

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A1501 Masters's Thesis and Seminar

Janne Rautiainen

**VAIHTOEHTOISET MENETELMÄT KONEISTETUN MONIMUOTOISEN
KAPPALEEN MITTAAMISEEN**

Työn tarkastajat:

Professori Aki Mikkola

TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Janne Rautiainen

Vaihtoehtoiset menetelmät koneistetun monimuotoisen kappaleen mittaamiseen

Diplomityö

2018

56 sivua, 10 kuvaa, 15 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: Professori Aki Mikkola
TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: mittaustekniikka, muodonmääritys, laadunvalvonta

Tämä diplomityö käsittelee vaihtoehtoja Abloy-avaimen jyrsinkoodin mittaamiseen. Diplomityön avulla haluttua selvittää nykyaikaisten mittausmenetelmien tarjoamia mahdollisuuksia sekä tutkia Abloyn nykyisen avaimen mittauslaitteen modernisointia.

Työ sisältää kirjallisuuskatsauksen, joka käsittelee nykyaikaisia mittaustekniikan ratkaisuja monimutkaisten muotojen tarkkaan mittaamiseen. Kirjallisuuskatsauksen havaintojen perusteella suunniteltiin mittauslaitteen prototyyppi järjestelmällisen koneensuunnittelun menetelmien mukaisesti.

Huomattiin, että erityisesti optiset mittalaitteet ja konenäkösovellukset sopisivat avainten mittaamiseen menetelmien hyvien mittatarkkuuksien ansiosta. Lisäksi menetelmien etuna ovat niiden hyvät muokkaamismahdollisuudet. Menetelmien huonona puolena ovat kohteeseen liian korkeat hankintakustannukset.

Prototyyppi valmistettiin ja sitä testattiin. Prototyypissä hyödynnettiin nykyisen avainten mittauslaitteen rakennetta. Laitteessa mittaus suoritettiin mikrokytkinten avulla ja mittausdataa käsiteltiin tietokoneella. Testeissä saatujen havaintojen perusteella tehtiin parannusehdotuksia prototyyppiin ja kaavailtiin mittalaitteen tuotteistamista.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Janne Rautiainen

Alternative methods on measuring 3 dimensional machined component

Master's thesis

2018

56 pages, 10 figures, 15 tables and 1 appendice

Examiner: Professor Aki Mikkola
D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: measuring technology, shape determination, quality control

This Master's Thesis is about finding novel solutions to measure code millings of Abloy keys. Study contains a literature research about different solutions for measuring complex three dimensional shapes. Also a prototype for measuring unit is designed and produced.

It is shown in the literature survey that optical measuring and different machine vision solutions would fit well to this task. These solutions have excellent accuracy and they are easily customizable. The methods are still too expensive and thus cannot be used at the moment for this task.

A prototype for key measuring was designed and produced. Solution based to Abloy's former key measuring technique, but measuring was performed by micro switches. The prototype was tested and improvements for prototype were be introduced according to testing.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Abloy Oy:tä ja esimiestäni Jouni Tirkkosta diplomityöaiheesta. Haluan myös kiittää ohjaajiani professori Aki Mikkolaa ja TkT Kimmo Kerkkästä opastuksesta ja kärsivällisyydestä diplomityöni aikana. Lisäksi kiitän työkavereitani Abloylla tuesta ja kannustuksesta, erityiskiitos Markus Hyväriselle ideointiavusta.

Janne Rautiainen

Joensuussa 7.1.2018

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 Abloy-avainten toimintaperiaate.....	8
1.2 Tutkimuksen taustaa	9
1.3 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset	9
1.4 Työssä käytettävät menetelmät	10
2 KÄYTETYT MENETELMÄT	11
2.1 Koneistettavien osien mittaaminen	12
2.1.1 Mekaaniset mittauslaitteet	12
2.1.2 Koordinaattimittaus	13
2.1.3 Optiset mittausmenetelmät	14
2.1.4 Konenäkö ja fotogrammetria	21
2.2 Systemaattisen koneensuunnittelun perusteet.....	24
3 TULOKSET	27
3.1 Vaatimukset	27
3.2 Erilaiset ratkaisuvaihtoehdot.....	28
3.2.1 Ratkaisuvaihtoehtojen esittely	31
3.2.2 Vaihtoehtojen vertailu.....	34
3.3 Toteutettava kokonaisratkaisu	37
3.4 Valmiin laitteiston esittely	38

3.5	Prototyypillä saatava mittausdata	41
4	POHDINTA	44
4.1	Nykyisen avainindikaattorin parantaminen ja prototyypin jatkokehitys aiheet...	44
4.2	Useiden avainjärjestelmien ja profiilijyrsintöjen mittaaminen	49
4.3	Lähitulevaisuuden vaihtoehdot avaimen mittaamiseen ja jatkotutkimus	50
4.4	Taloudellisten kustannusten arvioiminen	51
5	YHTEENVETO	54
	LÄHTEET	55
	LIITTEET	

Liite I: Ohjausyksikössä käytetty Python-koodi

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

ASIC	Sovelluskohtainen mikropiiri (eng. Application specific integrated circuit)
GPIO	Sisäänmeno- ja ulostulopinni (eng. General-purpose input/output)

1 JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Abloy Oy:n kanssa. Abloy Oy valmistaa turvallisia ja innovatiivisia lukitus- ja oviautomaatioratkaisuja, joilla suojataan niin ihmisiä, omaisuutta kuin liiketoimintaa. Abloy Oy kuuluu Assa Abloy – konserniin. (Abloy Oy 2017.) Patentin alaiset Abloy avaimet valmistetaan aina Abloy Oy:n tehtaalla.

1.1 Abloy-avainten toimintaperiaate

Abloy-lukkojen toiminta perustuu levyhaittoihin. Abloy-lukossa on käyttötarkoituksesta ja avainjärjestelmästä riippuen 7- 11 haittaa. Haitat lukitsevat lukossa olevan haittatangon lukonrunkoon, jolloin lukko on lukitussa asennossa. Jokaista haittalevyä vastaamaan avaimen on jyrstetty lovi avaimen varteen. Lovet ovat jyrstetty eri kulmiin ja ne voivat olla eri syvyisiä. Avaimen jyrstettyjen lovien mukaan avaimelle määräytyy jyrstinkoodi. Haittalevyn ulkokehällä on ura avaimen jyrstinkoodin mukaan. Kun avainta käännetään lukossa, haittalevyt alkavat kääntyä. Avaimessa oleva lovi kääntää haittalevyä. Jos avain on oikea, haittalevyt kääntyvät niin, että haittalevyissä olevat urat ovat samassa linjassa. Kun urat ovat linjassa, haittatanko pääsee laskeutumaan uraan ja lukon liike vapautuu. Tällöin avaimen kääntämistä voidaan jatkaa ja kääntämisellä voidaan toteuttaa lukolle määritetty toiminta, kuten teljen tai sähkökytkimen kääntäminen. Kuvassa 1 on esitetty erilaisia Abloy-avaimia.



Kuva 1. Erilaisia Abloy-avaimia vasemmalta oikealle: Classic, Exec, Sentry ja Protec2.

1.2 Tutkimuksen taustaa

Avaimen koodijyrsinnän on oltava oikea ja oikeellisuus on voitava tarkistaa. Tämä on tärkeää esimerkiksi kokoonpanon eri vaiheissa. Avaimen koodijyrsinnän karkeaan tarkistamiseen käytetään nykyisin avainindikaattoreita. Avainindikaattoria käytettäessä avainta käännetään indikaattorissa valintakiertoa vastaava kierto, jolloin indikaattorin mekaaniset kiekot kääntyvät ja kiekkojen kylkeen kaiverretuista numeroista voidaan lukea avaimen jyrskinkoodi. Tämä menetelmä ei tarjoa riittävästi tietoa esimerkiksi koodijyrsinnän mittatarkkuudesta. Tuotannossa mittatarkkuus voidaan todentaa toimittamalla avain tuotannon mittaushenkilökunnalle, jotka voivat tarkastaa mittatarkkuuden tarkemmilla mittalaitteilla.

Avaimen jyrskinkoodia ei luovuteta suoraan tietoturvasyistä edes lukon omistajalle. Jyrskinkoodin sijasta luovutetaan peitenumero, joka on eräänlainen muunnos jyrskinkoodista. Jyrskinkoodia käyttää avaimen koneistaja. Peitenumero määräytyy muun muassa jyrskinkoodin ja avainjärjestelmän mukaan. Peitenumero luovutetaan lukituksen haltijalle avainkortissa, jota vastaan lisäavaimia voidaan tilata. Nykyiset avainindikaattorit ilmaisevat sekä jyrskinkoodin että peitenumeron. Muun muassa mekaanisen ratkaisun ja peitenumeron muodostamisen takia jokaiselle avaintyypille ja haittalukumäärälle tarvitaan oma indikaattorinsa.

1.3 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on selvittää eri menetelmiä, joilla avaimen jyrskinkoodin mittatarkkuutta voitaisiin tutkia asteen kymmenesosien ja sadasosa millimetrien tarkkuudella. Nykyisin esimerkiksi lasermittaus on yleistynyt ja tällaisten uudempien mittaustapojen sopivuutta halutaan tutkia. Avaimen jyrskinkoodin mittaamisessa olisi tarpeellista tietää jyrskinkoodin leveys, asema pituussuunnassa, keskeisyys pituusakseliin nähden sekä tarkentaa jyrskinkulmien mittaamista. Lisäksi halutaan tutkia mahdollisuutta mitata erilaiset avaintyypit samalla mittalaitteella.

Useissa Abloyn avainjärjestelmissä on myös erilaisia pituussuuntaisia muotoja eli profiilijyrsintöjä, joilla lukitusjärjestelmän turvallisuutta halutaan parantaa. Tutkimuksessa halutaan myös selvittää, olisiko avainindikaattoriratkaisua, joka sopisi profiilijyrsintöjen

mittaamiseen? Profiilijyrsinnöistä tarvitaan mitata muoto, syvyys ja keskeisyys avaimen keskiakseliin nähden.

Tutkimuskysymyksiksi asetettiin:

1. Mitkä mittausmenetelmät olisivat tällä hetkellä tai lähitulevaisuudessa kilpailukykyisimmät vaihtoehdot avaimen mittaamisen?
2. Mitkä mittausmenetelmät soveltuisivat profiilijyrsintöjen tarkastamiseen?
3. Millainen ratkaisu sopisi useiden avainjärjestelmien mittaamiseen samalla laitteella?
4. Kuinka nykyisenkaltaista avainindikaattoria voitaisiin parantaa?

Työn lopputuloksena on karkea prototyyppi, jolla tutkitaan menetelmän soveltuvuutta kohteeseen. Prototyypissä selvitetään mittauslaitteelle soveltuvaa rakennetta ja mahdollisten komponenttien sopivuutta rakenteeseen. Onnistumista tutkitaan prototyypin pohjalta arvioitujen kustannusten sekä mittausdatan laadun perusteella.

1.4 Työssä käytettävät menetelmät

Prototyypin suunnittelussa sovelletaan järjestelmällisen koneensuunnittelun periaatteita. Erilaisten mittausmenetelmien ideoinnissa ja vertailussa hyödynnetään kirjallisuuskatsausta. Kirjallisuuskatsauksen lähteinä käytetään Lappeenrannan teknillisen yliopiston kirjastosta löytyviä kirjoja, tieteellisiä tutkimusartikkeleita sekä mittauslaitevalmistajien tarjoamia katalogeja. Tutkimusartikkeleita etsitään Scopus, Springer Link ja Google Scholar – tietokannoista.

2 KÄYTETYT MENETELMÄT

Mittaaminen ja laadunvarmistus ovat tärkeä osa tuotteiden sarjatuotantoa. Mittauslaitteiden kehitys on kulkenut tuotantolaitteiden kehityksen mukana. Mittauslaitteet voidaan jaotella eri tavoin esimerkiksi koskettaviin mittausmenetelmiin tai koskemattomiin mittausmenetelmiin. Koskettavat mittausmenetelmät ovat menetelmiä, joissa mitattavaa kappaletta mitataan mekaanisesti. Tällainen menetelmä on esimerkiksi akselin halkaisijan mittaaminen mikrometrillä. Kosketuksettomassa menetelmässä kappaletta mitataan ilman kosketusta esimerkiksi lasermittalaitteella. (Andersson & Tikka 1997, s. 14–15, 121.)

Elektroniikka on yleistynyt nykyisissä mittauslaitteissa useiden etujensa ansiosta. Elektronisissa mittauslaitteissa tulokset esitetään digitaalisesti numeroarvona, jolloin tulokset ovat helposti luettavissa. Elektroniikkaa mittauslaitteissa puoltaa myös useista laitteista löytyvä ominaisuus siirtää mittausdata tietokoneelle, jossa mittaustuloksia voidaan helposti taulukoida ja vertailla. (Timings & Wilkinson 2000, s. 181.)

Mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttaa muun muassa mittausmenetelmän tarkkuus. Mittaustuloksen tarkkuutta voidaan tutkia esimerkiksi mittauksen toistuvuuden ja toistettavuuden avulla. Mittauksen toistuvuus määritetään saman mittauksen tuloksen hajontana, kun mittaukset tekee sama henkilö, samalla mittausmenetelmällä, samoissa olosuhteissa ja lyhyellä aikavälillä. Mittauksen toistettavuuden määrittää eri paikassa, eri menetelmillä ja eri henkilöiden eri aikaan tekemien mittausten hajontaa. (Andersson & Tikka 1997, s. 123.)

Mittaustarkkuutta heikentävät mittausvirheet. Mittausvirheet voidaan jaotella kolmeen ryhmään: systemaattisiin, satunnaisiin ja karkeisiin virheisiin. Systemaattiset virheet ovat yleensä mittaustuloksen muutoksia mittausolosuhteiden muutoksista johtuvia virheitä. Systemaattisia virheitä voidaan usein korjata matemaattisesti. Esimerkkejä systemaattisista virheistä ovat mittausvoimien ja mittaustilanteen vaikutukset. (Andersson & Tikka 1997, s. 127–128.)

Satunnaiset virheet ovat virheitä, jotka muuttavat saman mittauksen arvoa samoissa olosuhteissa. Satunnaisvirheitä voidaan havainnoida laskemalla useiden mittausten keskiarvo. Karkeat virheet ovat yleensä mittaajasta johtuvia virheitä. Esimerkkejä karkeista virheistä ovat esimerkiksi mittaustuloksen lukeminen väärin ja väärän mittausten menetelmän käyttö. (Andersson & Tikka 1997, s. 129–130.)

Mittaustuloksissa on tärkeää arvioida mittaustulosten luotettavuutta. Mittaustuloksen luotettavuutta voidaan arvioida tutkimalla mittausepävarmuutta. Mittausepävarmuuteen vaikuttavat muun muassa mittaolosuhteiden muutokset, mittaajien henkilökohtaiset ominaisuudet mittalaitteiden tulkinnessa, mittalaitteen tarkkuus sekä mittausten menetelmien vaihtelu. (Andersson & Tikka 1997, s. 148–149.)

Mittaasepävarmuuden määrittämiseen on kaksi keinoa, tilastollinen keino ja muilla tavoilla määritetty mittaasepävarmuus. Tilastollisilla menetelmillä määritetty mittaasepävarmuus lasketaan usean samassa olosuhteessa tehdyn mittauksen hajonnasta. Muilla menetelmillä laskettu epävarmuus määritetään esimerkiksi mittalaitteen valmistajan ilmoittamista arvoista tai mittalaitteen kalibrointitiedoista. (Andersson & Tikka 1997, s. 148, 150–151.)

2.1 Koneistettavien osien mittaaminen

Tuotteiden eri osista pitää voida mitata eri mittoja. Yleisesti osista pitää voida mitata pituuksia ja kulmia. Nykyisin mittauksessa on yleistynyt kappaleen muotojen tutkiminen erilaisten skannaus- ja konenäkösovellusten avulla.

2.1.1 Mekaaniset mittauslaitteet

Mekaanisista mittauslaitteista tutuimpia ovat työntömitat ja mikrometrit. Työntömitoilla ja mikrometreillä mitattaessa mitta saadaan mittalaitteen leukojen välimatkasta. Työntömittoja ja mikrometrejä on erilaisia eri käyttötarkoituksiin kuten pituuksien, reikien ja halkaisijoiden mittaamiseen. Yleisesti mikrometriä ja työntömittojen lukematarkkuus on 0.01 mm. (Andersson & Tikka 1997, s. 183–186.)

Työntömittojen ja mikrometriä lisäksi konepajoissa yleisiä mittalaitteita pienien mittaerojen tarkastukseen ovat mittakellot. Perinteisten mekaanisten mittakellojen

lukematarkkuus 0.01 mm, mutta saatavilla on myös tuhannesosamittakelloja, joiden lukematarkkuus voi olla 0.2-2 μm . (Andersson & Tikka 1997, s. 189–191.)

Työntömitat toimivat periaatteessa kapasitiivisina lineaarisina enkoodereina. Enkooderit ovat mittalaitteita, jotka mittaavat asemaa, nopeutta ja suuntaa ja ilmaisevat tuloksen sähköisesti. Pituussuuntaisia mittoja saadaan lineaarisilla enkoodereilla ja kulmaa mitataan rotaatioenkoodereilla. Enkoodereita käytetään digitaalisten työntömittojen lisäksi työstökoneiden, robottien ja koordinaattimittauslaitteiden asemien mittaamisen. (Eitel & Kimbrell 2013; Collins 2015a.)

Enkoodereiden kolme yleisintä tyyppiä ovat optiset, magneettiset ja kapasitiiviset enkooderit. Optiset enkooderit ovat yleisimpiä enkoodereita. Optisissa enkoodereissa on valonlähde sekä vastaanotin. Optisissa enkooderissa valo lähetetään valonlähteeltä, valo pulssitetaan mitta-alueella ja pulssit havaitaan vastaanottimella. Vastaanotin laskee saadut pulssit ja päättelee liikutun matkan. Magneettisessa enkooderissa mitataan esimerkiksi asteikolla olevien magneettien määrää. Kapasitiivisissä enkoodereissa mitataan kapasitanssia lähetin-havaintimen ja välikappaleen välissä. (Collins 2015a; Collins 2015b.)

Enkooderit ovat joko absoluuttisia tai inkrementaalisia. Absoluuttisissa enkoodereissa mittaluku saadaan mitta-asteikolta jokaiselle mitalle yksilöllisenä binääriarvona, jolloin virran katkeamisen jälkeen asema on aina tiedossa. Inkrementaaliset enkooderit laskevat pulsseja enkooderin käynnistyksestä lähtien ja asema nollautuu virran katkettua. Inkrementaalisilla enkoodereilla varustetut laitteet vaativat yleensä uudelleen kalibroinnin käynnistyksen yhteydessä. (Eitel & Kimbrell 2013.)

2.1.2 Koordinaattimittaus

Koordinaattimittaus tapahtuu koordinaattimittauskoneella. Koordinaattimittauskone koostuu mittauspäästä sekä sähköisistä toimilaitteista, jotka liikuttavat mittauspäästä koneen johteiden mukaan kolmiulotteisessa avaruudessa. Kappaleen mittaus koordinaattimittauskoneella tapahtuu liikuttamalla mittauspäästä koneen johteiden rajaamassa avaruudessa. Mittauspään saadessa kontaktin mitattavaan kappaleeseen, mitataan toimilaitteiden asema ja saadaan mitatulle pisteelle koordinaatit. Mittauksia

toistetaan riittävän kauan, jotta saadaan määritettyä pistejoukko, joista määritetään kappaleen muoto. (Timings & Wilkinson 2000, s. 206–207.)

Koordinaatti mittauskoneet ovat hitaita verrattuna muihin mittaus- ja muodonmäärittämissä menetelmiin. Koskettavan koordinaattimittauksen ongelmana on pehmeiden ja hauraiden kappaleiden käsittely, joita mittauspää voi vahingoittaa. Koordinaattimittauskoneilla voidaan mitata noin 1 µm tarkkuudella riippuen laitteen koosta ja toimilaitteista. (Nikon 2015, s. 8-11.)

2.1.3 Optiset mittausmenetelmät

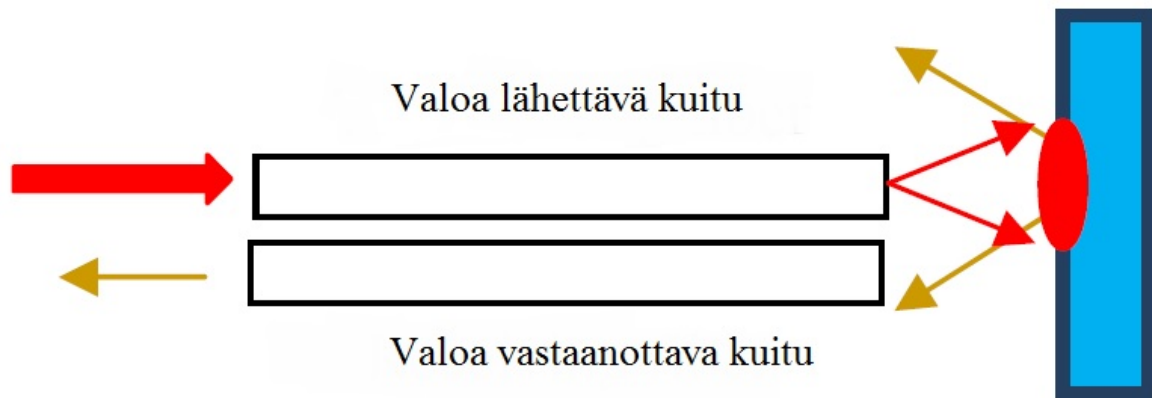
Optisten mittausmenetelmien etuna on mahdollisuus mitata etäisyyksiä ilman kosketusta.

Yleisesti käytössä olevat optiset mittausmenetelmät perustuvat:

- valon intensiteetin mittaamiseen
- Doppler-ilmiöön
- kulkuajamittaukseen
- kolmiomittaukseen
- polttopisteen mittaamiseen
- valon interferenssiin

(Berkovic & Shafir 2012, s. 442.)

Valon intensiteetin muutokseen perustuva etäisyyden mittaus on yksinkertaisimpia optisia etäisyyden mittauksessa käytetyistä menetelmistä. Intensiteettiin perustuvassa mittauksessa käytetään kuituoptiikkaa. Sensori koostuu valoa lähettävistä ja valoa vastaanottavista kuiduista. Mittauksessa valoa lähettävä kuitu lähettää valoa ja vastaanottavalta kuidulta mitataan kohteesta kimmonneen valon intensiteetti. Etäisyys saadaan laskettua intensiteetin pienenemisestä. (Berkovic & Shafir 2012, s. 444.) Kuvassa 2 on esitetty valon intensiteettiin perustuvan mittalaitteen toimintaperiaate.



Kuva 2. Valon intensiteettiin perustuvan mittalaitteen periaatekuva (Mukaiillen Berkovic & Shafir 2012, s. 444).

Valon intensiteetin muutokseen perustuvat etäisyyden mittauslaitteet ovat yksinkertaisia ja edullisia verrattuna muihin optisiin sensoreihin. Mittausmatkat valon intensiteettimuutokselle ovat muutamista millimetreistä noin 50 millimetriin ja mittausresoluutiossa voidaan päästä hyvissä olosuhteissa jopa alle 1 μm . (Berkovic & Shafir 2012, s. 444–445.)

Ongelmana valon intensiteetin muutoksiin perustuvassa mittauksessa on herkkyys häiriöille. Esimerkiksi erilaiset muutokset heijastuvan valon intensiteetissä tuottavat ongelmia. Tällaisia häiriöitä syntyy esimerkiksi, jos mitattavien kappaleiden pinnassa on likaa. Likainen kappale heijastaa vähemmän valoa ja vaikuttaa olevan kauempana. Myös muutokset pinnan kulmassa voivat aiheuttaa intensiteettihäiriötä valon heijastuessa pinnalta väärässä kulmassa. Mittausmenetelmä vaatii myös jokaiselle mittaukselle kalibrointimittauksen. Halutusta etäisyydestä heijastuva intensiteetti täytyy selvittää ennen kuin esimerkiksi mitattavan sarjan tarkastus voidaan aloittaa. (Berkovic & Shafir 2012, s. 445.)

Kulkuajamittaukseen perustuvat mittalaitteet voivat toimia kahdella eri periaatteella. Joko laiteella lähetetään lyhyt valopulssi ja mitataan aika, joka pulssilla kestää kulkea kappaleeseen ja heijastua takaisi. Toinen tapa on lähettää jatkuvaa valonsädettä ja mitata heijastuneen säteen vaihe-ero. Kulkumatkan mittaus sopii yleensä etäisyyksille, jotka ovat

yli 50 metriä. Vaihe-eron mittaus sopii lyhemmille matkoille. (Berkovic & Shafir 2012, s. 450.)

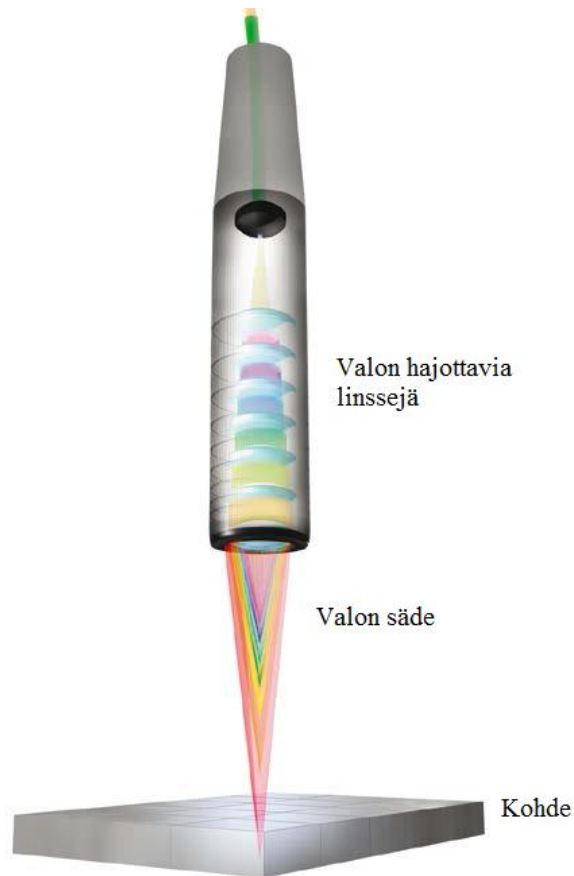
Kulkuajamittauslaitteistot, jotka ovat tarkoitettu muutamien metrien tai muutamien kymmenien metrien mittaamiseen ovat suhteellisen edullisia ja yksinkertaisia rakenteeltaan. Lyhyiden matkojen tarkkaan mittaukseen menetelmä vaatii kuitenkin tehokkaan laitteiston ja lyhyille matkoille suunnitellut kulkuajamittauslaitteistot ovat kalliita muihin optisiin menetelmiin verrattuna. Lyhyille matkoille toimintaperiaatetta voidaan muokata muun muassa käyttämällä ääntä mittauksessa, mutta tällöin tarkkuus heikkenee. (Berkovic & Shafir 2012, s. 450–452.)

Polttopistemittauksessa mitattavan kohteen pintaan kohdistetaan ohut valokeila. Valo hajaana kappaleen pinnassa ja heijastuu takaisin. Takaisin heijastuneesta valosta määritetään maksimi signaali muuttamalla mittalaitteen linssin ja mitattavan kappaleen etäisyyttä. Polttopistemenetelmällä kappaleen ja mittalaitteen etäisyys voidaan määrittää jopa alle mikrometrin tarkkuudella. Polttopistemittausensorit ovat herkkiä lämpötilan muutoksille. (Berkovic & Shafir 2012, s. 452, 454.)

Polttopistemenetelmät voidaan jakaa kahteen luokkaan riippuen millaista valoa käytetään. Monokromaattisessa polttopistemittauksessa käytetään yhtä valon aallonpituutta. Mittalaite säätää, joko sensorin etäisyyttä mitattavaan kappaleeseen tai muuttaa sensorin linssin etäisyyttä valolähteeseen nähden. Monokromaattista polttopistemittauksia voidaan käyttää myös kappaleen pinnanmuotojen määrittämiseen. Tällöin sensoria liikutetaan pitkin kappaleen pintaa. (Berkovic & Shafir 2012, s. 452–453.)

Toinen variaatio polttopistemittauksesta on käyttää polykromaattista polttopistemittauksia. Tässä menetelmässä lähetetään monia valon aallonpituuksia kohti kappaletta. Heijastunut valo kerätään linssin avulla polttopisteeseen ja mitataan valonspektri. Polttopisteeseen heijastuneen valon spektristä voidaan määrittää etäisyys alle mikrometrin tarkkuudella useiden millimetrin mittausalueella. Menetelmällä mitattavat etäisyydet sensorista riippuen ovat millimetristä joihinkin kymmeneen millimetriin. Polykromaattisen polttopistemittauksen etuna on, että sillä voidaan muista optisista menetelmistä poiketen

mitata myös hieman tummempia kappaleita. (Berkovic & Shafir 2012, s. 453–454.)
Kuvassa 3 on kuvattu polykromaattisen polttopistemittauksen toimintaperiaate.



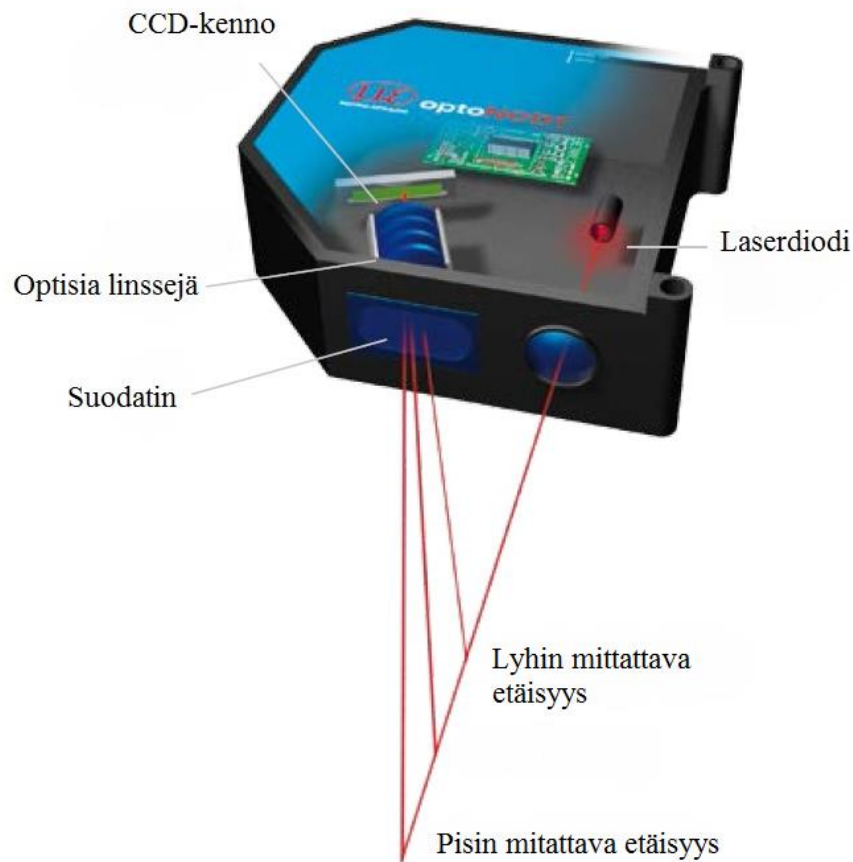
Kuva 3. Polykromaattisen polttopistemittauksen periaate (Mukaiillen Micro-Epsilon 2015, s. 4).

Valon interferenssiin perustuva mittaus suoritetaan yleensä matala koherentilla valolla. Menetelmässä lähetetään valonsäde kohti mitattavaa kappaletta ja referenssi peiliä. Peiliä liikutetaan ja tutkitaan valon interferenssi kuviota. Kun heijastuvien valojen taajuudet vahvistavat toisiaan, referenssi peili ja kappale ovat samalla etäisyydellä. Tällöin mitataan peilin asema ja saadaan kappaleen etäisyys mittalaitteeseen. Menetelmällä voidaan käytännössä päästä noin 1 μm mittaustarkkuuteen. (Berkovic & Shafir 2012, s. 454–455.) Interferenssimittauksella voidaan saavuttaa 0.1 μm mittausrésoluutio (Chugui et al. 2013, s. 325). Menetelmä on kuitenkin hidas, koska peiliä pitää liikuttaa laitteen mittausalueella, jotta tutkittava interferenssikuvio saadaan selvitettyä (Berkovic & Shafir 2012, s. 454–455).

Toinen tapa käyttää valon interferenssiä mittauksessa on käyttää muuttuvataajuisia säteilyä referenssinä. Tällöin kappaleen etäisyys saadaan määritettyä referenssivalon taajuudesta, kun interferenssikuviossa tapahtuu vahvistusta. Tällä menetelmällä päästään noin 5 μm mittaustarkkuuteen. Valon taajuuteen perustuva interferenssimittaus on nopeampi, mutta huomattavasti kalliimpi kuin referenssipisteen etäisyyden mittaamiseen perustuva interferenssimittaus. (Berkovic & Shafir 2012, s. 456.)

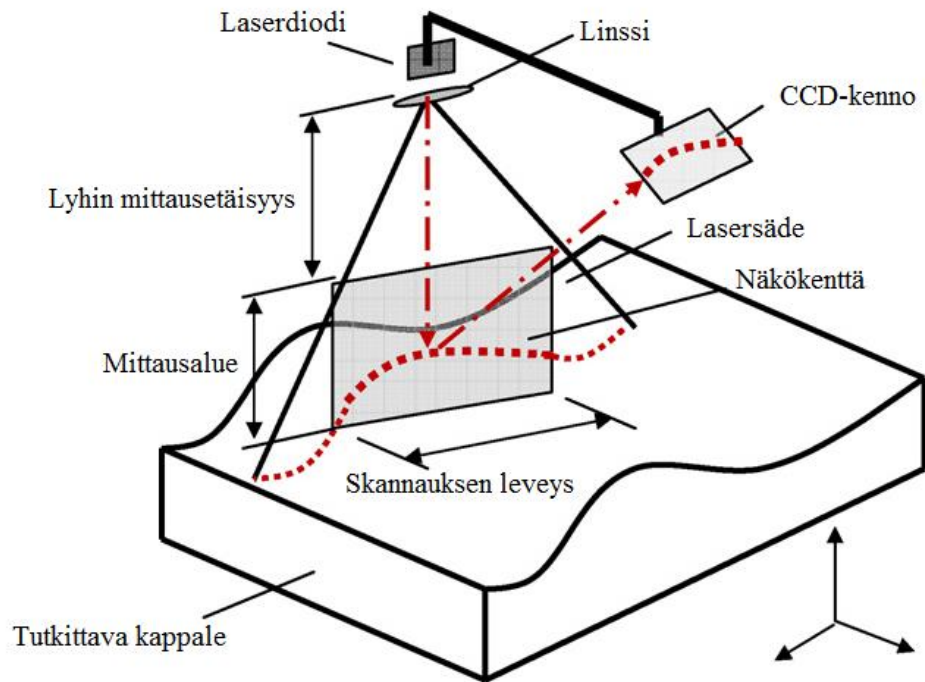
Laser kolmiomittauksessa sensorilta lähetetään lasersäde kohti mitattavaa kappaletta. Kappaleesta heijastuva säde ohjataan linssin avulla pinnalle, jolta säteen asema mitataan. Pinta on yleensä joukko pieniä vastaanottimia, kuten digitaalisen valokuvakameran kenno. Kun tiedetään heijastuneen lasersäteen asema, linssin ja lähttimen välimatka sekä linssin ja säteen kuvauspinnan välimatka, voidaan lähttimen ja kappaleen välimatka laskea kolmioiden yhtenevyysäännöllä. Kaupallisissa ratkaisuissa lähtin ja vastaanotin ovat yleensä sijoitettu kiinteästi samaan rakenteeseen. (Berkovic & Shafir 2012, s. 448.)

Kolmiomittauksen etuina ovat sensoreiden edullinen hinta muihin kontaktittomiin mittausmenetelmiin verrattuna ja mahdollisuus määritellä myös kappaleen muoto, joko liikuttamalla kappaletta tai sensoria mittauksen tallennuksen aikana (Berkovic & Shafir 2012, s. 449). Kolmiomittauksella voidaan mitata satojatuhansia mittauksia sekunnissa, mikä mahdollistaa menetelmän käytön esimerkiksi liikkuvia kappaleita tutkittaessa (Chugui et al. 2013, s. 324). Ongelmana kolmiomittauksessa on menetelmän rajattu mittausalue. Koska lasersäde vastaanotetaan sensoripinnalle ja sensoripinnan alue on rajattu antaa tämä rajat mittausalueelle. Sensoreilla on myös aina minimi mittausetäisyys, koska liian lyhyellä mittausetäisyydellä kolmioita ei synny. Lisäksi mittausresoluutio myös heikkenee mittausmatkan kasvaessa. (Berkovic & Shafir 2012, s. 449.) Kuvassa 4 on esitetty kolmiomittauslaitteen rakenne ja toimintaperiaate.



Kuva 4. Kolmiomittauslaitteen rakenne ja toimintaperiaate (Mukaiillen Microepisilon 2010, s. 2).

Konenäön ja optisenmittaamisen rajapinnassa on optinen skannaus. Optinen skannaus toimii kuten laser kolmiomittausmenetelmä. Optisessa skannauksessa lähetään tutkittavaa kohdetta päin valonsäde ja heijastunut valo rekisteröidään vastaanottimessa. Valo lähetetään skannauksessa yleensä viivana, mutta myös yksittäistä pistettä, kuten laser kolmiomittauksessa, voidaan käyttää joissain tarkoituksissa. Kappaleen kolmiulotteista muotoa tutkittaessa pitää viivaskanneria liikuttaa pitkittäin suhteessa kappaleen pintaan tai kappaletta liikuttaa suhteessa skanneriin. Kolmiulotteisessa viivaskannauksessa usein pyöritetään kappaletta ja mitataan paikallaan olevalla skannerilla kappaleen muotoja. Toinen tapa tutkia kolmiulotteisia muotoja on lisätä havaitsimien määrää laitteistossa. Tällä menetelmällä kolmiulotteinen muoto havaitaan tutkimalla samaa viivaa kahdesta eri suunnasta. (Forrest 2012, s. 331, 338–339.) Viivaskanneri voidaan myös integroida koordinaattimittauskoneeseen. Tällöin voidaan hyödyntää koordinaattimittauskoneen liiketietoja 3D-mallin luomisessa. (Isheil et al. 2011, s. 16.) Kuvassa 5 on esitetty viivaskannauksen toimintaperiaate.



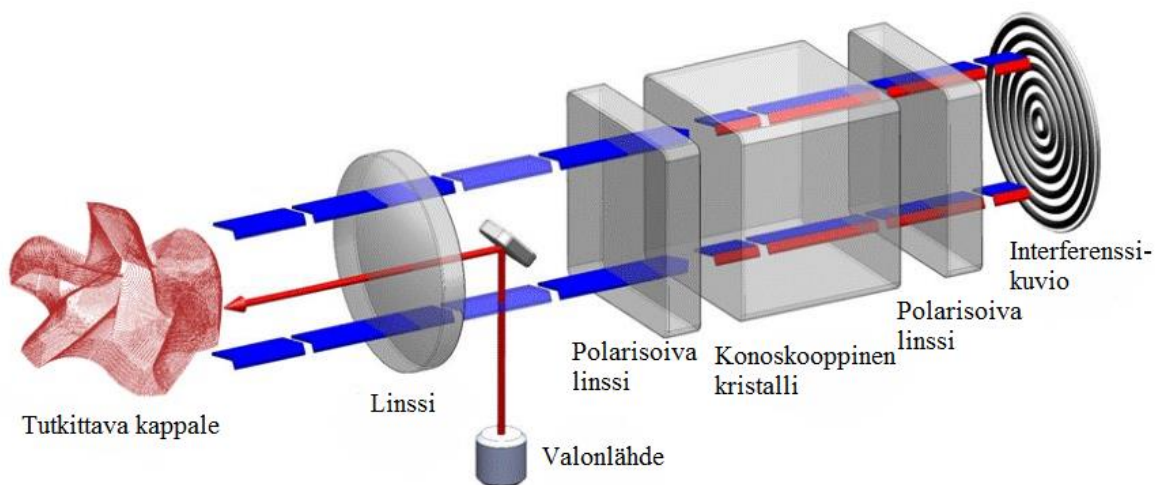
Kuva 5. Viivaskannauksen toimintaperiaate (Mukaiillen Isheil et al. 2011, s. 17).

Yleisesti teollisuudessa käytettävät optiset skannauslaitteistot käyttävät laserdiodeja tai LED-valoja. Laseria käytetään yleensä kohteissa, joissa tutkitaan pinnanmuotoja, kuten laadunvalvonnassa. LED-tekniikkaa käytetään kohteissa, joissa tarvitaan tarkkaa resoluutiota, kuten analogisen filmin digitalisoiminen. (Forrest 2012, s. 345.)

Viivaskannauksen etuna on yksinkertaisempi ja edullisempi laitteisto verrattuna perinteisempiin kuvankäsittelyyn perustuviin konenäkömenetelmiin (Forrest 2012, s. 331). Laserviivaskannauksella päästään 2-5 μm mittaustarkkuuteen ja se on koordinaattimittaukseen verrattuna huomattavasti nopeampi menetelmä (Isheil et al. 2011, s. 17, 20). Viivaskanneri tutkii kappaletta pienen alueen kerrallaan, jolloin kohteen valaistukselle riittää pieni alue toisin kuin sellaisissa konenäkömenetelmissä, joissa koko tutkittava kappale joudutaan valaisemaan samanaikaisesti ja huomioimaan esimerkiksi valon jakautuminen. Viivaskannauksella voidaan tutkia menetelmän hyvän resoluution ansioista pieniä kappaleita ja yksityiskohtia, mutta menetelmä soveltuu myös suurten kappaleiden kuten alumiinilevyjen pinnanlaadun tutkimiseen. (Forrest 2012, s. 331–332.)

Viivaskannauksen ongelmana on menetelmän tarve suhteelliseen liikkeeseen kappaleen ja mittalaitteen välillä (Forrest 2012, s. 332). Menetelmällä on myös haasteellista tutkia läpinäkyviä tai heijastavia kappaleita (Larue, Brown & Viala 2015, s. 162).

Konoskopinen holografia on kolmiulotteisten muotojen määrittäminen, jossa laservalo ohjataan kohti tutkittavaa pintaa. Heijastunut valoympyrä polarisoidaan ja ohjataan kristalliin, joka hajottaa valon kahdeksi säteeksi. Säteet kulkevat samaa matkaa, mutta niiden polarisaatiomuodot ovat vastakkaiset. Kristallin jälkeen säteet polarisoidaan ja heijastetaan pinnalle. Saadusta interferenssimuodosta voidaan laskea alkuperäinen heijastuspinta eli tutkittavan kappaleen muodot. (Optimet 2016.) Kuvassa 6 on esitetty konoskopisen holografian periaate.



Kuva 6. Konoskopisen holografian periaate (mukaiillen Optimet 2016).

2.1.4 Konenäkö ja fotogrammetria

Fotogrammetria on 1960-luvulta lähtien kehitetty optinen mittausmenetelmä, joka on eräänlainen konenäön esiaste. Fotogrammetriaa käytetään kappaleen kolmiulotteisten muotojen määrittämiseen. Menetelmässä otetaan kappaleesta kuva useammasta kuvakulmasta ja yhdistetään kuvat matemaattisilla menetelmillä kolmiulotteiseksi malliksi. Fotogrammetrialla ei suoraan voida määrittää mittakaavaa tutkittavalle kappaleelle. Mittakaavan määrittämiseksi kuviin on lisättävä jokin tunnettu referenssimitta. Fotogrammetria soveltuu parhaiten tutkimaan kokoluokassa muutamasta metristä muutama sataan metriin olevia kohteita. (Larue, Brown & Viala 2015, s. 147-148.)

Yleisesti käytössä olevat tietokonekäyttöiset konenäkölaitteistot sisältävät vähintään yhden kameran, jolla kuvataan tutkittavaa kappaletta, valaistukseen, joka valaisee kappaletta ja sen lähiympäristöä tasaisesti, kuvakaappauskortin, joka siirtää kameralta saatua dataa tietokoneelle, tietokoneen, ja kuvananalysointiohjelmiston (Liu, Ukida, Niel & Ramuhalli 2015, s. 3-4). Kuvan parantamiseksi voidaan järjestelmään lisätä myös erilaisia linssejä, peilejä tai varjostimia. Joissain tapauksissa voidaan konenäköä laajentaa myös lisäämällä laitteistoon sensoreita, jotka käsittävät myös esimerkiksi ultraviolettivaloa tai röntgensäteilyä. (Batchelor 2012, s. 27–28.)

Konenäkö voidaan myös toteuttaa kokonaan röntgensäteilyyn perustuen. Tällöin puhutaan röntgenkuvauksesta, jota käytetään yleisesti myös lääketieteen parissa ja on tullut markkinoille muodonmääritysmenetelmänä 2000-luvun alussa. Röntgenkuvaus perustuu eri materiaalien ja materiaalin paksuuksien ominaisuuksiin absorboida röntgensäteilyä. (Gapinzki 2014, s. 256.) Röntgensäteilyn asemesta voidaan käyttää myös gammasäteilyä (Liu et al. 2015, s. 24).

Röntgenkuvaus on tehokas menetelmä sisäpuolisten muotojen tutkimisessa. Menetelmällä voidaan tutkia myös materiaalin laatua, kuten materiaalin huokosten määrää. (Gapinzki 2014, s. 258.) Tavallisesti röntgenkuvauksella voidaan tutkia noin 10 mm kokoisia kappaleita noin 10 μm mittausrésoluutiolla, mutta saatavilla on röntgenkuvauslaitteita, joilla voidaan tutkia alle millimetrin kokoisia kohteita noin 10 nm mittausrésoluutiolla (Kastner & Heinzl 2015, s. 236–237).

Röntgenkuvaus on kontaktiton mittausten menetelmä ja soveltuu myös hauraille kappaleille. Röntgensäteily on kuitenkin terveydelle vaarallista ja menetelmää käytettäessä on pidettävä huolta riittävästä turvallisuusmenettelyistä. Röntgenkuvauslaitteistot ovat kalliita. Korkeaan hintaan vaikuttaa muun muassa röntgenkuvauslaitteen vaatima suunnittelutyön määrä. Teollisuuden röntgenkuvauslaitteet suunnitellaan yleensä käyttökohdekohtaisiksi. (Batchelor 2012, s. 509, 538.)

Konenäkölaitteisto voi olla myös sulautettujärjestelmä. Tällöin laitteessa on sisäänrakennettuna kamera, tarvittavat linssit sekä erilaisia prosessointi elementtejä, kuten suoritin ja grafiikkaprosessori. Sulautetuissa konenäköjärjestelmissä laitteisto ottaa ja

käsittelee kuvaa yhdessä tietokoneen kanssa. Sulautettujen konenäköjärjestelmien etuna tietokoneohjattuihin järjestelmiin verrattuna on niiden huomattavasti alhaisempi hinta ja yksinkertaisempi rakenne. Lisäksi sulautetut konenäkölaitteistot tehdään helposti uudelleenohjelmoitaviksi, mikä tekee niistä joustavampia teollisuuden tarpeisiin. Ongelmina sulautetuissa konenäköjärjestelmissä on niiden rajallinen muisti ja laskentateho. (Liu et al. 2015, s. 4-5.)

Uusimpana vaihtoehtona konenäkömenetelmistä ovat älykamerat. Älykamerat sisältävät linssit, sensorit ja kuvankäsittelyohjelmat samassa laitteessa. Älykamerat ohjelmoidaan yleensä yhtä käyttökohdetta varten. (Liu et al. 2015, s. 5.)

Konenäköprosessi alkaa kuvan ottamisella. Kuvaa ottaessa kohdetta tarkennetaan linssien ja valojen avulla. Kuvan ottamisen jälkeen raakaa kuvaa esikäsitellään, jonka jälkeen kuvan kohteen muoto määritetään. Määrittelyn jälkeen voidaan esimerkiksi alkaa vertaamaan kohdetta tietokannassa oleviin tuotteisiin tuotteen tunnistamiseksi. (Liu et al. 2015, s. 13.) Taulukossa 1 on listattu eri mittausmenetelmiä ja niiden heikkouksia ja vahvuuksia.

Taulukko 1. Yhteenveto eri menetelmien hyvistä ja huonoista puolista

Menetelmä	Vahvuuksia	Heikkouksia
Valon intensiteetin mittaaminen	<ul style="list-style-type: none"> • Yksinkertainen • Edullinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Häiriöherkkyys
Kulkuajamittaus	<ul style="list-style-type: none"> • Tarkka pitempien etäisyyksien mittaamiseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lyhyiden etäisyyksien mittaaminen vaatii tehokkaan laitteiston
Polttopistemittaus	<ul style="list-style-type: none"> • Tarkka • Mahdollista mitata tummia kohteita 	<ul style="list-style-type: none"> • Rajallinen mitta-alue
Interferenssimittaus	<ul style="list-style-type: none"> • Erittäin tarkka 	<ul style="list-style-type: none"> • Herkkä lämpötilan muutoksille • Hitaampi muihin optisiin menetelmiin verrattuna

Taulukko 1 jatkuu. Yhteenveto eri menetelmien hyvistä ja huonoista puolista

Laser kolmiomittaus	<ul style="list-style-type: none"> • Nopea 	<ul style="list-style-type: none"> • Rajattu mittausalue
Laser viivaskannaus	<ul style="list-style-type: none"> • Nopea 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaatii sensorin ja kappaleen välisen liikkeen
Konoskooppinen holografia	<ul style="list-style-type: none"> • Tarkka 	<ul style="list-style-type: none"> • Monimutkainen
Konenäkö	<ul style="list-style-type: none"> • Monipuolinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kallis (usein) • Käyttökohdekohtainen
Koordinaattimittaus	<ul style="list-style-type: none"> • Tarkka • Monipuoliset mittausmahdollisuudet 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidas • Vaatii kalliin laitteiston
Röntgenkuvaus	<ul style="list-style-type: none"> • Tarkka • Sisäpuolisten muotojen mittaus mahdollinen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kallis • Röntgensäteet terveydelle haitallisia

2.2 Systemaattisen koneensuunnittelun perusteet

Systemaattinen tuotesuunnitteluprosessi voidaan Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote (2007, s. 129) mukaan jakaa neljään osaan: tehtävän selvittelyyn, luonnosteluun, kehittelyyn ja viimeistelyyn.

Järjestelmällinen tuotteensuunnittelu aloitetaan tehtävän selvittelyllä. Tehtävän selvittelyssä otetaan kantaa suunniteltavan tuotteen ominaisuuksiin kuin myös tuotekehitysprojektin aikatauluun sekä lopullisen tuotteen kustannustavoitteisiin. Tehtävän selvittelyssä laaditaan vaatimuslista tuotteelta vaadittavista ominaisuuksista. Vaatimuslistassa listataan toiveet ja vaatimukset valmiille tuotteelle. Listatut vaatimukset ovat välttämättömiä toteuttaa tuotekehitysprojektissa. Tuotekehitysprosessi katsotaan epäonnistuneeksi, jos on yksikin vaatimus, jota valmistuote ei täytä. Vaatimuslistan toiveet ovat alempiarvoisia kuin vaatimukset. Toiveet pyritään täyttämään tuotekehitysprosessissa mahdollisuuksien mukaan. Vaatimuslistan vaatimukset ja toiveet ovat yleensä laadullisia tai määreellisiä, mutta ne pitäisi mahdollisuuksien mukaan määrittää mahdollisimman

tarkasti määreellisiksi. Esimerkiksi vaatimuslistaan voidaan määrittää laadullinen vaatimus "veden pitävä". Tämä vaatimus voitaisiin määritellä paremmin määrällisellä vaatimuksella "vesitiivis 30 minuutin ajan 1 metrin syvyydessä" tai "täyttää IP67-luokan vesitiiviiden". (Pahl et al. 2007, s. 145–147.)

Tehtävän selvittelystä siirrytään luonnosteluvaihteeseen. Luonnostelu aloitetaan abstrahoinnilla. Abstrahoinnissa vaatimuslista yksinkertaistetaan asteittain yhdeksi lauseeksi. Abstrahoitu lause toimii eräänlaisena rajauksena tuotekehitysprosessille ja siitä voidaan määrittää tuotteelle päätoiminto. (Pahl et al. 2007, s. 161–165, 169.)

Päätoiminnon määrittämisen jälkeen suunnitellaan tuotteelle toimintorakenne, jossa suunnitellaan tuotteen toimintaa ja toimintaan liittyviä tehtäviä. Valmiista toimintorakenteesta nähdään tuotteen sisääntulo tai lähtöhetki, tuotteen toiminnan lopputulos sekä vaiheet, joiden avulla lopputulokseen päästään. Näistä vaiheista voidaan määrittää tuotteelle osatoiminnot. (Pahl et al. 2007, s. 170–171, 178–181.)

Päätoiminnon määrittämisen jälkeen suunnitellaan tuotteelle osatoiminnot, jotka kuvaavat tuotteen yksittäiseen toimintoon liittyviä tehtäviä. Osatoimintojen avulla tuotteelle suunnitellaan toimintorakenne. Valmiista toimintorakenteesta nähdään tuotteen sisääntulo tai lähtöhetki, tuotteen toiminnan lopputulos sekä vaiheet, joiden avulla lopputulokseen päästään. (Pahl et al. 2007, s. 170–171, 178–181.)

Osatoiminnoille suunnitellaan erilaisia toimintaperiaatevaihtoehtoja ja toimintaperiaatteista aletaan suunnitella osatoiminnoille ratkaisuja. Eri ratkaisut kerätään ideamatriisiin. Ideamatriisista yhdistetään sopivilla arviointi kriteereillä parhaat osatoimintoratkaisut kokonaisratkaisuksi. (Pahl et al. 2007, s. 181–186.)

Kehittely vaiheessa ideoitua kokonaisratkaisua aletaan kehittää kohti konkreettista tuotetta. Kehittely on monimutkainen työvaihe, joka sisältää useita samanaikaisia toimintoja. Tässä vaiheessa tuotetta ja sen osia aletaan mitoittaa ja niille annetaan muoto tarvittavien toimintojen, rakennemuotoillun sekä lujuuslaskelmien mukaan. Tässä vaiheessa on myös tärkeää arvioida tuotteen valmistettavuutta ja taloudellista kustannuksia. (Pahl et al. 2007, s. 227–228, 247, 348.)

Viimeisenä vaiheena tuotekehitysprosessissa on viimeistely. Viimeistelyssä kerätään ja viimeistellään tuotteen dokumentaatio. Osien valmistuspiirroksen toleranssit tarkastetaan ja tarkastetaan osien ja niiden piirustusten sopiminen yrityksen sisäisiin standardeihin. Osien valmistuspiirrokset ja tuotteen kokoonpanopiirrokset numeroidaan ja kootaan osalistat ja kokoonpano-ohjeet. (Pahl et al. 2007, s. 436–438.)

3 TULOKSET

Avaimen jyrsinkoodin mittaamista varten suunniteltiin mittalaitteesta prototyyppi järjestelmällisen koneensuunnittelun periaatteiden mukaisesti. Prototyypin ideoinnissa hyödynnettiin kirjallisuuskatsauksessa saatuja tietoja mittaustekniikan nykytilassa. Prototyypin tavoitteena oli testata valitun mittausmenetelmän soveltuvuutta avaimen jyrsinkoodin mittaamiseen.

3.1 Vaatimukset

Järjestelmällisen tuotesuunnittelun periaatteiden mukaisesti suunnittelutyö aloitettiin määrittelemällä suunniteltavalle tuotteelle vaatimuslista. Vaatimuslista on esitetty taulukossa 2.

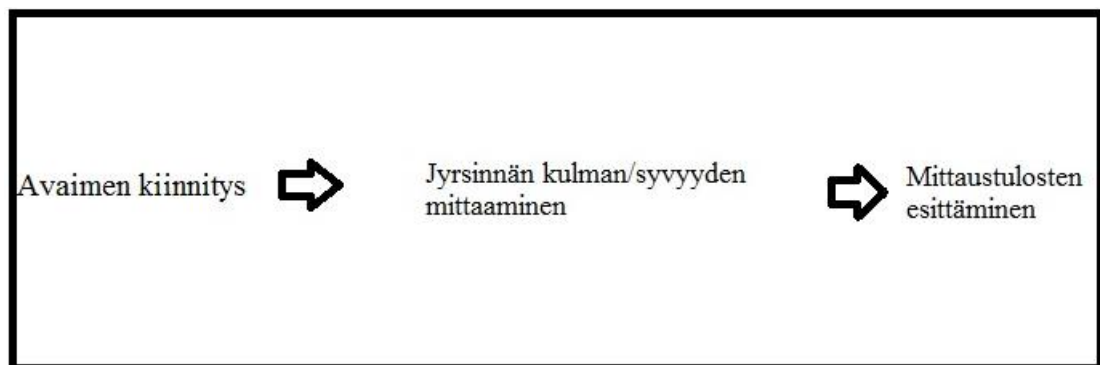
Taulukko 2. Suunniteltavan mittalaitteen vaatimuslista

<u>V</u> aatimus/ <u>T</u> oive	<u>K</u> uvaus
V	Lukee jyrsinkoodin
V	Jyrsinkoodi luettavissa selvästi ja yksiselitteisesti
V	Mukana kannettava
V	Nopea mittaus (max. 2 min)
V	Ilmaisee peitenumeron
T	Jyrsinnän jyrsinkulman tarkistus
T	Jyrsinnän leveyden tarkistus
T	Jyrsinnän aseman tarkistus
T	Jyrsinnän keskeisyyden tarkistus
T	Yksinkertainen käyttää
T	Profiilijyrshintöjen tarkistus
T	Kaikkien avainjärjestelmien tarkistus samalla mittalaitteella
T	Mittaustulosten saatavuus sähköisessä muodossa
T	Noin tietokonehiiren kokoluokkaa
T	Lopullisen mittalaitteen hinta max. 50 €
T	Lopullisen mittalaitteen hinta max. 150 € (, jos kaikkien avainjärjestelmien mittaus mahdollistuu)

Tärkeimmäksi ominaisuudeksi mittalaitteelle asetettiin jyrskoodin tunnistaminen mittaustulostusta. Mittalaitteen tulee myös esittää jyrskoodi yksiselitteisesti. Jyrskoodi on myös osalle käyttäjistä ainoa data, mitä mittalaitteen tarvitsee esittää. Mittalaitteen tulee myös olla mukana kannettava sekä pystyä suorittamaan mittaus lyhyessä ajassa, koska mittalaitteen toiminta ympäristö voi olla tarpeen mukaan tehtaan eri tiloissa tai lukkosepän mukana asiakaskäynnillä. Vaatimuslistasta saadaan abstrahoitua tuotteelle päätoiminto: ”*Muotojen yksiselitteinen ja yksinkertainen mittaaminen*”

3.2 Erilaiset ratkaisuvaihtoehdot

Vaatimuslistan määrittämisen jälkeen suunniteltavalle mittalaitteelle määritetään toimintorakenne. Toimintorakenteen päätoiminto on avaimen koodijyrskinnän mittaaminen ja määrittäminen. Tähän päästään osatoiminnoilla avaimen kiinnitys mittalaitteeseen, jyrskoodin kulmien mittaaminen sekä tulosten esittäminen. Muita päätoimintoja mittalaitteelle ovat myös mittalaitteen kustannustehokkaan valmistamisen ja mittaustulosten varmistus. Lisäksi mittalaitteen päätoimintona käsitellään mittalaitteen sisältämä avainten jyrskinkombinaatioiden tietoturva. Päätoiminto: kustannustehokkaan valmistamisen varmistus, sisältyy ideoiden vertailuvaiheessa arviointikriteereihin ja siihen ei keskitytä erikseen. Mittaustuloksen varmentamista tutkitaan prototyypin valmistuttua testaamalla ja säätämällä mittalaitetta, mutta osa tästä toiminnosta joudutaan jättämään mahdollisen tuotannollistamisen piiriin, jolloin varmistuvat muun muassa mittalaitteen osien todelliset mitat ja mittatoleranssit. Tuotantovalmiilla osilla mittalaitteen mittaustulosten hajonta saadaan määritettyä ja mittaustarkkuus saadaan säädettyä varmemmin. Toimintorakenne mittaustulosten esittämiselle on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Mittalaitteen toimintorakenne

Mittauslaitteen suunnittelua jatkettiin ideoimalla ja arvioimalla erilaisia toimintaperiaatteita jyrsinkoodin mittaamiseen. Mittausperiaate päätettiin arvioida erillisenä ja ensimmäisenä osana, koska erilainen mittausmenetelmä muuttaa kokolaitteen rakennetta ja voi muuttaa muiden osakokonaisuuksien vaatimuksia. Mittausperiaatteen kehittämiseksi luotu ideamatriisi on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Ideamatriisi jyrsinkoodin mittaamiseen

Osakokonaisuus Ratkaisuvaihtoehto	Jyrsinän syvyyden/kulman mittaaminen
1.	Optinen kolmiomittaus, jossa avain on kelkassa ja avainta liikutetaan pitkästi ja pyörittäen mittaussäteen alla
2.	Polttopistemittaus suunnattu avaimen sivuun ja avainta pyöritetään ja liikutetaan pituussunnassa mittalaitteen alla
3.	Koskettava jousiviritteinen mittauspää, jonka asema mitataan
4.	Valon intensiteettimittaus suunnattu avaimen sivuun ja avainta pyöritetään ja liikutetaan pituussunnassa mittalaitteen alla
5.	Konenäkö sovellus esim. älypuhelimella
6.	Laser viivaskannaus
7.	Ohjelma, joka laskee toimistoskannerilla skannatusta avaimesta geometrian
8.	Nykyisenlaisen indikaattorin parantaminen aseman anturoinnilla

Arviointikriteereiksi mittalaitteen suunnittelussa asetettiin ratkaisun monimutkaisuus, mittaustarkkuus, ratkaisun koko sekä tarvittavien sensorien hinta-arvio. Ratkaisut arvioitiin asteikolla 1-3 ja kriteereille annettiin painoarvot. Painotetut arviot laskettiin yhteen ja eniten pisteitä saanut ratkaisu valittiin jatkokehitykseen. Eri ratkaisujen arviointi on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Mittausmenetelmän arviointitaulukko

Arviointikriteeri Ratkaisu	Monimut- kaisuus	Kustan- nukset	Mitta- tarkkuus	Koko	
<i>Painoarvo</i>	2	2	0.5	0.5	YHT.
1	2	1	3	1	9
2	1	1	3	1	7
3	2	2	2	1	10,5
4	1	1	2	1	6,5
5	1	1	3	3	9
6	2	1	3	2	10
7	1	3	1	3	12
8	3	2	1	3	14

Eri ratkaisuvaihtoehtoiksi valikoituivat nykyisestä avainindikaattorista muokattavat ratkaisut. Nykyisen avainindikaattorin etuna muihin menetelmiin nähden on sen koko ja yksinkertainen rakenne. Ratkaisun suurimpana ongelmana on mittaustuloksen huono lukutarkkuus.

Mittalaitteen toteutukseen ideoitiin myös menetelmiä, jotka eivät vaadi erillistä mittalaitetta, vaan hyödyntävät jo yleisesti saatavilla olevia laitteita. Ratkaisuiksi ajateltiin erilaisia ohjelmia, jotka lukisivat jyrinnän esimerkiksi älypuhelimien valokuvaustoiminnon tai kopiokoneen skannerin avulla. Tällaisissa ratkaisuissa etuina ovat sovelluksen alhaiset kustannukset. Tarvittavan ohjelman tekeminen on kuitenkin työlästä ja älypuhelimien

kameroiden ja skannereiden ominaisuudet voivat vaikeuttaa ohjelman soveltamista kaikissa käyttökohteissa.

Optisten mittalaitteiden tai konenäön soveltamista kohteeseen ideoitiin. Nykyaikaisten optisten mittalaitteiden etuna on niiden erinomainen mittatarkkuus. Erityisesti konenäöllä ja laserskannauksella voidaan myös mitata kaikki avaimen dimensiot, kuten pituussuuntaiset profiilit ja jyrkyyden leveys, jotka olivat vaatimuslistassa toiveina. Ongelmaksi optisilla mittalaitteilla ja konenäöllä tulee, ratkaisun monimutkaisuus ja kustannukset. Optisilla mittalaitteilla tarvitaan suhteellinen liike sensorin ja mitattavan kappaleen välille, jolloin kokonaisratkaisuun tarvitaan esimerkiksi moottori pyörittämään mitattavaa avainta. Lisäksi pistemäisissä mittalaitteissa tarvitaan pituussuuntainen liike, koska kaikki mittaukset pitää tehdä mittalaitteiden alhaisen kustannustavoitteen ja mitattavan kohteen pienuuden takia yhdellä mittasensorilla. Konenäkö ja optiset mittalaitteet ovat nykyään liian kalliita, että niitä voitaisiin hyödyntää tässä sovelluksessa. Laser viivaskannaus on kuitenkin kilpailukykyinen, jos lähitulevaisuudessa tarvitaan yksittäinen mittalaite tuotannon tarpeisiin osaksi laadunvalvontaa.

Viimeinen hylätty mittauseriaate sisälsi jousiviritteisen neulan, joka liikkuu jyrkyyden kohdalla pystysuunnassa, kun avainta käännetään. Neulan liike mitataan joko analogisella hall-anturilla tai potentiometrillä. Ratkaisun etuna on riittävä mittaustarkkuus ja mittasensoreiden alhainen hinta varsinkin optisiin mittalaitteisiin verrattuna. Ongelmaksi voi syntyä nykymuotoista avainindikaattoria hankalampi kulumisen seuraaminen sekä riittävän pienten mittauserioiden huono saatavuus. Lisäksi riittävän mittauserioiden saamiseksi tarvitaan tasainen pyörimisliike, joka pitäisi tuottaa esimerkiksi pienellä servomoottorilla.

3.2.1 Ratkaisuvaihtoehtojen esittely

Eri ratkaisuvaihtoehtojen valikoituivat nykyisestä avainindikaattorista muokatut ratkaisut. Taulukossa 5 on esitettyä ideamatriisi indikaattorin toimintaperiaatteista. Taulukossa 6 on esitetty ideamatriisi avaimen kiinnittämisestä mittalaitteeseen.

Taulukko 5. Ideamatriisi indikaattoriratkaisuksi

Osakokonaisuus Ratkaisuvaihtoehto	Koodijyrsinnän selvittäminen
1.	Haittalevy, jossa on epäkesko muoto ja magneettinen tappi liikkuu pystysuunnassa ja nousu mitataan analogisella hall-anturilla
2.	Haittalevy, jossa epäkesko muoto ja tappi liikkuu pystysuunnassa ja nousu mitataan kapasitiivisella anturilla
3.	Haittalevyn kehällä magneetteja ja hall-anturilla mitataan ylitetyt magneetit
4.	Taipuva potentiometrinauha haitan kehälle
5.	Haitan kehälle siniaalto ja magneettinen tappi, lasketaan hall-anturilla liikuttu aallot
6.	Haitan kehälle siniaalto ja tappi, lasketaan mikrokytkimellä liikuttu aallot
7.	Vaijeri kiinni haitan kehälle ja potentiometri mittaamaan vaijerin liikettä

Taulukko 6. Ideamatriisi avaimen kiinnityksestä mittalaitteeseen

Osakokonaisuus Ratkaisuvaihtoehto	Avaimen kiinnitys
1.	Istukkakiinnitys
2.	Kumiholkki avaimen ympärille, joka tiivistyy kauluksen sisään
3.	Jigi-taso
4.	Avaimen profiiliin kiinnittyvä kiertolevy

Avaimen kiinnittämiseksi mittalaitteeseen löydettiin neljä erilaista ratkaisua. Istukkakiinnityksen idea on saatu sorveista. Ratkaisussa avain kiristettäisiin muovisilla tai metallisilla leuoilla mittauslaitteen suulle. Jos mittalaitteeseen tulee tarve lisätä sähkömoottori avaimen liikkeen vakioimiseksi, liike voitaisiin toteuttaa istukan kautta.

Toisena ratkaisuna ajateltiin kumiholkkia, joita valmistettaisiin jokaiselle avainjärjestelmälle omansa. Holkki vedettäisiin avaimen varteen ja avain holkkeineen puristettaisiin kiinni metalliseen kaulukseen, joka on kiinnitetty mittalaitteeseen. Ratkaisulla saataisiin kaikkien avainjärjestelmien kiinnitys yhdenmukaiseksi vaihtamalla kumiholkkeja. Vaihtoehtona kumiholkeille on vaihdettava jigi-taso, johon avain lukittuu kiinni ja jigi voidaan vaihtaa avainjärjestelmän mukaan ja samaa kiinnitystä voidaan käyttää jokaiselle avainjärjestelmälle.

Avaimen kiinnitys niin sanotulla kiertolevyllä on lukoissa käytetty kiinnitysratkaisu. Ratkaisussa on levy, jossa on viilto keskellä levyä. Ura kiinnittyy avaimen keskiuraan. Ratkaisu on edullinen ja mittalaite voitaisiin suunnitella hyödyntämään vakio-osia. Taulukossa 7 on esitetty mittaustulosten esittämiseen kehitettyjä ratkaisuja ideamatriisina.

Taulukko 7. Ideamatriisi mittaustulosten esittämiseen

Osakokonaisuus Ratkaisuvaihtoehto	Mittaustulosten esittäminen
1.	Tulosten siirto tietokoneelle
2.	Mittalaitteen oma näyttö
3.	Osoittimia
4.	LED-valoja ilmoittamaan jyrshintä

Mittaustulosten esittelyyn löydettiin neljä erilaista ratkaisua. Ensimmäisenä ratkaisuna oli siirtää tulokset mittalaitteista tietokoneelle esimerkiksi Excel-tiedostoon. Ratkaisun etuna on sen sopiminen myös laadunvalvonnan tarpeisiin mittaustulosten helpottuvan käsittelyn ansiosta. Tulokset voidaan tallentaa ja tuloksia voidaan analysoida suoraan indikaattorilla saaduilla tiedostoilla ilman erillisiä kirjausvaiheita.

Mittalaitteeseen voidaan myös integroida oma näyttö. Näytöksi sopisi esimerkiksi pieni LCD-näyttö. Vaihtoehtoisesti mittalaitteeseen pystyisi laittamaan erilaisia mittakellon tyyppisiä osoittimia tai LED-valoja indikoimaan jyrshintää. LED-valot olisivat rivissä ja valo syttyisivät jyrshinkoodin mukaisesti.

3.2.2 Vaihtoehtojen vertailu

Indikaattorin mittaustekniikkaa arvioitiin kolmella eri kriteerillä. Kriteereiksi valittiin hinta, saatavuus sekä tekniikan monimutkaisuus. Hinta-arvio määriteltiin internet-haun avulla komponenttimyyjien katalogeista. Saatavuudessa arvioitiin teknologian yleisyyttä näin pienessä kokoluokassa vertaamalla, kuinka monta mallia sopivan kokoisia komponentteja on tarjolla ja kuinka monta eri komponenttivalmistajaa komponentteja tarjoaa. Tekniikan monimutkaisuudella arvioitiin rakenteen fyysistä monimutkaisuutta ja tarvittavan ohjelmointityön haastavuutta. Fyysisessä monimutkaisuudessa arvioitiin tarvittavien osien määrää ja kuinka helppo osia on valmistaa.

Arviointi tehtiin arvioimalla ratkaisun ominaisuudet asteikolla 1-3. Hinta-arviossa 1 on kallein ja 3 halvin. Saatavuudessa 1 tarkoittaa tilauskohtaista yksittäistuotantoa ja 3 vakio-osan saatavuutta useilta valmistajilta ja saatavuutta useilta eri komponenttimyyjiltä. Tekniikan monimutkaisuudessa 1 on vaikea toteuttaa nykyteknologialla ja yksinkertaisista osista kasattava rakenne saa arvion 3. Kaikki arviointikriteerit koettiin yhtä tärkeiksi, joten kaikilla arviointikriteereillä on painoarvon 1. Avainindikaattorin mittausperiaatteen arviointitaulukko on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Avainindikaattoriratkaisun arviointitaulukko

Arviointikriteeri Ratkaisu	Hinta	Saatavuus	Monimut- kaisuus	YHT.
1	1	1	2	4
2	2	1	2	5
3	2	1	1	4
4	1	1	3	5
5	2	1	2	5
6	3	3	3	9
7	1	2	3	6

Avaimen kiinnitystä arvioitiin kahdella kriteerillä: osien lukumäärällä ja osien monimutkaisuudella. Molemmat arvostelukriteerit arvioitiin asteikolla 1-3. Osien lukumäärää arvioitaessa arvosanan kolme saa ratkaisu, jossa on yksi tai kaksi osaa. Osien lisääntyessä arvosana alenee. Monimutkaisuutta arvioitaessa arvosana kolme saadaan Abloyn konekannalla helposti valmistettavilla osilla. Arvosana kolme saadaan alihankkijan erikoistuneilla valmistusmenetelmillä. Painoarvoa ei arvostelukriteereille annettu. Avaimen kiinnitysratkaisun periaatteen valinta on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Avaimen kiinnitysratkaisun arviointitaulukko

Ratkaisu Arviointikriteeri	Osien lukumäärä	Monimut- kaisuus	YHT.
1	1	2	3
2	3	1	4
3	1	2	3
4	3	3	6

Avaimen kiinnitysratkaisuksi valikoitui kiertolevy, jonka suurimpana etuna on hinta. Mittalaite ei nykyisellä konstruktiolla, muokkausten jälkeenkään, tule sopimaan kaikille avainjärjestelmille täysin samalla kokoonpanolla, joten muiden ratkaisujen tarjoama modulaarisuus nähtiin turhaksi ominaisuudeksi. Lisäksi istukkarakenne nähtiin liian kalliiksi ja monimutkaiseksi ratkaisuksi. Kumiholkkeihin perustuvassa ratkaisussa nähtiin uhkana holkkien katoaminen ja holkkien sotkeutuminen.

Tulosten esittämisvaihtoehtojen vertailuun käytettiin kolmea kriteeriä: hintaa, lukutarkkuutta sekä ratkaisun monimutkaisuutta. Kaikki kriteerit arvioitiin asteikolla 1-3. Arvosana kolme saadaan ratkaisulla, joka maksaa alle kolme euroa. Arvosanalla yksi ratkaisu maksaa yli kymmenen euroa. Lukutarkkuudessa arvosana kolme tarkoittaa selvää kirjoitettua numeroarvoa, joka pystyy esittämään myös valmistusepätkkuuden. Arvosanalla kaksi ilmoitetaan selvästi lähin jrsinkoodi ja arvosanalla kolme lukutarkkuuteen vaikuttaa myös lukija itse. Monimutkaisuudessa arvioidaan ratkaisun toteutuksen vaikeutta ja mahdollisuutta hyödyntää muokkaamatta komponentteja, joita saadaan toimittajalta. Arvosana kolme tarkoittaa helposti saatavia komponentteja, joita ei tarvitse muokata. Arvosana kaksi tulee ostettavista komponenteista, joita joutuu muokkaamaan ja arvosana yksi tulee tilauksesta tehtäville osto-osille. Mittalaitteen tuloksen esitystapaa on arvioitu taulukossa 10.

Taulukko 10. Tulosten esitysmenetelmän arviointitaulukko

Ratkaisu Arviointikriteeri	Hinta	Lukutark- kuus	Monimut- kaisuus	
<i>Painoarvo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	YHT.
1	3	3	2	11
2	3	3	3	12
3	1	1	1	5
4	3	2	3	10

Tulosten esittämismenetelmäksi valikoitui mittalaitteen oma näyttö. Oman näytön etuna on se, että mittalaite säilyy mukana kannettavana. Tiedonsiirto tietokoneelle saatetaan pitää mahdollisuuksien mukaan tuotekehitysprosessissa. LED-valoissa ongelmana on luku tarkkuus, koska valoja ei voi laitteen koon takia olla enempää kuin jrsinkoodin ilmaisun verran. Lukutarkkuus tulee myös ongelmaksi osoittimien kanssa, analoginen osoitin kärsii käyttäjän lukuvirheistä. Osoittimet ovat myös kallein ratkaisu.

3.3 Toteutettava kokonaisratkaisu

Mittalaitteen kokonaisratkaisuksi valikoitui mittalaite, joka koostuu levyistä, joita on mittalaitteessa yhtä monta, kuin avaimessa on jrsintöjä. Avain työnnetään levyjen keskellä olevasta reiästä. Kun avainta käännetään 90° eli niin sanottu valintakierto, levyt asettuvat asemaan, jossa haittalevyt olisivat lukon ollessa auki-asennossa. Mittalaitteessa levyjen liike alkutilasta auki-asentoon mitataan. Mittausta varten levyjen ulkokehälle tehdään loiva sahalaitakuvio. Haittalevyjen liikkuessa sahalaitakuvio liikuttaa tappia pystysuunnassa. Tapin päähän sijoitetaan mikrokytkin, joka rekisteröi tapin liikkeitä ja mikrokytkimen rekisteröimistä tapin nousuista saadaan laskettua levyn kierto ja samalla avaimen jrsinkoodi.

Mittalaitteen prototyypissä päätettiin keskittyä mittaustekniikan testaamiseen, joten materiaalivalintoja ei mietitä sarjatuotantomielessä. Myöskään laitteen käyttöliittymään ja laitetta ohjaavaa sovelluskohtaista mikropiiriä ei suunnitella sarjatuotantoa varten, koska

diplomityö on rajattu tutkimaan mittaustekniikan soveltuvuutta. Sovelluskohtaisen mikropiirin sijaan vaihtoehtoisiksi jäivät erilaiset kaupalliset kehitysalustat, kuten Arduino ja Raspberry Pi.

3.4 Valmiin laitteiston esittely

Prototyypin kokoonpanossa päätettiin käyttää brittiläisen Raspberry Foundationin Raspberry Pi 3 Model B –kehitysalustaa, koska Raspberry Pi:llä voidaan helposti testata erilaisia laitekonfiguraatioita ja mallintaa mikropiirin toimintaa. Raspberry Pi sopii prototyypikäyttöön, koska se käyttää ohjelmointikielensä yksinkertaista Python-ohjelmointikieltä. Raspberry Pi on avoimenlähdekoodin Linux-pohjainen yhden piirilevyn tietokone ja siksi sen sisäänmeno- ja ulostulopinnejä (eng. General-purpose input/output, GPIO) on mahdollista ohjelmoida ja lukea helposti.

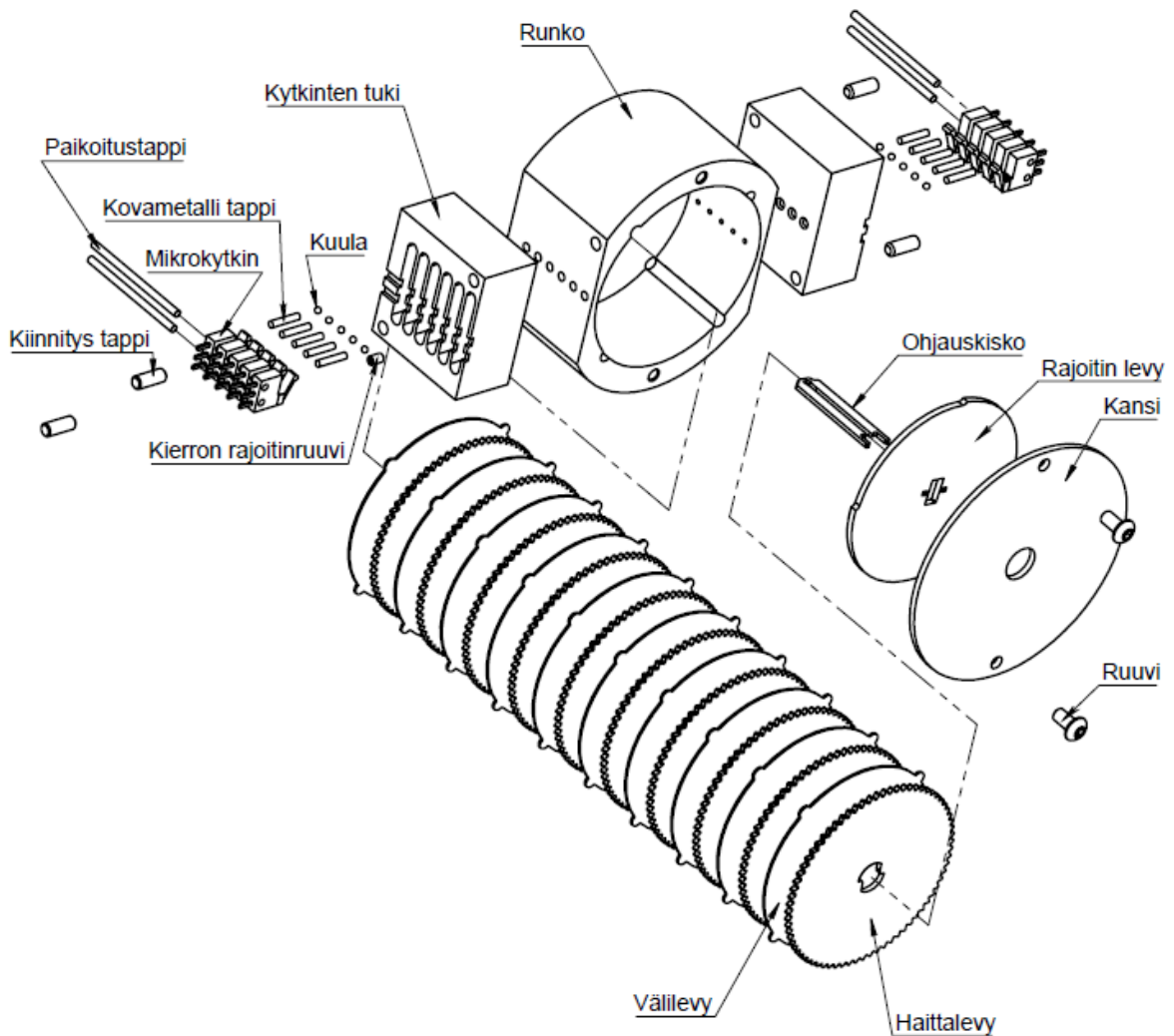
Kuvassa 8 on esitetty prototyypin mekaniikan kokoonpano räjäytyskuvana. Prototyyppi koostuu rungosta, haitta- ja välilevyistä, ohjauskiskosta ja ohjauskisko paikallaan pitävästä levystä sekä mikrokytkimistä. Runko koostuu sylinteriosasta ja sylinteriosaan tapeilla kiinnitettävistä mikrokytkimien tukiosista. Tukiosat ja runko tehtiin messingistä, koska messinkiä oli saatavilla ja sen koneistettavuus on erittäin hyvä. Mikrokytkimet liitettiin tukiosiin pujottamalla ne 1.5 millimetrin paksuisten tappien läpi ja kiinnittämällä ne pikaliimalla.

Rungon sisään tulivat kymmenen haittalevyä ja välilevyjä. Jokaisen haittalevyn keskellä on lukon haittalevyn avainkanavan muotoinen reikä ja ulkokehällä loiva sahalaitakuvio. Haittalevyjen väliin sijoitettiin välilevyjä. Välilevyjen ulkokehälle on jätetty korvat, jotka estävät haittalevyjä kääntymästä rungon sisällä. Kääntymisen estäminen on tärkeää, koska muuten kaksi peräkkäistä haittalevyä voisivat kääntää toisiaan kitkan avulla ja vääristää mittaustulosta. Välilevyn keskellä on riittävän suuri reikä, että välilevy ei koske avaimeen. Haittalevyjen väliin jätettävien välilevyjen määrällä säädetään haittalevyjen asemaa rungon reikiin nähden.

Haitta- ja välilevyjen keskelle tulee ohjauskisko, joka keskittää avaimen pituussuuntaisen jyrsinän avulla haittalevyjen reikiin ja ohjaa avaimen oikeaan syvyyteen. Ohjauskisko kiinnittyy levyyn, joka laitetaan levypaketin päällimmäiseksi. Levy keskittää ohjauskiskon

rungon keskelle. Levyn ulkokehällä on myös 90° lovi, joka runkoon kiinnitettävän ruuvin kanssa rajoittaa hättapaketin kierron mallintamaan lukon valintakiertoa. Levypaketti lukitaan rungon sisään kannella, joka kiinnitetään runkoon ruuveilla.

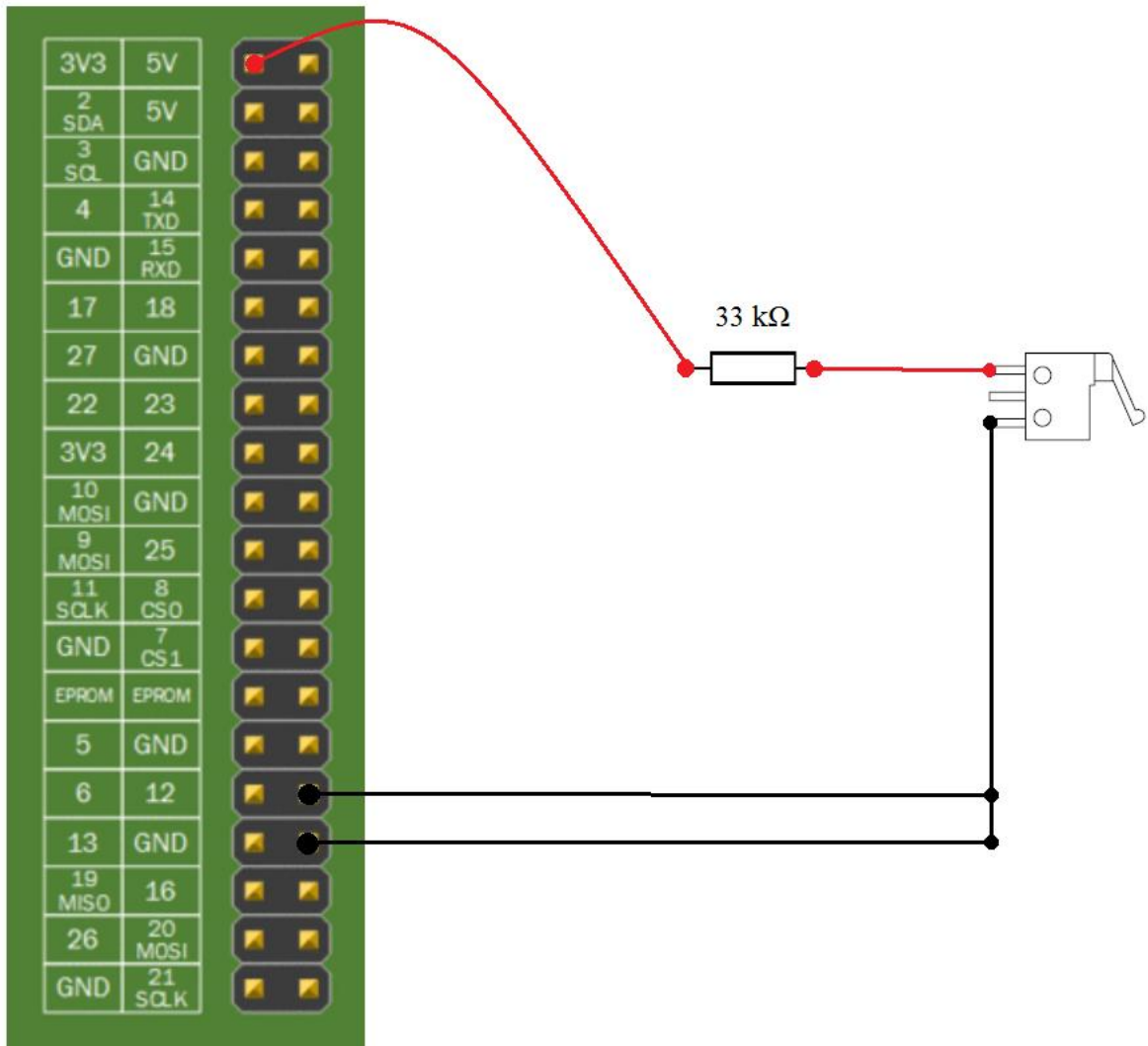
Häittalevyjen hammastuksiin sijoitettiin halkaisijaltaan 1.4 mm teräskuulat. Teräskuulien liike välitettiin mikrokytkimille 0.8 mm paksuisten kovametallitappien välityksellä. Kovametallitapit ja kuulat ohjautuvat mikrokytkintä kohti rungossa ja mikrokytkimien tukiosassa olevien reikien avulla.



Kuva 8. Räjätyskuva mittalaitteen mekaanisista osista

Mikrokytkimiksi valittiin Omron D2MQ-4L-1 – mikrokytkimet sopivan kokonsa ja hyvän saatavuutensa ansiosta. Raspberry Pi – tietokoneen GPIO-portit liitettiin lattakaapelilla reikälevyyn ja kytkimien sähkökytkentä tehtiin reikälevyn kautta. Kytkimet liitettiin

normaalisti auki –asentoon. Virta kytkimille tuotiin Raspberry Pi:n 3.3 voltin portista. Jokaisen kytkimen kanssa sarjaan asennettiin 33 kilo-ohmin vastus ja kytkimet liitettiin omiin GPIO-portteihinsa. Piiri täydennettiin liittämällä GPIO-portti Raspberry Pi:n maaporttiin. Kuvassa 9 on esitetty laitteen sähkökytkennän periaatekuva.



Kuva 9. Periaatekuva mittalaitteen elektronisista osista (Mukaillen The PiHut, 2015)

Raspberry Pi:hin ohjelmoitiin Python-koodi, jossa tarvittavat GPIO-portit alustettiin toimintaan. Ohjelman käynnistämisen jälkeen Raspberry aloittaa lukemaan kytkimien asentoa ja listaa jokaisella lukukerralla saadun tuloksen jokaiselle pinnille alustettuun listaan. Listaan tulee siis ykkösiä ja nollia ykkösten kuvatessa kytkimen painallusta ja nollien kuvatessa kytkimen aukioloa. Käyttäjä kääntää avainta tarvittavan 90° valintakieron verran ja painaa mikrokytkintä, joka on ohjelmoitu sammuttamaan GPIO-

porttien lukeminen. Syntyneistä binäärijonoista ohjelma laskee jokaisen haittalevyn liikkeen. Liike määritetään binäärijonon numeron muutoksesta, kun ykkönen muuttuu nolllaksi, on haittalevy kääntynyt kiertymän harjalta pohjalle. Nollan muuttuessa ykköseksi on pohjalta noustu harjalle. Kiertymän asteluku muutetaan jysinkoodiksi, joka muutetaan peitenumeroksi. Jos asteluku ei vastaa jysinkoodia, ilmoittaa ohjelma lähimmän peitenumeron sekä astevirheen mittalaitteen resoluution tarkkuudella. Liitteessä I on esitetty Python-koodi, jolla Raspberry Pi:tä ohjattiin. Koodi on esitetty jysinkoodin asteiden esittämiseen asti.

3.5 Prototyypillä saatava mittausdata

Mittalaitteen prototyyppeä testattiin mittaamalla prototyypillä kahta saman avainjärjestelmän avainta ja vertaamalla tuloksia lasermittalaitteella saatuihin tuloksiin. Mittauksissa tutkittiin kymmen- ja kahdeksanhaittaisen järjestelmän avaimia. Avaimista mitattiin yhdeksän ja seitsemän ylimmän jysinnän jysinkulma. Mittaus toistettiin 13 kertaa molemmille avaimille ja saatua mittausdataa analysoitiin keskiarvon, keskihajonnan ja mediaanin avulla. Mittaustuloksia käsiteltiin tietoturvasyiden takia vain astevirheen kannalta eikä varsinaisia jysinkulmia paljasteta. Mittaustulokset on esitetty taulukoissa 11 ja 12.

Taulukko 11. Mittalaitteen prototyypin mittausdata 10-haittaiselle avaimelle verrattuna todellisiin arvoihin

	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Virhe	0	-2,5	7,5	-25	10	-5	22,5	12,5	22,5
verrattuna	0	10	15	10	5	10	15	15	10
todelliseen	0	7,5	12,5	12,5	2,5	7,5	12,5	10	12,5
kulmaan	2,5	7,5	12,5	12,5	7,5	5	10	10	12,5
	0	5	12,5	12,5	7,5	5	10	10	12,5
	2,5	7,5	12,5	12,5	2,5	7,5	12,5	5	12,5
	0	0	-12,5	12,5	15	0	20	10	2,5
	0	-2,5	7,5	25	10	-5	22,5	12,5	22,5
	2,5	2,5	12,5	10	12,5	2,5	12,5	40	12,5
	2,5	2,5	0	5	40	42,5	10	5	7,5
	0	-2,5	7,5	-25	10	-5	22,5	12,5	10
	2,5	2,5	12,5	10	12,5	-2,5	12,5	0	12,5
	2,5	2,5	0	5	40	-42,5	10	5	7,5
Keskiarvo	1,15	3,08	7,69	5,19	13,85	1,73	15,00	11,35	13,08
Keskihajonta	1,25	4,06	7,43	14,29	11,75	17,44	4,80	9,18	5,90
Mediaani	0	2,50	12,50	10,00	10,00	2,50	12,50	10,00	12,50

Taulukko 12. Mittalaitteen prototyypin mittausdata 8-haittaiselle avaimelle verrattuna todellisiin arvoihin

	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta	Haitta
	1	2	3	4	5	6	7
Virhe	2,5	-7,5	-5	-2,5	-20	5	-2,5
verrattuna	2,5	0	5	2,5	-5	2,5	5
todelliseen	2,5	-2,5	10	7,5	0	7,5	10
kulmaan	2,5	2,5	5	-35	-5	2,5	5
	2,5	7,5	10	-10	-2,5	7,5	10
	2,5	7,5	10	-40	5	7,5	10
	2,5	7,5	10	-37,5	5	7,5	10
	2,5	7,5	10	0	-5	7,5	10
	2,5	2,5	10	-7,5	-5	2,5	10
	2,5	-7,5	0	-15	-15	-2,5	0
	2,5	7,5	10	0	-5	7,5	10
	2,5	2,5	10	-7,5	-5	2,5	10
	2,5	-7,5	0	-15	-15	-2,5	0
Keskiarvo	2,50	1,54	6,54	-12,31	-5,57	4,23	6,73
Keskihajonta	0	5,85	4,96	15,17	7,08	3,59	4,53
Mediaani	2,50	2,50	10,00	-7,50	-5,00	5,00	10,00

4 POHDINTA

Kappaleessa 3 suunniteltu mittalaitteen prototyyppi jäi erittäin karkeaksi. Mittalaitteen prototyyppi ei myöskään täytä kaikkia mittalaitteelle vaatimuslistassa määriteltyjä vaatimuksia. Laite kyllä lukee avaimen jyrskinkoodin ja ilmaisee koodin selvästi. Lukijalle jää kuitenkin suuri vastuu koodin tulkinnasta, sillä laitteen mittausten toistettavuus on heikko. Prototyyppi ei myöskään ole mukana kannettava sen tarvitseman verkkovirran ja ulkoisen näytön takia.

Mittalaitetta voidaan kuitenkin parantaa ja jatkokehityksellä sen voidaan odottaa täyttävän sille asetetut vaatimukset. Prototyyppi suunniteltiin valmistettavaksi konepajan materiaaleilla ja laitteistolla, jotka eivät tue laitteelta odotettavaa laatua ja kustannustehokkuutta. Prototyypin rakennetta ei myöskään hiottu loppuun mahdollisten suunnittelu- ja valmistusvirheiden tutkimisen ja korjaamisen helpottamiseksi. Laitteiston lopulliseen hiomiseen tarvittaisiin myös enemmän elektroniikka- ja tietotekniikkatuntemusta, jotta oma piirilevy, käyttöliittymä sekä hallintalaitteet saataisiin tehtyä lähemmäksi tuotantovalmista mallia.

4.1 Nykyisen avainindikaattorin parantaminen ja prototyypin jatkokehitys aiheet

Mittalaitte vaatii jatkokehittelyä. Mittalaitteen toimintaperiaatteena kannattaa vielä kokeilla tietokoneen näppäimistöissä ja pelikonsolien ohjaimissa käytettäviä kalvokytkimiä. Kalvokytkimet toimivat samalla periaatteella, kuin mikrokytkimet, mutta ovat yleensä selvästi edullisempia yksinkertaisemman rakenteensa ansiosta. Kalvokytkimissä on piirilevy, jonka päällä on kumikalvo. Piirilevyyn on piirretty sähköpiirit jokaiselle painikkeelle. Painikkeen kohdalla on rako, jolloin piiri jää vajaaksi. Kumikalvossa on sähköä johtava osa. Kun painikkeen kohdalta painetaan, piiri täyttyy ja painallus rekisteröidään.

Prototyypin etuna on se, että sillä voidaan mitata eri haittalevymäärille tehtyjä avaimia, koska peitenumero määräytyy nyt ohjelman avulla eikä valmiiksi haittalevyyneen kiinteästi merkatun numeron perusteella. Tämä mahdollistaa samaan suuntaan käännettävien avainten eri haittalevymäärien indikaattorien toteuttamisen yhdellä indikaattorilla.

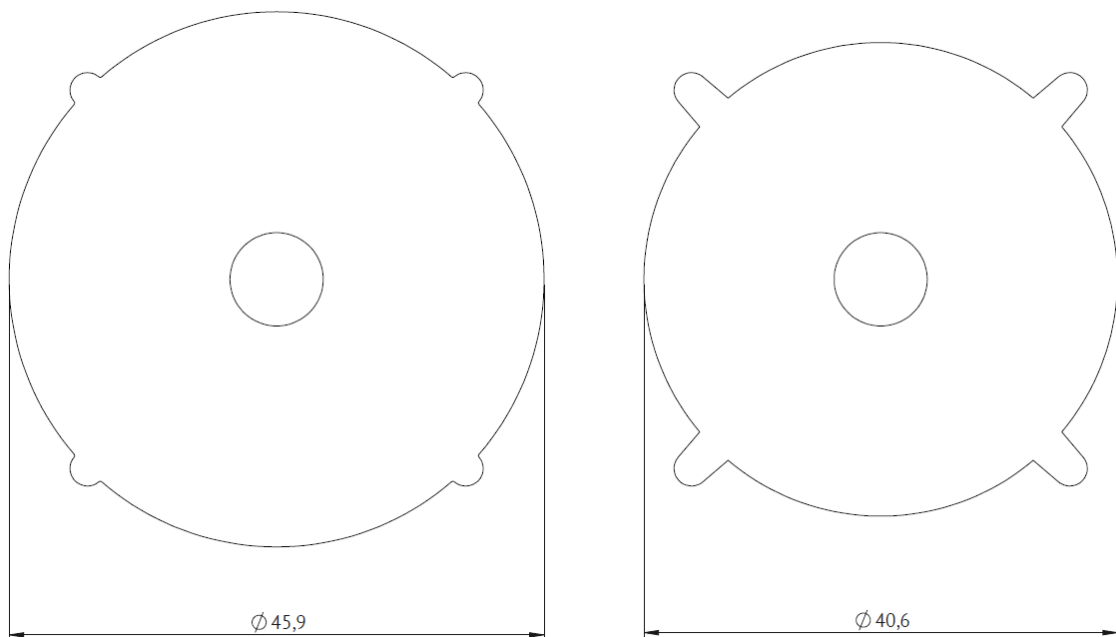
Prototyypin materiaalivalinnat suoritettiin yksittäisten kappaleiden tarpeiden mukaan. Messinkiä käytettiin prototyypin valmistuksessa sen hyvän koneistettavuuden ansiosta. Terästä käytettiin haitta- ja välilevyissä, koska teräslevyistä oli helppo valmistaa riittävän tarkkoja osia lankasahalla.

Tuotantoversiota varten tulisi ainakin laskea valmistuskustannuksia. Runko olisi hyvä muuttaa ruiskuvalettavaksi muovikappaleeksi. Mikrokytkinten erilliset tukikappaleet voitaisiin integroida osaksi runkoa. Materiaaliksi sopisi todennäköisesti jokin edullisempikin muovi, kuten polypropeeni. Myös haittalevyt voitaisiin muuttaa ruiskuvalettaviksi, mutta niiden materiaalilta vaaditaan kulutuskestävyyttä. Haittalevyjen materiaaliksi soveltuisi jokin polyamidi tai polyasetaali.

Rungon muuttaminen valettavaksi muoviosaksi parantaisi myös rungon mittatarkkuutta. Mittatarkkuuden parantaminen etenkin mikrokytkimille johtavien tappien reikien osalta parantaisi huomattavasti mittalaitteen mittaustarkkuutta ja mittausten toistettavuutta. Prototyyppiä testattaessa huomattiin mittalaitteen suureksi ongelmaksi keskimmäisten haittojen 4-6 tappien reikien mittalaitteen pituussuuntainen asemavirhe. Asemavirheen takia haittojen väliin jäi virheellisiä välyksiä. Kun haittalevyt olivat asemoitu oikein ja väleihin oli asetettu yhdet mittalaitteeseen suunnitellut välilevyt, välilevyt painoivat haittalevyihin kontakteissa olevia kuulia aiheuttaen virheellisiä mittaustuloksia. Osa keskimmäisistä mikrokytkimistä ei havainnut ollenkaan haittojen liikettä, koska välilevy painoi kuulaa. Virhettä yritettiin korjata muokkaamalla väleihin laitettavia välilevyjä. Väleihin laitettiin pienemmällä halkaisijalla olevia välilevyjä ja osaan mittalaitteen haittalevyväleistä sijoitettiin kaksi välilevyä, jotta kuulan ja haittalevyn kontakti saataisiin kaikkiin väleihin mahdollisimman hyväksi.

Taulukoista 11 ja 12 nähdään kuitenkin, että haittojen 4-6 tulokset heittelevät paljon. Tämä käy selväksi etenkin keskihajontaa tutkimalla. Välilevyjen muokkaaminen aiheutti laitteeseen ongelmaksi sen, että kaksi haittalevyä voi liikuttaa kitkan voimalla toisiaan. Eli toinen haitta voi liikkeessa pyörittää seuraavaa haittalevyä, joka ei liiku enää avaimen kosketuksen mukana.

Välilevyjen muotoa voisi muuttaa niin, että välilevyn kierron lukitsevat korvakkeet erkanisivat välilevyn pyöreästä pinnasta selvemmin. Nykyinen muoto on suunniteltu niin, ettei välilevyn ja rungon väliin jää ylimääräistä tilaa. Jos rungon ja välilevyn väliin jäävää tilaa kasvatettaisiin, auttaisi se myös haittalevyjen välysten korjaamisessa. Tällöin ei syntyisi ongelmaa kuulan ja välilevyn kontaktista. Nykyistä välilevyä verrattuna ehdotettuihin parannuksiin on verrattu kuvassa 10.



Kuva 10. Nykyinen välilevy vasemmalla ja välilevy ehdotetuilla parannuksilla oikealla

Välilevyjen materiaaliksi sopii hyvin jokin standardi teräslevy. Valmistusmenetelmänä kuitenkin lankasahaaminen ei todennäköisesti ole soveltuva, vaan välilevyjä kannattaisi alkaa valmistamaan laserleikkaamalla tai lävistämällä. Laserleikkauksen etuna on se, että laserleikkaaminen ei vaadi työkaluinvestointeja. Välilevyjen valmistusmäärät ovat todennäköisesti niin suuret, että lävistämisen vaatimat työkaluinvestoinnit jäävät kappalemäärällisesti pieniksi.

Tuotantoversiossa pitäisi myös miettiä laitteen tietoturva. Nykyinen avoimeen lähdekoodiin perustuva Raspberry Pi ei ole kohteeseen soveltuva alusta. Tuotantoversiota varten tulee todennäköisesti tarve suunnitella laitteelle sovelluskohtainen mikropiiri (eng. Application specific integrated circuit, ASIC). ASIC-piiri ei tarvitse olla yhtä

suorituskykyinen kuin prototyypissä käytetty Raspberry Pi Model 3. ASIC -piirin suunnittelussa tulee huomioida kuitenkin valmistuserä koko. Sovelluskohtaiset mikropiirit vaativat suuria valmistuseräkokoja ollakseen taloudellisesti kannattavia.

Mittalaitteen kokoonpano vaatii myös kokonaisuuden kriittisen arvioinnin. Prototyyppi on suunniteltu niin, että mekaniikka on kytketty sähkökomponentteihin, jotka ovat liitetty Raspberry Pi -tietokoneeseen, joka saa virran matkapuhelimen laturista. Tulokset esitetään tietokoneen näytöllä ja Raspberry Pi:tä ohjataan näppäimistöllä ja hiirellä. Tuotantovalmiin version rakenne pitäisi suunnitella paremmin. Laitteen voisi suunnitella joko niin, että laitteella olisi oma pieni näyttö ja muutama näppäin, kuten hyväksymis-, valinta- ja peruutusnäppäimet, tai niin, että laite kytketään esimerkiksi USB -kaapelin avulla tietokoneeseen ja ohjaus ja tulostenkatselu tapahtuisivat tietokoneen kautta. Lisäksi pitää tutkia mahdollisuutta käyttää samaa mikropiiriä useamman indikaattorin kanssa. Eli jos saadaan suunniteltua, että eri avaintyypit voitaisiin mitata muutamalla eri mekaanisella kokoonpanolla, olisiko mahdollista liittää aina avaintyypistä riippuva kokoonpano yhteen mikropiiriin? Näin saataisiin esimerkiksi paketti, jossa olisi muutama mekaaninen mittaussyksikkö ja yksi sähköinen yksikkö, jolla voitaisiin hallita kaikkia mekaanisia yksiköitä. Näin kalliin sovelluskohtaisen mikropiirin kustannukset jakautuisivat asiakkaalle edullisemmin. Mittalaitteen jatkokehitystä varten voidaan muodostaa SWOT -analyysi, joka on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. SWOT -analyysi mittalaitteen jatkokehitykselle

<p style="text-align: right;">Sisäiset</p> <p style="text-align: left;">Ulkoiset</p>	<p style="text-align: center;">Vahvuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eri haittaleyvymäärät voidaan mitata samalla mekaniikalla - Tuloksen selkeä ilmaisu - Ohjelma päivittäminen on helppoa esimerkiksi jyr-sintöjen mittamuutosten tai uuden avainjärjestelmän julkaisun yhteydessä 	<p style="text-align: center;">Heikkoudet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lähdekoodin tietoturvan kannalta vaatii oman mikropiirin suunnittelun - Vasenkätisen avaimen mittaaminen ei välttämättä onnistu samalla mekaniikalla, kuin oikeakätisen avaimen - Vaatii sähköä toimiakseen - Huomattavasti suuremman kokoinen, kuin nykyiset avainindikaattorit
<p style="text-align: center;">Mahdollisuudet</p> <ul style="list-style-type: none"> - Valmistuskustannusten alenemispotentiaali materiaalimuutoksilla ja mikrokytkinten korvaamisella kalvokytkimillä - Mahdollista suunnitella laite niin, että mittalaite tarvitsee vain yhden mikropiirin hallinnoimaan kaikkia mekaanisia mittapäitä - Mahdollista suunnitella mekaniikkaa niin, että useiden avainjärjestelmien mittaaminen onnistuu 	<p style="text-align: center;">Menestystekijät</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mittalaite voi ilmoittaa ohjelmistonsa edellisen päivityksen, jolloin voidaan varmistaa mittalaitteen ajantasaisuus - Uusien avainjärjestelmien käyttöönotto kustannukset alenevat, jos mittaus onnistuu saman mittalaitteen ohjelmistopäivityksellä 	<p style="text-align: center;">Heikkoudet vahvuuksiksi</p> <ul style="list-style-type: none"> - Laite toimii esimerkiksi usb-varavirtalähteellä, jolloin mukana kuljetettavuus säilyy - Usean avainjärjestelmän mittauksen mahdollistaminen vähentää tilantarvetta ja virhemahdollisuuksia - Suurempi indikaattori ei unohdu esimerkiksi taskuun ja säilyy paikallaan paremmin

Taulukko 13 jatkuu. SWOT -analyysi mittalaitteen jatkokehitykselle

Uhat	Uhat vahvuuksiksi	Mahdolliset kriisitilanteet
- ASIC-piirin kappalehinta voi muodostua korkeaksi	- Mahdollisuus muokata laite toimimaan esim. tietokoneen ohjauksen alla, jolloin mittalaite ei tarvitse omaa prosessoria	- Mikropiiri tulee suunnitella niin, että sen lähdekoodi ladataan laitteeseen suoraan binäärimuodossa, jolloin lähdekoodin sisältämää tietoa ei paljasteta - Mittalaitteille luotava rekisteri, jonne laitteet ja käyttäjät rekisteröidään

4.2 Useiden avainjärjestelmien ja profiilijärsintöjen mittaaminen

Mittalaitteen prototyypillä saadaan vastattua tavoitteeseen suunnitella nykyisestä avainindikaattorista helppolukuisempi. Prototyyppi esittelee myös muita keinoja neljänteen tutkimuskysymykseen; kuinka nykyistä avainindikaattoria voitaisiin parantaa?

Prototyypin haittalevyjä kannattaa kuitenkin kehittää eteenpäin. Tällöin voitaisiin myös tutkia kolmannen tutkimuskysymyksen eli useiden avainjärjestelmien lukemisen ongelmaa. Haittalevyn reiän muotoa kannattaa kehittää niin, että se mahdollistaisi myös muiden eri avainjärjestelmien mittaamisen samalla indikaattorilla. Useiden avainjärjestelmien mittauksessa voisi tällöin hyödyntää mittaustulosten käsittelyssä ja peitenumeron määrittämisessä avainindikaattoriin ohjelmoitavaa koodia. Tällöin voitaisiin korvata useita erilaisia avainindikaattoreita muutamalla indikaattorimallilla saaden säästöjä muun muassa suurempien valmistuseräkokojen ja vähentyvien osavariaatioiden ansiosta.

Toisaalta kaikkien avainjärjestelmien mittaaminen mahdollistuisi myös kirjallisuuskatsauksen mukaan muillakin keinoilla. Kaikkien avainjärjestelmien mittaamiseen soveltuvat laitteet ovat tällä hetkellä kuitenkin kalliita ja tutkimuskysymykseen vastaavina ratkaisuinä olisivat konenäkösovellukset ja optinen viivaskannaus, jotka tulisivat kustantamaan halvimmillakaan yli tuhat euroa mittaussyksikköä kohti. Optiset viivaskannerit mahdollistaisivat kuitenkin avaimen

profiilijyrsintöjen mittaamisen, johon haluttiin vastauksia toisessa tutkimuskysymyksessä. Konenäkösovellukset ja optiset mittausten menetelmät ovat todennäköisimmin ensimmäisessä tutkimuskysymyksessä haettuja tulevaisuuden kilpailukykyisiä mittausten menetelmiä.

4.3 Lähitulevaisuuden vaihtoehdot avaimen mittaamiseen ja jatkotutkimus

Hyvänä jatkotutkimuskohteena toimii optisten mittalaitteiden hyödyntäminen avaimen mittojen tutkimisessa. Tällä hetkellä lasermittalaitteet ovat liian kalliita hyödynnettäväksi avainindikaattoreissa. Optisten viivaskannereiden hinnat ohjelmistoinen alkavat työn kirjoitushetkellä noin tuhannesta eurosta, mutta laser- ja LED-viivaskanneria voitaisiin hyödyntää jo nyt tuotannon laadunvalvonnassa.

Viivaskannerit sopisivat tuotannon laadunvarmistukseen nopean ja tarkan mittauksen ansiosta ja tällainen mittalaite voitaisiin integroida linjastoon. Viivaskannerilla voitaisiin seurata avaimen kaikkia dimensioita avainaihion muodosta koodijyrsintään ja pitkittäisiin profiilijyrsintöihin. Viivaskannereiden etuna olisi lisäksi avaimen kolmiulotteinen mittaaminen, jolloin eri mittoja voidaan verrata toisiinsa ja esimerkiksi muotojen asemaa voidaan mitata suhteessa toisiinsa. Myös koodijyrsintöjen ja avaimen päässä olevien lyhyiden profiilijyrsintöjen aseman mittaaminen onnistuisi.

Noin viiden vuoden kuluttua tutkimus kannattaa suorittaa uudelleen optisen mittauksen tilaan painottuen, sillä etenkin lasermittalaitteet tulevat edullisemmiksi tekniikan kypsyttyä. Viiden tai kymmenen vuoden kuluessa optiset mittalaitteet voivat tulla kilpailukykyisiksi erityisesti niiden tarjoaman joustavuuden ansiosta. Optisilla mittalaitteilla voitaisiin mitata kaikki erilaiset avainjärjestelmät samassa mittalaitteessa, joka ei ole mahdollista nykyisillä avainindikaattoreilla. Sähköiset mittalaitteet voitaisiin myös räätälöidä ohjelmallisesti käyttäjilleen sopiviksi, jolloin samalla mittalaitteen kokoonpanolla voitaisiin käyttökohteesta riippuen mitata eri mittoja tai esittää eri mittaustietoja eri tavalla. Esimerkiksi tuotannossa riittäisi asteikko hyvä-hylätty ja tuotantolaitteiden kulumista ja asetusten seuranta suorittava laadunvalvonta voisi seurata vaikka yksittäisiä mittoja tarkasti taulukoiden mittaustietoa omiin kuvaajiinsa.

Etenkin viivaskannereiden ja konenäkölaitteistojen haittana tulee olemaan vielä pitkään, niiden vaatima suuri koko verrattuna nykyiseen avainindikaattoriin. Optisten ja

konenäköön perustuvien mittalaitteiden kokoon ei vaikuta pelkästään mittaussensoreiden koko vaan myös mittauksen kolmiulotteisuuden vaatima mitattavan kappaleen ja mittaussensorin välinen suhteellinen liike. Tällöin myös laitteen koko kasvaa ja laitteen tekniikka monimutkaistuu. Kokoluokka ei kuitenkaan häiritse tuotannon laadunvalvontaa, jossa mittalaitetta ei tarvitsisi siirtää.

4.4 Taloudellisten kustannusten arvioiminen

Mittalaitteen prototyypin valmistuskustannukset arvioitiin kappaleessa 4.1 esitettyjen tuotannollistamista parantavien ehdotusten mukaisesti. Valmistuskustannusten arvioinnissa hyödynnettiin standardikomponenttien myyjien tarjoamia kappalehintoja sekä arvioimalla valettaviksi muutettavien osien kustannukset samankaltaisten muoviosien kustannusten avulla. Kustannukset arvioitiin noin 2000 kappaleen valmistusta ajatellen.

Valettavien osien, eli rungon ja haittalevyjen, hintaan vaikuttavat muotin valmistuskustannukset, materiaalikustannukset sekä muun muassa työstä syntyvät kustannukset. Materiaalikustannukset arvioitiin kirjoitushetken maailmanmarkkinahintojen perusteella. Rungon polypropeenille kilogrammahinta on noin dollarin eli noin 0,85 euroa kilolta. Haittalevyjen abs-muoville hinta on noin 1.5 dollaria kilogrammalta eli noin 1.275 euroa kilogrammalta. Rungon muottikustannukset arvioitiin olevan noin 20 000 euroa, rungon monimutkaisten muotojen ja koon perusteella. Haittalevyjen kohdalla selvittäänsä selvästi kevyemmällä muotilla, haittalevyjen yksinkertaisemman muodon ansiosta. Haittalevyjen muotin hinnaksi arvioitiin noin 5 000 euroa. Valmistuksen muihin kustannuksiin arvioitiin noin 0,5 euroa kappaleelle. Valettavien osien valmistuskustannukset on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Valettavien muoviosien valmistuskustannukset

	Runko	Haittalevy
Muottikustannukset	20 000 €	5 000 €
Muottikustannukset/kpl	10 €	0,25 €
Materiaalikustannukset	0,2 €	0,06 €
Muut kustannukset	0,5 €	0,5 €
Valmistuskustannukset/kpl	10,7 €	0,81 €

Rungon ja haittalevyjen lisäksi vain mittalaitetta varten tehtäviä osia ovat välilevyt, kierronrajoituslevy sekä kansi. Kaikki ovat yksinkertaisia levyosia ja niiden hinnat voidaan arvioida välille 0,1-0,2 €. Loput jäljelle jäävät osat ovat vakio osto-osia. Mittalaitteen osien hinta-arviointi on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Mittalaitteen osien hinta-arvio

Osa	Kpl/mittalaite	Hinta/kpl	Hinta yht.
Runko	1	10,7 €	10,7 €
Haittalevy	10	0,81 €	8,1 €
Välilevy	10	0,1 €	0,1 €
Ohjauskisko	1	0,08 €	0,08 €
Rajoitinlevy	1	0,15 €	0,15 €
Kansi	1	0,2 €	0,2 €
Kuula	9	0,003 €	0,03 €
Kovametallitappi	10	0,14 €	1,4 €
Mikrokytkin	10	1,409 €	14,09 €
Kokonaishinta			34,85 €

Mekaanisten osien lisäksi tarvitaan mittalaitteelle vielä mikropiiri. Mittalaitteelle sopivan piirin hinnan arvioiminen ilman valmiiksi suunniteltua piirilevyä on vaikeaa, mutta karkeaksi arvoiksi voitaneen sanoa Raspberry Pi:n hinta eli 40 €. Mittalaitteen loppukokoonpanoon kuluu noin 15–30 minuuttia ja siitä syntyy arvoilta vielä 20 € kustannus muun muassa kokoonpanijan palkkojen muodossa.

Mittalaitteen valmistuskustannuksiksi muodostuu noin 95 €. Tämä on lähes kaksinkertainen hinta verrattuna vaatimuslistassa (taulukko 2) määriteltyyn maksimihintavaatimukseen nähden. Kustannuksiin tulee kuitenkin vaikuttamaan suuresti valmistusmäärät. Nyt valmistuskustannuksia vääristää 2 000 kappaleen erälle mitoitettu rungon ruiskuvalumuotti. Valmistuskustannuksia voitaneen alentaa vielä kappaleessa 4.1 esitellyllä kalvokytkin rakenteella, joka voitaisiin myös integroida mittalaitteen mikropiirin piirilevyille. Toisaalta pitää harkita mahdollisuutta hyödyntää samaa ASIC -piiriä useammalle mekaniikka kokoonpanolle kappaleen 4.1 mukaisesti, jolloin nykyisten avainjärjestelmien mittaaminen onnistuisi ehkä kolmella mekaniikka kokoonpanolla. Tällöin kokonaisuuden valmistuskustannuksissa voitaisiin päästä noin 180 € luokkaan, joka on huomattavasti alhaisempi kuin nykytilanne, jossa kaikki tarvittavat indikaattorit ostetaan erikseen. Tällöin päästäisiin lähes vaatimuslistassa määriteltyyn toiveeseen kaikkien avainjärjestelmien jyrskoodin mittaamisen soveltuvan laitteen valmistuskustannuksista.

5 YHTEENVETO

Diplomityössä tutkittiin mittaustekniikan mahdollisuuksia avaimen jyrsinkoodin mittaamiseksi. Työssä tutkittiin kirjoitushetken mittaustekniikan näkymiä kirjallisuuskatsauksen avulla sekä suunniteltiin prototyyppi, jolla testattiin nykyisen mittalaitteen toimintaperiaatteen kehittämistä paremmin luettavaan ja käsiteltävään muotoon.

Kirjallisuuskatsauksessa huomattiin nykyisten optisten mittalaitteiden soveltuvan toimintatavoiltaan ja tarkkuuksiltaan kohteeseen. Erityisesti laser viivaskannauksen avulla voitaisiin saada mitattua avaimen dimensioita monipuolisesti, tarkasti ja nopeasti. Laser viivaskannauksen avulla pystyisi avaimista myös seuraamaan laadunvalvonnan kannalta tärkeitä mittoja. Optisten mittalaitteiden ongelmana ovat kuitenkin niiden korkeat hankintakustannukset. Optisten mittalaitteiden hinnan uskotaan kuitenkin ajan myötä laskevan sovelluksen edellyttämälle tasolle, jolloin niiden testaamista kohteessa kannattanee harkita uudelleen.

Mittalaitteen prototyypin suunnittelussa päädyttiin kehittämään nykyisen mittalaitteen toimintaa, jossa avaimella käännetään haittalevyjä. Haittalevyjen liike mitataan ja määritetään avaimen jyrshintä haittalevyn liikkeen mukaan. Mittalaitteessa hyödynnettiin mikrokytkimiä, joita käytettiin laskemaan haittalevyn kiertokulma. Haittalevyn ulkokehälle suunniteltiin sahalaitakuvio, joka painaa mikrokytkintä tietyn astekulman välein. Mikrokytkimen painallusten määrästä määritettiin kiertokulma. Elektronisten komponenttien avulla mittadata voitiin esittää tietokoneen avulla eksakteina lukuina.

Suunnitellun mittalaitteen toimintaperiaatteen huomattiin soveltuvan kohteeseen, mutta vaativan jatkokehittelyä. Mittalaitteen prototyyppiä vaivasivat ongelmat valmistustarkkuuksien kanssa, jotka selvittämällä mittalaitteesta voitaisiin saada huomattavasti luotettavampi. Lisäksi ehdotettiin useita tapoja alentaa prototyypin mukaisen mittalaitteen valmistuskustannuksia, mikäli mittalaitetta aletaan tuotteistamaan.

LÄHTEET

Abloy Oy. ABLOY as a company. [Abloy Oy:n www-sivuilla]. 7.11.2017 [viitattu 2.1.2018]. Saatavissa: <http://www.abloy.com/en/abloy/abloycom/about-us/>

Andersson, P. H. & Tikka, H. 1997. Mittaus- ja laatutekniikat. Porvoo: WSOY. 323 s.

Berkovic, G. & Shafir, E. 2012. Optical methods for distance and displacement measurements. *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 4, Iss. 4. S. 441-471.

Chugui, Y., Verkhoglyad, A., Poleschuk, A., Korolkov, V., Sysoev, E., & Zavyalov, P. 2013. 3D Optical Measuring Systems and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications. *Measurement Science Review*, Vol. 13, Iss. 6. S. 322-328.

Collins, D. FAQ: What are capacitive encoders and where are they suitable?. [Motion Control Tips www-sivuilla]. 29.10.2015a [viitattu 30.3.2017]. Saatavissa: <http://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-capacitive-encoders-and-where-are-they-suitable/>

Collins, D. FAQ: What types of linear encoders are there and how do I choose?. [Motion Control Tips www-sivuilla]. 25.9.2015b [viitattu 30.3.2017]. Saatavissa: <http://www.motioncontroltips.com/faq-what-types-of-linear-encoders-are-there-and-how-do-i-choose/>

Eitel, L., Kimbrell, J. How to select, apply and integrate the right encoder for an industrial automation application. [Motion Control Tips www-sivuilla]. 4.11.2013 [viitattu 30.3.2017]. Saatavissa: <http://www.motioncontroltips.com/understanding-encoders/>

Gapinski, B., Wiczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., Dybala, B. & Ziolkowski, G. 2014. Comparison of Different Method of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D. Teoksessa: Katalinic, B., 24th DAAAM International Symposium

on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013. Volume 69. Procedia Engineering. S. 255-262.

Isheil, A., Gonnet, D., Joannic, D. & Fontaine, J.-F., 2011. Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 49, Iss. 1. S. 16-24.

Micro-Epsilon, 2015. More Precision. confocalDT // Confocal chromatic measurement system [verkkodokumentti]. USA: syyskuu 2015 [viitattu 22.3.2016]. Micro-Epsilon Tuotekatalogi. 20 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--confocalDT--en-us.pdf>

Micro-Epsilon, 2010. More Precision. Application Guide Laser Triangulation Sensors optoNCDT [verkkodokumentti]. USA: maaliskuu 2010 [viitattu 22.3.2016]. Micro-Epsilon Tuotekatalogi. 16 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--optoNCDT-Application-Guide--en-us.pdf>

Optimet. Our technology. [Optimetin www-sivuilla]. 3.3.2016 [viitattu 3.3.2016]. Saatavissa: http://www.optimet.com/our_technology.php

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K., H. 2007. Engineering Design: A Systematic Approach. 3.painos. Lontoo: Springer-Verlag London Limited. 617 s.

The PiHut. Turning on an LED with your Raspberry Pi's GPIO Pins. [The PiHutin www-sivuilla]. 11.6.2015 [viitattu 15.6.2017]. Saatavissa: <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/27968772-turning-on-an-led-with-your-raspberry-pis-gpio-pins>

Timings, R. L. & Wilkinson, S. P. 2000. Manufacturing Technology Volume 2. 2. painos. Harlow: Longman. 414 s.

Ohjausyksikössä käytetty Python-koodi

```
## Janne Rautiainen
## Di-työ koodi
## 13.1.2017

## Tuodaan kirjastosta GPIO- ja aikatyökalut
import RPi.GPIO as GPIO
import time

##Valitaan väytettävät GPIO:t
GPins = [5, 6, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 24, 27]

## GPIOiden alustus
heratys = 0

while heratys < 11:
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)
    GPIO.setup(GPins[heratys], GPIO.IN)
    print('GPIO'+ str(GPins[heratys])+ ' online')
    heratys = heratys + 1

##alustetaan lasku
in5 = 0
no5 = 0
in6 = 0
no6 = 0
in12 = 0
no12 = 0
in16 = 0
no16 = 0
in17 = 0
no17 = 0
in19 = 0
no19 = 0
in20 = 0
no20 = 0
in21 = 0
no21 = 0
in22 = 0
no22 = 0
in27 = 0
no27 = 0
```

```
## Alustetaan datavektorit
lista1 =[]
lista2 =[]
lista3 =[]
lista4 =[]
lista5 =[]
lista6 =[]
lista7 =[]
lista8 =[]
lista9 =[]
lista10 =[]

##Yhdistetään häirtalevy ja GPIO
while True:
    haitta1 = GPIO.input(5)
    haitta2 = GPIO.input(6)
    haitta3 = GPIO.input(12)
    haitta4 = GPIO.input(16)
    haitta5 = GPIO.input(17)
    haitta6 = GPIO.input(19)
    haitta7 = GPIO.input(20)
    haitta8 = GPIO.input(21)
    haitta9 = GPIO.input(22)
    haitta10 = GPIO.input(27)
    killswitch = GPIO.input(24)

##Muodostetaan datavektorit jyrksinnöille
####
    if (haitta1 == True):
        in5 = in5 + 1
        lista1.append(1)
        time.sleep(0.01)
    elif(haitta1 == False):
        no5 = no5 + 1
        lista1.append(0)
        time.sleep(0.01)

####
    if (haitta2 == True):
        in6 = in6 + 1
        lista2.append(1)
        time.sleep(0.01)
    elif(haitta2 == False):
        no6 = no6 + 1
        lista2.append(0)
        time.sleep(0.01)
```

```
####  
if (haitta3 == True):  
    in12 = in12 + 1  
    lista3.append(1)  
    time.sleep(0.01)  
elif(haitta3 == False):  
    no12 = no12 + 1  
    lista3.append(0)  
    time.sleep(0.01)
```

```
####  
if (haitta4 == True):  
    in16 = in16 + 1  
    lista4.append(1)  
    time.sleep(0.01)  
elif(haitta4 == False):  
    no16 = no16 + 1  
    lista4.append(0)  
    time.sleep(0.01)
```

```
####  
if (haitta5 == True):  
    in17 = in17 + 1  
    lista5.append(1)  
    time.sleep(0.01)  
elif(haitta5 == False):  
    no17 = no17 + 1  
    lista5.append(0)  
    time.sleep(0.01)
```

```
####  
if (haitta6 == True):  
    in19 = in19 + 1  
    lista6.append(1)  
    time.sleep(0.01)  
elif(haitta6 == False):  
    no16 = no16 + 1  
    lista6.append(0)  
    time.sleep(0.01)
```

```
####  
if (haitta7 == True):  
    in20 = in20 + 1  
    lista7.append(1)  
    time.sleep(0.01)  
elif(haitta7 == False):  
    no20 = no20 + 1  
    lista7.append(0)  
    time.sleep(0.01)
```

```

####
    if (haitta8 == True):
        in21 = in21 + 1
        lista8.append(1)
        time.sleep(0.01)
    elif(haitta8 == False):
        no21 = no21 + 1
        lista8.append(0)
        time.sleep(0.01)

####
    if (haitta9 == True):
        in22 = in22 + 1
        lista9.append(1)
        time.sleep(0.01)
    elif(haitta9 == False):
        no22 = no22 + 1
        lista9.append(0)
        time.sleep(0.01)

####
    if (haitta10 == True):
        in27 = in27 + 1
        lista10.append(1)
        time.sleep(0.01)
    elif(haitta10 == False):
        no27 = no27 + 1
        lista10.append(0)
        time.sleep(0.01)

####

    if (killswitch == False):
        break
        time.sleep(0.5)

## Näytetään i:n jyrksinnän kulma
def indikointi(lista, haitta):
    alpha = 0
    for i in range(1,len(lista)):
        if lista[i-1] != lista[i]:
            alpha = alpha + 2.5
    print(str(alpha))

## Esitetään jysintöjen kulmat
indikointi( lista1, 1 )
indikointi( lista2, 2 )

```

indikointi(lista3, 3)
indikointi(lista4, 4)
indikointi(lista5, 5)
indikointi(lista6, 6)
indikointi(lista7, 7)
indikointi(lista8, 8)
indikointi(lista9, 9)
indikointi(lista10, 10)