

Ville Lyyra

# Linssimoduulin polttovälin mittaaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

9.5.2017

Tekijä Otsikko	Ville Lyyra Linssimoduulin polttovälin mittaaminen
Sivumäärä Aika	36 sivua 9.5.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaajat	Toimitusjohtaja Juha Jääskeläinen Lehtori Heikki Paavilainen
<p>Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella Janesko Oy:lle mittauslaitteisto linssimoduulien polttovälin mittaamiseksi. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta havaita samalla laitteistolla mahdolliset epäpuhtaudet linssimoduulien sisällä sekä tarkastaa linssien samansuuntaisuus. Laitteisto suunniteltiin tuotannon tueksi laadunvalvontatyökaluksi.</p> <p>Insinööriyössä tutustuttiin mittaustekniikkaan ja virhelähteisiin, teollisuuskameroihin sekä autokollimaattorin toimintaan. Myös suunnitteluprojektin vaiheet läpikäytiin osana työtä.</p> <p>Mittauslaitteistolla mitattiin jo aiemmin testattuja kelpollisia, hylättyjä ja testaamattomia linssimoduuleja. Vertailemalla aiemmin tutkittuja linssimoduuleja toisiinsa saatiin arvioitua linssien kohtisuoruuksien vaikutus kuvan muodostumiseen. Mittauslaitteisto soveltui hyvin polttovälin mittaamiseen, ja sen suunnittelu katsottiin onnistuneeksi. Mittaustulokset taulukoitiin ja tulosten perusteella linssimoduulien laatu on polttovälin perusteella tasaista, mutta kuvan terävyys vaihtelee. Linssimoduulien polttovälin vaihtelu todettiin oletettua pienemmäksi.</p> <p>Insinööriyö täytti suurimmaksi osaksi sille asetetut tavoitteet. Epäpuhtauksia ei laitteistolla kyetty havaitsemaan vakuuttavasti, ja linssien kohtisuoruuden mittaamiseen nykyinen laitteisto soveltuu vain välttävästi.</p> <p>Jatkotoimenpiteinä tutkitaan linssimoduulien polttovälin vaihtelun vaikutusta refraktometrin toimintaan. Parannusehdotuksia laitteeseen on jo keksitty, ja tavoitteena on päästä numeerisesta mittauksesta eroon ja siirtä hyväksyty/hylätty -mittaukseen.</p>	
Avainsanat	Linssi, autokollimaattori, polttoväli

Author Title	Ville Lyyra Measurement of the Focal Length of a Lens Module
Number of Pages Date	36 pages 9 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Machine Automation
Instructors	Juha Jääskeläinen, Managing Director Heikki Paavilainen, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to design and build a measuring system for measuring the focal length of a lens module. This thesis was commissioned by Janesko Oy. Also the possibilities to identify impurities inside the lens module were studied. How to measure the parallelism of the lenses was examined as well. The set-up was designed to be a part of the quality control system. Metrology and sources of errors were investigated in the study. The measuring system was built round an industrial camera and an autocollimator and therefore their functions were explored. The phases of a design project were also included in this thesis.</p> <p>Firstly, the previously inspected, accepted and rejected, lens modules were analyzed with the measuring system. Secondly, the untested lens modules were compared to the previously inspected modules. By comparing the previously inspected items to the uninspected ones, it was possible to estimate the effect of the parallelism on the focal length.</p> <p>The measuring system functioned well and it was easy to carry out the measuring of the focal length. The measurement results were tabulated. According to the results, the overall quality of the lens modules is steady, but the sharpness of the image varies depending on the parallelism of the lenses. The variations in focal lengths were less than expected.</p> <p>The test results indicated that identifying impurities cannot be done accurately but measuring the parallelism of the lenses is sufficiently possible. The design of the measuring system created to measure focal lengths was finished. In future the next step is to investigate the effects of focal length changes on the operation of a refractometer. Suggestions for improvements to the system were made. In conclusion, the finished version of the measuring system should function on the basis of the accepted/rejected method.</p>	
Keywords	Lens, autocollimator, focal length

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tavoitteet	1
1.2	K-Patents Oy	2
1.3	Janesko Oy	3
1.4	Refraktometri	3
2	Linssit, välineistö ja mittaaminen	5
2.1	Linssit	5
2.1.1	Valon taittuminen linssissä	5
2.1.2	Linssisysteemit	6
2.2	Autokollimaattori	7
2.2.1	Rakenne	7
2.2.2	Toimintaperiaate	7
2.2.3	Möller-Wedel Optical -autokollimaattori	8
2.3	Teollisuuskamera	9
2.3.1	Teollisuuskameran ominaisuudet	10
2.3.2	IDS-teollisuuskamera	11
2.3.3	uEye Cockpit	12
2.4	Mittaaminen	13
2.4.1	Mittausvirheet	13
2.4.2	Mittausvirheisiin johtavat tekijät	14
2.4.3	Mittausepävarmuus	15
2.4.4	Polttovälin mittaaminen ja vaihteluväli	16
3	Mittauslaitteiston suunnittelu	17
3.1	Selvitystyö	18
3.2	Ongelmanratkaisun valinta	18
3.3	Suunnittelu	19
3.4	Toteutus	20
3.5	Projektin lopetus	20
3.6	Suunnittelutyön kuvaus	21

4	Mittauslaitteiston testaus	28
5	Tulokset	30
6	Yhteenveto	36
	Lähteet	38

## Lyhenteet

A/D	Analog to Digital. Analogisen signaalin muuttaminen digitaaliseksi.
AOI	Area of Interest. Kuva-analyysin kohteena oleva rajattu alue.
CAD	Computer Aided Design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CCD	Charge-Coupled Device. Valoherkkä kenno, jota käytetään kameroissa.
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor. Mikropiirien valmistustekniikka. Käytetään mikroprosessoreissa ja kuvakennoissa.
LED	Light Emitting Diode. Loistediodi.
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor. Puolijohteesta valmistettu kondensaattorityyppi.
USB	Universal Serial Bus. Standardoitu yleisesti tietokoneissa käytettävä liitäntätyyppi.

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tavoitteet

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella laitteisto linssimoduulien polttovälien mittaamiseksi. Tässä yhteydessä linssimoduulilla tarkoitetaan useista linseistä koostuvaa linssisysteemiä. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta käyttää samaa laitteistoa tarkastamaan linssien samanakselisuus ja -suuntaisuus sekä mahdolliset epäpuhtaudet linssimoduulien sisällä. Työssä suunniteltua laitteistoa tullaan käyttämään tuotannon laaduntarkastuksessa ja myöhemmin laitteistoa tullaan käyttämään linssimoduulien valmistuksesta vastaavalla alihankkijalla.

Tällä hetkellä linssimoduulien tarkastuksessa käytettävät menetelmät eivät ota kantaa linssimoduulien polttoväliin, vaan ainoastaan yhden linssin kohtisuoruuteen. Linssimoduulin toiminnan kannalta on tärkeää, että niiden valmistuksessa päästään tasaiseen laatuun ja virheettömyyteen. Aikaisemmat linssien testausmenetelmät ja tarkastukset ovat antaneet viitteitä siitä, että linssimoduulien laatu on epätasaista.

Työn tilaaja on Janesko Oy, joka on K-Patents Oy:n tutkimus- ja tuotekehitysosasto. Työssä tutkittavia linssimoduuleja käytetään K-Patents Oy:n valmistamissa refraktometreissa. Mittauslaitteisto tullaan rakentamaan yritykselle hankitun autokollimaattorin ja siihen liitetyn teollisuuskameran ympärille.

## 1.2 K-Patents Oy

K-Patents Oy on Vantaalla toimiva teknologia-alan yritys, joka valmistaa ja suunnittelee refraktometreja ja oheislaitteita prosessiteollisuudelle nesteiden in-line-mittaukseen. Näitä laitteita käytetään laajasti elintarvike-, öljynjalostus-, sellu- ja paperi- sekä raaka-aineteollisuudessa. Suurimpina asiakassegmentteinä ovat sellu- ja paperiteollisuus sekä elintarviketeollisuus. Yritys on perustettu vuonna 1978, jolloin se kehitti CCD (Charge-Coupled Device) -kameratekniikkaan pohjautuvan mittalaitteen. Vuonna 1981 K-Patents Oy lanseerasi ensimmäisen täysin digitaalisen refraktometrin, malliltaan PR-01. Tällä hetkellä K-Patentsin mallisarja on laajentunut merkittävästi, ja vuonna 2015 julkaistiin viides mallisarja PR-43. Kuvassa 1 on esiteltyä PR-23 -sarjan laitteita. K-Patents-refraktometreja on saatavilla laippa- ja pantaliitoksin varustettuina.



Kuva 1. K-Patents-refraktometreja (K-Patents 2014).

K-Patents Oy on kansainvälisesti toimiva yritys, jolla on lisäksi kaksi tytäryhtiötä: K-Patents Inc. Yhdysvalloissa sekä K-Patents Co., Ltd Kiinassa. K-Patents Oy:ssä työskentelee noin 30 henkilöä.

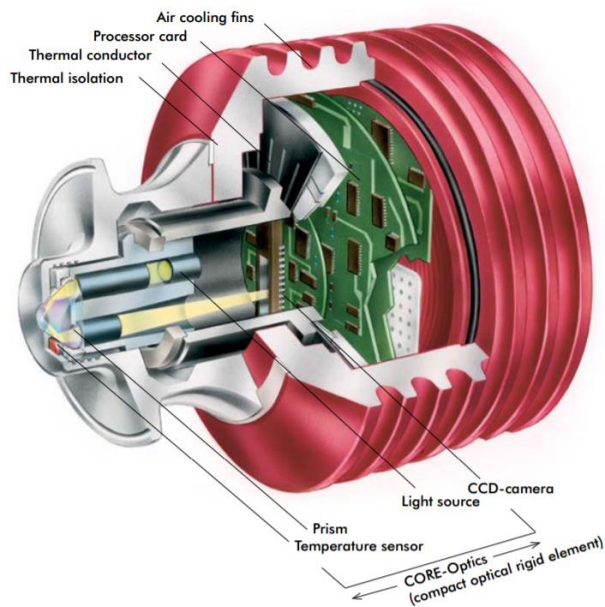


### 1.3 Janesko Oy

Janesko Oy vastaa K-Patents Oy:n tuotekehityksestä ja suunnittelusta. Janesko Oy:n tehtäviin kuuluvat mekaniikka-, sähkö- ja ohjelmistosuunnittelu. Työntekijöitä Janesko Oy:ssä on noin 10 henkeä.

### 1.4 Refraktometri

Figuran ja Teixeira'n (2007: 462) mukaan refraktometriä käytetään teollisuudessa nestemäiseen liuokseen liuenneen aineen pitoisuuden mittaamiseen. Pitoisuuden mittaamiseen voidaan käyttää myös muita menetelmiä, kuten virtaus-, ultraääni- ja induktiivisia sensoreita. Yksi yleisimmistä refraktometreilla tehtävistä mittauksista on sokeripitoisuuden mittaaminen liuoksesta. Refraktometreja on putkistoon asennettuja in-line- ja on-line-tyyppisiä sekä kannettavia niin kutsuttuja käsimalleja. Kuvasta 2 nähdään refraktometrin poikkileikkaus. Suoraan putkistoon asennettavien refraktometrien etuna on jatkuva ja välitön datavirta putkistosta, kun taas kannettavat mallit vaativat erillisen näytteen keräämisen prosessista.



Kuva 2. Refraktometrin halkaisukuva (K-Patents 2014: 5).

Linssimoduulit sijaitsevat refraktometrissa valonlähteen ja prisman sekä prisman sekä kamerakennon välillä (kuva 2). Linssimoduulien tehtävänä on kohdistaa valonsäteet tiettyyn kohtaan prismaa sekä kennoa.

Refraktometrin toiminta perustuu valon heijastumiseen liuksen ja refraktometrin prisman rajapinnasta. Snellin lain mukaan

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\eta_B}{\eta_A} = \frac{\sin \alpha_G}{\sin 90^\circ}, \quad (1)$$

josta

$$\eta_B = \eta_A * \sin \alpha_G \quad (2)$$

missä

$\alpha$  on tulevan valon kulma

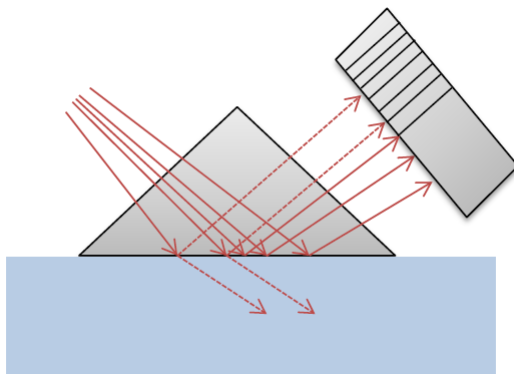
$\beta$  on taittuvan valon kulma

$\eta_A$  on aineen 1 taitekerroin

$\eta_B$  on aineen 2 taitekerroin

$\alpha_G$  on kokonaisheijastuksen rajakulma.

Heijastunut valo ohjataan refraktometrissa CCD-kameralle. Kameran kennolta luetaan kokonaisheijastuksen rajakulman arvo. Liusken ominaisuuksista johtuen sen taitekerroin muuttuu ja tällöin myös kokonaisheijastuksen rajakulma riippuu liuksesta (kuva 3).



Kuva 3. Kokonaisheijastuksen rajakulma.

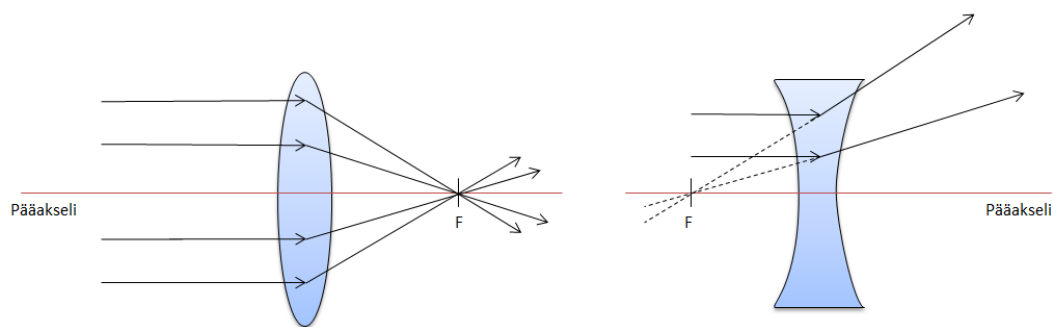
## 2 Linssit, välineistö ja mittaaminen

### 2.1 Linssit

Optiset laitteet pitävät sisällään usein linsskejä. Niitä käytetään niiden valon taittumisominaisuuksien hyödyntämiseksi. Useimmiten linssillä suurennetaan tutkittavaa kohdetta. Tavanomaisia optisia laitteita ovat esimerkiksi suurennuslasit ja silmälasit. Nämä ovat yhdestä linssistä koostuvia yksinkertaisia optisia laitteita. Mikroskoopit ja kamerat sisältävät useita linsskejä. Linssin materiaaleja ovat yleisesti eri lasilaadut sekä kirkkaat muovit.

#### 2.1.1 Valon taittuminen linssissä

Linssissä on kaksi valoa taittavaa pintaa. Tavanomaisissa linssissä pinnat ovat tasoa ja pallopintoja. Pallopintaiset linssit ovat kuperia, koveria tai näiden yhdistelmiä (kuva 4). Linssin toinen pinta voi myös olla tasopinta.



Kuva 4. Kupera ja kovera linssi.

Kupera linssi on keskeltä paksumpi kuin reunoilta. Kuperat linssit ovat valoa kokoavia ja ne taittavat valoa polttopisteeseen. Koverat linssit ovat reunoiltaan paksuja ja ohenevat keskeltä. Kovera linssi on hajauttava linssi.

Linssin polttoväliin vaikuttavat linssin tyyppi, linssimateriaalin taitekerroin ja linssin pallopintojen säteet. Polttopiste  $F$ , joka on polttovälin  $f$  etäisyydellä linssin keskustasta, sijaitsee linssin molemmilla puolilla. Koveralla linssillä polttopisteet ovat valepolttopisteitä.

Kuperan linssin polttopiste muodostuu siihen pisteeseen, missä linssin pääakselin kanssa samansuuntaiset valonsäteet taittuvat linssissä ja leikkaavat pääakselin.

Linssin kuvausyhtälön avulla voidaan esittää kuvan muodostuminen ohuessa linssissä:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (3)$$

missä

a on esineen etäisyys linssistä

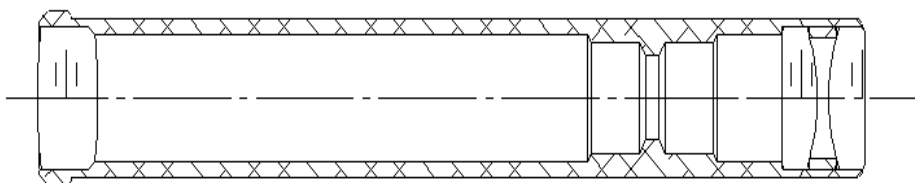
b on kuvan etäisyys linssistä

f on linssin polttoväli.

### 2.1.2 Linssisysteemit

Linssisysteemillä tarkoitetaan kahden tai useamman linssin kokonaisuutta. Linssisysteemeissä linssit on asetettu samalle pääakselille peräkkäin. Jokaisen linssin muodostamaa kuvaa voidaan käsitellä linssin kuvausyhtälön avulla erikseen. Linssisysteemeissä edellisen linssin kuva toimii seuraavan linssin esineenä. Kuvassa 5 on esitetty havainnollistava malli refraktometrin linssisysteemistä.

Työn kohteena oleva linssimoduuli on kuvan 5 kaltainen. Linssimoduulissa on yksi kaksoiskupera linssi sekä kaksi tasokuperaa linssiä. Tasokuperat linssit toimivat yhdessä ja niitä voidaan käsitellä yhtenä linssinä.



Kuva 5. Linssisysteemi.

## 2.2 Autokollimaattori

Autokollimaattori on optinen instrumentti, jota käytetään tasojen ja pintojen suoruuden mittaamiseen, kulmanmittaukseen sekä optiikan testaamiseen. Autokollimaattorien suosio näissä mittaustehtävissä johtuu niiden erittäin tarkasta mittauskyvystä. Niillä voidaan mitata jopa puolen kaarisekunnin kulmamuuutoksia. Yksi kaarisekunti vastaa  $1/3600$  astetta. (Smith 2016: 287.)

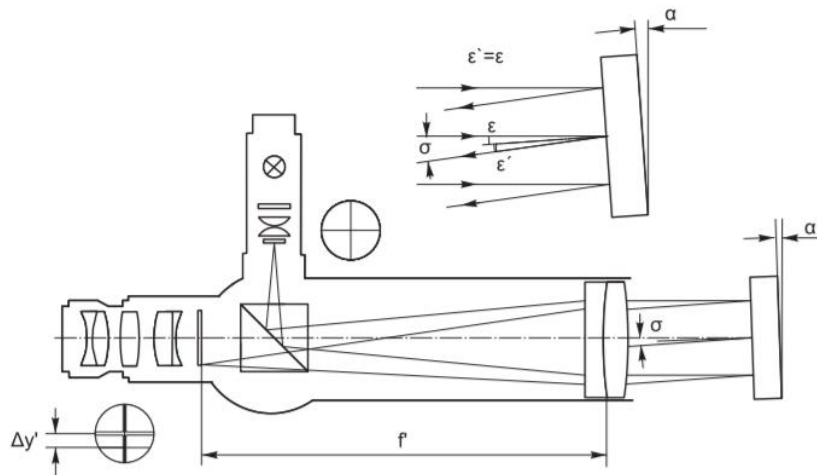
### 2.2.1 Rakenne

Autokollimaattorin mekaaninen rakenne perustuu hienotyöstettyyn optiikkaan. Autokollimaattori koostuu rungosta, valonlähteestä, säteenpuolittajasta, okulaarista sekä optiikasta. Okulaarin tilalle voidaan liittää rengas kameran kiinnittämistä varten. Käyttämällä kameraa autokollimaattorin yhteydessä voidaan tällöin hyödyntää konenäköä kuvan analysointiin ja tulkintaan. Kuvassa 6 on autokollimaattorin havainnollistava poikkileikkaus.

### 2.2.2 Toimintaperiaate

Kollimaatio tarkoittaa yhdensuuntaistamista. Voidaan sanoa yhdensuuntaisten valonsäteiden olevan projisoitu äärettömyyteen. Säteen matkalle asetettu peili heijastaa valon takaisin. Takaisin heijastunutta valoa verrataan lähetettyyn valoon ja näin saadaan selville mahdollinen poikkeama.

Kuvasta 6 nähdään valon kulkeutuminen autokollimaattorin sisällä. Valonlähteestä lähtevä valo kulkee säteenpuolittajalle. Se on optinen laite, jolla on kyky halkaista tuleva säde. Osa valosta läpäisee säteenpuolittajan ja jatkaa kohti tutkittavaa optiikkaa, kun taas toinen osa valosta taittuu säteenpuolittajassa okulaarille. Autokollimaattorin optiikalla tarkoitetaan akromaattista dublettia. Dubletti koostuu kahdesta linsistä, joilla on eri taitekerroin. Akromaattisessa dubletissa tapahtuu säteiden yhdensuuntaistaminen (Smith 2016: 287). Vertaamalla heijastunutta kuvaa vertailukuvaan pystytään mittaamaan mahdolliset suoruus- ja kulmapoikkeamat.



Kuva 6. Autokollimaattorin poikkileikkaus ja toimintaperiaate (Möller-Wedel Optical International 2013: 3.)

Kuvassa 6 käytetyt symbolit:

$\alpha$  on peilin poikkeama pystylinjasta

$\sigma$  on heijastuneen säteen ja autokollimaattorin optisen akselin välinen kulma

$f'$  on autokollimaattorin polttoväli

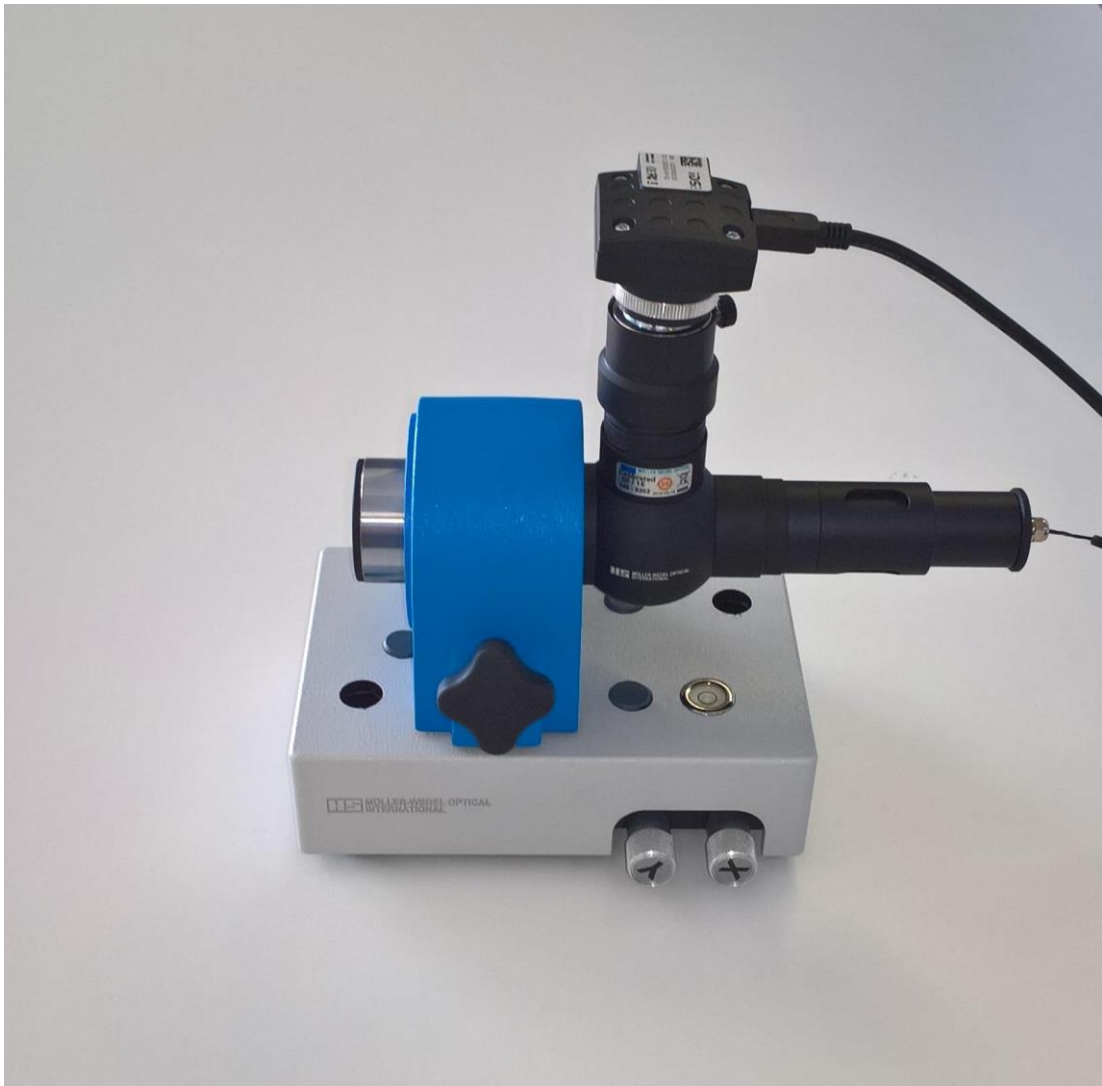
$\Delta y'$  on ristikon kulmapoikkeama

$\epsilon$  on peiliin tulevan valon kulma.

Valonlähteenä käytetään LEDejä, laseria tai tavallisia hehkulamppuja. Valonlähteen eteen kiinnitetään ristikko tai muu havainnollistava kuva riippuen sovelluksesta. Toinen kuva, vertailukuva, asetetaan okulaarin eteen. Autokollimaattorin optiikka on sijoitettu täsmälleen polttovälin päähän kuvasta. Kuvan 6 tapauksessa mitataan kahden ristikon viivojen väliset etäisyydet ja näin saadaan selville peilin kulmapoikkeama.

### 2.2.3 Möller-Wedel Optical -autokollimaattori

Kuvan 7 mukainen autokollimaattori on hankittu jo ennen insinööriyön aloitusta Janesko Oy:lle linssien testausta varten. Autokollimaattori on malliltaan AKR 90/40/14,7. AK tarkoittaa autokollimaattoria, R viittaa  $90^\circ$  katselukulmaan, 90 on polttoväli, 40 on autokollimaattorin putken halkaisija millimetreissä ja 14,7 kertoo okulaarin polttovälin.



Kuva 7. Möller-Wedel Optical -autokollimaattori ja IDS-teollisuuskamera.

Kyseinen autokollimaattori on varustettu kamerakiinnityksellä. Kameran avulla autokollimaattorilta saatava kuvainformaatio siirretään tietokoneen ruudulle. Autokollimaattori on varustettu kiinnitysjalalla, jossa on x- ja y-akselin säädöt vaaitusta varten.

### 2.3 Teollisuuskamera

Teollisuuskameroita käytetään monissa sovelluksissa teollisuuden ja automaatiotekniikan aloilla. Niitä hyödynnetään niin valvonta-, laaduntarkastus-, tunnistus- kuin analysointitehtävissä. Tavallisista digitaalikameroista ne eroavat niin ulkonäkönsä kuin käyttötapsansa perusteella.

### 2.3.1 Teollisuuskameran ominaisuudet

Teollisuuskameralla tarkoitetaan kameraa, joka rakenteensa ja ominaisuuksiensa puolesta täyttää teollisuusympäristön vaatimukset. Teollisuusympäristössä kameralta vaaditaan enemmän kuin kuluttajakameroilta johtuen ympäristöstä tai erikoisesta sovelluskohteesta johtuvista tekijöistä. Siksi teollisuuskameroilta vaaditaan usein pölyn- ja vedensuojausta, suurta kuvanopeutta, kenttäväyläliitääntää, värinän- ja lämpötilan sietoa sekä jäykkää kiinnitystapaa. (Batchelor 2012: 448–460.)

Kameran optiikalla tarkennetaan ja rajataan kuva tietylle alueelle. Kuvattaessa tarkasteltavia kohteita on tarpeetonta kuvata suuria alueita kohteen ulkopuolelta. Kuva-alueen järkevällä rajauksella kuvan analysointi on helpompaa ja nopeampaa, kun mahdollisia häiriötekijöitä mahtuu kuvaan vähemmän. Tavallisesti teollisuuskamerassa ei ole kameran runkoon kiinteästi asennettua optiikkaa, vaan optiikka hankitaan sovelluskohteen mukaan. (Batchelor 2012: 448–460.)

Kameran pääkomponentti on optiikan ohella kamerakenno. Kennon valintaa määrittää haluttu kuvakoko eli pikselimäärä, kuvanopeus sekä tarve värikuvulle. Yleensä teollisuuskäytössä riittää monokromaattinen eli harmaasävykuva. Markkinoilla vallitsee tällä hetkellä kilpailu kahden eri kennotyyppin, CCD ja CMOS, välillä. CCD eli Charge-Coupled Device ja CMOS eli Complementary Metal-Oxide-Semiconductor ovat molemmat piistä valmistettuja valoherkkiä sensoreita. Molemmissa kennoissa jokaisena kuvapisteenä toimii MOS-kondensaattori tai fotodiodi. Valon osuessa sensoriin varautuu siihen kapasitanssia. Kamerakennon varautumisesta eteenpäin on CCD- ja CMOS-kennojen toiminta erilaista.

Kun CCD-kennoilta luetaan kuvaa, pikselin varaus siirretään seuraavaan pikseliin. Varaus siirtyy näin koko pikselirivin päätyyn. Kertyneet kapasitanssit muutetaan rivin päässä jännitteeksi. Analogista jännitesignaalia ei voida sellaisenaan hyödyntää, joten se muutetaan A/D-muuntimella digitaaliseksi viestiksi. CMOS-kennossa jokaisella kuvapikselillä on oma A/D-muuntimensa. Jokaiselta kuvapisteeeltä lähtee johdin ulostulolle. Tämän ansiosta CMOS-kennon jokainen kuvapiste voidaan lukea yksittäin. CMOS-kenno kykenee tekemään itse kuvan prosessointitehtäviä, joten elektroniikka mahtuu yhdelle piirikortille, Toisin kuin CCD-kenno, joka tarvitsee erillisen kuvankäsittelykortin.



CMOS-kennon eduksi voidaan laskea myös vähäisempi virrankulutus.. CMOS-kennon lukunopeus on huomattavasti nopeampi kuin CCD-kennon, mutta CCD-kenno tuottaa paremman kuvanlaadun vähemmällä kohinalla. Kohinaa CMOS-kennossa aiheuttaa pienempi kuva-ala, sillä kuvankäsittelyyn tarvittavat transistorit tarvitsevat enemmän tilaa pikselin ympäriltä. (Batchelor 2012:490–491; Belbachir 2010: 38–39).

### 2.3.2 IDS-teollisuuskamera

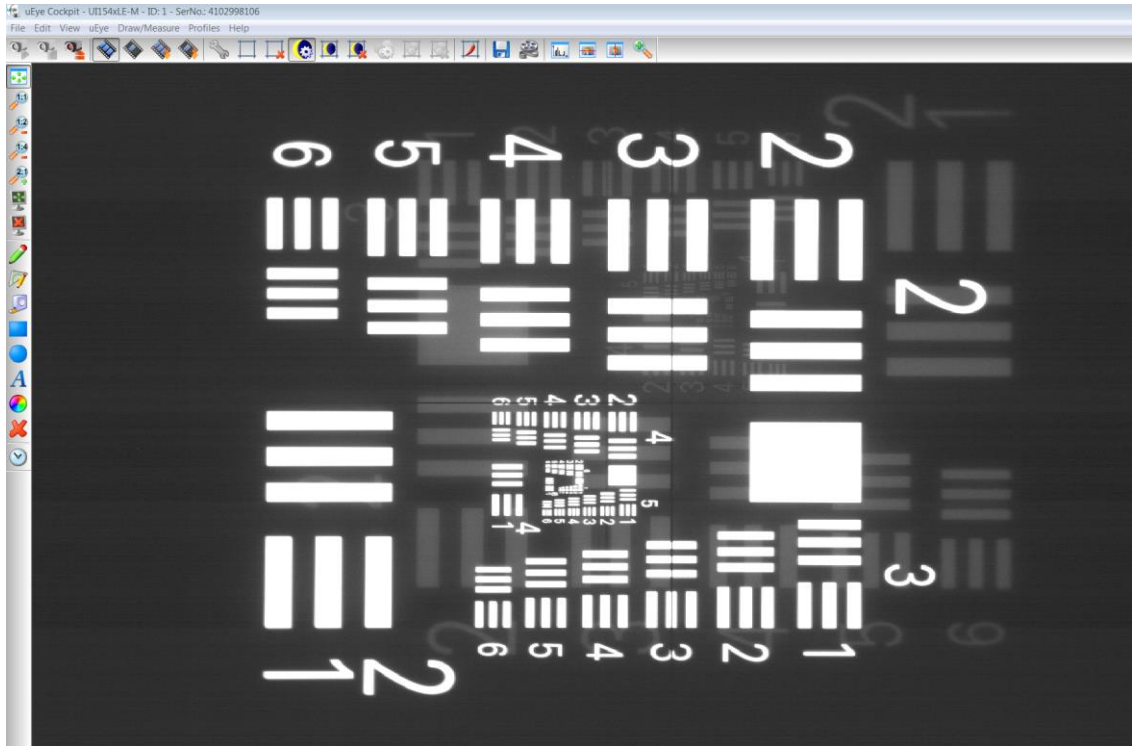
Tässä työssä käytettävä kamera on malliltaan UI-1540LE (kuva 8). Kamerassa on 1,3 megapikselin harmaasävy-CMOS-kenno, ja se kykenee kuvaamaan 25 kuvan sekuntinopeudella. Kamera kytketään USB 2.0 -liitännällä tietokoneeseen. Autokollimaattoriin kamera kiinnittyy C-mount -kiinnityksellä.



Kuva 8. IDS-teollisuuskamera (IDS GmbH 2017).

### 2.3.3 uEye Cockpit-sovellus

uEye Cockpit on IDS:n kehittämä kuvan analysointisovellus. Sovelluksessa on mahdollisuus käyttää useita AOI:ta (Area Of Interest), suodattaa värejä, suorittaa mittauksia ja tallentaa kuvia ja videoita kuvavirrasta. Analysointityökalut löytyvät kuvan yläpuolella olevasta työkalupalkista. Kuvassa 9 näkyvä kuvio on autokollimaattorissa käytettävä kuva.



Kuva 9. uEye cockpit -sovelluksen näkymä.

## 2.4 Mittaaminen

Mittauksen tarkoitus on varmistaa, että mitattava kappale on teknisten piirustusten mukainen. Samalla saadaan selville, kuinka paljon korjattavaa kappaleessa on. Mittaustuloksen luotettavuuden varmistamiseksi tulee ottaa huomioon kaikki mittaamiseen vaikuttavat seikat. Väärin tehty mittaus voi johtaa virheelliseen tulokseen, ja tätä kautta virheellinen kappale voidaan tulkita hyväksytyksi. (Keinänen & Järvinen 2014: 9.)

### 2.4.1 Mittausvirheet

Kaikki suoritettava mittaus pitää sisällään jonkin verran virhettä. Aina mittaustuloksia ei kuitenkaan tarvitse pitää virheellisenä. Mittausvirheellä tarkoitetaan mitattavan kohteen mitatun ja todellisen arvon eroa. Toistamalla mittaus voidaan arvioida mittausvirheen suuruutta. Mittausvirheet jaotellaan tyypillisesti systemaattisiin, karkeisiin ja satunnaisiin virheisiin. (Keinänen & Järvinen 2014: 95.)

#### Karkea virhe

Karkea virhe tarkoittaa mittaustapahtumassa ilmi tullutta käyttäjän tai mittalaitteen toiminnasta johtuvaa virhettä. Karkea virhe syntyy esimerkiksi silloin, kun mitta-asteikkoa luetaan väärin tai mittalaitteeseen iskee häiriö. Toisaalta karkeana virheenä pidettävää mittauspistettä ei saa hylätä, jos mittaustuloksen tavallisesta suuresti poikkeavan arvon syytä ei varmasti tiedetä. (Keinänen & Järvinen 2014: 95.)

#### Systemaattinen virhe

Systemaattinen virhe tarkoittaa Keinäsen ja Järvisen (2014: 95) mukaan mittavälineen tai mittausmenetelmän ominaisuuksista johtuvaa virhettä. Esimerkiksi lämpötila vaikuttaa mittavälineiden tarkkuuteen. Tällaisissa tilanteissa mittalaite tulee kalibroida.

## Satunnainen virhe

Satunnaista virhettä ei voida eliminoida mittaustapahtumasta. On havaittu, että satunnaisia virheitä saadaan enemmän, kun mittalaitteen tarkkuutta lisätään. Yleensä satunnainen virhe saadaan kumottua, kun mittaus toistetaan riittävän monesti. Kokeellisessa mittauksessa satunnaiselle mittausrvirheelle pystytään laskemaan arvio. (Keinänen & Järvinen 2014: 95.)

### 2.4.2 Mittausvirheisiin johtavat tekijät

Mittausvirheiden vähentämiseksi täytyy tuntea mahdolliset mittausrvirheen aiheuttajat. Nämä syyt voidaan luokitella eri kategorioihin niiden perusolemuksen mukaan.

#### Mittalaite

Mittalaitteesta johtuvat mittausrvirheet ovat yleisimmin mittalaitteen väärästä lukemisesta johtuvia virheitä. Mittalaitteen mittaviivat voivat olla huonosti näkyvissä tai muuten epäselviä. Virhettä voi syntyä lämpölaajenemisen johdosta, jolloin mittalaitteen tulos eroaa todellisesta. Mittalaite voi myös kulua jolloin tulos on virheellinen. Mittalaitteen suositeltuja mittausrvoimia tulee noudattaa. Väärällä mittausrvoimalla mittalaite voi tuottaa virheellisen tuloksen esimerkiksi mittakärjen taipuessa.

Mittalaitteesta johtuvia mittausrvirheitä ehkäistään parhaiten käyttämällä mittalaitetta huolellisesti. Kalibrointi tulee suorittaa säännöllisesti tai silloin, kun epäillään tarvetta kalibroinnille.

#### Mittaaja

Mittaajan toimintakyvyllä ja -tavoilla on merkittävä rooli mittauksen onnistumisessa. Huono näkökyky vaikeuttaa mittaustuloksen lukemista mittalaitteesta. Puutteellinen ammattitaito yhdessä huonojen mittausrhojeiden kanssa kasvattaa mittausrvirheen riskiä. Mittaaja tulisi siksi aina perehdyttää mittaustehtävään ja mittausrhojeiden tulee olla aina saatavilla. Kiireessä suoritettu mittaus voi aiheuttaa lukuvirheen varsinkin käytettäessä mittaviivoilla varustettuja mittausrvälineitä. Mittaajan täytyy tuntea mittausrmenetelmä ja -välineistö, jotta mittaustuloksesta saadaan luotettava.

## Työkappale

Työkappaleen ominaisuuksista johtuvista mittausvirheistä on hankala päästä eroon. Työkappaleesta johtuvia virheitä voivat aiheuttaa pehmeä tai huokoinen materiaali tai epätasainen pinnanlaatu, jolloin mittakärki saattaa upota kappaleen pintaan. Mitattavan kappaleen muodosta johtuen mittaus voi olla vaikeasti suoritettavissa esimerkiksi ahtauden vuoksi. Likainen kappaleen pinta tai mitattavan kappaleen suuresti poikkeava lämpötila ympäristöstä tuottavat virhettä mittaukseen. Parhaiten työkappaleen virheitä voidaan vähentää valitsemalla kappaleen mittaamiseen parhaiten soveltuva mittaväline.

## Ympäristötekijät

Ympäristötekijät vaikuttavat välillisesti mittaustulokseen. Mittausympäristön vakioinnilla sekä sopivalla valaistuksella luodaan onnistunut mittaustapahtuma. Varjot ja heijastukset voivat vaikeuttaa mittalaitteen lukemista. Mittausympäristön väärä lämpötila vääristää mittaustuloksia varsinkin tarkkoja mittauksia tehtäessä johtuen kappaleiden lämpölaajenemisesta. Lisäksi kappaleen tulee pysyä paikoillaan mittaamisen ajan, jolloin mittaus voidaan suorittaa huolellisesti.

### 2.4.3 Mittausepävarmuus

Yksikään mittaustulos ei ole koskaan absoluuttisesti oikein, vaan arvio mitattavasta arvosta. Jos mittausvirheen suuruus tunnettaisiin, se tietenkin korjattaisiin. Mittaustapahtumaan kuitenkin liittyy edellisissä kappaleissa esiintyviä riskitekijöitä, joiden olemassaoloa ei voida täysin eliminoida. Satunnaiset ja systemaattiset virheet yhdessä ovat toisistaan riippumattomia, mutta sopivasti summautuneena jo merkittäviä virheitä mittaustapahtumassa. Mittausepävarmuudella tarkoitetaan arviota mittausvirheen suuruudesta. Mittausepävarmuus on siis parametri, joka kuvaa mittaustuloksen oletettua vaihtelua. (JCGM 2008: 5–6; Keinänen & Järvinen 2014: 98.)

#### 2.4.4 Polttovälin mittaaminen ja vaihteluväli

Polttovälin mittaamisessa vaihtelua mittaustuloksissa aiheuttavat mittaajan lisäksi valmistustoleranssien sallimat poikkeamat. Linssimoduuleissa muutoksia vaihteluväliin aiheuttavat linssiputken koneistuksien toleranssit, lähinnä linssien olakkeiden koneistusten sijainnit suhteessa toisiinsa. Linssien valmistaja lupaa linseille  $\pm 1$  % toleranssin polttovälille. Taulukkoon 1 on koottu laskennalliset tulokset linssien valmistustoleranssien vaikutuksesta kuvan muodostamiseen. Taulukosta nähdään, että suurimmat vaihtelut linseissä aiheuttaa siirtolinssin valmistustoleranssi. Yhden prosentin muutos polttovälissä aiheuttaa noin 6 mm:n eron verrattuna tavoitetilanteeseen. Tavoite-sarakkeessa on laskettu kuvan sijainti  $b$  käyttäen haluttua linssin polttoväliä. +1 % -sarakkeessa lasketaan suurimmalla sallitulla polttovälillä ja -1 % -sarakkeessa pienimmällä. Kohdassa 1 on tarkasteltu vain siirtolinssin vaikutusta muodostettavan kuvan sijaintiin. Kohdassa 2 huomioidaan myös linssiparin valmistustoleranssit.

Laskennallinen linssisysteemin tuottaman kuvan paikan vaihteluväli on siis 134,25–147,78 mm. Lisäksi linssimoduulin putkesta muodostuu yhteensä  $\pm 0,1$  mm:n toleranssi. Muut mittaustulokseen vaikuttavat tekijät jätetään laskujen ulkopuolelle. Laskennalliset tulokset eivät kuitenkaan ole absoluuttisia tuloksia. Laskuissa on käytetty niiden yksinkertaistamiseksi linssien ensimmäisen kertaluvun yhtälöä

Taulukko 1. Kuvan muodostuminen linssimoduulissa

## Siirtolinssin kuvan paikka

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow b = \frac{a * f}{a - f}$$

1. Huomioitu vain siirtolinssin toleranssi ±1 %		tavoite	+1 %	-1 %
	a	46,59	46,59	46,59
	b	<b>140,74</b>	<b>146,58</b>	<b>135,25</b>
	f	35,00	35,35	34,65

2. Huomioitu kaikkien linssien toleranssit ±1 %		tavoite	+1 %	-1 %
	a	46,59	46,47	46,71
	b	<b>140,74</b>	<b>147,78</b>	<b>134,25</b>
	f	35,00	35,35	34,65

jossa a muodostuu siirtolinssin ja linssiparin etäisyydestä. Lisäksi a:han vaikuttaa linssiparin valmistustoleranssi.

Linssiparin kuvan sijainti (polttoväli)  
verrattuna keskitasoon

tavoite	f+1 %	f-1 %
12,00	12,12	11,88

### 3 Mittauslaitteiston suunnittelu

Suunnitteluprojekti lähtee aina liikkeelle tarpeesta tai ongelmasta. Projektilla on selkeä alku, sillä on tavoite, lopputuotteena tulos tai tuloksia, ja sen kesto on rajallinen. Tämän insinööriyön suunnitteluprojektin tarpeena on linssimoduulin polttovälin selvittäminen. Tarve liittyy laadunvalvontaan ja tarve on syntynyt aikaisempien linssin testauksessa käytettyjen menetelmien pohjalta. Ennen projektin aloittamista on hyvä kirjata ylös syy projektin aloittamiselle, aikataulu, työryhmä, budjetti sekä muut mahdolliset kriteerit. Karlssonin ja Marttalan (2001: 16–17) mukaan projekti alustetaan puitesuunnitelmalla, johon edellä mainitut tekijät kirjataan. Projektin onnistunut läpivienti sisältää viisi eri vaihetta: selvitystyö, ongelmanratkaisun valinta, suunnittelu, toteutus ja projektin lopetus (kuva 10).



Kuva 10. Suunnitteluprojektin vaiheet.

### 3.1 Selvitystyö

Projektin alkuvaiheessa on tärkeää kirjata ylös kaikki vaatimukset ja näkökulmat, jotka tulee ottaa huomioon suunnitteluprojektissa. Tässä vaiheessa projektia ei mietitä vielä ratkaisua, vaan pohditaan ongelmaa ja siihen liittyviä rajoitteita sekä analysoidaan niitä. Kattavalla taustatiedon hankinnalla luodaan pohja ongelman määrittelyn tueksi. Selvitysvaiheessa tulee myös määrittää projektiorganisaatio, asiakas sekä projektin tarkoitus. Selvitystyön lopputuloksena saadaan ongelma-analyysi. Sen tarkoituksena on päämäärän lisäksi määrittää projektin riskit ja vaikeudet. Analyysi siis yhdistää tiedon, teorian ja ongelman. Selkeän päämäärän asettaminen auttaa asettamaan realistiset tavoitteet projektille. (Karlsson & Marttala. 2001: 21–30.)

### 3.2 Ongelmanratkaisun valinta

Selvitystyön jälkeen projektissa on aika valita suunta, mitä kohti ryhdytään pyrkimään. Ongelmanratkaisun valinnassa käytetään apuna selvitystyössä syntyneitä taustatietoja. Tässä vaiheessa huomioidaan jo yksityiskohtia, millä on vaikutuksia lopputulokseen. Ongelmanratkaisua etsiessä on ehdottoman tärkeää, ettei valita ensimmäistä konkreettista ratkaisua, vaan annetaan kaikille esiin tulleille vaihtoehdoille tilaa. Vaihtoehtojen tuottaminen on luova prosessi. Tavoitteena tuotosprosessille on



vaatimusmäärittelyyn hyväksyttävästi vastaavien vaihtoehtojen esilletuominen. Aivoriihet ovat yleisesti hyväksi havaittuja tapoja, joissa eri taustan omaavat jäsenet yhdessä keksivät ideoita. Aivoriihen onnistumiseksi on tärkeää, että aivoriihen taustatiedot ovat saatavilla muutamaa päivää etukäteen. Tällöin ajatusprosessi on jo virittynyt ja ideoita on helpompi tuoda ilmi. (Karlsson & Marttala. 2001: 38–39.)

### 3.3 Suunnittelu

Ongelman syvällisen tuntemisen ja siihen liittyvän ratkaisun valinnan jälkeen otetaan selvää, mitä ratkaisun tuottamiseksi on tehtävä. Tässä vaiheessa projektia on oltava selvää, mikä on kunkin projektin jäsenen tehtävä, vastuut ja valtuudet. Jo tässä vaiheessa projektia on erilaisia dokumentteja kertynyt jo paljon. Niiden arkistointi ja hallinta on tärkeää projektinhallinnan kannalta. Dokumentteja tullaan muokkaamaan tyypillisesti usein projektin aikana ja tästä syystä tulisi dokumentit nimetä selkeästi muokkauksen jälkeen. (Karlsson & Mattila. 2001: 55–70.)

Suunnitteluvaiheessa on tarpeen tehdä niin kutsuttu toteutussuunnitelma tai projektisuunnitelma. Toteutussuunnitelma kuvaa projektin toteuttamisen kulkua. Toteutussuunnitelmaan voidaan kirjata muun muassa

- tavoite ja toivottu tulos
- rajaukset ja menetelmät
- aikataulu
- budjetti
- seurantapisteet
- riskianalyysi.

Projektisuunnitelman aluksi kuvataan projektin tausta: miksi projekti tehdään ja kenelle. Rajaukset kirjataan ylös, jotta projektin tavoitteesta saadaan selkeä kuva. Ennen kuin budjetti voidaan määritellä, on projektista oltava mahdollisimman realistinen aikataulu. Ainoastaan silloin voidaan antaa luotettava arvio eri vaiheisiin käytetystä rahasta. Seurantapisteet taasen auttavat projektia pysymään aikataulussa. (Silfverberg: 36–38).

### 3.4 Toteutus

Toteutusvaiheessa projekti suoritetaan projektisuunnitelman mukaisesti. Projektin jäsenet hoitavat suunnitellut tehtävät aikataulun mukaisesti. Tarvittaessa projektisuunnitelmaa voidaan vielä tarkentaa toteutuksen edetessä.

### 3.5 Projektin lopetus

Projektin täytettyä sille asetetut kriteerit ja saavutettua päämääränsä sekä tavoitteensa projekti on päättynyt. Projektin lopetusta edeltää myös projektin tilaajan hyväksyntä projektin lopputuloksesta. Projektin loputtua tehdään myös loppuraportti. Raporttiin kirjataan tiivistelmä siitä, mitä tehty, lopullinen budjetti sekä mahdolliset jatkotoimenpiteet ja parannusehdotukset. Projektin päätyttyä on hyvä arvioida projektin suoritus ja miettiä, mitä parannettavaa jäi. (Karlsson & Mattila. 2001: 97–99.)

### 3.6 Suunnittelutyön kuvaus

Insinööri työ lähti liikkeelle kirjaamalla ylös vaatimukset, jota laitteelle asetettiin. Tässä projektissa tavoitteeksi asetettiin mittalaitteen liittäminen autokollimaattorin yhteyteen. Projektia varten pidettiin palaveri, jossa päätettiin laitteistolle asetettavat vaatimukset. Vaatimuksia, jotka nousivat esiin tavoitteen saavuttamiseksi:

- mittauksen tarkkuus  $\pm 1$  mm
- nopea mittaus
- digitaalinen mittaus
- mittalaitteessa kytkentämahdollisuus tietokoneeseen
- yksinkertainen rakenne
- linssimoduulin helppo vaihto
- mittaustuloksen riippumattomuus mittauksen suorittajasta
- roskien tunnistus linseistä mittaustapahtuman yhteydessä
- linssin kohtisuoruuksien havaitseminen.

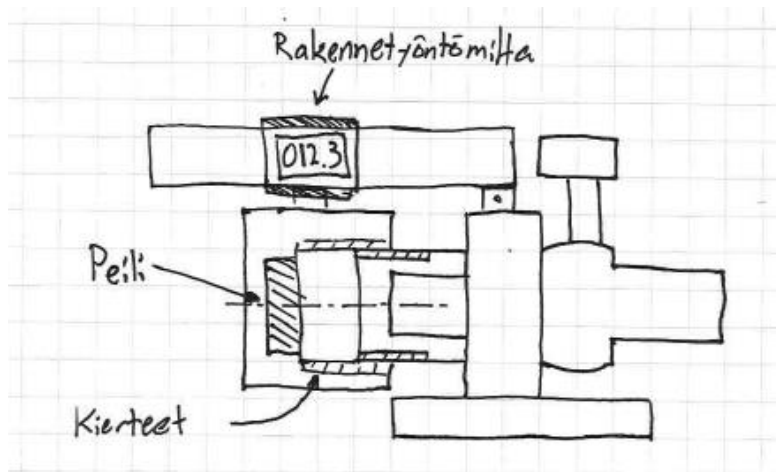
Vaatimusten perusteella ryhdyttiin selvittämään laitteiston mahdollisia toteutustapoja. Jo tässä vaiheessa oli selvää, että mittaustapa tulee olemaan lineaarimittaus. Muita ennakkovaatimuksia mittaustavalle ei asetettu. Tämän johdosta edes mittalaitteen tyyppin valintaa ei voitu suorittaa, ennen kuin koko mittausprosessi oli päätetty.

Ensimmäisenä otettiin selvää markkinoilla olevista valmiista linssien tutkimiseen soveltuvista mittauslaitteistoista. Markkinatutkimuksen tarkoitus oli hahmottaa eri toteutusvariaatioita, joiden pohjalta voitaisiin alkaa pohtimaan mahdollisia toteutustapoja. Markkinoilla olevien mallien skaala onkin varsin laaja ja toteutustapoja on useita. Useimmissa tapauksissa peili on sijoitettu kiinteästi laitteeseen ja autokollimaattori toimii liikkuvana elementtinä. Markkinatutkimuksen johdosta nousi esiin myös vaihtoehto, että hankitaan suoraan valmis polttovälin mittaamisen soveltuva laitteisto. Suunnittelutyötä päädyttiin kuitenkin jatkamaan jo hankitun autokollimaattorin parissa.

Valmiiden mittauslaitteistojen lisäksi selvitystyön alle otettiin mittalaitteiden tyypit. Rakennemitta on yleisesti saatavilla oleva työntömitta muistuttava mittaväline ja siitä syystä se valikoitui tarkempaan tutkailuun. Siinä ei kuitenkaan ole leukoja vaan

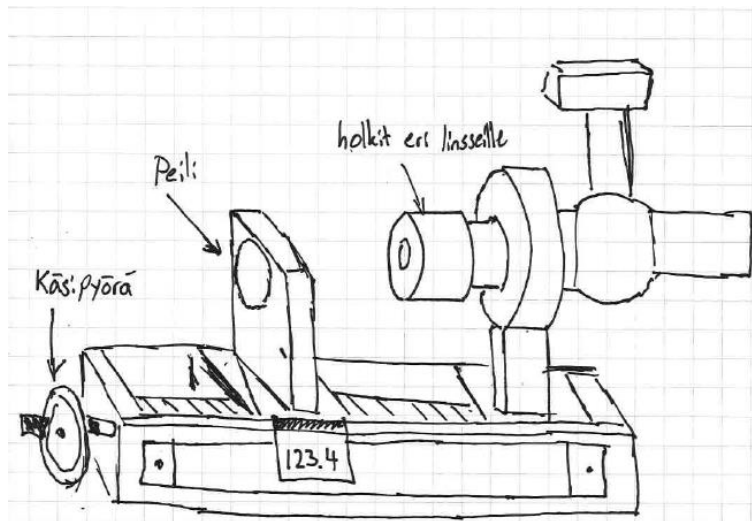
kiinnitysreiät rungolle sekä kiinnitys mittavälineen kelkasta. Toiseksi vartenotettavaksi mittavälinevaihtoehdoksi löytyi korkeudenmittauslaite. Se on jalalla varustettu vertikaalisesti liikkuva mittaväline. Se koostuu yhdestä tai kahdesta pystysuorasta johteesta ja johteeseen kiinnitetystä mittauspäästä. Mittaväline on joko mekaaninen tai digitaalinen. Mittauspäähän kiinnitetään sovellukseen sopiva mittauskärki tai mittakello. Korkeudensäätö tapahtuu joko käsipyörästä pyörittäen tai kädellä siirtäen.

Insinööriyön ideointi aloitettiin luonnostelemalla mahdollisia ratkaisuja. Osa luonnoksista perustui markkinoilla oleviin tuotteisiin ja osa oli täysin uutta muotoilua. Kuvassa 11 on yksi ensimmäisistä luonnoksista, joita mittauslaitteistosta piirrettiin. Tässä luonnoksessa autokollimaattoriin liitetään rakennemitta. Mitattava linssimoduuli asetetaan autokollimaattorin putkeen kiinnitettyyn holkkiin. Kierteillä liikkuvaan ulompaan kuoreen on sisäpinnalle kiinnitetty peili. Peilin etäisyyttä linssimoduulista säätämällä selvitetään sen polttoväli.



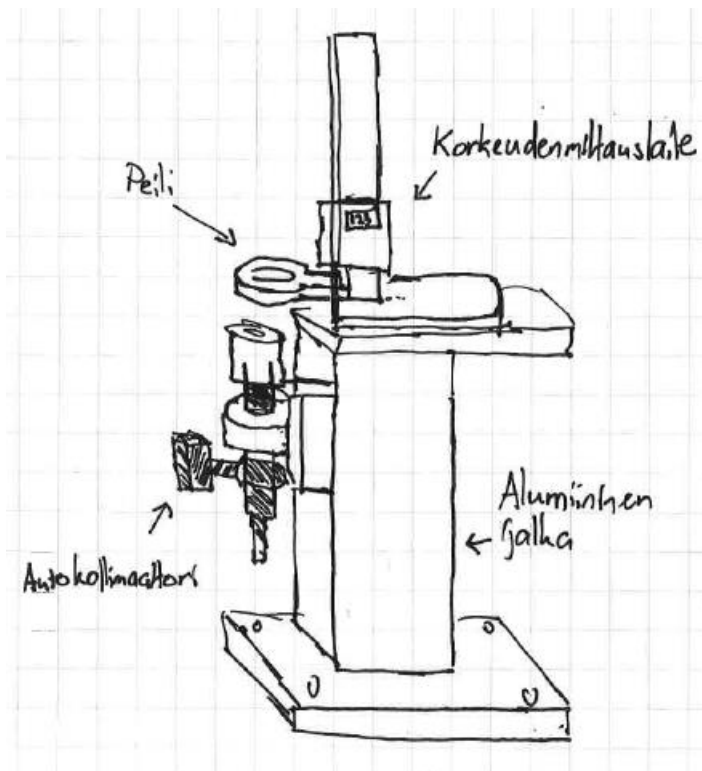
Kuva 11. Luonnos mittaustavan toteutuksesta.

Hahmotelmia pyrittiin tuottamaan useita erityyisiä. Näin varmistuttiin siitä, että riittävän monta vaihtoehtoa ja hyvää ratkaisua tulee esille. Kuvassa 12 esiintyy jo edellistä mallia hieman teknisempi laite. Tässä versiossa peiliä siirretään käsipyörän avulla. Autokollimaattori on kiinnitetty jalalla kiinni laitteen runkoon. Samassa rungossa on kiinni rakennemitta, joka on kiinnitetty myös peilin kiinnitysalkaan. Näin peilin sijainti voidaan lukea rakennemitasta.



Kuva 12. Käsipyöräkäyttöinen mittausväline.

Yksi vaihtoehdoista (kuva 13) käyttää mittavälineenä korkeudenmittauslaitetta ja on siksi erilainen verrattuna muihin mittaustapoihin. Tässä versiossa autokollimaattori kiinnitetään pystyasentoon. Peili kiinnitetään korkeudenmittauslaitteen mittauspäähän. Siirtämällä mittauspäätä sopivalle etäisyydelle linssimoduulista löytyy lopulta linssimoduulien polttopiste. Polttovälin suuruus luetaan korkeudenmittauslaitteen näytöltä.



Kuva 13. Korkeudenmittauslaitteeseen kiinnitetty autokollimaattori.

Seurantapalaverissa pohdittiin vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia yhdessä muitten suunnittelijoiden kanssa. Mitään vaihtoehtoa ei tyrmätty suoralta kädeltä, vaan kaikki vaihtoehdot käsiteltiin tasapuolisesti. Kuvan 11 mallissa hyvänä pidettiin kierteiden avulla tapahtuvaa mittausta, jolloin saavutetaan hyvä tarkkuus mittauksessa. Toisaalta juuri kierteiden takia mittaustapahtuma on hidas: päästäkseen polttovälin lähelle tulee kuorta kiertää useita, jopa kymmeniä kierroksia.

Kuvan 12 malli on avara ja sitä on helppo käyttää. Linssimoduulin vaihto on rakenteen ansiosta helppoa. Rakenteen monimutkaisuus tekee siitä kuitenkin kalliin, koska koneistettavia osia tulisi olemaan paljon. Kuvan 13 luonnos arvioitiin kaikkein kehityskelpoisimmaksi. Rakenne on pelkistetyt yksinkertainen. Sen ansiosta kustannukset pysyvät maltillisina. Parhaana ominaisuutena koettiin korkeudenmittauslaitteen käyttö. Se on rakenteeltaan tukeva, ja se on varustettu käsikammella. Näin korkeudensäädöstä saadaan tarkka. Tässä vaiheessa näytettiin vihreää valoa kuvan 11 mukaiselle vaihtoehdolle. Jo aiemmassa vaiheessa projektia tiedusteltiin mittavälineiden hintatasoa. Korkeudenmittauslaitteen hinta ei ollut merkittävästi kalliimpi kuin rakennetyöntömitan.

Laitteisto suunniteltiin vaatimusmäärittysten perusteella. Suoranaista budjettia laitteelle ei asetettu, mutta kustannukset tuli pitää kohtuullisina. Aluksi oli tarkoitus tutkia myös muita linssimoduuleja, mutta tehtävä rajattiin koskemaan vain pitkän refraktometrin toista linssimoduulia.

Valmistumisaikataulu arvioitiin taulukon 2 mukaiseksi. Projekti lohkottiin vaiheisiin, jotka ovat selkeästi erillään toisistaan. Seurantapisteeksi otettiin vaihe 5, jolloin läpikäytiin jo saadut tulokset laitteen toiminnasta ja havainnoista.

Taulukko 2. Insinööriyön aikataulu.

		arvio
1	Aloituspalaveri	30.1.2017
2	Mittaväline valittu ja tilattu	3.3.2017
3	Kiinnikkeen suunnittelu valmis ja tilattu	17.3.2017
4	Linssin holkkien suunnittelu valmis ja tilattu	24.3.2017
5	Laite kokoonpantu ja testattu	7.4.2017
6	Käyttöohjeet tehty ja opastettu käyttö tuotannolle	21.4.2017

Suunnitteluvaiheessa ensimmäisenä tehtävänä oli löytää sopiva korkeudenmittauslaite. Korkeudenmittauslaitteita etsittiin kokoluokasta 0—300 mm. Näitä mittavälineitä ei varsinaisesti ole suunniteltu kannattelemaan kuormaa, kuten tässä tapauksessa peiliä ja sen pidikettä. Mittavälineiden jälleenmyyjiltä tiedusteltiin korkeudenmittauslaitteen kuormankantokykyä. Arvioiden perusteella niiden jarru todettiin riittävän tehokkaaksi kannattelemaan tarvittavia mittauslaitteiston osia.

Korkeudenmittausvälineeksi valikoitui harkinnan jälkeen kuvan 14 mukainen Asimeto 626-sarjan mittalaite. Se täytti mittalaitteelle asetetut vaatimukset hyvin. Laitteesta pyydettiin mittapiirustus tarkempaa perehtymistä varten, mutta sitä ei koskaan saatu. Laite kuitenkin päätettiin tilata pelkän markkinointimateriaalin perusteella.

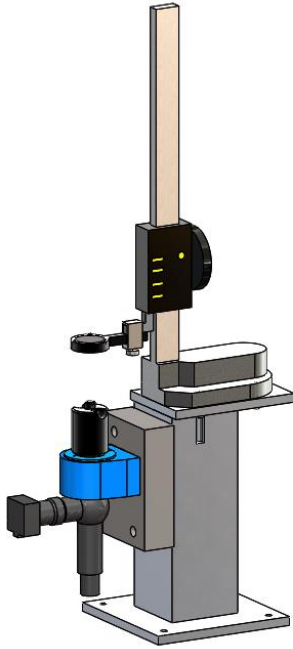


Kuva 14. Asimeto-korkeudenmittauslaite

Korkeudenmittauslaitteen saavuttua pystyttiin aloittamaan muun mittausvälineistön rakenteen varsinainen suunnittelu. Mittalaitteen pohjassa on ruuvikiinnitteiset ohjauspinnat. Hyödyntämällä näitä valmiita ruuvikiinnityksiä saadaan mittalaitteen kiinnitys tehtyä ilman ylimääräisiä puristusmekanismeja eikä mittalaitteen jalkaa tarvitse alkaa koneistamaan. Mittauslaitteiston runko päätettiin suunnitella käyttäen 6000-sarjan alumiinia. Kyseinen alumiinilaatu on yleisesti käytetty koneenrakennusalumiini. Tietyt osat päätettiin anodisoida mustaksi estämään valon heijastumista. Myös muut osat anodisoitiin luonnollisen väriseksi. Autokollimaattorin mukana tullutta pöytätelinettä päätettiin hyödyntää tässä hankkeessa. Telineen säätömekanismin ansiosta autokollimaattori voidaan säätää helposti kohtisuoraan peiliä vastaan.

Mallinnustyö ja työpiirustukset tehtiin käyttäen Solidworks CAD (Computer Aided Design) -ohjelmaa. Suunnittelun tuloksena syntyi kuvan 15 mukainen mittauslaitteisto. Tarvittavat osat koneistettiin alihankkijayrityksessä Vantaalla.





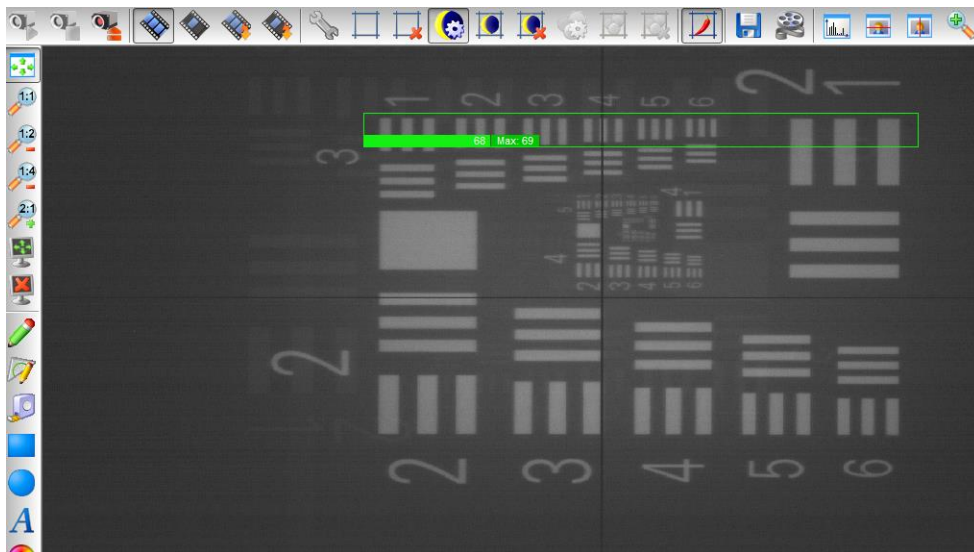
Kuva 15. Mittauslaitteiston 3D-malli.

Suunnittelutyössä on otettava huomioon mahdolliset toleranssit sekä pinnanlaatuvaatimukset. Liian tiukka tolerointi on turhaa, sillä valmiin kappaleen mittojen tarkastus vie aikaa ja tarkkojen mittojen takia valmistusprosessi hidastuu. Lisäksi toleransseja tulee käyttää vain siinä tapauksessa, kun osan toiminnallisuus sitä vaatii. Yleistoleranssilla, esimerkiksi ISO 2768, voidaan määrittää yleispätevät pituusmittojen sallitut poikkeamat.

#### 4 Mittauslaitteiston testaus

Mittauslaitteisto koottiin osien saavuttua koneistuksesta. Korkeudenmittauslaitteen mittakärkeen kiinnitettiin peili, jota vasten kohtisuoraan autokollimaattori suunnattiin mahdollisimman tarkasti. Apuna kohdistamisessa käytettiin autokollimaattorin hiusristikkoa (kuva 16). Autokollimaattorin kamera kytkettiin tietokoneeseen ja asennettiin tarvittavat ohjelmistot ja ajurit. uEye Cockpit tunnistaa ja osaa konfiguroida automaattisesti tietokoneeseen liitetyn IDS-kameran. Kameran parametreihin ei tässä vaiheessa puututtu vaan ne jätettiin oletusarvoihin.

Aluksi testauksessa käytettiin lyhyttä linssimoduulia. Polttovälin paikka löydetään, kun autokollimaattorilta näkyvä kuva on mahdollisimman terävä. Käytännössä tämä tapahtuu säätämällä peilin etäisyyttä linssimoduulista. uEye Cockpitissä on valmiiksi kuvan terävyyttä mittaava työkalu, Sharpness AOI. Työkalulla rajataan tutkittava alue kuvasta. Kyseinen AOI antaa relatiivisen arvon terävyydestä. Kuvassa 16 terävyyden maksimiarvo on 69. Terävimmän mahdollisen kuvan voi löytää myös silmämääräisesti. Sharpness AOI antaa ihmissilmää tarkemman arvion terävyydestä ja terävyyden muutoksista. Jo pieni alle 0,1 mm:n muutos peilin sijainnissa vaikuttaa kuvan terävyyteen. Kuvan selkeyteen vaikuttaa myös kuvan intensiteetti. Autokollimaattorin kuvan valaistusta säädetään erillisellä jännitteensäätimellä, jolla kuvaa saadaan himmeämmäksi tai kirkkaammaksi. Kuvan valaistus säädettiin sellaiseksi, että se erottuu selkeästi mutta niin, että kuva ei pala puhki.



Kuva 16. Terävä kuva.

Laitteiston testauksen aikana huomattiin, että autokollimaattori kerää valoa ympäristöstä. Niinpä peilin ja linssimoduulin väliin lisättiin musta muovinen putki valosuojaksi. Tällöin kameran kuva on kirkkaampi ja musta pysyy mustempana.

Testaamista jatkettiin pitkillä linssimoduuleilla. Varsin nopeasti kävi selväksi, että pitkän linssimoduulin muodostama kuva on intensiteetiltään heikko ja kuvan terävyys vaihtelee kuvan eri laidoilla. Näistä syistä johtuen uEye Cockpitin terävyystyökalua ei voitu käyttää. Kameran parametreista muutettiin master gainia eli kokonaisvahvistusta. Tällä säädöllä kuvasta saatiin hieman tummempi ja kuvan valaistuksessa voitiin käyttää kirkkaampaa valoa.

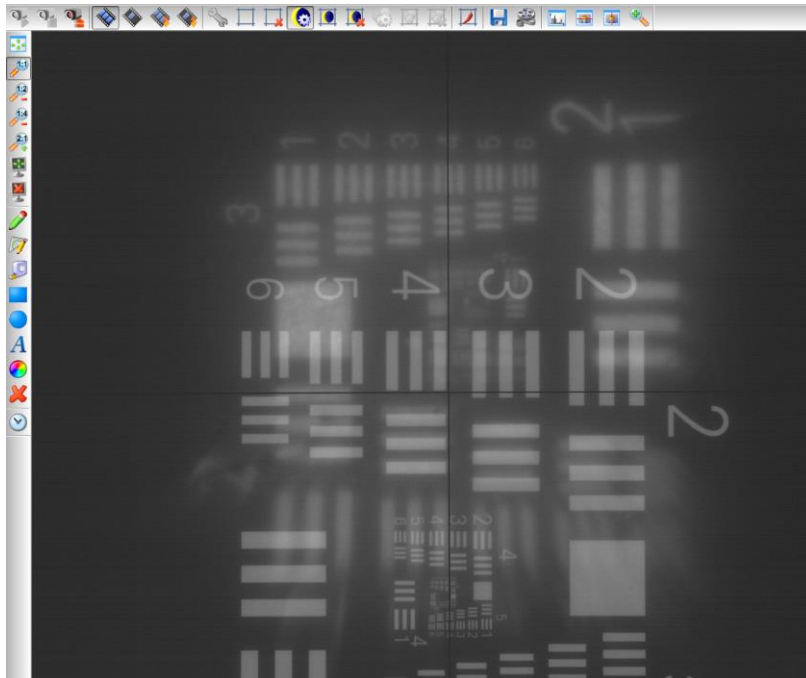
Koska kuvan terävyyttä piti arvioida ilman työkaluja, tuli mittaustuloksiin noin 0,5 mm:n poikkeamia eri mittauskertojen välillä. Toisaalta mittaustuloksen virheen suuruus verrattuna linssimoduulien laskennallisiin valmistustoleransseihin on niin pieni, että sitä ei pidetä merkittävänä.

## 5 Tulokset

Linssimoduuleja on testattu aikaisemmin yksinkertaisella laserin avulla tapahtuvalla heijastusmittauksella. Tässä testissä linssimoduulin toisen pään tasolinssiin kohdistetaan lasersäde ja mitataan heijastuneen säteen piirtämän ympyrän halkaisija, joka ei saa olla yli 50 mm. Laajan mittausdatan ja vertailukohtien saamiseksi mittauslaitteistolla mitattiin

- aiemmin testattuja ja hyväksytyjä
- aiemmin testattuja ja hylättyjä
- aiemmin testattuja ja hylättyjä liian suuren halkaisijan perusteella
- sekä testaamattomia linssimoduuleja.

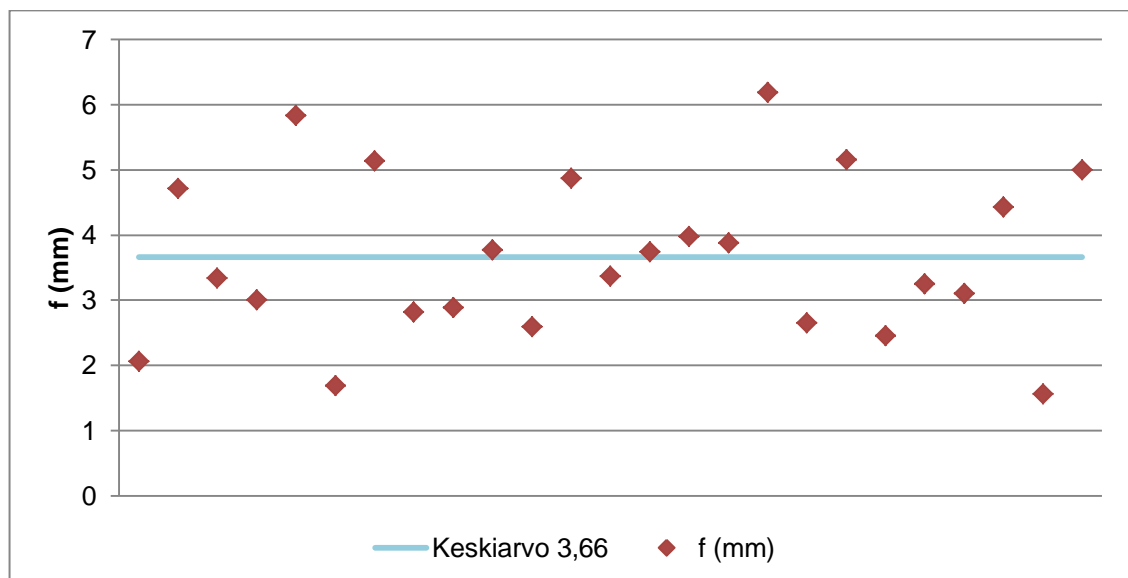
Testaaminen aloitettiin mittaamalla jo testattuja ja hyväksytyjä linssimoduuleja. Mittauksen referenssitaso asetettiin tulkin avulla 160 mm:n päähän linssipitimestä. Etäisyys vastaa suunnilleen kamerakortin etäisyyttä linssimoduulista. Linssimoduulien polttovälin mittaaminen osoittautui toisinaan haastavaksi, sillä kuva muodostui varsin vaaleana ja usein niin, että puolet kuvasta on terävä ja toinen puoli sumea (kuva 17).



Kuva 17. Puoliksi terävä kuva.

Kuvassa 17 todellinen, tutkittava kuva näkyy vaaleampana ja osin epäterävänä. Terävänä näkyvä kuva on linssimoduulin ensimmäisen linssin tasopinnasta heijastuva kuva.

Hyväksytyjä linssimoduuleja mitattiin 25 kappaletta. Näiden polttovälit asettuivat referenssitason kuvan 18 mukaiselle etäisyydelle. Tuloksista käy ilmi, että linssimoduulien polttovälin vaihtelut ovat pieniä verrattuna laskennalliseen mahdolliseen vaihteluun. Keskiarvo hyväksytyjen linssimoduulien mittaustulokselle oli noin 3,66 mm. Terävyyseroista johtuen linssimoduulin polttopisteen löytäminen oli haastavaa. Niinpä polttopisteen paikka kirjattiin ylös silloin, kun kuva oli terävimmillään noin puolessa kuvassa.

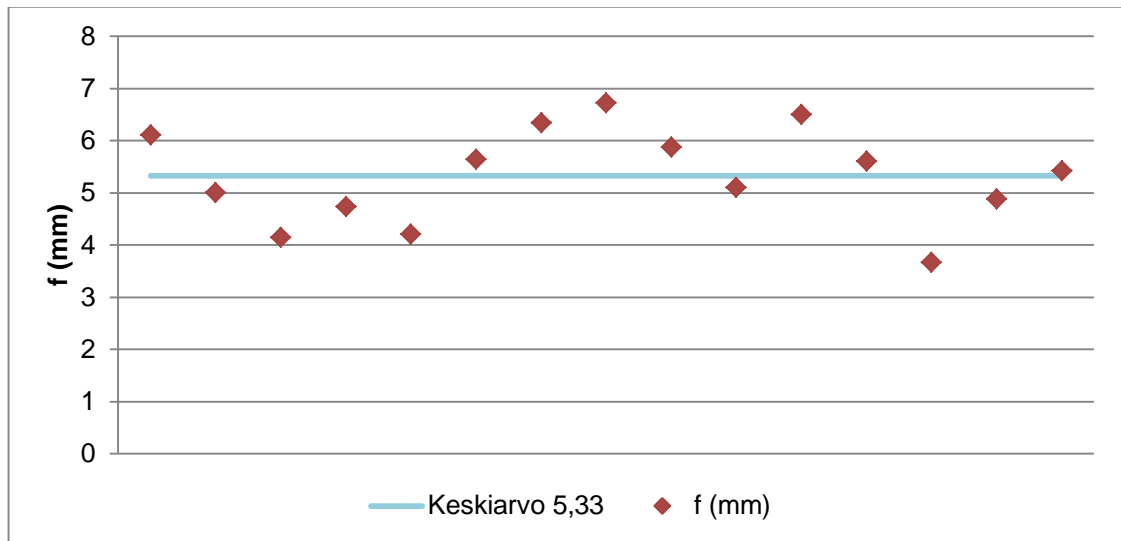


Kuva 18. Testattujen ja hyväksytyjen linssimoduulien polttovälit verrattuna referenssitason.

Seuraavaksi mitattiin hylättyjä linssimoduuleja, joiden tulos lasertestauksessa ylitti 50 mm. Näitä linssimoduuleja testatessa ilmeni niissä selkeästi muita enemmän ja vahvemmin terävyyseroa kuvassa. Myös polttovälin mittauskaskearvo oli suurempi kuin hyväksytyillä linssimoduuleilla. Toisaalta mittaustulosten hajonta oli selkeästi pienempää kuin hyväksytyissä linssimoduuleissa. Kuvasta 19 nähdään, että suurin poikkeama keskiarvosta on alle 2 mm.

Lasertestissä hylättyjen linssimoduulien kohdalla voi löytää riippuvuuden polttovälin ja linssien kohtisuoruuksien välillä. Toisiinsa nähden vinot linssit kasvattavat polttoväliä.

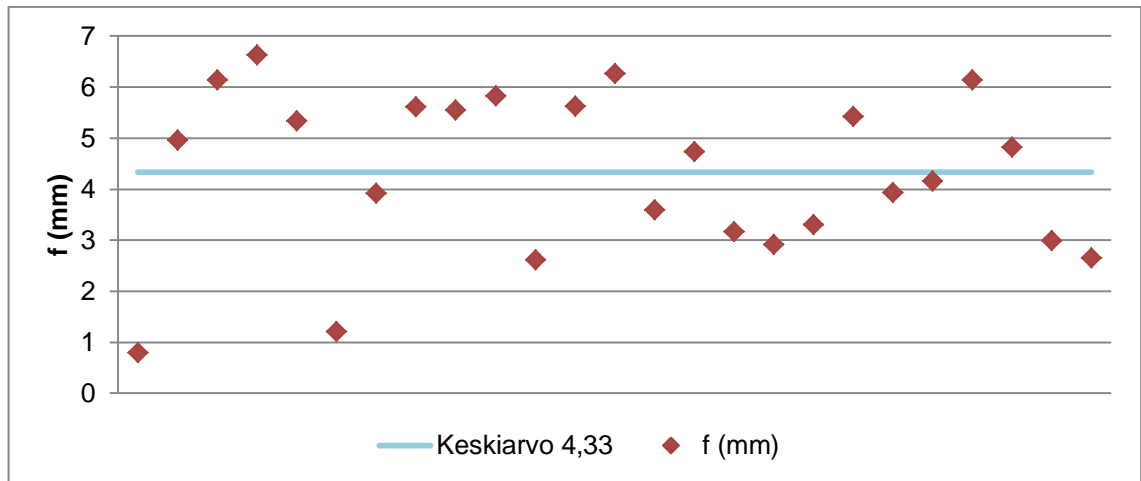
Toisaalta hylättyjä linssimoduuleja mitattiin 10 kappaletta vähemmän kuin muita. Selkeä trendi on kuitenkin tuloksissa havaittavissa ja sitä voidaan pitää uskottavana.



Kuva 19. Hylättyjen  $\varnothing > 55$  mm linssimoduulien polttoväli verrattuna referenssitason.

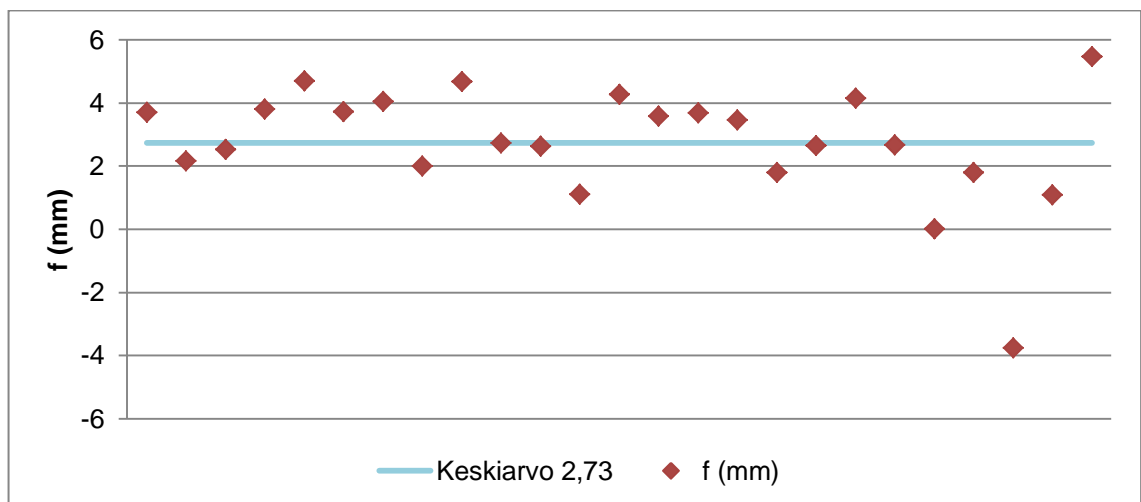
Lasertestin yhteydessä linssimoduulit tutkitaan silmämääräisesti epäpuhtauksien havaitsemiseksi linssimoduulien sisältä. Osa hylätyistä linssimoduuleista on hylätty pölyhiukkasten tai muiden sellaisten takia, ja osa linssin vinouden takia. Tässä testiryhmässä linssimoduuleja ei ollut lajiteltu hylkäyssyyn mukaan, sillä niitä ei ollut kirjattu ylös. Tässä ryhmässä mittaustulosten vaihtelu oli suurta, mutta keskiarvoltaan lähellä hyväksytyjä linssimoduuleja (kuva 20).

Yhdeksi tavoitteeksi insinööriyössä asetettiin epäpuhtauksien havaitseminen linssimoduuleista. Tätä demonstroitiin asettamalla suuria, halkaisijaltaan noin 2 mm:n kokoisia muovin palasia linssimoduulin päälle. Tämänkokoiset epäpuhtaudet aiheuttavat selkeästi havaittavaa suttuisuutta kuvaan, mutta alle 1 mm:n kokoisilla roskilla kuvassa ei havaittu suurta muutosta. Usein epäpuhtaudet linssimoduuleissa ovat pieniä, pistemäisiä pölyhiukkasia tai kuidunpätkiä. Nämä pystytään havaitsemaan ihmissilmällä valoa vasten. Näihin havaintoihin perustuen epäpuhtauksien havaitsemiseen laitteisto ei sovellu.



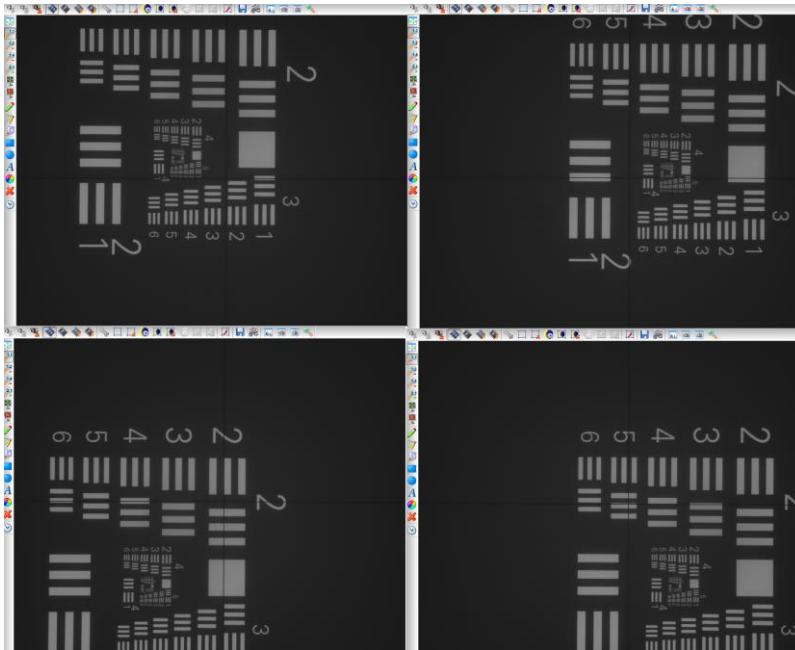
Kuva 20. Testattujen ja hylättyjen linssimoduulien mittaustulokset.

Viimeisenä testiotoksena olivat testaamattomat linssimoduulit. Näitä testattiin yhteensä 25 kappaletta. Näissä polttovälin vaihtelu oli kaikkein suurinta. Kaksi linssimoduulia oli täysin erilaisia verrattuna muihin. Toinen ei muodostanut kuvaa lainkaan ja toisen kuva muodostui  $-3,8$  mm:n päähän referenssisitasosta. Mitään ulkoista syytä poikkeavuuksille ei löytynyt eivätkä linssit olleet poikkeavan paljon vinossa. Molemmat näistä läpäisivät lasertestin, mutta olivat lähellä tulla hylätyiksi. Luultavasti linssit olivat virheellisiä tai väärin liimattuna linssiputkeen. Muilta osin testaamattomat linssimoduulit olivat tasalaatuisia. Polttovälin keskiarvo oli testin pienin, mutta tätä selittää yhden linssimoduulin negatiivinen mittaustulos. Muuten keskiarvo asettuisi lähelle vähän yli 3 mm:in, kun korjaamattomana se on 2,73 mm. Kuvasta 21 nähdään testaamattomien linssimoduulien mittaustulokset.



Kuva 21. Testaamattomien linssimoduulien polttovälit verrattuna referenssisitasoon.

Mittauslaitteiston tavoitteeksi asetettiin myös linssien kohtisuoruuksien määrittäminen. Ensimmäisen tasokuperan linssin kohtisuoruus pystytään havaitsemaan asettamalla tutkittava linssimoduuli linssipitimeen ja pyörittämällä moduulia. Autokollimaattorin kuva heijastuu ensimmäisestä linssistä takaisin autokollimaattoriin ja edelleen kameralle. Kuvasta 22 nähdään, kuinka kuvan asema vaihtelee linssimoduulin asentoa kiertämällä.



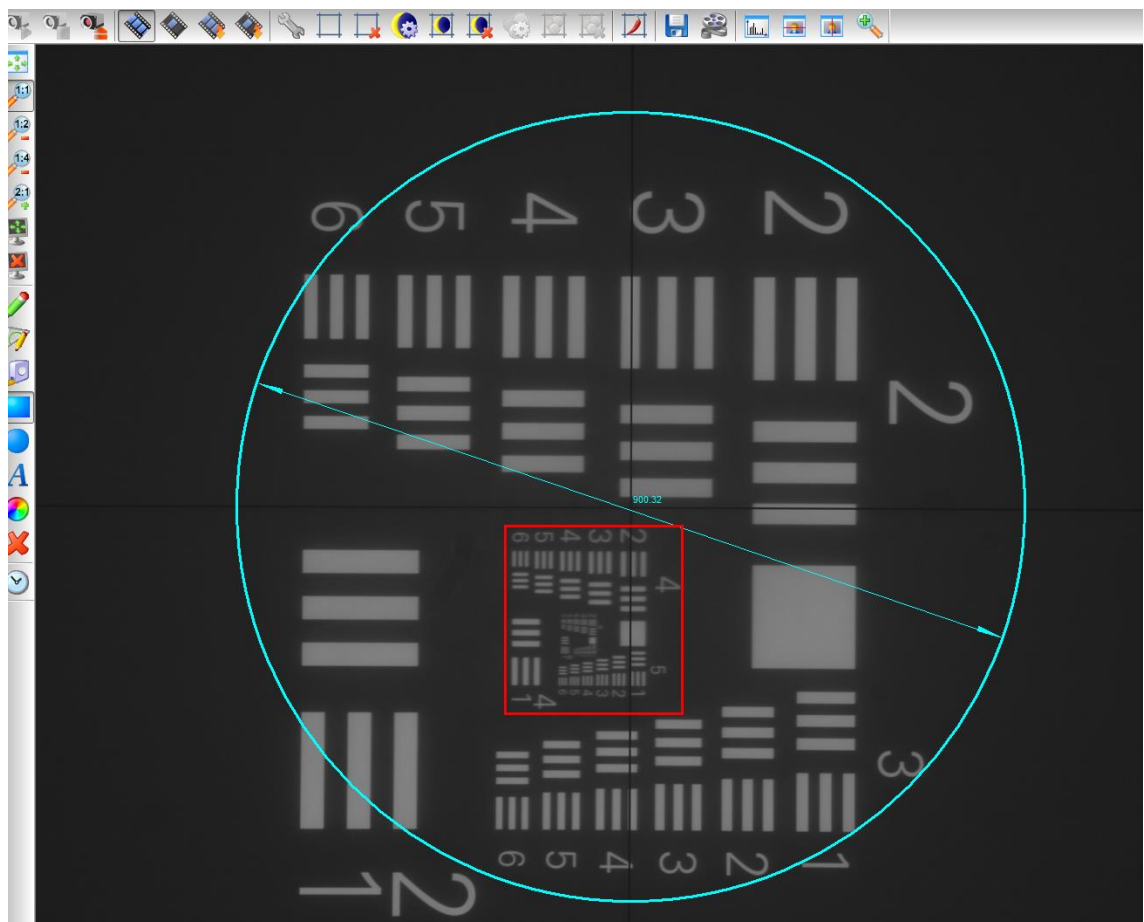
Kuva 22. Linssin kohtisuoruuden toteaminen.

uEye Cockpit on kevytrakenteinen kuvan analysointiohjelma, eikä sillä pysty suorittamaan kunnollisia mittauksia. Kuvaan voi kuitenkin piirtää kuvioita, joita voi käyttää apuna analysoinnissa. Linssin kohtisuoruuden maksimiarvon rajaamiseksi kuvaan piirrettiin halkaisijaltaan noin 900 pikselin kokoinen ympyrä, jonka sisällä kuvan tulee pysyä. Työssä käytettävän kuvan keskellä oleva, numeroista ja palkeista koostuvan kuvion haluttiin pysyvän ympyrän sisällä (kuva 23). 900 pikselin halkaisija vastaa suunnilleen 50 mm:n halkaisijaa lasertestissä. Tähän tulokseen päästiin vertailemalla hylättyjä linssimoduuleja, joiden lasertestin tulos oli yli 50 mm, hyväksytyihin linssimoduuleihin.

Tutkimuksen edetessä kävi ilmi, että mittauslaitteistossa on pientä kohtisuoruuspoikkeamaa. Laitteistosta tutkittiin linssipidin ja mitattiin heittokellolla mahdollisia poikkeamia. Linssipitimen reikä, johon linssimoduuli asetetaan, on hieman epäkeskeinen. Mittaustulos 0,05 mm tulkitaan niin pieneksi, että se ei vaikuta



ratkaisevasti linssin kohtisuoruuden toteamiseen. Reiän samansuuntaisuutta linssipitimen pääakselin kanssa ei pystytty toteamaan. Sen selvittäminen vaatii erikoisia mittausten menetelmiä, joihin työn puitteissa ei ryhdytty. Tietyissä asennoissa kuvion piirtämisen alueen halkaisija on halkaisijaltaan hyvin pieni, kun taas hieman kiertämällä linssimoduulia tulos voi poiketa huomattavasti ja olla jopa hylätty. Tämä kertoo siitä, että linssin vinous ja linssipitimen porauksen vinous kompensoivat tai vahvistavat toisiaan riippuen asennosta. Myös autokollimaattorin putken samanakselisuudessa suhteessa optiseen akseliin saattaa olla poikkeamaa. Näistä syistä johtuen kohtisuoruustestin tekeminen nykyisellä mittaustaitteistolla ei onnistu luotettavasti.



Kuva 23. Linssin kohtisuoruuden arviointi apukuvioiden avulla.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin mittauslaitteisto useita linsejä sisältävien linssimoduulien polttovälin mittaamiseksi. Lisäksi laitteistolla pyrittiin havaitsemaan linssimoduulien sisälle päätyneet epäpuhtaudet. Myös linssimoduulin linssien kohtisuoruutta linssisysteemin pääakselin suhteen pyrittiin mittaamaan. Aiemmin linssimoduuleille on suoritettu yksinkertainen lasertesti, millä mitataan uloimman tasokoveran linssin kohtisuoruutta pääakseliin.

Mittauslaitteiston suunnittelu oli onnistunut ja linssimoduulien polttovälin mittaus kyetään suorittamaan laitteella riittävällä tarkkuudella. Polttovälin mittaamista vaikeuttaa linssimoduulin muodostaman kuvan osittainen epäterävyys. Kokemusten perusteella kuvan epäterävyys vaikuttaa refraktometrin toimintaan, mutta se lähinnä aiheuttaa kuvaan kohinaa ja pyöristää terävimpiä huippuja. Epäpuhtauksien tunnistus ja linssien kohtisuoruuden määrittäminen pääakseliin nähden ei onnistu luotettavasti nykyisellä mittauslaitteistolla.

Mittauslaitteiston suunnittelu aloitettiin hyvissä ajoin ja valmistettavat osat tilattiin lähes aikataulun mukaisesti. Alihankkijasta johtuva myöhästyminen myöhästytti koko projektia eikä se valmistunut aikataulussa. Mittauslaitteistolla ehdittiin kuitenkin suorittaa tarvittavat testit.

Tulosten valossa linssimoduulit ovat polttoväliiltään varsin tasalaatuisia. Mittaustulosten vaihteluväli jäi selkeästi pienemmäksi kuin laskennallinen. Mittaustulokset olivat kuitenkin jossain määrin epäloogisia. Aikaisemmin tutkittujen linssimoduulien polttovälien uskottiin asettuvan lähelle samaa, sillä lajittelu karsii poikkeavat yksilöt pois otannasta. Varsinkin hyväksytyjen linssimoduulien mittaustulokset olivat ristiriitaisia. Lopuksi voidaan todeta, että linssit valmistetaan hyvällä tarkkuudella.

Insinööriyön tulosten avulla voidaan alkaa määrittämään linssimoduulien testauksessa käytettävät ylä- ja alarajat. Tämä määrittäminen vaatii useita koelaitteita, eikä hyväksyntärajojen selvitystä ajanpuutteen vuoksi sisällytetty tähän työhön. Laitteistoa ei tulla vielä luovuttamaan tuotannon käyttöön, vaan vasta sitten, kun polttovälin toleranssi saadaan määritettyä.

Mittauksen toistettavuudessa olisi parannettavaa, mutta nykyinen tarkkuus antaa kohtuullisen tuloksen polttovälin suuruudesta. Laitteistolle jäi myös parannusehdotuksia. Linssipitimeen täytyy koneistaa reikä, jotta puristuksiin jäävä ilma pääsee pois autokollimaattorin ja linssipitimen välistä. Nykyisellään autokollimaattorissa on vihertävä 546 nm:n aallonpituudella toimiva valaistus. Se ei vastaa refraktometreissa käytettävää valon aallonpituutta. Siksi mittaustulokset eivät ole suoraan käyttökelpoisia, mutta kuitenkin suuntaa-antavia. Myös autokollimaattorin kuvan voisi vaihtaa esimerkiksi siemens stariksi, jolloin kuvan terävyyttä olisi mahdollisesti helpompi arvioida. Tavoitteena on, että linssimoduulien numeerisesta mittaamisesta päästään tilanteeseen, jossa tutkitaan niiden polttoväliä vain tietyllä etäisyydellä, josta tuloksena saadaan hyväksytyt tai hylätyt linssimoduulit.

## Lähteet

Batchelor, Bruce G. 2012. Machine Vision Handbook. Lontoo: Springer.

Belbachir, Ahmed Nabil. 2010. Smart Cameras. Lontoo: Springer.

Figura, Ludger O. & Teixeira, Arthur A. 2007. Food Physics. Berliini: Springer.

IDS GmbH. 2017. UI-1540LE. Verkkodokumentti. <<https://en.ids-imaging.com/store/ui-1540le.html>>. Luettu 21.4.2017.

JCGM. 2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Verkkodokumentti. <[http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)>. Luettu 24.3.2017.

Karlsson, Åke & Marttala, Anders. 2001. Projekti kirjja. Tampere: Talentum Media Oy.

Keinänen, Tomi & Järvinen, Masi. 2014. Mittaustekniikka. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

K-Patents. 2014. K-Patents Sanitary process refractometer PR-23-A. Verkkodokumentti. <[http://kpatents.com/assets/files/downloads/PR\\_23\\_A\\_brochure\\_May\\_2015\\_LORES.pdf](http://kpatents.com/assets/files/downloads/PR_23_A_brochure_May_2015_LORES.pdf)>. Luettu 21.3.2017.

K-Patents. 2015. Verkkodokumentti. <[www.kpatents.com/company](http://www.kpatents.com/company)>. Luettu 18.3.2017.

Möller-Wedel Optical International. 2013. Examples for Applications of collimators, telescopes, visual and electronic autocollimators. Verkkodokumentti. <[http://www.vermontphotonics.com/VT\\_Photo\\_Applications.pdf](http://www.vermontphotonics.com/VT_Photo_Applications.pdf)>. Luettu 20.3.2017.

Silfverberg, Paul. 2017. Ideasta projektiksi: Projektinvetäjän käsikirja. Verkkodokumentti. <[http://www.helsinki.fi/urapalvelut/materiaalit/liitetiedostot/ideasta\\_projektiksi.pdf](http://www.helsinki.fi/urapalvelut/materiaalit/liitetiedostot/ideasta_projektiksi.pdf)>. Luettu 11.4.2017.

Smith, Graham T. 2016. Machine Tool Metrology. Sveitsi: Springer.