannalta lupaavimmiksi jatkokehityksen kannalta. Projektin aikana kummankin rakenteen tutkimuksessa saavutettiin merkittäviä tieteellisiä ja teknisiä edistysaskeleita.

Projektin lopullinen tavoite oli niinsanotun kvanttimitrologiakolmion sulkeminen eli sen osoittaminen, että sähkövirran, jännitteen ja resistanssin kvanttinormaalit ovat keskenään ristiriidattomia. Toteutus on tehty kolmen rinnakkaisen reitin kautta, joista yksi on rakennettu MIKESiin. Kaikki kokeet ovat edenneet lupaavasti, mutta kvanttimitrologiakolmion sulkeminen riittävällä tarkkuudella on niin suuri haaste, että sitä ei pystytty toteuttamaan millään kolmesta koejärjestelystä 3-vuotisen projektin aikana.

MIKESin ja hankkeen virallisen yhteistyökumppanin, Aalto-yliopiston Kylmälaboratorion, tutkimuskohdeena oli SINIS-käntöportti, jonka Kylmälaboratorion tutkijat keksivät vuonna 2007. Projektin aikana SINIS-käntöportista ja sen käytöstä kvanttivirtanormaalina on tullut kansainvälinen tutkimuskohde ja MIKES on rakentanut ehkä maailman parhaiten häiriösuojatun mittaustympäristön tämän tyyppisten komponenttien



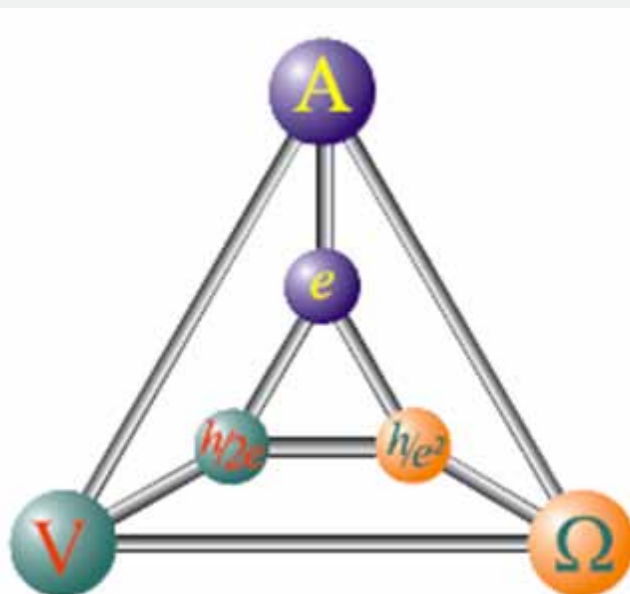
Kuva 1. Yksittäisten elektronien pumpaukseen käytettävä porttipiiri.

ominaisuuksien tutkimiseen alle 100 mK:n lämpötiloissa sekä kvanttimitrologiakolmion ja muiden metrologiasovellusten toteuttamiseen. MIKES on julkaissut projektissa saamia tuloksia seitsemässä kansainvälisten julkaisusarjojen artikkeleissa ja yhdessä väitöskirjassa sekä lukuisissa konferensseissa.

Suomessa metrologiakolmioyhteistyöhön osallistuivat MIKESin ja Aalto-yliopiston lisäksi myös VTT:n kvanttielektronikan tutkijat muiden tutkimushankkeiden puitteissa.

Konsortio: PTB + MIKES, LNE, METAS, NMI-VSL ja NPL

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Antti Manninen  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 416



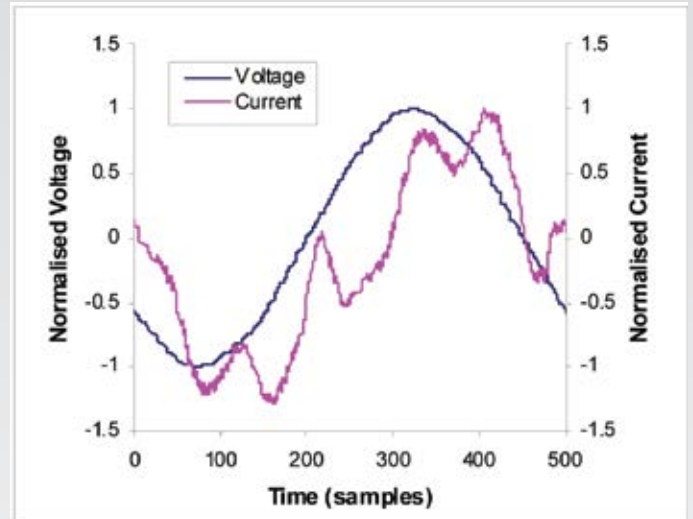
Kuva 2. Kvanttimitrologiakolmio

# POWEREMRP UUDEN SUKUPOLVEN TEHON JA ENERGIAN MITTAUSTEKNIIKAT

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

Avautuneilla sähkömarkkinoilla sähkön laadun merkitys kasvaa. Huonolaatuinen sähkö näkyy esimerkiksi energia-alan yhtiöille siirtohäviöinä ja kuluttajille sähkökatkoksina. Uusiutuvien energiamuotojen kasvava osuus asettaa uusia haasteita sähkön hyvän laadun ja sähköverkon stabiilisuuden ylläpitämiselle. Näihin haasteisiin vastaaminen asettaa uusia vaatimuksia mittaustekniikalle ja tarvittaville jäljitettävälle mittauksille.

MIKES osallistui tässä projektissa kahteen työpakettiin. MIKES oli mukana mm. verifioimassa laajakaistaisten näytteistävien mittalaitteiden ominaisuuksia sähkönlaatumittauksia varten. Toteutetun kahdeksankana-  
vaisen laitteiston kaistanleveys on 100 kHz ja mittauspävarmuudet 0,01 % ja 5  $\mu$ rad amplitudin ja vaihe-eron osalta.



Kuva 1. Esimerkki sähköverkosta mitatusta säröytyneestä jännitteestä ja virrasta.



Kuva 2. Virtamuuntajien kalibrointia niiden käyttöpaikalla, 400 kV sähköasemalla.

Toisessa työpaketissa MIKES kehitti Rogowskin kelaan perustuvan avattavan virtanturin suurten virtojen tarkkuusmittauksia varten. Anturi on lämpötilakompensoitu, ja se on kerta-luokkaa epäherkempi sekä ympäristön että virtakiskon lämpenemiselle kuin perinteiset Rogowskin kelaan perustuvat ratkaisut. Koska Rogowskin kela on ilmasydäminen, perinteiselle virtamuuntajalle tyypillisiä muuntajasydämen saturoitumisongelmia ei tässä ratkaisuissa ole. Saavutettu lineaarisuus on erinomainen; muutosuhteen muutos on vähemmän kuin 5 ppm (ppm=miljoonasosa) välillä 10 A – 6000 A.



Kuva 3. Avattava Rogowskin kela käyttöpaikalla tehtäviä virtakalibrointeja varten.

Konsortio: NPL + MIKES, BEV, CMI, AREPA, LNE, PTB, INRIM, NMi VSL, JV, INM, SMU, MIRS, CEM, SP ja METAS

Lisätietoja:

Projektipäällikkö Jari Hällström

etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 441

# JOSY SEURAAVAN SUKUPOLVEN KVANTTIJÄNNITEJÄRJESTELMÄT LAAJALLE SOVELLUSALUEELLE

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

Suprajohdelliitosten Josephson-ilmiöön perustuva tasajännitteen kvanttinormaali mullisti sähkömetrologian 1970-luvulla. Sen avulla voidaan toteuttaa luonnonvakioiden arvoista määräytyvät, aina ja kaikkialla samat jännitetasot, jopa alle 0,1 miljardisosan suhteellisella epävarmuudella. Myös Josephson-vaihtojännitenormaali on ollut tavoitteena ja tutkimuksen kohteena jo pitkään, ja nyt se alkaa olla valmis metrologisiin ja muihin sovelluksiin.

JOSY-hankkeessa konsortion tavoitteena oli kehittää pienille taajuuksille (alle 10 kHz) alle miljoonasosan suhteellisen epävarmuuden mahdollistavia vaihtojännitenormaaleja aina 10 V:n jännitetasolle asti. Lisäksi tavoiteltiin suuremmille, jopa 1 MHz:n taajuuksille yltävää yhtä tarkkaa, mutta jännitteeltään vaatimattomampaa 100 mV:n tasolle yltävää mittanormaalia. Suomi, jossa aiheeseen liittyvää tutkimusta on tehty MIKESin ja VTT:n toimesta jo 10 vuotta, on yksi maailman kärkimaita. MIKESin työpanos liittyi pientaajuisten 10 V vaihtojännitenormaalien tutkimukseen.

MIKESin idea tarkalle vaihtojännitenormalille on poikkeuksellisen yksinkertainen: tuotetaan Josephson-jännitenormalipiirillä suorakaideaalto, jonka amplitudi on tarkasti tunnettu (jännite on kvantittunut, ja se voidaan laskea muutamista luonnonvakioista ja hyvin tarkasti mitattavissa olevasta millimetriaalto-taajuudesta). Tämän suorakaideaallon perustaajuisen sinikomponentin amplitudi on myös tarkasti tunnettu ja sitä voidaan käyttää jäljitettävyyden lähteenä. Käytännössä vaihtojännitenormalin ulostulona käytetään perinteistä puolijohdeteknologiaan perustuvaa tarkkuussyntetisaattoria, jonka lähdejännitettä verrataan Josephson-suorakaideaallon perustaajuuskomponentin amplitudiin. Tämän kaltaista mittanormaalia voidaan kuormittaa helposti ilman tarkkuuden heikkenemistä ja taajuusalue ulottuu ehkä jopa kymmeneen kilohertzeihin. Konsortion muiden jäsenten tutkimien ratkaisujen on havaittu rajoittuvan n. 1 kHz:n taajuudelle, jonka yläpuolella tarkkuus heikkenee jyrkästi.

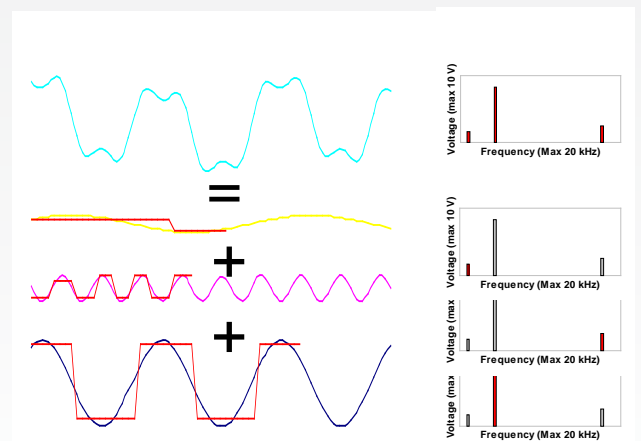
Projektin aikana MIKES suunnitteli ja rakensi edellä kuvatun kaltaisen mittanormalin ja onnistui todentamaan sen yltävän tavoitetarkkuuteen 1 kHz taajuudella ja 1 V jännitetasolla. On täysin mahdollista, että toteu-

tettu ratkaisu yltää samalla tarkkuudella myös suuremmille taajuuksille, mutta tätä ei ehditty projektin kuluessa todentamaan. Kehitystyö jatkuu yhteistyössä PTB:n kanssa.

JOSY-projektin kuluessa MIKESin käyttämän suorakaideaallon edut ymmärrettiin myös muualla konsortion sisällä. Yhteistyössä PTB:n kanssa kehitettiin ensimmäinen sovellus tämän kaltaiselle vaihtojännitenormalille: uudentyyppinen Josephson-jännitenormaliin perustuva impedanssilta. Tällä mittaajärjestelmällä voidaan mitata periaatteessa kahden mielivaltaisen impedanssin suhde huomattavan paljon joustavammin kuin perinteisillä mittaussilloilla. Käytettävissä oleva taajuusalue on merkittävästi laajempi ulottuen 10 Hz:stä 10 kHz:iin. Ensimmäisissä mittauksissa saavutettiin selvästi alle 0,1 ppm tarkkuus. Tämänkin työ jatkuu tavoitteena kapasitanssi- ja induktanssimittaukset.

Konsortio: PTB + MIKES, BEV, CEM, INRIM, LNE, METAS, NMI VSL, NPL ja SMU

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Jaani Nissilä  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 421



Kuva 1. Summa-aalto muodostuu kolmesta siniaallosta.



# ULQHE HUIPPUTASON METROLOGISTEN KVANTTI-HALL-LAITTEIDEN KEHITTÄMINEN

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

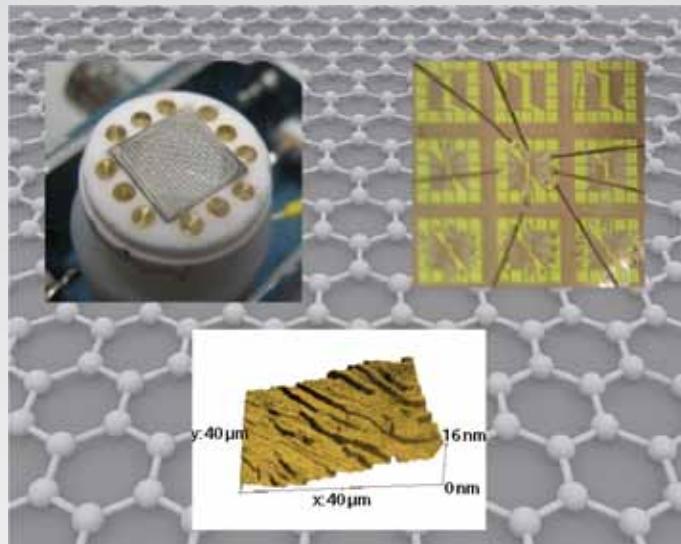
PÄÄTTYNEET PROJEKTIT

Kvantti-Hall-ilmioon liittyvistä tutkimuksista on myönnetty jo kolme Nobelin palkintoa, mutta vieläkin ilmiön ainoa käytännön sovellutus on resistanssin kvanttinormaali, jonka avulla ohmi voidaan toteuttaa muutaman miljardisosan suhteellisella epävarmuudella. ULQHE-hankkeessa kvantti-Hall-resistanssinormaalia kehitettiin uudelle tasolle erityisesti käytettävyyttä parantamalla.

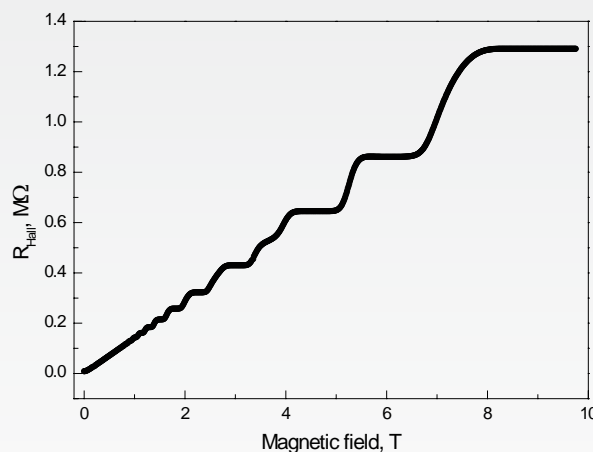
Perinteisellä kvantti-Hall-normaalilla voidaan tuottaa vain 12,9 k $\Omega$ :n resistanssitaso, ja sen käyttö esim. 100 ohmin resistanssinormaalien kalibrointiin vaatii monimutkaisen laitteiston. Projektissa tutkittiin ja kehitettiin rinnan- ja sarjaankytkettyihin kvantti-Hall-elementteihin perustuvia resistanssinormaaleita 100  $\Omega$ :n ja 1 M $\Omega$ :n välille. Tarkkuusmittauksissa perinteisiä kvantti-Hall-normaaleja vasten osoitettiin, että tällaiset kvantti-Hall-matriisit toimivat odotusten mukaisesti muutaman miljardisosan mittaustarkkuuden rajoissa.

Nykyisten kvantti-Hall-normaalien toinen ongelma on, että ne täytyy jäähdyttää hyvin matalaan, noin 1 kelvinin lämpötilaan hyvin korkeassa, 10 teslan luokkaa olevassa magneettikentässä. Manchesterin yliopiston fyysikot, jotka saivat tutkimuksistaan fysiikan Nobelin palkinnon vuonna 2010, onnistuivat kuitenkin vuonna 2004 tutkimaan kokeellisesti aivan uudentyypistä materiaalia, yhdestä hiiliatomikerroksesta muodostuvaa grafeenia. Siinä kvantti-Hall-ilmio voidaan havaita nykyistä korkeammissa lämpötiloissa ja/tai matalammassa magneettikentässä. ULQHE-projektissa tutkittiin ja kehitettiin grafeenin soveltuvuutta metrologiakäyttöön.

MIKESin osuus projektissa oli varsin pieni mutta tuloksekas. Kryogeenisellä tarkkuusmittauslaitteistolla MIKESissä tutkittiin rinnan- ja sarjaankytketyistä kvantti-Hall-elementeistä valmistettuja komponentteja ja todennettiin niiden toimivuus muutaman miljardisosan epävarmuustasolla. Mittausosaamista vietiin toiselle projektipartnerille tutkijavaihtovierailulla. MIKES osoitti myös, että kaupallisella resistanssilalla voidaan kalibroida 100 k $\Omega$  - 10 M $\Omega$  resistanssinormaaleita suoraan 10 M $\Omega$ :n kvantti-Hall-matriisia vasten. Yhdessä Aalto-yliopiston kanssa MIKES lisäksi kehitti piikarbidialustalle epitaktisesti kasvatettavien grafeenikerrosten valmistus- ja mittausten menetelmiä.



Kuva 1. Grafeeni on tulevaisuuden materiaali.



Kuva 2. Kvantti-Hall-ilmioon perustuva resistanssi magneettikentän funktiona.

Konsortio: LNE + MIKES, PTB, INRIM, CEM ja METAS

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Alexandre Satrapinski  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 431

# OCS OPTISET KELLOT SEKUNNIN UUDELLEENMÄÄRITTELYSSÄ

ERA-NET PLUS 2008 - 2011

PÄÄTTYNEET PROJEKTIT

Aika- ja taajuusnormaalien — kellojen — suuri merkitys yhteiskunnalle on nähtävissä SI-mittayksikköjärjestelmästä, modernin tieteen ja teknologian perustasta, joka laajalti perustuu sekuntiin. Ajan lisäksi mittayksikköjärjestelmän sähkösuureet ja metri realisoidaan sekunnin ja luonnonvakioiden avulla.

Tarkka aika itsessään on välttämätön modernille yhteiskunnalle esimerkiksi tietoliikenteen ja navigaation ajoitusvaatimusten vuoksi. Tulevaisuudessa mittayksikköjärjestelmää todennäköisesti uudistetaan siten, että useimmat perusyksiköt, mukaan lukien kilogramma, voidaan realisoida sekunnin ja luonnonvakioiden avulla.

Kellot, joilla sekunti realisoidaan, ovat myös käymässä läpi suurinta muutosta sitten atomikellojen tulon 1950-luvulla. Taajuuskampa, joka kehitettiin vuosituhannen vaihteessa, mahdollisti vaihekoherentin linkin optisten alueen ja radiotaajuuksien välillä avaten näin mahdollisuuden käyttää optisia kelloja ajan muodostamiseen. Johtuen korkeasta toimintataajuudesta, optisten kellojen suorituskyky voi teoriassa olla kertaluokkia radiotaajuuskelloja parempi.

Optisten kellojen yhdenmukaisuus laboratorioiden välillä on tällä hetkellä samalla tasolla,  $2 \times 10^{-16}$ , kuin mihin parhailla Cs-atomikelloilla päästään. Optisten kellojen kehittäminen on työlästä, eikä parasta lähestymistapaa vielä tiedetä.

Projektissa tutkittiin eri laboratorioissa kehitettyjen optisten kellojen yhdenmukaisuutta ja kehitettiin menetelmiä niiden suorituskyvyn parantamiseen. Projektin puitteissa MIKES on tehnyt kaksi tutkimusvierailua PTB:hen.

Konsortio: LNE + MIKES, PTB, NPL ja INRIM

Lisätietoja:  
Projektipäällikkö Mikko Merimaa  
etunimi.sukunimi@mikes.fi, puh. 029 5054 419



Kuva 1. Kanadan kansallisen metrologia-laitoksen NRC:n primäärinormaali Cs-fountain clock (Louis Marmet)  
Kuva: Markku Vainio