

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan Koulutusohjelma

KOORDINAATTIMITTAUSKONEET JA KONEENOSIEN MITTAAMINEN  
COORDINATE MEASURING MACHINES AND MEASURING OF MACHINE  
COMPONENTS

Lappeenrannassa 18.4.2011

Ari Pesola

0312085

## SISÄLLYSLUETTELO

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1 JOHDANTO .....                                                | 1  |
| 2 KONEENOSIEN MITAT JA TOLERANSSIT .....                        | 3  |
| 2.1 Pituustoleranssit .....                                     | 3  |
| 2.2 Geometriset toleranssit .....                               | 5  |
| 3 KOORDINAATTIMITTAUSKONEET .....                               | 7  |
| 4 KOORDINAATTIKONEIDEN MITTAUSPÄÄT .....                        | 11 |
| 4.1 Koskettavat anturit .....                                   | 11 |
| 4.2 Videomittaus .....                                          | 14 |
| 4.3 Laseranturit .....                                          | 17 |
| 5 MITTAUSOHJELMISTOT .....                                      | 20 |
| 6 KONEISTETUN TUOTTEEN MITTAUKSET .....                         | 21 |
| 6.1 Pituusmittojen tarkastus .....                              | 21 |
| 6.2 Geometriset toleranssit .....                               | 22 |
| 6.3 Koordinaattimittauskoneen käyttö kotelon mittauksissa ..... | 25 |
| 7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....                                          | 27 |
| 8 YHTEENVETO .....                                              | 28 |
| LÄHTEET .....                                                   | 29 |

## LIITEET

## 1 JOHDANTO

Koneistettujen kappaleiden mittatarkkuus on tänä päivänä yhä isommassa roolissa konepajojen pyrkiessä parantamaan tuotteidensa laatua. Perinteisten käsikäyttöisten mittalaitteiden tarkkuus ei välttämättä aina riitä, tai mittaustulosten saanti vie liian kauan aikaa. Tässä kandidaatintyössä on tutkittu, mitä erilaisia vaihtoehtoja perinteisille käsikäyttöisille mittalaitteille on nykyään olemassa. Työssä on myös mainittu mittaamisen kannalta muutamia seikkoja, joita koneenosien suunnittelussa, mittauslaitteen hankinnassa sekä itse mittaustapahtumassa tulisi ottaa huomioon.

Koordinaattimittauskoneet ovat laitteita joiden avulla voidaan mitata vaikeitakin geometrisia muotoja ja tuotteita kuten nokka-akseleita, kampiakseleita, turbiinien siivekkeitä, jne. /1/ Työssä on vertailtu keskenään kosketukseen, lasersäteeseen ja konenäköön perustuvia koordinaattimittauskoneita. Vertailtavien laitteiden valinnassa on otettu huomioon sarjatuotannon tuomat vaatimukset. Toisaalta erittäin tarkat mittauslaitteet asettavat omat vaatimuksensa myös mittausympäristölle mm. siisteyden ja ilmanlaadun suhteen.

Tekstissä käsitellään koordinaattimittauskoneita, jotka kykenevät mittaamaan noin  $1\text{m}^3$  tilavuuteen mahtuvia, tasomaisia kappaleita, kuitenkin menemättä mikroskooppisiin kappaleisiin. Viimeisessä kappaleessa pohditaan erään koneistetun tuotteen mittauksia; tarvitaanko joissain mittauksissa koordinaattimittauslaitetta vai selvitäkö perinteisillä käsimittauslaitteilla? Tässä työssä tarkastellaan mittauslaitteita vain pituus- ja geometriamittausten kannalta. Pinnanlaadun, kovuuden tms. mittausta ei ole otettu huomioon.

Ennen koordinaattimittauskoneita, konepajatekniset mittaukset on suoritettu perinteisillä käsimittavälineillä. Vaikka koordinaattimittauskoneet ovat nopeuttaneet joitain mittauksia sekä tehnyt vaikeimpien geometrinen toleranssien mittaamisen ylipäättään mahdolliseksi, eivät ne kuitenkaan koskaan syrjäytä täysin käsimittavälineitä. Varsinkin yksinkertaisissa pituusmittauksissa ja pienissä sarjoissa, käsimittalaitteet ovat nopeampi ja halvempi ratkaisu mittauksen toteuttamiseen.

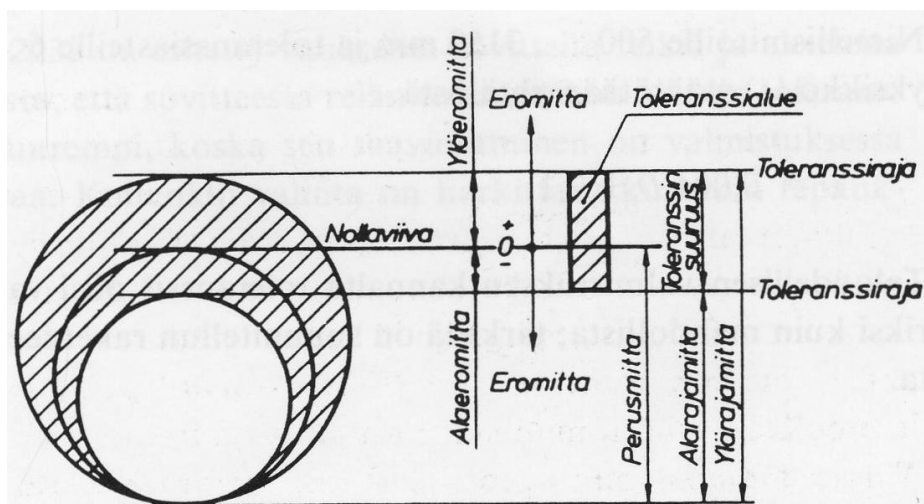
Perinteiset käsimittauslaitteet ovat jaoteltu kolmeen eri ryhmään, jotka ovat kiintomitat, osoittavat mittauslaitteet ja muut mittauslaitteet. Kiintomittoihin kuuluvat erilaiset mittapalat, tulkit ja mallit. Konepajoilla on usein käytössä mittapalasarja tai rakotulkki, joiden avulla voidaan tarkistaa esim. raon tai akselin toleranssialue. /2/ Mittapaloja käytetään yleensä muiden mittausvälineiden tarkastuksiin ja asetuksiin /3/. Muut mittauslaitteet tarkoittavat työstökoneiden omia mittasauvoja /2/. Konepajoissa saatetaan joskus käyttää myös luotilankaa tai vesivaakaa mittojen ja kohtisuoruuksien tarkistamiseen /4/. Tyypillisesti tällaisilla perinteisillä mittausvälineillä päästään noin 0,01...0,2 mm tarkkuuteen /5/.

## 2 KONEENOSIEN MITAT JA TOLERANSSIT

Tuotteet mitoitetaan aina joidenkin toleranssiarvojen väliin. Tällöin pääperiaatteena on luopuminen absoluuttisen mitan käytöstä jolloin se korvataan mitalla, joka saa vaihdella toleranssialueella. Näitä mittamääräyksiä kontrolloidaan mittausvälineillä. /3/ Koska ehdottoman tarkkaa kappaletta on mahdotonta valmistaa, saadaan valmistuksessa toleranssien käytöllä aikaan kustannussäästöjä kuitenkin tinkimättä tuotteen toimintavarmuudesta. /3, 4/ Konepajateollisuudessa on käytössä periaate, jonka mukaan mittalaitteen mittausepävarmuus saa olla 20 % toleranssialueesta. Tämä periaatteen pohjalta tehdään mittauslaitteen valinta. /3/

### 2.1 Pituustoleranssit

Pituusmittojen toleransseja varten on olemassa kansainvälinen ISO - toleranssijärjestelmä, jonka käsitteet löytyvät kotimaisesta SFS 2772 – standardista. /6/ Järjestelmän avulla voidaan kullekin osalle ilmoittaa perusmitta, rajamitat, eromitat, toleranssiasema ja –aste. Perusmitta ilmoittaa osan nimellisen mitan. Rajamitat kertovat ne rajat, joiden väliin osan mitan tulee osua. Eromitoilla ilmoitetaan toleranssirajat perusmitan suhteen. Ne voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia. Toleranssiasema ilmoitetaan kirjaimilla ja sen tarkoitus on ilmoittaa toleranssialueen paikka perusmitan suhteen. Akseleille käytetään pieniä kirjaimia ja rei'ille isoja kirjaimia. Toleranssiaste kuvaa toleranssin suuruutta. Edellä mainittuja käsitteitä havainnollistaa kuva 1. /4/



**Kuva 1.** Toleranssien nimikkeitä. /6/

ISO – toleransseissa on perustoleranssiasteet ilmoitettu IT - taulukossa. Taulukossa 1 on osa IT – taulukon arvoista. Taulukosta nähdään, että mitä pienempi IT – aste on, sitä tarkempi on valmistusvaatimus. Taulukko jatkuu aina 3150 mm perusmittaan ja IT18 asteeseen asti. /7/ Käytännössä siis akseleiden ja reikien kohdalla kirjaimen perässä oleva toleranssiasteen numero kertoo, kuinka paljon mitattu mitta saa poiketa peruseromitasta /8/

Taulukko 1. Osa perustoleranssiasteista IT – taulukossa. /14/

| Perusmitta<br>Basic size<br>mm |                 | Perustoleranssiasteet/Standard tolerance grades |                   |                   |                   |                   |     |     |     |     |      |      |      |      |  |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|--|
|                                |                 | IT1 <sup>2)</sup>                               | IT2 <sup>2)</sup> | IT3 <sup>2)</sup> | IT4 <sup>2)</sup> | IT5 <sup>2)</sup> | IT6 | IT7 | IT8 | IT9 | IT10 | IT11 | IT12 | IT13 |  |
| >                              | ≤               | Toleranssit/Tolerances                          |                   |                   |                   |                   |     |     |     |     |      |      |      |      |  |
|                                |                 | μm                                              |                   |                   |                   |                   |     |     |     |     |      |      |      |      |  |
| –                              | 3 <sup>3)</sup> | 0,8                                             | 1,2               | 2                 | 3                 | 4                 | 6   | 10  | 14  | 25  | 40   | 60   | 0,1  | 0,14 |  |
| 3                              | 6               | 1                                               | 1,5               | 2,5               | 4                 | 5                 | 8   | 12  | 18  | 30  | 48   | 75   | 0,12 | 0,18 |  |
| 6                              | 10              | 1                                               | 1,5               | 2,5               | 4                 | 6                 | 9   | 15  | 22  | 36  | 58   | 90   | 0,15 | 0,22 |  |
| 10                             | 18              | 1,2                                             | 2                 | 3                 | 5                 | 8                 | 11  | 18  | 27  | 43  | 70   | 110  | 0,18 | 0,27 |  |
| 18                             | 30              | 1,5                                             | 2,5               | 4                 | 6                 | 9                 | 13  | 21  | 33  | 52  | 84   | 130  | 0,21 | 0,33 |  |
| 30                             | 50              | 1,5                                             | 2,5               | 4                 | 7                 | 11                | 16  | 25  | 39  | 62  | 100  | 160  | 0,25 | 0,39 |  |
| 50                             | 80              | 2                                               | 3                 | 5                 | 8                 | 13                | 19  | 30  | 46  | 74  | 120  | 190  | 0,3  | 0,46 |  |
| 80                             | 120             | 2,5                                             | 4                 | 6                 | 10                | 15                | 22  | 35  | 54  | 87  | 140  | 220  | 0,35 | 0,54 |  |

Teknisten piirustusten pituusmitat voidaan jaotella kolmeen eri ryhmään. Ryhmät ovat toimintamitat, ei-toimintamitat ja apumitat. Toimintamitat määrittelevät osien muodon ja sijainnin ja nämä mitat vaikuttavat niiden sopivuuteen muiden osien kanssa. Toimintamittaan on yleensä lisätty toleranssi. Ei-toimintamitat vaikuttavat kappaleen ulkonäköön, mutta ei sen toimintaan tai yhteensopivuuteen muiden osien kanssa. Apumitat voidaan yleensä jättää merkitsemättä, koska ne eivät vaikuta kappaleen valmistukseen. Joskus apumitta on kuitenkin tärkeä esim. raaka-aineen tai asennuksen valinnassa. /4/

Ne osat, joita ei ole erikseen piirustuksessa toleroitu, tulee olla valmistettu otsikko-osan yleistoleranssin tarkkuuteen. Ohjeet tähän on ISO 2768 standardissa (taulukko 2). Poikkeuksena ovat apumitat, joihin yleistoleranssi ei vaikuta. /4/

Taulukko 2. ISO 2768-standardin mukaiset toleranssiluokat. /7/

|                            |                 | Arvot mm                                   |            |             |               |                |                  |                    |                    |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------------------|------------|-------------|---------------|----------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Toleranssiluokka<br>Tunnus | Kuvaus          | Sallitut poikkeamat nimellismitta-alueella |            |             |               |                |                  |                    |                    |
|                            |                 | > 0,5 <sup>1)</sup><br>≤ 3                 | > 3<br>≤ 6 | > 6<br>≤ 30 | > 30<br>≤ 120 | > 120<br>≤ 400 | > 400<br>≤ 1 000 | > 1 000<br>≤ 2 000 | > 2 000<br>≤ 4 000 |
| f                          | hieno           | ±0,05                                      | ±0,05      | ±0,1        | ±0,15         | ±0,2           | ±0,3             | ±0,5               | –                  |
| m                          | keskikarkea     | ±0,1                                       | ±0,1       | ±0,2        | ±0,3          | ±0,5           | ±0,8             | ±1,2               | ±2                 |
| c                          | karkea          | ±0,2                                       | ±0,3       | ±0,5        | ±0,8          | ±1,2           | ±2               | ±3                 | ±4                 |
| v                          | erittäin karkea | –                                          | ±0,5       | ±1          | ±1,5          | ±2,5           | ±4               | ±6                 | ±8                 |

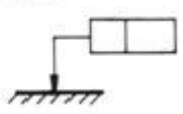
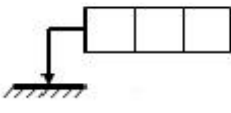
<sup>1)</sup> Nimellismitoille < 0,5 mm, eromitat tulee merkitä vastaavan nimellismitan viereen.

## 2.2 Geometriset toleranssit

Geometrisilla toleransseilla ilmoitetaan rajat, joiden sisällä muodon ja sijainnin tulee olla. Geometristen toleranssien käyttö on lisääntynyt koordinaattimittauskoneiden myötä. Geometritoleransseilla voidaan antaa elementille varsinaisesta mittatoleransseista riippumattomia vaatimuksia. Geometriset toleranssit voidaan jakaa muoto- ja sijaintitoleransseihin. /3/ Geometristen toleranssien piirustusmerkinnät ovat kuvassa 2.

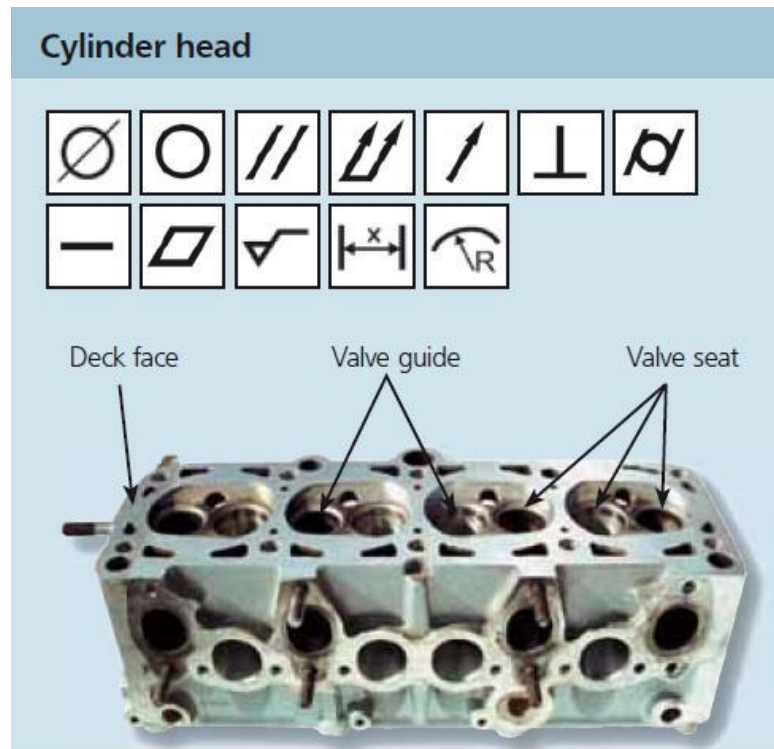
Muototoleranssit ilmoittavat kuinka paljon elementin muoto saa poiketa sen teoreettisesta muodosta. Tällaisia ovat suoruus, tasomaisuus, ympyrämäisyys, lieriömäisyys sekä tasoviivan ja pinnan muoto. /2/

Sijaintitoleransseilla rajataan kahden tai useamman elementin keskinäistä asentoa toisiinsa. Tällaisia rajoituksia ovat yhdensuuntaisuus, kohtisuoruus, kulma-asento, paikka, samankeskiyys, sama-akselisuus ja symmetria. /2/

| Elementit ja toleranssit                                                                                             |                     | Toleroitu ominaisuus             | Tunnus |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------|--------|
| Riippumattomille elementeille<br> |                     | Suoruus                          | —      |
|                                                                                                                      |                     | Tasomaisuus                      | ◻      |
|                                                                                                                      |                     | Ympyrämäisyys                    | ○      |
|                                                                                                                      |                     | Lieriömäisyys                    | ⊘      |
| Riippumattomille tai riippuvaisille elementeille                                                                     |                     | Tasoviivan muoto                 | ⤿      |
|                                                                                                                      |                     | Pinnan muoto                     | ⤿      |
| Riippuvaisille elementeille<br>   | Suuntatoleranssit   | Yhdensuuntaisuus                 | //     |
|                                                                                                                      |                     | Kohtisuoruus                     | ⊥      |
|                                                                                                                      |                     | Kulma-asento                     | ∠      |
|                                                                                                                      | Sijaintitoleranssit | Paikka                           | ⊕      |
|                                                                                                                      |                     | Samankeskiyys ja sama-akselisuus | ⊙      |
|                                                                                                                      |                     | Symmetrisyys                     | ≡      |
|                                                                                                                      | Heittotoleranssit   | Heitto                           | ↗      |
|                                                                                                                      |                     | Kokonaisheitto                   | ↗↘     |

**Kuva 2.** Geometristen toleranssien merkintä. /9/

Otetaan esimerkiksi auton moottorin sylinterin kansi. Kuvasta 3 voidaan nähdä, kuinka paljon erilaisia geometriatoleransseja auton sylinterin kannesta tulee mitata. Osa pituusmitoista ja toleransseista olisi mahdotonta mitata tehokkaasti perinteisin käsimittauslaittein.



**Kuva 3.** Auton sylinterikannen mittauksessa vaadittavat geometriatoleranssit. Vasemmalla tiivistyspinta (deck face), keskellä venttiilin ohjaimet (valve guide) ja oikealla venttiilitaskut (valve seat). /10/

Geometrisia toleransseja tarkastettaessa on hyvä tarkastaa SFS 4910 – standardi. Tässä standardissa annetaan ohjeita, miten eri geometristen toleranssien mittaustapahtuma tulisi suorittaa. /7/ Mittaajan sekä valmistajan kannalta olisi suunnittelijan hyvä suosia säteisheittotoleranssien käyttöä mittauksien helpottamiseksi /8/.



### 3 KOORDINAATTIMITTAUSKONEET

Ensimmäinen koordinaattimittauskone oli Zeissin tekemä UM 500 vuodelta 1973. Se kykeni 0,5 mikrometrin tarkkuuteen ja oli tietokoneohjelmoitu- sekä ohjattu. /5/ Sittenkin markkinoille on tullut niin käsikäyttöisiä halvempia verstasmalleja, kuin auton kokoisten tuotteiden mittaamiseen tarkoitettuja täysin ohjelmoituja portaalimittauslaitteita /12/. Suomessa on tällä hetkellä noin 300 koordinaattimittauskonetta /19/. American machinist – lehden mukaan vuonna 2006 huippukonepajoista oli 54,9 %:lla oli käytössään kehittynyt koordinaattimittauslaitetta. /11/

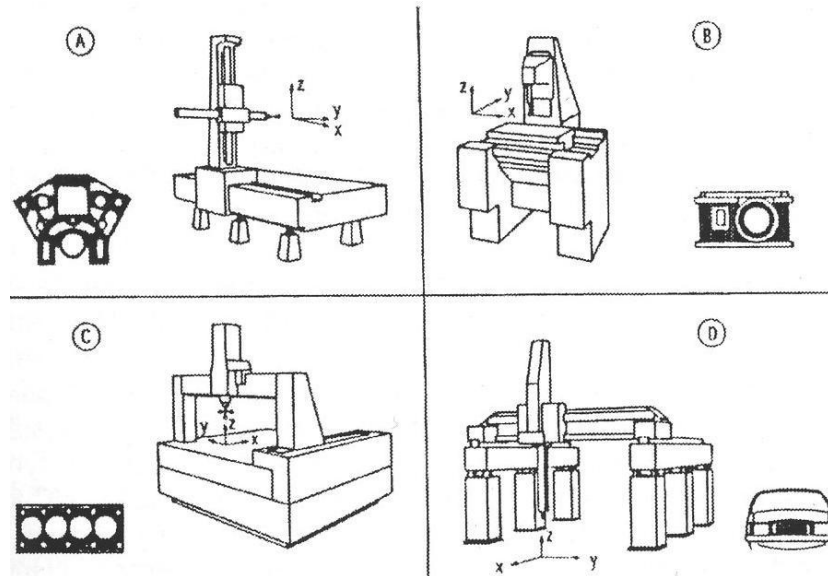
Koordinaattimittauskone koostuu itse mittauskoneesta ja sen referenssikoordinaatistosta, mittausantureista, tietokoneesta, mittausohjelmistosta, työkappaleohjelmasta ja raportoinnista. Koordinaattimittauskone on yleensä sijoitettu erilleen tuotannosta omaan ilmastoituun tilaansa, mutta valmistajat pyrkivät koko ajan kehittämään mittauslaitteita myös huonompiin olosuhteisiin. /12/

Mittauskoneiden toimintatapoja ovat käsikäyttöinen, motorisoitu tai NC - ohjattu. NC - ohjattuja koneita käytetään yleensä sarjatuotannossa. Kone kuljettaa mittauspäättä joka rekisteröi kohteen pinnalta mitattavan pisteen. Mittauspäättä on valtava määrä erilaisiin tarpeisiin. Tietokoneessa olevan mittausohjelmiston ja työkappaleen mittausohjelman avulla saadaan rekisteröidyt mittauspisteet raportoitavaan muotoon. /12/

Mittauspisteiden rekisteröinti perustuu mekaanisen kosketukseen, optiseen kuvaan tai lasermittaukseen. /11/ Viime aikoina mm. saksalainen koordinaattimittauskoneiden valmistaja Werth on kehittänyt myös röntgenkuvaukseen perustuvan mittauslaitteen. Röntgenkuvauslaite muodostaa kappaleesta läpinäkyvän kuvan, josta voidaan tarkistaa esimerkiksi valutuotteiden sisäisiä mittoja. /13/ Mekaanisessa kosketusmittauksessa laite rekisteröi mittaussauvan kosketuksen kappaleen pintaan. Optisissa mittauskoneissa konenäkö tunnistaa kappaleen piirteet. Lasermittauskoneissa koordinaatit saadaan taas mitattua nimensä mukaisesti lasersäteiden taittumista. /12/

Koordinaattimittauskoneiden rakennetyyppejä ovat pylväs-, puomi-, portaal- ja siltatyypiset rungot sekä nivelvartiset rakenteet. Neljä ensimmäistä on esitetty kuvassa 4,

josta nähdään kuinka kukin runkotyyppi on tarkoitettu hieman erityyppisille ja kokoisille komponenteille.



**Kuva 4.** A) Pylväs- B) puomi- C) portaali- ja D) siltarakenne. /12/

Viimeksi mainittu nivelvartinen rakenne poikkeaa muista siten, että se muistuttaa hieman robotin käsivartta, kun taas muut rakenteet voivat olla huomattavasti kookkaampia. /12/ Kuvassa 5 on Faron valmistama nivelvarsityyppinen mittausslaite.



**Kuva 5.** FaroArm – nivelvarsimittausslaite. /14/

Yleisin mittauskone on portaalityyppinen koordinaattimittauskone, joka on varustettu kiinteällä pöydällä ja suoraviivaisilla liikeakseleilla. Koneiden mittaussnopeus ja käytettävyys paranee tietotekniikan kehityksen mukana. Rungon ja pöydän materiaaleina käytetään yleensä kiveä, joten kone on kohtalaisen painava. Suomessa olevista koneista suurin osa on tarkoitettu noin koirankopin kokoisten kappaleiden mittaamiseen. Mittauspää

on yleensä mekaaniseen kosketukseen perustuva, mutta NC-ohjatuissa versioissa voi olla myös kamera- tai lasermittauspää. /12/

Aina mitattaessa erilaisia koneenosia, mittauksiin liittyy mittausepävarmuus. Mittausepävarmuuden suuruus vaikuttaa moneen asiaan ja sen tiedostaminen on sekä valmistajan, että suunnittelijan hyvä tietää. Yleisesti ajatellaan, että mittaustuloksen osuessa toleranssialueelle, tulos on suoraan hyväksyttävissä. Mittaustulosta tarkasteltaessa on kuitenkin huomattava että tuloksen tulee mahtua toleranssialueelle, kun mittauslaitteen virhemarginaali lisätään mittaustulokseen. Mittausepävarmuus siis käytännössä pienentää toleranssialuetta. Mitään valmistusprosessia ei myöskään voida trimmata tarkemmaksi, kuin mitä käytössä olevien mittalaitteiden tarkkuus on. /15/

Koordinaattimittauskoneiden mittausepävarmuutta varten on olemassa omat standardinsa. Valmistajat käyttävät yleisesti standardia ISO 10360, joka antaa ohjeet *koskettavan mittauskoneen* mittausepävarmuuden selvittämiseksi. Osa valmistajista käyttää taas CMMA, VDI/VDE 2617, ASME B89 tai JIS – standardia. Koordinaattimittauskonetta hankkiessa onkin syytä ottaa huomioon, minkä standardin mukaan valmistaja ilmoittaa koneensa mittausepävarmuuden. /1/

Koskettavien koordinaattimittauskoneiden valmistajat ilmoittavat yleensä koneiden suurimman sallitun virheen (eng. Maximum Permissible Error, MPEE) ISO –standardin mukaisesti. Se saadaan yhtälöstä

$$MPEE = A + b * L/1000, \quad (1)$$

jossa A on osa, joka on riippumaton mittauspituudesta. L on mitattu pituus (mm) ja b on mittauspituudesta riippuva osa. Vastaus saadaan mikrometreinä (0,001 mm), josta joissain lähteissä käytetään myös termiä mikroni. Kaavasta nähdään, että mittausvirhe on sitä suurempi, mitä kauempaa koneen referenssipisteestä joudutaan mittaamaan. /12, 16/

Kuten sanottua, toistaiseksi virallisia mittausepävarmuuden määrittäviä standardeja on olemassa vasta koskettavia koordinaattimittauskoneita varten. Laser- tai optista mittalaitetta ostettaessa ollaan mittausepävarmuuden suhteen pitkälti valmistajan

luotettavuuden armoilla. Valmistajien on täytynyt kehittää omat menetelmänsä mittausepävarmuuden määrittämiseen. Hyvä uutinen on, että edellä mainittuja koneita varten on tulossa ISO-standardiin laajennus (10360-7), joka todennäköisesti julkaistaan vuoden 2011 ensimmäisellä puoliskolla. /16/

Japanilainen mittauslaitteiden valmistaja Mitutoyo ilmoittaa optisten mittauslaitteensa tarkkuuteen myös MPEE – kaavaa käyttäen. Erona on, että mittausepävarmuudet ovat ilmoitettu akselisuunnittain. Esimerkiksi Mitutoyon Ultra Video Check – laitteiston mittausepävarmuus ilmoitetaan seuraavasti: E1XY(0,3+L/1000), E1Z(3+2L/1000) ja E2XY(0,5+2L/1000). /26/ Muita käyttötapoja on ilmoittaa virhe 2D – tai 3D – tasossa /12/.

## 4 KOORDINAATTIMITTAUSKONEIDEN MITTAUSPÄÄT

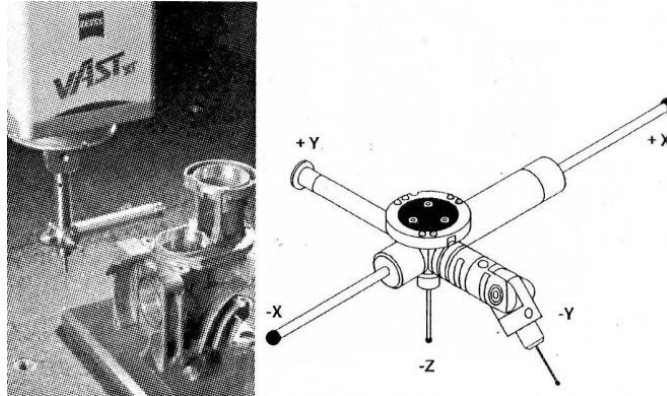
Kuten jo aiemmin mainittiin, mittauksen hoitavia mittauspäitä on useita erilaisia. Samassa rungossa voi olla kaksikin eri mittauspäätä. Yleensä toinen niistä on mekaaniseen kosketukseen perustuva. Koordinaattimittauskoneita joissa on enemmän kuin yksi mittauspää, voidaan kutsua monianturimittauskoneeksi. Monianturikoneessa voi olla makasiinissa useita erilaisia mittauspäitä, kuten CCD-kamera tai laseranturi, jotka voivat mitata muita ominaisuuksia kuin dimensioita esim. pinnankarheutta, lämpötilaa, jne. Tässä kappaleessa käsitellään miten eri mittauspäiden ominaisuudet ja käyttö poikkeavat toisistaan. Karkeasti voidaan sanoa, että *parhaiten* koskettava mittaus soveltuu monen suuntaisille pinnoille, mutta ei nurkkapaikkoihin. Lasermittaus taas sopii parhaiten vaakapinnoille ja videomittaus reunojen tunnistukseen. /12/

### 4.1 Koskettavat anturit

Koskettavassa käsiikäyttöisessä mittauskoneessa puhutaan mittauskärjestä, jonka päässä teräskuula, jota painetaan kappaletta vasten. Kun käyttäjä on valinnut kärjelle sopivan paikan, hän painaa kytkimestä jolloin kone rekisteröi kuulun paikan nivelakselien suhteen. Tällaisessa tapauksessa kuulassa ei ole minkäänlaista anturia. /12/

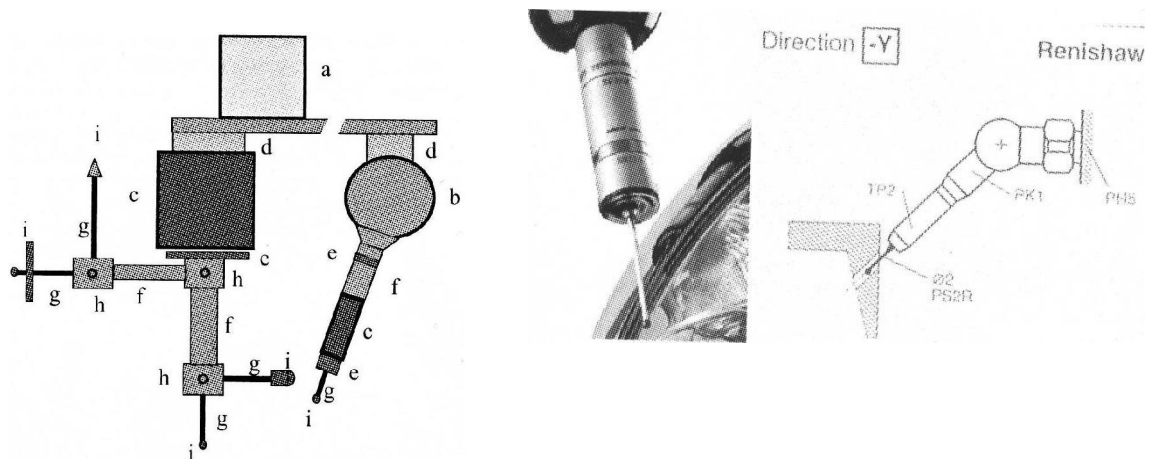
Mittauspää voi myös reagoida kosketukseen siten, että se aukaisee kytkimen jolloin kone ymmärtää kosketuksen kappaleeseen. Tällöin puhutaan mittausanturista. Anturi voi myös olla täysin aktiivinen, jolloin se mittaa jatkuvasti mittauskärjen paikkaa avaruudessa. /12/

Mittauskärkiä ja –antureita on olemassa valtava määrä eri pituuksilla ja mekaanisilla ominaisuuksilla varustettuna. Yksi erittäin tunnettu valmistaja on Renishaw, jonka koskettavia mittauspäitä on saatavissa lähes jokaisen valmistajan laitteeseen. Toinen suosittu valmistaja on Carl Zeiss, joka suosii useammalla erikokoisella anturilla varustettuja mittauspäitä. Kuvassa 6 on Zeissin ja Renishawin mittauspäät. /12/



**Kuva 6.** Vasemmalla Renishawn kevyt versio ja oikealla usealla kärjellä varustettu Zeiss:n valmistama mittauspää /12/.

Kuvan 6 osakokonaisuuksia kutsutaan siis mittauspäiksi. Zeissin raskas ja iso mittauspää kiinnittyy koneen Z-pinooliin tai -luistiin välisovitteilla. Välisovitteen ja mittausanturin väliin tulee adapteri, joka mahdollistaa kärkien vaihdot koneen makasiinista. Renishawin mallissa mittausanturit on kiinnitetty kärkimoduuliin, joka irtoaa mittauskoneesta tai nivelistukasta. Renishawin PH10 on erittäin suosittu kääntyvä nivelistukka, johon voidaan asentaa mekaanisen anturin lisäksi laseranturi. Kuvassa 7 on havainnollistettu tarkemmin mittauspäiden eri osat. /12/



**Kuva 7.** Kaksi erilaista mittauspäävaihtoehtoa. Äärimmäisenä vasemmalla Zeissin suosima malli ja siitä oikealle Renishawin nivelistukallisia malleja. /12/

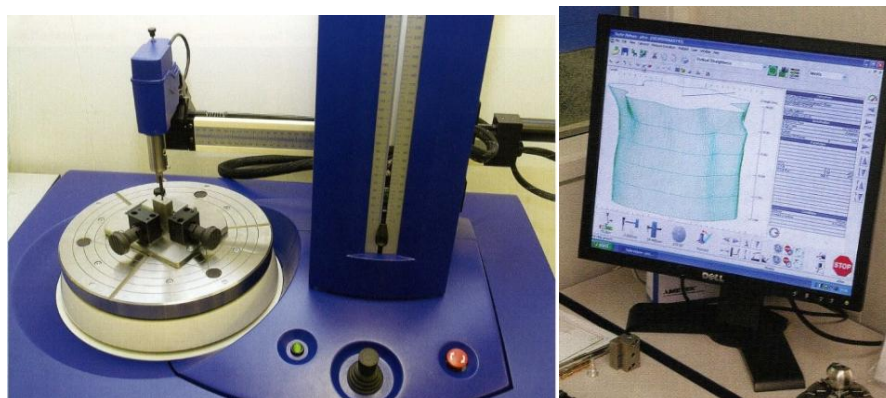
Kuvassa 7 olevien mittauspäiden osat ovat a) mittauskoneen Z-pinooli tai -luisti, b) nivelistukka, c) anturi (mittaava, kytkävä), d) välisovite, e) adapteri, f) jatkovarsi, g) mittauskärki tai -varsi, h) liitinkappale ja e...i) mittauskärkiyhdistelmä. /12/

Mittausantureita on useita erilaisia riippuen toimintatavasta. Toiset anturit kykenevät mittaamaan vain yhden pisteen kerrallaan, kun taas toisia antureita voidaan kuljettaa pintaa pitkin. Kone painaa mittauskärkeä aina ennalta määrätyllä voimalla kappaletta vasten, jolloin se kykenee erottamaan todellisen kosketuksen ns. ilmapisteistä. Kone osaa myös välttää pahimmat törmäykset, kun kosketusvoima on tiedossa. /12/

Manuaalisesti ohjattavan, koskettavan portaalimallisen koordinaattimittauskoneen voi saada jo alle 20 000 euron, kun taas NC-ohjatut laitteet maksavat huomattavasti enemmän. Koskettavaan mittaukseen perustuvat laitteet ovat teollisuudessa suosittuja niiden edullisen suorituskyky-hinta – suhteensa takia. Niiden tarkkuus ja mittaustulosten luotettavuus on myös parempi mitä esim. lasermittauslaitteilla mitattaessa. Haittapuolena optisiin ja lasereilla toimiviin laitteisiin on korkea operointiaika varsinkin kun kerättävien mittauspisteiden määrä on suuri esim. monimutkaisilla pinnoilla. /12/

Koneenosien geometrisista pinnoista noin 80 % on pyörähdyssymmetrisiä. On siis luontevaa, että ympyrämäisyysmittauksille on omat laitteensa. Ympyränmittauslaitteilla voidaan mitata ympyrämäisyyden lisäksi heittoa, sama-akselisuutta, yhdensuuntaisuutta ja suorutta. /17/

Karkkilassa toimiva Mansner Oy on investoinut mittaushuoneeseensa noin 100 000 euron arvoisen ympyrämäisyydenmittauskoneen. Mittauskone skannaa reiän kehää useilta eri tasoilta ja laskee mittaustietojen samankeskisyyttä. Mittauskone pystyy jopa kahden mikronin mittaustarkkuuteen. Kuvassa 8 on kyseinen kone ja oikealla näkyy mittaustulos tietokoneen ruudulla. /18/



**Kuva 8.** Taylor Hobson Talyrond 385 – ympyrämäisyydenmittauskone /18/.

## 4.2 Videomittaus

Suomen noin 300:sta koordinaattimittauskoneesta noin kolmasosa on videomittauslaitteita. Sen etuna on muun muassa se, ettei kappaletta tarvitse lainkaan koskettaa. Silti videomittauslaitteeseen saattaa olla yhdistettynä myös koskettava mittauskärki. Videomittakonetta ohjaa tietokone ja mittaukset voidaan suorittaa automaattisesti. Mittausohjelmistolla kyetään mittaamaan pituutta, halkaisijaa, kulmaa, suoruutta, yhdensuuntaisuutta sekä ympyrämäisyyttä. /19/

Itse mittaamiseen videomittauslaite käyttää CCD - kameraa, joka saa paikkatietonsa johteisiin asennetuista, tarkoista asteikoista. Kappaleen valaistaan joko objektin läpi tulevalla myötävalolla, objektin ympärillä olevalla rengasvalolla tai alavalolla. /19/ Oikean etäisyyden mittaaminen perustuu kuvan tarkennukseen (fokusointiin). Valaistusta on säädettävä kappaleen mukaan siten, että pinnassa on sekä tummia, että vaaleita kohtia. Tummia ja vaaleita sävyjä tarvitaan erilaisten reunojen ja pintojen muotojen erottamiseen muusta ympäristöstä. Ongelmaksi voi tulla materiaalin pinnoite tai läpinäkyvyys. /12/ Kuvassa 9 on videomittauskoneen laitteisto.



**Kuva 9.** Videomittauskone. /19/

Videomittauslaite on Z-suunnassa erittäin tarkka, kun mitattava pinta on kohtisuorasti kameraa kohti. Videomittauslaitteen ja koskettavan mittauksen ero on, että videomittauskoneella voidaan mitata reunoja mitä koskettavalla mittauksella ei voida tehdä. Koskettavalla mittauksella voidaan taas mitata pystysuoria seinämiä. Siten



esimerkiksi ympyrän halkaisijan mittauksissa kyseisillä laitteilla saadaan hyvin erilaiset tulokset. Koskettavan mittauksen tulokseen vaikuttaa pinnankarheus ja sen muoto. /12/

Kappaleesta voidaan siis perinteisesti mitata vain kameraan päin oleva pinta. Kappaleen pinnan ja objektin välinen suunta on Z-suunta. Jotta muutkin sivut saadaan kuvattua, on kameraa tai kappaletta käänneltävä, tai käytettävä peilejä joilla saadaan kaikki sivut näkyviin. Tyypillisesti kameran objektissa ei ole liikkuvia linsejä, vaan tarkkuus haetaan liikuttamalla koko objektia Z-suunnassa. Viime aikoina on kuitenkin markkinoille tullut myös muuttuvalla fokusetäisyydellä olevia zoom – linsejä ja nivelellisiä kääntyviä kameroita. /12/

Parhaiten videomittauskone soveltuu erityisesti elektroniikan sovelluksiin, mutta sitä käytetään myös mittaamaan ohutseinäisiä muovi- ja metallikappaleita, sekä kappaleita joiden koskettava mittaus on vaikeaa tai mahdotonta. /7/ Myös työstettyjen kappaleiden mittaus onnistuu. Werth on tunnettu koordinaattimittauslaitteiden valmistaja, jonka videomittauskoneilla voi työkappaleen ja objektin väli vaihdella 20 – 200 mm välillä. Laitteiston yksi etu on, että syvien reikien mittaus työstetystä kappaleesta voidaan suorittaa luotettavasti ilman pitkiä mekaanisia antureita, jotka voisivat aiheuttaa törmäysvaaran. Laite sopii hyvin yksinkertaisten 2D-muotojen mittauksiin, kuten hammaspyörien mittaamiseen. /20/

Eräs optisen mittaamisen sovellus on lasermittauksestaikin tuttu viistokuva- tai kolmiomittaus. Menetelmässä kohde valaistetaan valojuovalla. Juovia voi olla yksi tai enemmän ja niiden koko vaihtelee. Juovastolla peitetään kohteen pinta sopivalla tiheydellä. Valojuovia tai kappaletta liikutetaan jolloin samaan aikaan kamera kaappaa kuvia kohteen pinnasta ja ”näkee” valojuovien kulun muutokset kappaleen pinnassa. /12/ Kuvassa 10 on GOM:n valmistama Atos - stereokuvausprojektorilla kahdella kameralla, joka perustuu tähän menetelmään /11/.



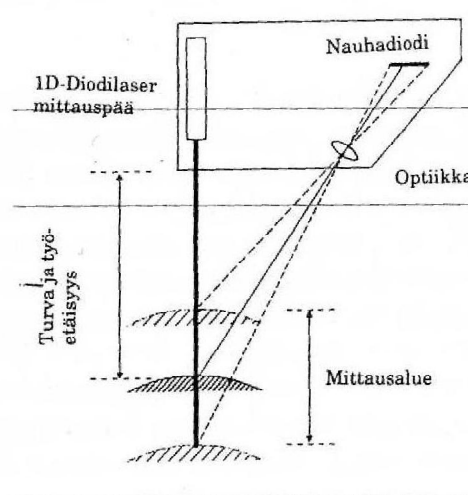
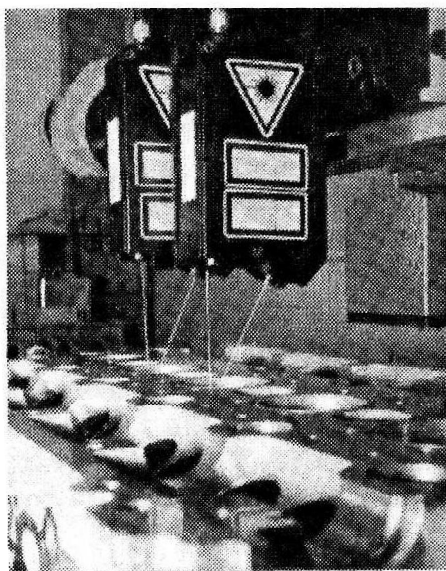
**Kuva 10.** GOM:n Atos 3D-stereokuvausprojektorin /21/.

Viistokuvamittausta voidaan käyttää myös suurille kappaleille. Suomalainen luksuspurjehävälä Nautor käyttää saksalainen GOM:n valmistamaa stereokuvausprojektoria peräsimien, rungon ja kölien mittaamiseen. Esimerkiksi peräsim voi olla noin 3m pitkä. GOM:n mittaustavassa kappaleen pintaan tai sen ympäristöön kiinnitetään tarralappuja. Lappujen avulla koneen mittausohjelma osaa yhdistää skannatut ruudut. GOM:n Atos-stereokuvausprojektorissa on kaksi kameraa, joiden välinen kulma on tiedossa. Mitattavan kappaleen pinnalle heijastetaan viivoitus, jonka kokoa ja muotoa muutetaan mitattavan kappaleen mukaan. Kohdetta pyöritetään pyörityspöydällä, jotta riittävä määrä kuvia saadaan eri puolilta. Yleensä kohteesta tarvitaan vähintään 5-6 kuvaa, jotta ohjelmisto pystyy luomaan niistä pistepilven. /22/

GOM:n maahantuojan, Cascade Computingin Johan Lundellin mukaan optisen mittaamisen tekniikka on yksinkertaista, mutta sen soveltaminen on vaikeaa. Edellä mainitun järjestelmän käytännön mittausepävarmuus on  $\pm 0,005\text{mm}$  ja se täyttää autonvalmistajien käyttämän VDE 2634-standardin vaatimukset. Järjestelmän hinta alkaa n. 50 000 eurosta. Peruspakettiin sisältyy kalibroitu ja toimintavalmis laitteisto, joka sisältää tietokoneen ja tarvittavan mittausohjelmiston. /22/ Samalla laitteistolla voidaan kuvata aina 38mm kokoisista osista jopa 2 m asti /21/.

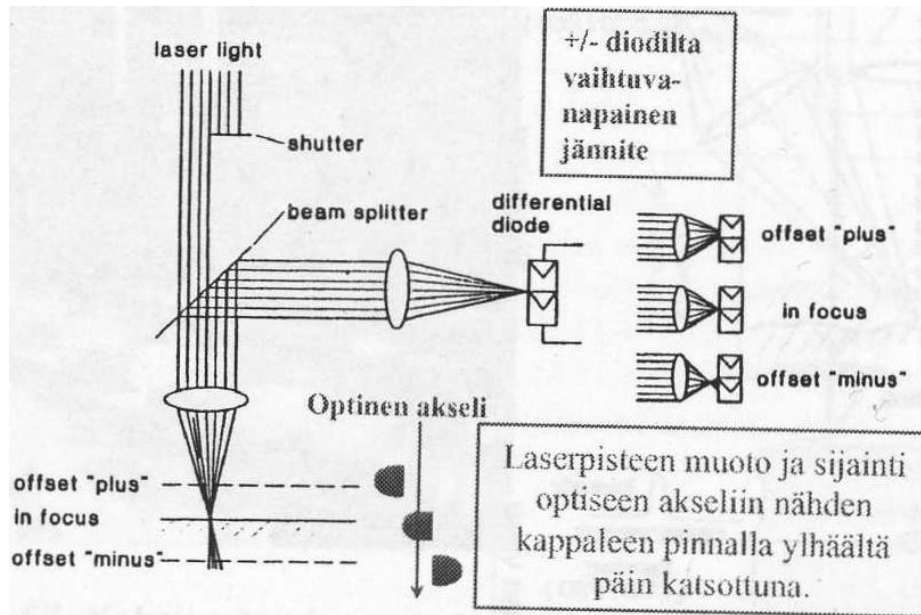
### 4.3 Laseranturit

Lasersäteen avulla on mahdollista mitata yhtä pistettä tai ”pyyhkäistä” (scanning) alue pisteestä pisteeseen. Käytettyjä lasermittauksen toimintapoja on kaksi: kolmiomittaus ja fokusoiva laser. Kolmiomittauksessa diodilaser lähettää valo kohti kappaleen pintaa. Valo heijastuu pinnasta takaisin linssin kautta analogiselle sensorille tai CCD-kennoon, joka muuttaa sen digitaaliseen muotoon. Tästä paikasta mitataan anturin etäisyys kappaleeseen kolmion kulman perusteella. Mittaustarkkuus on hyvä isoilla kulmilla, mutta tällöin mittausalue on pieni. Pienellä kulmalla tarkkuus on huono, mutta mittausalue on suuri. Kuvassa 11 on kolmiomittauslaserin toimintaperiaate. /12/



**Kuva 11.** Kolmiolaser ja kaavio sen toiminnasta. /12/

Fokusoiva laser toimii kuten CD-soittimen lukupää. Fokusoivassa laseranturissa valon heijastusmatka muutetaan siirtymäksi ns.  $\pm$ diodille. Valon osumispaikka vaikuttaa  $\pm$ diodin tuottamaan jännitteeseen ja napaisuuteen. Kohdetta liikutetaan siten että,  $\pm$ diodin antama jännite on nolla, jolloin valo osuu keskelle diodia ja anturi on sopivalla fokusetäisyydellä. Fokusoivan laserin paras puoli on, että valo kulkee suoraan optista akselia pitkin mitattavaan kappaleeseen ja palaa samaa rataa myös takaisin. Tällöin voidaan mitata luotettavasti lähellä myös olakkeita sekä kapeiden ja syvien reikien pohjia. Kuvassa 12 on esitetty fokusoivan laserin etäisyyden mittauksen periaate. /12/



**Kuva 12.** Fokusoivan laserin toimintaperiaate. Differential diode =  $\pm$ diodi, offset "minus/plus" = polttopisteen etäisyys optimikohdasta, shutter = varjostin, laser light = laservalo. /12/

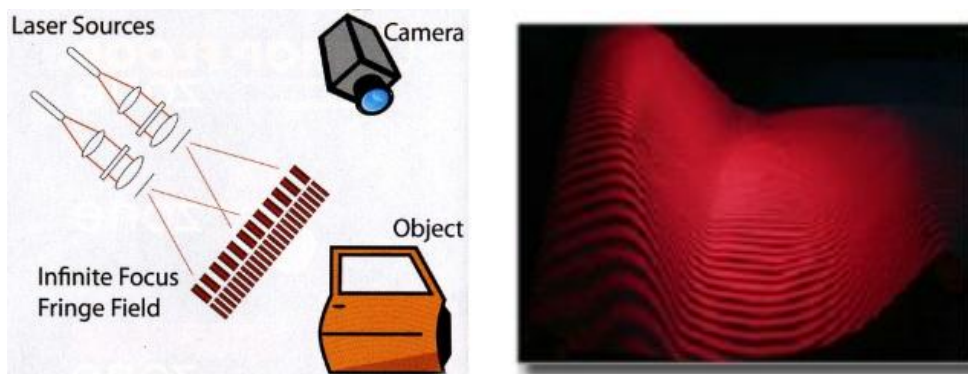
Lähtevästä diodilaservalosta peitetään puolet pois (shutter). Loppu säde kulkee kappaleen pinnalle. Kappaleesta heijastuneen säteen poikkeama fokus pisteestä saa aikaan  $\pm$ diodissa jännite-eron, josta Z-pinooli saa signaalin liikkua ylös tai alas. Fokusetäisyys on oikea, kun valo on jälleen keskellä diodia. Rajoitteena voi olla suuresta suurennoksesta aiheutuva lyhyt fokusetäisyys. Anturi saatetaan joutua asettelemaan hyvin lähelle kappaletta, jolloin törmäysriski on olemassa. /12/

Kolmiomittauksessa yleisimmin käytetty anturi kykenee mittaamaan vain yhtä pistettä kerrallaan. Kun laservalo heijastetaan pinnalle juovana, käytetään termiä viistokuvamittaus. Kohteen pinnalla olevat epätasaisuudet muuttavat laserjuovan kulkua. Juovan muoto talletetaan yhdellä tai kahdella kameralla. Kahdella kameralla mittaustarkkuus on parempi, koska tietoa tulee kaksi kertaa enemmän. Laserjuovalla mittaavia laitteita kutsutaan myös nauhaskannereiksi. /12/

Laservaloon perustuvat mittausslaitteet ovat suosittuja varsinkin muottien mittaustöissä. Laseranturi voi olla sijoitettu joko perinteiseen koordinaattimittauskoneen runkoon (kuva 4) tai nivelvarsityyppiseen varteen (kuva 5). Faro Technologies on edelläkävijä

nivelvarsilaitteiden valmistajana. Faron kehittämät kannettavat FaroArm nivelvarsimittauslaitteet voidaan ottaa mukaan ja viedä suoraan paikan päälle, kun kappaletta ei voida esim. kokonsa puolesta tuoda mittaustiloihin. Platinum FaroArm:lla nivelvarsimittauslaitteella päästään 0,005mm tarkkuuteen. /23/

Lasermittauksen uusimpia keksintöjä on patentoitu AFI – tekniikka (Accordion Fringe Interferometry), jossa lasersäteen lähteitä on kaksi ja ne heijastavat haitarimaisen kuvion mitattavan kappaleen pintaan (kuva 13). Erittäin tarkka kamera rekisteröi kuvion vaihtelun pinnalla, joka voidaan digitalisoida ja muuttaa mittauspisteiksi. /24/



**Kuva 13.** Vasemmalla AFI-tekniikan toimintaperiaate ja oikealla kahden laserlähteen muodostama kuvio. /24, 25/

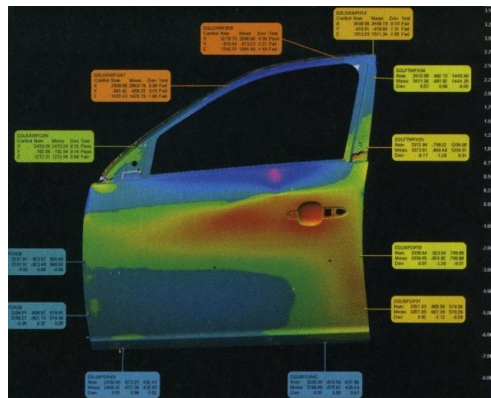
AFI-tekniikan ansiosta mittaustapahtuma ei ole arka ulkoiselle valolle. Se on erittäin tarkka ja projektorissa on hyvä syvyystarkkuus. Myös heijastavien pintojen mittaaminen onnistuu perinteisempää lasermittausta paremmin. /25/

## 5 MITTAUSOHJELMISTOT

Niin manuaalisiin, kuin NC - ohjattuihinkin koordinaattimittauskoneisiin kuuluu aina tietokone ja mittausohjelma. Mittausohjelmisto käsittelee mitattuja pisteitä; se laskee mittauspään tai – kärjen kosketuskohdat tai ohjaa videomittauskoneen CCD - kameran reunatunnistusta. Kosketuspisteistä mittausohjelma laskee mm. geometrioita, uusia elementtejä ja vertailee tuloksia CAD-malliin. Pisteitä voidaan edelleen verrata toleranssivaatimuksiin. Lopuksi ohjelma lähettää kuvat sekä tekstit tiedostona, verkossa tai tulosteena käyttäjälle. Mittausohjelma kannattaa hankkia sertifioituna, jolloin ohjelma on testattu käyttäen pistejoukkoja, jotka haastavat ohjelman haastaviin laskutoimenpiteisiin. /12/

Nykyajan kehittyneet tekoälypohjaiset mittausohjelmistot ja tietojärjestelmät valvovat tulevaisuudessa mittautapahtumaa. Ne varoittavat huonoista mittauskosketuksista ja mahdollisista vääristä laskelmista mikäli ollaan matemaattisten algoritmien äärialueilla. Tarvittaessa ne saattavat pyytää uuden mittauksen. Käyttäjä voi myös poistaa huonoja mittauspisteitä tai antaa koneen tehdä sen automaattisesti. Käyttäjän on valvottava myös mm. törmäyksien vaikutuksia, mittauspään toimintaa ja sen kalibrointia, kaapeleiden kuntoa, jne. /12/

Ohjelmistot ovat perinteisesti olleet konekohtaisia, mutta esim. ranskalainen Metrologic valmistaa ohjelmistoja useisiin eri koneisiin. Vielä 1990-luvun lopulla ohjelmien käyttö perustui tekstivalikkojen käyttöön, mutta 2000-luvulle tultaessa, mittausohjelmistot ovat tulleet visuaalisimmiksi ja käyttävät enemmän hyödyksi mm. kappaleen CAD – mallia. Kuvassa 14 värit indikoivat mitattujen pisteiden eroa CAD – mallin pisteisiin. /12/



**Kuva 14.** Värit paljastavat mitattujen pisteiden heiton CAD – mallista. /25/

## 6 KONEISTETUN TUOTTEEN MITTAUKSET

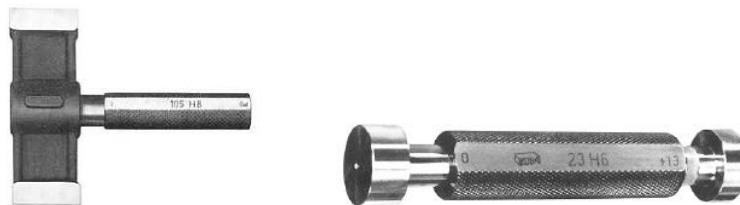
Yritys tilaa erään tuotteen valmiina alihankkijalta. Asiakas toimittaa tuotteen mukana mittauspöytäkirjat, mutta yritys haluaa selvittää miten he voivat tarpeen vaatiessa myös itse tarkastaa tuotteen mitat. Tuotteen tekniset piirustukset ovat liitteessä III, ja CAD – mallin kuvat eri puolilta ovat liitteissä I ja II. Tässä kappaleessa pohditaan miten tuotteen mitat saadaan varmistettua oikeiksi. Koska yrityksellä on ennestään mittaustoimintaa vähän, tarkoituksena on käyttää mahdollisimman paljon perinteisiä käsimittatyökaluja ja kartoittaa, mitkä mittaukset on suoritettava koordinaattimittauskoneella. Piirustuksessa ja kuvissa on valmiin rakenteen toinen puolikas. Valmiissa rakenteessa kaksi tällaista puolikasta on kiinnitettyä vastakkain toisiinsa yhdeksi kokonaisuudeksi.

### 6.1 Pituusmittojen tarkastus

Piirustuksen otsikkoalueella on mainittu niille mitoille standardin 2768-m mukaiset mitat, joita ei ole erikseen toleroitu. Nämä mitat voidaan tarkistaa kappaleen 2.1 taulukosta 1 tai kyseisestä standardista.

Tuotteen ulkoiset mitat saadaan helposti tarkistettua esim. viivaimella ja/tai riittävän isolla työntömitalla. Myös tuotteen sisäkehän läpireikien kohdalla olevat suorakulmaiset kolot (6 kpl) voidaan mitata työntömitalla.

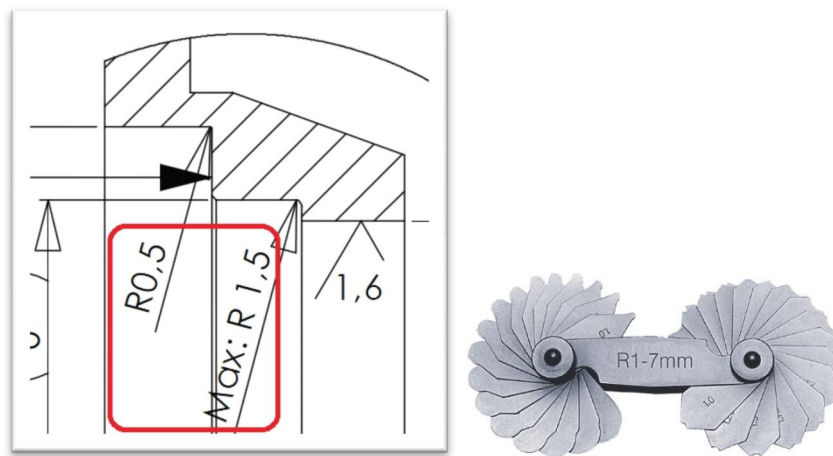
Tuotteen laakeripesän keskireiän ja sen kahden olakkeen, sekä kaikkien läpireikien halkaisijamitat voidaan tarkastaa tappitulkkien ja litteiden reikätulkkien avulla (kuva 15). Tappitulkit sopivat alle 100mm halkaisijalla olevien reikien mittaamiseen. Tätä isompiin tarvitaan reikätulkki. Yksi mahdollisuus laakeripesän halkaisijatoleranssien mittaamiseen on myös käyttää kolmipistemikrometriä.



**Kuva 15.** a) Vasemmalla litteä (>100mm) ja b) oikealla pyöreä reikätulkki (<100mm). /26/

Tuotteen ulkokehällä olevat 13,5 mm reiät (8 kpl), sekä sisäkehän 9 mm reiät (6 kpl) voidaan tarkastaa sopivan kokoisten tappitulkkien avulla.

Laakeripesän olakkeissa on säteisvaatimuksena 0,5 mm ja keskimmäisessä maksimissaan 1,5 mm (kuva X). 1,5 mm säteen mittaaminen voidaan tehdä kuvan 16 oikean reunan mukaisella sädetulkilla, mutta sisemmän olakkeen 0,5 mm pyörityssädetä ei. Markkinoilla olevissa tulkeissa pienin mitattava säde on yleensä 1 mm, kuten kuvan X tulkista voidaan nähdä. Tässä tapauksessa tarvittaisiin tarkkaa koordinaattimittauskonetta. Mikäli laakerin/tiivisteiden toiminnan kannalta on mahdollista, olisi olakkeiden koneistuksessa hyvä käyttää tyypillisiä nirkonsäteitä (esim. 0,4 tai 0,8 mm).



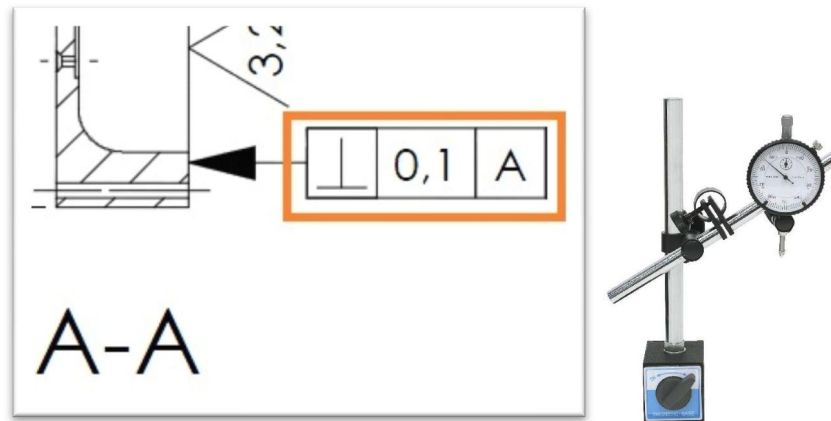
**Kuva 16.** a) Vasemmalla laakeripesän pyörityssäteet, b) oikealla tarkistuksessa käytettävä sädetulkki /27/.

## 6.2 Geometriset toleranssit

Tuotteessa on muutamia erittäin tiukkoja geometrisia toleransseja niin valmistuksen, kuin mittaustenkin kannalta. Otetaan ensimmäisenä käsittelyyn laakeripesän keskiolakkeen lieriömyisyys. ISO 1101 – standardia mukaillen, olakkeen pinnan tulee olla kahden sama-akselisen lieriöpinnan välissä, joiden väli tässä tapauksessa on 0,0065 mm. Näin pienen arvon mittaaminen heittokellolla, tai millään muulla käsimittavälineellä on käytännössä mahdotonta, koska tarkkuus käsimittavälineillä on yleensä n. 0,01 mm. Tässä kohtaa tarvittaisiin siis koordinaattimittauskonetta. Näin tarkka toleranssivaatimus rajoittaa myös koordinaattimittauskoneen valintaa. Esimerkiksi hyvin tasomaisten ja symmetristen muotojen mittaamisen kykenevä videomittauskone ei kykene lähellekään näin tarkkoja mittauksia. Mittausta varten tarvitaan tarkka ympyrämyönteisyyden mittauskone tai tavanomainen koskettava koordinaattimittauskone. Tästä on mainittu myös standardissa SFS 4910.



Yksi mitattava kohde käsimittavälineillä on tuotteen liittymispinnan kohtisuoruustoleranssi suhteessa laakeripesään (kuva 17). Mitattaessa kohtisuoruutta tulee kotelo kiinnittää laakerointikohdasta (elementti A) pyörityselementtiin, esimerkiksi sorviin tai pyörityspöytään, missä ei itsessään ole kohtisuoruusheittoa. Tämä mittaus ei onnistu pelkästään käsimittavälineillä. Koordinaattimittauskoneessa pyörityselementtiä ei tarvita.

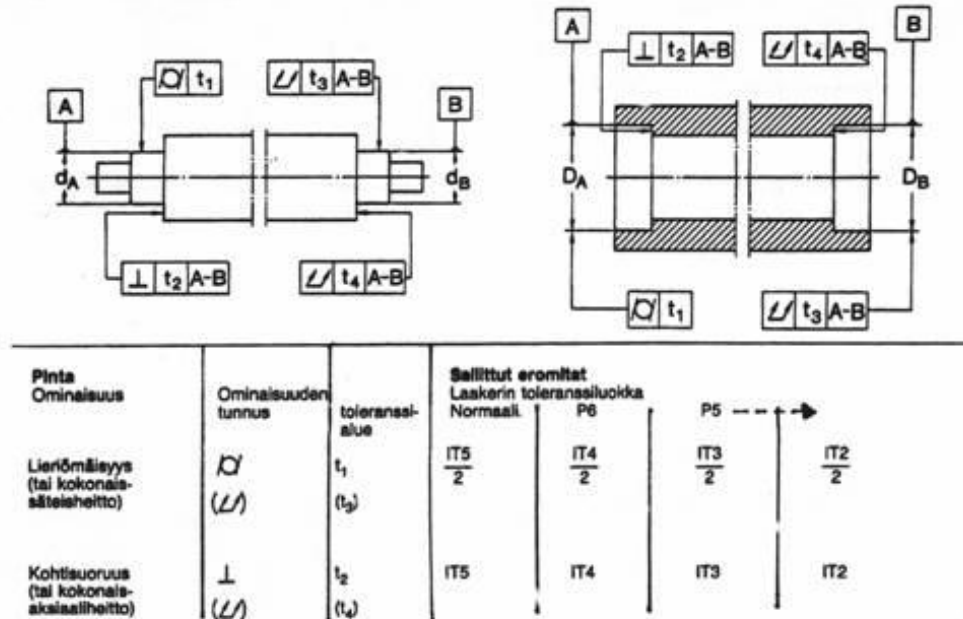


**Kuva 17.** Kohtisuoruustoleranssi liittymispinnassa laakeripesän pinnan suhteen. Oikealla mittauksessa tarvittava mittakello. /28/

Mittakello asetetaan tuotteen kehälle nuolen osoittamaan kohtaan jonka jälkeen sitä pyöritetään. Mittakellon pienimmän ja suurimman arvon näyttämä saa olla korkeintaan 0,1 mm. Ohjeet asetteluun löytyvät myös standardista SFS 4910. Samaan tapaan tulee mitata myös laakeripesän 100 mm halkaisijalla oleva olake.

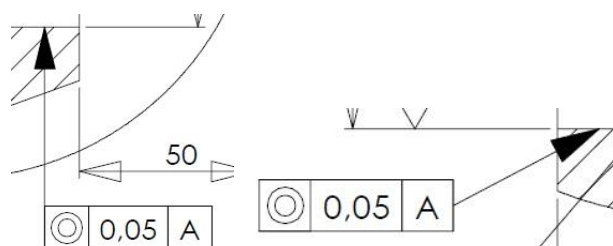
Kuvan 18 mukaisesti edellä mainitut lieriömäisyys- ja kohtisuoruustoleranssit voidaan muuttaa säteisheiton toleransseiksi. Tällainen muutos voisi selventää mittaustapahtumaa ja helpottaa piirustusten oikein ymmärtämistä. Säteisheitto on merkintänä on selkeämpi ja helpommin ymmärrettävissä kuin lieriömäisyyden toleranssi.

### Akselien ja laakeripesien muoto- ja sijaintitarkkuudet laakerointia varten



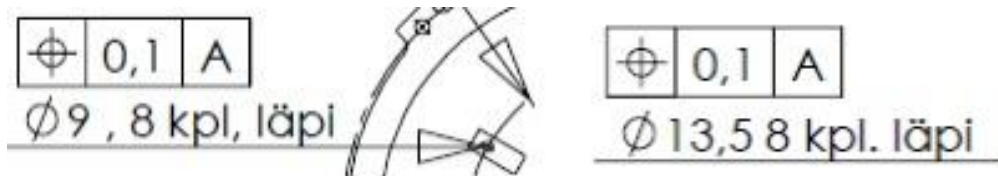
**Kuva 18.** Lieriömyisyys- ja kohtisuoruustoleranssin muuttaminen säteisheiton toleransseiksi. /29/

Laakeripesän toleranssimittauksista seuraavana käsitellään olakkeiden sama-akselisuuden mittausta (kuva 19). ISO – standardin mukaan toleroitujen pintojen keskiviiva ei saa heittää A-elementin keskiviivasta enempää kuin 0,05 mm. Myös sama-akselisuuden mittaukseen tarvitaan heittokelloa sekä pyörityselementtiä. Tuote tulee tukea laakerointikohdasta pyörityselementtiin. Pyörityselementin ja laakerointikohdan (A-elementin) tulee olla samalla pyörähdysakselilla. Tuotetta pyöritetään ja mitataan toleroitujen pintojen säteisheitot. Säteisheitto ei saa ylittää puolta toleranssiarvosta 0,025 mm. Vaikeudeksi saattaa muodostua mittakellon mahduttaminen varsinkin kapeampaan olakkeen pintaa vasten. Tuotetta pitää myös kääntää työn aikana, joka lisää mittausepävarmuutta. Koordinaattimittauskonetta käyttämällä nämä ongelmat voitaisiin välttää, koska laite kykenee skannaamaan pinnat, eikä kappaletta tarvitse liikutella työvaiheen aikana.



**Kuva 19.** Sama-akselisuuden toleranssit laakeripesässä.

Tuotteen kahdella kehällä olevien läpireikien paikkatoleranssien mittaaminen ilman koordinaattimittauskoneita aiheuttaa päänvaivaa (kuva 20). Läpireikien keskipisteen paikan heitto *tuotteen keskipisteen* suhteen ei saa ylittää 0,1 mm. Koska tuotteen keskipistettä on vaikea saada laakeripesän reikien takia selville ja reikien välisen kulman mittaaminenkin käsimitavälineillä on hieman epävarmaa, voisi paikkatoleranssin muuttaa esim. reikien koon toleranssiksi. Tämä sen takia, että todennäköisesti kokoonpannussa rakenteessa laakeripesän ja siitä läpimenevän akselin valmistustarkkuudet määrittävät myös tuotteen puoliskojen asettumisen toisiaan vasten. Koordinaattimittauskoneelle paikkatoleranssi ei aiheuta ongelmia, koska se osaa hakea laskennallisesti kotelon keskipaikan.



**Kuva 20.** Läpireikien paikan toleranssit.

Reikiä koon toleranssin suurentamisella myös todennäköisesti nopeutettaisiin valmistusnopeutta ja pienet, 1 – 2 mm paikan heitot eivät vaikuttaisi kokoonpanon toimintaan, koska läpirei'istä tulee pinnapultit/normaalit pultit läpi, jotka pitävät kotelon puolikkaat kiinni toisissaan.

### 6.3 Koordinaattimittauskoneen käyttö kotelon mittauksissa

Kuten jo aiemmin tekstissä on mainittu, koordinaattimittauskoneen käyttö varsinkin geometrinen toleranssien mittaamisessa säästäisi aikaa ja etenkin hermoja. Myös mittaustulosten luotettavuus olisi huomattavasti parempi johtuen koneiden tarkkuudesta ja kappaleiden vähäisemmän liikuttelun ansiosta. Isoja sarjoja mitattaessa ajan säästön takia kone olisi varmasti lähes välttämätön. Haittapuolena on laitteiston käytön opettelu mikä voi viedä aikaa. Lisäksi laitteisto vaatii ilmastoidun tilan, jossa lämpötila ja ilmankosteus on oltava standardien vaatimissa rajoissa. Riippuen mittauskoneen koosta, voi myös olla tarpeen tehdä hallin lattiarakenteisiin muutoksia (esim. oma eristetty betonivalupohja).

Tämän selvitystyön perusteella kannattaa mittaukset hoitaa koskettavalla anturilla varustetulla koordinaattimittauskoneella. Videomittauskoneiden ongelma on, että ne

soveltuvat parhaimmillaan reunojen mittaamiseen. Laseranturilla varustetut koneet sopivat taas paremmin esim. valumuottien ynnä muiden ei-lineaaristen kappaleiden mittaamiseen. Yrityksen tapauksessa tuotanto ei oletettavasti ole myöskään niin isoa, että kalliimpia ja nopeampia monianturikoneita olisi tässä vaiheessa syytä edes harkita.

Yhtenä vaihtoehtona voisi olla Teräskonttorin jälleenmyymä Mitutoyon CrystaApex koordinaattimittauskone. Kone mittaustarkkuus on noin  $1,7\mu\text{m}/\text{metri}$ , joten vaativatkin toleranssivaatimukset saadaan luotettavasti mitattua. Pakettiin sisältyy itse koneen lisäksi vaadittava mittausohjelmisto, joten laite on valmis mittauksiin. Karkea hinta-arvio koneelle on noin 65 000 € /30/ Muita tunnettuja valmistajia ovat mm. Zeiss, Nikon, Leitz, TESA, CEJ ja DEA /12/.

Käsimittalaitteet maksavat tietysti murto-osan tästä. Puhutaan sadoista tai korkeintaan tuhansista euroista. Kuitenkin on muistettava että käsimittalaitteet on kalibroitava tasaisin väliajoin, jotka myös lisäävät kustannuksia. Lisäksi mittaustarkkuus ja etenkin mittausten luotettavuus ei vastaa koordinaattimittauskoneella tehtyjä mittauksia.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittauskoneet ovat voimakkaasti kehittyneet niin mittaustarkkuuden kuin tulosten analysoinninkin suhteen. Nykyaikaiset koordinaattimittauskoneet kykenevät jopa muutamien mikrometrien tarkkuuksiin. Tämä tarkkuus on huomattavasti suurempi mitä käsimitavälineillä. Erilaisia mittauskoneita varustettuna eri mittausantureilla ja -päillä on markkinoilla satoja. Koneita valittaessa tulee ottaa huomioon mitattavien tuotteiden koko, muoto, mittausvolyymi, mittausolosuhteet jne. Kokenut mittaaja huomaa virheet, mitä myös koordinaattimittauskoneilla voi tapahtua. Tietotekniikka on koordinaattimittauskoneissa hyvin vahvasti mukana ja mittausohjelmistojen hallitseminen on välttämätöntä koneen käytön kannalta. Suurin osa mittauskoneista vaatii hyvin tasaiset olosuhteet mm. lämpötilan ja ilmankosteuden suhteen, joten näiden olosuhteiden järjestämisestä voi koitua koneen hankkijalle kustannuksia.

Kuten luvusta 6 ilmenee, korkea valmistustarkkuus sekä suunnittelijan ratkaisut vaikuttavat huomattavasti mittauksien vaikeustasoon ja siten kustannuksiin. Varsinkin geometrinen toleranssien määrällä ja laadulla vaikutetaan pitkälti siihen, tarvitaanko koordinaattimittauskoneita vai ei. Tietysti tarkkoja toleransseja ei voida jo pelkästään koneenosien toiminnan kannalta aina välttää. Kuitenkin toleranssien tarkalla harkinnalla voidaan mittauksia vähintäänkin nopeuttaa varsinkin, kun käytössä on perinteiset käsimitalaitteet. Myös erilaisilla pituuksien mitoitusratkaisuilla voidaan saada aikaan ajan sekä rahan säästöä, kun pituustoleransseista ei tehdä turhan tarkkoja.

Mikäli kappaleessa 6 käsitellyn tuotteen kaikki mitat halutaan tarkastaa luotettavasti, on yrityksen hankittava koordinaattimittauskone. Mitat/toleranssit, joihin koordinaattimittauskoneita tarvitaan ovat:

- laakeripesän keskiolakkeen lieriömäisyystoleranssi,
- laakeripesän olakkeiden sama-akselisuustoleranssit,
- kohtisuoruustoleranssit (mikäli sopivaa pyörityselementtiä ei ole saatavilla),
- läpäreikien paikan toleranssi.

Toisaalta muutamilla geometrinen toleranssien muutoksilla voitaisiin toiminnan kannalta kriittisen laakeripesän mittaaminen tehdä mahdolliseksi myös käsimitavälinein.

## 8 YHTEENVETO

Koneenosien mittauksia voidaan tehdä perinteisillä käsimitavälineillä tai koordinaattimittauskoneilla. Koordinaattimittauskoneet ovat ohjelmoitavissa samaan tapaan kuin työstökoneet/robotit ja niiden mittaustarkkuus on huomattavasti parempi kuin perinteisten mittalaitteiden.

Mitattavat suureet jaotellaan pituusmittoihin ja sen toleransseihin, sekä geometrisiin toleransseihin. Absoluuttisen mittatarkkaa koneenosa on mahdoton valmistaa, joten mitoille annetaan jokin vaihteluväli eli toleranssi. Koneenosien mitoittamisesta sekä toleranssien käytöstä on ohjeet ISO – standardeissa.

Koordinaattimittauskoneet jaotellaan runkotyyppinsä mukaan pylväs-, puomi-, silta-, portaali- ja nivelvarsirakenteeseen. Kappaleen koko ja muoto päättävät pitkälti minkälaista mittauskoneen runkoa tarvitaan. Mittauskoneen rungossa on mittauspää, jonka mittauskyky perustuu joko mekaaniseen kosketukseen, laservaloon tai optiseen videokuvaukseen. Näistä koskettavat mittauspääät ovat teollisuudessa suosituimpia. Koordinaattimittauskoneessa voi olla myös esim. koskettava- sekä lasermittauspää, jolloin sitä voidaan kutsua monianturikoneeksi.

Koordinaattimittauskoneen ohjelmointi ja mittaustulosten tarkastelu vaatii tietokoneen ja mittaushjelmiston. Mittausohjelmiston avulla voidaan mittaustuloksia peilata suoraan 3D – malliin, jolloin nähdään suoraan kuinka paljon todelliset mitat poikkeavat halutuista mitoista.

Käytännön osuudessa on pohdittu erään yrityksen koordinaattimittauskoneen tarvetta tilaamansa tuotteen mittauksissa. Tuotteen pituusmittojen tarkastuksessa selvittää käsimittalaitteiden avulla. Geometristen toleranssien kohdalla ajaudutaan kuitenkin tilanteeseen, jossa toleranssien mittaaminen käsimittalaitteilla on joko vaikeaa tai mahdotonta. Laitehankinnaksi suositellaan koskettavalla mittaasanturilla toimivaa koordinaattimittauskonetta.

## LÄHTEET

1. Card, G. Selecting Your CMM. Manufacturing Engineering. 2003. Vol 130. Nro. 6. Lehtiartikkeli. Saatavissa: <http://www.sme.org/cgi/-bin/find-articles.pl?&03jum003&ME&20030601&&SME&>
  2. Andersson, P. Tikka, H. Mittaus- ja laatutekniikat. 1997. WSOY. Porvoo. 323 s.
  3. Ihalainen, E. Konepajan mittaukset. Otakustantamo. 1985. Espoo. 111s.
  4. Keinänen, T., Kärkkäinen, P. Konetekniikan perusteet. WSOYpro Oy. Porvoo. 364 s.
  5. Aaltonen, K. Miksi koordinaattimittauskone kannattaa hankkia? AEL-seminaarin luentokalvot. 2-3.10.2003. Helsinki.
  6. Airila, M. Karjalainen, J, A. Mantovaara, U. Nurmi, L. Ranta, A. Verho, A. 1995. Koneenosien suunnittelu 1 perusteet. Werner Söderström Osakeyhtiö. Porvoo, Helsinki, Juva. 283 s.
  7. SFS – käsikirja 20-1. Toleranssit ja pinnankarheus osa 1: ISO – toleranssit ja geometriset toleranssit. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 1. painos. 12/2008. Helsinki.
  8. Eskelinen, H. Tekninen piirustus 2. Luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2008.
  9. SFS EN-ISO 1101-standardi. Vahvistettu 14.8.2006.
  10. Metrology for engine components. MAHR GmbH:n tuote-esite. PDF-tiedosto. Päivitetty 24.11.2009. Viitattu 14.1.2011. Saatavissa: <http://www.mahr.com/scripts/relocateFile.php?ContentID=11467&NodeID=331&FileID=10110&ContentDataID=35555&save=0>
-

11. I Know Where I Am But Where Are You? American Machinist –lehden verkkoartikkeli. Julkaistu 21.12.2006. Viitattu 10.1.2011. Saatavissa: <http://www.americanmachinist.com/>
  12. Tikka, H. Koordinaattimittaus. 2007. Tampereen Yliopistopaino Oy. Tampere. 473s.
  13. Scanning The Horizon. The Machinery. S: 14-16. August 2010. Lehtiartikkeli.
  14. Kuva Faron verkkosivuilta. Viitattu 7.1.2011. Saatavissa: <http://www.faro.com/FaroArm/Home.htm>
  15. Esala, V-P. Lehto, H. Tikka, H. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Tekninen tiedotus, 3/2003. Teknologiateollisuus ry. Helsinki. 79 s
  16. Morey, B. Accuracy and Uncertainty in Noncontact Metrology. Manufacturing Engineering. Julkaistu 11/2010. S: 67 – 74. Lehtiartikkeli.
  17. Ympyrämäisyys konepajateollisuudessa. Mittatekniikan keskuksen MIKES:n verkkosivut. Viitattu 12.2.2011. Saatavissa: <http://www.mikes.fi/documents/upload/ympyramaisyys.pdf>
  18. Kortelainen, K. Mansner mittaa lisää töitä. Metallitekniikka 11/2009. S: 28 – 29.
  19. Mittatekniikan keskuksen MIKES:n verkkosivut. Saatavissa: <http://www.mikes.fi/frameset.aspx?categoryID=3&url=page.aspx%3FpageID%3D891%26contentID%3D427>, viitattu 8.1.2011.
  20. The Worth Of Werth. The Machinery. S: 23-24. August 2010. Lehtiartikkeli.
  21. GOM-yhtiön verkkosivut. Viitattu 11.1.2011. Saatavissa: <http://www.gom.com/metrology-systems/3d-scanner.html>
-



22. Tervola, J. Muodot talteen kameralla. Metallitekniikka 8/2008. S: 18-20. Lehtiartikkeli.
23. Kortelainen, K. Kannettavalla 3d-mittausvarrella 0,005mm tarkkuuteen. Talentumin lehtiarkisto verkossa. Julkaistu Metallitekniikka-lehdessä 28.8.2002. Viitattu 11.1.2011 Saatavissa: <http://lehtiarkisto.talentum.com/lehtiarkisto/search/show?eid=384831>
24. Dimensional Photonics Internationalin verkkosivut. Viitattu 11.1.2011. Saatavissa: <http://www.dpi-3d.com/products/technology>
25. Bruce, M. Advances in Automotive Metrology. Manufacturing Engineering. September 2010. S: 53-61. Lehtiartikkeli.
26. Kuva Knorring Oy:n verkkosivuilta. Saatavissa: [http://www.knorring.fi/FI/Teollisuus/Tyokalut/M-valineet/TeTu\\_Mv\\_Tappitulkit.htm](http://www.knorring.fi/FI/Teollisuus/Tyokalut/M-valineet/TeTu_Mv_Tappitulkit.htm)
27. Kuva Teräskonttorin tuotevalikoimasta. Päivitetty 16.11.2010. Viitattu 24.1.2011. Saatavissa: <http://188.65.137.50/teraskonttori.fi/adeona/index.php?page=products&c=148967&e=18327&p=0>
28. Kuva Virtasenkauppa.fi – sivustolta. Viitattu 12.2.2011. Saatavissa: <http://www.virtasenkauppa.fi/tuote/13478/mittakello-magneettijalalla>
29. SKF – laakerikirja. 1991. Luettelo 4000 Fi. 976 s.
30. Puhelinkeskustelut Teräskonttori Oy:n Harri Salmen kanssa 17.2.2011.

