

# Kaksoisnivelsauvamittaus työstökoneen geometrian analysoinnissa

Veli Matti Ahonen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2011

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Tekniikan ja liikenteen ala





Tekijä AHONEN, Veli Matti	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 16.05.2011
	Sivumäärä 79	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus	Verkkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi Kaksoisnivelsauvamittaus työstökoneen geometrian analysoinnissa		
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja PEURANEN, Harri, yliopettaja Jyväskylän ammattikorkeakoulu		
Toimeksiantaja NÄRHI, Jouni, asiakaspalvelupäällikkö Maintpartner Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli parantaa työstökoneen laaduntuottokykyä. Työssä kehitettiin menetelmä kaksoisnivelsauvamittauksen avulla työstökoneen geometriamuutoksien hallintaan. Kaksoisnivelsauvamittaus oli kunnossapidossa tuntematon ja hyödyntämätön mittaus mittaväline.</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin asiakkaan tuotantotiloissa Moventas Oy Jyväskylän tuotantolaitoksessa. Mitattavaksi työstökoneeksi valittiin tuotannossa oleva FMS-työstökeskus, jonka tarkkuusvaatimukset tuulivoimateollisuuden osien valmistuksessa ovat tiukat. Kaksoisnivelsauvamittauksia tehtiin kevään 2011 aikana viitenä eri ajanjaksona yhteensä 22 mittausta.</p> <p>Mittauksella paikannettiin interpolaatiolla suoritettujen liikeratojen paikoitusvirheitä. Menetelmällä todettiin mekaaniset vapausasteet ja sähköiset poikkeamat akseliliikkeistä. Mittaukset tehtiin standardin ISO 230-4 mukaisesti.</p> <p>Mittaustuloksia analysoimalla löydettiin kohtisuoruusvirheitä ja servomoottorien optimointipoikkeamia. Analyysin perusteella tehtiin työstökoneeseen kompensaatiosäätöjä. Säätöjen oikeellisuus varmistettiin vertailumittauksilla työstökoneesta sekä tuotantokappaleen mittaustuloksesta.</p> <p>Opinnäytetyötä tehtäessä ilmeni säätöjen oikeellisuuden tarkastamisen tarpeellisuus, koska työstökoneen yksilöllinen käyttäytyminen erilaisten poikkeamien ja muodonmuutoksien hallinnassa ei toteudu välittömästi, vaan työstökoneen stabiloituminen vaatii aikaa ja useampia säätötoimenpiteitä.</p> <p>Opinnäytetyössä selvisi, että kaksoisnivelsauvamittauksella voidaan parantaa työstökoneen laaduntuottokykyä ja mahdollistaa tuotannolle suuremmat toleranssit valmistuksessa. Kaksoisnivelsauvamittaus on nopea kunnonvalvontamittaus, mikä mahdollistaa tuotannon seisokkijan minimoimisen sekä työstökoneen kunnan seurannan kansainvälisten standardien mukaisesti.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Kunnossapito, kaksoisnivelsauvamittaus, ISO 9001 -standardi		
Muut tiedot		



Author AHONEN Veli Matti	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 16.05.2011
	Pages 79	Language Finnish
	Confidential	Permission for web publication ( X )
Title Double BallBar measuring as a geometric inspection		
Degree Programme Mechanical and Production Engineering		
Tutor PEURANEN, Harri, Principal Lecturer JAMK University of Applied Sciences		
Assigned by NÄRHI, Jouni, Service Manager Maintpartner Oy		
Abstract <p>The aim set for this bachelor's thesis was to measure the motion errors of machining centers by the circular test. A double ball bar system is an essential device for measuring the contouring accuracy. The motion errors during circular interpolation were measured by detecting the distance between the spindle tool and the workpiece on the table.</p> <p>The purpose of this bachelor's thesis was to provide the customer company with valuable information concerning the operation of the production plant in (Moventas) Jyväskylä. The target machine was chosen for FMS Machining which requires a high standard of accuracy. Measurements were made in accordance with the ISO 230-4 standard.</p> <p>A measurement method has been developed to recognize error origins of machining centers, Additionally; the method takes the mechanical construction and servo control aspect into analysis. The method was found to be capable of resolving many error parameters such as the center-offset error, roll-yaw-pitch errors and servo-gain mismatches.</p> <p>The study revealed the need for double checking the accuracy of the adjustment, because the machine tool's deformation control does not operate instantly. The deformation control requires time and new adjustments to destabilize</p> <p>The advantage of using the double ball bar system in maintenance is its quick performance in checking and thus minimizing the downtime of the machine. The study showed that the method can be used to improve the quality of the machine tool and enable the production of higher manufacturing tolerances.</p>		
Keywords Maintenance, DBB-measuring, ISO 9001-standard		
Miscellaneous		

# SISÄLTÖ

1	OPINNÄYTETYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET .....	6
2	KUNNOSSAPIDON ERI MUODOT .....	7
2.1	Kunnossapitostrategiat .....	7
2.2	Kunnossapitolajit.....	9
2.2.1	Korjaava kunnossapito .....	9
2.2.2	Ehkäisevä kunnossapito .....	9
2.2.3	Parantava kunnossapito.....	10
3	LAATU .....	11
3.1	Standardi ISO 9001:2008 .....	11
3.2	Mittaaminen .....	12
3.3	Dokumentointi .....	12
3.4	Analysointi .....	12
3.5	Jatkuva parantaminen.....	13
4	KONEISTUSTARKKUUS .....	14
4.1	Virhelähteet .....	14
4.2	Geometria .....	15
4.3	Stabiilius.....	16
4.4	Paikoitustarkkuus.....	18
4.5	Vapausasteet.....	19
4.6	Mittausepävarmuus .....	20
4.7	Mittalaitteen kalibrointi.....	22
5	TAVANOMAISET MITTAUSLAITTEISTOT .....	23
5.1	Laser-interferometri.....	23
5.2	Testikappale .....	24

5.3	Keraaminen suorakulma .....	25
5.4	Mittakello .....	26
5.5	Tarkkuusvesivaaka .....	27
6	INTERPOLAATIOMITTAUS .....	28
6.1	Heidenhain-mittauslaitteisto .....	30
6.2	PolarCheckAnalysis-ohjelma .....	32
6.3	Työstökoneen kunto .....	34
7	FMS-TYÖSTÖKESKUS .....	35
7.1	Akselien toiminta .....	36
7.1.1	Moottori .....	36
7.1.2	Ruuvi ja mutteri .....	37
7.1.3	Paikoitusjärjestelmä .....	38
7.2	Koneparametrit .....	39
7.2.1	Lämpötila kompensointi .....	40
7.2.2	Kääntöväljyys .....	40
7.2.3	Moottorin vahvistus .....	42
7.2.4	Asteikkovirhe .....	43
7.2.5	Kuularuuvien kompensointi .....	44
8	MITTAUS TYÖSTÖKESKUKSELLA .....	45
8.1	Valmistelu mittaukseen .....	45
8.2	Toteutus .....	46
8.2.1	Mittausolosuhteiden vakiinnuttaminen .....	46
8.2.2	Kiinnittimet .....	47
8.2.3	Karan asemointi .....	49
8.2.4	Ongelmat .....	50
8.3	Referenssimittaus .....	51

9	SÄÄTÖTOIMET .....	52
9.1	Perinteiset säätötoimet.....	52
9.2	Tarkastusmittaus, XY-taso.....	52
9.2.1	Koordinaattimittaus.....	53
9.2.2	Saavutettu tulos.....	53
9.3	Tarkastusmittaus, YZ-taso.....	54
9.3.1	Kaksoisnivelsauvamittaus.....	54
9.3.2	Saavutettu tulos.....	54
9.4	Asteikkovirhe .....	55
10	POHDINTA.....	57
11	KEHITYSEHDOTUKSET .....	59
	LÄHTEET.....	61
	LIITTEET .....	63
	Liite 1. Ympyrämäisyysvirhe, XY-taso.....	63
	Liite 2. Referenssimittaus, XY-taso.....	64
	Liite 3. Referenssimittaus, ZY-taso.....	65
	Liite 4. Mittausepävarmuuden määrittely.....	66
	Liite 5. Säädetty XY-taso .....	67
	Liite 6. Sokkapiirin paikoitustarkkuus.....	68
	Liite 7. Tuotantokappaleen ympyrämäisyys.....	69
	Liite 8. Uusintamittaus, XY-taso.....	70
	Liite 9. Servojättämän säätö, XY-taso.....	71
	Liite 10. Tuotantokappaleen mittaustulos .....	72
	Liite 11. Tavanomaisten säätöjen vaikutus, XY-taso.....	73
	Liite 12. Säädetty YZ-taso .....	74
	Liite 13. Asteikkovirhereikäpiirimittaus.....	75

Liite 14. Asteikkovirhekoordinaattimittaus .....	76
Liite 15. Asteikkovirhepaikoitustarkkuus .....	77
Liite 16. Säädetty asteikkovirhe .....	78
Liite 17. Asteikkovirheen tarkastusmittaus .....	79

## KUVIOT

KUVIO 1. Kunnossapitolajit.....	7
KUVIO 2. Kunnossapidon kustannusjäävuori .....	8
KUVIO 3. Demingin ympyrä .....	13
KUVIO 4. Työstötarkkuuden tekijät .....	14
KUVIO 5. Koneistuskeskuksen vapausasteet.....	15
KUVIO 6. Vapausasteet .....	19
KUVIO 7. Laser-interferometri.....	23
KUVIO 8. NAS 979 -testikappaleen työpiirustus.....	24
KUVIO 9. Keraaminen suorakulma.....	25
KUVIO 10. Mikrokaattori .....	26
KUVIO 11. Tarkkuusvesivaaka.....	27
KUVIO 12. Kaksoisnivelsauvalaitteiston periaate .....	29
KUVIO 13. Kaksoisnivelsauvamittalaite.....	30
KUVIO 14. PolarCheck Analysis -ohjelma .....	32
KUVIO 15. Mittausmenetelmäepävarmuus .....	33
KUVIO 16. Ympyrämäisyys.....	34
KUVIO 17. FMS työstökoneet .....	35
KUVIO 18. Servomoottorin poikkileikkaus .....	36
KUVIO 19. Kuularuuvi.....	37
KUVIO 20. Heidenhain LC 100 mittasauva .....	38
KUVIO 21. Kääntöväljyys .....	40

KUVIO 22. Käännemitta.....	41
KUVIO 23. Servovaste.....	42
KUVIO 24. Asteikkovirhe .....	43
KUVIO 25. Kuularuuvin kompensointi.....	44
KUVIO 26. Ulkolämpötila mittausajankohtana.....	46
KUVIO 27. Kulmahyllyn asetus.....	47
KUVIO 28. XY-tason asetus .....	48
KUVIO 29. ZY-tason asetus .....	49
KUVIO 30. Paikoitusvirhe kaksoisnivelsauvamittaus .....	50

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Lämpölaajenemiskertoimia .....	17
TAULUKKO 2. Epävarmuuskorjauskertoimet .....	21
TAULUKKO 3. Koneparametri, NCMD 1800* .....	39



# 1 OPINNÄYTETYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET

Laatuajattelun perusta on asiakaskeinen tuotantojärjestelmä, jossa tuotannon tunnuslukuja esitetään neljännesvuosittain. Asiakkaiden tarpeisiin on kyettävä reagoimaan nopeasti ja joustavasti. Tuotantokoneilla on kyettävä valmistamaan pitkiä sarjoja tai yksittäiskappaleita. Nykyaikaisilla tuotantojärjestelmillä pyritään toimimaan vuorokauden ympäri ilman taukoja ja siksi koneiden laaduntuottokykyyn täytyy kiinnittää erityistä huomiota. Metalliteollisuudessa työstökoneen laaduntuottokyky on avainasemassa pyrkiessä 0-virhe tuotantoon. Tehtyjen tuotteiden laatuun vaikuttaa useita tekijöitä, mutta työstökoneen geometriset poikkeamat vaikuttavat valmistettujen kappaleiden laatuun systemaattisesti. Kunnossapidon tehtävänä on seurata työstökoneella tapahtuvia muutoksia ja reagoida niihin.

Opinnäytetyön toimeksiantaja, Maintpartner Oy, toimii kunnossapitoalalla. Palvelutarjontaan kuuluvat tuotantolaitosten kunnossapito, käyttöpalvelut, kunnossapidon konsultointi sekä yksittäiset tukipalvelut asiakkaan tarpeen mukaan räätälöitynä. Maintpartner Oy:n asiakaskunta koostuu pääosin teollisuudesta ja teollisuuspuistoista, energiateollisuudesta sekä kunnista. Yrityksen toimintajärjestelmä on sertifioitu standardien ISO 9001:2000 ja ISO14001:2004 sekä OHSAS 18001:2007 mukaisesti.

Tälle opinnäytetyölle oli tarve kehitettäessä ennakoivan kunnossapidon toimia. Kunnossapidossa oli vähäisellä käytöllä oleva kaksoisnivelsauvamittalaitteisto, jonka käytettävyyttä haluttiin tutkia työstökeskuksen kunnonvalvonnan osana.

Opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää kaksoisnivelsauvamittauksen sopivuus dynaamisten ja staattisten poikkeamien hallintaan FMS-työstökoneella. Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa kaksoisnivelsauvamittauksen avulla työstökoneen laaduntuottokykyä ja kunnossapidon mahdollisuutta reagoida laadullisiin poikkeamiin ennen virheellisten tuotteiden syntymistä.

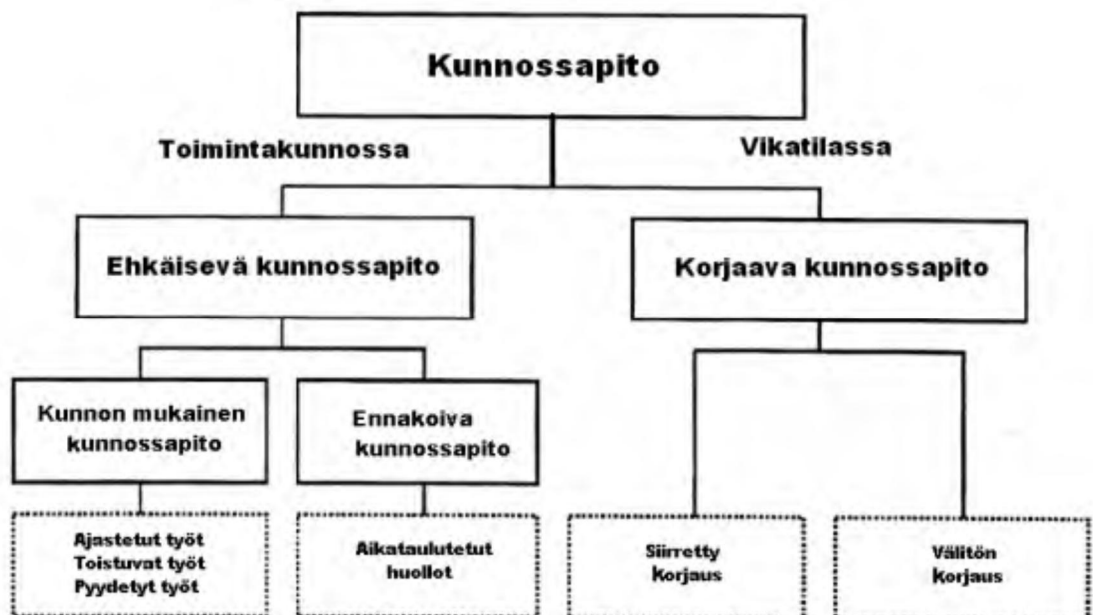
## 2 KUNNOSSAPIDON ERI MUODOT

### 2.1 Kunnossapitostrategiat

Metalliteollisuuden kunnossapito on kehittynyt nopeaa vauhtia. Yrityksissä on ymmärretty, kuinka tärkeää on pitää laitteet toimintakykyisinä ympäri vuorokauden, vuoden jokaisena päivänä. Kunnossapidon tehtävänä on vikojen ja vioittumistapojen syntymisen ja niiden vaikutusten selvittäminen sekä vikojen korjaaminen.

Kunnossapito määritellään standardissa SFS-EN 13306 seuraavasti: *Combination of all technical, administrative and managerial actions during the life cycle of an item intended to retain it in, or restore it to, a state in which it can perform the required function.* Tämä tarkoittaa toimenpiteitä, joilla ylläpidetään tai palautetaan kohteen toimintakyky suorittamaan sille vaaditut toiminnot. (SFS-EN 13306 2001, 8.)

Standardin SFS-EN 13306 mukaisesti kunnossapitolajit jaetaan vian havaitsemisen mukaan, kuten kuviossa 1 on esitetty. Kansallisella tasolla standardi PSK 6201 on harmoniassa standardin SFS-EN 13306 kanssa.

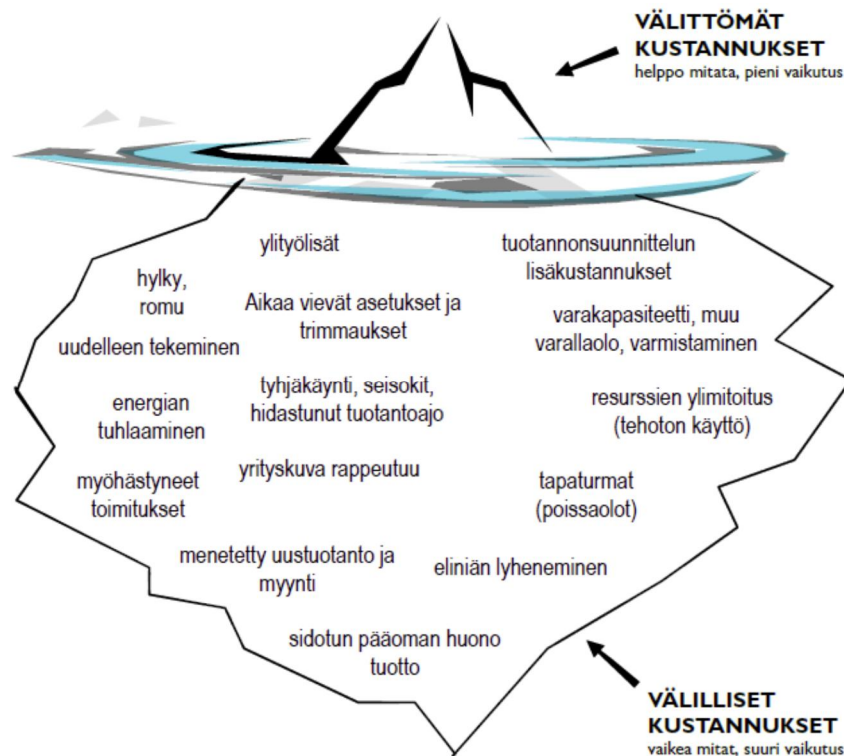


KUVIO 1. Kunnossapitolajit (SFS-EN 13306 2001, 36).

PSK-standardisointi on vuonna 2007 prosessiteollisuuden tarpeisiin kehitetty kotimainen standardointiyhdistys, jonka tarkoituksena on laatia käytännönläheisiä ja menetelmätyyppisiä työkaluja. Kehyksinä käytetään eurooppalaisia ja kansainvälisiä standardeja. (PSK-standardisointi 2010, PSK lyhyesti.)

Kunnossapidon tarkoitus on asiakkaan käyttöomaisuuden ylläpitäminen ja parantaminen mahdollisuuksien mukaan. Standardissa viitataan hallinnollisiin ja liikejohdollisiin toimiin, mitkä saattavat olla ristiriidassa kunnossapitokustannuksien kanssa. Järviö toteaaakin, että ennakoivat toimenpiteet on järkevää tehdä, mikäli ne alentavat häiriön seurauksia enemmän, kuin itse ennakoiva toimenpide vaatii kustannuksia. (Järviö 2008, 16.)

Vikojen ja vikaantumissyiden analysointi ymmärretään tärkeäksi, mutta systemaattinen havainnoiminen on harvinaista. Välittömät kustannukset ns. jäävuoren huippu, on helppo mitata, mutta vaikutukset ovat pienet. Välillisten kustannusten vaikutukset näkyvät pitemmällä aikavälillä. (Järviö 2007, 135.) Kunnossapidon kustannusjäävuori on esitetty kuviossa 2.



KUVIO 2. Kunnossapidon kustannusjäävuori (Järviö 2008, 15).

## 2.2 Kunnossapitolajit

Kunnossapitolajit määritellään korjaavaan ja ehkäisevään kunnossapitoon. Ehkäisevän kunnossapidon merkitys on kasvanut nykyaikana, koska välillisten kustannuksien muutoksia on pystytty mittaamaan ja kohdentamaan ennakkohuollon toimenpiteisiin. Seisokkikustannuksien arviointiin on kunnossapito-ohjelmistoja, joilla voidaan mitata strategioita ja saadaan taloudelliset vaikutukset ennakkohuollon osalta selvitettyä. Kunnossapidon nykytila voidaan mitata esimerkiksi SKF Oy:n CNA-analyysimenetelmällä. Tärkeimpiä pääalueita analyysissä ovat kunnossapidon strategia, töiden tunnistaminen, hallinta ja toimeenpano kunnossapidon tehokkuuden optimoinnissa. (Järviö 2008, 18.)

### 2.2.1 Korjaava kunnossapito

Korjaava kunnossapito on yleensä välitöntä vian korjaamista ja lähinnä väliaikaista. Usein työstökoneen korjaukselta joudutaan siirtämään mahdollisten varaosien puutteesta tai henkilöstöresurssipuutteesta johtuen. Korjauksen lykkäykselle syynä voi olla myös tuotannolliset kiireet, mikäli koneella voidaan toimia edes osittaisella kapasiteetilla. Vikatilanteeseen voivat olla syynä käyttäjän antamat väärät parametrit koneohjelmassa, sähkökatkokset, materiaali- tai ennakkohuollon puuttuminen tai viivästyminen. Kunnossapidon tehtäviin kuuluu vian tunnistaminen ja toimintakuntoon palauttaminen. (Järviö 2008, 49.). Vikatilanteen aikana tuotantoväline ei kykene suoriutumaan sille vaaditusta tuotannollisista tehtävistä.

### 2.2.2 Ehkäisevä kunnossapito

Ennakoivan kunnossapidon tavoitteena on ylläpitää koneiden toimintakykyä. Määräaikaishuolto on konevalmistajan määrittelemällä aikavälillä tapahtuvaa korjaamista, silloin vaihdetaan tietyt osat, kuten leikkuunesteet, voiteluaineet ja kuluvat osat. Toiminta perustuu käytännön hyväksi havaittuihin toimintamalleihin. Laittevalmistaja on laskenut osille tietyn elinkaaren ja osat vaihdetaan säännöllisesti huoltosuunnitelman mukaisesti. Määräaikaishuollon tehtäviin kuuluu mm. puhdistus, voitelu, ku-

luvien osien vaihtaminen ja kalibrointi. Koneen suorituskyky ei parane yleensä näillä toimilla, mutta voidaan olettaa koneen toimivan luotettavammin.

Kunnonvalvontaa käytetään kuntoon perustuvan huollon keinoina. Tavoite on paikantaa osien kuluminen ennen koneen vikaantumista, ja tarkoituksena on ehkäistä vikaantumisen todennäköisyyttä. Myös koneen oma diagnostiikka voi ilmaista huollon tarvetta. Tehdään öljy- ja äänianalyysyjä sekä mitataan lämpötiloja. Koneen historiatietojen perusteella voidaan määritellä kriittiset osat ja vaihtovälit.

Liiallinen kunnossapito ei paranna koneen luotettavuutta, koska avattaessa ja suljetaessa altistetaan kone vikaantumismekanismeille. Ammattilaisten sanonta "Älä kaivoa toimivaan laitteeseen" pitää paikkansa. (Järviö 2007, 60.)

### 2.2.3 Parantava kunnossapito

Parantavan kunnossapidon tavoitteena on korjata koneiden rakenteellisia vikoja ja siten lisätä toimintavarmuutta. Koneeseen vaihdetaan alkuperäisten osia tilalle uusia osia. Koneen suorituskyky ei muutu näillä toiminnoilla.

Työstökoneiden modernisaatiot ovat tuotannon muuttuessa tulleet mukaan elinkaarirajatteluun. Vanha tuotantokone ei pysty valmistamaan kustannustehokkaasti tuotteita, mutta uuden koneen hankinta on useasti kalliimpi vaihtoehto, kuin vanhan modernisointi. Modernisaatiossa koneen tuotantonopeutta parannetaan. Koneisiin vaihdetaan yleensä ohjausjärjestelmä, nopeakierroskara sekä nopeammat akseli-moottorit. Tavoitteena on työstömenetelmien uusiminen ja työstönopeuden lisääminen. Modernisaation mukana uudistetaan useasti koko valmistusprosessi. (Järviö 2007, 51.)

PSK 7501 -standardi lisää parantavan kunnossapidon kunnossapitolajeihin. Parantavan kunnossapidon toiminta on vikaantumissyiden selvittäminen ja vian aiheuttajan poistaminen. Parantavan kunnossapidon toimenpiteinä koneen rakennetta muutetaan toimintavarmuuden ja kunnossapidettävyyden parantamiseksi. (Leinonen 2010, 36.)

## 3 LAATU

### 3.1 Standardi ISO 9001:2008

Standardia ISO 9001:2008 käytetään asiakasvaatimusten todentamiseksi sekä tuote- ja palvelunlaadun varmistamiseksi. Standardia voidaan soveltaa hyvinkin erityyppisissä ja -kokoisissa organisaatioissa hyvällä menestyksellä. Laadunhallintajärjestelmän tarkoituksena on parempien asiakasvaatimusten täyttäminen ja organisaation tehokkuuden parantaminen. (Paananen 2011, 1-3.)

Standardi ISO 9001:2008 määrittää viisi toimintoa, joiden pitää olla kunnossa, jotta tuote tai palvelu täyttäisi asiakas- ja lakisääteiset vaatimukset. (SFS-EN ISO 9001 2008, 18-34.)

1. tuotteen toteuttaminen
2. laadunhallintajärjestelmät
3. johdon vastuu
4. resurssien hallinta
5. mittaaminen, analysointi ja parantaminen

Standardin toteutumista mitataan auditoinneilla, jonka avulla pyritään löytämään yrityksen toiminnasta kehittämiskohteita. Auditoinnissa löydettyjen kehityskohteiden avulla toimintaa pyritään korjaamaan ja kehittämään sekä mahdollisesti ennalta ehkäisemään tulevaisuudessa syntyviä ongelmia.

Standardin ISO 9001:2008 viimeisiä osia mittaamista, analysointia ja parantamista, tarkastellaan tuotteen valmistuksen kannalta. Sertifioitujen kunnossapitoyrityksien toimintakäsikirjoissa on määritelty ne toimenpiteet, joilla asiakkaille voidaan taata standardin ISO 9001:2008 mukainen palvelu. Tarkoituksena on taata tuotteen vaatimustenmukaisuus. (SFS-EN ISO 9001 2008, 16.)

## 3.2 Mittaaminen

Tarkastus-, mittaus- ja testausvälineitä tulee valvoa yrityksessä, jotta mittaustulokset olisivat riittävän tarkkoja standardin mukaisiin asiakasvaatimuksiin nähden. Jokainen tarkastuspöytäkirja, kalibrointi ja huolto tulee dokumentoida asianmukaisesti, jotta mittapoikkeaman sattuessa mittaustoiminnolla säilyy jäljitettävyys. Seuraavassa on lueteltu standardin ISO 9001:2008 mukaisia vaatimuksia mittauksille. (Paananen 2010, 1-3.)

- Menettelyohje mittavälineiden ylläpidosta
- Kalibrointijärjestelmä
- Kalibrointipöytäkirjat
- Menettelyohje jäljittävyyden varmistamiseksi
- Mittaustietojen laitekohtainen seurantakirjanpito
- Tarpeellinen ohjeistus

## 3.3 Dokumentointi

Mittaustuloksien tallenteet ovat dokumentti, asiakkaalle luvatussa palvelusta ja laadusta, laadunvarmistamisesta ja asetettujen vaatimusten toteuttamisesta. Laadunhallintajärjestelmän laatukäsikirjassa kuvaillaan toimintatapoja ja periaatteita, joilla yritys huolehtii koneidensa ja laitteidensa kunnosta ja tarkkuudesta. (SFS-EN ISO 9001 2008, 16.)

Mittaustuloksien tallenteet palvelevat myös kehitystyötä. Mittaustuloksien trenditietoa analysoimalla voidaan tunnistaa ongelmien syitä tai mahdollisia syitä.

## 3.4 Analysointi

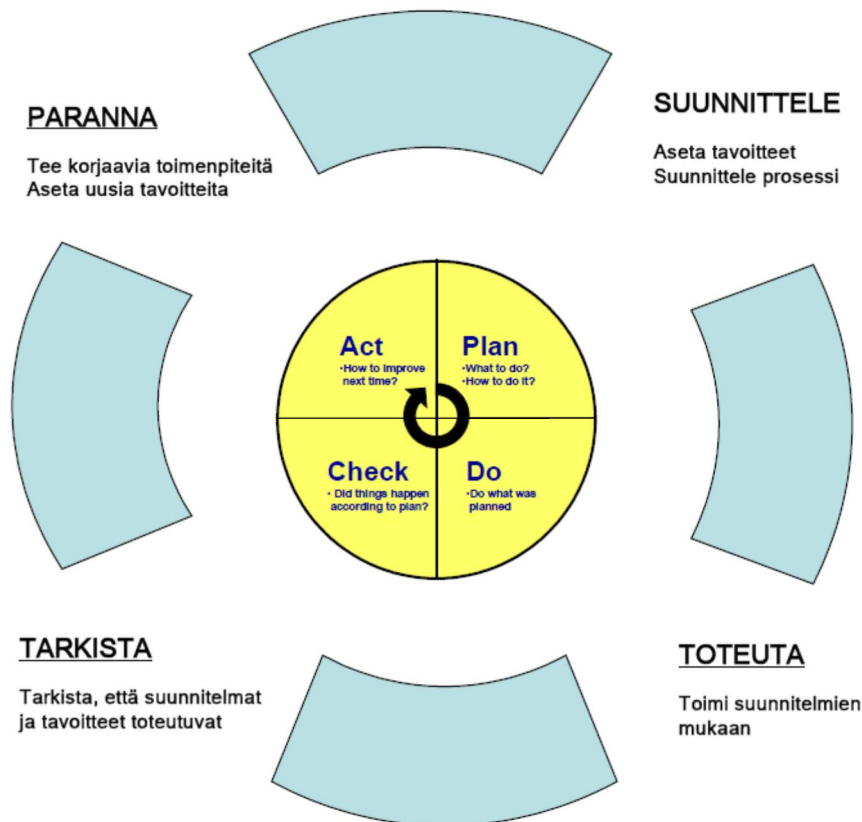
Asiakkaan kunnossapidosta huolehtivan yrityksen velvollisuus standardin ISO 9001:2008 mukaan on kerätä ja analysoida mittalaitteiden avulla saatua tietoa. Yri-

tyksen tulee myös dokumentoida hankittu tieto asianmukaisesti, jotta hankittua tietoa olisi helppo tulkita.

Organisaatioiden tulee määrittää, kerätä ja analysoida tarkoitukseen sopivaa tietoa osoittaakseen laadunhallintajärjestelmänsä soveltuvuuden ja vaikuttavuuden sekä arvioidakseen, kuinka laadunhallintajärjestelmää tulisi jatkuvasti kehittää ja parantaa. (SFS-EN ISO 9001 2008, 34–38.)

### 3.5 Jatkuva parantaminen

Kaikkein käytetyin jatkuvan kehittämisen prosessi lienee Demingin ympyrä menetelmä. Menetelmän vaiheet ovat: Suunnittele (Plan), Toteuta (Do), Tarkista (Check), Kehitä (Act). (Paananen 2010, 5.) Tarkoituksena on oppia tehdyistä virheistä, eikä toistaa samaa virhettä.



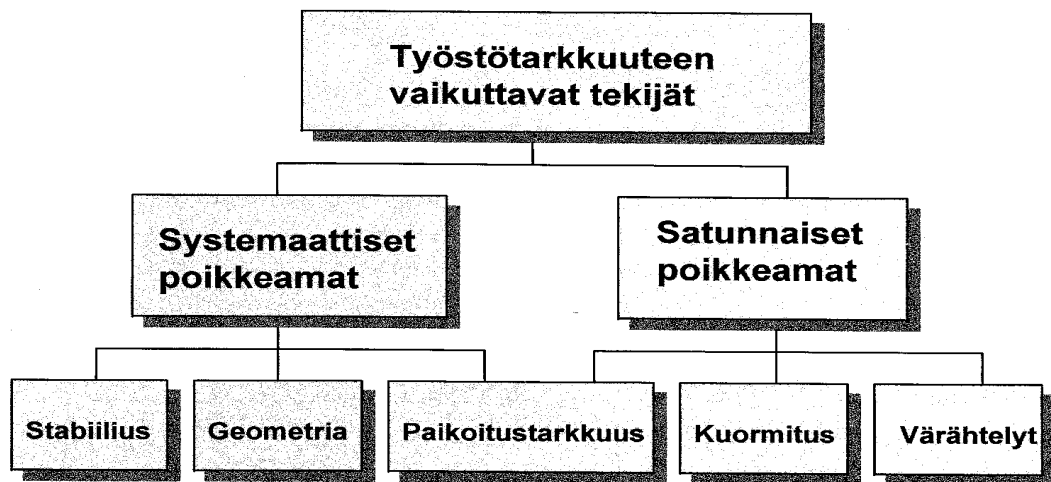
KUVIO 3. Demingin ympyrä (Paananen 2010, 5).



## 4 KONEISTUSTARKKUUS

### 4.1 Virhelähteet

Työstökoneen koneistustarkkuus muuttuu kulumisen, konerikkojen ja ympäristöstä johtuvien muutoksien vuoksi. Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät jaetaan systemaattisiin ja satunnaisiin poikkeamiin saksalaisen VDI / VDG -normin mukaan. Kuviossa 4 on esitetty työstötarkkuuteen vaikuttavat erilaiset tekijät. (Andersson 1997,273.)



KUVIO 4. Työstötarkkuuden tekijät (Andersson 1997, 273).

Satunnaiset poikkeamat ovat hetkellisiä työstömenetelmistä johtuvia ja koneenkäyttäjän hallittavissa olevia toimenpiteitä. Poikkeamat aiheutuvat vääristä syöttönopeuksista, työkalujen kulumisesta tai työstettävässä kappaleessa olevista poikkeamista.

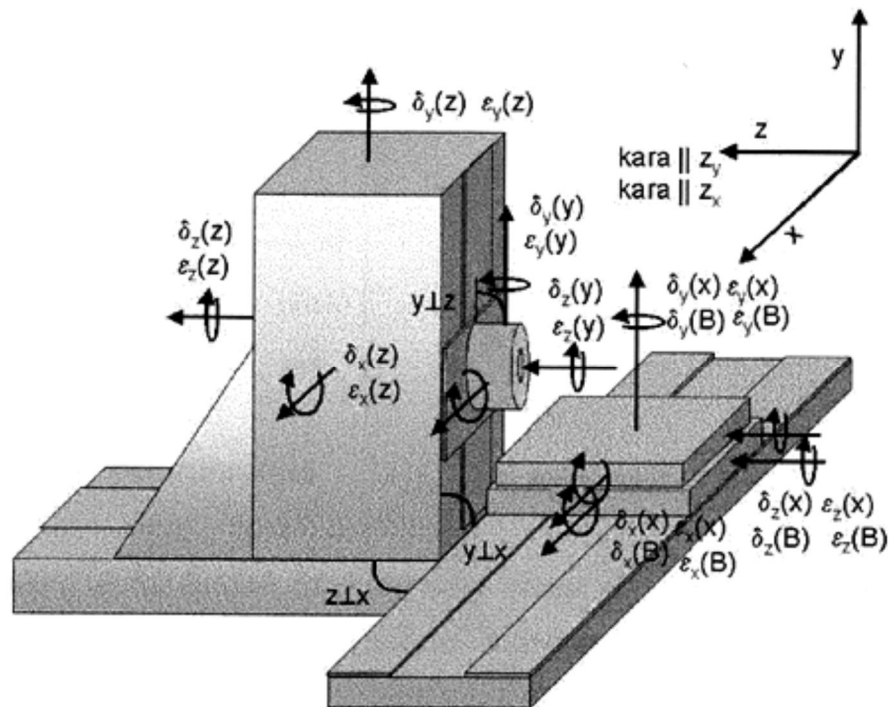
Systemaattisissa poikkeamissa kunnossapidon tarkistusmenetelmät tulevat esille. Työstökoneen rakenteiden jäykkyys, lämpölaajeneminen ja geometria aiheuttavat ei-toivottuja toimintoja koneistuksessa.

Esitetyn kuvion 4 perusteella geometriamuutokset ovat vain osa työstötarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Geometriamuutoksia voidaan pitää kuitenkin merkittävimpinä ongelmina työstökoneen laaduntuottokyvyn ylläpitämisessä. (Andersson 1997, 273.)

## 4.2 Geometria

Geometrisella tarkkuudella tarkoitetaan työstökoneen osien valmistusvirheettömyyttä ja asennustyön tarkkuutta asentaa työstökone. Asennusvaiheessa koneen liikkuvat akselit pyritään saamaan kohtisuoraan toisiinsa nähden. Akselien liikkuvuuden vuoksi osat sovitetaan tarkasti toisiinsa sopiviksi ja liikekitkaa vähennetään voitelulla akselipintojen välissä. Akseleiden liikkumista toisiinsa nähden kutsutaan vapausasteiksi. (Andersson 1997, 272.)

Työstökoneen yhden lineaariakselin liikkumisesta aiheutuu kuusi vapausastetta, joista vain liikesuunnan mukainen liikesuunta on haluttu. Kuviossa 5 on esitetty työstökoneen kaikki vapausasteet, joita on yhteensä kolmekymmentä. Akseleiden vapausasteet muodostuvat (X, Y, Z) -kohtisuuruusvirheistä sekä akselien liikesuunnista. Pyöröpyötä (B) lisää vapausasteita kolmelle liikesuunnalle ja kohtisuoruudelle. Työstökoneen tarkastus vaatii näiden kaikkien vapausasteiden hallintaa. (Andersson 1997, 277.)



KUVIO 5. Koneistuskeskuksen vapausasteet (Andersson 1997, 277).

### 4.3 Stabiilius

Työstökone pyritään rakentamaan mahdollisimman jäykäksi. Umpirunkoinen valurautarakenne olisi stabiilein ratkaisu konerungoksi, mutta taloudelliset syyt pakottavat etsimään kompromisseja stabiiliuden ja kustannusten välillä. Koneen stabiiliuteen vaikuttavat lämpötilamuutokset, valmistustarkkuudet ja värähtelyt. (Andersson 1997, 280.)

#### Staattinen stabiilius

Staattinen jäykkyys muodostuu työstökoneen rakenteiden materiaalista ja valmistusmenetelmistä. Kaikki materiaali joustaa ja joustot on osattava ottaa huomioon konetta valmistettaessa. Koneenpeti on perusta työstökoneen stabiilille toiminnalle. Koneenpetinä käytetään yleensä betonia, koska rungon ja konepedin lämpölaajeneminen on lähes sama.

Työstön aikana esiintyviin joustoihin ei voida valmistaa täysin ideaalista konerunkoa. Joustoa aiheuttavat työstettävän kappaleen paino ja työstövoimat. Kappaleen paino taivuttaa koneen runkoa ja akseleiden kohtisuoruus muuttuu, mikä vaikuttaa suoraan työstettävän kappaleen laatuun. Kappaleen kiinnitys ja tuenta vaikuttavat kappaleen taipumaan, siksi työstövoimat ovat viimeistely- ja hienotyöstössä pienemmät kuin rouhintatyöstössä tarkkuuden ja pinnanlaadun parantamiseksi. (Andersson 1997, 280.)

#### Dynaaminen stabiilius

Työstökoneeseen tulevat häiriöimpulssit saavat koneen rungon värähtelemään. Mikäli värähtely on hetkellinen piikki, värähtely vaimenee tietyssä ajassa. Värähtelyn johtuessa toistuvasta lähteestä, kuten laakeroinnista, työstökone jää värähtelemään jatkuvasti. Rungon värähtelytaajuuden nostaminen mahdollisimman korkeaksi vähentää värähtelyn vaikutuksia tuotantokappaleeseen. Työstökoneen dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavat rungon rakenteelliset ratkaisut. Parhaiten soveltuvat betoni-, valurauta- ja hitsatut rakenteet rungon rakenteeksi. (Andersson 1997, 282.)

## Terminen stabiilius

Materiaalin pituus muuttuu lämpötilan mukaan. Teknisen kappaleen pituudella tarkoitetaan +20 °C:n lämpötilassa kappaleen pituutta. (Andersson 1997, 131.) Kappaleen pituuden riippuvuutta lämpötilasta kuvaa yhtälö.

$$l=l_{20} [1+\alpha(t-t_{20})]$$

missä	$l$	on kappaleen pituus
	$l_{20}$	on kappaleen pituus +20 °C
	$\alpha$	on lämpölaajenemiskerroin
	$t$	on mitattu lämpötila
	$t_{20}$	on +20 °C

Yhtälöä voi ajatella teräksen ( $\alpha=11,5 \times 10^{-6} \text{ m / }^\circ\text{C}$ ) lämpölaajenemisella yhden Celsius asteen muutoksen yhdelle metrille aiheuttaman 0,0115 m (11.5  $\mu\text{m}$ ) pituuden muutoksen. (Andersson 1997, 132.) Taulukossa 1 on esitetty yleisempien työstettävien materiaalien lämpölaajenemiskertoimia.

TAULUKKO 1. Lämpölaajenemiskertoimia

Materiaali	Lämpölaajenemiskerroin $\alpha$ ( $10^{-6} \text{ m / }^\circ\text{C}$ )	Materiaali	Lämpölaajenemiskerroin $\alpha$ ( $10^{-6} \text{ m / }^\circ\text{C}$ )
Alumiini	23.8	Valurauta	10
Kovametalli	5...6	Ruostumaton teräs	10...18
Teräs	11,5	Pronssi	18
puu	3...54	Betoni	10...13

Työstökoneen lämpötila muuttuu työstön aikana. Lämpötila nousee kitkan muuttuessa energiaksi. Kitkaa aiheutuu voimansiirrosta ja erilaisista sähköisistä lähteistä. Lämpöä siirtyy voitelu- ja leikkuunestejärjestelmän mukana eri puolille työstökoneita. Tällainen lämmön siirtyminen saavuttaa lämpötasapainon tietyn ajan jälkeen. (Andersson 1997, 283.)

Työstön aikana lämpöä johtuu työkalusta kappaleeseen ja kappaleesta irtoavien lastujen mukana satunnaisesti. Lämpö jakautuu epätasaisesti ja pistemäisesti. Kappaleen lämpötilan muutos aiheuttaa kappaleeseen vääntymiä ja rakennemuutoksia. Lämmön siirtymiseen voidaan vaikuttaa leikkuunesteillä. Leikkuunesteen tarkoitus on jäähdyttää ja viedä lämpö pois työstettävästä kappaleesta.

Ulkopuoliset lämmönlähteet, kuten vuodenajan vaihtelut, muuttavat koneistusolosuhteita. Kesän ja talven lämpötilavaihtelut saattavat olla yli 80 astetta. Auringonpaiste ja ulkoiset lämmönlähteet kohdistuessaan koneeseen vaikuttavat lämpötasapainoon. Lämmön haittavaikutuksia pyritään vähentämään esim. ilmastoinnin avulla. (Andersson 1997, 285.)

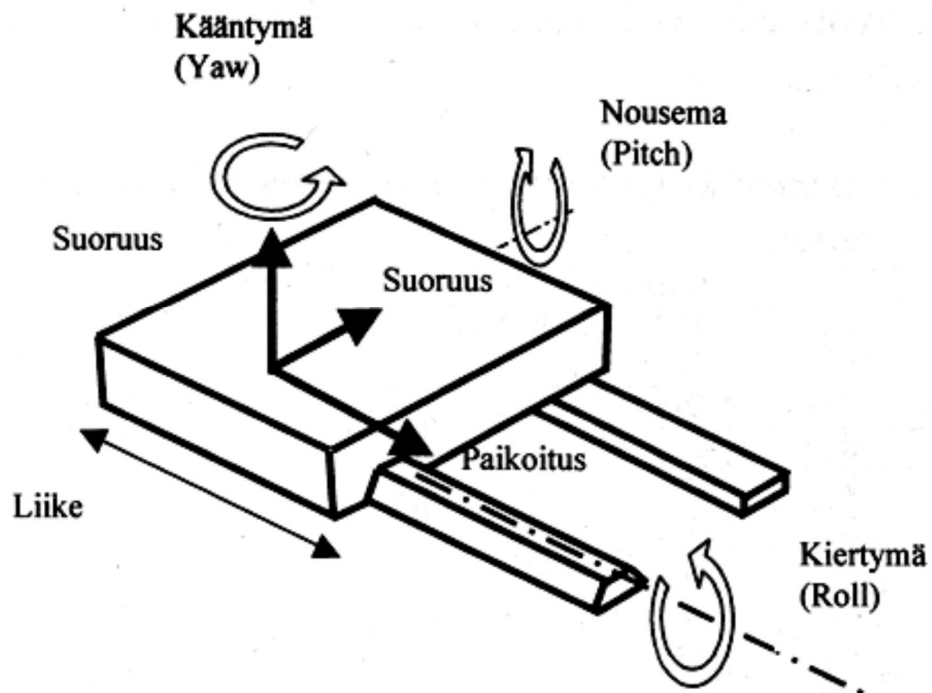
#### 4.4 Paikoitustarkkuus

Standardissa ISO 230-2 määritellään paikoitustarkkuus koneen liikeakselin tavoiteliikkeen ja toteutuneen liikkeen väliseksi suurimmaksi poikkeamaksi asemasta tai suunnasta riippumatta. Paikoitustarkkuuden määrittelyssä huomioidaan keskihajonta. Paikoitustarkkuus mitataan koneenliikeakselin ollessa pysähdyksissä. (SFS-ISO 230-2 1990, 3.)

Mittausmenetelmiä on käsitelty standardissa SFS-ISO 230-2 laajemmin tavanomaisien geometriatarkastuksien näkökulmasta. Mittausvälineistön kehittyessä on otettu käyttöön standardin ISO 230-4 mukainen ympyrätetausmenetelmä, jonka tarkoituksena on mitata interpolaatioliikkeen aikana tapahtuvia akselipoikkeamia. Menetelmää käytetään numeerisesti ohjattujen työstökoneiden kunnonmittauksessa. Mittauksen tarkoituksena on ympyränmuotoisen radan seurantavirheiden toteaminen. (ISO 230-4 1996, 2.)

## 4.5 Vapausasteet

Työstökoneessa on kuusi mahdollista poikkeamasuuntaa yhtä akselin liikesuuntaa kohti. Liikesuuntaan kohtisuoraan vaikuttavat poikkeamat ovat suoruuspoikkeamia, liikesuunnassa vaikuttava poikkeama on paikoitusvirhe. Kulmapoikkeamat ovat kunkin liikeakselin ympäri, ja ne ovat kiertymä, nousema ja kääntymä. Kuviossa 6 on esitetty mahdolliset liikeakselin vaikuttavat poikkeamat. Nämä poikkeamat vaikuttavat toisiinsa. Siksi työstökoneen tarkastuksessa pyritään arvioimaan eri poikkeamasuureiden vaikutusta yksittäisenä virheenä. (Andersson 1997, 275.)



KUVIO 6. Vapausasteet (Tikka 1997, 240).

Pyöröpöydän paikoitusvirhettä voidaan kuvata kääntymänä, muutoin pyöröpöytään vaikuttavat samat kuusi vapausastetta kuin lineaariakseliin. Pyöröpöytää ei käytetä normaalisti työstävänä akselina. Siksi sen merkitys kaksoisnivelsauvamittauksen kannalta on vähäinen.

## 4.6 Mittausepävarmuus

Mittauksiin liittyy aina virheitä ja siten mittauksen tulos on aina arvio. Mittausvirhe on yksittäisen tuloksen ja todellisen arvon ero. Mittausvirheeseen liittyy satunnaisvirhettä ja systemaattista virhettä. Satunnaisen virheen määrää voidaan pienentää mittauskertoja lisäämällä. Systemaattiset virheet ovat yleensä tunnettuja ja niiden vaikutustapa tunnetaan. Tavallisimmat systemaattiset virheet johtuvat lämpötilan muutoksista ja mittausvoimista. Niiden vaikutus poistetaan korjaamalla virhe, tai suorittamalla mittaus siten, että vaikutus eliminoituu. (Andersson & Oksanen 1997, 148.)

Mittausepävarmuus on vaihteluväli systemaattisen ja satunnaisen virheen välillä. Käytännössä mittausepävarmuus on mittausprosessin kokonaisepävarmuus, eikä mittalaitteen kalibrointitodistuksen ilmoitettu epävarmuusarvo. (SFS 3700 1998, 8.)

Epävarmuus voidaan laskea tilastollisilla menetelmillä, mutta pienet mittauskerrat joudutaan arvioimaan suureen mahdollisista vaihteluista. Mittauslukemien ollessa välillä (q-a)...(q+a) voidaan kaava kirjoittaa muodossa. (Andersson 1997, 152.)

$$u(q) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

missä a on vaihteluvälin puolikas.

Satunnaiset ja systemaattiset mittausvirheet summataan neliöllisellä menettelyllä. Epävarmuustekijät, kuten mittalaitteen maksimivirhe, kalibrointitodistuksen epävarmuus, lämpötila laajentuminen ja toistuvuus lasketaan seuraavasti. (Andersson 1997, 149.)

$$u = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2 + B_1^2 + B_2^2 + \dots + B_n^2}$$

missä            A ovat satunnaisia poikkeamia  
                     B ovat systemaattisia poikkeamia

Kokonaispävarmuus lasketaan kattavuuskerrointa käyttäen. Mittausepävarmuutta määriteltessä kymmenen mittauskertaa antaa kattavuuskertoimen kaksi. Mikäli mitauksia on vähemmän, käytetään taulukko 2 mukaisia korjauskertoimia. Kattavuuskertoimen arvo kaksi kalibrointi todistuksessa ilmaisee 95 % varmuutta. (Tikka 2010, 16-17.)

TAULUKKO 2. Epävarmuuskorjauskertoimet (FINAS S12.)

Mittauskerrat	korjauskerroin	mittauskerrat	korjauskerroin
2	7.0	6	1.3
3	2.3	7	1.3
4	1.7	8	1.2
5	1.4	9	1.2
<i>Kertoimet ovat voimassa k arvon ollessa 95 % todennäköisyydellä</i>			

Kokonaispävarmuus ilmoitetaan mitattuun pituuteen riippuvaisena tekijänä U.

$$U = \pm k^*(A + KL)$$

missä	U	on kokonaispävarmuus
	k	on kattavuuskerroin
	A	on epävarmuusarvon vakio-osa
	K	on epävarmuusarvon suureesta riippuva osa
	L	on mitattu pituus

Riittävä mittausepävarmuus saadaan myös tuotetoleranssista. Käytettävien mittausepävarmuus saadaan jakamalla toleranssi kymmenellä. Useasti joudutaan käyttämään 30 % sääntöä, koska mittaepävarmuudesta tulisi käytännössä mahdottoman pieni. (Tikka 2010, 17.)

Mittausepävarmuus ( $\pm U$ ) pitää tietää. Korjaamisen ja kompensoinnin jälkeen mittaus tulos on vielä arvio, vasta mittausepävarmuuden määrittämisen jälkeen mittaus tulos on täydellinen. (Andersson 1997, 148.) Mittausjärjestelmän pieni epävarmuus antaa valmistukselle isomman osan toleranssialueesta.



## 4.7 Mittalaitteen kalibrointi

Standardin ISO 9001:2008 mukainen laatujärjestelmä ja sen osille vaadittava vaihtokelpoisuus asettaa suuria vaatimuksia yrityksen mittaustoiminnalle ja mittalaittehallinnalle.

Vaikka mittalaitteet ovat standardin ISO 9001:2008 mukaisessa kunnossa, jokainen mittaaja saa erilaisen tuloksen mitattaessa. Tuloksia analysoidessa tulee huomioida yksilölliset erot mittausta suorittaessa. Riittävän monta mittausta ottamalla saadaan keskiarvo. Mikäli keskiarvo heittelee mittalaitteeseen ilmoitetun toleranssin yli, on syytä epäillä mittalaitteessa olevan vikaa, jonka poistamiseksi tulisi mittalaite kalibroida.

Kalibroinnilla tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden avulla tunnetuissa olosuhteissa saadaan selville mittauslaitteen näyttämien arvojen ja mitattavan suureen vastaavien arvojen välinen yhteys. Mittalaitetta kalibroitaessa etsitään yhteyttä sovittuun vertailumittaan, eli mittanormaaliin. Kalibroinnin keskeinen käsite on jäljitettävyyys. Kalibrointitoiminnan tarkoituksena on taata, että kaikki mittaukset voidaan jäljittää kansainvälisesti hyväksytyihin mittanormaaleihin saakka. Suomen kansallinen mittanormaalijärjestelmä on MIKESin tai sen akkreditoima kalibrointilaboratorio. MIKESin akkreditoimat kalibrointilaboratoriot tarjoavat palveluita käytännön mittaajille. (Rantanen 2010, 65.)

Mittalaitteen toiminnan tarkastaminen on tärkeä toimenpide ennen mittauksen aloittamista, mikäli mittanormaaleja ei ole mahdollista käyttää. Päivittäisen toiminnan tarkastamiseksi ulkoisen kunnan silmämääräinen ja mittaustulosten analysoiminen on ainoa toimenpide laitteen toimivuuden varmistamiseksi. Päivittäisessä käytössä mittaajan oma arviointi mittalaitteesta on tärkeää.

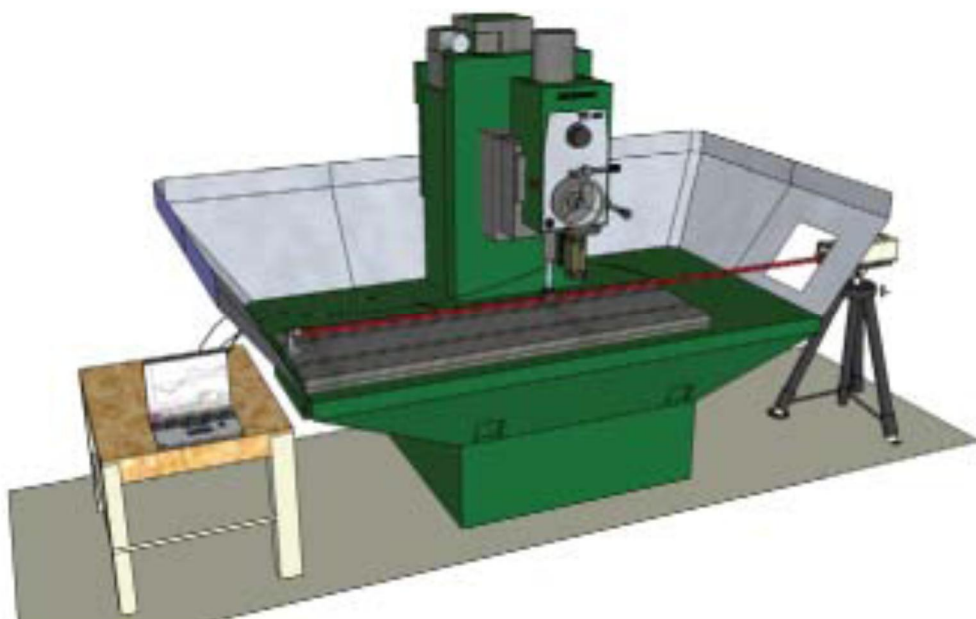
Suorituksen luotettavuutta ja laatua arvioidaan mittaamalla, joten mittaamiseen liittyvät asiat ovat ratkaisevia.

## 5 TAVANOMAISET MITTAUSLAITTEISTOT

Tavanomaisilla mittauksilla tarkoitetaan tässä menetelmiä, joilla mitataan suoraan tiettyä koneen vapausastetta, kuten esimerkiksi paikoitustarkkuutta. Mittaukset tehdään aina akseliliikkeen ollessa pysähtyneenä. Paikoitustarkkuuden määrittelemiseksi käytetään yleisesti laser-interferometriä. Muissa poikkeamissa voidaan käyttää mittalaitteistona suorakulmaa, mittakelloa ja vesivaakaa.

### 5.1 Laser-interferometri

Laserin monokromaattinen, kollimoitu valo mahdollistaa pitkät mittauasetäisyydet mittaustarkkuuden kärsimättä. Mittalaitteeseen erilaisia peilejä yhdistämällä voidaan mitata työstökoneen kaikki poikkeamat. Laser-interferometrin mittaustarkkuuteen vaikuttavat ilmanpaine, kosteus, lämpötila ja valon taittovirheet optiikoista. Mittausepävarmuus on noin  $\pm(0,2 + 0,51) \mu\text{m}$ . Kuviossa 7 on esitetty mittausjärjestely pituudenmittauksen ja paikoitustarkkuuden osalta. Menetelmällä päästään alle  $1 \mu\text{m}$ :n tarkkuuteen. (Rantanen 2010, 65.)



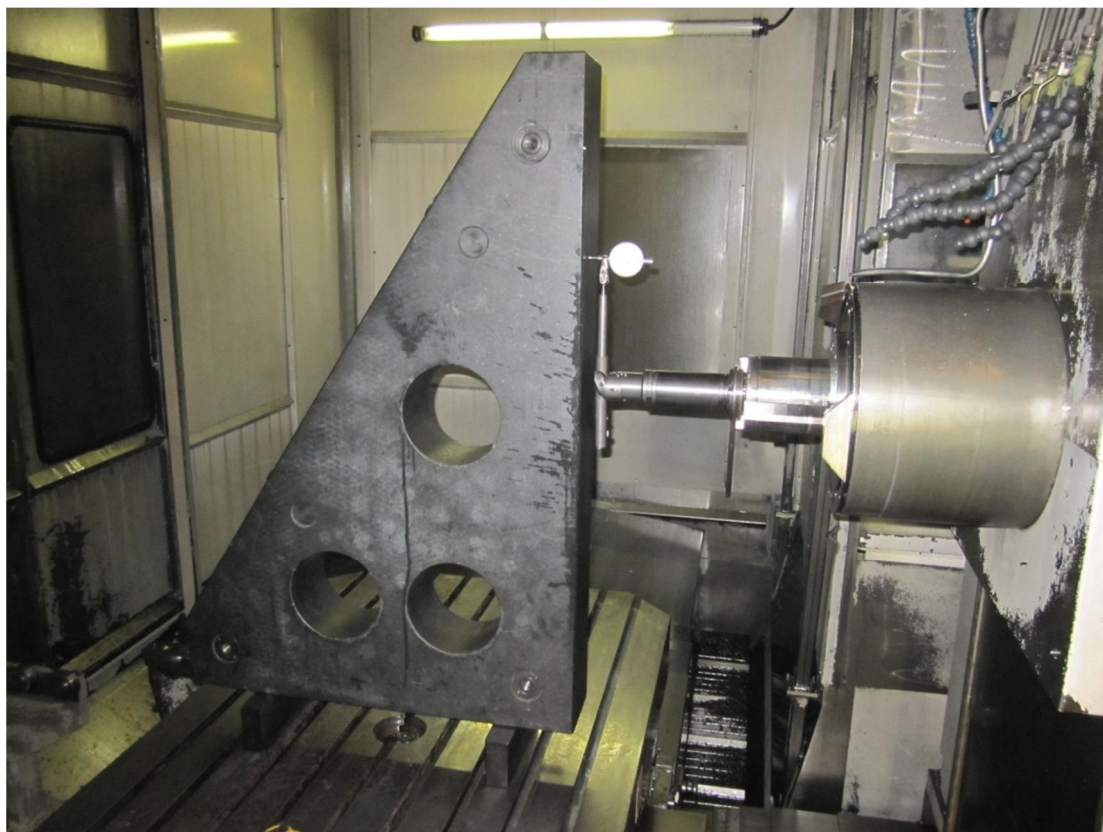
KUVIO 7. Laser-interferometri (Rantanen 2010, 64).



### 5.3 Keraaminen suorakulma

Suorakulmaa käytetään kahden akselin kohtisuoruuden toteamiseen. Mittaukset suoritetaan yleensä mittakellon avulla, kuten kuviossa 9 on esitetty. Suorakulman alle asetetaan mittapalat, joilla voidaan säätää suorakulma pöydän tason mukaisesti sekä mitattavan akseliliikkeen suuntaisesti.

Suorakulman kohtisuoruus tulee olla alle  $5 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ . (SFS-ISO 230-1 1992, 81.) Kuviossa 9 oleva keraamisen suorakulman sivun pituus on 800mm, mikä mahdollistaa mittauksen pitemmiltä matkoilta ilman suorakulman siirtämistä. Mikäli suorakulmaa joutuu useasti siirtämään, suositellaan mittaamista laser-interferometrillä.

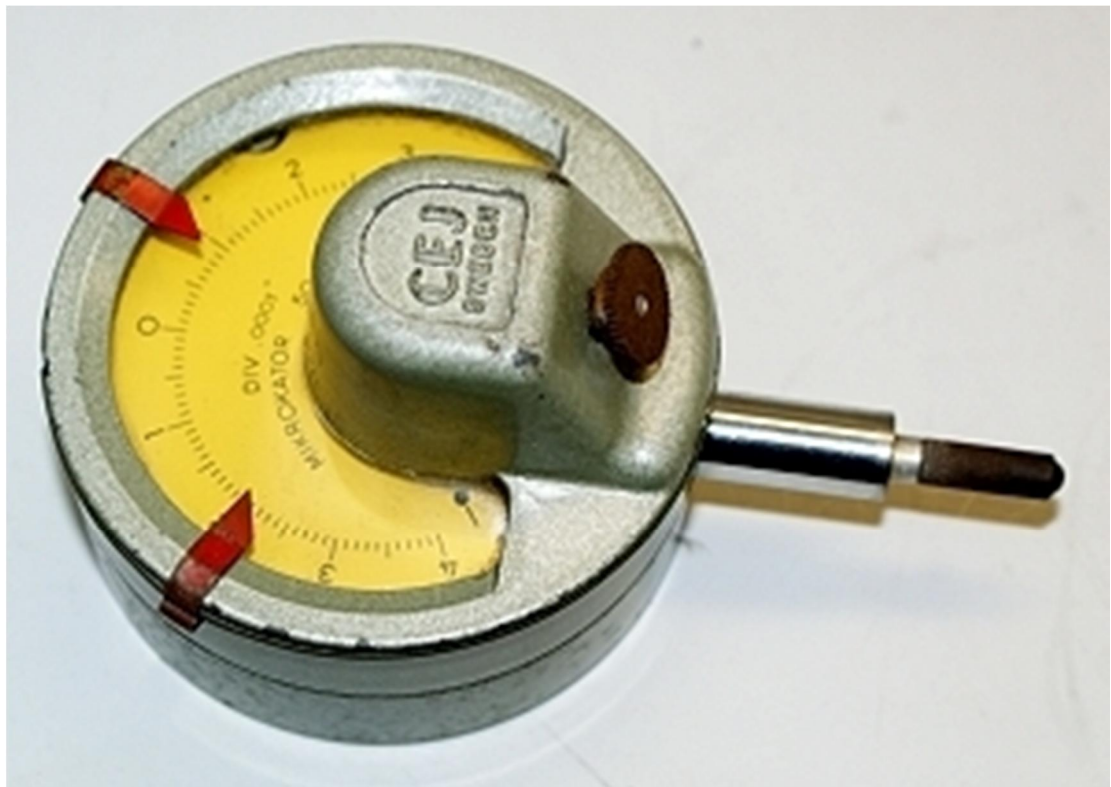


KUVIO 9. Keraaminen suorakulma

## 5.4 Mittakello

Mittakelloja on jaoteltu tarkkuuden mukaan sadasosa- ja tuhannesosa mittakelloiksi. Mittakellon laatua ei suoraan kuvaa desimaalien lukumäärä, vaan niiden rakenne. Mittakellon jalan jäykkyys, virhekäyrä, käännemitta ja pienet mittaussuoraukset ovat tärkeimpiä kriteereitä mittakelloa valitessa. (Andersson 1997, 190.)

Geometriamittauksissa poikkeaman numeraalinen arvo ei ole tärkeä, vaan poikkeamien havainnointi. Parhaimpia mittakelloja ovat mikrokaattorit, joiden rakenne on lähes kitkaton ja välyksetön. Asteikkoarvona voidaan lukea jopa  $0.1 \mu\text{m}$ :n poikkeamia. Kuviossa 10 on esitetty mikrokaattori, jossa mittakärkenä on rubiini.



KUVIO 10. Mikrokaattori

## 5.5 Tarkkuusvesivaaka

Työstökoneen asennusvaiheessa pyritään saamaan akselit kohtisuoraan maanpintaan nähden kokoonpanon helpottamiseksi. Vesivaaka'alta vaaditaan 5...10  $\mu\text{m}/\text{m}$  tarkkuutta. (SFS-ISO 230-1 1992, 83.) Mittauksessa on huomioitava lämpötilan vaikutus ja siksi mittaukset toistetaan vastaisessa järjestyksessä. Tarkkuusvesivaakaan paljain käsin koskeminen aiheuttaa mittausvirhettä lämpötilan johtumisen vuoksi. Kuviossa 11 olevassa vaa'assa libelli asteikon jakoväli on 0,02 mm/m. Mittalaitteessa on kalibrointia varten ruuvi, millä asteikon saa näyttämään oikein. Kalibrointi tehdään kääntämällä vesivaaka 180° tasonpäällä ja säädetään libelli asteikko näyttämään samaa.



KUVIO 11. Tarkkuusvesivaaka

Vesivaaka on käyttökelpoinen mittausväline, mikäli työstökoneen runko on maanpinnan kanssa suorassa. Työstökoneen perustukset saattavat painua jolloin maanpinnan mukainen kohtisuoruus menetetään. Työstökoneen akseleiden kohtisuoruus voidaan arvioida helpommin suorakulman avulla, kuin koko työstökoneen uudelleen vaaitus maanpinnan mukaan vaatisi tarkkuusvesivaaka'alla.

## 6 INTERPOLAATIOMITTAUS

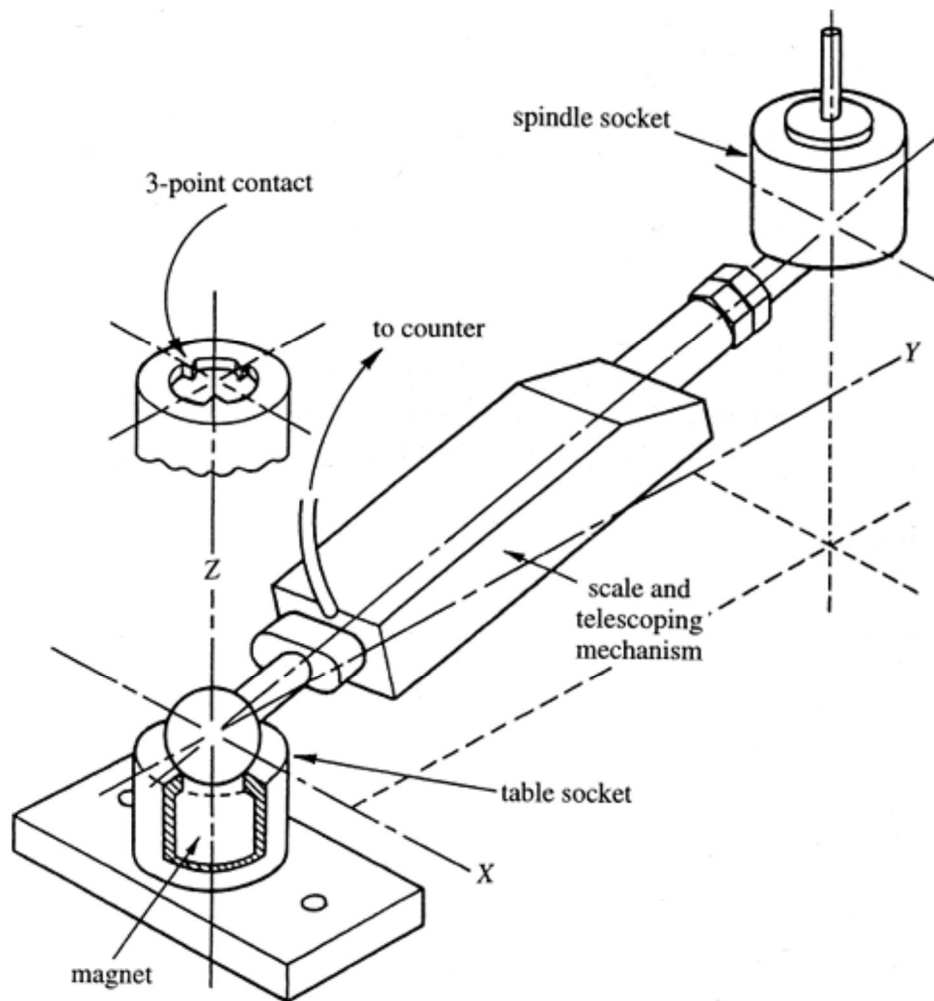
Ympyräkaarimittaus poikkeaa tavanomaisista mittauksista sen kahden liikeakselin yhtäaikaisen liikkeen vuoksi. Akseliliikkeiden paikoituspoikkeamien mittaaminen origoon nähden mahdollistaa koneen kunnon arvioinnin ja parametrisen säädön poikkeamille.

Ympyräkaarimittalaitteista yleisimmät ovat hilalevy- ja kaksoisnivelsauvamittauslaitteet. Mikko Hokkanen on diplomityössään Tampereen teknisessä korkeakoulussa tehnyt vertailututkimuksen työstökoneiden tarkastusmenetelmistä ja selvittänyt laitteiden keskinäisiä ominaisuuksia. Hilalevyssä on kosketukseton mittaus, mikä mahdollistaa nopeat ja vapaat akseliliikkeet. Mitta-alueen pieni koko ( $\varnothing$  140mm) rajoittaa laitteen käytettävyyttä. (Hokkanen 1999, 29.) Opinnäytetyössä käytettävä kaksoisnivelsauva on *Heidenhainin* valmistama ja mittaustuloksien analysointiin käytetään Tampereen teknisessä korkeakoulussa kehitettyä PolarCheckAnalysis-ohjelmistoa, joka perustuu standardin ISO 230-4 mukaisiin mittausmenetelmiin.

Kaksoisnivelsauva mittauksen perustajana pidetään Amerikkalaista James B. Bryania, joka haki U.S. patentin vuonna 1984 kaksoisnivelsauva englantilaiselle *Renishaw*-laitteistolle. Nykyiset kaksoisnivelsauvamittauslaitteistot perustuvat hänen keksintöönsä. (ASME n.d., achievement awards.) Saksalainen kaksoisnivelsauva valmistaja *Heidenhain* on tehnyt yhteistyötä japanilaisen professori A. Kakinon kanssa, jota pidetään mittaustuloksien analysoinnin ja virhemallien kehittäjänä. Nämä edellä esitetyt kaksi laitevalmistajaa ovat Euroopan tunnetuimmat kaksoisnivelsauvan valmistajat.

Kaksoisnivelsauvan mittaavana osana on teleskooppisauvan sisällä oleva tarkka mitta-anturi, joka lähettää mittapistekoordinaatit tietokoneelle. Teleskooppisauvan päissä on teräspallot, jotka mahdollistavat ympyrämäisen liikeradan. Työstökoneen pöytään ja karaan kiinnitetään magneettikupit, joiden ympäri teleskooppisauva liikkuu teräspallojen varassa. Magneettikupissa on kolmenpisteen kosketuspinnat hei-

tottomuuden varmistamiseksi. (Kakino, Ihara, Shinohara 1993, 11.) Kuviossa 12 on esitetty kaksoisnivelsauvalaitteiston rakennetta.



KUVIO 12. Kaksoisnivelsauvalaitteiston periaate (Kakino ym. 1993, 11).

Mittalaitetta valmistetaan myös langattoman tiedonsiirron ominaisuudella. Yhteys muodostetaan lähetin–vastaanotin parin avulla tietokoneeseen. Tämä yhteys mahdollistaa turvallisen mittauksen, koska mittauslaitteisto ei tarvitse olla suljetussa työstötilassa ja koneen turvalaitteita ei tarvitse kytkeä pois mittauksen ajaksi.

Mittaustuloksien analysointia varten on kehitetty erilaisia ohjelmia laitevalmistajan toimesta ja ohjelmakehittäjille on esimerkki lähdekoodeja Microsoft tuoteperheelle valmistajan kotisivulla. (DBB110 Ballbar by heidenhain 2011, products.)



## 6.1 Heidenhain-mittauslaitteisto

Kaksoisnivelsauvalla mitataan NC-ohjattujen työstökoneiden ympyräradan seuranta-  
virhettä. Mittalaitteita on 150, 200, 250 ja 300 mm:iin asti kalibroituna ja erottelu  
tarkkuus on 1  $\mu\text{m}$ . Akselien syöttönopeutena voidaan maksimissaan käyttää 10  
m/min. Laite mahdollistaa akseli liikkeen aikaisen mittauksen, rajoittavana tekijänä  
voidaan mitata ainoastaan ympyräkaarelta olevia paikkatietoja. (Measuring systems  
2002, DBB 110.)

Heidenhain nivelsauvamittauslaitteistolla kerätään ja tallennetaan staattista ja dy-  
naamista mittaustietoa. Mittaustieto analysoidaan PolarCheckAnalysis-ohjelmalla ja  
tallennetaan tietokantaohjelmaan. Tuloksia voidaan käyttää yksittäismittauksissa ja  
pitkäaikaisempien tarkkuutta heikentävien trendien havaitsemiseen. Kuviossa 13 on  
Heidenhain kaksoisnivelsauvamitta-anturi. Mitta-anturin teräskuula on työstökoneen  
pöydässä kolmpistekannattimen varassa ja toinen mitta-anturin pää on kiinnitetty  
työkalun tilalle.



KUVIO 13. Kaksoisnivelsauvamittalaite (Measuring systems 2002, DBB 110).

Kuviossa 13 esiintyvä lyhyt mitta-anturi mahdollistaa nopeat akseliliikkeet, sillä mittalaitteen paino rajoittaa nopeita kiihdytyksiä ja jarrutuksia. Akseliliike nopeuksien muutoksilla voidaan tutkia servomoottorien säätöjen oikeellisuutta ja mekaanisia poikkeamia työstökoneessa. Pitkät mitta-anturit ja hitaat liikkeet soveltuvat parhaiten geometria poikkeamien mittaamiseen tavanomaisten mittauksien tapaan.

Pasi Oksanen on tutkinut lisensiaattityössään kaksoisnivelsauvamittauksen ja laser-infernometrin sekä kivisuorakulman avulla poikkeamien keskinäisiä korrelaatioita. Vertailussa oli mukana 24 kpl koneita ja 72 kpl erilaista mittausta. Tutkimuksen mukaan kaksoisnivelsauvamittauksien tulokset vastaavat hyvin vertailumittauksia, ainoastaan suoruuspoikkeamassa ei pystytty toteamaan vastaavuutta. (Oksanen 1996, 24.)

Työstökoneen geometriamittaus pitäisi tehdä koneen käyntilämpöisenä heti tuotanto kappaleen jälkeen. Kaksoisnivelsauvamittaus voidaan suorittaa yhdelle tasolle noin tunnissa, tästä johtuen kaksoisnivelsauvamittaus soveltuu hyvin työstökoneen kunnan arvioimiseen sen nopean asetusajan vuoksi ja yksinkertaisten kiinnityslaitteiden vuoksi.

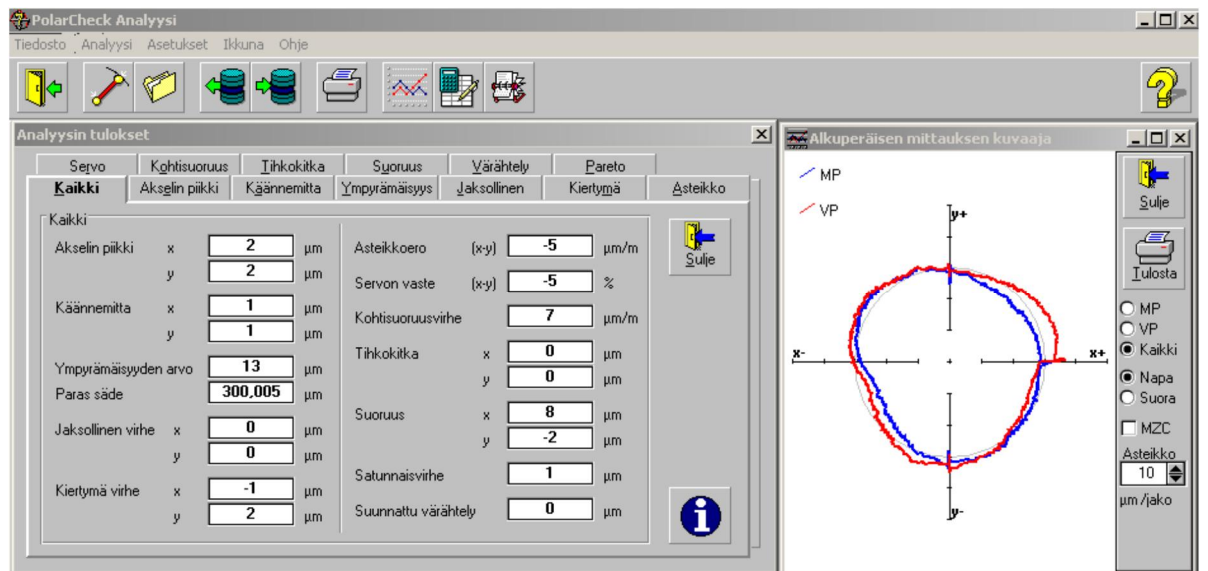
Kaksoisnivelsauva mittalaitteistoon on saatavana kalibrointialusta, joka mahdollistaa jäljitettävyyden kansainvälisiin mittanormaaleihin. Kalibroidulla mittalaitteella voidaan mitata paikoitustarkkuutta ympyräkaarelta ja jäljittää absoluuttinen paikoitusvirhe. Mittalaitteen 300 mm pituinen jatkokappale soveltuu koneiden geometria tarkastuksiin hitailla syöttönopeuksilla. Lyhyemmät jatkokappaleet soveltuvat parhaiten akselien nopeisiin liikkeisiin ja siten moottoriparametrien säätöön. (Oksanen 1997, 314.)

## 6.2 PolarCheck Analysis-ohjelma

Kaksoisnivelsauvamittauksessa käytettävä analyysiohjelma on kehitetty Tampereen tuotantotekniikan laitoksella. Jouni Hölsä on väitöskirjassaan esitellyt ohjelmassa käytetyt matemaattiset ratkaisut. Hän on kehittänyt ohjelman Tampereen teknisessä korkeakoulussa *Heidenhain* mittalaitteelle. (Hölsä 1999, 35-53.)

Ohjelmassa mallinnetaan tunnetuimpiin työstökoneissa ilmenneisiin poikkeamiin Kakinon matemaattisia ratkaisuja ja neliöllistä sovitusta. Ohjelman etsimät virhetyypit ovat teoreettisia ja virheitä tulkitaan yksittäisinä poikkeamina. (Hölsä 2011, sähköpostiviesti.)

Windows -perustaisen ohjelman käyttöliittymä on esitetty kuviossa 14. Ohjelmalla voidaan suorittaa ympyräkaarimittaus standardin ISO 230-4 mukaisesti. Mittauksen analysoidut tulokset esitetään sekä graafisesti että numeraalisesti.



KUVIO 14. PolarCheckAnalysis-ohjelma

Algoritmien toiminnallisuutta on testattu tietokonesimuloinnilla ja käytännön kokeilla laboratoriossa. Mittausepävarmuuden tuloksia on esitetty kuviossa 15 kaksoisnivelsauvamittauksen ja NAS 979 -koekappaleen välillä. Vertailussa käytettiin neljää eri työstökoneetta ja valmistettiin kuusitoista koekappaletta. Koekappaleet mitattiin CMM- koordinaattimittauskoneella. (Hölsä 1999, 68.)

*Table 13. Difference between DBB and test piece measurements*

Deviation type	Bias	Uncertainty	Unit
Squareness	1,7	10	arcsec
Scale mismatch	-2,4	72	$\mu\text{m}/\text{m}$
Scale error	76	170	$\mu\text{m}/\text{m}$
Backlash	-1,9	8,5	$\mu\text{m}$
Straightness	-4,2	23	$\mu\text{m}/\text{m}$
Servo mismatch	-0,24	1,18	$\mu\text{m}/\text{max}(\text{feed} [\text{mm}/\text{s}])$
Servo lag	-	-	$\mu\text{m}/\text{max}(\text{feed}^2/\text{radius})$
Cyclic error	0,29	1,5	$\mu\text{m}$
Axis spike	4,0	9,0	$\mu\text{m}$
Lateral play	-0,23	7,9	$\mu\text{m}$
Random error	-	-	$\mu\text{m}$
Tool compensation	-	-	$\mu\text{m}$

KUVIO 15. Mittausmenetelmäepävarmuus (Hölsä 1999, 68).

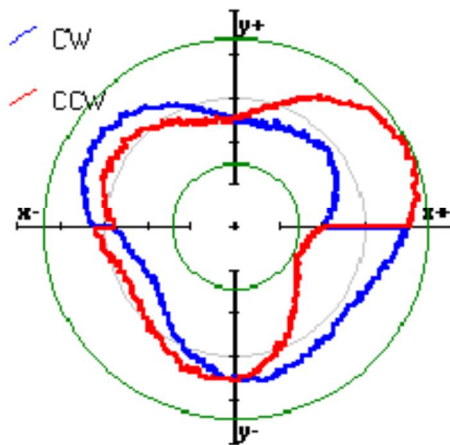
Testikappaleen käyttö mahdollistaa työstövoimien ja teräkompensaation vaikutuksen arvioinnin ja siten antaa luotettavamman tuloksen mittauksista. Kuvio 15 mukaan asteikkovirhepoikkeama on suuri ja kasvattaa epävarmuutta mittauksessa. Asteikkovirheeseen vaikuttaa lämpötilamuutokset kuularuuvissa. Mittaustuloksien perusteella voidaan olettaa, että mittausmenetelmät ja lämmön vaikutukset koneistuksessa sekä mitatessa kasvattavat mittausepävarmuutta merkitsevästi.

### 6.3 Työstökoneen kunto

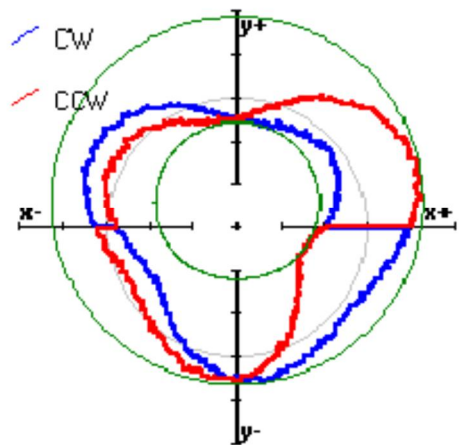
Työstökoneen tarkkuus muuttuu tehtyjen kappaleiden funktiona. Suurimmat poikkeamat geometriassa liittyvät kohtisuoruuksiin ja karan heittoihin. Dynaamisessa mittauksessa suurimmat poikkeamat ovat paikoitustarkkuuteen ja käännemittaan liittyviä. Kaksoisnivelsauva mittauksen avulla voidaan todeta nämä poikkeamat yhdellä mittauksella. (Andersson 1997, 308.)

PolarCheckAnalysis-ohjelman MZ-ympyrämäisyys menetelmä vastaa standardin SFS-ISO 4910 -geometriset toleranssit mukaista määritelmää. Ympyrämäisyys kuvaa työstökoneen yleiskuntoa, kuten kuviossa 16 on esitetty. Ympyrämäisyys on suurimman ja pienimmän poikkeaman välinen erotus. (Hölsä 1993, PolarCheck mittausohje.)

**LSC-ympyrämäisyys**



**MZC-ympyrämäisyys**



KUVIO 16. Ympyrämäisyys (PolarCheck mittausohje 1998, ympyrämäisyys).

Kaksoisnivelsauva mittauksen ympyrämäisyyden arvo määritellään mittalaitteen säteen mukaan. Ympyrämäisyyden ollessa alle 10  $\mu\text{m}$ :n työstökoneen tarkkuus on erittäin hyvä, arvot 15...20  $\mu\text{m}$ :ä ovat normaaleja. Ympyrämäisyyden arvon kohotessa yli 20  $\mu\text{m}$ :iin, koneen säädöt ovat tarpeelliset. Näitä esitettyjä arvoja voidaan pitää ohjeellisena, riippuen koneen käyttötarkoituksesta ja tarkkuudesta.

## 7 FMS-TYÖSTÖKESKUS

Kaksoisnivelsauvamittauskohteeksi valittiin FMS-työstökeskus, joka on vuonna 1996 valmistettu Tampereella Mercantile Fastemsin toimesta. Vaakakarainen työstökeskus on varustettu joustavalla paletinkäsittelyjärjestelmällä, joka mahdollistaa miehittämättömän ajon ympäri vuorokauden. Työstökeskuksen X-liikesuunnan pituus on 3240 mm ja pystyliikkeen 2240 mm.

Työstökeskukselle on suunniteltu modernisaatiota, missä leikkuunopeuksia on tarkoitus kasvattaa ja uusia ohjausjärjestelmä laskentatehon parantamiseksi. Perustuksien ja koneen rakenteellista laatua kuvaa 15 vuoden toiminta-aika.

Työstökeskuksella on valmistettu tuulivoimateollisuuden tarpeisiin vaihteistokoteloita, joiden ohjauspintojen viimeistelyssä käytetään interpolaatiotyöstöradan ohjelmointia. Ympyräkaaren halkaisijat vaihtelevat 1000 mm ylöspäin kotelon mallista riippuen. Kuviossa 17 on palettiasema viemässä FMS-työstökeskukselle kappaletta.



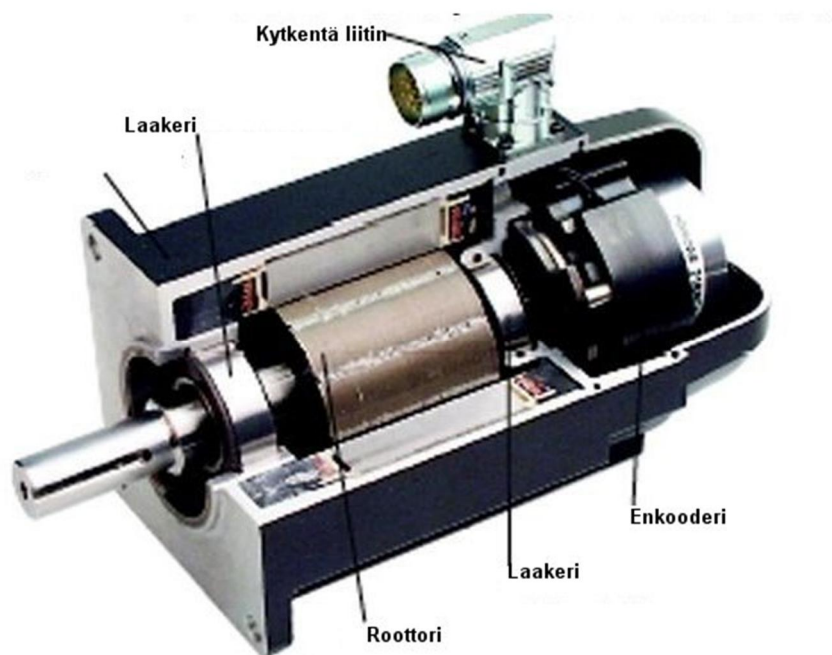
KUVIO 17. FMS-työstökoneet

## 7.1 Akselien toiminta

Työstökoneen liikeakselit toteuttavat halutun toiminnon servomoottorin pyörittäessä kuularuuvia, mistä liike johdetaan mutterin kautta palettipöytään. Paikoitustarkkuutta valvotaan servomoottorin sisällä olevalla paikoitusanturilla ja ulkoisella mittasauvalla. Liikeakselin sähköinen ohjaus on suljettusilmukka, missä haluttua liikekäskyä valvotaan ja korjataan tarvittaessa.

### 7.1.1 Moottori

Työstökoneen moottoria kutsutaan servomoottoriksi sen takaisinkytkennän vuoksi. Servomoottorin ankkurin asennon ja pyörintänopeuden seuranta mahdollistavat tehokkaan moottorin pyörimisen ja paikallaan pysymisen. Servomoottori sydän on keskomagneetti roottori, jota pyöritetään sen ympärille käämityllä staattorilla sähkövirran vaikutuksesta. Servomoottorin akseliin on kytketty enkooderi, kuten kuviossa 18 on esitetty. Moottorin nopeutta ohjataan taajuuden avulla ja momentti saadaan suurtaajuustehoyksiköiltä jännitepulsseja säätämällä.



KUVIO 18. Servomoottorin poikkileikkaus (Danaher motion 2011, AKM -series).

### 7.1.2 Ruuvi ja mutteri

Moottorin pyörivä liike muutetaan lineaariseksi kuularuuvin ja mutterin avulla. Kuviossa 19 on esitetty periaatekuva kuularuuvista.



KUVIO 19. Kuularuuvi (ISEL 2011, kuularuuviveto).

Kuularuuvin vaativin osa on mutterin ja ruuvin sovittaminen toisiinsa mahdollisimman tarkasti. Kuularuuvin nousu määrää kuulien koon mutterissa ja vaikuttaa samalla tarkkuuteen. Pienellä nousulla ruuvin kierros liikuttaa mutteria vähemmän eteenpäin ja mahdollistaa tarkemman paikoituksen.

Kuularuuvi asennetaan moottoriin kytkimen välityksellä, kuten kuviossa 19 ilmenee. Kuularuuvin tarkkuuden parantamiseksi kuularuuvi esijännitetään laakereitten vaaran taipumisen ja mittatarkkuuden parantamiseksi.



### 7.1.3 Paikoitusjärjestelmä

Mittaustuloksen tarkkuuden parantamiseksi käytetään kahta mittausjärjestelmää. Liikematkaa voidaan mitata pyörivällä enkooderilla tai lineaarisella mittasauvalla. Yleisin mittauslaite on mittasauva, kuten kuviossa 20 on esitetty. Mittasauva on kiinnitetty mahdollisimman lähelle liikkuvaa liikeakselia. Tällä kiinnityksellä eliminoidaan mahdolliset mekaaniset väljyydet. Lasisella asteikolla varustetun mittasauvan mittaustarkkuus on normaalisti 1  $\mu\text{m}$ . Tarkimmat mittasauvat heidenhainilla ovat 0.001  $\mu\text{m}$ :n paikoitustarkkuuksille ja tarkoitettu NANO-tekniikan työstökoneisiin. (Heidenhain 2008, yleisesite)



KUVIO 20. Heidenhain LC 100 mittasauva (Heidenhain 2008, yleisesite.)

Kuularuuviin kiinnitetty enkooderi mittaa pulsseja kierrosta kohti. Mittauksen epävarmuutta lisää vaihteistojen ja mekaanisten voimavälityksen joustot. Enkooderi on yleisesti käytetty pyörivissä liikkeissä, kuten karoissa ja pyöröpöydissä.

Mitta-antureita valmistetaan optisella tai magneettisella lukijalla varustettuna. Optisen mittasauvan ongelmana on asteikon likaantuminen ja toimintahäiriöiden lisääntyminen. Vaikeissa olosuhteissa käytetään magneettisia lukijoita, jotka saavat paikkatiedon johteiden sisälle upotetusta mitta-asteikolta. (Heidenhain 2008, yleisesite)

## 7.2 Koneparametrit

Työstökoneen ohjauksessa on jokaiselle akselille omat säätöparametrit. Koneen valmistaja on määritellyt parametrien arvon rakennusvaiheessa ja optimoinut parametrit sen hetkisen toiminnan mukaisesti. Sinumerik-ohjauksessa säätöparametrit ovat numeerisen ohjauksen (NC) ja logiikan (PLC) parametrejä. NC -parametrien tarkoitus on kertoa koneelle, miten käyttäjä haluaa työstökoneen toimivan ja PLC-parametrit antavat reunaehdot, kuinka on mahdollista toimia. Akseliparametrit Sinumerik 880 ohjauksessa on NCMD 200\* - 400\* alueella. Kertomerkki luvun jäljessä tarkoittaa käytettävissä olevaa akselia; X=0, Y=1, Z=2,.. riippuen valmistajan valinnasta. Koneohjaus mahdollistaa 24 eri akselin ohjauksen. (Installation instructions 1989, 394.) Esimerkiksi NC MD 1800\* määrittää näytön ja paikoitustarkkuuden resoluution. Paikoitustarkkuus voidaan asettaa taulukon 3 mukaisesti. Yleisin resoluutio on  $10^{-3}$  [mm] liikeakseleilla.

TAULUKKO 3. Koneparametri, NCMD 1800\*

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0	Näytön resoluutio	Paikoitus tarkkuus
0	0	0	0	0	0	0	0	$10^{-1}$	$0,5 \times 10^{-1}$
1	0	0	0	1	0	0	0	$10^{-2}$	$0,5 \times 10^{-2}$
0	1	0	0	0	1	0	0	$10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$
1	1	0	0	1	1	0	0	-	$2 \times 10^{-4}$
0	0	1	0	0	0	1	0	$10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$
1	0	1	0	1	0	1	0	$10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$

Kaksoisnivelsauvamittauksessa yleisemmin esiintyvät poikkeamat ja niiden parametrit ovat mittajärjestelmään ja moottorin optimointiin liittyviä.

Lämpötilakompensointi tulee olla säädetty oikein ennen parametrin säätöä. Lämpötilan muutoksista johtuvat poikkeamat kompensoidaan uudemmissa työstökoneissa automaattisesti. (Installation instructions 1989, 98.)

### 7.2.1 Lämpötila kompensointi

#### 272\* Parametri. "Drift compensation"

Lämpötilan vaikutus analogisissa virtapiireissä aiheuttaa säätöarvojen muuttumisen. Tämän seurauksesta moottorionjauksyksikön ja moottorin säätöarvot ovat virheelliset. Virheellinen ohjearvo ohjauksyksikössä aiheuttaa moottorin ryömimisen. (Installation instructions 1989, 243.)

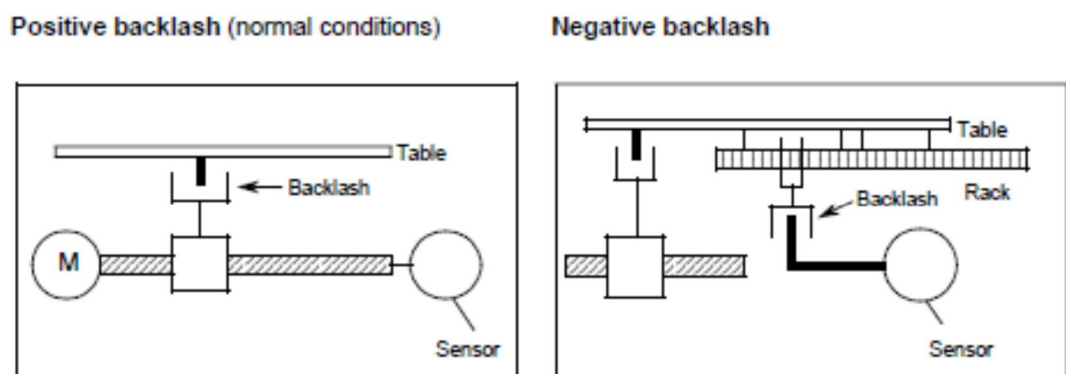
Tämän ryömimisen huomaa, kun akseliliike on pysäytetty ja ohjauksen seurantavirhe arvo ei ole nolla. Moottorin ryömiminen voi olla myötä- tai vastapäiväistä ja aiheuttaa tarkkuuden menetyksen lisäksi tarpeetonta osien kuumenemista.

Lämpötila kompensointi tarkastetaan ennen kaksoisnivelsauvamittausta ja tehdään liikeakselille, mikäli seurantavirhettä ilmenee.

### 7.2.2 Kääntöväljyys

#### 220\* Parametri "Backlash compensation"

Akselin mekaaninen väljyys ilmenee akseliliikkeen vaihtaessa liikesuuntaa. Mekaanista väljyyttä pöydän ja kuularuudin välillä ilmenee lämpötilamuutoksista ja paikallisena kulumisena työstöalueen kohdalla. Kuviossa 21 on esitetty kahden erilaisen mitaus tavan kääntöväljyyteen vaikuttavia tekijöitä.



KUVIO 21. Kääntöväljyys (installation instructions 1989, 232).

Positiivinen kääntöväljyys ilmenee akselliikkeen jättämänä. Paikoitusanturi valvoo moottorin paikoituksen valvontaa ja silloin mekaaninen väljyys tulee esille akselin jättämänä. Moottori voidaan kytkeä kuularuuviin kytkimen tai hinnan välityksellä, mikä lisää paikoitusepävarmuutta.

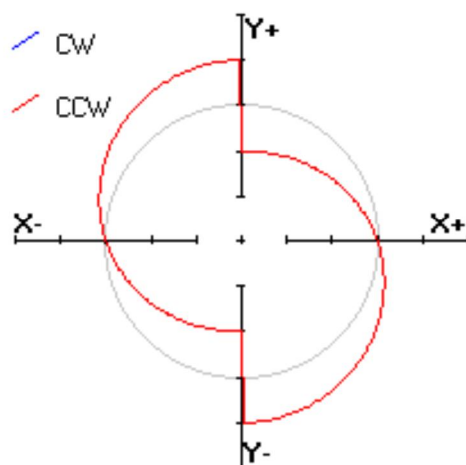
Negatiivisessa kääntövirheessä virhe muodostuu mittalaitteen ja pöydän välille. Mit-taustavalla saadaan poistettua monia mekaanisia virhetekijöitä pois.

Yleisemmin käytetään kahta mittalaittejärjestelmää paikoitustarkkuuden määrittele-miseen, missä ensimmäinen on moottorin sisäinen paikoitusanturi ja toinen mitta-sauva lineaariliikkeessä. Nämä mittausjärjestelmät yhdessä antavat luotettavan mit-ta-arvon, vaikka toinen mittajärjestelmä vaurioituisi.

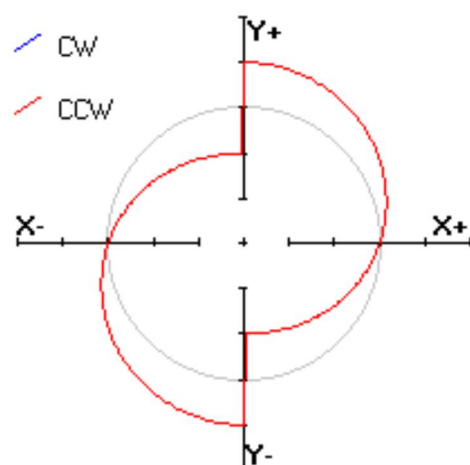
Kaksoisnivelsauvamittauksessa käännetmittavirheet näkyvät kuvaajassa kuvio 22 mu-kaisesti. Positiivinen käännetmitta kuvaa liian pientä kompensointia. Liikenopeuksien kasvattaminen mittauksia tehtäessä saattaa lisätä käännetmitan virhettä.

Negatiivinen käännetmitta näkyy hyppäyksenä akselin kohdalla sisäänpäin ja on merkki ylikompensoinnista Y-akselilla.

**Positiivinen käännetmitta**



**Negatiivinen käännetmitta**



KUVIO 22. Käännetmitta (PolarCheck mittausohje 1998, käännetmitta).

### 7.2.3 Moottorin vahvistus

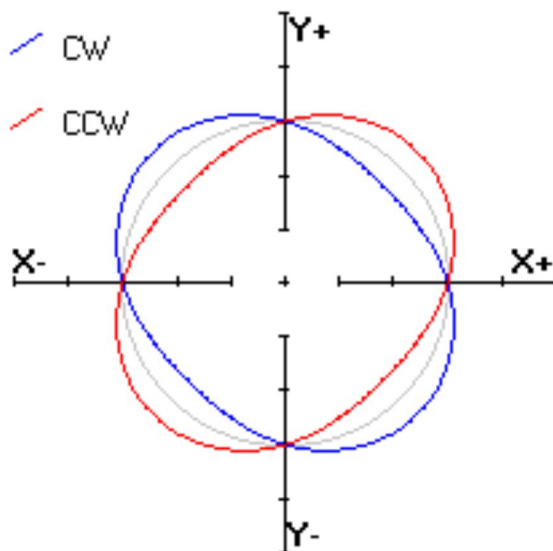
#### 252\* Parametri "Kv factor"

Moottorin momentti vaikuttaa akseliliikkeen seurantavirheen määrään. Vahvistusparametrilla säädetään moottoriohjausyksikön antotehoa. Tehon säätö vaikuttaa akseli-liikenopeuteen ja työstössä saatavissa olevaan voimaan. Työstävillä akseleilla moottorivahvistus täytyy olla yhdenmukainen, jotta sama akselinopeus saavutettaisiin. (installation instructions 1989, 238.)

Vahvistusparametrin virheellisen arvon voi havaita kahden akselin yhtäaikaisesta liikettä seurattaessa samalla nopeudella. Näin liikerata on 45 ° kaltevuuskulmassa. Liik-kuvien akseleiden jättämä täytyy olla sama molempiin liikesuuntiin.

Kaksoisnivelsauvamittauksen servovastevirhe ilmenee kuvaajan kallistumisena, joka mittaussuunnan vaihtuessa kallistuu erisuuntaan, kuten kuviossa 23 ilmenee. Kaksoisnivelsauvamittaus tehdään kahteen suuntaan, jotta kohtisuoruusvirhe voidaan eliminoida servovasteesta. (PolarCheck mittausohje 1998, servojen vaste.)

#### Servojen vaste



KUVIO 23. Servovaste (PolarCheck mittausohje 1998, servojen vaste).

### 7.2.4 Asteikkovirhe

364\*...368\* Parametrit.

Asteikkovirhe on säännöllinen virhe, mihin vaikuttaa koneen mittaavan anturin valinta ja NC MD 1800\* arvo. Parametrit 364\* ja 368\* on syytä tarkistaa, jotta koneen asetusten säätö saadaan toteutettua oikein. Asteikkovirhe ilmenee dynaamisessa mittauksessa ja paikoitusvirheen säätö tehdään kuularuuvien kompensoinnin avulla. Asteikkoparametrien arvot lasketaan alla olevan kaavan mukaisesti. (Installation instructions 1989, 257.)

$$\text{NC MD 368}^* = S/b$$

$$\text{NC MD 364}^* = p \cdot 4$$

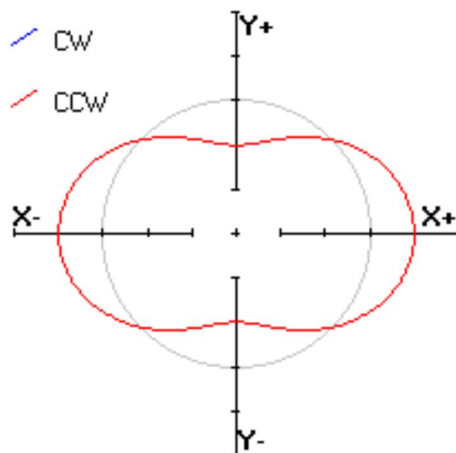
missä  $S$  = kuularuuvien nousu (akseliliikematka / kierros)

$b$  = paikoitustarkkuus (MD 1800\*)

$p$  = pulssia kierrosta kohti (anturi)

Kaksoisnivelsauva mittaa asteikkojen suhteellisen eron toisiinsa nähden. Kalibroidulla nivelsauvalla voidaan staattisella mittauksella analysoida paikoitustarkkuus ympyräkaarelta mitatulta matkalta. Kuviossa 24 on esitetty, kuinka asteikkoero ilmenee poikkeamana optimaalisesta ympyräkaaren radasta.

#### Asteikkoero



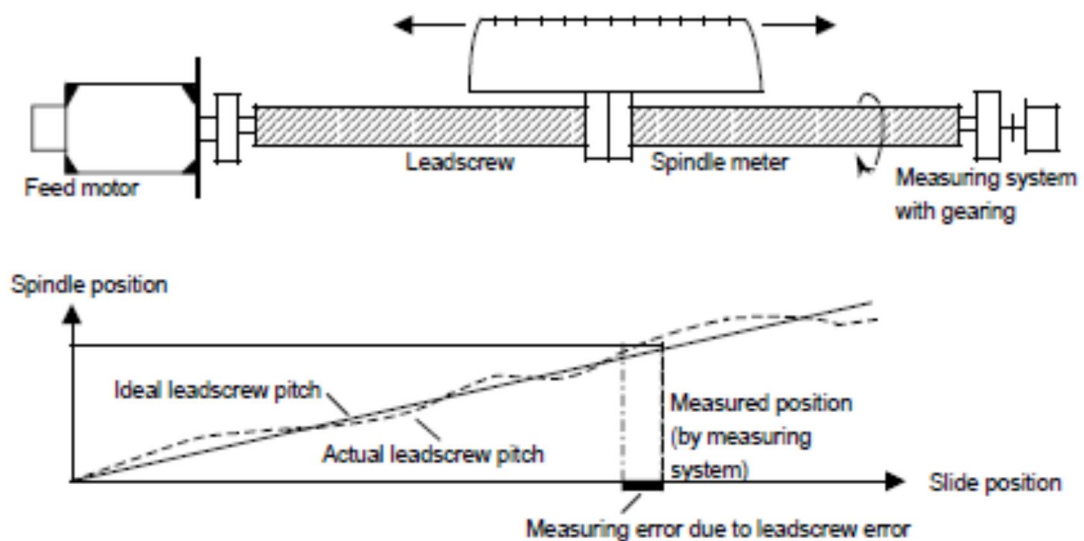
KUVIO 24. Asteikkovirhe (PolarCheck mittausohje 1998, asteikkoero).

### 7.2.5 Kuularuuvin kompensointi

Kuularuuvin kulumis- ja taipuma virheitä kompensoidaan paikoitustarkkuus mittauksen perusteella. Poikkeamat kuularuuvissa voivat olla positiiviseen tai negatiiviseen suuntaan, kuten kuviossa 25 paikoitustarkkuuden mittauskäyrässä on esitetty.

Kuularuuvin kompensoinnissa otetaan huomioon seuraavat parametrit. (Installation instructions 1989, 502-509.)

- 316\* (Kompensointisuunta +)
- 320\* (Kompensointisuunta -)
- 324\* (kompensointi pisteiden välimatka)
- 328\* (kompensointi arvo)
- 6000- 6999 (kuularuuvin virhe arvo)



KUVIO 25. Kuularuuvin kompensointi (installation instruction 1989, 502).

Paikoitusvirheen kompensointi tehdään laser-interferometrimittauksien perusteella. Kaksoisnivelsauvamittaus mahdollistaa lyhyet akseliliikkeiden kompensoinnin. Rajoittavana tekijänä on mittalaitteen 300 mm maksimi säde, koska mittaustulokset luetaan ympyräkaarelta.

## 8 MITTAUS TYÖSTÖKESKUKSELLE

### 8.1 Valmistelu mittaukseen

Kaksoisnivelsauvamittausten tarve tulee joko laadunvarmistukselta tai konerikon jälkeisenä korjaustoimenpiteen tarkastuspyyntönä. Opinnäytetyön kaksoisnivelsauvamittauksen selvittämispyyntö tuli laadunvarmistukselta. Lähtökohtatilanteessa oli mittahuoneen Leitz-mittauskoneen tuloksien perusteella työstökoneen ympyrä-  
mäisyys XY-tasossa toleranssin rajoilla ja ZY-tasossa yhdensuuntaisuusvirhettä oli 0,1 mm/m. (ks. Liite 1.)

Koneen geometriatarkastukset päätettiin tehdä ensin tavanomaisin mittausmenetelmin. Kun mittaukset oli tehty ja korjaavia toimenpiteitä suunniteltu, niin sillä aikaa oli mahdollista tehdä kaksoisnivelsauvamittaus. Mittauksia tehtiin vain kahteen tasoon. XY-taso otettiin mukaan kappaleessa huomattujen ympyrä-  
mäisyyspoikkeamien vuoksi ja ZY-taso mitattiin huomattujen kohtisuoruspoikkeamien vuoksi.

Lähtökohtana oli verrata tavanomaisten mittauksien ja kaksoisnivelsauvamittauksen mittautuloksia ja mahdollisten mekaanisten toimenpiteiden jälkeen parametroida työstökone mahdollisimman tarkaksi. Mittausten tavoitteena oli tuottaa uutta tietoa kohtisuoruspoikkeamien tulkintaa varten. Tuotannossa olevaa työstökoneetta ei ole järkevää mekaanisesti poikkeuttaa kohtisuoruslinjoista ja tulevassa mittauksessa oli odotettua, että koneen geometriassa olisi poikkeamia.

Tavanomaiset mittaukset tehtiin tarkkuusvesivaa'an ja kivisuorakulman avulla. työstökoneesta tarkastettaisiin karan kohtisuorus pöytään nähden tarkkuusvesivaa'alla, XY- ja ZY -taso tarkastettiin kivisuorakulmalla ja tuhannesosamittakellolla.

Tavanomaisten mittauksien tuloksista tehtiin mittauspöytäkirja, joka tallennettiin standardin ISO 9001 mukaisesti. Suunniteltujen korjaavien toimenpiteiden jälkeen tehtiin tarkastavat mittaukset tavanomaisin menetelmin sekä kaksoisnivelsauvamittauksen avulla.

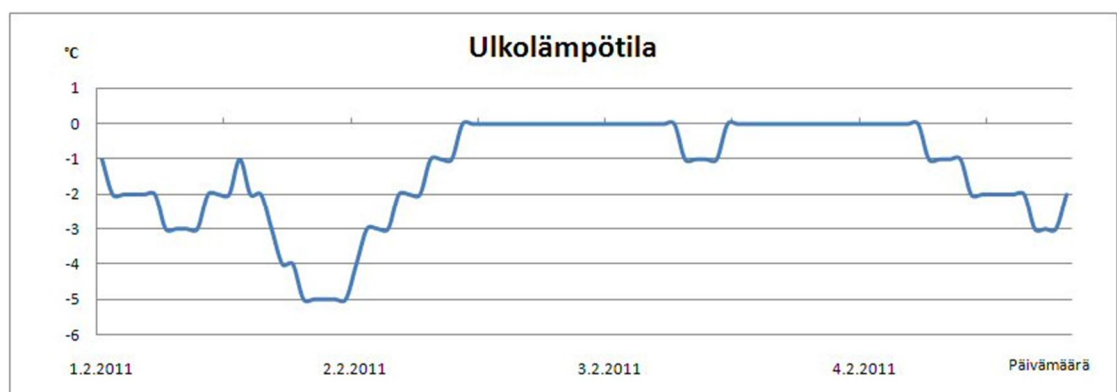


## 8.2 Toteutus

### 8.2.1 Mittausolosuhteiden vakiinnuttaminen

Mittaus pyrittiin tekemään mahdollisimman samankaltaisissa oloissa kuin tuotantokappaleen valmistus kyseisellä työstökoneella. Lämpötila on merkittävä tekijä mittatuloksiin. Tuotantotilan ovet pidettiin kiinni mittauksen aikana lämpövaihteluiden eliminoimiseksi. Mittauskorkeudeksi Y-akselilla valittiin tuotantokappaleen 0-piste, joka vastaa koneen normaalia työstökorkeutta hyvin. Tällä Y-akselin korkeudella työstökoneen kuluminen on ollut voimakkainta johteiden ja kuularuuvien osalta. Liikenopeudeksi valittiin 800 mm/min, koska tuotantokappaleen ohjauspinnan viimeistelyssä käytetään samaa syöttönopeutta.

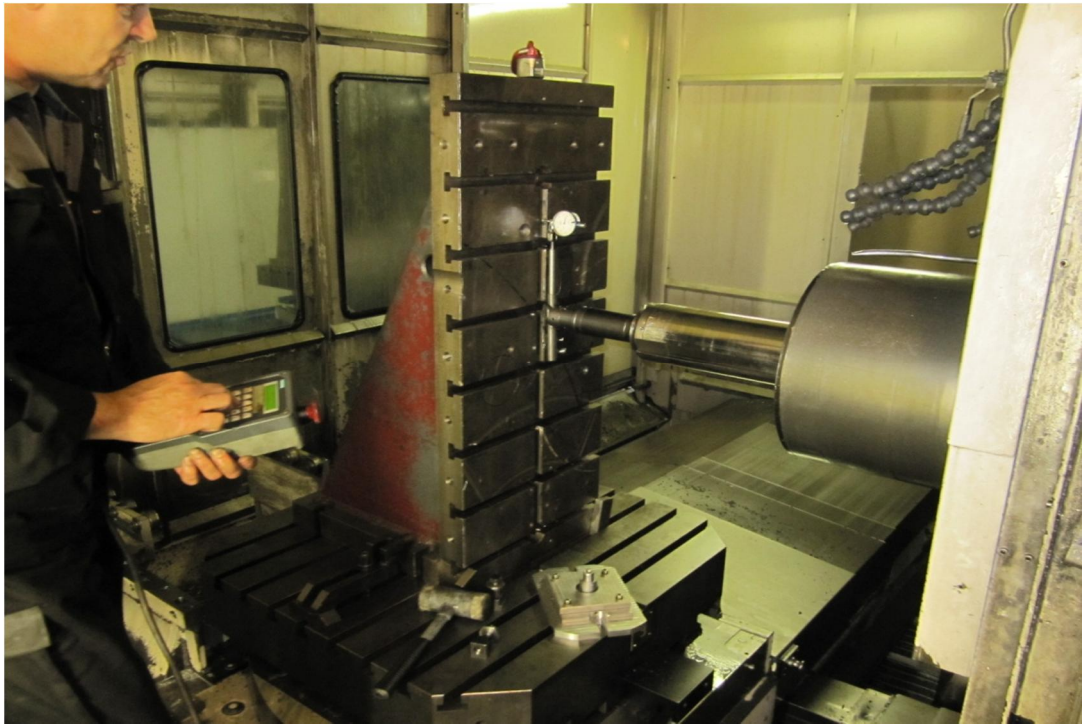
Työstökone pidettiin tuotannossa yön yli, koska haluttiin lämpötilojen olevan samantaiset kuin tuotantotilanteessa. Hallin lämpötilassa ei huomattu poikkeavuuksia edellisen 24 h:n aikana. Varsinaisia mittauksia ei tehty, vaan lämpötila tarkastettiin kiinteistövalvonnan tietokoneelta. Lämpötila oli vakiintunut + 20 °C:seen. Ulkolämpötila oli mittausajankohtana 3.2.2011 kuvion 26 mukaisesti lähellä nollaa.



KUVIO 26. Ulkolämpötila mittausajankohtana

### 8.2.2 Kiinnittimet

Työstökeskuksessa on kappaleen vaihtoa varten FMS- järjestelmä, joka mahdollisti mittalaitteiston esiasettelun jo edeltävänä päivänä. Paletille asennettiin kulmahylly, joka linjattiin kohtisuoraan akseliliikkeisiin nähden sadasosamittakellolla, kuten kuviossa 27 on esitetty. Kulmahyllyyn kiinnitettiin *Heidehain* -mittalaitteiston magneettikuppi jalustan välityksellä kahdella kiinnittimellä. Magneettikupin jalustan kiinnityksen suoruus ei ole merkittävä mittaustuloksien poikkeamissa, mutta nollapisteasetuksien teko helpottuu, koska asetusten aikana karan etäisyyteen ei tarvitse tehdä muutoksia.



KUVIO 27. Kulmahyllyn asetus

Kuviossa 27 näkyy palettipöydän päällä magneettikupin kiinnitysalusta ja kiinnityspultit. Kulmahyllyn pinnan tasomaisuus varmistettiin hiomakivellä hioen, jotta kiinnityksessä ei tulisi muodonmuutoksia kiinnitysalustaan.

Työstökoneen karalle kiinnitettävän magneettikupin paikallaan pysymisen varmistamiseksi kara lukittiin pyörimisen estämiseksi. Magneettikupin kiinnityksen tulee kestää mittauslaitteiston massasta johtuvat taipumat. Kuviossa 28 on esitetty mittauksessa käytetty kiinnitysmenetelmä. Karan lukitus pyörimisen estämiseksi oli varmistettu pultilla kiristetyllä kiinnitysraudalla.

Magneettikuppi voidaan kiinnittää suoraan työkalussa olevaan 16 mm:n tappijyrsimen tilalle, mikäli akselin liikerata ei ole estynyt törmäysvaaran takia. Tämä kiinnitystapa on luotettava XY- tasossa tehtävälle mittaukselle. Mittauksia tehtiin kuitenkin kahdelle tasolle ja siksi valittiin kiinnitysmenetelmä, joka mahdollisti sekä XY- ja ZY- tasossa tehtävät mittaukset. Työstökoneen karalle valmistettu mittakellonjalka mahdollisti mittauksen näihin kahteen tasoon samalla kiinnityksellä.



KUVIO 28. XY-tason asetus

### 8.2.3 Karan asemointi

Mittalaitteelle tehtävä 0-pisteen määrittely tehdään käsin ajamalla kaikki liikeakselit niin, että mittalaitteen teräspallo on kahden magneettikupin välissä luotettavasti. Tämä asemointi tulisi tehdä  $\pm 0,5$  mm:n tarkkuudella. Sopiva tiukkuus saavutetaan, kun kuviossa 29 näkyvä teräspallon jalka kääntyy alaspäin oman massansa voimalla kiinnitysmagneettien välissä.



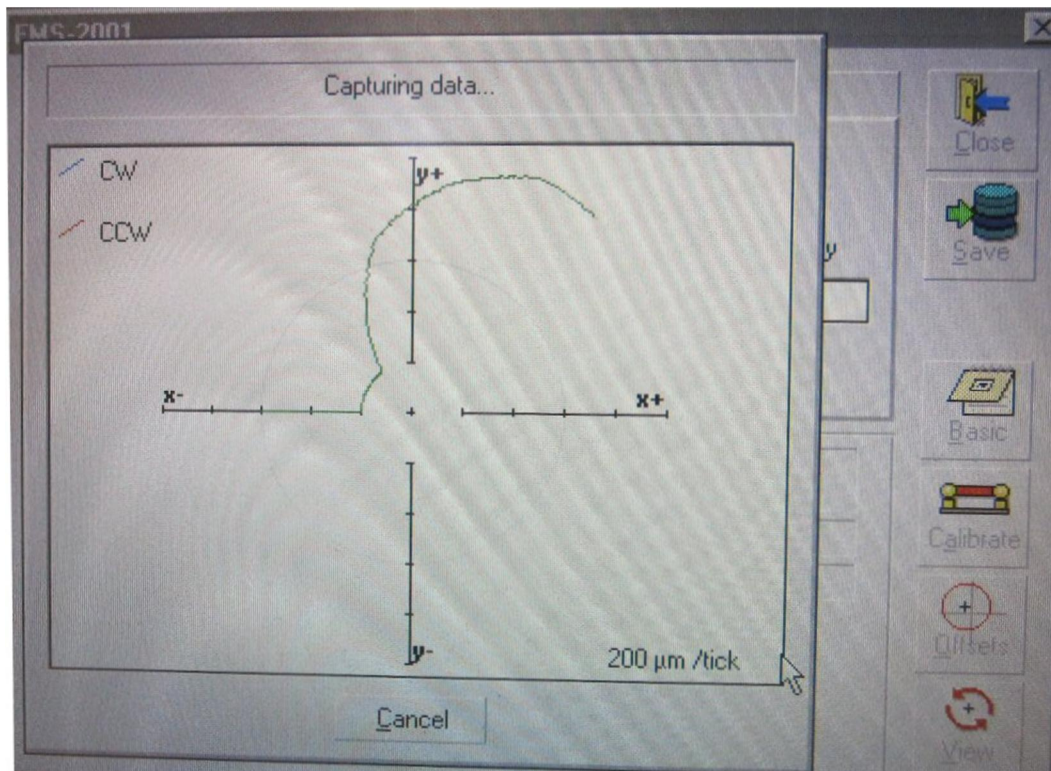
KUVIO 29. ZY-tason asetus

Nollapisteen hienosäätö tehtiin mittausanturin ollessa kiinni magneettikupien välissä ja ohjelmalla ajettiin ympyräkaarta. Ohjelma pysäytettiin X-akselin ollessa muuttamassa liikesuuntaa ja luettiin Y-akselin mittausanturin ilmoittama paikoitus. Kun mittatiedot ovat yhtenevät, voidaan varmistua nollapisteen olevan oikein asetettu.

### 8.2.4 Ongelmat

Palettipöydälle tehtävän asetuksen tarkoitus oli nopeuttaa mittauksen suorittamista, mutta karan orientointi ei onnistunut samalle paikalle riittävän tarkasti.

Mittauksen alussa tarkistettiin koneen nollapistet ja säädettiin ne uudelleen. PolarCheckAnalysis-ohjelma laskee ohjelmallisesti nollapisteen siirron. Olisi voitu hyväksyä  $\pm 500 \mu\text{m}$ :n tarkkuus kiinnitykselle. Tavoitteena oli tehdä mittauksesta mahdollisimman tarkka, joten nollapiste tarkastettiin uudelleen.



KUVIO 30. Paikoitusvirhe kaksoisnivelsauvamittaus

Kaksoisnivelsauvamitta-anturin liikerata mahdollistaa seurantavirhettä  $\pm 5 \text{ mm}$ , mutta PolarCheckAnalysis-ohjelmisto ei kykene mittaamaan kuin  $0,5 \text{ mm}$ :n suuria poikkeamia ympyräkaarelta. Kuviossa 30 näkyy X-akselin  $400 \mu\text{m}$ :n paikoitusvirhe, joka aiheuttaa mittausasteikon ylityksen ohjelmistossa.

### 8.3 Referenssimittaus

Kaksoisnivelsauvamittauksia toistettiin XY- ja YZ- tasossa neljä kertaa. Mittalaite irrotettiin, referoitiin ja tehtiin uusi mittaus. Työstökoneen asetuksiin ei tehty muutoksia. Tarkoituksena oli vähentää satunnaisten virheiden vaikutusta. Tavoitteena oli saada työstökoneen satunnaiset poikkeamat mahdollisimman vähäisiksi, jotta tuotannolle saataisiin suurempi toimintatoleranssi.

#### Mittaus, XY-taso

Kaksoisnivelsauvamittauksien perusteella ympyrämäisyyden arvo vastaa tuotantokappaleesta koordinaattimittakoneella mitattua arvoa hyvin. Ympyrämäisyyden suuri MZC -poikkeama vaatisi työstökeskuksen säätöä, koska tuotannon toleranssi-vaatimukset ovat samat kuin mitattu poikkeama. Liitteessä 2 on esitetty XY-tason merkittävimmät poikkeamat kaksoisnivelsauvamittauksen mukaan.

#### Mittaus, YZ-taso

Mittaushuoneen tuloksien mukaan tiedettiin yhdensuuntaisuuden olevan  $100 \mu\text{m}/\text{m}$  virheellinen. Kaksoisnivelsauvamittauksen perusteella poikkeaman suunta oli oikea, mutta kohtisuoruusarvo oli virheellinen. Suuren servovasteen vuoksi tulokseen ei voitu luottaa. Liitteessä 3 on esitetty YZ-tason merkittävimmät poikkeamat.

#### Virhelähteet

Mitatuista arvoista laskettiin mittaustuloksien keskiarvo ja keskihajonta Excel-taulukkolaskentaohjelmalla liitteen 4 mukaisesti. Keskihajonta kuvaa mittausmenetelmän ja laitteiston tasalaatuisuutta. Keskihajonnan arvoksi saatiin  $3 \mu\text{m}$ , minkä perusteella mittausmenetelmää voidaan pitää erinomaisena. Edellisten referenssimittauksien perusteella kääntöväljyyden- ja lämpötilakompensoinnin säädölle ei ollut tarvetta.

## 9 SÄÄTÖTOIMET

### 9.1 Perinteiset säätötoimet

Työstökoneen geometria säädettiin perinteisillä menetelmillä käyttämällä kivisuorakulmaa ja tuhannesosamittakelloa. Säädöt tehtiin mahdollisimman tarkasti, jotta kohtisuoruusvirheiden mahdollisuus voitaisiin eliminoida kaksoisnivelsauvamittauksesta. Saavutetut kohtisuoruustarkkuudet tavanomaisten säätöjen jälkeen:

- XY-Taso  $\pm 0 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$
- YZ-Taso  $+5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}/\text{m}$

YZ-taso säädettiin tarkoituksellisesti yläpäästä pöytään päin kallelleen työstövoimien kompensoimiseksi. Tavanomaisten säätöjen jälkeen työstökeskuksen kohtisuoruudet olivat erinomaisessa kunnossa eikä kohtisuoruusvirhettä ollut.

### 9.2 Tarkastusmittaus, XY-taso

Kaksoisnivelsauvamittauksen tulosten perusteella asteikkovirhe pieneni. Asteikkovirhe muuttui lähes samaksi molemmilla akseleilla, jolloin akselit kulkevat ympyräkaarella halutun radan mukaisesti. Parametrisille säädöille asteikkovirheen kompensoimiseksi ei ollut tarvetta. Tehtyjen säätöjen vaikutus korjasi ympyrämäisyyden  $10 \mu\text{m}$ :iin, jota voidaan pitää erinomaisena. Liitteestä 5 voi havaita tavanomaisten säätöjen vaikutuksen ympyrämäisyyteen.

Asteikkovirheen oikeellisuutta tarkasteltiin myös tuotantokappaleen sokkareikien mittaustuloksien perusteella. Liitteessä 6 on mittauspöytäkirja akseleiden paikoitus-tarkkuudesta. X-akselin suunnassa paikoitustarkkuus on ollut hyvä, eli asteikkovirheen mahdollisuus voidaan sulkea pois. Y-akselin suunnassa paikoitus on jäänyt vaajaaksi, mikä kumoaa kaksoisnivelsauvamittauksen arvon positiivisesta asteikkovirheestä.

Näiden tuloksien perusteella parametrisiä säätöjä ei tehty, vaan odotettiin tuotantokappaleen mittaustuloksien vahvistavan työstökoneen säätöjen oikeellisuuden.

### 9.2.1 Koordinaattimittaus

Mittahuoneen koordinaattimittaustulokset tuotantokappaleesta kumosivat odotukset säätöjen oikeellisuudesta. Mittaustuloksen mukaan ympyräkaaren muotoon oli tullut lisää poikkeamia. (ks. Liite 7.) Samoin ympyrämäisyys huonontui. Nämä poikkeamat eivät näkyneet kaksoisnivelsauvamittauksen aikaisemmassa mittauksessa.

Toistettaessa kaksoisnivelsauvamittausta huomattiin mittaustuloksen olevan lähes sama kuin aloittaessa (ks. Liite 8.) Kaksoisnivelsauvamittaustuloksien virheellisyys perinteisten säätöjen muutoksista jäi selvittämättä. Tuloksen virheellisyyteen voi vaikuttaa esimerkiksi työstövoimien puuttuminen, mikä näkyy akseliliikkeessä satunnaisena poikkeamana. Poikkeaman korjaaminen vaatisi Y-akselin johdekiilojen ja keventimen mekaanista korjaamista.

Työstömenetelmänä kappale työstetään vastapäivään toteutetulla interpolaatio-työstöllä, joten Y-akselin servovahvistusta lisättiin. Sädöllä on tarkoitus kääntää ympyräradan muotoa myötäpäivään kallelleen. Tämä kompensoisi vastapäivään toteutettavan interpolaatoradan työstönvoimia. Koska asteikkovirhe ja kohtisuoruuspoikkeamat oli pois suljettu edellisten koordinaattimittauksen perusteella, poikeutettiin servon jättämän avulla ympyräkaaren muotoa liitteen 9 mukaisesti.

### 9.2.2 Saavutettu tulos

Y-akselin vahvistuksen lisäyksellä saavutettiin tuotantokappaleeseen ympyrämäisyydessä 21  $\mu\text{m}$  tarkkuuden, mitä voidaan pitää hyvänä. (valmistustoleranssi oli 30  $\mu\text{m}$ .) Samoin radan muoto parani pyöreämmäksi. Y-akselin asteikkovirhettä ei ole ja X-akselissa se on n.15  $\mu\text{m}$ . (ks. Liite 10.)

Kaksoisnivelsauvamittauksen avulla voi kuvaajasta toteamaan muutoksien suunnan ja suuruuden. Poikkeamien numeraalinen arvo ei vastannut todellisuutta.



## 9.3 Tarkastusmittaus, YZ-taso

### 9.3.1 Kaksoisnivelsauvamittaus

Referenssimittauksen yhteydessä havaittiin servon jättämän, asteikkovirheen ja kohtisuoruuden olevan suurimpina poikkeamina YZ-tasossa. Nämä virheet yhdessä aiheuttivat tulkintavirheen PolarCheckAnalysis -ohjelmalle. Servon jättämän ollessa yli 900 % asteikkovirheen ja kohtisuoruuden osuus on merkityksetön kokonaisvirheeseen nähden. Perinteisten säätöjen jälkeen kohtisuoruusvirhe oli kääntynyt väärään suuntaan, kuten liitteestä 11 voi havaita.

Kompensoitaessa suurimman poikkeaman, eli servon jättämän pois, virheen pienentyessä myös kohtisuoruusvirhearvo muuttui. Mittauksien perusteella ei saatu tiedettyyn kohtisuoruusarvoon yhteneväisyyttä. Servon jättämän aiheuttama ympyrämäisyyden virhettä säädettiin ja ympyrämäisyys parani hyvälle tasolle (ks. Liite 12.)

### 9.3.2 Saavutettu tulos

Kaksoisnivelsauvamittauksen avulla voitiin todeta servon vasteen vaikutusta ja kompensoimaan sitä. Mittaustulosta tulkitessa on tärkeää saada suurin poikkeama eliminoitu, koska virheet ovat monien tekijöiden summia. Suurimman poikkeaman eliminointi vaikuttaa myös analysointiohjelman tulokseen muissa tunnetuissa poikkeamissa.

Kohtisuoruuspoikkeamien todentamiseen mittaustulokset eivät olleet luotettavia. Kohtisuoruusvirheen arvot muuttuivat eri mittauskertojen välillä ilman tavanomaisen säädön tekemistä.

Mittaustuloksen ympyrämäisyyden MZC-arvon saatiin työstökoneen käyttötarkoituksen mukaiseen kuntoon. YZ-tasoa voidaan tarvittaessa käyttää työstettävänä tasona. Säädöillä saatiin kompensoitua servovasteen virhe lähes pois, millä saavutettiin 26  $\mu\text{m}$ :n ympyrämäisyys, mitä voidaan pitää riittävänä kyseiselle akselille

## 9.4 Asteikkovirhe

Kuularuuvien valmistustarkkuus aiheuttaa mittapoikkeaman paikoitustarkkuudessa. Samoin kuluminen ja lämpötilamuutokset lisäävät kompensointitarvetta. Poikkeaman virhettä korjataan kuularuuvien kompensoinnilla. Paikoitustarkkuus ilmenee akseliliikkeen ollessa pysähdyksissä. Interpolaatiotyöstössä asteikkovirhe ilmenee parhaiten reikäpiirityökierossa. (ks. Liite 13.)

Asteikkovirhe ja servonvaste antavat samanlaisen kuvaajan kaksoisnivelsauvamittauksessa. Mitattaessa myötä- ja vastapäivään voidaan todeta, kummasta poikkeamasta on kyse. Asteikkovirheessä kuvaajat ovat päällekkäin, kuten kuviossa 24 sivulla 43 on esitetty.

Työstökoneen käyttäjä voi kompensoida virheen työstöohjelmaan, siksi ennen asteikkovirheen määrittämistä on tärkeä huomioida kyseiset korjaukset työstöohjelmassa. Ohjelman korjauksilla saadaan työstökone paikoittamaan haluttuun sijaintiin, mutta silti ympyräkaari ja erilaiset muodot työstöradalla eivät toteudu oikein.

Liitteessä 14 esitetty poikkeamamittaus on esimerkki asteikkovirheestä, ja kaksoisnivelsauvamittauksen graafinen kuvaaja liitteessä 15 on yhtenevä koordinaattimittaus koneen mittaustuloksen kanssa. Kaksoisnivelsauvamittaus määrittelee lähes koko virheen Y-akselille, muita huomioitavia virheitä ei voida havaita kaksoisnivelsauvamittauksessa.

Asteikkovirhettä analysoidessa graafinen kuvaaja on paras tuloksia analysoinnissa, kuten liitteessä 15 voi havaita. Liitteen 15 mukaan X-akseli on kulkenut liian suuren liikematkan ja Y-akseli on jäänyt vajaaksi liikematkaltaan. Kuvaajasta arvioiden virheen määrä on n. 20  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Tuotantokappaleen reikäpiirimittauksista (ks. Liite 12.) ei pystytty tulkitsemaan asteikkovirheen suuntaa eikä määrää tarkasti. Luotimme kaksoisnivelsauvamittauksen tulokseen ja tehdä säädöt kuvaajan muotoa tarkkaillen.

Työstökoneen parametreista (TEA1) havaittiin, että X-akselille oli määritetty 64 kompensointiopistetta 24 mm:n kompensointivälillä. Kompensointia oli tehty +16  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Muutos kohdistettiin suoraan kompensointiarvoon 2  $\mu\text{m}$  ja se puolitettiin. Muutoksen arvioitiin korjaavan asteikkovirhettä 8  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Y-akselille oli määritetty 84 kompensointiopistetta 32 mm:n kompensointivälillä. Kompensointia oli tehty 36  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Kompensointi arvona oli 2  $\mu\text{m}$  ja se muutettiin 3  $\mu\text{m}$  arvoon. Muutoksen arvioitiin korjaavan asteikkovirhettä 18  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Asteikkovirheen kompensointia varten on tehtävä laser-interferometri mittaus, jotta koko akselin liikematka saataisiin kalibroitu tarkaksi. Tätä mahdollisuutta harkittiin, mutta tuotannollisten kiireiden takia siitä luovuttiin.

Kaksoisnivelsauvamittauksen tuloksen liitteen 16 mukaan ympyrämuotoisuus parani hyvälle tasolle, mutta kohtisuoruusvirhe lisääntyi ja asteikkovirheen arvo puolittui. Tuotantokappaleesta mitattiin liitteen 17 mukainen tarkastusmittaus. Koordinaattimittaus koneen mittaustuloksen mukaan ympyrämuotoisuus on riittävä valmistukselle. Paikoitustarkkuus poikkeamaa y-akselilla ei ole ja X-akselin poikkeamaksi jäi 15  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Kaksoisnivelsauvamittauksella saatiin todettua interpolaatiolla työstetyn liikeradan muutokset ja säädettyä asteikkovirhe kyseiselle kappaleelle sopivaksi. Tällaista mitaustapaa ei voida pitää yksiselitteisenä ja työstökoneen tarkkuuden paranemista ei voida todeta koko liikematka-alueelta.

## 10 POHDINTA

Opinnäytetyön tehtävänä oli selvittää kaksoisnivelsauvamittauksen sopivuus dynaamisten ja staattisten poikkeamien hallintaan FMS -työstökeskuksella. Kaksoisnivelsauvamittaus antaa kuvan koneen toimivuudesta ja mahdollisista säätötarpeista. Opinnäytetyössä tehtävät säädöt toteutettiin ylilaadullisiksi, koska haluttiin selvittää kaksoisnivelsauvamittauksen kykyä poikkeamien toteamisessa ja työstökoneen säätöjen oikeellisuutta. Kaksoisnivelsauvamittauksia tehtiin 22 kpl:tta normaalin kahden sijaan (Taso / mittaus).

Työstökoneen kohtisuoruuden mittaustuloksien arvot muuttuivat eri mittauskertojen aikana. Mittaustulokseen ei voida luottaa numeraalisten arvojen osalta. Mittaukseen lähdetessä on selvitettävä, mitä vapausasteita halutaan mitata ja mihin tarkkuuteen mittalaitteella kyetään. Kaksoisnivelsauvamittauksella voidaan säätää käänneväljyyksiä ja servojen jättämää hyvin, mutta asteikkovirheen ja kohtisuoruuden toteamiseen laite ei sovellu luotettavasti.

Asteikkovirheen korjaamiseen tarvitaan laser-interferometri ja parametroiminen koneen ohjaukseen on haasteellista. Selvityksen perusteella en suosittelen kaksoisnivelsauvamittauksen perusteella muuttamaan kuularuuvien kompensoinnin n. 4000 eri parametria sekä toteamaan, että oikeilla laitteilla työ onnistuisi paremmin ja nopeammin.

Työstökoneen säätöjen vaikutusten seuranta pitää jaksottaa pitemmälle ajanjaksolle, mikäli kohtisuoruuksia korjataan mekaanisesti. Työstökoneen rungon jännitystilat tasaantuvat päivän tai vasta viikkojen työstön jälkeen, siksi tarkastustoimet jatkuvan parantamisen mallin mukaan ovat tärkeitä toimenpiteet säätöjen oikeellisuuden toteamiseksi.

Työstökoneen yksilöllisen käyttäytymisen tunteminen ja mittalaitteen kalibroiminen jokaista konetta varten on tärkeää mittauksen tuloksen oikeellisuuden varmistamiseksi. Mittauslaitteen asetusvaiheessa on tärkeää mittausepävarmuuden määrittäminen.

Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa kaksoisnivelsauvamittauksen avulla työstökoneen laaduntuottokykyä ja kunnossapidon mahdollisuutta reagoida laadullisiin poikkeamiin ennen virheellisten tuotteiden syntymistä.

Opinnäytetyössä saavutettiin tavoitteet laaduntuottokyvyn parantamiseksi. Työssä saatiin aikaiseksi toimintamalli, jota voidaan käyttää pohjana säädetyn työstökeskusten kunnan seurannassa. Samaa mittaus- ja säätömenetelmää voidaan käyttää vastaavanlaisissa työstökeskuksien geometriasäädöissä. Menetelmää voidaan käyttää poikkeamien seurantaan pitemmällä aikavälillä ja parametrinen säädön yhteydessä.

Säätötoimien tekeminen vaatii malttia koska suoraan mittauksen numeraaliset arvot eivät kerro parametrien muutoksien suuruutta. Kaksoisnivelsauvamittauksessa ei ole huomioitu työstövoimia eikä työstömenetelmistä tulevia virhetekijöitä, siksi tuotantokappaleen tai testikappaleen mittaustulokset ovat tärkeitä apulähteitä suunniteltaessa säätötoimenpiteitä. Mittaustuloksia analysoinnissa ei tuloksien numeraalinen arvo ole tärkeä, vaan poikkeamien muutoksien suunnan seuranta ja sen tulkitseminen. Kaksoisnivelsauvamittauksen avulla kompensointi on jatkuvan kokeilemisen ja erehtymisen kautta saavutettavissa.

Kansainvälistyminen ja alihankintatoiminta kansainvälisille yrityksille ovat pakottaneet yritykset standardin ISO 9001 mukaiseen toimintaan. Standardin mukainen toiminta ja sertifiointi eivät ole laadun tae, mutta yritykset pyrkivät parantamaan ja seuraamaan standardin mukaisesti toimiaan. Sertifioiminen on tuonut työstökoneiden kunnanvalvonnan ja laaduntuottokyvyn esille. Asiakas haluaa tietää, millaiseen tarkkuuteen työstökoneet kykenevät ja millaisia töitä niillä voidaan tehdä. Samalla se on viesti yrityksen asiakkaalle standardin toteutumisesta.

Opinnäytetyö ei anna valmista toimintamallia, kuinka toimia työstökoneiden erilaisien poikkeamien kanssa. Opinnäytetyössä kuvataan työstökoneen poikkeamien aiheuttajia ja annetaan suuntaa-antavia malleja, mihin suuntaan kannattaa säätöjä lähteä tekemään, jotta työstökoneen tarkkuus saataisiin paremmaksi.

## 11 KEHITYSEHDOTUKSET

Kaksoisnivelsauvamittaus tulisi aloittaa työstökoneen vastaanoton yhteydessä ja tehdä aina, kun työstökoneen geometriaan tehdään muutoksia. Näin toimittaessa työstökoneen yksilöllinen käyttäytyminen saadaan selville. Tavoitteeksi tulisi asettaa asiakasyrityksen kaikkien työstökoneiden kunnon arviointi jokaisen vuosihuollon yhteydessä.

Opinnäytetyön aikana ilmeni kaksoisnivelsauvamittauksen asteikkovirheen oikeellisuuden tulkinnassa virheitä. Kaksoisnivelsauvamittauslaitteistoon voidaan kytkeä Heidenhainin mittasauva, jota kalibroituna voidaan pitää luotettavana paikoitustarkkuuden mittavälineenä. Asiakkaalla on tällainen 2000 mm:n mittasauva, joka voitaisiin ottaa käyttöön paikoitustarkkuuden määrittelyyn. Suosittelen tämän mittasauvan käyttöönoton aloittamista välittömästi opinnäytetyön jälkeen.

Nykyisin kaksoisnivelsauvamittaus tehdään standardi ISO 230-4 mukaisesti kaksi kertaa myötä- ja vastapäivään. Selvityksen perusteella mittausepävarmuuden satunnaisvirheiden vaikutus näyttää kuitenkin vääristävän tulosta. RR-testiä (Repeatability & Reproducibility) voidaan käyttää kattavaan satunnaisvirheiden tunnistamiseen. Testissä Repeatability (toistettavuus) kuvaa mittauslaitteiston ominaisuutta ja Reproducibility (uusittavuus) kuvaa mittaajien ammattitaitoa. RR-testistä on saatavana lisätietoa MIKESin Internet sivuilta. ([www.mikes.fi](http://www.mikes.fi), RR-testi) Liitteessä 4 on esitetty Excel-malli, jota käytettiin tässä opinnäytetyössä arvioimaan mittausepävarmuutta ja se toimii hyvänä pohjana RR-testin kehitykselle.

Yksilöllistä käyttäjäkoulutusta kunnossapidon ammattilaisille kaksoisnivelsauvamittauslaitteiston käyttöönottoon tulisi järjestää tarvittaessa, koska yksiselitteisiä ohjeita laitteen käytöstä ja kompensatioista ei voida antaa. Laitteiston käytettävyyden parantamiseksi tämä opinnäytetyö tullaan liittämään kaksoisnivelsauvamittauslaitteiston kuljetusalustaan ja perehdyttämään ja antamaan ohjeita työstökoneen poikkeamien hallintaan. Kaksoisnivelsauvamittalaitteella voidaan mitata helposti ja nopeasti, mutta analysointi ja toimivien säätöjen tekeminen vaatii kokemusta.

Lämpötilan seuranta tuotantotiloissa täytyy kehittää. Mittaushuoneen lämpötila ja ilmankosteudelle on asetettu tiukat suositukset akkreditoituakseen, mutta tuotantotiloissa lämpötilat muuttuvat vuodenajan mukaan rajusti. Esimerkiksi lämpösäteilyikkunoiden kautta työstökoneeseen vaikuttaa geometria poikkeamiin. Poikkeamien korjaamisessa lämpötilavaikutukset täytyy huomioida tarkasti, saattaisi olla järkevämpää korjata ja ehkäistä poikkeaman aiheuttajaa, kuin seurauksia.

Tiedottamista ja dokumenttien tallentamista yrityksen tietokantaan täytyy kehittää, jolloin konekohtainen trendien seuranta ja poikkeamiin reagoiminen tapahtuisi riittävällä nopeudella. Mittaushuoneen tuotantokappaleiden mittaustulokset ja kaksoisnivelsauvamittauksen tulokset tulee siirtää asiakkaan tietojärjestelmään. Yhdessä näillä toimenpiteillä ja mittaustuloksilla saadaan luotettava työstökoneen kunnan seuranta aikaiseksi.

## LÄHTEET

Andersson, P., Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Porvoo: WSOY.

ASME. 2011. American Society of Mechanical Engineers. Viitattu 3.2.2011  
<http://www.asme.org/about-asme/honors-awards/achievement-awards/james-b-bryan-to-receive-the-m-eugene-merchant-m>.

DBB110 Ballbar by heidenhain. 2011. Viitattu 3.3.2011  
<http://www.atechauthority.com/products.asp?id=23>.

Hokkanen, M. 1999. Työstökoneiden tarkastusmenetelmän vertailututkimus  
Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Heidenhain yleisesite. 2008. Pituuden mittaaminen. Viitattu 20.1.2011.  
[http://www.heidenhain.fi/fileadmin/pdb/media/img/350\\_457-F1.pdf](http://www.heidenhain.fi/fileadmin/pdb/media/img/350_457-F1.pdf)

Hölsä, J. 1999. Method for analysing planar machine tool measurements. Väitöskirja  
Tampere: Tampereen tekninen korkeakoulu.

Hölsä, J. 2011. Neuvoja PolarCheck -ohjelman virheistä. Sähköpostiviesti 1.3.2011.  
Vastaanottaja V M, Ahonen. Ohjelman kehittäjän neuvoja mittausmenetelmän  
virhetulkinta mahdollisuuksista.

ISEL. 2008. Kuularuuviveto, lineaarimekaniikka. Viitattu 20.1.2011.  
<http://www.roboty.fi/Lineaariyksikot%20ruuviveto.htm>

ISO 230-4. 1996. Circular tests for numerically controlled machine tools. Berliini: DIN  
Deutsches institut Für Normunge.

Järviö, J. 2008. Kunnossapitoyhdistys Promaint ry. viitattu 20.1.2011.  
[http://www.promaint.net/alltypes.asp?menu\\_id=734](http://www.promaint.net/alltypes.asp?menu_id=734), Ehkäisevä kunnossapito ja sen  
suunnittelu.

Järviö, J., Piispa, T., Parantainen T., Åström, T. 2007. Kunnossapito. 4 p. Hamina: Oy  
KP-Media Oy.

Kakino, Y., Ihara, Y., Shinohara, A. 1993. Accuracy inspection of NC Machine tools by  
double ball bar method. Munich Germany: Carl Hanser Verlag.



Leinonen, P. 2010. Parantava kunnossapito. Viitattu 20.1.2011.  
[http://www.promaint.net/alltypes.asp?menu\\_id=844](http://www.promaint.net/alltypes.asp?menu_id=844), Parantava kunnossapito lisää käyttövarmuutta.

Measuring systems. 2002. Measuring systems for machinetool inspection and acceptance testing. Viitattu 5.2.2011.  
[www.heidenhainweb.com.ar/bajando.php?id=20887126.pdf](http://www.heidenhainweb.com.ar/bajando.php?id=20887126.pdf).

Oksanen, P. 1996. Kaksoisnivelsauva koneistuskeskuksen tarkastuksessa ja kunnon seurannassa. Iisensiaatintyö. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Paananen, V. 2010. Jatkuva parantaminen. Monisteita. Laatutyökalut ja mittarit. Luento Jyväskylän ammattikorkeakoulussa syksyllä 2010.

Paananen, V. 2010. Tuotteen toteuttaminen. Monisteita. seuranta- ja mittalaitteistojen ohjaus. Luento Jyväskylän ammattikorkeakoulussa syksyllä 2010.

PSK-Standardisointi. 2010. PSK lyhyesti. Viitattu 22.1.2011.  
[http://www.psk-standardisointi.fi/Alasivut/PSK\\_lyhyesti.htm](http://www.psk-standardisointi.fi/Alasivut/PSK_lyhyesti.htm).

PolarCheck mittausohje. 1998. Versio 2,3,2. PolarCheck Analysis ohjelman ohje. "Tietoa virheistä".

SFS 3700. 1998. Metrologia. Perus- ja yleistermien sanasto. Viitattu 28.3.2011.  
<http://www.jamk.fi/kirjasto/nelliportaali> SFS online.

SFS-EN 13306. 2001. Kunnossapitosanasto. Viitattu 22.1.2011.  
<http://www.jamk.fi/kirjasto/nelliportaali> SFS online.

SFS-EN ISO 9001. 2008. Laadunhallintajärjestelmät. Vaatimukset. Helsinki: Suomen standardoimisliitto sfs.

SFS-ISO 230-1. 1992. Työstökoneiden tarkastusohje. Osa1. Viitattu 24.1.2011.  
<http://www.jamk.fi/kirjasto/nelliportaali> SFS online.

SFS-ISO 230-2. 1990. Työstökoneiden tarkastusohje. Osa2. Viitattu 24.1.2011.  
<http://www.jamk.fi/kirjasto/nelliportaali> SFS online.

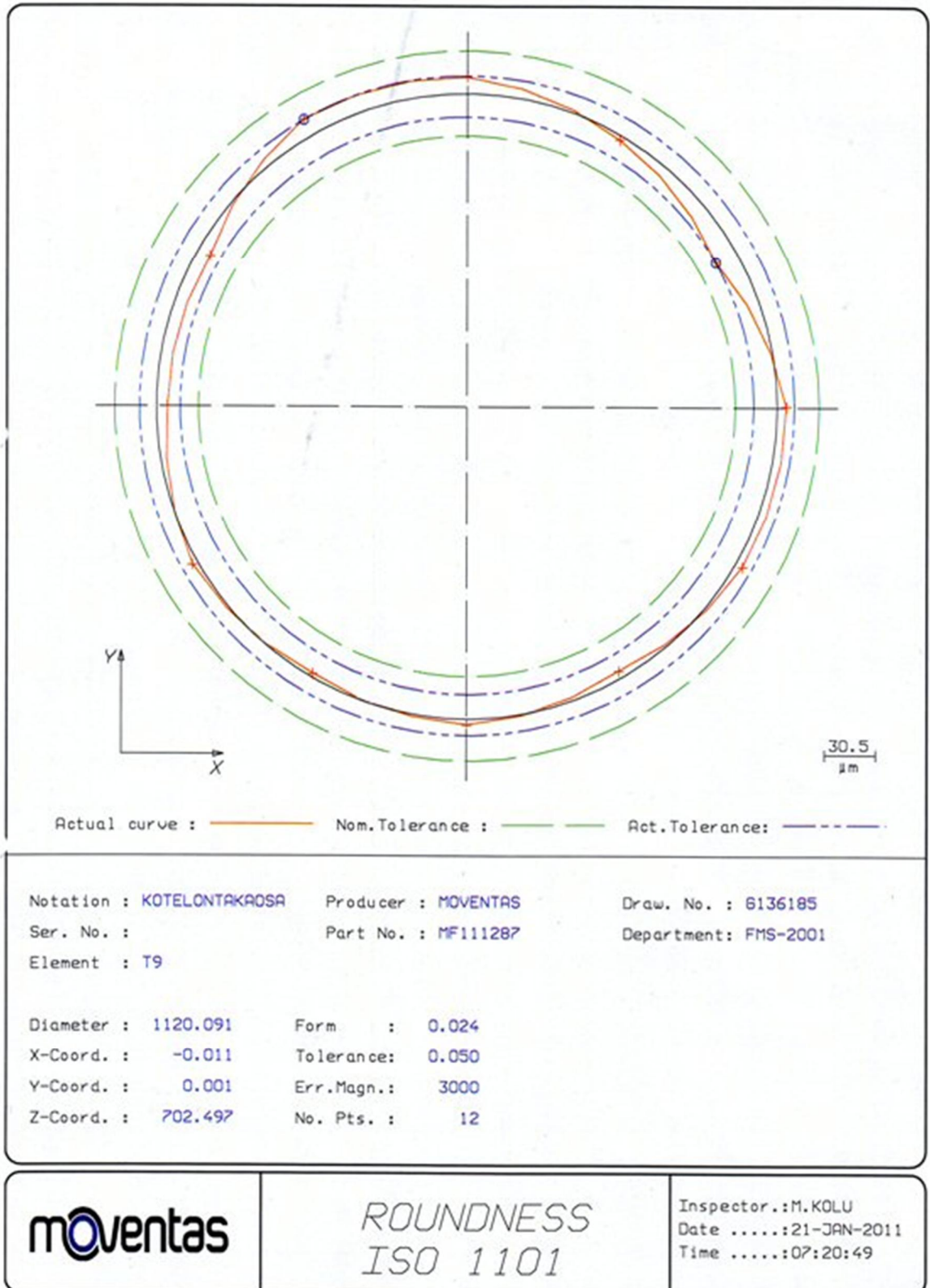
SFS-Standardisointi. 2011. Laadunhallintajärjestelmän luominen. Viitattu 22.1.2011.  
<http://www.sfs.fi/iso9000/laadunhallinta/>.

Sinumerik 880. 1991. Sinumerik 880, Installation instructions. Nuremberg: Siemens AG

Tikka, H. 2010. Mittauskyvyn riittävyys. Espoo: MIKES.

## LIITTEET

Liite 1. Ympyrämäisyysvirhe, XY-taso



## Liite 2. Referenssimittaus, XY-taso

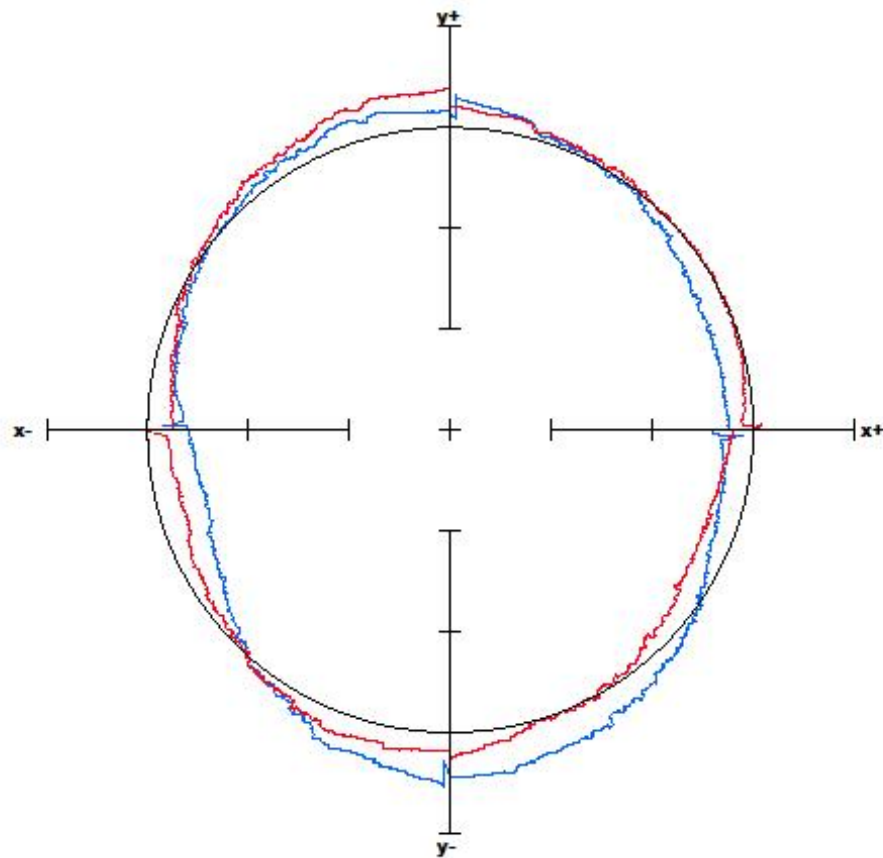


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	<i>moventas</i>	Taso:	<i>xy</i>
Kone:	<i>FMS-2001</i>	Syöttönopeus:	<i>800 mm/min</i>
Mittauseriä:	<i>FMS_2001</i>	Sauvan pituus:	<i>300,919 mm</i>
Päiväys:	<i>1.2.2011 7:23:48</i>	Paras säde:	<i>300,000 mm</i>
Mittaaja:	<i>Ahve,</i>	Otantompeus:	<i>7,8125</i>
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	<i>1106</i>
Mittauksen keskipiste:	<i>x:63 , y:852 , z:0</i>	Kalibrointi:	<i>Kalibroitu</i>
Ympyrämäisyys LSC:	<i>21 µm</i>	Ympyrämäisyys MZC:	<i>19 µm</i>
Asteikkovirhe (x-y):	<i>-36 µm/m</i>	Servon jättämä (x-y):	<i>-5 %</i>
Kohtisuorusvirhe:	<i>5 µm/m</i>	Satunnaisvirhe:	<i>1 µm</i>
		Suunnattu värähtely:	<i>0 µm (0)</i>
Akselin piikki x:	<i>4 µm</i>	Akselin piikki y:	<i>1 µm</i>
Käänneimitat x+:	<i>3 µm</i>	Käänneimitat y+:	<i>4 µm</i>
Käänneimitat x-:	<i>0 µm</i>	Käänneimitat y-:	<i>0 µm</i>
Jaksollinen virhe x:	<i>0 µm</i>	Jaksollinen virhe y:	<i>0 µm</i>
Nousu x:		Nousu y:	
Kiertymä virhe x:	<i>3 µm</i>	Kiertymä virhe y:	<i>3 µm</i>
Asteikkovirhe x:	<i>-18 µm/m</i>	Asteikkovirhe y:	<i>18 µm/m</i>
Tihkokitka x:	<i>0 µm</i>	Tihkokitka y:	<i>0 µm</i>
Suoruus x:	<i>5 µm</i>	Suoruus y:	<i>-4 µm</i>



MP

VP

Asteikko 20 µm

## Liite 3. Referenssimittaus, ZY-taso

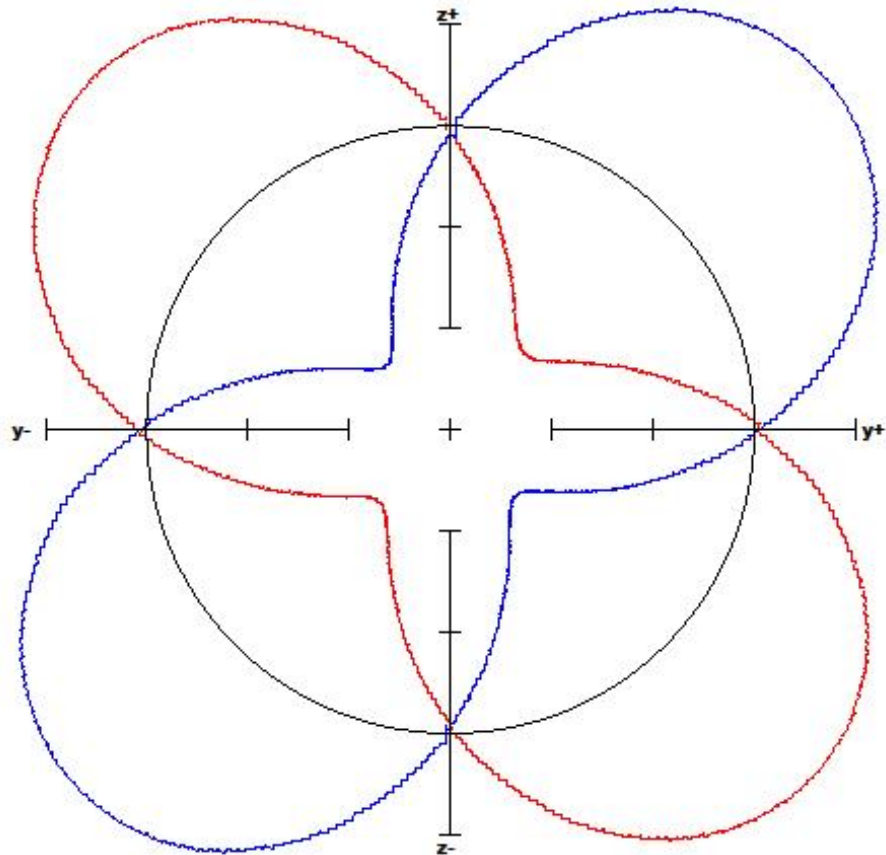


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	moventas	Taso:	yz
Kone:	FMS-2001	Syöttönopeus:	800 mm/min
Mittauseriä:	FMS_2001	Sauvan pituus:	300,919 mm
Päiväys:	1.2.2011 9:22:09	Paras säde:	300,014 mm
Mittaja:	Ahve,	Otantompeus:	7,8125
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	1106
Mittauksen keskipiste:	x:-465 , y:973 , z:732	Kalibrointi:	Kalibroitu
Ympyrämäisyys LSC:	422 $\mu\text{m}$	Ympyrämäisyys MZC:	420 $\mu\text{m}$
Asteikkovirhe (y-z):	41 $\mu\text{m}/\text{m}$	Servon jättämä (y-z):	911 %
Kohtisuorusvirhe:	-45 $\mu\text{m}/\text{m}$	Satunnaisvirhe:	1 $\mu\text{m}$
		Suunnattu värähtely:	0 $\mu\text{m}$ (0)
Akselin piikki y:	30 $\mu\text{m}$	Akselin piikki z:	0 $\mu\text{m}$
Käänneimat y+:	0 $\mu\text{m}$	Käänneimat z+:	-1 $\mu\text{m}$
Käänneimat y-:	-3 $\mu\text{m}$	Käänneimat z-:	1 $\mu\text{m}$
Jaksollinen virhe y:	1 $\mu\text{m}$	Jaksollinen virhe z:	0 $\mu\text{m}$
Nousu y:		Nousu z:	
Kiertymä virhe y:	7 $\mu\text{m}$	Kiertymä virhe z:	6 $\mu\text{m}$
Asteikkovirhe y:	66 $\mu\text{m}/\text{m}$	Asteikkovirhe z:	25 $\mu\text{m}/\text{m}$
Tihkokitka y:	0 $\mu\text{m}$	Tihkokitka z:	0 $\mu\text{m}$
Suoruus y:	-2 $\mu\text{m}$	Suoruus z:	2 $\mu\text{m}$



Aloitettu ennen muutoksia /AhVe

MP

VP

Asteikko 100  $\mu\text{m}$

## Liite 4. Mittausepävarmuuden määrittely

Kaksoisnivelsauva mittaus						
Epävarmuus ja menetelmän hyvyden tulkinta						
Mittauskerrat	Ympyrä mäisyys /Ø	Asteikko virhe X µm/m	Asteikko virhe Y µm/m	Käänte mitta X µm/m	Käänte mitta Y µm/m	Servo jättämä %
1:	14	-11	25	2	1	-5
2:	19	-15	14	2	2	-5
3:	14	-18	24	2	1	-5
4:	18	-14	18	2	1	-5
5:						
6:						
7:						
8:						
9:						
10:						
Keskiarvo	16	-15	20	2	1	-5
Keskihajonta	3	3	5	0	1	0
Mittaus tulos	16 ± 4	-14 ± 6	20 ± 9	2 ± 1	1 ± 1	-5 ± 1

Ympyrä mäsitys arvo laskettu /m	
<b>27 µ/m ± 4µ</b>	

Keskiarvo kuvaa satunnaisen virheen suuruutta..  
Keskihajonta kuvaa menetelmän ja -välineen hyvyttä.

Mittalaitteen arvioitu epävarmuus 1 µm  
Mittalaitteen sauvan kalibroitu pituus 300.919 mm

Epävarmuus;  $u(q) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Virheiden yhdistäminen;

$$u = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_n^2 + B_1^2 + B_2^2 + \dots + B_n^2}$$

Korjauskertoimet FINAS;

Mittauskerrat	korjauskerroin	mittauskerrat	korjauskerroin
2	7.0	6	1.3
3	2.3	7	1.3
4	1.7	8	1.2
5	1.4	9	1.2

Kertoimet ovat voimassa k arvon ollessa 95 % todennäköisyydellä

## Liite 5. Säädetty XY-taso

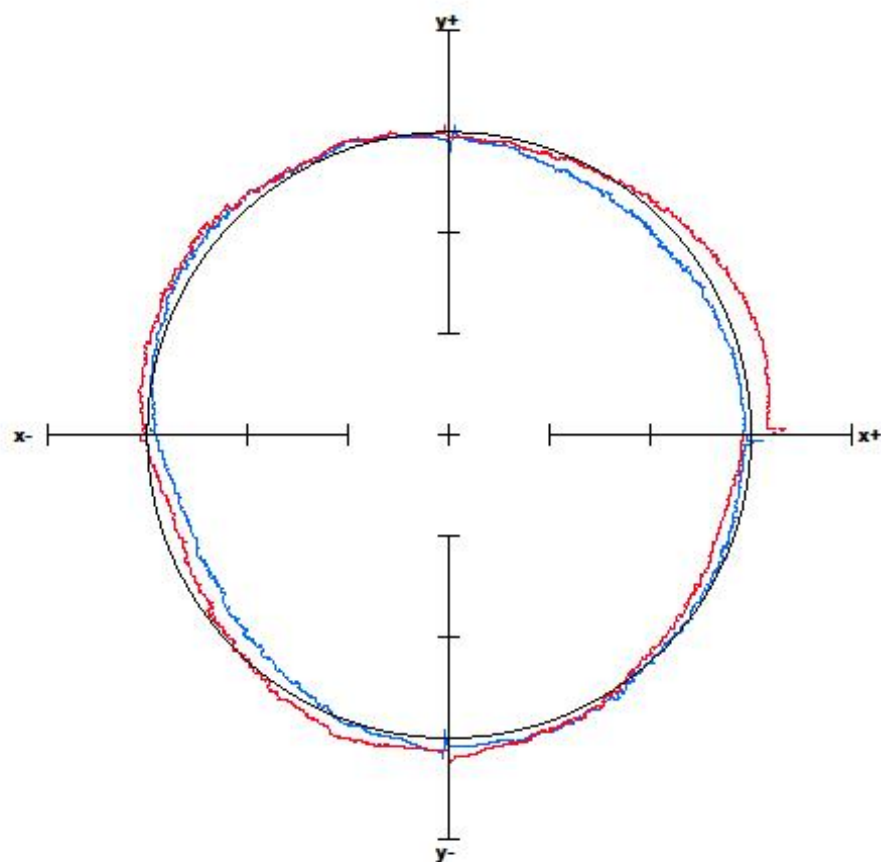


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	moventas	Taso:	xy
Kone:	FMS-2001	Syöttönopeus:	800 mm/min
Mittauseriä:	FMS_2001	Sauvan pituus:	300,919 mm
Päiväys:	3.2.2011 13:43:39	Paras säde:	300,005 mm
Mittaja:	Ahve,	Otantonopeus:	7,8125
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	1106
Mittauksen keskipiste:	x:60 , y:801 , z:617	Kalibrointi:	Kalibroitu
Ympyrämäisyys LSC:	13 $\mu\text{m}$	Ympyrämäisyys MZC:	10 $\mu\text{m}$
Asteikkovirhe (x-y):	-5 $\mu\text{m}/\text{m}$	Servon jättämä (x-y):	-5 %
Kohtisuoruusvirhe:	7 $\mu\text{m}/\text{m}$	Satunnaisvirhe:	1 $\mu\text{m}$
		Suunnattu värähtely:	0 $\mu\text{m}$ (0)
Akselin piikki x:	2 $\mu\text{m}$	Akselin piikki y:	2 $\mu\text{m}$
Käänneimitat x+:	3 $\mu\text{m}$	Käänneimitat y+:	1 $\mu\text{m}$
Käänneimitat x-:	-1 $\mu\text{m}$	Käänneimitat y-:	1 $\mu\text{m}$
Jaksollinen virhe x:	0 $\mu\text{m}$	Jaksollinen virhe y:	0 $\mu\text{m}$
Nousu x:		Nousu y:	
Kiertymä virhe x:	-1 $\mu\text{m}$	Kiertymä virhe y:	2 $\mu\text{m}$
Asteikkovirhe x:	14 $\mu\text{m}/\text{m}$	Asteikkovirhe y:	18 $\mu\text{m}/\text{m}$
Tihkokitka x:	0 $\mu\text{m}$	Tihkokitka y:	0 $\mu\text{m}$
Suoruus x:	8 $\mu\text{m}$	Suoruus y:	-2 $\mu\text{m}$

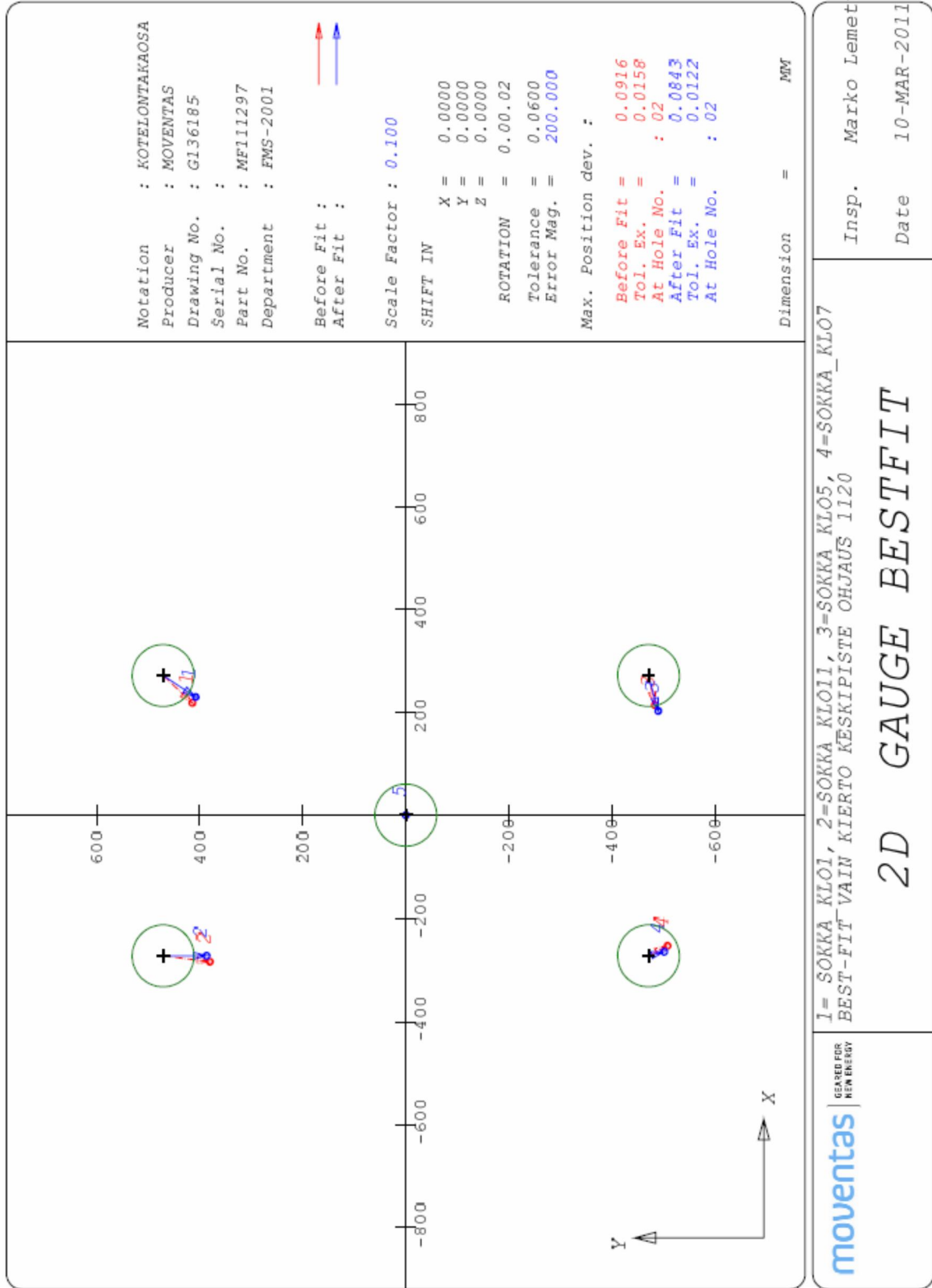


MP

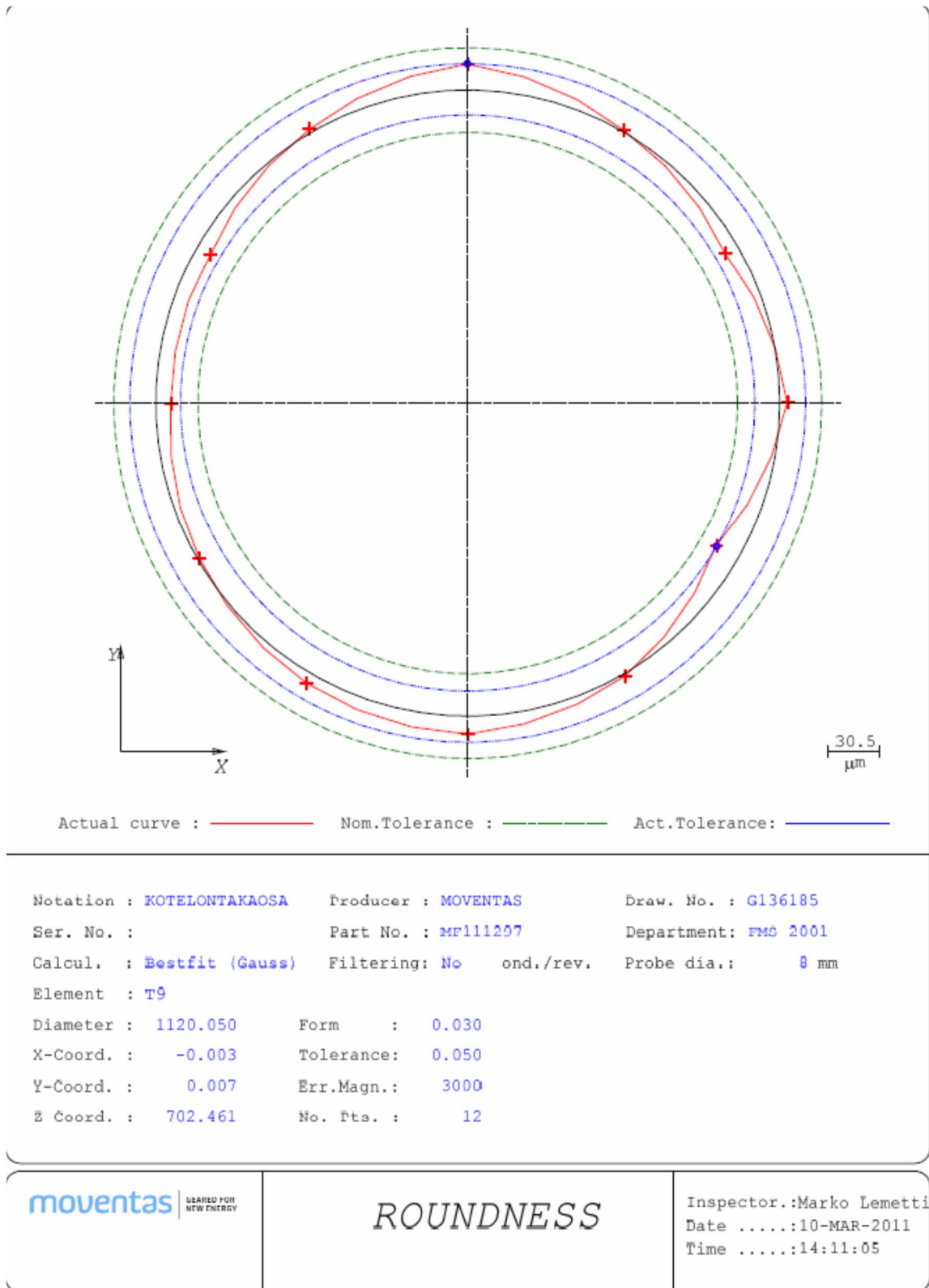
VP

Asteikko 20  $\mu\text{m}$

Liite 6. Sokkapiirin paikoitustarkkuus



## Liite 7. Tuotantokappaleen ympyräisyys





## Liite 8. Uusintamittaus, XY-taso

## Liite 8

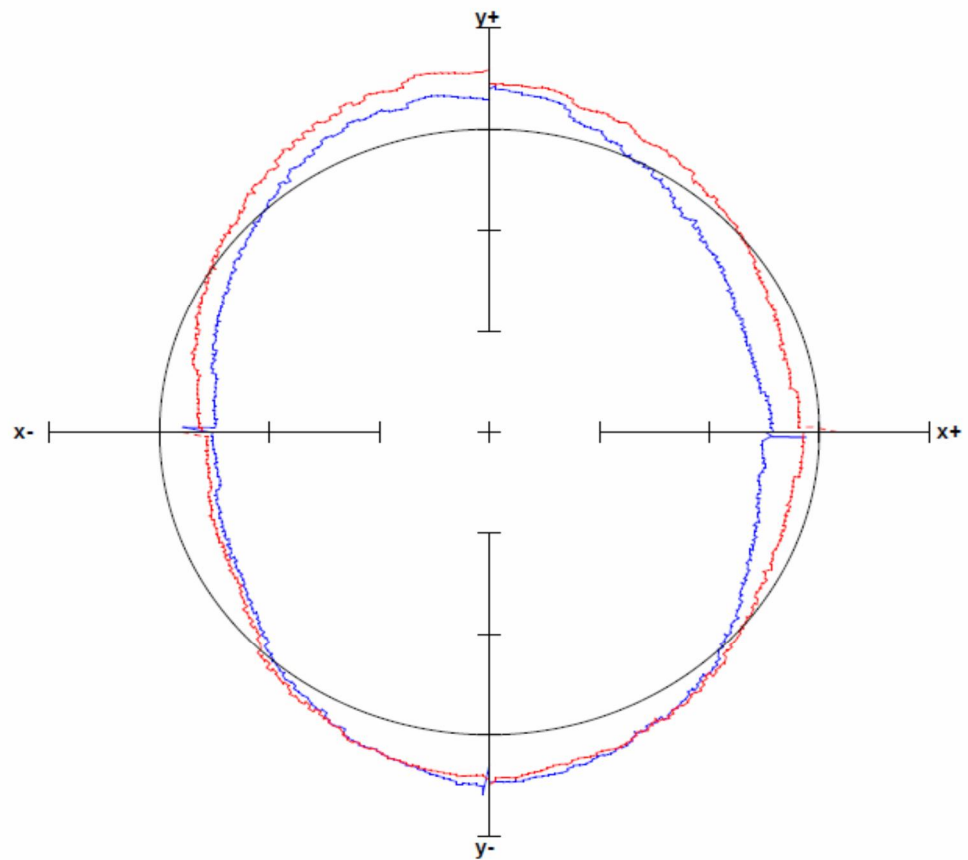


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	<i>moventas</i>	Taso:	<i>xy</i>
Kone:	<i>FMS-2001</i>	Syöttönopeus:	<i>800 mm/min</i>
Mittauserä:	<i>FMS_2001</i>	Sauvan pituus:	<i>300,919 mm</i>
Päiväys:	<i>02/03/2011 17:53:16</i>	Paras säde:	<i>300,002 mm</i>
Mittaaja:	<i>Ahve,</i>	Otantanopeus:	<i>7,8125</i>
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	<i>1106</i>
Mittauksen keskipiste:	<i>x:60 , y:801 , z:617</i>	Kalibrointi:	<i>Kalibroitu</i>
Ympyrämäisyys LSC:	<i>23 µm</i>	Ympyrämäisyys MZC:	<i>22 µm</i>
Asteikkovirhe (x-y):	<i>-55 µm/m</i>	Servon jättämä (x-y):	<i>-5 %</i>
Kohtisuoruusvirhe:	<i>11 µm/m</i>	Satunnaisvirhe:	<i>1 µm</i>
		Suunnattu värähtely:	<i>0 µm (0)</i>
Akselin piikki x:	<i>6 µm</i>	Akselin piikki y:	<i>1 µm</i>
Käännemitat x+:	<i>0 µm</i>	Käännemitat y+:	<i>1 µm</i>
Käännemitat x-:	<i>-3 µm</i>	Käännemitat y-:	<i>1 µm</i>
Jaksollinen virhe x:	<i>1 µm</i>	Jaksollinen virhe y:	<i>1 µm</i>
Nousu x:		Nousu y:	
Kiertymä virhe x:	<i>0 µm</i>	Kiertymä virhe y:	<i>4 µm</i>
Asteikkovirhe x:	<i>-22 µm/m</i>	Asteikkovirhe y:	<i>33 µm/m</i>
Tihkokitka x:	<i>0 µm</i>	Tihkokitka y:	<i>0 µm</i>
Suoruus x:	<i>1 µm</i>	Suoruus y:	<i>-3 µm</i>



MP

VP

Asteikko 20 µm

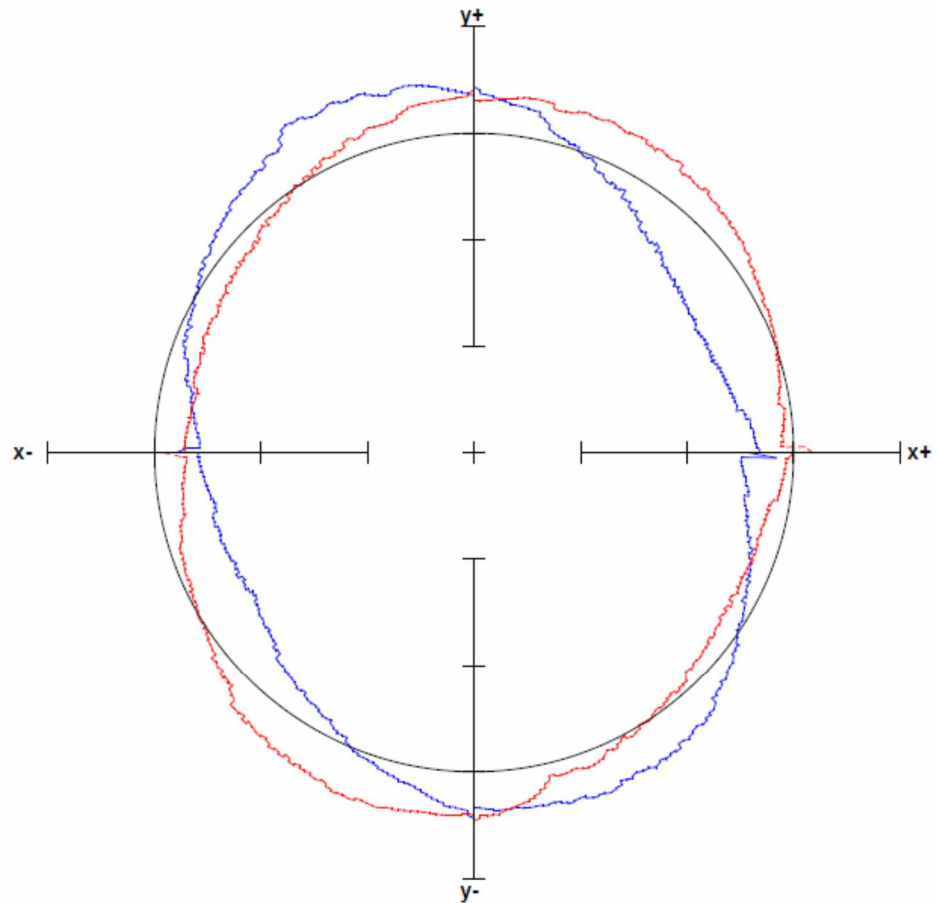
## Liite 9. Servojättämän säätö, XY-taso

## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	<i>moventas</i>	Taso:	<i>xy</i>
Kone:	<i>FMS-2001</i>	Syöttönopeus:	<i>800 mm/min</i>
Mittauserä:	<i>FMS_2001</i>	Sauvan pituus:	<i>300,919 mm</i>
Päiväys:	<i>02/03/2011 20:44:06</i>	Paras säde:	<i>300,003 mm</i>
Mittaaja:	<i>Ahve,</i>	Otantaopeus:	<i>7,8125</i>
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	<i>1106</i>
Mittauksen keskipiste:	<i>x:60 , y:801 , z:617</i>	Kalibrointi:	<i>Kalibroitu</i>
Ympyrämäisyys LSC:	<i>24 µm</i>	Ympyrämäisyys MZC:	<i>22 µm</i>
Asteikkovirhe (x-y):	<i>-45 µm/m</i>	Servon jättämä (x-y):	<i>-27 %</i>
Kohtisuoruusvirhe:	<i>11 µm/m</i>	Satunnaisvirhe:	<i>1 µm</i>
		Suunnattu värähtely:	<i>0 µm (0)</i>
Akselin piikki x:	<i>5 µm</i>	Akselin piikki y:	<i>2 µm</i>
Käännemitat x+:	<i>-2 µm</i>	Käännemitat y+:	<i>0 µm</i>
Käännemitat x-:	<i>-2 µm</i>	Käännemitat y-:	<i>1 µm</i>
Jaksollinen virhe x:	<i>1 µm</i>	Jaksollinen virhe y:	<i>1 µm</i>
Nousu x:		Nousu y:	
Kiertymä virhe x:	<i>1 µm</i>	Kiertymä virhe y:	<i>5 µm</i>
Asteikkovirhe x:	<i>-11 µm/m</i>	Asteikkovirhe y:	<i>34 µm/m</i>
Tihkokitka x:	<i>0 µm</i>	Tihkokitka y:	<i>0 µm</i>
Suoruus x:	<i>0 µm</i>	Suoruus y:	<i>-2 µm</i>

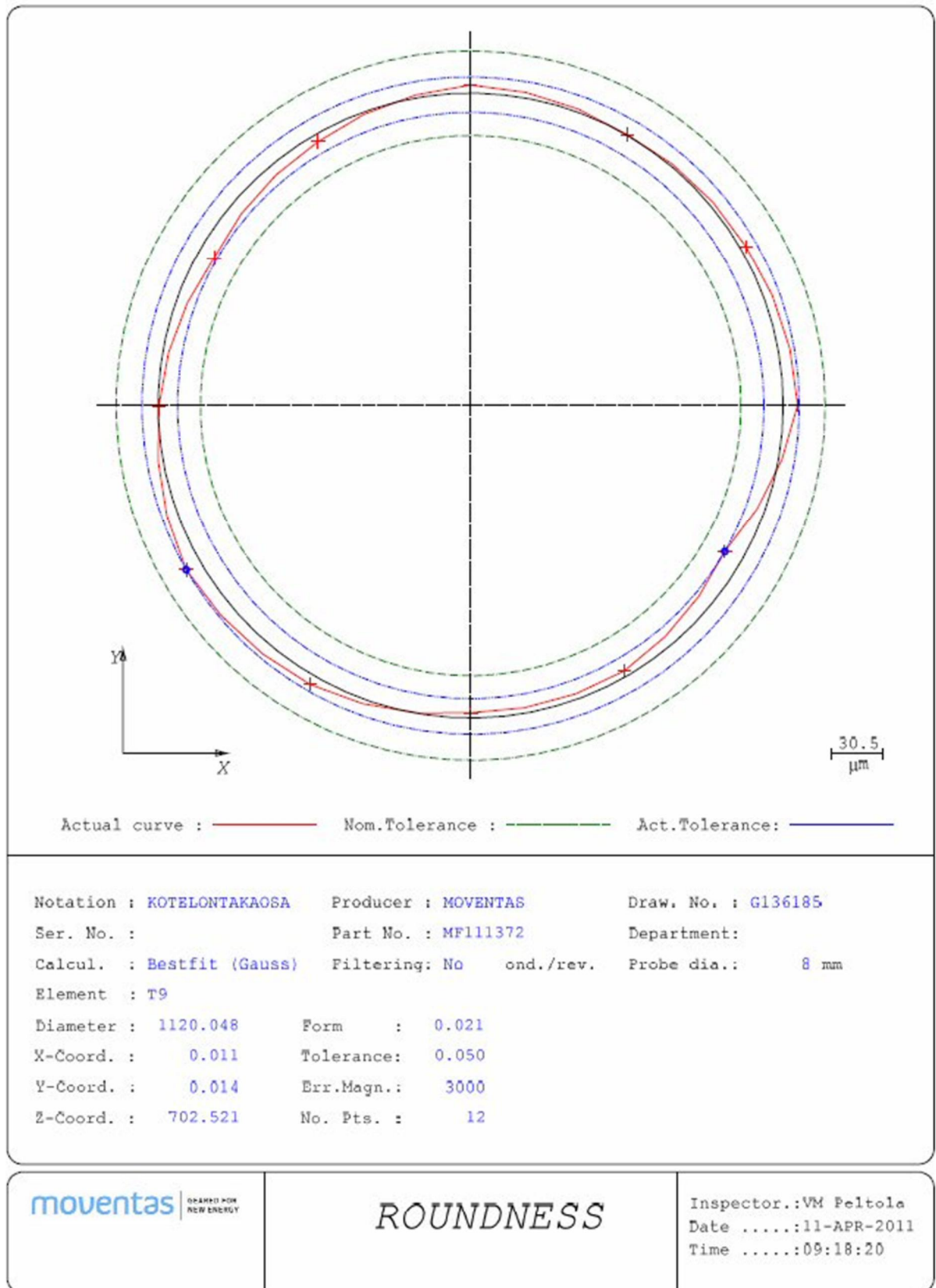


MP

VP

Asteikko 20 µm

## Liite 10. Tuotantokappaleen mittaustulos



## Liite 11. Tavanomaisten säätöjen vaikutus, XY-taso

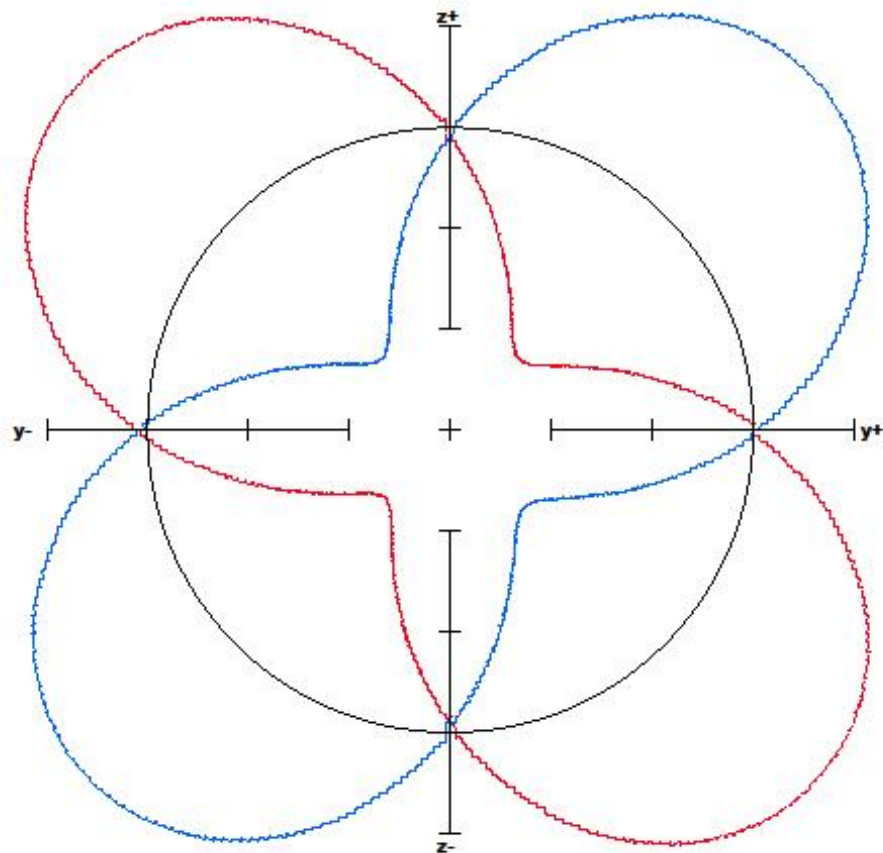


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	moventas	Taso:	yz
Kone:	FMS-2001	Syöttönopeus:	800 mm/min
Mittauseriä:	FMS_2001	Sauvan pituus:	300,919 mm
Päiväys:	3.2.2011 10:38:10	Paras säde:	300,007 mm
Mittaaja:	Ahve,	Otantompeus:	7,8125
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	1106
Mittauksen keskipiste:	x:-465 , y:973 , z:732	Kalibrointi:	Kalibroitu
Ympyrämäisyys LSC:	411 $\mu\text{m}$	Ympyrämäisyys MZC:	408 $\mu\text{m}$
Asteikkovirhe (y-z):	42 $\mu\text{m}/\text{m}$	Servon jättämä (y-z):	905 %
Kohtisuorusvirhe:	15 $\mu\text{m}/\text{m}$	Satunnaisvirhe:	1 $\mu\text{m}$
		Suunnattu värähtely:	0 $\mu\text{m}$ (0)
Akselin piikki y:	29 $\mu\text{m}$	Akselin piikki z:	0 $\mu\text{m}$
Käänneimitat y+:	3 $\mu\text{m}$	Käänneimitat z+:	3 $\mu\text{m}$
Käänneimitat y-:	-1 $\mu\text{m}$	Käänneimitat z-:	-1 $\mu\text{m}$
Jaksollinen virhe y:	0 $\mu\text{m}$	Jaksollinen virhe z:	0 $\mu\text{m}$
Nousu y:		Nousu z:	
Kiertymä virhe y:	8 $\mu\text{m}$	Kiertymä virhe z:	6 $\mu\text{m}$
Asteikkovirhe y:	46 $\mu\text{m}/\text{m}$	Asteikkovirhe z:	4 $\mu\text{m}/\text{m}$
Tihkokitka y:	0 $\mu\text{m}$	Tihkokitka z:	0 $\mu\text{m}$
Suoruus y:	2 $\mu\text{m}$	Suoruus z:	11 $\mu\text{m}$



MP

VP

Asteikko 100  $\mu\text{m}$

## Liite 12. Säädetty YZ-taso

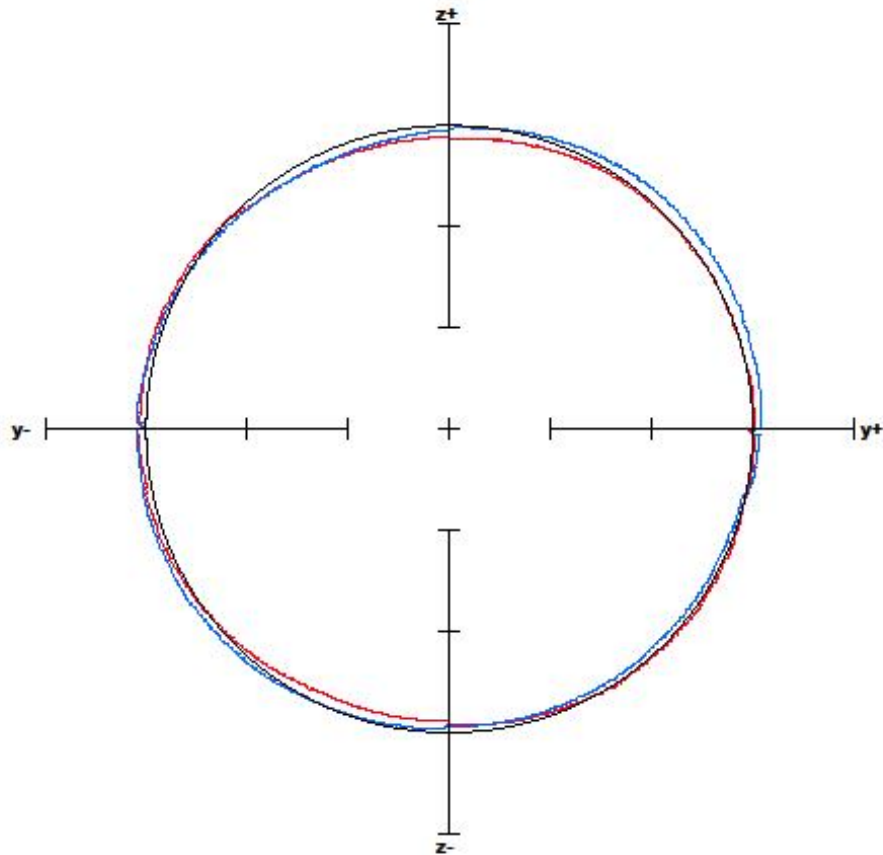


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	<i>moventas</i>	Taso:	<i>yz</i>
Kone:	<i>FMS-2001</i>	Syöttönopeus:	<i>800 mm/min</i>
Mittauseriä:	<i>FMS_2001</i>	Sauvan pituus:	<i>300,919 mm</i>
Päiväys:	<i>3.3.2011 20:23:12</i>	Paras säde:	<i>300,009 mm</i>
Mittaaja:	<i>Ahve,</i>	Otantomopeus:	<i>7,8125</i>
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	<i>1106</i>
Mittauksen keskipiste:	<i>x:-465 , y:973 , z:732</i>	Kalibrointi:	<i>Kalibroitu</i>
Ympyrämäisyys LSC:	<i>28 µm</i>	Ympyrämäisyys MZC:	<i>26 µm</i>
Asteikkovirhe (y-z):	<i>42 µm/m</i>	Servon jättämä (y-z):	<i>14 %</i>
Kohtisuorusvirhe:	<i>-19 µm/m</i>	Satunnaisvirhe:	<i>1 µm</i>
		Suunnattu värähtely:	<i>0 µm (0)</i>
Akselin piikki y:	<i>1 µm</i>	Akselin piikki z:	<i>0 µm</i>
Käänneimitat y+:	<i>-3 µm</i>	Käänneimitat z+:	<i>1 µm</i>
Käänneimitat y-:	<i>2 µm</i>	Käänneimitat z-:	<i>2 µm</i>
Jaksollinen virhe y:	<i>1 µm</i>	Jaksollinen virhe z:	<i>0 µm</i>
Nousu y:		Nousu z:	
Kiertymä virhe y:	<i>5 µm</i>	Kiertymä virhe z:	<i>-1 µm</i>
Asteikkovirhe y:	<i>52 µm/m</i>	Asteikkovirhe z:	<i>11 µm/m</i>
Tihkokitka y:	<i>0 µm</i>	Tihkokitka z:	<i>0 µm</i>
Suoruus y:	<i>3 µm</i>	Suoruus z:	<i>10 µm</i>

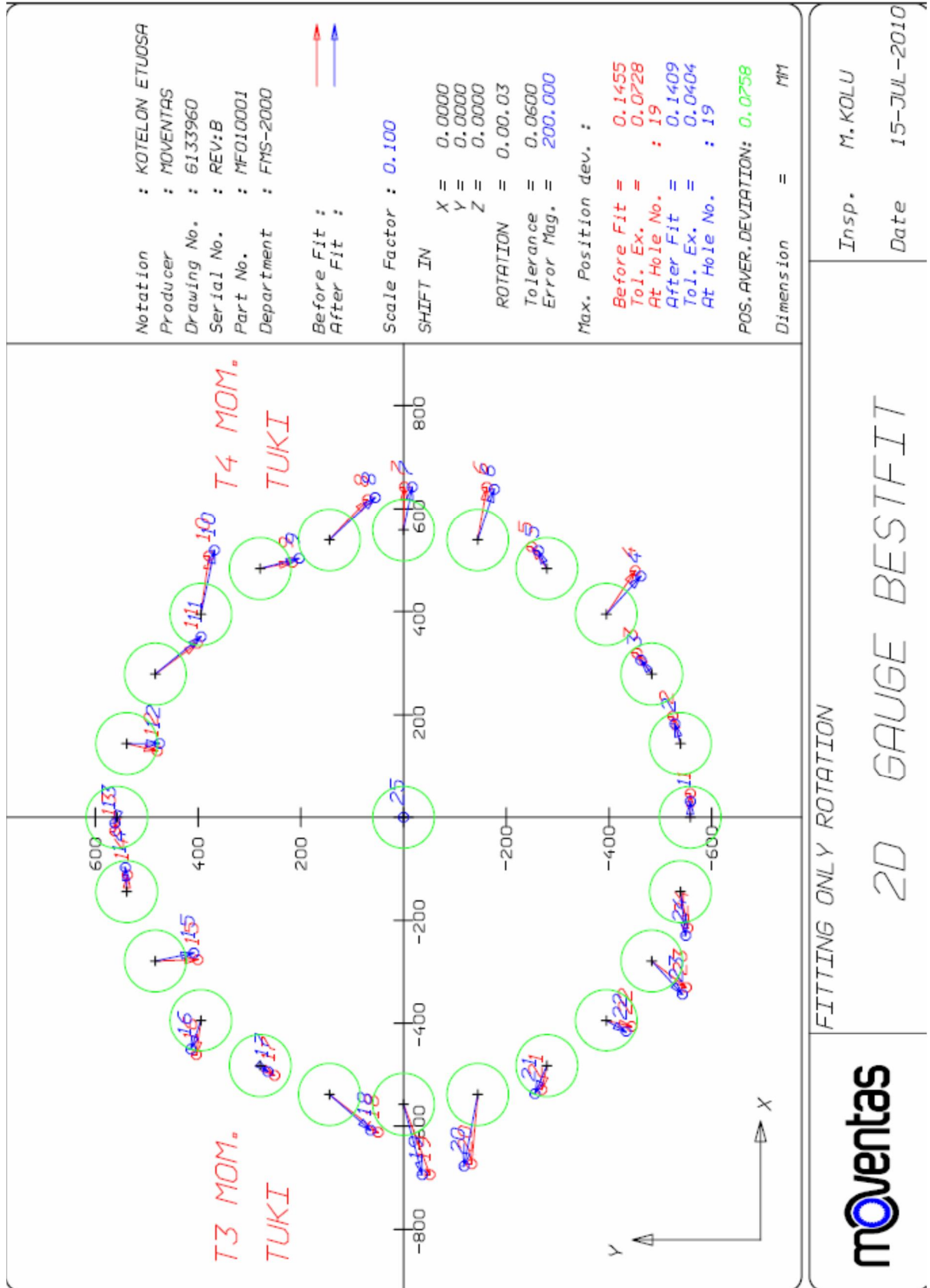


MP

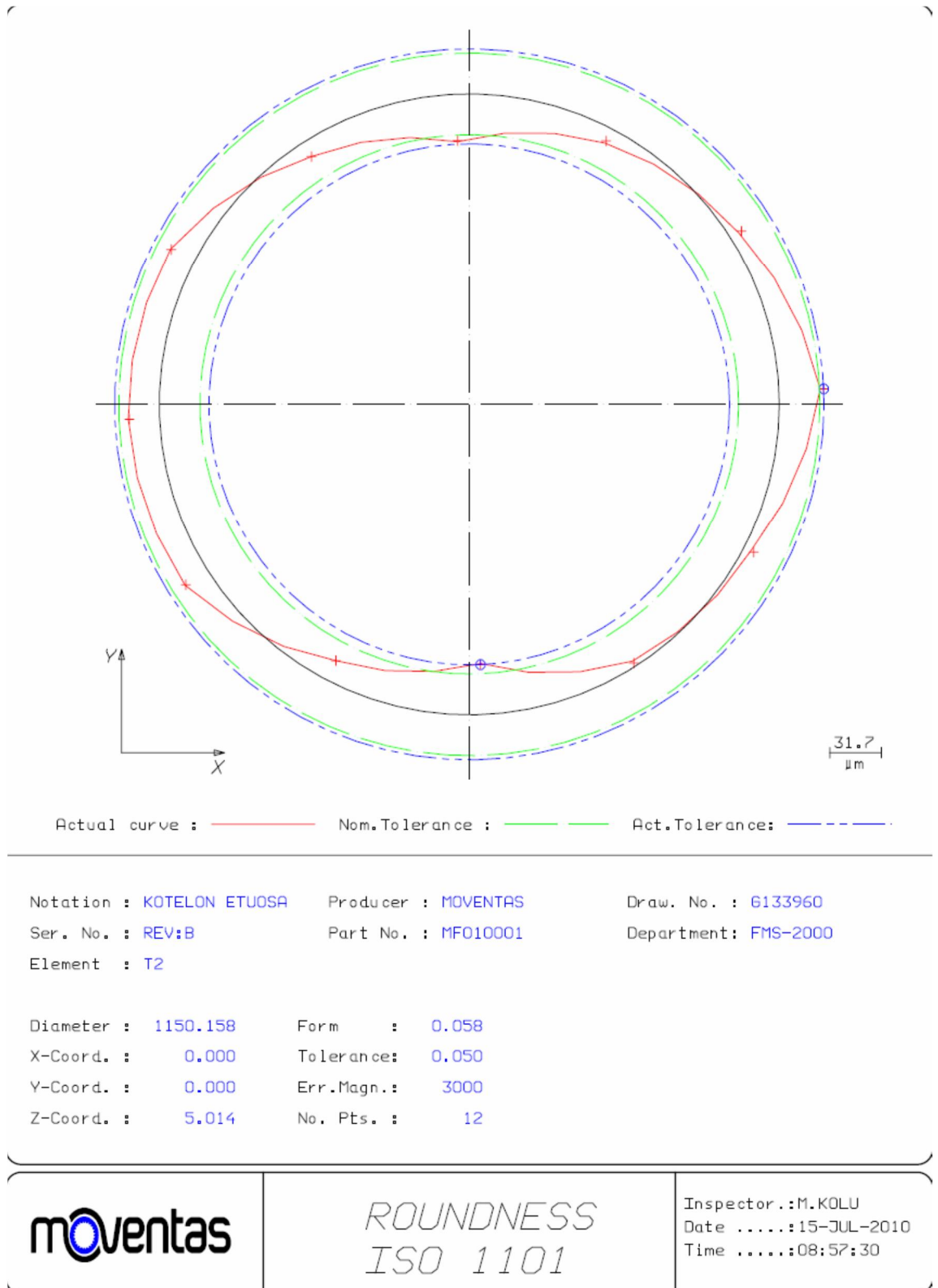
VP

Asteikko 100 µm

Liite 13. Asteikkovirhereikäpiirimittaus



## Liite 14. Asteikkovirhekoordinaattimittaus



## Liite 15. Asteikkovirhepaikoitustarkkuus

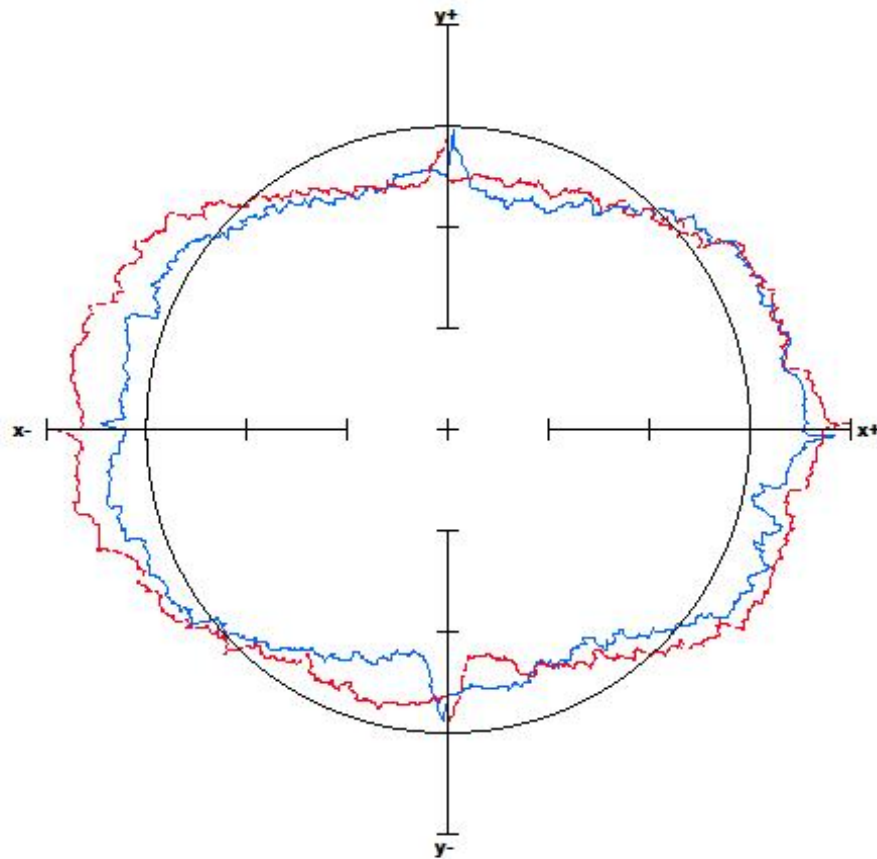


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	<i>moventas wind</i>	Taso:	<i>xy</i>
Kone:	<i>FMS-2000</i>	Syöttönopeus:	<i>800 mm/min</i>
Mittauseriä:	<i>FMS-2000</i>	Sauvan pituus:	<i>300,919 mm</i>
Päiväys:	<i>20.7.2010 9:08:57</i>	Paras säde:	<i>299,995 mm</i>
Mittaaja:	<i>Ahve,</i>	Otantanopeus:	<i>3,9062</i>
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	<i>553</i>
Mittauksen keskipiste:	<i>x:28 , y:622 , z:-181</i>	Kalibrointi:	<i>Kalibroitu</i>
Ympyrämäisyys LSC:	<i>18 µm</i>	Ympyrämäisyys MZC:	<i>17 µm</i>
Asteikkovirhe (x-y):	<i>39 µm/m</i>	Servon jättämä (x-y):	<i>5 %</i>
Kohtisuoruusvirhe:	<i>0 µm/m</i>	Satunnaisvirhe:	<i>1 µm</i>
		Suunnattu värähtely:	<i>0 µm (0)</i>
Akselin piikki x:	<i>2 µm</i>	Akselin piikki y:	<i>5 µm</i>
Käänneimitat x+:	<i>0 µm</i>	Käänneimitat y+:	<i>-2 µm</i>
Käänneimitat x-:	<i>0 µm</i>	Käänneimitat y-:	<i>-3 µm</i>
Jaksollinen virhe x:	<i>1 µm</i>	Jaksollinen virhe y:	<i>1 µm</i>
Nousu x:		Nousu y:	
Kiertymä virhe x:	<i>0 µm</i>	Kiertymä virhe y:	<i>2 µm</i>
Asteikkovirhe x:	<i>4 µm/m</i>	Asteikkovirhe y:	<i>-35 µm/m</i>
Tihkokitka x:	<i>1 µm</i>	Tihkokitka y:	<i>0 µm</i>
Suoruus x:	<i>1 µm</i>	Suoruus y:	<i>-1 µm</i>



Asteikko 10 µm



## Liite 16. Säädetty asteikkovirhe

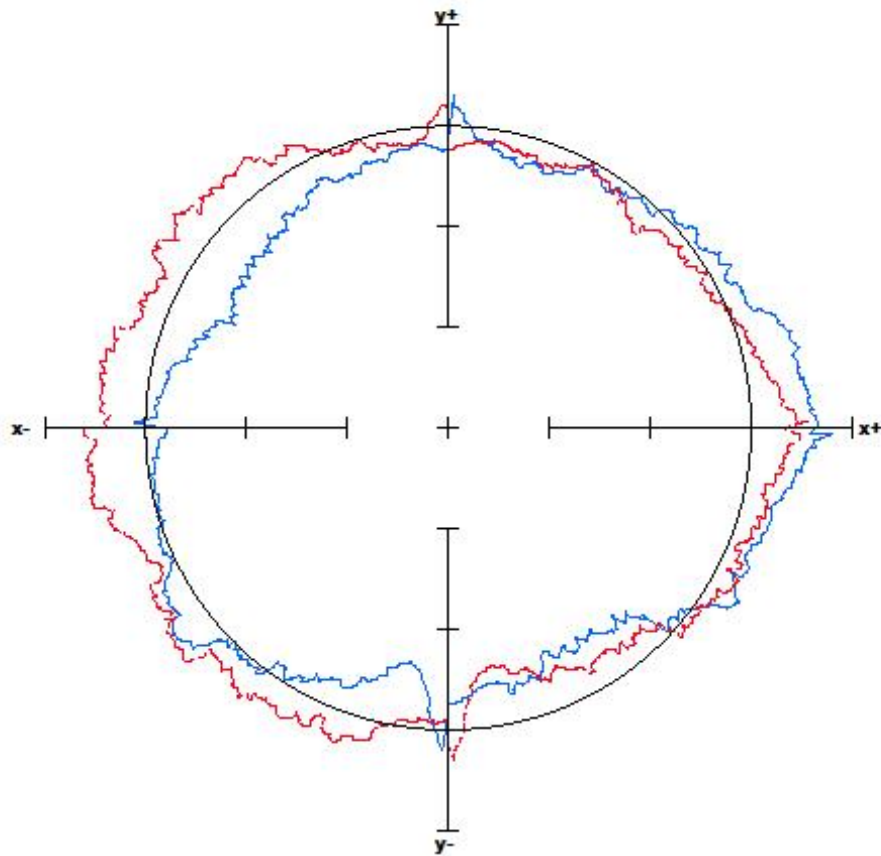


## PolarCheck

ISO 230-4

Versio: 2.3.2

Asiakas:	<i>moventas wind</i>	Taso:	<i>xy</i>
Kone:	<i>FMS-2000</i>	Syöttönopeus:	<i>800 mm/min</i>
Mittauseriä:	<i>FMS-2000</i>	Sauvan pituus:	<i>300,919 mm</i>
Päiväys:	<i>20.9.2010 9:31:50</i>	Paras säde:	<i>299,995 mm</i>
Mittaaja:	<i>Ahve,</i>	Otantompeus:	<i>3,9062</i>
Tiedoston nimi:		Pisteitä max:	<i>553</i>
Mittauksen keskipiste:	<i>x:0 , y:893 , z:-200</i>	Kalibrointi:	<i>Kalibroitu</i>
Ympyrämäisyys LSC:	<i>15 µm</i>	Ympyrämäisyys MZC:	<i>13 µm</i>
Asteikkovirhe (x-y):	<i>16 µm/m</i>	Servon jättämä (x-y):	<i>7 %</i>
Kohtisuorusvirhe:	<i>-7 µm/m</i>	Satunnaisvirhe:	<i>1 µm</i>
		Suunnattu värähtely:	<i>0 µm (0)</i>
Akselin piikki x:	<i>1 µm</i>	Akselin piikki y:	<i>5 µm</i>
Käänneimat x+:	<i>0 µm</i>	Käänneimat y+:	<i>1 µm</i>
Käänneimat x-:	<i>0 µm</i>	Käänneimat y-:	<i>-5 µm</i>
Jaksollinen virhe x:	<i>1 µm</i>	Jaksollinen virhe y:	<i>1 µm</i>
Nousu x:	<i>38 mm</i>	Nousu y:	
Kiertymä virhe x:	<i>-2 µm</i>	Kiertymä virhe y:	<i>2 µm</i>
Asteikkovirhe x:	<i>-10 µm/m</i>	Asteikkovirhe y:	<i>-26 µm/m</i>
Tihkokitka x:	<i>0 µm</i>	Tihkokitka y:	<i>0 µm</i>
Suoruus x:	<i>-4 µm</i>	Suoruus y:	<i>-5 µm</i>

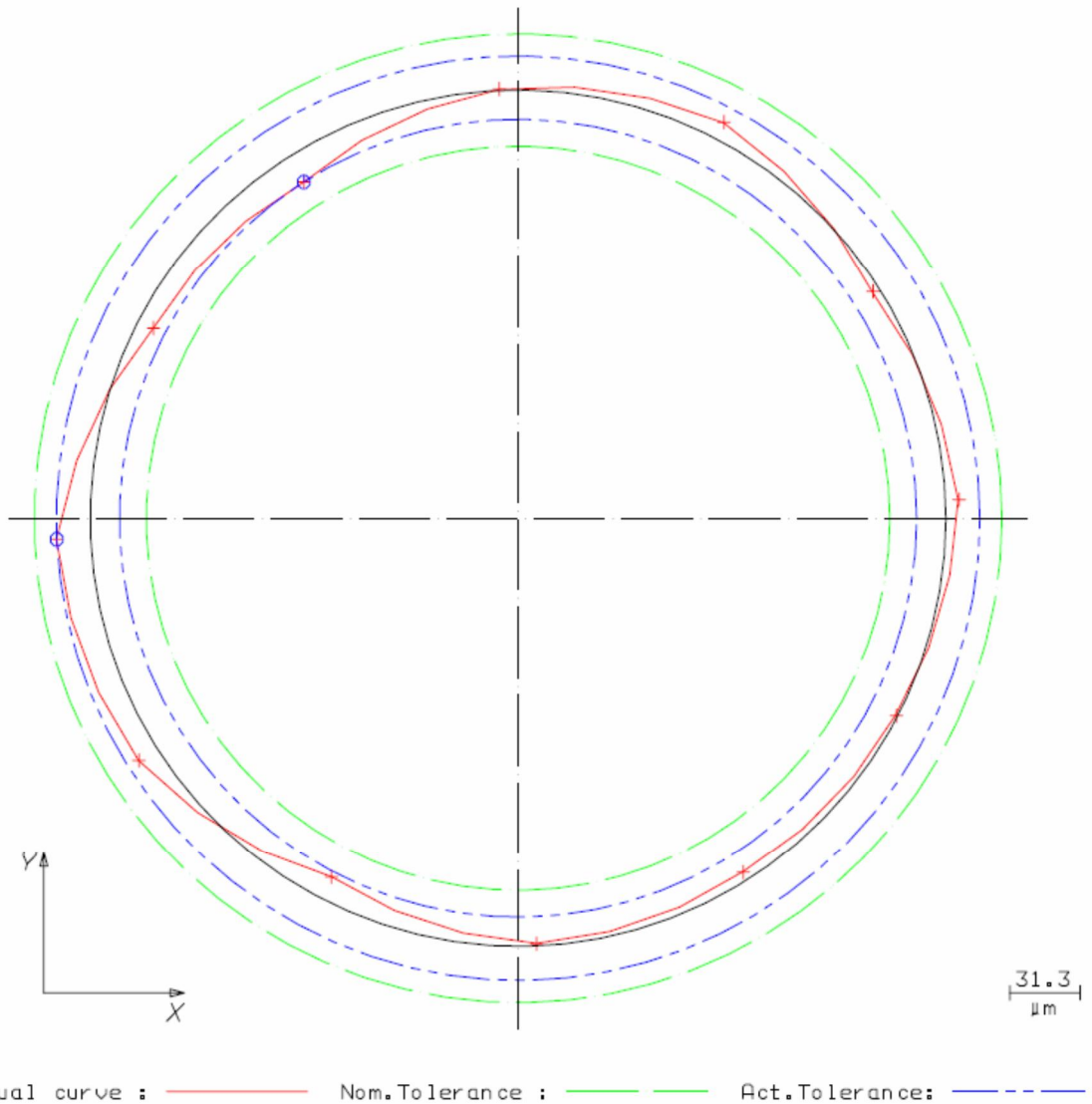


MP

VP

Asteikko 10 µm

## Liite 17. Asteikkovirheen tarkastusmittaus



Notation : KOTELON ETUOSA  
 Ser. No. : REV:B  
 Element : T2

Producer : MOVENTAS  
 Part No. : MFO10050

Draw. No. : 6133960  
 Department: FMS-2000

Diameter : 1150.061  
 X-Coord. : 0.000  
 Y-Coord. : 0.000  
 Z-Coord. : 5.026

Form : 0.028  
 Tolerance: 0.050  
 Err. Magn.: 3000  
 No. Pts. : 12

**moventas**

*ROUNDNESS  
 ISO 1101*

Inspector.: M.KIVINEN  
 Date .....: 22-SEP-2010  
 Time .....: 06:51:33