

# Kalibrointipalvelut

Pituus ja kulma

VTT MIKES





Copyright © VTT MIKES 2022

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

## VTT MIKES

## Pituus, kulma ja geometria

Kvantitatiivinen mikroskopia – atomivoimamikroskooppi.....	4
Nanopartikkelien karakterisointi.....	6
Laserinterferometriä kalibrointi .....	8
Mittapalojen interferometrinen kalibrointi .....	10
Mittapalojen mekaaninen vertailukalibrointi.....	12
Muodon ja pinnankarheuden 2D- ja 3D-mittaus.....	14
Optinen pinnanmuodon mittaus.....	16
Tarkkojen sisä- ja ulkopuolisten mittojen sekä kierteiden mittaukset ....	18
Koordinaattimittaus .....	20
Optinen koordinaattimittaus – videomittaus.....	22
Tarkkojen piirtomittojen kalibroinnit.....	24
Porrasmittapalojen tarkat kalibroinnit.....	26
Mittalatat, nauhat ja etäisyysmittarit.....	28
Tasomaisuuden ja muodon interferometrinen mittaus .....	30
Työstökone mittaukset.....	32
Ympyrämaisyyden mittaus .....	34
Mikroskoopit ja niiden kalibrointinormaalit.....	36
Kulman ja kohtisuoruuden mittaus .....	38
Takymetrit .....	40

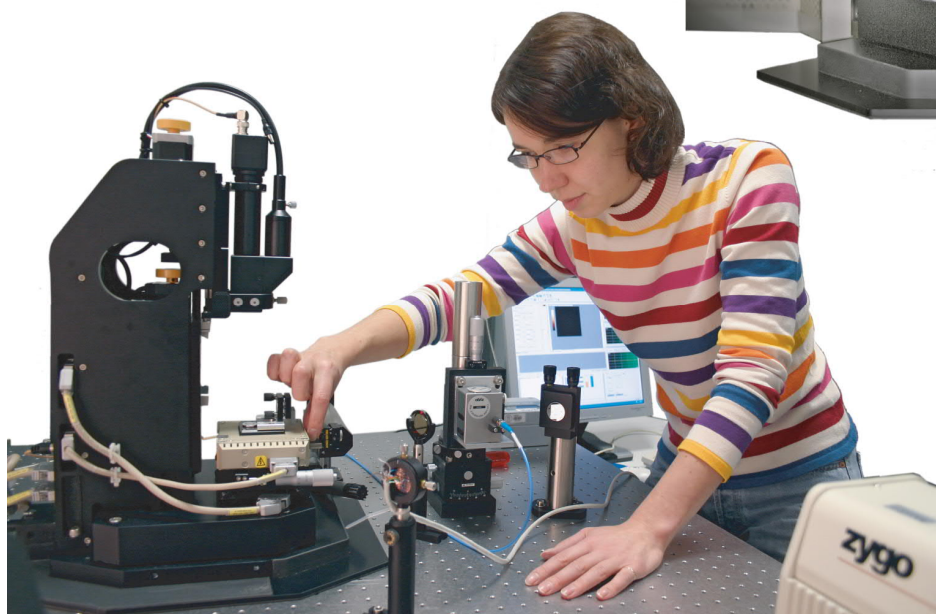
# Kvantitatiivinen mikroskopia – atomivoimamikroskooppi

Virpi Korpelainen, erikoistutkija  
Puh. +358 050 410 5504  
[virpi.korpelainen@vtt.fi](mailto:virpi.korpelainen@vtt.fi)

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

Nanoteknologian kehitys ja tutkimus ovat lisänneet tarkkojen mittausten tarvetta tutkimuslaitoksissa ja teollisuudessa. Erityisesti atomivoimamikroskoopilla tehtäviä (AFM) erilaisia mittauksia käytetään yleisesti monin paikoin yliopistoista yrityksiin. Tarkkojen ja luotettavien nanometrialueen dimensiomittausten takaamiseksi VTT MIKESillä on jäljitettävästi kalibroitu atomivoimamikroskooppi (AFM).

Täten VTT MIKES voi tarjota jäljitettäviä mittauksia myös nanometrialueella asiakkaiden tarpeita vastaamaan. Lisäksi kalibroimme AFM-siirtonormaaleja.

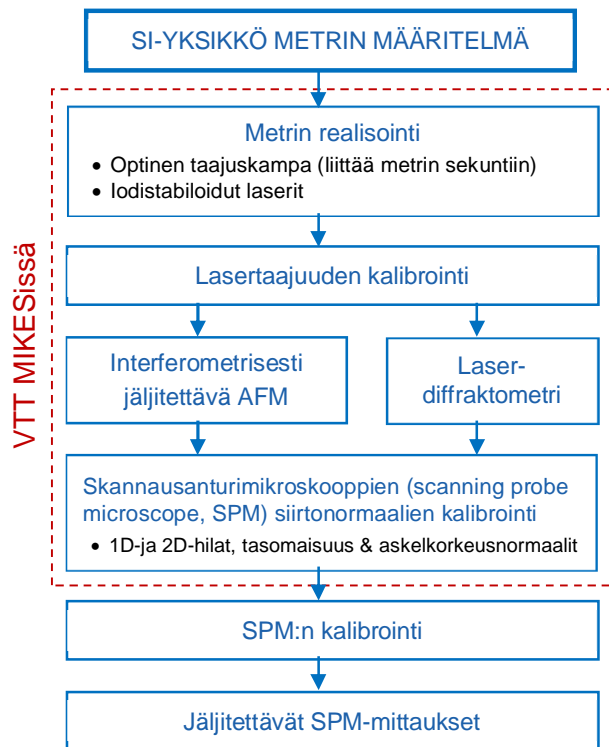


Kuva 1. Lasersäteiden suuntaus AFM:n y-akselin interferometristä kalibrointia varten.

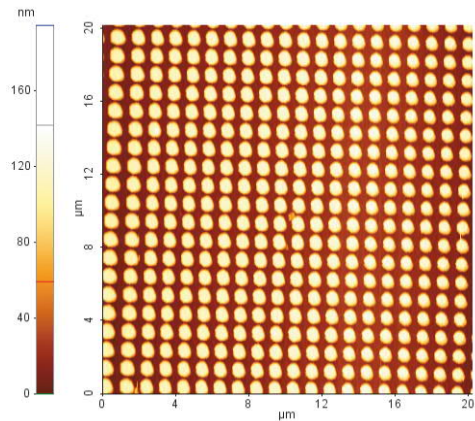
VTT MIKESillä on PSIA XE-100 atomivoimamikroskooppi, joka on kalibroitu VTT MIKESissä interferometrisesti ja käyttäen laserdiffraktiolla kalibroitua hila. AFM on jäljitettävissä metrin määritelmään. AFM:n xy-liikkeet on mekaanisesti erotettu z-liikkeistä. Tämä lisää liikkeiden lineaarisuutta, vähentää tasopoikkeamia ja eliminoi liikkeiden ylikuulumisen. Laitteen rakenne mahdollistaa melko suurten näytteiden mittaamisen ja mittaukset voidaan tehdä tavallisimmilla mittaustavoilla: kosketus, kosketukseton, dynaaminen (tapping) ja lateraalivoima. Mittaustulokset voidaan analysoida SPIP-ohjelmistolla <sup>1</sup>.

Atomivoimamikroskoopit on kalibroitava, koska kalibroimattomien laitteiden asteikkovirheet vaihtelevat tyypillisesti välillä 2–20 %. Mittausvirheet voivat lisäksi aiheuttaa vääristymiä mitatussa kuvassa, mitä voi olla vaikea havaita kuvasta. Uusissa, edistyneemmissä AFM-mikroskoopeissa on parempi tarkkuus, mutta tämä kehitys ei poista kalibroinnin tarvetta. Eriyisesti kaikissa kvantitatiivisissa mittauksissa mitausten tulisi olla jäljitettävissä metrin määritelmään. AFM:t kalibroidaan yleensä käyttämällä kalibroituja siirtonormaaleja.

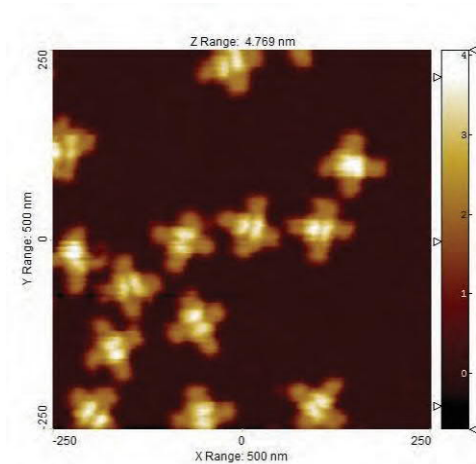
<sup>1</sup> The Scanning Probe Image Processor SPIP™  
<http://www.imagemet.com>



Ominaisuus	Tiedot
Näytteen koko	<100 mm x 100 mm
Näytteen paksuus	<20 nm
Näytteen massa	<500 g
Mittausalue (xy)	100 μm x 100 μm
Mittausalue (z)	12 μm
Resoluutio (xy)	0.15 nm 0.02 nm (pienjännitemoodi)
Resoluutio (z)	0.05 nm 0.01 nm (pienjännitemoodi)
Epävarmuus (k=2), x- ja y-suuntiin	Q [3; 2 L/μm] nm
Epävarmuus (k=2), z-suuntaan	Q [3; 2 L/μm] nm
	$Q [x; y] = (x^2 + y^2)^{1/2}$



Kuva 2. 2D-hilanormaali.



Kuva 3. AFM-kuva Seeman tile -tyyppisestä DNA-nano-origimirakenteesta.

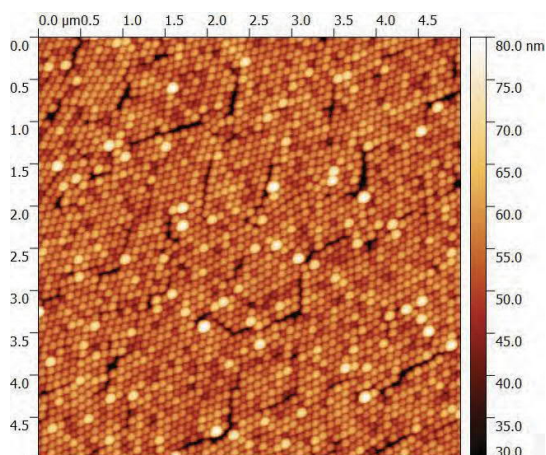


# Nanopartikkelien karakterisointi

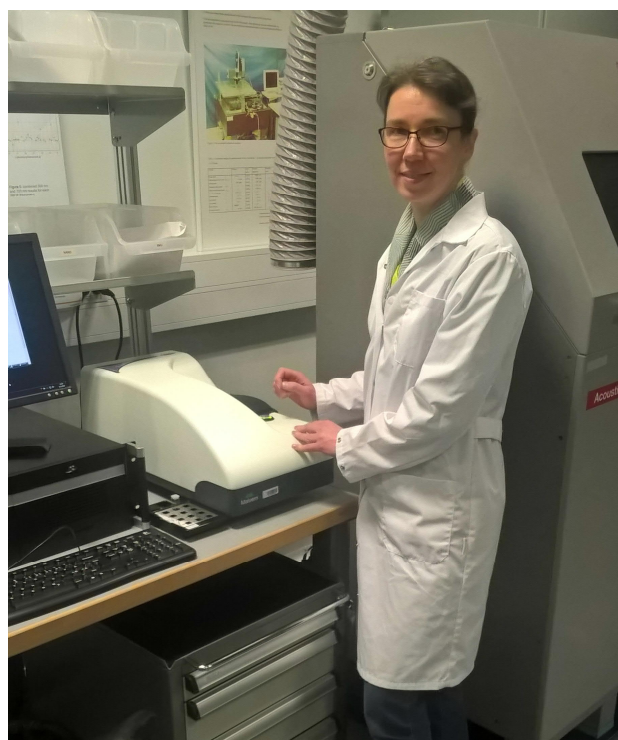
Virpi Korpelainen, Erikoistutkija  
Puh. +358 050 410 5504  
[virpi.korpelainen@vtt.fi](mailto:virpi.korpelainen@vtt.fi)

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

Nanopartikkeleita käytetään yleisesti monissa soveluksissa. Nanopartikkeleiden tarkka karakterisointi on tärkeää tutkimuksessa, tuotannossa ja monilla sovelusaloilla kuten teollisuus, terveys, turvallisuus ja näihin liittyvä sääntely. VTT MIKESissä partikkeleita voidaan karakterisoida kahdella eri menetelmällä: dynaaminen valon sironta (DLS) ja atomivoimamikroskoopi (AFM). Mittausten jäljitettävyyden metrin määrittelyyn tulee VTT MIKESin interferometrisesti jäljitettävän metrologisen AFM:n (IT-MAFM) kautta. Molemmilla menetelmillä on omat hyvät puolensa ja rajoituksensa. DLS on nopea ja tulokset ovat tilastollisesti edustavia. DLS-mittauksissa jo pieni määrä suuria partikkeleita voi estää pienten partikkeleiden havaitsemisen. AFM:llä voidaan mitata sekä partikkelin kokoa että muotoa. Huonona puoleena on, että vain rajallinen määrä partikkeleita voidaan mitata, mikä johtaa huonoon statistiikkaan. Mittauskärjen ja näytteen vuorovaikutus on merkittävä, etenkin kun mitataan pieniä partikkeleita. Joissain tapauksissa myös näytteen valmistus voi olla hankalaa.



Kuva 1. AFM kuva 100 nm:n nanopartikkeleista.



Kuva 2. DLS mittauksia.

Taulukko 1. VTT MIKESissä on kaksi laitetta, jotka soveltuvat nanopartikkeleiden mittauksiin.

Laite	Zetasizer Nano	PSiA XE-100
Mittausmenetelmä	DLS	AFM
Mittaussuure	Kokojakauma Zeta potentiaali	Koko Muoto
Mittausalue	0,3 nm – 10 μm	5 nm – 5 μm
Mittausepävarmuus	2 %	alkaen 1 nm

## Zetasizer Nano

Dynaamista valonsirontaa käytetään partikkeleiden ja molekyylien koon mittaamiseen. Tässä tekniikassa mitataan partikkeleiden diffuusiota, kun ne liikkuvat Brownin liikkeen seurauksena. Tästä liikkeestä laskeaan Stokes-Einstein yhtälöiden avulla partikkeleiden koko ja kokojakauma.

Laser Doppler Micro-electrophoresista käytetään zeta-potentiaalin mittaamiseen. Liuoksessa molekyylit tai partikkelit liikkuvat sähkökentän vaikutuksesta. Tämän liikkeen nopeus on suhteessa molekyylien tai partikkeleiden zeta-potentiaaliin.

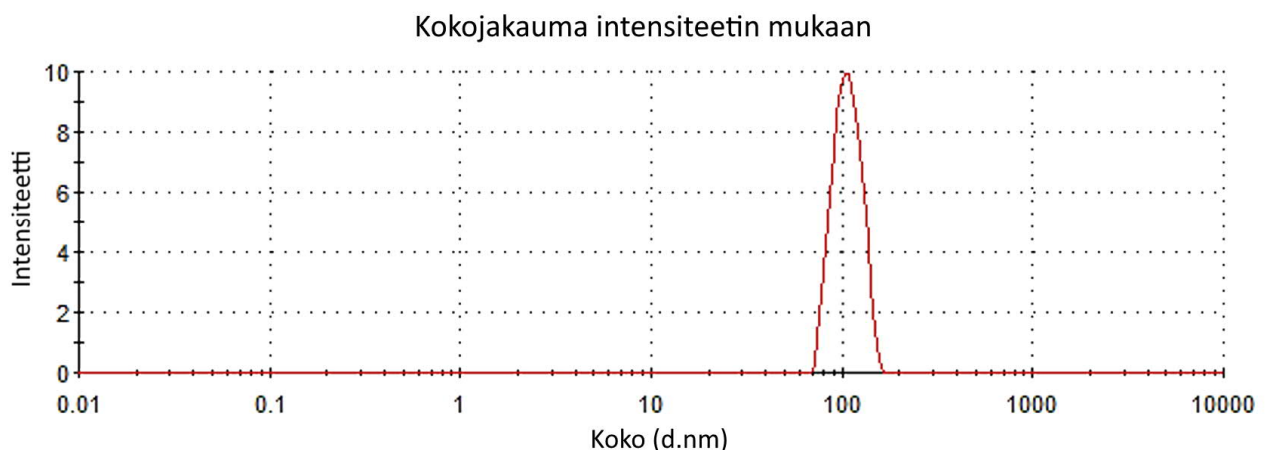
## Nanopartikkeleiden mittauspalvelut VTT MIKESissä

- Nanopartikkeleiden koon ja muodon mittaukset AFM:llä
- Nanopartikkeleiden kokojakauman mittaukset liuoksessa DLS:llä
- Nanopartikkeleiden pintavarauksen (zeta-potentiaalin) mittaukset liuoksessa

## Atomivoimamikroskopia (AFM)

AFM:n mittauspäässä on hyvin terävä kärki, joka skannaa tutkittavaa aluetta. Kun kärki lähestyy pintaa, jossain vaiheessa lyhyen kantaman attraktiiviset voimat taivuttavat mittauspäättä pintaa kohti. Jos kärki tuodaan vielä lähemmäksi pintaa, jolloin kärki koskettaa pintaa alkavat repulsio voimat vaikuttaa ja taivuttavat mittauspäättä pinnasta poispäin.

AFM mittauksessa kuvataan näytteenpinnan muoto skannaamalla mittauskärjellä halutun alueen yli piirto kerrallaan. Pinnan nousut ja laskut taivuttavat mittauspäättä ja muutokset havaitaan paikkaherkällä detektorilla. Takaisinkytkentäluuppi säätelee mittauskärjen korkeutta ja pitää taipuman vakiona. Siten saadaan mitattua tarkka topografiakartta pinnan muodosta.



Kuva 3. DLS tulos noin 100 nm:n nanopartikkeleista.

# Laserinterferometri- kalibrointi

Jeremias Seppä, Erikoistutkija  
Puh. 050 410 5503  
[jeremias.seppa@vtt.fi](mailto:jeremias.seppa@vtt.fi)

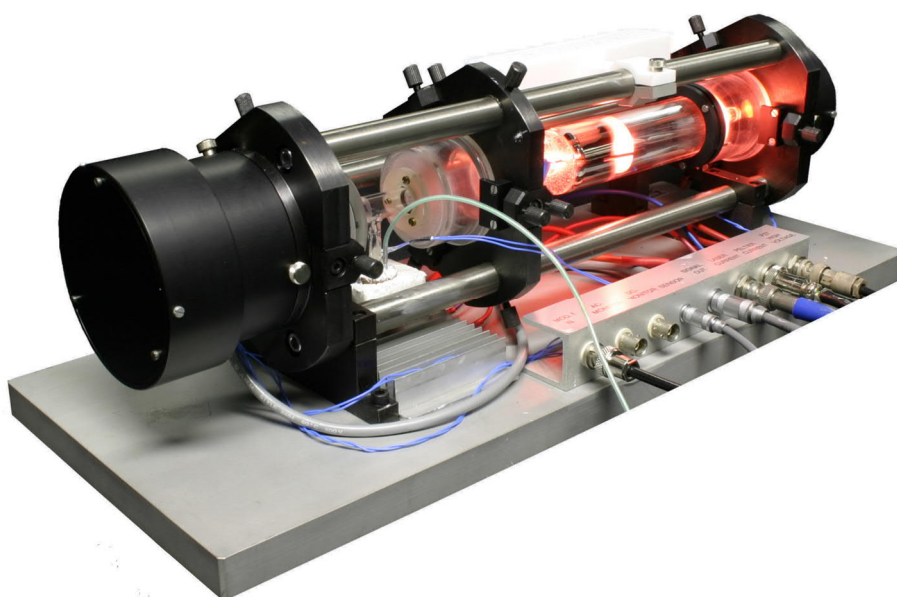
Jarkko Unkuri, Erikoistutkija  
Puh. 0504105506  
[jarkko.unkuri@vtt.fi](mailto:jarkko.unkuri@vtt.fi)

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

Laserinterferometrit ovat nykyaikaisessa pituusmetrologiassa mittapalojen ohella tärkeimmät mittanormaalit. Vielä 1980-luvulla ajateltiin, että laserinterferometrit ovat riittävän tarkkoja ilman kalibrointiakin. Käyttäjien tarpeiden ja kertyneiden kokemusten perusteella nykyään katsotaan myös laserinterferometri-  
kalibrointi välttämättömäksi. VTT MIKESillä on jäljitettävät menetelmät laserinterferometri-  
kalibroimiseksi. Kalibrointi parantaa laserinterferometri-  
käyttötarkkuutta ja luotettavuutta.



Kuva 1. Laserinterferometrin toiminnallinen testaus.



Kuva 2. Metrin primaarinormaal  
– 633 nm:n jodistabiloitu HeNe-  
laser.



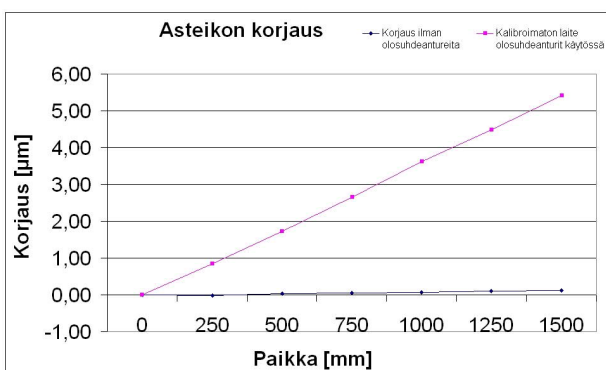
## Kalibroinnin sisältö

### Lasertaajuuden kalibrointi

Laserinterferometrisissä mittauksissa käytettävien lasereiden tyhjiöaallonpituus kalibroidaan jodistabiloidun laserin avulla. Suora jäljitettävyyden metrin määrittelyä taataan sillä, että jodistabiloitujen lasereiden taajuus (tyhjiöaallonpituus) on määritetty atomikelloon lukitulla optisella taajuuskampalaitteistolla.

VTT MIKES ylläpitää seuraavia lasereita, joiden taajuus on lukittu kansainvälisten suositusten mukaisesti jodimolekyylin absorptioviivoihin: HeNe-laserit aallonpituuksilla 633 nm (kuva 2) ja 543,5 nm sekä Nd:YAG-laser aallonpituudella 532 nm. Näiden laserien taajuuden suhteellinen laajennettu epävarmuus ( $k=2$ ) on parempi kuin  $10^{-10}$ .

Jodistabiloiduilla lasereilla kalibroidaan muiden stabiloitujen lasereiden taajuus (tyhjiöaallonpituus) taajuuseromittauksella. Lasertaajuuden kalibrointiin kuuluu pitkäkestoinen taajuusmittaus sekä toistettavuusmittauksia. Lisäksi mitataan pysty- ja vaakapolarisaatioiden välinen taajuusero ja tarkastetaan polarisaatioerottelu. Nämä mittaukset antavat hyvän kuvan laitteen taajuuden stabiiliudesta ja luotettavuudesta. Muilla aallonpituuksilla toimivien lasereiden taajuus voidaan määrittää optisen taajuuskamman avulla.



Kuva 3. Virheet olosuhdeantureissa saattavat aiheuttaa huomattaviakin virheitä laserinterferometrin mittaustuloksessa.

## Ympäristöantureiden kalibrointi ja toiminnan testaus

Lasertaajuuden lisäksi kalibroidaan olosuhdeanturit ja testataan laitteiston toiminta monipuolisesti. Nämä mittaukset ovat välttämättömiä laserinterferometrillemme ominaisen hyvän mittaustarkkuuden takaamiseksi. Erityisesti olosuhdeanturien kalibroinnilla saavutetaan kalibroindulle laitteistolle jopa kertaluokkaa parempi mittaustarkkuus kuin ilman laitteiston kalibrointia.

Olosuhdeanturien kalibrointi sisältää lämpötila-anturin, ilmanpaineanturin ja materiaalin lämpötila-antureiden kalibroinnit. Toiminnallinen testaus suoritetaan lämpötilastabiloidussa mittaustilassa mittaamalla siirtyvään kelkkaan kiinnitetyn retroreflektorin paikoituksia sekä kalibrointivälillä referenssilaserinterferometrillä (kuva 1). Mittauksessa molempien laserien säteet kulkevat samojen optisten komponenttien kautta sekä ilman olosuhdeantureita että niiden kanssa. Samoin kulma-asteikko testataan referenssilaseriin vertaamalla. Tarvittaessa optiset komponentit mitataan taasomaisuusinterferometrillä.

Mikäli olosuhdeantureiden virheet ovat merkittäviä, on ne syytä säätää. Säätämällä saadaan interferometrin mittausta helposti tarkemmaksi (kuva 3). Esimerkiksi Agilentin laserinterferometreille säätö onnistuu melko helposti.

## Jäljitettävyyden

Jodistabiloitujen lasereiden taajuus on kalibroitu taajuuskamman avulla. Taajuuskampan avulla, jonka avulla metri realisoidaan VTT MIKESissä saa taajuusasteikkonsa atomikelloista. Olosuhdeantureiden kalibroinneissa käytettävät mittarit on kalibroitu vastaavien kansallisten mittanormaalilaboratorioiden toimesta.

Taulukko 1. Kalibroinnin epävarmuudet.

Suure	Mittausalue	Epävarmuus ( $k=2$ )
Aallonpituus	633 nm; 543,5 nm; 532 nm	$\sim 10^{-9}$ (suhteellinen)
Ilman paine	970...1050 hPa (730...790 mmHg)	40 Pa
Ilman lämpötila	17...25 °C	0,10 °C
Materiaalin lämpötila	15...25 °C	0,050 °C
Yhdistetty epävarmuus	0...30 m	Q[0,02 µm; 05E-6L]

# Mittapalojen interferometrinen kalibrointi

Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

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

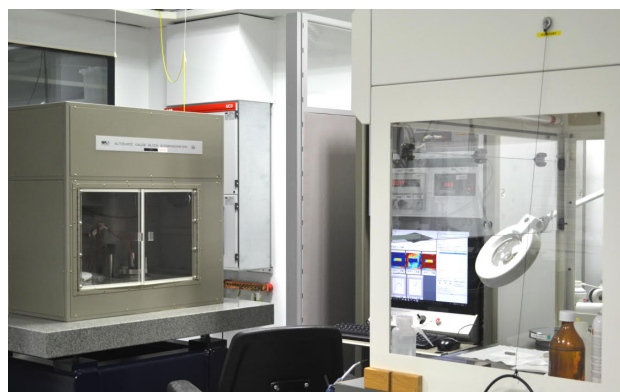
## Mittapalojen kalibrointi

Interferometrinen mittapalamittaus on primaari menetelmä mittapalojen teollisuuden tärkeimpien pituuden mittanormaalien, kalibrointiin. Interferometriä avulla siirretään metrin realisointi mittapaloihin laserin stabiloidun ja kalibroidun aallonpituuden kautta. Myös vertailumittauksella kalibroituja mittapaloja on oltava jäljitettäviä interferometrisesti kalibroituja mittapaloihin. Mittapalan pituudeksi on standardissa määritelty etäisyys mittapalan pinnan keskipisteestä toiseen päähän imeytettyyn referenssitason 20 °C lämpötilassa ja 1013,25 hPa paineessa. Interferometrisesti kalibroidun mittapalasarjan käyttö antaa pienemmän epävarmuuden mekaanisiin kalibrointiin esim. akkreditoituissa kalibrointilaboratorioissa.

## VTT MIKESin interferometrit

VTT MIKESillä on mittapalainterferometri sekä lyhyille (0 ... 300 mm) että pitkille (100 ... 1000 mm) mittapaloille ja päätemittoille. Laitteet sijaitsevat ympäristöstabiloiduissa mittaushuoneissa ja ne on varustettu lämpötila-, kosteus- ja paineantureilla. Tarkka olosuhdevalvonta (laboratorion lämpötilastabiliteetti 20 °C ± 0,05 °C) mahdollistaa pienen epävarmuuden taitekerroin- ja lämpöpitenehkompensoinneille. Mittapalan pinnan ja referenssitason välinen pinnankarheusero mitataan ja korjataan tuloksista. Mittapaloista voidaan mitata myös pintojen yhdensuuntaisuus ja tasomaisuus.

Lyhyiden mittapalojen interferometri VTT MIKES PSIGB (kuva 1) käyttää 633 ja 543,5 nm:n stabiiloituja He-Ne-lasereita. Laitteessa on iso imeytysalusta, joka mahdollistaa nopean jopa 14 mittapalan peräkkäisen automaattisen kalibroinnin. Laitteella mittapalat kalibroidaan pystyasennossa.



Kuva 1. VTT MIKES PSIGB mittapalainterferometri ja imeytyspiste.

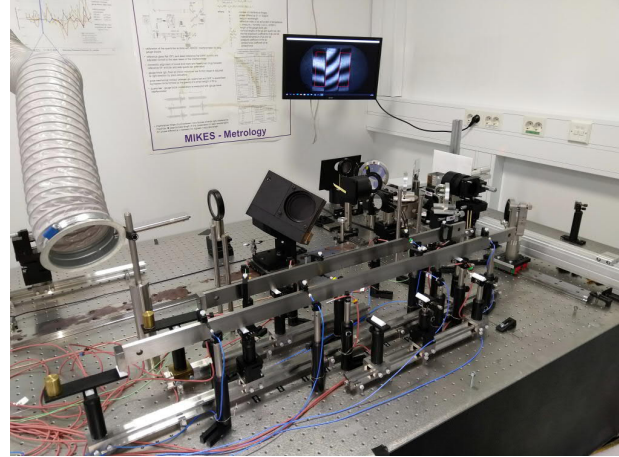
Pitkien päätemittojen interferometri (kuva 2) käyttää hyväkseen valkoisen valon ja 633 nm laservalon interferenssejä. Valkoisen valon interferenssin käytön etuna on se, että kalibroinnissa ei tarvita ennakkotietoa päätemitan pituudesta. Päätemitat kalibroidaan vaakasuorassa asennossa tuettuna Besselin pisteistä, siten että referenssitason paino on kompensoitu.

## Jäljitettävyys

Pituusmittojen ja pituudenmittauslaitteiden säännöllinen kalibrointi on välttämätön osa mittausten varmentamista. Jäljitettävät kalibroinnit ja tieto mittausten epävarmuudesta ovat perusedellytyksiä hyvälle ja tasaiselle laadulle. Jäljitettävyys mittapalakalibrointeihin saadaan kalibroimalla niissä käytettyjen HeNe-lasereiden aallonpituudet pituuden kansallisia mitta-normaaleja jodistabiloituja lasereita vasten. Interferometriänsä kanssa käytettävät lämpötilan, paineen ja kosteuden mittalaitteet kalibroidaan vastaavissa VTT MIKESin laboratorioissa. Kalibrointien luotettavuus varmistetaan osallistumalla säännöllisesti kansainvälisiin vertailumittauksiin.

## Kalibrointipalvelut

Mittapalainterferometreillä voidaan mitata muitakin kappaleita, joiden pinnat ovat riittävän tasomaisia ja sileitä. Esimerkkejä ovat keraamisten tiivisteiden lämpöpitenemiskertoimen määrittäminen ja kahden yhdensuuntaisen lasipinnan väliin muodostetun ilmavälin mittaaminen. Interferometrinen kalibrointi vaatii tavallista enemmän myös mittapaloilta. Niiden mittauspintojen on oltava hyvin yhdensuuntaiset, tasomaiset sekä naarmuttomat. VTT MIKES kalibroi laatuluokkien K (00) ja 0 mukaisia mittapaloja sekä päätemittoja esim. kvartsimetrejä oheisen taulukon mukaisesti.



Kuva 2. VTT MIKESin pitkien mittapalojen interferometrinen kalibrointilaite.

### Viitteet:

Byman, V., & Lassila, A. (2015) MIKES' primary phase stepping gauge block interferometer. *Measurement Science and Technology* **26**(8), [084009]. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/8/084009>

Ikonen, E. & Riski, K. (1993) Gauge-block Interferometer Based on One Stabilized Laser and a White-light Source, *Metrologia* **30**, 95–104. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/30/2/006>

Taulukko 1. Kalibrointikohteet ja mittausepävarmuudet

Kalibroitava laite	Mittausalue	Epävarmuus ( $k=2$ )*
Mittapalat, lyhyet	0,5 mm ... 200 mm	Q[20 nm; 190E-9L]**
Mittapalat, lyhyet, mittapalaparin pituusero	0,5 mm ... 100 mm	18 nm
Mittapalat, pitkät	100 mm ... 1000 mm	Q[22 nm; 110E-9L]**
Kvartsimetrit	1000 mm	72 nm

L, D = mitattu pituus tai vastaava halkaisija metreissä

\*Kalibroinnin epävarmuus on joskus suurempi johtuen kalibroitavan laitteen aiheuttamasta epävarmuudesta

\*\*Epävarmuus lasketaan  $Q[x; y]=(x^2+y^2)^{1/2}$

# Mittapalojen mekaaninen vertailukalibrointi

Jyrki Ranta, Tutkimusinsinööri  
Puh. 0400445887  
[jyrki.ranta@vtt.fi](mailto:jyrki.ranta@vtt.fi)

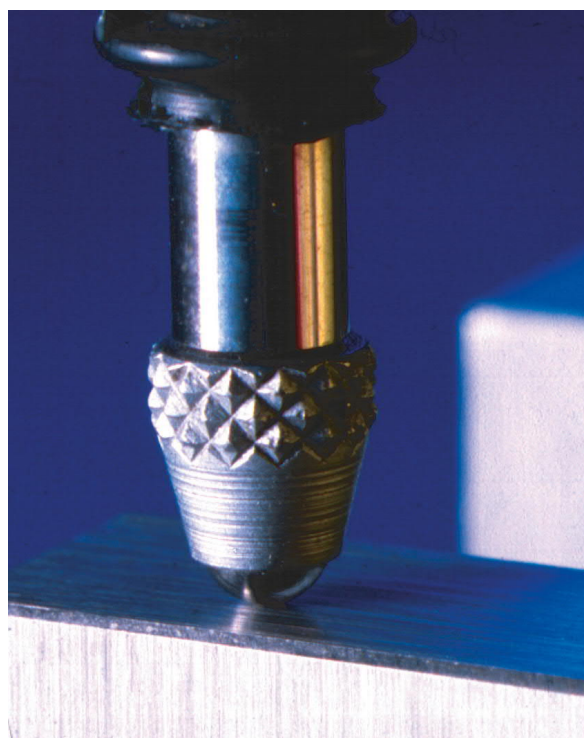
Juho Kukkohovi, Vastaava tutkimusteknikko  
Tel. +358 50 348 4200  
[juho.kukkohovi@vtt.fi](mailto:juho.kukkohovi@vtt.fi)

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

Mekaaninen vertailumittaus on yleisin tapa mittapalojen pituuden määrittämiseksi. Menetelmässä kalibroitavan mittapalan pituutta verrataan nimellisarvoltaan saman pituisen kalibroidun mittapalan pituuteen erityisen komparaattorin avulla (kuva 1).

## Mittapalamittaus

Samaa materiaalia olevien samanpituisien mittapalojen vertaaminen toisiinsa on menetelmänä erittäin yksinkertainen, luotettava, nopea ja edullinen. Menetelmä soveltuu myös käytössä olleille mittapaloille, joiden pinnat ovat kuluneet. VTT MIKES kalibroi teräksisiä sekä myös kovametallisia että keraamisia mittapaloja. Kalibroitavien mittapalojen pituus vaihtelee alueella 0,1...1000 mm (taulukko 1). Kalibroinnin yhteydessä tarkastamme mittapintojen tasomaisuuden ja poistamme porskeet, jotka estäisivät mittapalojen luotettavan käytön. Palojen määrävälein tapahtuva tarkastus estää vaurioiden siirtymisen koko sarjaan. Kalibroimattomien palojen käyttö tuotannon laadunvalvonnassa ja mittalaitetekalibroinnissa aiheuttaa ylimääräisiä riskejä ja kustannuksia.



Kuva 1. Mittapalavertailulaitteen anturi tunnistaa palan pinnan sijainnin 0,6 N mittausvoimalla.

Taulukko 1. Mittapalojen mekaaninen vertailukalibrointi.

Mittalaite	Mittausalue	Laajennettu mittausepävarmuus
Tesa-mittapalavertailija	0,1 mm ...100 mm	Q[50 nm; 0,87E-6L]
VTT MIKES pitkien mittapalojen vertailulaite	100 mm ...1000 mm	Q[100 nm; 0,87E-6L]

L mittapalan nimellismitta



## Jäljitettävyys

Mekaanisessa vertailumittauksessa käytetyt referenssimittapalat kalibroidaan säännöllisesti VTT MIKESin omilla mittapalainterferometreillä. Mittapalainterferometreissa käytettyjen lasereiden aallonpituudet on kalibroitu pituuden kansallisten mitta-  
normaalien jodistabiloitujen lasereiden avulla.

Taulukko 2. Standardin ISO 3650:1998 mukaiset tarkkuusluokat mittapaloille.

Nimellismitta-alue mm		Kalibrointiluokka K mm		Luokka 0 mm		Luokka 1 mm		Luokka 2 mm	
Alaraja	Yläraja	$\pm t_e$	$t_v$	$\pm t_e$	$t_v$	$\pm t_e$	$t_v$	$\pm t_e$	$t_v$
0,5	10	0,20	0,05	0,12	0,10	0,20	0,16	0,45	0,30
10	25	0,30	0,05	0,14	0,10	0,30	0,16	0,60	0,30
25	50	0,40	0,06	0,20	0,10	0,40	0,18	0,80	0,30
50	75	0,50	0,06	0,25	0,12	0,50	0,18	1,00	0,35
75	100	0,60	0,07	0,30	0,12	0,60	0,20	1,20	0,35
100	150	0,80	0,08	0,40	0,14	0,80	0,20	1,60	0,40
150	200	1,00	0,09	0,50	0,16	1,00	0,25	2,00	0,40
200	250	1,20	0,10	0,60	0,16	1,20	0,25	2,40	0,45
250	300	1,40	0,10	0,70	0,18	1,40	0,25	2,80	0,50
300	400	1,80	0,12	0,90	0,20	1,80	0,30	3,60	0,50
400	500	2,20	0,14	1,10	0,25	2,20	0,35	4,40	0,60
500	600	2,60	0,16	1,30	0,25	2,60	0,40	5,00	0,70
600	700	3,00	0,18	1,50	0,30	3,00	0,45	6,00	0,70
700	800	3,40	0,20	1,70	0,30	3,40	0,50	6,50	0,80
800	900	3,80	0,20	1,90	0,35	3,80	0,50	7,50	0,90
900	1000	4,20	0,25	2,00	0,40	4,20	0,60	8,00	1,00

Taulukon lyhenteet ovat:

$t_e$  = toleranssi poikkeamalle nimellimitasta

$t_v$  = toleranssi pituuden vaihteluille

# Muodon ja pinnankarheuden 2D- ja 3D-mittaus

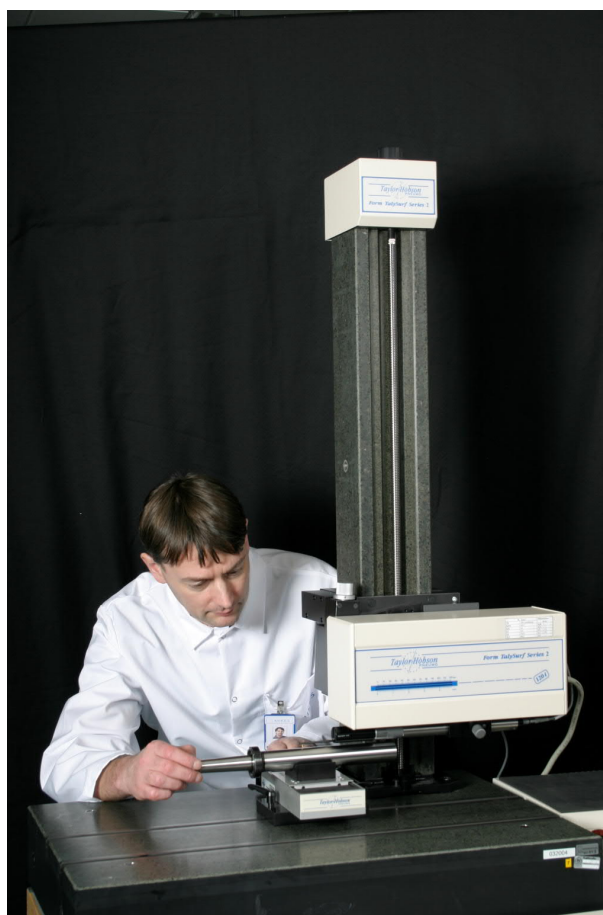
Björn Hemming, Erikoistutkija  
Puh. 050 773 5744  
[bjorn.hemming@vtt.fi](mailto:bjorn.hemming@vtt.fi)

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

Nykyaikaisten tuotteiden valmistustarkkuudet sekä pyrkimys korkeaan laatuun edellyttävät kykyä mitata pienehköjen ja muodoltaan monimutkaisten kappaleiden muutosuureita, kuten suoruuksia, yhdensuuntaisuuksia, kaarevuussäteitä tai pinnankarheutta. Ratkaisun näihin mittausongelmiin tarjoavat VTT MIKESin palvelut tietokoneohjatulla muodon- ja pinnankarheuden mittalaitteella.

## Muodonmittaus

Muodonmittauskone mahdollistaa jopa 0,6 nm:n suuruusluokkaa olevien muoto poikkeamien havaitsemisen. Tyypillisiä muodonmittauksia ovat tarkat suoruuksien mittaukset, sisä- ja ulkopuolisten kaarevuussäteiden määritykset sekä erilaiset pienten osien dimensiomittaukset (kuva 1). Näihin kuuluvat urien syvyyksien ja pituuksien sekä pienten sisä- ja ulkopuolisten kulmien mittaukset. Muodonmittauskoneen Taylor Hobson Form Talysurf tärkeimmät tekniset tiedot on koottu taulukkoon 1.



Kuva 1. Lieriöpinnan sivun suoruden mittaus.

## Pinnankarheuden mittaus

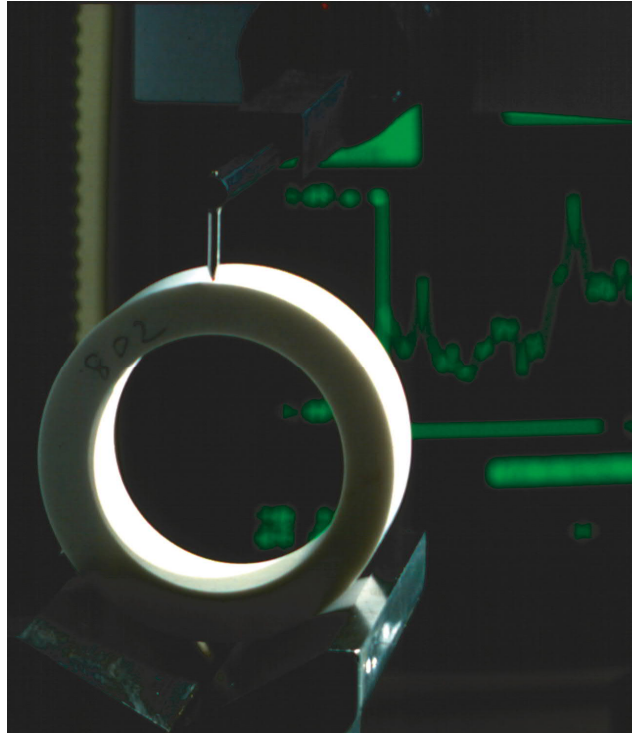
Pinnankarheusnormaalien kalibroinnin ohella tavalisia tehtäviä ovat laadunvalvontaan ja tuotekehitykseen liittyvät mittaukset. VTT MIKESin pinnankarheusmittaukset perustuvat standardeihin ISO 5436-1 sekä ISO 4287.

## Mittauskohteita

- pinnankarheusnormaalien jäljitettävät kalibroinnit
- lääketieteen tuotekehitykseen liittyvät proteesien mittaukset
- tribologisten näytteiden mittaukset
- maanrakennuksessa käytettävien työkonien terien profiilimittaukset
- elektroniikan komponenttien tuotekehitykseen ja laadunvalvontaan liittyvät geometriset mittaukset
- metallisten tiivisteiden, hydraulikka- ja pneumaattikkakomponenttien tuotekehitys- ja laadunvalvontamittaukset.

## Jäljitettävyys

Mittauskoneen jäljitettävyys tulee interferometrisesti kalibroittujen mittapalojen, piirtomitan sekä tasolasien ja pallon kautta.



Kuva 2. Kylkiviivan suoruuden mittaus käynnissä.

Taulukko 1. Muodonmittauskoneen Taylor Hobson Form Talysurf tärkeimmät tekniset tiedot.

Ominaisuus	Tiedot
Mittauslaite ja toimintaperiaate	Taylor Hobson Form Talysurf Ser. 2, Type 112/2815-02, induktiivinen
Käytettävät mittauskärjet	Timanttikärki, säde 0,002 mm, Pallonmuotoinen safiirikärki, säde 0,397 mm.
Mittausvoimat	1,0 mN (timanttikärkeä käytettäessä), 15–20 mN (safiirikärkeä käytettäessä)
Mitattavat pinnankarheuden parametrit	R3y, R3z, Ra, Rc, Rda, Rdc, Rdq, RHSC, Rku, Rln, RLo, Rlq, Rmr, Rmr(c), Rp, R <sub>Pc</sub> , Rq, RS, Rsk, RSm, Rt, Rv, RVo, Rz, Rz(JIS). Lisäksi joukko aaltomaisuusparametreja.
Suurin mittauspituus	120 mm
Mitattavan kappaleen suurin korkeus	700 mm, suurin leveys 3D-mittauksessa 50 mm
Suurin sallittu muoto-poikkeama	28 mm (120 mm:n mittauskärjellä)
Mittausnopeus	1 mm/s
Laitteiston erottelukyky	0,0006 µm
Pienin mittausepävarmuus	Q[10 nm, 0,02 P], kun P on poikkeama tasomaisuudesta

# Optinen pinnanmuodonmittaus

Ville Heikkinen, Tutkija  
Puh. 050 415 5980  
[ville.heikkinen@vtt.fi](mailto:ville.heikkinen@vtt.fi)

Björn Hemming, Erikoistutkija  
Puh. 050 773 5744  
[bjorn.hemming@vtt.fi](mailto:bjorn.hemming@vtt.fi)

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

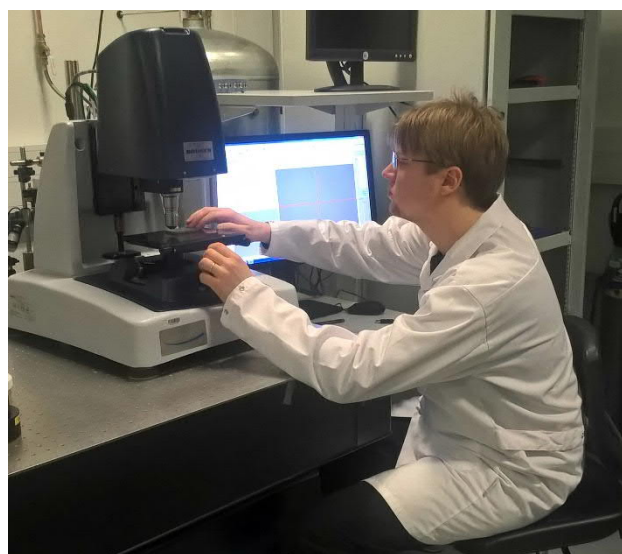
VTT MIKESin valkoisen valon pyyhkäisymikroskooppilla on mahdollista mitata millimetri-mikrometri kokoluokan rakenteita.

VTT MIKESin valkoisen valon pyyhkäisymikroskoopin (SWLI) ominaisuuksiin kuuluu nanometriluokan pystytarkkuus, mikrometriluokan vaakaresoluutio ja kyky mitata millimettiluokan alueita nopeasti. VTT MIKESin SWLI on mallia Bruker ContourGT-K (kuva 1). Etuna SWLI:ssä muihin vastaavaan pystysuunnan mittaustarkkuuteen pystyviin instrumentteihin verrattuna (esim. laserinterferometrit tai AFM) on suuri mitausalue, kyky mitata korkeita pystysuoria askelmia ja kyky mitata läpinäkyvien kerrosten läpi. Lisätietoja laitteen ominaisuuksista on taulukossa 1.

Todellinen mittausepävarmuus on aina tapauskohtaista riippuen ympäristöolosuhteista, koneesta ja työkappaleen ominaisuuksista. Erityisesti kiinnittämme toiminnassamme huomiota kohteen puhtauteen, lämpötilaan, kiinnitykseen, suuntaamiseen, mittausjärjestelyihin sekä tulosten dokumentointiin.

## Esimerkkejä mittauskohteista:

- Laakerit, liukupinnat, pinnan topografia ja kuluminen
- Puolijohteiden ja MEMS rakenteiden mittaus
- Lääketieteelliset komponentit ja implantit
- Optiset komponentit
- Tarkkuuskoneistetut komponentit

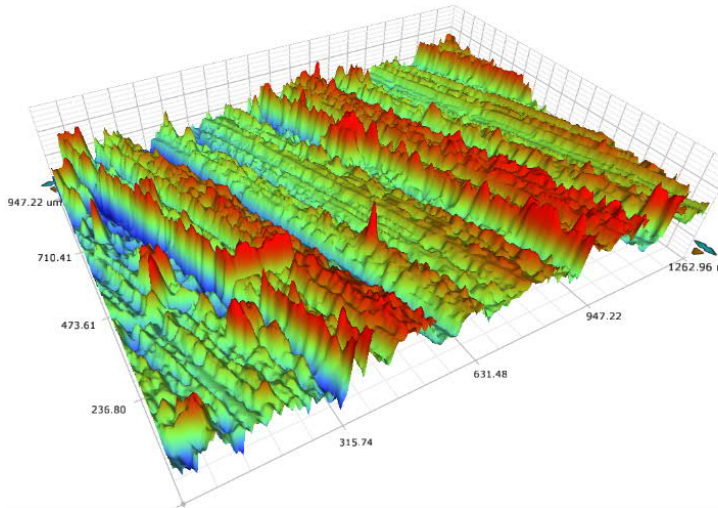


Kuva 1. Bruker ContourGT-K valkoisen valon pyyhkäisymikroskooppi.

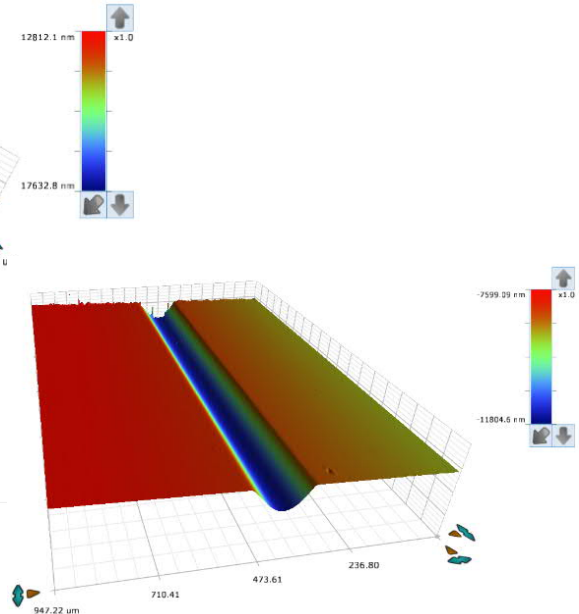
## Teemme SWLI:llä

- palvelumittausta eri kappaleille
  - pinnan muotojen ja yksityiskohtien pituuden ja korkeuden mittaus
  - pinnanmuotojen digitointi
  - kerrospaksuuksien mittaus
  - pinnankarheus (2D ja 3D ISO pinnankarheusparametrit), tasomaisuus, poikkeamat muodosta
- erilaisia mittalaittekalibrointeja
- siirtonormaalien kalibrointeja
  - askelkorkeusnormaalit ja vertailukappaleet





Kuva 2. Alumiinin työstöjäljen laadun tutkimista.



Kuva 3. Lasiin uurretun uran muodon mittaus.

## Optimaaliset mittaolosuhteet

SWLI on sijoitettu maanalaiseen, tasalämpöiseen ( $20 \pm 0,2$ ) °C mittaushuoneeseen. Huoneessa useimmat lämpölähteet on eliminoitu poistoilmapiputuksilla.

## Jäljitettävyys

SWLI on jäljitettävä SI-metriin VTT MIKESin omien siirtonormaalien kuten askelkorkeusnormaalien ja laserinterferometrillä.

Taulukko 1. SWLI:n tärkeimmät ominaisuudet

Ominaisuus	Tiedot
Optinen x-y resoluutio	3,8 – 0,7 $\mu\text{m}$
Pikselikoko	7,2 – 0,2 $\mu\text{m}$
Pystysuunnan erotuskyky	< 0,1 nm
Askelkorkeuksien mittaus:	
• toistuvuus	< 0,1 %
• tarkkuus	< 0,75 %
Mitattavan pinnan heijastavuus:	0,05 % – 100 %
Mitattavan pinnan maksimikaltevuus:	3° (2,5x objektiivilla), 18,9° (20x objektiivilla)
Objektiivit	2,5x ja 20x objektiivit, 0,55x, 1x ja 2x suurennuslinssit
Mittausalue (X x Y x Z mm <sup>3</sup> ): pienin suurennos	3,5 x 4,6 x 3,5
suurin suurennos	0,4 x 0,6 x 3,5
Mittausalue pikseleinä	640 x 480
Ohjelmistot	Vision64 Analysis Software, MountainsMap, MatLab
Mitattavan kappaleen maksimikoko	10 cm korkea x 20 cm leveä, toisen vaakasuunnan pituus voi olla paljon suurempi
Kyky mitata päällekkäisiä pintoja	2 päällekkäistä pintaa voidaan mitata yhdellä mittauksella. Maksimisyyvyys riippuu taitekertoimista, geometriasta ja suurennoksesta, esim. 0,3 mm lasin läpi voi mitata. 7 mm ehdoton yläraja mittaussyvyydelle.

# Tarkkojen sisä- ja ulkopuolisten mittojen sekä kierteiden mittaukset

Juho Kukkohovi, Vastaava tutkimusteknikko  
Tel. +358 50 348 4200  
[juho.kukkohovi@vtt.fi](mailto:juho.kukkohovi@vtt.fi)

Jarkko Unkuri, Tutkija  
Puh. 040 410 5506  
[jarkko.unkuri@vtt.fi](mailto:jarkko.unkuri@vtt.fi)

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

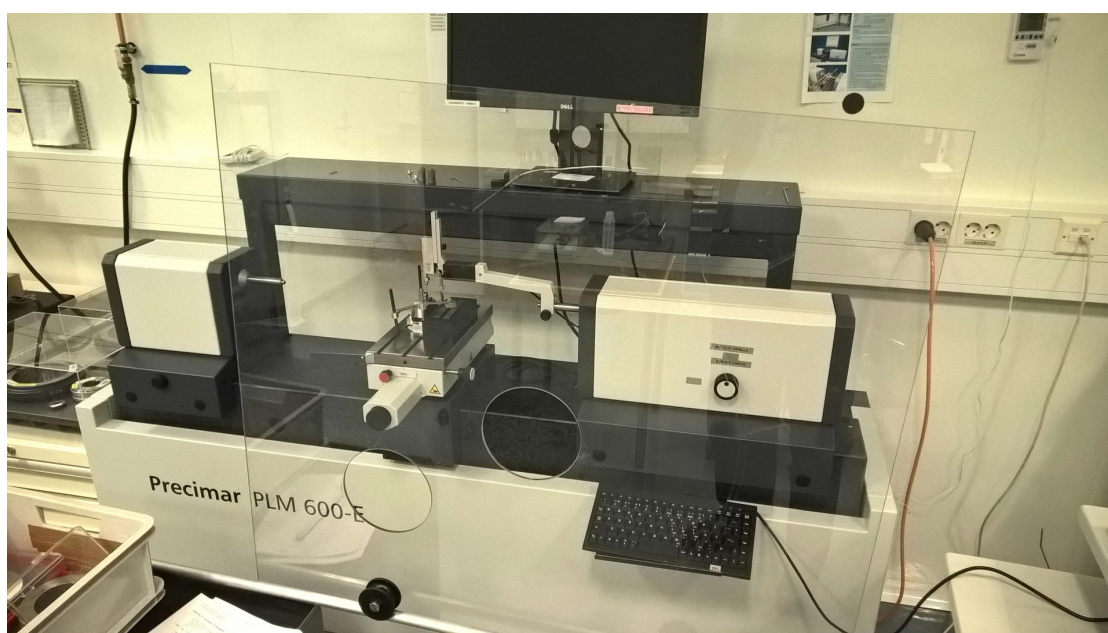
## Mittaukset Mahr pituudenmittauskoneella

Tarkat sisä- ja ulkopuoliset halkaisijamittaukset tehdään Mahrpituudenmittauskoneella joko omalla asteikolla tai samanpituisen referenssinormaaliiin vertaamalla (kuva 2). Mittaus tapahtuu kosketuksella ke-raamisilla pallokärjillä, tasokärjillä tai sisäpuolisissa mittauksissa vipumittakärjellä. Mikäli mittaussyvyys sisäpuolisissa mittauksissa on yli 15 mm, käytetään erillisiä hakaleukoja. Mittausvoimaa voidaan säätää alueella 0,3...11 N. Mittaamalla kohdetta eri mitta-usvoimilla voidaan laskennallisesti poistaa mitta-usvoiman eri geometrioilla ja materiaaleilla aiheuttamat muodonmuutokset ja antaa tulos ns. nollavoimalla.

Tämä on välttämätöntä, jos referenssi ja kalibroitava kohde ovat eri materiaalista tai eri muotoisia.

Eri lämmönlähteet on eliminoitu poistoilmaputkituk-silla, lämpösuojilla ja tarpeen vaatiessa erillisellä la-minaarivirtauksella. Mittausepävarmuuden arvo riip-puu mittauspituuden lisäksi mittaushetkestä (muoto- ja pinnankarheus), mittalaitteesta, mittaolosuh-teista ja käytetystä menettelystä.

Halkaisijamittausten lisäksi Mahr:llä tehdään myös kierteenmittauksia ja toleranssivertailuja. Kierteen-mittaus tehdään sisäpuolisessa mittauksessa pallo-kärjillä ja ulkopuolisessa mittauksessa kolmilankame-netelmällä.



Kuva 1. Rengastulkin halkaisijan mittaus pituudenmittauskoneessa.

## Halkaisijamittauksia täydentävät mittaukset

Jotta mitattavan pyörähdyskappaleen ominaisuuksista saisi tarkan kuvan, on kohteesta mitattava myös ympyrämaisyydet, pinnankarheudet ja kylkien suoruudet erillisillä erikoismittalaitteilla.

## Jäljitettävyys

Pituudenmittauskoneella tehdyt mittaukset ovat jäljitettäviä vastaaviin VTT MIKESin kalibroituihin siirtönormaaleihin. Lineaariasteikko kalibroidaan laserinterferometrin avulla, referenssimittapalat on kalibroitu interferometrisesti ja lämpötila-anturit kalibroidaan hauteessa Pt-25-referenssiantureita vasten.



Kuva 2. Kappaleen ja referenssin kiinnitys vierekkäin vertailumittauksessa.

Taulukko 1. Halkaisijamittausten saavutettavissa olevat mittausepävarmuudet.

Mittauskohde	Mittausepävarmuus ( $k=2$ )
Tappitulkki 0 – 550 mm	Q[0,2 $\mu\text{m}$ ; 0.87E-6L]
Rengastulkki 1 – 500 mm	Q[0,2 $\mu\text{m}$ ; 0.87E-6L]
Pallo 0,2 mm ... 200 mm	Q[0,15 $\mu\text{m}$ ; 0.7E-6L]
	L nimellispituus

# Koordinaattimittaus

Linus Teir, Tutkija  
Puh. 040 655 4829  
[linus.teir@vtt.fi](mailto:linus.teir@vtt.fi)

Ville Byman, Tutkija  
Puh. 0503869327  
[ville.byman@vtt.fi](mailto:ville.byman@vtt.fi)

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

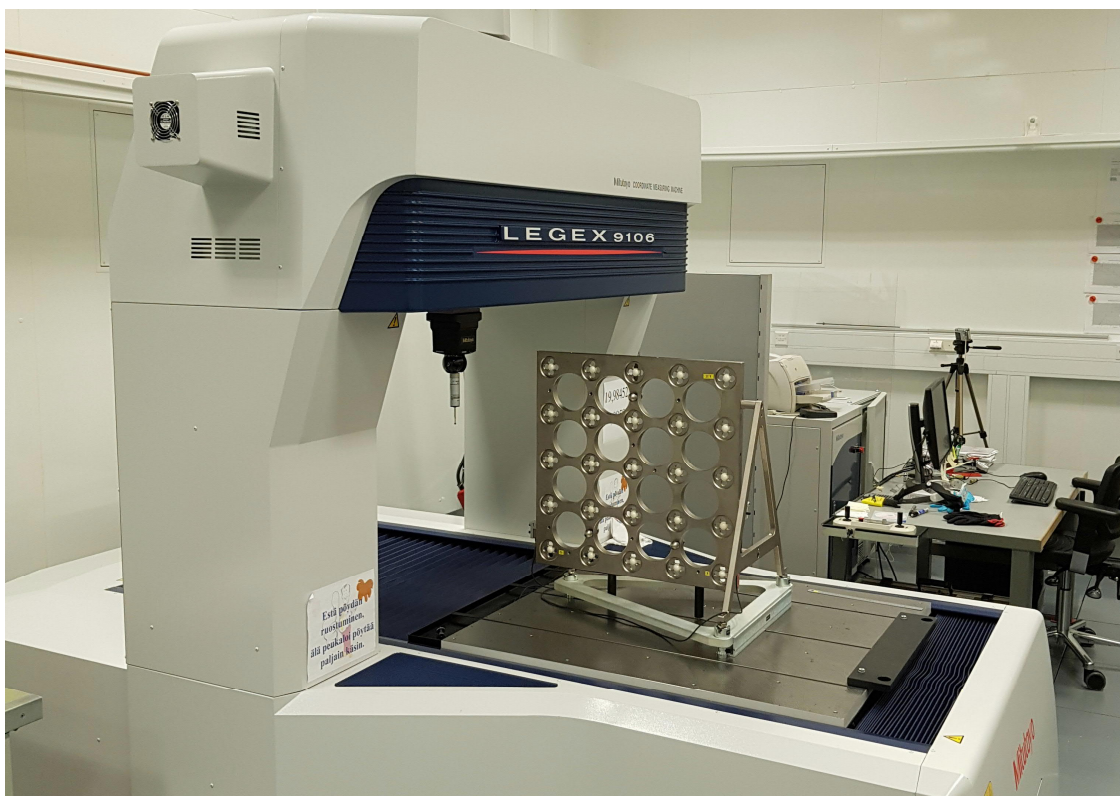
VTT MIKESin koordinaattimittauspalvelut sisältävät mittauksia optisella koordinaattimittauskoneella sekä erikoistarkalla teollisuuskokoa olevalla koskettavalla koordinaattimittauskoneella.

## Koskettava koordinaattimittaus

VTT MIKESin koordinaattimittauskoneen perusominaisuuksiin kuuluu tarkkuus, joustavuus, nopeus sekä mittaustulosten automaattinen laskenta. VTT MIKESin 3D-kone on Mitutoyo Legex 9106, portaalityyppinen koordinaattimittauskone (kuva 1). Lisätietoja mittauskoneen ominaisuuksista on taulukossa 1.

Todellinen mittausepävarmuus on aina tapauskohtaista riippuen ympäristöolosuhteista, koneesta ja työkappaleen ominaisuuksista. Erityisesti kiinnitämme toiminnassamme huomiota kohteen puhtauteen, lämpötilaan, kiinnitykseen (kuva 2), suuntaamiseen, mittausjärjestelyihin sekä tulosten dokumentointiin.

Kuva 1. Mitutoyo Legex koordinaattimittauskone.





Teemme koordinaattimittauskoneella mm:

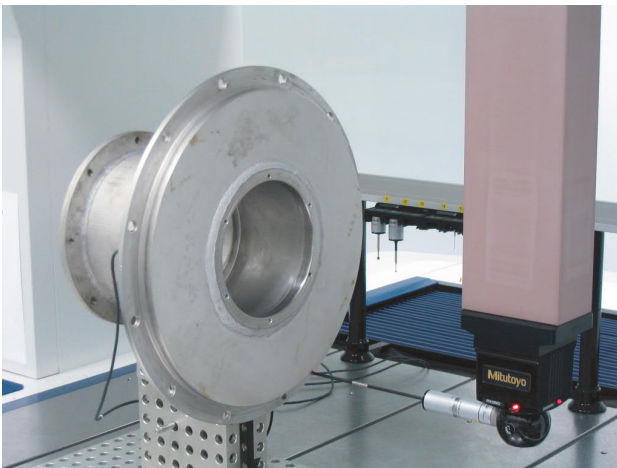
- palvelumittausta 3D-kappaleille (kuva 3) ja vaikeille muodoille
  - skannaus
  - pistepilven digitoinnit
- erilaisia mittalaitetekalibrointeja
  - viivaimet, tasot, tulkit, kartiot, suorakulmat
- koordinaattimittauskoneiden siirtonormaalien kalibrointeja
  - porrasmittapalat, pallokuutiot ja -levyt ja vertailukappaleet.

## Optimaaliset mittausolosuhteet maan alla

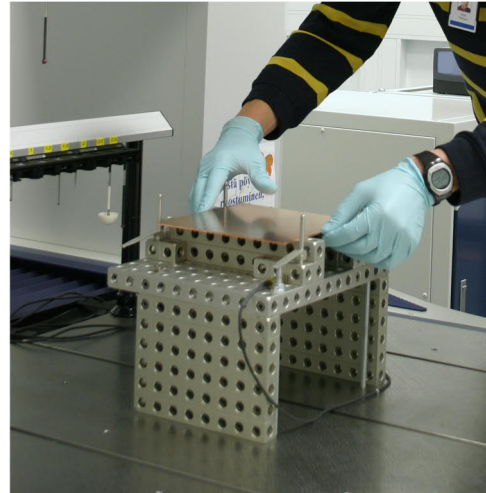
Mittauskone on sijoitettu maanalaiseen, tilavuudeltaan suureen tasalämpöiseen + 20 °C ± 0,2 °C mittauhuoneeseen. Huoneessa useimmat lämpölähteet on eliminoitu poistoilmaputkituksilla. Lisäksi huone on varustettu 1000 kg:n kiskoilla kulkevalla nosturilla ja tavaroiden haalauksen mittauhuoneeseen voidaan käyttää 4000 kg:n hissiä.

## Jäljitettävyys

Käyttöönnotossa tehtyjen laser- ja mittapalamittauksen lisäksi koordinaattimittauskone kalibroidaan säännöllisesti VTT MIKESin omilla mittanormaaleilla kuten porrasmittapaloilla, pallolevyillä ja laserinterferometrillä. Mittaustulosten epävarmuus ja jäljitettävyys varmistetaan tapauskohtaisesti vertailumittauksena (substitution method) eli tulosta korjataan kalibroidun normaalin avulla.



Kuva 3. Tyypillinen tuotantokappale mitattavana koordinaattimittauskoneessa.



Kuva 2. Kappaleiden oikea kiinnittäminen on tärkeää.

Taulukko 1. Koordinaattimittauskoneen pääominaisuudet.

Ominaisuus	Tiedot
Suorituskyky ISO 10360-2 mukaisesti tarkistettuna:	
• maksimivirhe pituuden mittauksessa	MPE <sub>e</sub> = (0,35 + L / 1000) µm, L = mm
• maksimi 3D kosketuspoikkeama	MPE <sub>P</sub> = 0,35 µm
• maksimivirhe skannausmittauksessa	MPE <sub>th</sub> = 1,4 µm
• Laser mittapään skannausvirhe	1,8 µm
Asteikot	Mitutoyo Zerodur -lasiasteikot uivalla kiinnityksellä, resoluutio 0,01 µm.
Liikepituudet	X-910 mm, Y-1010 mm ja Z-610 mm
Koskettava mittauspää	Renishaw nivelistukka PH10MQ Renishaw SP25M kosketus- ja skannausanturi.
Mittausvoima	0,03 N...0,09 N
Lasermittapää	SurfaceMeasure 201FS
Ohjelmistot	Mitutoyo COSMOS -ohjelmisto <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geopak-Win-geometriaohjelma</li> <li>• Statpak-Win geo tilastollinen laadunvalvonta</li> <li>• Scanpak-Win-muodonmittausohjelma</li> </ul> 3Dtol-Win/ MCAD300 CAD-malliin vertaaminen ja mallista ohjelmointi
Mittausvoima	• 0,03 N...0,09 N
Mitattavan kappaleen maksimipaino	800 kg
Mittakärjen halkaisijat	0,5 mm...30 mm

# Optinen koordinaattimittaus – videomittaus

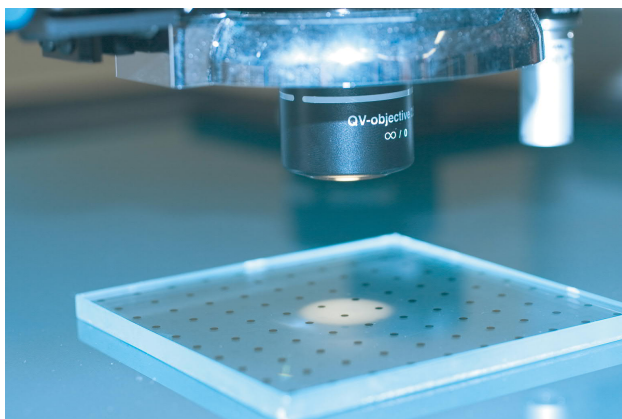
Ville Byman, Tutkija  
Puh. 050 386 9327  
[ville.byman@vtt.fi](mailto:ville.byman@vtt.fi)

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

Nykykaisten tuotteiden valmistustarkkuudet sekä pyrkimys korkeaan laatuun edellyttävät kykyä mitata tarkasti pienten ja muodoltaan monimutkaisten kappaleiden dimensionaalisia suureita.

Videomittalaitteet sekä konenäkö ovat vakiintuneet kosketuksettomiin tarkkuusmittauksiin.

VTT MIKESillä on Mitutoyo Quickvision Hyper QV-350 videomittalaite, joka on varustettu myös koskettavalla mittakärjellä. Optisesti mitattaessa laite käyttää hyväkseen CCD-kameralla konenäön menetelmän saatua mittauspisteen paikkaa sekä paikkatietoa, joka saadaan mekaanisten johteiden yhteyteen asennetuista tarkoista asteikoista.



Kuva 2. Mitattavaa kappaletta voidaan valaista objektiivin läpi tulevalle myötävalolle, alavalolle ja rengasvalolle.



Kuva 2. VTT MIKESin videokoordinaattimittauskone.

Laitteisto on tietokoneohjattu ja kappaleiden mittaus voidaan suorittaa automatisoidusti. Mittauslaitteella voidaan mitata pituutta, halkaisijaa, kulmaa, suoruutta, tasomaisuutta, yhdensuuntaisuutta ja ympyrämuotoisuutta.

Laite soveltuu erityisesti mittaamaan piirilevyjä, ohutseinäisiä hentoja muovi- ja metallikappaleita, sekä muita kappaleita, joiden mittaaminen koskettaen on hankalaa tai mahdotonta.

Mitattavaa kappaletta voidaan valaista objektiivin läpi tulevalla myötävalolla, rengasvalolla ja alavalolla. Rengasvalossa on neljä ohjattavaa segmenttiä ja sen korkeus on säädettävissä.

VTT MIKES tarjoaa asiakkaan tarpeisiin räätälöityjä tarkkoja optisia tai koskettavia dimensiomittauksia. Toimeksiannosta riippuen mittauksista tehdään joko kalibrointitodistus tai mittauspöytäkirja.

Taulukko 1. Videomittauskoneen ominaisuudet.

Ominaisuus	Tiedot
Mittaustilavuus	350 mm x 350 mm x 150 mm
Mittauspöydän koko	490 mm x 550 mm
Mitattavan kappaleen maksimipaino	15 kg
Pienin mittauserävarmuus ( $k=2$ ) optisesti mitattaessa	U1XY = $(0,8 + 2 L/1000) \mu\text{m}^*$ U2XY = $(1,4 + 3 L/1000) \mu\text{m}^*$ U1Z = $(3 + 2 L/1000) \mu\text{m}^*$
Pienin mittauserävarmuus ( $k=2$ ) koskettavalla kärjellä mitattaessa	U1XY = $(1,8 + 2 L/1000) \mu\text{m}^*$
Maksiminopeus (pika-liike)	100 mm/s
Maksimikihtyvyyys	490 mm/s <sup>2</sup>

\* L on mittauspituus millimetreissä. U1 on epävarmuus mitattaessa yhden akselin suuntaisesti ja U2 vastaavasti mitattaessa kahden akselin suuntaisesti.

# Tarkkojen piirtomittojen kalibroinnit

Ville Byman, Tutkija  
Puh. 0503869327  
[ville.byman@vtt.fi](mailto:ville.byman@vtt.fi)

Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

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

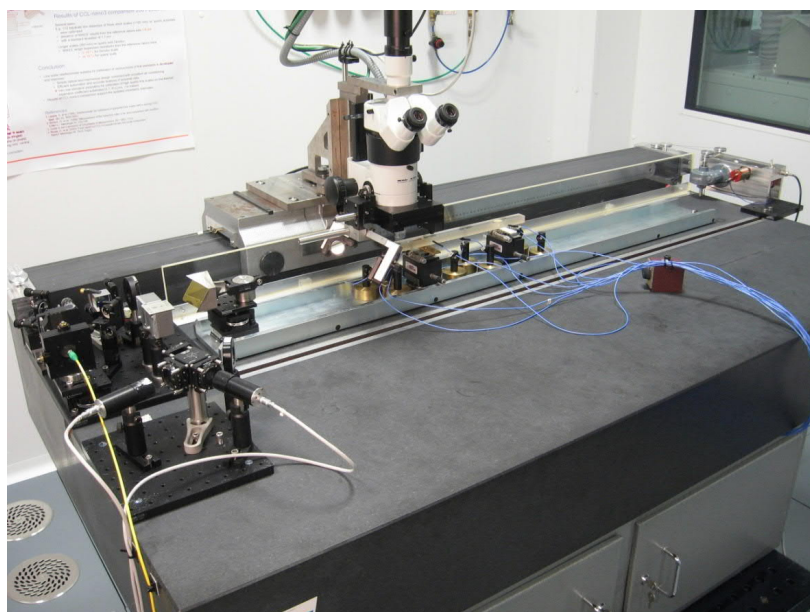
## Piirtomittainterferometri

VTT MIKESin tarkkojen piirtomittojen kalibrointilaitte (kuva 1.) mahdollistaa piirtomittojen huipputarkat kalibroinnit parhaalla mahdollisella tarkkuustasolla aina 1,12 metrin pituuteen saakka. Mittalaitte sijaitsee olosuhteiltaan stabiilissa laboratoriossa: lämpötila on  $20\text{ °C} \pm 0,05\text{ °C}$  ja suhteellinen kosteus  $45 \pm 5\%$ . Laitte mittaa piirtojen etäisyydet tietokoneohjatuksi interferometriä ja mikroskooppia kytkettyä ccd-kameraa käyttäen. Mitat asetetaan mikroskoopin alle tuettuina ns. Airyn pisteistä, jolloin mitan taipumat ovat minimissään.

Ilman taitekertoimen vaikutus mitataan erillisten kosteus-, paine- ja lämpötila-antureiden avulla ja korja-

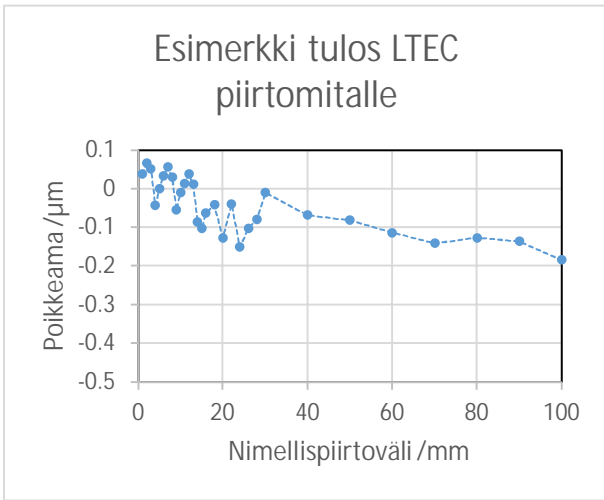
taan käyttäen uudistettua Edlenin kaavaa. Lämpö-pitenemiskorjaus tehdään mittaan kiinnitettyjen neljän Pt-100 anturin lukemia käyttäen. Kalibroittavat piirtovälit voivat olla  $10\text{ }\mu\text{m} \dots 1,12\text{ m}$ . Laitte soveltuu sekä teräsmitoille että esim. lasisille mikroskooppias-teikoille ja todella tarkkoille matalan lämpö-pitenemiskertoimen omaaville kvartsi tai Zerodur asteikoille.

Automatisoitu ja dynaaminen mittausmenetelmä mahdollistaa, vaikka kaikkien piirtomittain piirtojen mitaamisen edullisesti. Piirtomittoja käytettäessä on huomattava, että hyvälaatuistenkin piirtomittojen asteikossa on usein epälineaarisuutta eli vain kalibroittujen piirtojen paikka on tarkkaan tunnettu.



Kuva 1. VTT MIKESin piirtomittainterferometri.





Kuva 2. Tulokset korkealaatuiselle piirtomitalle paljastavat asteikon epälineaarisuuden. Katso 0-25 mm aluetta joka on mitattu tiheämmällä välillä.

## Jäljitettävyys

Piirtomittainterferometrissä käytetyn laserin aallonpituus on kalibroitu pituuden kansallista mittanormaa- lia jodistabiloitua HeNe-laseria vasten. Myös käytet- tävät lämpötila-, paine- ja kosteusmittarit on kalib- roitu VTT MIKESissä.

Oikeat mittaustulokset varmistetaan osallistumalla säännöllisesti EURAMETin ja/tai CCL järjestämiin avainvertailuihin.

## Kalibrointipalvelu ja mittausepävarmuus

Kalibrointitoimeksianto aloitetaan kysymällä asiak- kaalta mitattavien piirtojen nimellisetäisyyden, mit- tausalueen paikka ja leveys sekä sopimalla tavoitel- tava epävarmuustaso. Toistamalla mittausta eri koh- dissa interferometrin mittausaluetta ja eri asennoissa voidaan keskiarvoistaa mm. Abbe virheeseen ja tai- tekerroinkorjaukseen liittyviä epävarmuuskom- ponentteja.

Paras mittausepävarmuus saavutetaan matalan lämpöpiteneiskertoimen piirtomitoille, joissa piirrot ovat hyvälaatuisia eli reunoiltaan mahdollisimman teräviä, suoria ja tasalevyisiä. Myös mittausalueen toistuvaan asettamiseen olisi hyvä olla merkinnät. Tavoiteltaessa pientä mittausepävarmuutta myös piirtomitan pinnan tasomaisuuden oikein tuettuna on hyvä olla mahdollisimman hyvä ja ainakin parempi kuin 50 µm.

Asiakas voi valita omien tarpeidensa mukaan joko edulliseen peruskalibrointiin tai huipputarkan kalib- roinnin.

Taulukossa 1 on eri piirtomittakalibrointien mit- tausepävarmuuksia.

### Viitteet:

Lassila, A. (2012). MIKES fibre-coupled differential dy- namic line scale interferometer. *Measurement Science and Technology* 23(9), [094011].  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/9/094011>

Taulukko 1. Mittausepävarmuudet piirtomitoille.

Kalibroitava laite	Mittausalue	Epävarmuus (k=2)
Tavalliset piirtomitat, normaalikalibrointi	10 µm ...1,12 m	0,2...0,5 µm
Tarkat piirtomitat, tarkempi kalibrointi	10 µm ...1,12 m	0,05...0,15 µm
Huipputarkat piirtomitat, paras kalibrointi	10 µm ... 1,12 m	Q[6,2 nm, 82E-09 L] **

L, D = mitattu pituus tai vastaava halkaisija metreissä

\*Kalibroinnin epävarmuus on joskus suurempi johtuen kalibroitavan laitteen aiheuttamasta epävarmuudesta

\*\*Epävarmuus lasketaan  $Q[x; y]=(x^2+y^2)^{1/2}$

# Porrasmittapalojen tarkat kalibroinnit

Ville Byman, Tutkija  
Puh. 0503869327  
[ville.byman@vtt.fi](mailto:ville.byman@vtt.fi)

Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

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

## Porrasmittapalainterferometri

VTT MIKESin porrasmittapalojen kalibrointiin tehty interferometri (kuva 1.) mahdollistaa porrasmittapalojen huipputarkat kalibroinnit maailman parhaalla tarkkuustasolla aina 2 metrin pituuteen saakka. Mittalaite sijaitsee olosuhteiltaan stabiilissa laboratoriossa: lämpötila on  $20\text{ °C} \pm 0,05\text{ °C}$  ja suhteellinen kosteus  $45 \pm 5\%$ . Laite mittaa pintojen etäisyydet tietokoneohjatuksi interferometriä ja erikoismittapäätä hyväksikäyttäen.

Porrasmittapala asetetaan ja suunnataan hyödyn-tään laitteessa olevaan 3d paikka-anturia. Ilman tai-tekertoimen vaikutus mitataan erillisten kosteus-, paine- ja lämpötila-antureiden avulla ja korjataan käyttäen uudistettua Edlenin kaavaa. Lämpöpitemiskorjaus tehdään mittaan kiinnitettyjen Pt-100 anturien lukemia käyttäen. Laite soveltuu mm. Koban ja Mitutoyon valmistamille porrasmittapaloille.

Automatisoitu ja dynaaminen mittaumenetelmä mahdollistaa nopean ja edullisen kalibroinnin.



Kuva 1. VTT MIKESin interferometri porrasmittapalojen kalibrointiin.

## Kalibrointipalvelu ja mittausepävarmuus

Kalibrointitoimeksianto aloitetaan sopimalla tavoiteltava epävarmuustaso. Toistamalla mittausta eri kohdissa interferometrin mittausaluetta ja eri asennoissa voidaan keskiarvoistaa mm. Abbe virheeseen ja taittekerroinkorjaukseen liittyviä epävarmuuskomponentteja.

Asiakas voi valita omien tarpeidensa mukaan joko edulliseen peruskalibrointiin tai huipputarkan kalibroinnin porrasmittapalelle.

Taulukossa 1 on eri porrasmittapalalibrointipalveluiden mittausepävarmuuksia.

## Jäljitettävyys

Porrasmittapalainterferometrissä käytetyn laserin aallonpituus on kalibroitu pituuden kansallista mitta-normaalia jodistabiloitua HeNe-laseria vasten. Myös käytettävät lämpötila-, paine- ja kosteusmittarit on kalibroitu VTT MIKESissä.

Oikeat mittaustulokset varmistetaan osallistumalla säännöllisesti EURAMETin ja/tai CCL järjestämiin avainvertailuihin.

### Viitteet:

Byman, V., Jaakkola, T., Palosuo, I., & Lassila, A. (2018). High accuracy step gauge interferometer. *Measurement Science and Technology* **29**(5), [054003].

<https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaad32>

Coveney, T., et al., Calibration of 1-D CMM artefacts: step gauges (EURAMET.L-K5.2016) et al, 2020, *Metrologia* **57**, 04002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/04002>

Taulukko 1. Mittausepävarmuudet porrasmittapaloille.

Kalibrointipalvelu	Mittausalue	Epävarmuus ( $k=2$ )
Edullinen peruskalibrointi	10 mm... 2 m	0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Tarkempi kalibrointi	10 mm ...2 m	0,15 $\mu\text{m}/\text{m}$
Huipputarkka kalibrointi	10 mm ... 2 m	Q[64 nm; 88E-9 L]

L = mitattu pituus tai vastaava halkaisija metreissä

\*Kalibroinnin epävarmuus on yleensä näitä suurempi johtuen kalibroitavan laitteen aiheuttamasta epävarmuudesta

\*\*Epävarmuus lasketaan  $Q[x; y]=(x^2+y^2)^{1/2}$

# Mittalatat, -nauhat ja etäisyysmittarit

Jarkko Unkuri, Tutkija  
Puh. 040 410 5506  
[jarkko.unkuri@vtt.fi](mailto:jarkko.unkuri@vtt.fi)

Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

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

## Mittalattojen, -nauhojen ja etäisyysmittareiden kalibroinnit

### 30 m:n mittarata

VTT MIKESin 30 m:n mittarata (kuva 2) tarjoaa hyvät mahdollisuudet tarkkojen pituuden mittalaitteiden kalibrointiin. Mittahuoneen lämpötilaksi on vakioitu koko pituudeltaan  $+20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$  ja kosteudeksi  $45 \pm 5\%$ . Kolmenkymmenen metrin mittausalue on toteutettu korkealuokkaisen lineaarijohteen ja liikkuvan mittauskelkan avulla. Mittauskelkalla sijaitsevat piirtomittojen mittauksissa käytettävät mikroskooppi, CCD-kamera ja monitori. Mikroskoopin paikka mitataan laserinterferometrin avulla.

Mittaushuoneen lämpötilan tasaisuus ja tarkat mittarit mahdollistavat tarkan lämpöpitenehämisen ja taitekertoimen kompensoinnin.

Radalla voidaan kalibroida hyvin erilaisia pituuden mittalaitteita. Kalibroittavat laitteet voivat olla fyysisiä artefakteja kuten esim. mittanauhoja, mittalattoja tai esim. optisia etäisyydenmittauslaitteita. Nauhamitat ja muut taipuisat pituusnormaalit jännitetään standardoitua valmistajan ilmoittamaa tai erikseen asiakkaan kanssa sovitua voimaa apuna käyttäen. Useimmiten nauhamitoille voima on 50 N. Lämpöpitenehämisen korjaamiseen käytetään valmistajan tai asiakkaan ilmoittamaa kerrointa ja mitattua materiaaliämpötilaa.



Kuva 1. 30 metrin mittarata.



## Jäljitettävyys

30 m:n interferometrisellä mittaradalla käytettyjen laserien aallonpituudet on kalibroitu pituuden kansallista mittanormaalia jodistabiloitua HeNe-laseria vasten. Myös käytettävät lämpötila-, paine- ja kosteusmittarit on kalibroitu VTT MIKESissä.

Taulukko 1. Kalibroittavat mitat, mitta-alueet ja mittausepävarmuudet.

Kalibroitava laite	Mitta-alue	Epävarmuus ( $k=2$ )*
Mittanauha	0,001 m ... 30 m, (60, 90 ...) m	Q[35; 2L] $\mu\text{m}^{**}$
Mittalatta	0,001 m ... 5 m	10 $\mu\text{m}^{**}$
Circometri	0,1 m ... 9,55 m (halkaisija)	Q[7; 2D] $\mu\text{m}^{**}$
Luotimitta	1 m ... 30, (60, 90) m	Q[250; 5L] $\mu\text{m}^{**}$
Muut laitteet	0 m ... 30 m	(tapauskohtaisesti)

L, D = mitattu pituus tai vastaava halkaisija metreissä

\*Kalibroinnin epävarmuus on joskus näitä suurempi johtuen kalibroittavan laitteen aiheuttamasta epävarmuudesta

\*\*Epävarmuus lasketaan  $Q[x; y]=(x^2+y^2)^{1/2}$

# Tasomaisuuden ja muodon interferometrinen mittaus

Björn Hemming, Erikoistutkija  
Puh. 050 773 5744  
[bjorn.hemming@vtt.fi](mailto:bjorn.hemming@vtt.fi)

Ville Byman, Tutkija  
Puh. 050 386 9327  
[ville.byman@vtt.fi](mailto:ville.byman@vtt.fi)

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

## Tasomaisuus

Tekniikan ja fysiikan eri osa-alueilla käytetään moninaisia komponentteja, joissa kappaleen pinnan muoto ja erityisesti tasomaisuus on tärkeää. Esimerkkeinä mainittakoon piikiekot puolijohdeteollisuudessa, tiivistepinnat, laakeripinnat, mittauspinnat koskettavassa mittauksessa ja valon taittamiseen sekä heijastamiseen käytettävät optiset tasopinnat ja linssit.

Tasolasi on nopea ja helppokäyttöinen mittaväline tasomaisuuden siirtonormaaliksi sekä mittaamiseen.

Tasolasia käytetään teollisuudessa esim. mittapalojen ja mikrometriä mittauspintojen tasomaisuuden mittaamiseen, jolloin lasipinnan hyvä tasomaisuus on ehdoton edellytys kohdepinnan mittausten onnistumiseksi. Tasolaseilla siirretään tasomaisuus myös teollisuudessa käytettäville tasomaisuusinterferometreille tai muille tasomaisuuden tarkistuslaitteistoille. Edellä mainituille mittaustarpeille tarjoaa VTT MIKES mittaustaikaa sekä metrologisen jäljitettävyyden tasomaisuuden ja muodon mittaustarpeillaan (kuva 1).



Kuva 1. Tasolasin kalibrointi.

## Mittausmenetelmä

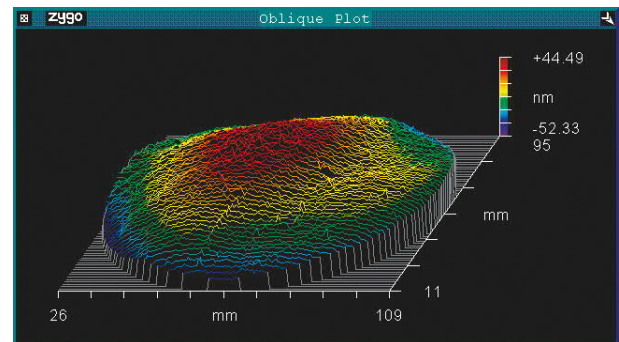
VTT MIKESin tasomaisuusmittalaite on Fizeau-interferometri, jonka valolähteenä on 633 nm:n He-Ne-laser. Säättämällä pieni kulma referenssinä toimivan tason ja mitattavan pinnan välille saadaan aikaan interferenssijuovia. Interferenssijuovien muoto mitataan ns. phase stepping -menetelmällä. Tuloksena on tutkittavan pinnan muodon poikkeama referenssitasosta (kuva 2). Mittausmenetelmän etuja ovat nopeus ja tarkkuus sekä se, että menetelmä mittaa koko alueen yhdellä kertaa.

## Jäljitettävyyttä

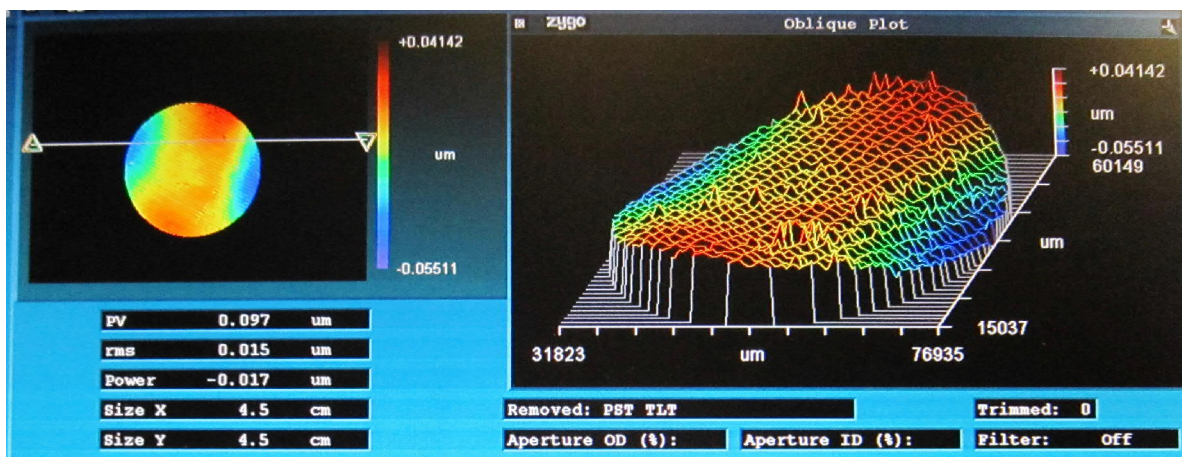
Laitteen referenssitaso on erittäin hyvälaatuinen tasomaisuuspoikkeaman ollessa vain noin 20 nm. Referenssitaso kalibroidaan joko absoluuttisella kolmen tason menetelmällä tai vertaamalla nestepintaan. Tasoja on myös eri heijastuskertoimilla, mikä mahdollistaa sekä peilipintojen että esimerkiksi lasipintojen tutkimisen.

## Mittauspalvelut

VTT MIKESin laitteistolla (Zygo GPI) voidaan mitata halkaisijaltaan  $\leq 150$  mm pintojen muotoa parhaimmillaan 45 nanometrin mittaustarkkuudella. Mittauksen edellytyksenä on, että mitattavan pinnan korkeusvaihtelut ovat alle  $12 \mu\text{m}$  ja luonteeltaan hitaasti muuttuvia. Optinen valon interferenssiin perustuva pinnanmuodon mittaus soveltuu kosketuksettomana myös aroille materiaaleille ja tarkkuutensa ansiosta erityisen hyvin vaativiin mittauksiin. Laitteella voidaan mitata myös läpinäkyvien levyjen tasapaksuutta.



Kuva 2. Esimerkki mitatuista pinnanmuodoista tasolasille.



Kuva 3. Esimerkki mitatuista pinnanmuodoista tasolasille.



# Työstökoneemittaukset

Pasi Laukkanen, Tutkimusinsinööri  
Puh. 050 382 9674  
[pasi.laukkanen@vtt.fi](mailto:pasi.laukkanen@vtt.fi)

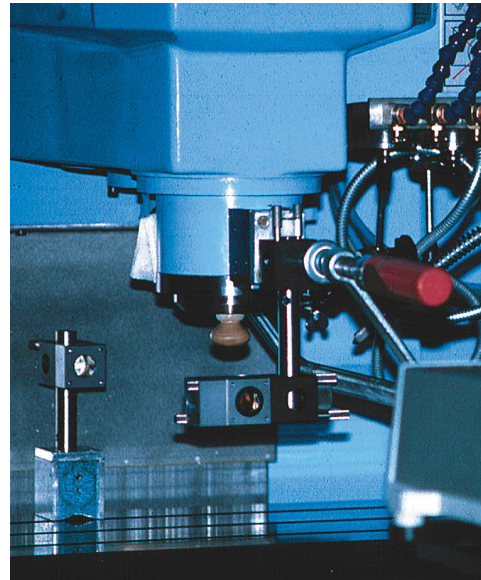
Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

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

## Työstökoneemittaukset

Tuotannon ja laatu järjestelmien vaatimukset edellyttävät työstökoneiden tarkkuuden tuntemista. Työstökoneille suoritetaan erilaisia mittauksia vastaanotto-tarkastuksissa, siirtojen yhteydessä ja pyrittäessä enakoivaan kunnossapitoon. VTT MIKES tarjoaa käyttöön laajan kokemuksensa geometrisista mittauksista, paikoitus- ja toistotarkkuuden mittauksista sekä koneella työstettyjen testikappaleiden mittauksista.

VTT MIKESin asiantunteva ja kokenut henkilöstö, nykyaikainen mittalaiteteknologia ja jatkuva mittausmenetelmien kehitystyö takaavat asiakkaalle tarkat ja standardien mukaiset mittaukset.



Kuva 1. Työstökoneen asteikon mittaus.



Kuva 2. Mittausjärjestely työstökoneen mittauksessa.



## Geometriset mittaukset

Geometristen mittausten avulla selvitetään työstökoneiden tärkeimpien toimielinten muotovirheet sekä osien keskinäiset sijainnit ja asennot. VTT MIKES tekee geometriset mittaukset ISO- ja DIN-standardeihin perustuen. Tärkeimpiä mittaushohteita ovat karan heiton mittausta, karan ja koneen johteiden yhdensuuntaisuuksien ja kohtisuoruuksien mittausta sekä koneen liikkeiden kohtisuoruuksien ja suoruuksien mittaukset.

## Paikoitus- ja toistotarkkuuden mittaukset

Akselin paikoitus- ja toistotarkkuuden mittauksella saadaan selville virheet akselin eri pisteissä. Liikeakselin virheet voidaan kompensoida syöttämällä virheitä vastaavat kompensointiarvot työstökoneen ohjainyksikön muistiin. VTT MIKESin laserinterferometrillä suorittama paikoitustarkkuuden mittausta on nopea ja tarkka tapa koneen liikeakselien säätöön (kuva 3). Kyseistä menetelmää käytettäessä mittaustarkkuus on parhaimmillaan alle 0,001 mm /m.

## Testikappaleiden mittaukset

Työstökokeiden tarkoituksena on selvittää koneen tarkkuus työstötilanteessa. VTT MIKESin geometriset mittaukset ja työstökokeissa valmistettujen testikappaleiden mittaukset täydentävät toisiaan. Testikappaleet mitataan lämpötilastabiloidussa mittaustalioriossa monipuolisia ja nykyaikaisia mittalaitteita ja menetelmiä käyttäen. Käytössä on valikoima yleisiä konepajateknisiä mittalaitteita sekä joukko erikoislaitteita (katso taulukko 1).

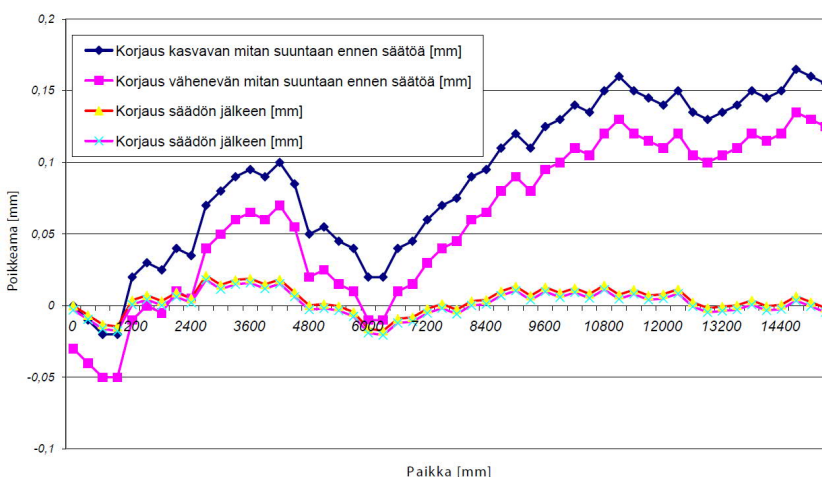
## Jäljitettävyys

Kaikki työstökonemittauksissa käytetyt mittanormaalit on kalibroitu vastaavia tarkempia VTT MIKESin siirtönormaaleja käyttäen.

Taulukko 1. Työstökonemittauksissa käytettäviä mittalaitteita.

Geometrisissa sekä paikoitus- ja toistotarkkuuden mittauksissa:	Testikappaleiden mittauksissa
– laserinterferometrit	– pinnankarheuden, muodon, ympyrämäisyyden ja pituuden mittauskoneet
– autokollimaattorit	– induktiiviset anturit
– sähköinen vesivaaka	– yleiset konepajatekniset mittalaitteet
– induktiiviset anturit	– koordinaattimittauskone
– luotimitta	
– muut laitteet	

Paikoitustarkkuus X-akseli



Kuva 3. Erään avarruskoneen x-akselin virheet ennen lasermittausta ja säätöä sekä sen jälkeen.

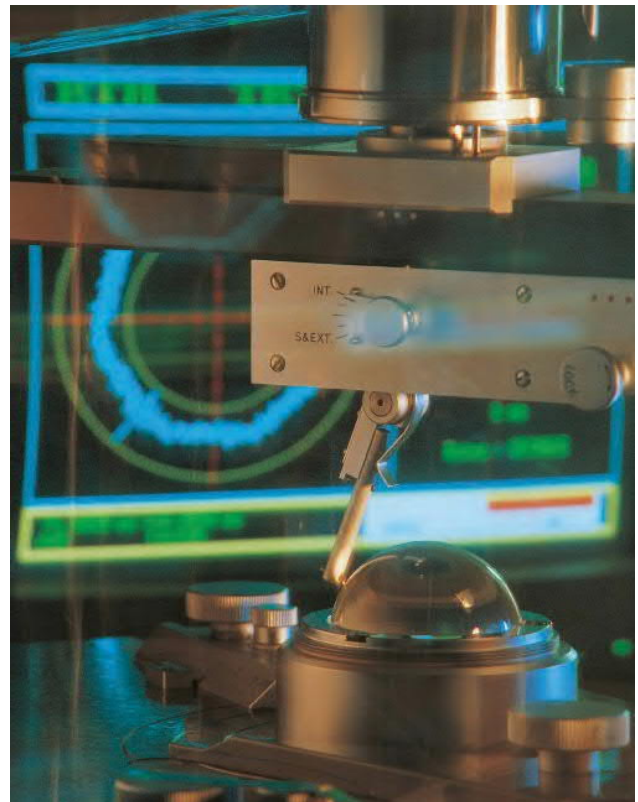
# Ympyrämäisyyden mittaus

Björn Hemming, Erikoistutkija  
Puh. 050 773 5744  
[bjorn.hemming@vtt.fi](mailto:bjorn.hemming@vtt.fi)

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

## Ympyrämäisyys konepajateollisuudessa

Koneistettujen kappaleitten geometrisistä elementeistä noin 80 % on pyörähdyspintoja. Koneiden ja laitteiden moitteettoman toiminnan kannalta ympyrämäisyydellä on tärkeä merkitys, joka korostuu vaadittaessa luotettavuutta, pitkää käyttöikää, alhaisia käyttökustannuksia ja ympäristöystävällisyyttä. VTT MIKES mittaa ympyrämäisyyttä mm. rengas- ja tappitulkeista, liukulaakereista, metallisista tiivisteistä sekä hydraulikka- ja pneumaattikkakomponenteista. Näihin läheisesti liittyvinä suureina mittaamme myös mm. heitot, sama-akselisuudet, yhdensuuntaisuudet ja suoruudet (kuva 1).



Kuva 1. Ympyrämäisyyden mittaus on välttämätön osa konepajateknistä valmistusta.

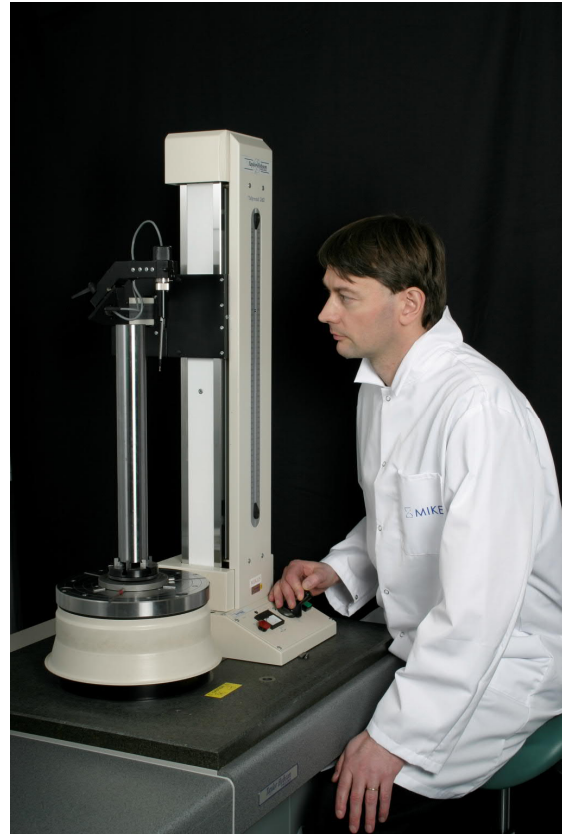
## Mittausmahdollisuudet

Ympyrämäisyys mitataan joko pyörivällä karalla tai pyörivällä pöydällä varustetulla ympyrämäisyyden mittauskoneella. Mittaukset voidaan suorittaa usealla eri suodattimella ISO 1101 -standardin määritelmän mukaisesti (MZ) ja vastaavasti käyttäen muita laskentatapoja (MC, MI ja LS). Asiakkaan kannalta kahden vaihtoehtoisen mittauskoneen käyttö takaa sen, että kohteet saadaan oikein ja edullisesti mitattua. Tarkemmat tiedot laitteesta löytyvät taulukossa 1.

Lieriömäisyydet mitataan pyörivällä pöydällä varustetulla mittauskoneella (kuva 2), osin samalla asetuksella voidaan mitata kappaleen sama-akselisuuksia, heittoja, yhdensuuntaisuuksia ja suoruuksia. Lieriömäisyyden mittaus on osa rengas- ja tappitulkkien kalibrointia.

## Jäljitettävyys

Molempien mittauskoneiden antureiden jäljitettävyys saadaan suurennusnormaalien avulla, jotka vuorostaan on kalibroitu muodonmittauskoneella. Muodonmittauskone saa jälkensä interferometrisesti kalibroituista mittapaloista. Mittauskoneiden johteet ja akselit on kalibroitu virhe-erottelua käyttäen.



Kuva 2. Ympyrämäisyyden ja lieriömäisyyden mittauskone Talysond 262.

Taulukko 1. VTT MIKESin ympyrämäisyyden mittalaitteet.

Laite	Pyörivä osa	Kappaleen maksimi korkeus /mm	Kappaleen maksimi sisä- / ulkohalkaisija /mm	Kappaleen maksimipaino /kg	Muuta	Laajennettu epävarmuus ( $k=2$ )
Talysond 73HR ympyrämäisyys	kara	400	175 / 300	100	pinta voi olla epäjatkuva ja epäsymmetrinen	Q[10 nm; 0.01 R]
Talysond 262 lieriömäisyys	pöytä	500	- / 350	50	pinta voi olla epäjatkuva	Q[0,1 μm; 0.001 L]

R on poikkeama ympyrämäisyydestä mikrometreissä, L on lieriön korkeus metreinä;  $Q[x; y] = (x^2+y^2)^{1/2}$

# Mikroskoopit ja niiden kalibrointinormaalit

Virpi Korpelainen, Erikoistutkija  
Puh. +358 050 410 5504

[virpi.korpelainen@vtt.fi](mailto:virpi.korpelainen@vtt.fi)

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

Luotettavat mittaustulokset tutkimuksessa, valmistuksessa ja laadunvalvonnassa edellyttävät mittalaitteiden tarkkuuden tuntemusta. Kalibrointi on paras tapa tarkistaa instrumentin tarkkuus ja stabiilisuus. Mikroskooppien kalibrointi voidaan tehdä kalibroiduilla siirtonormaaleilla. Virallinen kalibrointitodistus takaa jäljitettävyyden metrin määritelmään.

Optisille mikroskoopeille VTT MIKES tarjoaa korkealaatuisten piirtoasteikkojen kalibroinnin.

Skannausanturimikroskoopit (SPM) voidaan kalibroida käyttämällä monenlaisia siirtonormaaleja [1,2], jotka voidaan kalibroida VTT MIKESissä. 1D- ja 2D-hilatkalibroidaan joko laserdiffraktiolla tai metrologisella atomivoimamikroskoopilla (MAFM). Lisäksi hilan korkeus ja ortogonaalisuus voidaan mitata. Askelkorkeusstandardit tai 1D- tai 2D-hilojen z-asteikko voidaan kalibroida myös.

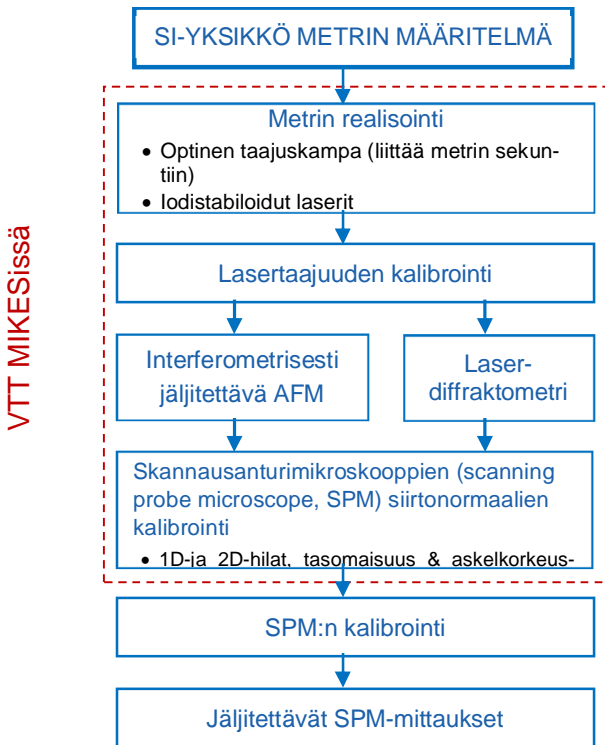
[1] Guideline VDI/VDE 2656 Part 1 (Draft): Determination of geometric quantities by Scanning Probe Microscopes - Calibration of Measurement Systems.

[2] V. Korpelainen and A. Lassila, Calibration of a commercial AFM: traceability for a coordinate system, Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 395–403.

Kuva 1. VTT MIKESin interferometrisesti jäljitettävä metrologinen AFM (MIKES IT-MAFM).



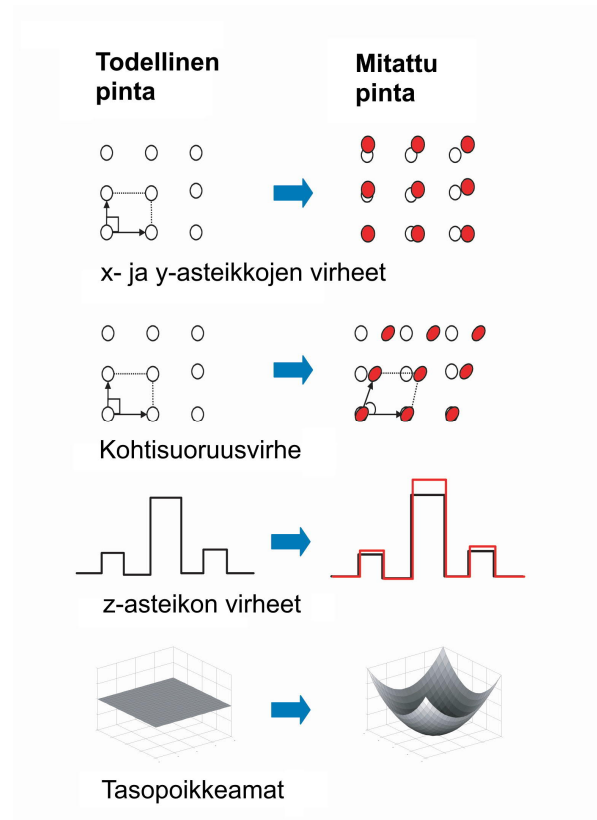




Itse kalibrointi antaa tietoa instrumentin tarkkuudesta. Mittauksen tarkkuutta voidaan lisätä korjaamalla kalibroinnissa havaitut virheet joko suoraan mittausohjelmistossa tai mittauksen jälkeen erillisellä ohjelmistolla.

Kalibroinnin ensimmäinen vaihe on x- ja y-asteikko- virheiden mittaaminen 1D- tai 2D-hiloilla ja z-asteikkovirheet askelkorkeusnormaaleilla. X- ja y-asteikkojen kalibrointi antaa myös tietoa niiden lineaarisuudesta. Z-asteikon lineaarisuus on tarkistettava useilla eri askelkorkeusnormaaleilla. 2D-hilojen avulla voidaan havaita ortogonaalisuusvirheet.

Poikkeamat tasomaisuudesta voidaan mitata tasomaisuusnormaalilla. Tarkimmissa kalibroinneissa täytyy mitata ja korjata myös muita virhetyppejä; esimerkiksi z-akselin ortogonaalisuus ja pyörimisvirheet. Lisäksi seuraavat virhelähteet tulee ottaa huomioon: kärjen ja näytteen vuorovaikutus, värinä, melu ja lämpöpyöriminen. Kalibrointiväli riippuu laitteen stabiilisuudesta, esim. mikroskoopit, joissa on avoimen silmukan skanneri, on kalibroitava ennen ja jälkeen jokaisen mittauksen.



Kuva 3. SPM-mikroskooppien tyypillisiä virhelähteitä.

Taulukko 1. Kalibrointipalvelut SPM-mittanormaaleille.

	Mittausalue	Epävarmuus
1D-hila (diffraktiomittaus) Hilan periodi (pitch)	300 nm – 10 µm	50 – 100 pm
2D-hila (diffraktiomittaus) Hilan periodi (pitch) Kohtisuorus	300 nm – 10 µm	50 – 100 pm
1D-hila (AFM-mittaus) Hilan periodi (pitch), $p$ Kohtisuorus Askelkorkeus, $h$ Tasomaisuus	100 nm – 10 µm  10 nm – 2 µm 100 µm x 100 µm	Q [3.4; 0.2 $p/\mu\text{m}$ ] nm 14 mrad Q [2; 0.2 $h/\mu\text{m}$ ] nm 5 nm
Askelkorkeusnormaali	10 nm – 2 µm	Q [2; 0.2 $h/\mu\text{m}$ ] nm
Tasomaisuusnormaali	100 µm x 100 µm	5 nm

# Kulman ja kohtisuoruuden mittaus

Ville Heikkinen, Tutkija  
Puh. 050 415 5980  
[vile.heikkinen@vtt.fi](mailto:vile.heikkinen@vtt.fi)

Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

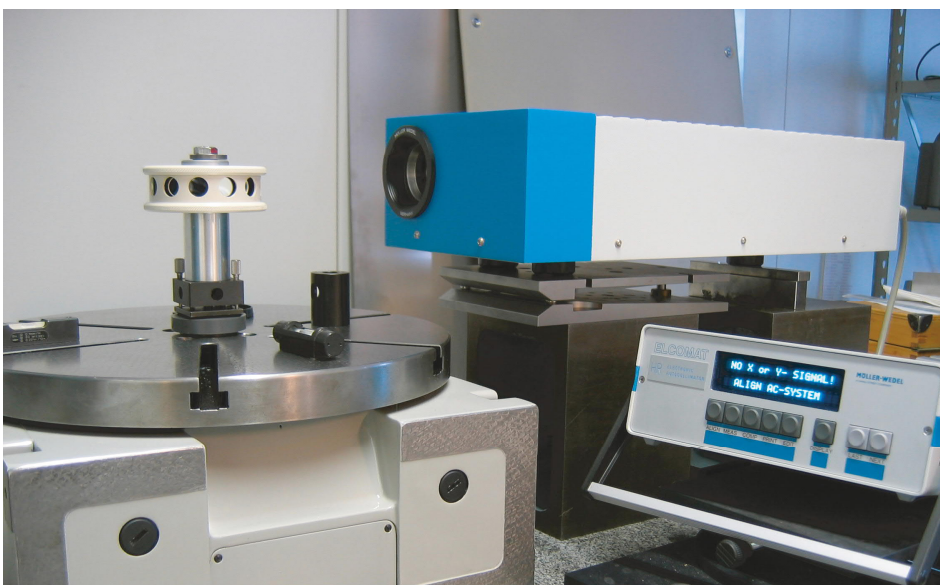
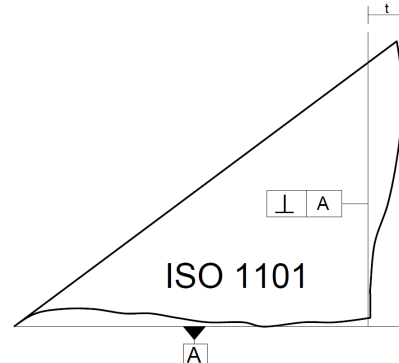
VTT MIKES, Tekniikantie 1,  
02150 Espoo  
Puh. 020 722 111

Kulman mittaus on tärkeää kaikessa konepaja- ja rakennusteollisuudessa. Mittojen kasvaessa kulman mittauksen merkitys korostuu myös dimensioiden mitauksessa. Suorakulma ja siihen liittyvä kohtisuoruus ovat kulmanmittauksen keskeinen erikoistapaus.

Kulman yksikkö SI-järjestelmässä on radiaani [rad], mutta toimialasta ja mittauskohteesta riippuen kullekin käytetään yleisemmin muita yksiköitä. Koneenrakennuksessa kulmat ilmoitetaan yleensä asteina [°], minuutteina ['] ja sekunteina ["], geodesiassa yleisimmin käytetty yksikkö on gooni [gon]. Maaraken-  
nuksessa ja muutenkin pienille kulmille yleinen yksikkö on [mm/m]. Kirjavassa yksikköjoukossa muita ilmaisutapoja ovat prosentit [%] ja pituussuhteet.

Kohtisuoruus ISO1101-standardin mukaan:

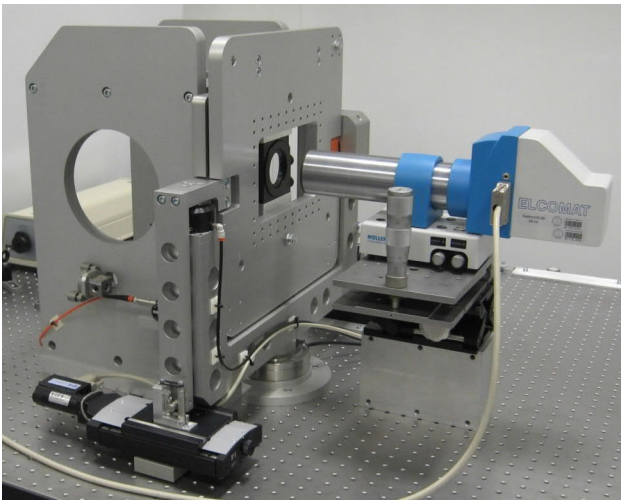
- Tuloksena annetaan toleranssialueen leveys  $t$
- Toinen sivu määritetään referenssisivuksi ja vain tätä referenssisivua vastaan kohtisuora sivu mitataan



Kuva 1. Kuvassa monitahokas on kiinnitetty pyöröpöytään. Pyöröpöydän ja monitahokkaan virheet voidaan erottaa suorittamalla sarja mittauksia Möller Wedel HPR autokollimaattorilla.

## Kulman mittalaitteet

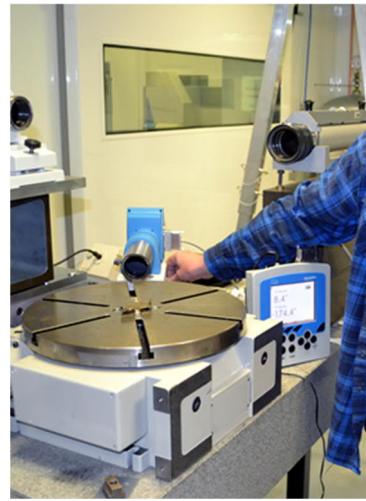
Tavallisimpia kalibrintikohteita konepajoissa ovat työstö- ja mittauskoneitten pyöröpöydät, yleiskulma- mitat, kulmamittapalat ja erilaiset vesivaa'at. Kone- asennuksissa ja rakennusteollisuudessa käytettäviä kulmamittalaitteita ovat mm. sähköiset kulmanmit- tauslaitteet, teodoliitit, vaaituskojeet, takymetrit, laser- interferometrit, autokollimaattorit ja monitahokkaat.



Kuva 2. VTT MIKESissä kehitetty interferometrinen 2D kulmageneraattori autokollimaattorien kalibrointiin

## Mittausepävarmuus

Mittaukset tapahtuvat kontrolloidussa mittaushuo- neessa  $+20\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$  lämpötilassa. Saavutettava mittausepävarmuus riippuu oleellisesti kalibroinnin kohteesta ja sen ominaisuuksista (esim. muoto- ja pinnankarheusvirheet).



Kuva 3. Kulmamittausten valmistelua.

Taulukko 1. Esimerkkejä kulmamittalaitteiden pienimmistä mittausepävarmuuksista.

Laitte	Mittausalue	Mittausepävarmuus ( $k=2$ )	Rajoituksia
Optiset monitahokkaat	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	0,2"	
Indeksoitava pyöröpöytä	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	0,5"	indeksoitava kulma $n \times 15^{\circ}$
Pyöröpöytä	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	0,2"	
Autokollimaattori	$0^{\circ} - 1^{\circ}$	0,02"	
Sähköinen kulmamittalaite	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	0,2"	
Teodoliitti	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	0,2"	pystykulmaa rajoittaa laite
Kulmamittapala	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	0,2"	
Teräs- ja kivisuorakulma	$90^{\circ}$	0,5"	suurin pituus 1 m
Pylvässuorakulma	$90^{\circ}$	0,5"	suurin pituus 1 m
Optinen suorakulma	$90^{\circ}$	0,5"	

# Takymetrit

Jarkko Unkuri, Tutkija  
Puh. 040 410 5506  
[jarkko.unkuri@vtt.fi](mailto:jarkko.unkuri@vtt.fi)

Antti Lassila, Tutkimustiimin päällikkö  
Puh. 040 767 8584  
[antti.lassila@vtt.fi](mailto:antti.lassila@vtt.fi)

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

VTT MIKES kalibroi takymetriä kulma- ja pituusmittaustoimintoja.

## Etäisyysmittarin kalibrointi 30 metrin mittaradalla

Takymetrin etäisyysmittarin havaintoja verrataan VTT MIKESin referenssimittalaitteen, laserinterferometrin, havaintoihin 30 m:n mittaradalla. Takymetrin ja laserinterferometrin mittaussakselit linjataan yhdensuuntaisiksi. Interferometri nollataan mittaradan alussa ja etäisyysmittarin havainnoista vähennetään interferometrin nollakohdassa havaittu lukema. Tuloksena

kalibrointitodistuksessa ilmoitetaan poikkeamat referenssietäisyydestä ja laajennettu ( $k=2$ ) mittausepävarmuus tähyksittäin. Tähyksenä voi olla mm. tarkkuusprisma, palloprisma, tarratähys tai tähyslevy. Mittausepävarmuuden arvo riippuu havaintojen hajonnasta ja on tarkoilla etäisyysmittareilla yleensä välillä 0,05 mm – 0,25 mm.



Kuva 1. VTT MIKESin 30 m:n mittarata.



## Kulmamittausten kalibrointi pyöröpöydällä ja kollimaatioputkilla

Takymetrin pysty- ja vaakakulma-asteikot kalibroidaan käyttäen referenssilaitteena monitahokkaiden ja autokollimaattoreiden avulla kalibroituja Eimeldingen pyöröpöytää.

Vaaka-asteikon kalibrointia varten takymetri asennetaan kulmapöydälle siten että pystyakseli on kulmapöydän akselin jatkeena (kuva 2). Kulmapöytää käännetään täysikierto 30° välein ja vastaavat havainnot takymetrillä tehdään kollimaatioputkeen kohdistuen.

Pystykulma-asteikko kalibroidaan samaan tapaan pyöröpöytää pystyasennossa käyttäen hyväksi tarkoitusta varten suunniteltua optomekaniikkaa.



Kuva 2. Takymetrin vaaka-asteikon kalibrointi Eimeldingen pyöröpöydällä käyttäen tähtäyskohteena kollimaatioputkea.

Takymetrikalibroinnin sisältö	Tyypillinen mittausepävarmuus
pituusasteikon kalibrointi	
ero referenssiin	
– tarkkuustähyksellä	0,15 mm
– pallotähyksellä	0,15 mm
– tarratähyksellä	0,20 mm
– ilman tähystä	
kulma-asteikkojen kalibrointi	
– pystykehän asteikkovirhe	2" – 3"
– vaakakehän asteikkovirhe	1" – 2"
– tappikaltevuus	1" – 2"
– pystykehän indeksivirhe	0,5" – 1,5"
– kollimaatiovirhe	0,5" – 1,5"
– hiusristikon asento ja kohtisuoruus	
– fokuksinnin vaikutus	
– olosuhdeantureiden näyttämän tarkistus	
– automaattihakutoiminnon hajontatesti	

# bey<sup>0</sup>nd

## the obvious