



# Robottisolujen automaattisen mittauksen kehitys ja vakiointi

Ari-Pekka Heikkilä

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Automaatiotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Automaatiotekniikka

HEIKKILÄ, ARI-PEKKA:

Robottisolujen automaattisen mittauksen kehitys ja vakiointi

Opinnäytetyö 62 sivua  
Toukokuu 2021

---

Opinnäytetyön tarkoitus oli kehittää ja vakioida Fastems Oy:n robottisolujen automaattista mittausta. Kun robotilla käsitellään yksittäisiä kappaleita, täytyy kappaleen ja sen kohteen sijainti tietää tarkasti. Joskus kappaleen tai sen kohteen sijainti täytyy mitata, jotta kappaleesta tarttumisen ja sen vieminen kohteeseen onnistuisi. Ympäristön piirteitä voidaan mitata monella tavalla, ja työssä keskityttiin lasermittaukseen. Työn teoriaosuudessa perehdyttiin laajasti laseranturien toimintaan sekä tutustuttiin myös robotiikkaan teoriassa. Käytännön osuudessa mitattiin metallilevyssä olevan reiän sijaintia laserantureilla. Kolme laseranturia kiinnitettiin robotin laippaan, ja niitä vertailtiin erilaisissa mittaolosuhteissa. Laseranturien vertailun lisäksi mittauksen tarkoitus oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat lasermittaukseen ja miten niiden vaikutusta voidaan vähentää.

Mittauksista selvisi, että etenkin mittausetäisyys, valaistus, heijastukset ja mittauspinnan materiaali vaikuttavat lasermittaukseen. Pidemmällä mittausetäisyydellä mittauksen tarkkuus oli huomattavasti huonompi kuin lyhyemmällä. Lähes kaikissa mittauksissa kirkas valaistus huononsi mittauksen tarkkuutta. Vastaavasti ympäristön pimentäminen yleensä paransi mittauksen tarkkuutta. Heijastava kappale lähellä mitattavaa kohdetta voi aiheuttaa häiriötä, mutta suurempi vaikutus on mitattavan pinnan heijastavuudella. Heijastavalla mittauspinnalla mittauksen tarkkuus on yleensä huonompi kuin heijastamattomalla pinnalla. Yksittäisten olosuhteiden vaikutukset olivat melko pieniä, ja vasta yhdistämällä useita mittauksia haittaavia olosuhteita saatiin haitallisen suuria mittaustuloksia.

Tiettyjen mittaolosuhteiden todettiin jatkuvasti haittaavan lasermittauksia. Laseranturien asetusten muuttaminen ei yleensä vähentänyt olosuhteiden vaikutusta, joten ainoaksi ratkaisuksi jäi itse häiritsevän tekijän poistaminen. Opinnäytetyön avulla selvisi kuitenkin se, kuinka paljon eri olosuhteet häiritsevät lasermittauksia. Yksittäiset olosuhteet vaikuttivat mittauksen tarkkuuteen oletettua vähemmän. Tulosten perusteella yksi laseranturi oli selvästi luotettavin ja monikäyttöisin. Kyseinen anturi soveltuisi käytettäväksi kaikkiin mittauksissa vaativiin robottisoluihin. Mittauksia varten kehitettyä ympäristöä voidaan halutessa käyttää jatkossakin. Samoja laserantureita voidaan testata lisää, tai ympäristössä voidaan testata uusia antureita tai mittausmenetelmiä.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering  
Automation Engineering

HEIKKILÄ, ARI-PEKKA:  
Development and Standardization of Automatic Measurement in Robotic Cells

Bachelor's thesis 62 pages  
May 2021

---

The purpose of this thesis was to develop and standardize the automatic measurement in Fastems Oy's robotic cells. When handling individual parts with robots, the location and the destination of the part have to be known precisely. Sometimes it is necessary to measure the location or the destination of the part. There are many suitable measurement methods, and the thesis focuses on laser measurement. The research for this thesis consisted mostly of studying the operation of laser sensors. The operation of industrial robots was also studied. The thesis included laser measurements, in which the location of a hole was measured. Three different laser sensors were attached to the flange of the robot. In addition to comparing the laser sensors, the main purpose of the measurements was to find out which conditions affect the reliability of laser measurement. Finding ways to reduce the effects of the conditions was also a goal of the measurements.

The results showed that the measurement distance, lighting conditions, reflections and the measured surface had the greatest effect. With a longer measurement distance, the measurement accuracy was considerably worse than with a shorter distance. Bright lighting reduced the measurement accuracy and darkening the measuring environment improved the accuracy. A reflective item can affect the measurement accuracy, but the reflectiveness of the measuring surface has a greater effect. The measurement accuracy was worse on a reflecting surface. Usually the effects of a single condition were quite small. It took multiple conditions to occur simultaneously to produce significant measurement errors.

Certain conditions produced consistent errors to measurement accuracy. Changing the settings of the laser sensors generally was not enough to negate the conditions. The measurements did however show that the individual conditions had a smaller effect on the measurement accuracy than expected. One of the laser sensors was clearly the most reliable and versatile. This sensor could be used in all the robotic cells that require measurements. The measurement environment that was developed for this thesis can be used to do further testing of different sensors or methods.

---

Key words: laser, laser measurement, robotics

## SISÄLLYS

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | JOHDANTO .....                                                         | 7  |
| 2     | MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU .....                                      | 8  |
| 2.1   | Kosketusmittaus .....                                                  | 8  |
| 2.2   | Konenäkö .....                                                         | 8  |
| 2.3   | Lasermittaus .....                                                     | 9  |
| 3     | LASERMITTAUKSEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ .....                           | 10 |
| 3.1   | Sähkömagneettinen säteily .....                                        | 10 |
| 3.2   | Optiikka .....                                                         | 12 |
| 3.2.1 | Sironta .....                                                          | 13 |
| 3.2.2 | Heijastuminen .....                                                    | 14 |
| 3.2.3 | Tahtuminen .....                                                       | 15 |
| 3.2.4 | Interferenssi .....                                                    | 16 |
| 3.2.5 | Diffraktio .....                                                       | 17 |
| 3.2.6 | Absorptio .....                                                        | 19 |
| 3.3   | Ympäristön vaikutus .....                                              | 20 |
| 3.3.1 | Ympäristöparametrien vaikutus ilman taitekertoimeen .....              | 20 |
| 3.3.2 | Lämpölaajeneminen .....                                                | 21 |
| 4     | LASERETÄISYYSMITTAUS .....                                             | 22 |
| 4.1   | Laservalon tuottaminen .....                                           | 22 |
| 4.1.1 | Absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio .....               | 23 |
| 4.1.2 | Energian pumppaus, aktiivinen laseroiva materiaali ja kaviteetti ..... | 24 |
| 4.1.3 | Puolijohdelaserit .....                                                | 25 |
| 4.2   | Takaisinheijastuvan valon havaitseminen .....                          | 25 |
| 4.2.1 | Fotodiodi .....                                                        | 26 |
| 4.2.2 | MOSFET-kanavatransistori .....                                         | 28 |
| 4.2.3 | Valoherkkä kenno .....                                                 | 29 |
| 4.3   | Laseretäisyysmittauksen toimintaperiaate .....                         | 31 |
| 4.3.1 | Valopulssin kulkuaikaan perustuva mittaus .....                        | 32 |
| 4.3.2 | Lasersäteen modulaatioon perustuva mittaus .....                       | 33 |
| 4.3.3 | Kolmiomittaus .....                                                    | 34 |
| 4.3.4 | Interferometria .....                                                  | 35 |
| 5     | TEOLLISUUSROBOTIIKKA .....                                             | 37 |
| 5.1   | Teollisuusrobotiikka yleisesti .....                                   | 37 |
| 5.2   | Teollisuusrobottien rakenne .....                                      | 38 |
| 5.3   | Teollisuusrobotin toiminta .....                                       | 40 |

|     |                                          |    |
|-----|------------------------------------------|----|
| 5.4 | Teollisuusrobotin ohjelmointi.....       | 40 |
| 6   | MITTAUSJÄRJESTELYT.....                  | 42 |
| 6.1 | Lasermittalaitteet.....                  | 42 |
| 6.2 | Mittausolosuhteet.....                   | 43 |
| 6.3 | Mittauspinnat ja taustalevyt.....        | 44 |
| 6.4 | Laseranturien asennus ja kytkentä.....   | 45 |
| 6.5 | Robotin ohjelmat.....                    | 48 |
| 7   | MITTAUSTULOKSET.....                     | 50 |
| 7.1 | Yleisiä huomioita mittaustuloksista..... | 50 |
| 7.2 | Laseranturien asetusten vaikutus.....    | 51 |
| 7.3 | Mittausetäisyyden vaikutus.....          | 52 |
| 7.4 | Valaistuksen vaikutus.....               | 53 |
| 7.5 | Heijastusten vaikutus.....               | 55 |
| 7.6 | Mittauspinnan vaikutus.....              | 55 |
| 7.7 | Taustan vaikutus.....                    | 57 |
| 7.8 | Laseranturien väliset erot.....          | 57 |
| 8   | POHDINTA.....                            | 59 |
|     | LÄHTEET.....                             | 61 |

## LYHENTEET JA TERMIT

|                      |                                                                                                                                      |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AlGaInP              | alumiini-gallium-indium-fosfidi, materiaali, jota voidaan käyttää laserin laseroivana materiaalina                                   |
| APD                  | Avalanche Photodiode, fotodiodi, joka vahvistaa siihen muodostuvaa sähkövirtaa                                                       |
| CAD                  | Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu                                                                               |
| CCD                  | Charge-Coupled Device, valokenno, joka havaitsee tulevan valon pikselikohtaisesti                                                    |
| CMOS                 | Complementary Metal Oxide Semiconductor, valokenno, joka havaitsee tulevan valon pikselikohtaisesti                                  |
| CW                   | Continuous Wave, jatkuvaa valoa käyttävä mittaus                                                                                     |
| GaAs                 | gallium-arsenidi, materiaali, jota voidaan käyttää laserin laseroivana materiaalina                                                  |
| LASER                | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, laite, joka vahvistaa valoa stimuloidulla emissiolla                        |
| MOSFET               | Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, metallioksidi-puolijohdekanavatransistori, komponentti, jolla havaitaan fotoneita |
| MSM-fotodiodi        | Metal-semiconductor-metal, fotodiodi, jossa on metallin ja puolijohteen liitos                                                       |
| n-tyyppin puolijohde | Puolijohdemateriaali, jossa on ylimääräisiä elektroneja                                                                              |
| NC-sorvi             | Numerical Control, numeerisesti ohjattu sorvi                                                                                        |
| p-tyyppin puolijohde | Puolijohdemateriaali, jossa on elektronivajaus                                                                                       |
| PIN-fotodiodi        | Fotodiodi, jossa on eristekerros pn-liitoksen välissä                                                                                |
| PN-fotodiodi         | Fotodiodi, jossa on pn-liitos                                                                                                        |
| pn-liitos            | p- ja n-tyyppin puolijohdemateriaalien liitos                                                                                        |
| ppm                  | parts per million, miljoonasosa                                                                                                      |
| PSD                  | Position Sensitive Device, valokenno, jolla havaitaan kaiken sille tulevan valon keskipiste                                          |
| SCARA                | Selective Compliant Assembly Robot Arm, robottityyppi                                                                                |
| TCP                  | Tool Center Point, robotin työkalupiste                                                                                              |
| TOF                  | Time of Flight, valon kulkuaikaan perustuva mittaus                                                                                  |

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on kehittää ja vakioida Fastems Oy:n robottisolujen automaattista mittausta. Kun robotilla käsitellään yksittäisiä kappaleita, täytyy kappaleen ja sen kohteen sijainti tietää tarkasti. Jos robotin käsittelemien kappaleiden sijainti voi muuttua, voi olla tarpeellista mitata kappaleen sijainti, jotta siitä tартtuminen onnistuisi. Yleinen automaattisen mittauksen käyttötarkoitus on varaston mittaaminen. Jos robottisolussa on tuhansia varastopaikkoja, jokaisen paikan opettaminen yksi kerrallaan robotille veisi viikkoja. Automaattisella mittauksella säästetään merkittävästi aikaa, kun robotti itse mittaa varastopaikkojen sijainnit.

Soveltuvia mittausmenetelmiä on monenlaisia, ja tutkittavaksi menetelmäksi valittiin lasermittaus. Työn teoriaosuudessa perehdytään valon ominaisuuksiin, optiikkaan, laservalon tuottamiseen, erilaisiin lasermittausmenetelmiin ja robotiikkaan. Käytännön osuudessa vertaillaan kolmea laseranturia eri mittausolosuhteissa. Mittauksissa selvitetään, kuinka paljon vaikutusta eri olosuhteilla on mitaustarkkuuteen. Lisäksi pyritään selvittämään, miten olosuhteiden vaikutusta voidaan pienentää. Olosuhteiksi on valittu käytännön kokemusten perusteella ongelmallisia olosuhteita sekä mahdollisia ratkaisuja näihin ongelmiin.

Työn ensisijainen tavoite on selvittää, mitkä olosuhteet vaikuttavat lasermittaukseen ja kuinka paljon. Työssä pyritään myös löytämään ratkaisuja lasermittausta haittaaviin olosuhteisiin. Kun ongelmia aiheuttavat olosuhteet tiedostetaan ja osataan ottaa huomioon projektin jokaisessa vaiheessa, voidaan välttyä niiden aiheuttamilta ongelmilta. Yhtenä tavoitteena on myös löytää yksi mittalaite, jota voidaan käyttää kaikissa robottisolujen automaattisissa mittauksissa. Yhden mittalaitteen käyttäminen kaikissa toteutuksissa yksinkertaistaisi hankintaa, suunnittelua, asennusta ja käyttöönottoa. Valitulle laitteelle tehtäisiin myös käyttöönotto-ohjeet, joka helpottaisi käyttöönottoa ja säästäisi aikaa.

## 2 MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU

Työn alussa käytiin läpi mahdollisia ideoita robottisolujen automaattisten mittaus-ten parantamiseksi. Yhtenä osana oli mittausmenetelmien vertailu. Aikaisemmin Fastemsilla on vastaavissa mittauksissa käytetty lasermittausta. Pohdittiin, voi-siko lasermittauksen sijasta käyttää esimerkiksi konenäköä tai kosketusmit-tausta. Tässä osiossa pohditaan kosketusmittauksen, konenäkömittauksen ja la-sermittauksen hyviä ja huonoja puolia.

### 2.1 Kosketusmittaus

Kosketusmittauksella voitaisiin saada tarkkoja mittaustuloksia, sillä monet ympä-ristön vaikutukset, kuten kirkkaat valot ja heijastukset eivät vaikuta siihen. Mit-tausmenetelmä, jossa mittapää painuu anturin sisään osuessaan kohteeseen, on melko yksinkertainen. Kosketusmittauksella etäisyyden mittaustarkkuus on erit-täin hyvä, sillä mittalaitteilla päästään jopa mikrometrin tarkkuuteen (OMRON 2014, 4). Kolmiulotteisen sijainnin mittaaminen tarkasti voi olla vaikeampaa, sillä anturia pitäisi pystyä liikuttamaan samalla, kun se koskee mitattavaa pintaa. Kos-ketusmittausanturit ovat myös halvempia kuin laserit tai konenäkökamerat.

Kosketusmittaus ei kuitenkaan osoittautunut käytännölliseksi vaihtoehdoksi, sillä aina ei ole mahdollista tuoda robottia tarpeeksi lähelle mitattavaa kohdetta. Vaikka anturi on melko pieni, sen täytyisi ulottua robotin työkalun yli, jotta mittaus voitaisiin tehdä. Jos mittausta käytetään vain robottisolun käyttöönotossa, anturi voitaisiin asentaa robottiin mittausten ajaksi ja irrottaa, kun sitä ei enää tarvita. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä joissakin robottisoluissa mittauksia tehdään myös tuotannon aikana.

### 2.2 Konenäkö

Konenäkö on selvästi monimutkaisempi mittaustapa kuin laser- tai kosketusmit-taus. Konenäön käyttö voisi nopeuttaa mittauksia, sillä kamerakuvasta saadaan

enemmän tietoa kerralla kuin lasermittauksessa. Konenäöllä voitaisiin mitata esimerkiksi varastopaikan sijainti yhdestä pisteestä ja mahdollisesti jopa useampia paikkoja kerralla. Syvyys suunnan määrittäminen tarkasti konenäöllä voisi olla haastavaa, etenkin yhdestä paikasta mitatessa. Konenäkö vaatii myös paremmat valaistusolosuhteet kuin lasermittaus. Lisäksi konenäkökamera on lähtökohtaisesti suurempi kuin laser- tai kosketusanturi, joten se voi rajoittaa robotin liikkeitä.

Vaikka konenäköä käytetäänkin joissain Fastemsin automaatiosovelluksissa, päätettiin valita jokin toinen mittausmenetelmä tavallisiin automaattisiin mittauksiin. Mittausnopeudella ei saavutettaisi merkittävää hyötyä, sillä monet mittaukset voidaan tehdä myös silloin, kun robottia ei muuten käytettäisi. Tarkkaa konenäkömittausta varten tarvitaan laadukas kamera, joka on paljon kalliimpi kuin laadukas laser- tai kosketusanturi.

## **2.3 Lasermittaus**

Lasermittaus on kosketusmittauksen tapaan melko yksinkertainen tapa mitata ympäristön piirteitä. Mittauslogiikan kannalta lasermittaus toimii hyvin samalla tavalla kuin kosketusmittaus, mutta sillä voidaan tehdä mittaukset tarpeeksi kaukaa. Laseranturin mittaustarkkuus on tarpeeksi hyvä, ja tarkemmasta mittalaitteesta ei olisi paljoa hyötyä, sillä robotin toistotarkkuuskaan ei ole täydellinen. Laseranturi on myös tarpeeksi pieni, joten se ei yleensä rajoita robotin liikkeitä. Hyvä laseranturi on jonkin verran kalliimpi kuin kosketusanturi, mutta silti paljon konenäkökameraa halvempi. Valaistus vaikuttaa jonkin verran laseranturin toimintaan, mutta konenäössä valaistusolosuhteet ovat vielä kriittisemmät.

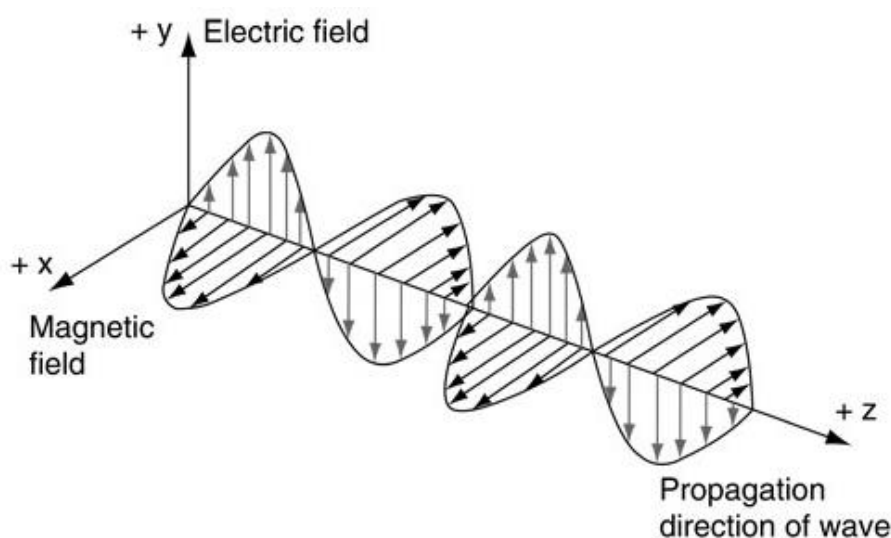
Lasermittauksessa todettiin olevan paljon vähemmän huonoja puolia kuin kosketus- ja konenäkömittauksissa. Lasermittauksessa on monessa asiassa kosketus- ja konenäkömittausten hyvät puolet. Laseranturi on pieni, melko edullinen, yksinkertainen, sillä voidaan mitata kaukaa ja se soveltuu hyvin kolmiulotteisen sijainnin mittaamiseen. Lopulta päätettiin pysyä lasermittauksessa ja kehittää olemassa olevaa mittausmenetelmää paremmaksi. Lasermittauksessa on todettu olevan ongelmia, ja yhtenä työn tavoitteena on selvittää, mistä ongelmat johtuvat ja miten niistä voidaan päästä eroon.

### 3 LASERMITTAUKSEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Tässä osiossa käsitellään lasermittaukseen ja etenkin laservaloon vaikuttavia tekijöitä. Koska valo on sähkömagneettista säteilyä, käsitellään ensin hieman sähkömagneettisen säteilyn ja fotonien ominaisuuksia. Useat optiset ilmiöt vaikuttavat valon kulkuun, joten osiossa käsitellään myös optiikkaa ja optisia ilmiöitä. Monet laserin käyttötarkoitukset perustuvat tiettyihin optisiin ilmiöihin. Lisäksi tutustutaan ympäristöparametrien, kuten lämpötilan, ilmanpaineen ja ilmankosteuden vaikutukseen lasermittauksessa.

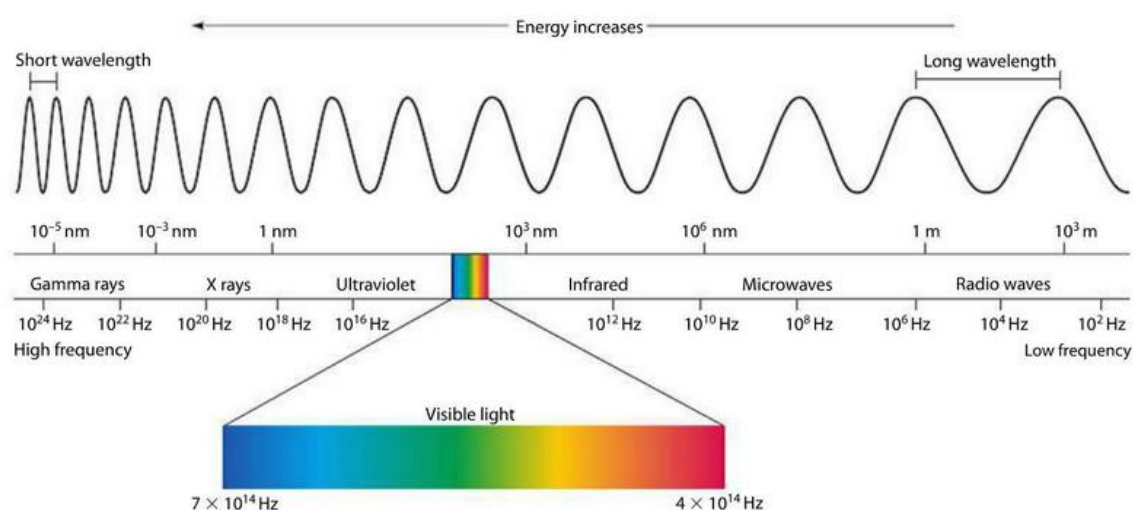
#### 3.1 Sähkömagneettinen säteily

Laserin tuottama näkyvä valo on sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettinen säteily koostuu fotoneista eli pienistä valokvanteista, jotka sisältävät energiaa. Sähkömagneettinen säteily sisältää sinimuotoisesti värähtelevät sähkökentän ja magneettikentän, jotka ovat kohtisuorassa eli  $90^\circ$  kulmassa toisiinsa ja säteilyn kulkusuuntaan nähden kuvion 1 tavalla. Sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen, nopeuteen ja vuorovaikutukseen aineen kanssa vaikuttaa monet fysiikkaaliset tekijät, joita käsitellään myöhemmin. (Al-Azzawi 2006.)



KUVIO 1. Sähkömagneettisen säteilyn sähkökenttä- ja magneettikenttäkomponentit kohtisuorassa toisiinsa nähden (Al-Azzawi 2006)

Näkyvä valo on vain pieni osa sähkömagneettisen säteilyn spektriä, aallonpituudeltaan noin 400–780 nm. Ihmisen silmän reseptorit aktivoituvat vain näillä aallonpituuksilla, jonka takia emme näe muun taajuista sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettisella säteilyllä voi periaatteessa olla mikä tahansa aallonpituus tai taajuus. Tietyille taajuusalueille on annettu nimiä, kuten näkyvä valo, radioaallot ja infrapuna-aallot. Kuviossa 2 on sähkömagneettisen säteilyn spektri, jossa näkyy eri taajuusalueille annettuja nimiä. Todellisuudessa nimettyjen taajuusalueiden rajat eivät ole täysin yksiselitteisiä, vaan alueissa on päällekkäisyyksiä. Kuvioista 2 nähdään, että säteilyn aallonpituus voi olla femtometreistä kilometreihin. Eri taajuusalueita hyödynnetään monissa nykyaikaisissa teknologioissa, kuten tiedonsiirrossa ja lääketieteessä. Näkyvän valon osuus spektristä on huomattavan pieni. (Al-Azzawi 2006.)



KUVIO 2. Sähkömagneettisen säteilyn spektri ja tietyille taajuusalueille annettuja nimiä (Mini Physics 2016)

Toisin kuin esimerkiksi elektronilla, fotonilla ei ole lepomassaa. Tämän takia sen nopeus on vakio eli valon nopeus. Valon nopeus riippuu väliaineesta ja tyhjiössä se on tunnettu fysikaalinen vakio  $c$ , joka on 299 796 458 m/s. Koska fotonilla ei ole lepomassaa, sen kokonaisenergia on sama kuin sen liike-energia. Fotonin energia ei myöskään riipu sen nopeudesta, vaan taajuudesta, jolloin suurempi-taajuisella säteilyllä on suurempi energia. (Al-Azzawi 2006; Pedrotti, Pedrotti & Pedrotti 2018, 5.)

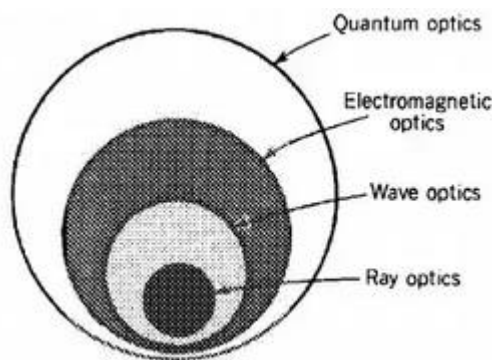
Toinen ero elektronien ja fotonien välillä on se, että elektronit käyttäytyvät Fermin-Diracin statistiikan mukaisesti. Fermin-Diracin statistiikan mukaan samassa systeemissä olevat kaksi elektronia eivät voi olla täysin samassa tilassa. Fotonit taas käyttäytyvät Bosen-Einsteinin statistiikan mukaisesti, joka ei estä identtisiä fotoneita. Suuri määrä identtisiä fotoneita samassa systeemissä ilmenee esimerkiksi laservalon tuottamisessa. (Pedrotti ym. 2018, 6.)

### 3.2 Optiikka

Optiikka on fysiikan ala, joka käsittelee valon ominaisuuksia ja käyttäytymistä. Valolla on sekä aaltomaisia, että sädemäisiä ominaisuuksia. Aalto-optiikassa eli fysikaalisessa optiikassa käsitellään valoa aaltoliikkeenä, jolloin valon aaltomaisilla ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus. Aalto-optiikassa ei kuitenkaan käsitellä valoaallon sähkömagneettisia komponentteja, vaan valo kuvataan yhtenä aaltona. (Saleh & Teich 1991, 2.)

Sädeoptiikassa eli geometrisessa optiikassa tutkitaan sitä, kun valon aallonpituus on merkityksettömän pieni verrattuna sitä ympäröiviin esineisiin. Tällöin aaltomaisuudella ei ole merkitystä, ja valoa voidaan käsitellä yksittäisinä säteinä. Tarkalleen sädeoptiikka yksinkertaistaa aalto-optiikan ja olettaa, että valon aallonpituus on äärettömän pieni. Sädeoptiikka perustuu Fermat'n sääntöön, jonka mukaan valonsäde kulkee nopeinta mahdollista reittiä. Sädeoptiikassa käsitellään valon sijaintia ja suuntaa. (Saleh & Teich 1991, 2–4.)

Sähkömagneettinen optiikka sisältää klassisen optiikan eli aalto- ja sädeoptiikan ilmiöt. Siinä huomioidaan valon olevan sähkömagneettista säteilyä, jolla on sähkö- ja magneettikenttäkomponentit. Kaikkia valon ominaisuuksia ei kuitenkaan voida selittää klassisen optiikan avulla niiden kvanttimekaanisen luonteen takia. Kvanttioptiikka eli moderni optiikka käsittelee valon kvanttimekaanisia ominaisuuksia. Kuviossa 3 näkyy, kuinka kvanttioptiikka sisältää valon sähkömagneettiset ominaisuudet. Sähkömagneettinen optiikka puolestaan sisältää valon aaltomaiset ominaisuudet, joihin sisältyy valon sädemäiset ominaisuudet. (Saleh & Teich 1991, 2, 42–43.)



KUVIO 3. Optiikan eri alojen sisältyminen toisiinsa (Saleh & Teich 1991, 2)

Yleiset optiset ilmiöt voidaan selittää joko sädeoptiikalla tai aalto-optiikalla. Sädeoptiikka sisältää valon heijastumisen ja taittumisen. Aalto-optiikka sisältää interferenssin ja diffraktion, joita ei ilmiöiden aaltomaisuuden takia voida selittää sädeoptiikalla. (Saleh & Teich 1991, 4, 43.)

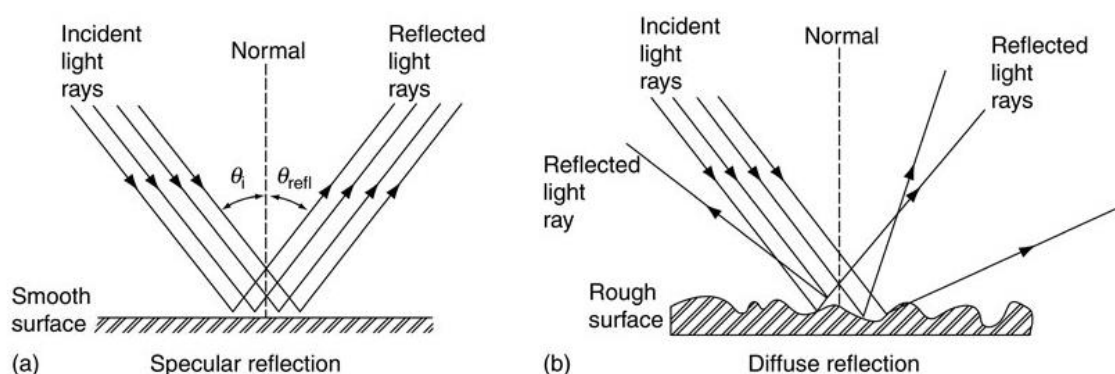
### 3.2.1 Sironta

Sironta on sähkömagneettisten aaltojen leviämistä ympäristöön, kun se kohtaa esteen. Yleensä hajaheijastumista eli valon heijastumista epätasaisesta pinnasta kutsutaan sironnaksi. Sironta on kuitenkin eri asia. Se on monen optisen ilmiön aiheuttaja. Esimerkiksi heijastuminen ja diffraktio johtuvat pohjimmiltaan sironnasta. (Bohren & Huffman 2004, 3–4.)

Sähkömagneettisten aaltojen sironta johtuu aineen heterogeenisyydestä eli siitä, että aine on epäyhteneväistä. Kaikki aine on ainakin jonkin verran heterogeenistä, sillä puhtaissakin kaasuissa ja aineissa on epäyhtenevyyksiä atomi- ja molekyylitasolla. Este voi olla todella pieni, esimerkiksi yksittäinen elektroni, atomi tai molekyyli. Este voi myös olla suurempi, kuten kiinteä tai nestemäinen partikkeli. Kun sähkömagneettinen säteily osuu esteeseen, säteilyn sähkökenttä saa esteen sähkövaraukset värähtelemään. Tämä värähtely aiheuttaa ympärilleen sähkömagneettista säteilyä, jolloin säteily siroaa. Värähtelyenergia voi myös muuttua mm. lämmöksi, jolloin tapahtuu absorptiota. (Bohren & Huffman 2004, 3–4.)

### 3.2.2 Heijastuminen

Heijastumisessa valo osuu kahden materiaalin rajapintaan heijastuen takaisin samaan materiaaliin ilman, että se läpäisee pintaa. Vaaleat, heijastavat ja peilimäiset pinnat heijastavat parhaiten kaikkia aallonpituuksia. Heijastumislain mukaan valonsäteen tulo- ja heijastuskulmat ovat yhtä suuret ja molemmat säteet ovat samassa tasossa. Hajaheijastumisessa valo heijastuu pinnasta ja hajaantuu joka suuntaan, koska pinnassa on mikroskooppisen pieniä epätasaisuuksia. Heijastumislaki pätee myös hajaheijastumisessa, mutta pintaa tarkastellaan paikallisesti, jolloin pinnan normaali vaihtelee jatkuvasti. Kuviossa 4 havainnollistetaan a) täydellinen heijastuminen tasaisesta pinnasta ja b) hajaheijastuminen epätasaisesta pinnasta. (Pedrotti & Pedrotti 1993, 37; Al-Azzawi 2006.)

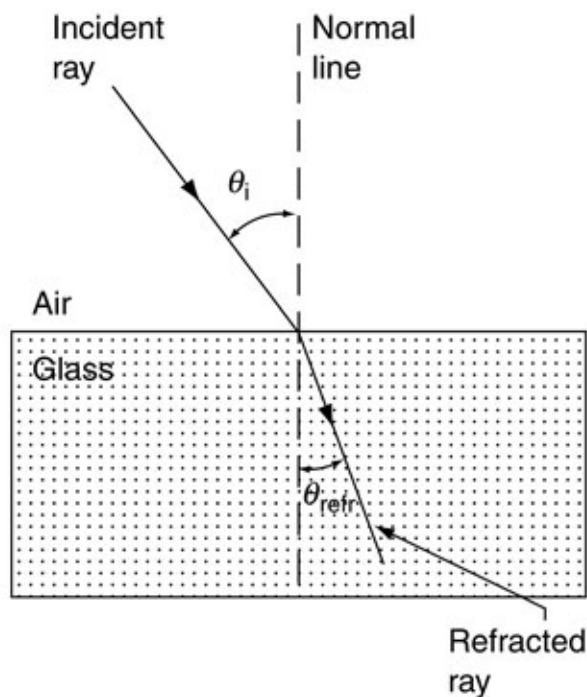


KUVIO 4. a) Täydellinen heijastuminen b) Hajaheijastuminen (Al-Azzawi 2006)

Täydellinen heijastuminen tapahtuisi vain, jos pinta olisi täydellisen tasainen. Käytännössä se ei ole mahdollista, joten hajaheijastumista tapahtuu aina jonkin verran. Esimerkiksi peileissä hajaheijastumisen osuus on pieni. Hajaheijastuminen mahdollistaa useat lasermittausmenetelmät, jotka eivät olisi mahdollisia täydellisesti heijastuvilla pinnoilla, sillä heijastunut lasersäde ei osuisi vastaanottiin (Donges & Noll 2015, 248). Heijastumiseen vaikuttaa mm. materiaalien ominaisuudet, pinta, valon voimakkuus, aallonpituus ja tulokulma. (Pedrotti & Pedrotti 1993, 37; Al-Azzawi 2006.)

### 3.2.3 Taittuminen

Taittuminen on ilmiö, jossa valonsäteen suunta muuttuu, kun se siirtyy materiaalista toiseen. Toisin kuin heijastumisessa, taittumisessa valonsäde läpäisee pinnan ja siirtyy toiseen materiaaliin. Taittuminen johtuu siitä, että valon nopeus riippuu materiaalista. Materiaalin taitekerroin kuvaa valon nopeutta tyhjiössä suhteessa valon nopeuteen kyseisessä materiaalissa. Fermat'n säännön mukaan valo kulkee nopeinta mahdollista reittiä, joten materiaalin taitekertoimen muuttuessa valon suunta muuttuu (Pedrotti & Pedrotti 1993, 35). Kuviossa 5 on havainnollistettu tilannetta, jossa valonsäde siirtyy ilmasta lasiin. Koska lasilla on suurempi taitekerroin kuin ilmalla, valonsäde taittuu kohti pinnan normaalia. (Al-Azzawi 2006.)



KUVIO 5. Valon tahtuminen eri taitekertoimen omaavien materiaalien rajapinnalla (Al-Azzawi 2006)

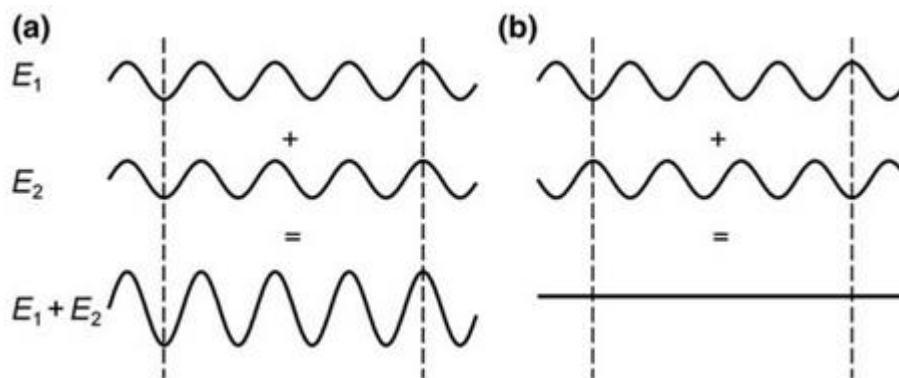
Tahtumisessa tulo- ja taitekulmien välistä suhdetta kuvataan Snellin lailla (kaava 1)

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_{refr}. \quad (1)$$

Kaavassa  $n_1$  ja  $n_2$  ovat materiaalien taitekertoimet ja  $\theta_i$  ja  $\theta_{refr}$  ovat tulo- ja lähtökulmien arvot. Jos valo osuu pintaan kohtisuorassa, sen kulma ei muutu, mutta nopeus muuttuu. Kulma tai nopeus eivät myöskään muutu, jos materiaalien taitekertoimet ovat samat. Kriittinen tulokulma  $\theta_c$  on se kulma, jolloin taitekulma on  $90^\circ$ . Taitekulman ollessa  $90^\circ$  taittunut valonsäde kulkee materiaalien rajapintaa pitkin. Jos tulokulma on suurempi kuin kriittinen kulma, valo ei läpäise materiaalien rajapintaa, vaan heijastuu kokonaan. (Al-Azzawi 2006.)

### 3.2.4 Interferenssi

Interferenssi tarkoittaa ilmiötä, jossa kaksi tai useampi aalto kohtaavat. Tällöin niistä muodostuu aalto, joka on kaikkien näiden aaltojen summa. Jos aallot ovat samassa vaiheessa, ne vahvistavat toisiaan, eli tapahtuu konstruktivista interferenssiä. Jos taas aallot ovat vastakkaisvaiheisia, ne kumoavat toisensa, eli tapahtuu destruktiivista interferenssiä. Kuviossa 6 on havainnollistettu a) konstruktivista ja b) destruktiivista interferenssiä. (Al-Azzawi 2006.)

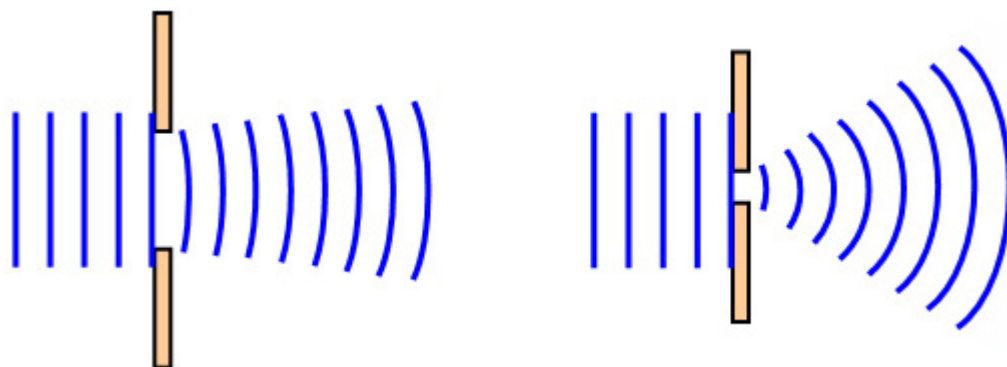


KUVIO 6. Aaltojen a) konstruktivinen ja b) destruktiivinen interferenssi (Donges & Noll 2015, 10)

Muodostuneen interferenssiaallon intensiteetti ei välttämättä ole suoraan sen osatekijöiden intensiteettien summa, sillä valon aaltomaisuuden takia aaltojen vaihekulmalla on merkitystä. Interferenssiaalto on aaltojen amplitudien summa jokaisessa pisteessä, jossa ne kohtaavat. Interferenssiä ei siis voida selittää sädeoptiikalla. (Saleh & Teich 1991, 63.)

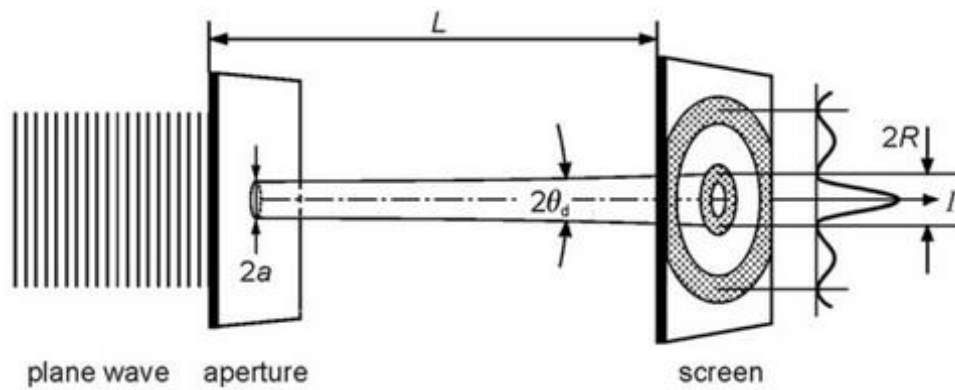
### 3.2.5 Diffraktio

Diffraktio on aaltoliikkeelle ominainen ilmiö. Tämän takia valon diffraktiota käsitellessä täytyy aalto-optiikan tavoin pitää valoa aaltomaisena. Diffraktio on aallon taipumista, kun se kulkee jonkin esteen, esimerkiksi aukon tai kulman ohi. Diffraktiota tapahtuu aina aallon kohdatessa esteen, mutta se on voimakkaampaa esteen ollessa samaa suuruusluokkaa tai pienempi kuin aallonpituus. Kuviossa 7 on havainnollistettu diffraktiota, kun tasomainen aalto kohtaa aukon. Kuviossa näkyy, kuinka diffraktion määrä muuttuu, kun aukko on paljon aallonpituutta suurempi, ja kun aukko on aallonpituuden kanssa samaa kokoluokkaa. (Donges & Noll 2015, 13.)



KUVIO 7. Diffraktion voimakkuus aallonpituutta suuremmalla aukolla ja aallonpituuden levyisellä aukolla (Alternative Physics n.d.)

Diffraktiokuvio on interferenssin aiheuttama aallon intensiteetin jakauma jonkin matkan päässä kappaleesta (Saleh & Teich 1991, 127). Kuviossa 8 näytetään, kun kaukaa tuleva tasomainen valo osuu pyöreään aukkoon. Aukon takana olevalle tasolle muodostuu interferenssikuvio, jonka tummat alueet johtuvat destruktiivisesta interferenssistä ja kirkkaat alueet konstruktiivisesta interferenssistä. (Donges & Noll 2015, 16.)

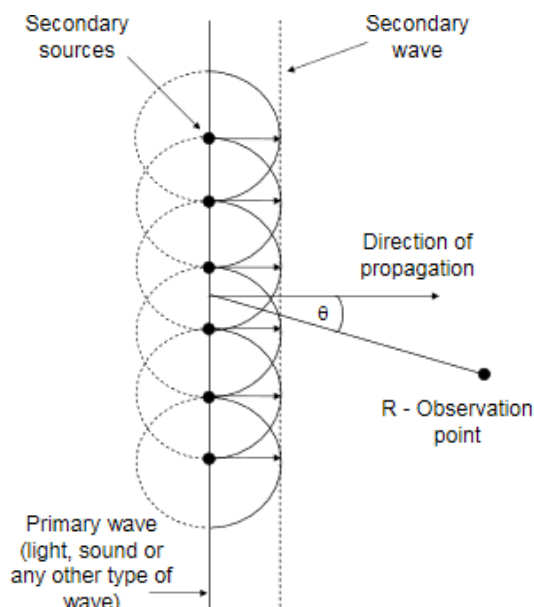


KUVIO 8. Diffraktiossa taipuneiden valoalttojen muodostama diffraktiokuvio (Donges & Noll 2015, 16)

Yksinkertaisin tapa selittää diffraktio on Huygensin-Fresnelin periaate. Periaatteen mukaan jokaisella ajanhetkellä aallon jokaisesta pisteestä lähtee uusi saman taajuisen alkeisaalto jokaiseen suuntaan. Alkeisaallon amplitudi ei ole sama jokaiseen suuntaan, vaan amplitudi riippuu suunnasta kaavan 2

$$K(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta) \quad (2)$$

mukaisesti. Kaavassa  $K$  on alkeisaallon amplitudi ja  $\theta$  on alkeisaallon suunta alkuperäiseen aaltoon nähden. Kaavan mukaan aallon kulkusuuntaan nähden suoraan eteenpäin ( $\theta = 0$ ) syntyy suurin amplitudi, suoraan taaksepäin ( $\theta = \pi$ ) amplitudi on nolla ja muihin suuntiin amplitudi on näiden väliltä. Alkeisaallot interferoivat ja niistä muodostuu uusi tasomainen toisioaalto aallon kulkusuuntaan. Koska periaatteen mukaan alkeisaallon intensiteetti riippuu suunnasta kulkusuuntaan nähden, toisioaalto muodostuu vain kulkusuunnassa alkuperäisen aallon eteen. Kuviossa 9 on havainnollistettu alkuperäisestä tasomaisesta aallosta (Primary wave) lähteviä alkeisaaltoja (Secondary sources) ja niistä interferoituvaa toisioaaltoa (Secondary wave). (Karpalos, Jenkin & Milios 2005, 40–41; Donges & Noll 2015, 13.)



KUVIO 9. Huygensin-Fresnelin periaatteen alkuperäinen aalto, alkeisaallot ja toisiaalto (Karpalos, Jenkin & Milios 2005, 40)

Aaltorintaman kohdatessa esimerkiksi aukon, osa aallosta törmää esteeseen ja osa jatkaa aukon läpi. Aukon läpi kulkeutuu aukon levyinen aalto. Siitä muodostuvat alkeisaallot muodostavat uuden toisiaallon, joka on myös aukon levyinen. Reunimmaisilla toisiaalloilla ei ole viereisiä aaltoja, joiden kanssa interferoida. Tämän takia reunimmaiset toisiaallot eivät kumoudu destruktiivisen interferenssin vaikutuksesta, vaan leviävät ympärilleen esteen takana. (Donges & Noll 2015, 13–14.)

### 3.2.6 Absorptio

Sähkömagneettinen säteily, joka osuu materiaaliin mutta ei heijastu takaisin eikä läpäise sitä, absorboituu. Yleensä absorboituneiden fotonien energia muuttuu lämmöksi. Kappaleen väri riippuu siitä, mitä valon aallonpituuksia sen pinta heijastaa ja mitä se absorboi. Esimerkiksi punainen kappale heijastaa punaisen valon aallonpituuksia, mutta absorboi suurimman osan muista aallonpituuksista. Tummat pinnat heijastavat ja läpäisevät vain vähän valoa, jolloin ne absorboivat suurimman osan. Tämän takia tummat pinnat kuumenevat helpommin esimerkiksi auringonpaisteessa. Valkoiset pinnat taas heijastavat suurimman osan aallonpituuksista, jolloin ne näkyvät ihmiselle valkoisena, eivätkä ne kuumene yhtä paljon absorptio vaikutuksesta. (Al-Azzawi 2006.)

Läpinäkyvät materiaalit, kuten lasi, eivät absorboi juurikaan näkyvän valon taajuuksia. Osa valosta heijastuu lasin pinnasta, mutta suuri osa läpäisee sen kokonaan absorboitumatta. Lasi kuitenkin absorboi esimerkiksi ultraviolett- ja infrapunasäteilyä. Muut materiaalit, kuten kalsiumfluoridi ja germanium eivät juurikaan absorboi infrapunasäteilyä. (Saleh & Teich 1991, 174.)

### **3.3 Ympäristön vaikutus**

Ympäristöparametreilla, kuten ilman lämpötilalla, paineella ja kosteudella, on myös vaikutusta lasermittauksen tarkkuuteen. Etenkin nämä ympäristöparametrit vaikuttavat ilman taitekertoimeen, joka puolestaan vaikuttaa valon kulkuun ilmassa. Lämpötilan muutos aiheuttaa lisäksi materiaalien lämpölaajenemista, joka vaikuttaa myös mittaustulokseen. Erittäin tarkkoilla mittalaitteilla ympäristöparametrien kompensointi on välttämätöntä luvatus mittaustarkkuuden saavuttamiseksi. (Chapman 2013, 1.)

#### **3.3.1 Ympäristöparametrien vaikutus ilman taitekertoimeen**

Yleisesti ilman ominaisuudet ilmoitetaan normaaliolosuhteissa, jolloin ilman lämpötila on 20 °C, paine on 1013,25 mbar ja suhteellinen kosteus on 50 %. Tällöin ilman taitekerroin on 1,0002714. Todelliseen ilmanpaineeseen vaikuttavat mm. paikalliset sääolosuhteet ja korkeus merenpinnasta. 1013,25 mbar on tyypillinen ilmanpaine merenpinnan tasolla. Verrattuna tyhjiöön, jonka taitekerroin on tasan 1, valon aallonpituus ilmassa on noin 271 ppm (parts per million, miljoonasosaa) lyhyempi. Kun laservalon aallonpituus ilmassa on tasan 650 nm, olisi se siis tyhjiössä noin 650,18 nm. (Chapman 2013, 3.)

Lämpötilan, ilmanpaineen ja suhteellisen kosteuden vaikutus valon aallonpituuteen riippuu paljon ilman olosuhteista. Lähellä normaaliolosuhteita valon aallonpituus muuttuu ilman lämpötilan muuttuessa noin +1 ppm/°C. Samoissa olosuhteissa aallonpituus muuttuu ilmanpaineen muuttuessa noin -0,27 ppm/mbar. Päivittäiset säästä ja vuodenajasta riippuvat muutokset ilmanpaineessa voivat olla

noin 100-150 mbar. Vastaavasti samoissa olosuhteissa ilman suhteellinen kosteus muuttaa aallonpituutta noin  $+0,1 \text{ ppm}/10\%RH$ . (Chapman 2013, 3–4, 8.)

Esimerkiksi  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa, 900 mbar ilmanpaineessa ja 60 % suhteellisessa kosteudessa aallonpituus on noin 35,5 ppm lyhyempi kuin normaaliolosuhteissa. 650 nm aallonpituudella virhe olisi siis noin 0,02 nm. 900 mbar on tyypillinen ilmanpaine noin 1 km korkeudella merenpinnasta. Tarkimmat lasermittalaitteet pystyvät mittaamaan etäisyyden noin  $1 \text{ }\mu\text{m}/\text{m}$  eli 1 ppm tarkkuudella, joten ympäristöparametrien kompensointi on tärkeää. (Chapman 2013, 4.) Tässä opinnäytetyössä käytettävien mittalaitteiden ilmoitettu toistotarkkuus on noin 0,1 mm ja lineaarisuus noin 2 mm/m, joten ympäristöparametrien kompensointi ei ole tarpeellista. Näille mittalaitteille on ilmoitettu olosuhteet, joissa mittaustarkkuus tulisi toteutua.

### 3.3.2 Lämpölaajeneminen

Suurin osa materiaaleista laajenevat tai kutistuvat lämpötilan muuttuessa materiaalin lämpölaajenemiskertoimen mukaisesti. Yleensä tuotteiden tarkat mitat ilmoitetaan tietyssä lämpötilassa, joka on yleensä  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jos tuotteen mitat tarkistetaan laserilla, täytyy ottaa huomioon tuotteen lämpötila mittaushetkellä. Yksi keino on suorittaa mittaukset huoneessa, jonka lämpötila pidetään tarkasti  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :ssa. Tämä ei kuitenkaan ole monesti mahdollista, jolloin lämpölaajenemisen vaikutusta voidaan kompensoida mittaamalla tuotteen lämpötila ja syöttämällä laskentaan materiaalin lämpölaajenemiskerroin. (Chapman 2013, 8–9.)

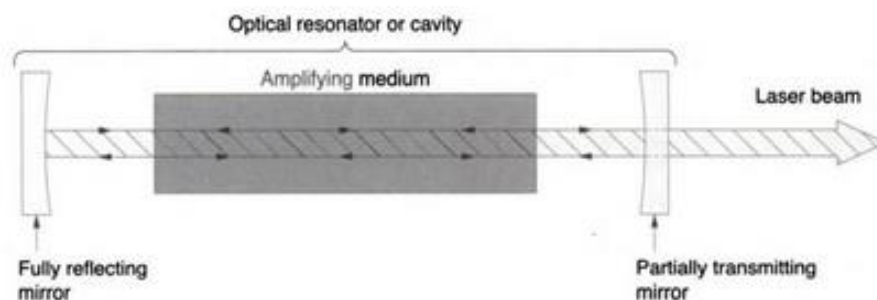
Esimerkiksi lasin lämpölaajenemiskerroin on noin  $6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ , riippuen lämpötilasta. Kun laserilla varmistetaan tasan 0,5 m pitkän lasista tehdyn kappaleen pituutta  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa, kappaleen pituus on noin 6  $\mu\text{m}$  pidempi kuin  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Jos tuotteen pituus halutaan varmistaa 1  $\mu\text{m}$  tarkkuudella, täytyy lämpölaajeneminen ottaa huomioon, jotta haluttu mittaustarkkuus saavutettaisiin. (Chapman 2013, 9.) Tässä opinnäytetyössä tehdyt mittaukset eivät ole niin tarkkoja, että lämpölaajenemista täytyisi ottaa huomioon.

## 4 LASERETÄISYYSMITTAUS

Tässä osiossa käsitellään laserin hyödyntämistä etäisyysmittauksessa. Lasere-  
täisyysmittaus perustuu laservalon lähettämiseen, takaisinheijastumiseen mitat-  
tavasta kohteesta ja havaitsemiseen. Ensin käsitellään laservalon tuottamista ja  
siihen liittyviä ilmiöitä. Seuraavaksi käsitellään heijastuneen laservalon havaitse-  
miseen käytettäviä menetelmiä. Laserin avulla voidaan mitata etäisyyttä useilla  
eri tavoilla. Osion lopussa tutustutaan joihinkin yleisiin mittaamenetelmiin.

### 4.1 Laservalon tuottaminen

Laser on laite, joka vahvistaa valoa stimuloidun emission ja peilien avulla. Sana  
laser on lyhenne sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Ra-  
diation, joka kuvaa hyvin laitteen toimintaperiaatteen. Tuotettu valo heijastuu ka-  
viteetissa peilien välillä tuottaen lisää valoa. Osa valosta läpäisee toisen peilin,  
tuottaen lasersäteen. Kuviossa 10 on yksinkertaistettu kuva laserista, jossa nä-  
kyy kaviteetti, peilit ja lasersäde. (Silfvast 2004, 1–2.)



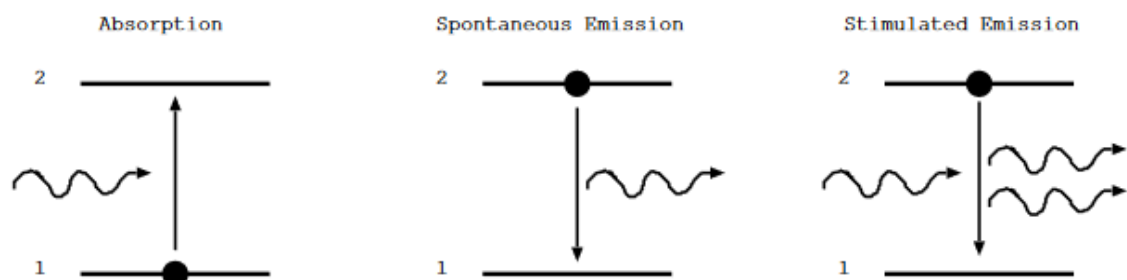
KUVIO 10. Yksinkertaistettu kuva laserista (Silfvast 2004, 2)

Koska laservalo on kohdistettu yhdensuuntaiseksi, valonsäde on voimakkaampi  
kuin tavallisissa ympärilleen säteilevissä valonlähteissä. Oleellinen ero laserin ja  
tavallisen valonlähteen välillä on myös laserissa tapahtuva valon vahvistuminen.  
Valon vahvistuminen stimuloidulla emissiolla vaatii tietyt olosuhteet, joka tekee  
laserista erityisen valonlähteen. Laserin tuottaman valon aallonpituuskaista on  
myös hyvin kapea. (Silfvast 2004, 2–3.)

#### 4.1.1 Absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio

Kun atomin elektroniin syötetään tarpeeksi energiaa esimerkiksi fotonin tai sähkövirran muodossa, energia siirtyy elektroniin ja elektroni voi virittyä korkeammalle energiatasolle. Tätä ilmiötä kutsutaan absorptioksi. Jos elektroni palautuu perustilaansa luonnollisesti, energiatasojen välinen energia vapautuu lämmön, mekaanisen liikkeen tai fotonin muodossa. Jos energia vapautuu fotonina, ilmiötä kutsutaan spontaaniksi emissioksi, ja vapautuneen fotonin suunta, vaihekulma ja polarisaatio ovat sattumanvaraisia. Esimerkiksi pimeässä hohtavat materiaalit perustuvat spontaaniin emissioon. (Mitofsky 2018, 139–141.)

Lasereissa hyödynnettävä stimuloitu emissio tapahtuu, kun korkeammalla energiatasolla olevaan elektroniin syötetään energiatasojen välisen energian sisältävä foton. Tällöin elektroni voi palautua alemmalle energiatasolle vapauttaen fotonin, jolla on energiatasojen välinen energia. Vapautuneella fotonilla on sama aallonpituus, suunta, vaihekulma ja polarisaatio kuin syötetyllä fotonilla, eli tuotettu valo on koherenttia (Saleh & Teich 1991, 436). Kuviossa 11 on havainnollistettu absorptiota, spontaania emissiota ja stimuloitua emissiota. (Mitofsky 2018, 142.)



KUVIO 11. Absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio havainnollistettu kahden energiatason (1 ja 2) avulla (Mitofsky 2018, 143)

Absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio voivat myös tapahtua molekyylillä. Kun molekyyli absorboi fotonin, fotonin energia voi saada molekyylin vaihtamaan värähtelytilaansa korkeammaksi. Molekyyli voi myös palata alempaan värähtelytilaan spontaanisti tai stimuloidusti, jolloin ylimääräinen energia vapautuu fotonina. Tämä on esimerkiksi hiilidioksidilaserin toimintaperiaate. (Mitofsky 2018, 143–144.)

#### 4.1.2 Energian pumppaus, aktiivinen laseroiva materiaali ja kaviteetti

Laser koostuu kolmesta pääkomponentista: energialähteestä, aktiivisesta laseroivasta materiaalista ja kaviteetista. Elektronin virittämiseen tarvittava ulkoinen energia syötetään yleensä sähköisesti virtalähteeltä. Energia voidaan syöttää myös optisesti lampulla tai toisella laserilla. Virtalähdettä kutsutaan pumpuksi. Energiaa pumpataan laseroivan aineen atomeihin, jolloin elektronit saadaan virittymään korkeammalle energiatasolle, ja fotoneilla saadaan aikaan stimuloitua emissiota. Laseroiva materiaali voi olla kiinteää, nestemäistä tai kaasua. (Mitofsky 2018, 153–154.)

Valon vahvistus onnistuu vain, jos laseroivassa aineessa on populaatioinversio. Populaatioinversiossa aineen atomien elektronit ovat jakautuneet niin, että ylemmillä energiatasoilla on enemmän elektroneja kuin alemmilla energiatasoilla. Tällöin stimuloidulla emissiolla vapautettu ylimääräinen fotonitodennäköisemmin aiheuttaa uuden stimuloidun emission vapauttaen jälleen uuden fotonin. Ketjureaktion ansiosta fotonien määrä kasvaa eksponentiaalisesti. Populaatioinversio saadaan aikaan energian pumppauksella. Valon intensiteetti ei kuitenkaan kasva äärettömästi, vaan se saturoituu tietyssä pisteessä. Saturaatiopisteessä pumppauksella ylemmälle energiatasolle viritettävien elektronien määrä on sama kuin stimuloidulla emissiolla alemmalle energiatasolle palautettujen elektronien määrä. Laserista riippuen elektronit voivat vaihdella kahden, kolmen tai neljän energiatason välillä. (Silfvast 2004, 235–236; Mitofsky 2018, 154.)

Kaviteetti on peilien ja mahdollisesti linssien ja muiden optisten komponenttien muodostama tila, jossa laseroiva aine sijaitsee. Se toimii myös suodattimena väärintaajuiselle ja -vaiheiselle valolle. Fotonit heijastuvat peilien välillä edes takaisin laseroivan aineen läpi, jolloin tapahtuu valoa vahvistavaa stimuloitua emissiota. Kaviteetin pituus eli peilien välinen etäisyys on oltava halutun valon aallonpituuden puolikkaan monikerta. Tällöin halutunlaisen valon osuessa peiliin syntyy seisova aaltoliike ja konstruktivista interferointia. Jos kaviteetissa on väärän taajuista tai -vaiheista valoa, niin tapahtuu destruktiivista interferointia ja väärät taajuudet suodattuvat pois. (Mitofsky 2018, 155–156.)

### 4.1.3 Puolijohdelaserit

Puolijohdelaserit toimivat hieman eri tavalla kuin tavalliset laserit. Laseroivana materiaalina on kahdesta eri materiaalista valmistettu diodi, ja laseroituminen tapahtuu näiden materiaalien rajalla. Puolijohdelasereissa ei välttämättä tarvita erilisiä peilejä valon vahvistukseen. (Silfvast 2004, 576.)

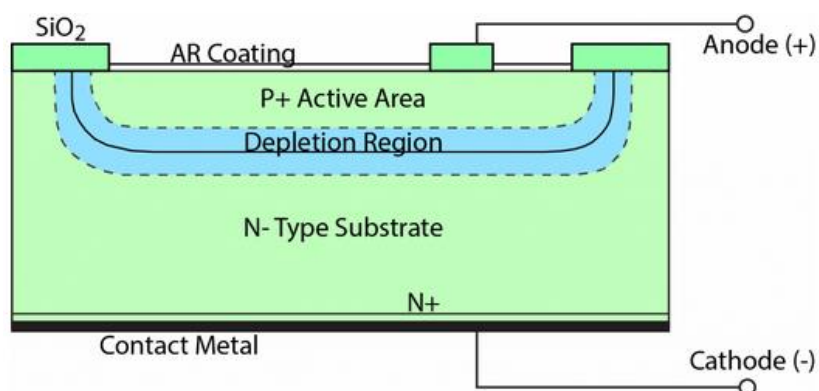
Negatiivisella eli n-tyyppin materiaalilla on vapaina varauksenkuljettajina ylimääräisiä elektroneja. Positiivisella eli p-tyyppin materiaalilla on elektronivajaus, eli varauksenkuljettajina on puuttuvien elektronien jättämiä aukkoja. Kun materiaalien pn-liitokseen syötetään tasajännitettä, nämä varauksenkuljettajat kulkeutuvat materiaalien rajapinnalle. N-tyyppin materiaalin elektroneilla on korkeampi energia kuin p-tyyppin aukoilla. Negatiivisesti varautuneet elektronit ja positiivisesti varautuneet aukot vetävät toisiaan puoleensa. Kun ne törmäävät, ne neutralisoituvat, ja ylimääräinen energia vapautuu sähkömagneettisena säteilynä eli fotonina. Eri puolijohdeyhdisteillä vapautuu eri määrä energiaa, jonka ansiosta niillä saadaan muodostettua eri aallonpituuksia. Jos syötetty sähkövirta on alhainen, syntyy spontaanilla emissiolla epäkoherenttia valoa, kuten LED-valoissa. Jos sähkövirta on tarpeeksi voimakas, syntyy populaatioinversio ja valon voimistuminen stimuloitulla emissiolla. (Silfvast 2004, 576–579.)

## 4.2 Takaisinheijastuvan valon havaitseminen

Lasermittalaitteiden toiminta perustuu valon lähettämiseen, takaisinheijastumiseen mitattavasta kohteesta ja heijastuksen havainnointiin (OMRON 2017). Kohteesta heijastuneet fotonit havaitaan fotodiodilla (Kilpelä 2004, 46). Tietynlaisissa mittalaitteissa käytetään valoherkkää kennoa, joka voi koostua useista fotodiodeista tai MOSFET-kanavatransistoreista, joilla havaitaan tulevaa valoa (Donges & Noll 2015, 260).

### 4.2.1 Fotodiodi

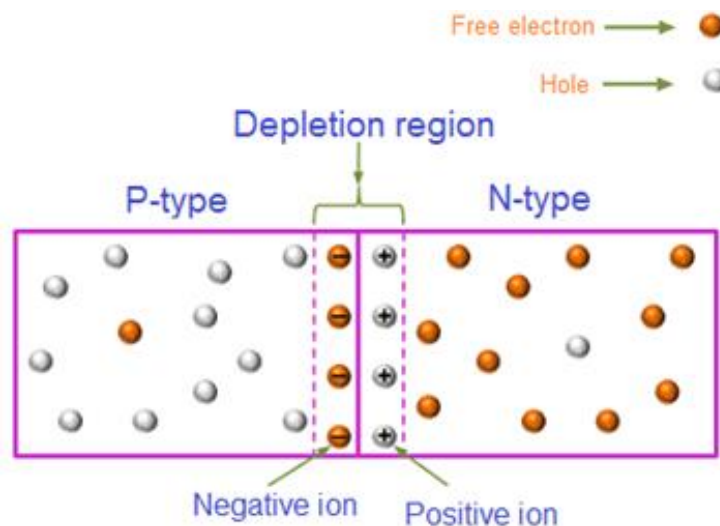
Fotodiodi on puolijohdekomponentti, joka tuottaa sähkövirtaa, kun siihen osuu fotoni. Fotodiodissa on positiivisen ja negatiivisen puolijohdemateriaalin pn-liitos. Näiden materiaalien välissä oleva tyhjennysalue (Depletion Region), jossa ei ole lainkaan vapaita varauksenkuljettajia. Kuviossa 12 on yksinkertaisen, ns. PN-fotodiodin rakenne. (Wavelength Electronics 2020, 1.)



KUVIO 12. Yksinkertaisen PN-fotodiodin rakenne (Wavelength Electronics 2020, 1)

Tyhjennysalue syntyy, kun negatiivisen materiaalin elektronit siirtyvät positiivisen materiaalin aukkoihin. Positiivisessa materiaalissa on tällöin enemmän elektroneja kuin protoneja, joten siitä tulee negatiivinen ioni. Vastaavasti negatiiviseen materiaaliin jää ylimääräisiä aukkoja, jolloin siitä tulee positiivinen ioni. Materiaalien pinnoille muodostuu vastakkaismerkkinen varaus, jolloin enempää varauksenkuljettajia ei pääse siirtymään materiaalista toiseen. Tästä syntyvä jännite aiheuttaa tyhjennysalueen yli sähkökentän. (Wavelength Electronics 2020, 1.)

Kun tyhjennysalueelle tai sen lähelle absorboituu fotoni, se vapauttaa elektronin. Elektronin vapautumisessa muodostuu vapaa varauksenkuljettajapari. Sähkökentän ansiosta varauksenkuljettajat aiheuttavat materiaalien välille sähkövirtaa. Kuviossa 13 on selventävä kuva pn-liitoksen välisestä tyhjennysalueesta ja siihen muodostuneista ioneista. (Wavelength Electronics 2020, 1; Physics and Radio-Electronics.)



KUVIO 13. Pn-liitoksen väliin muodostunut tyhjennysalue (Physics and Radio-Electronics)

Erityyppisiä fotodiodeja PN-tyyppin lisäksi ovat mm. PIN-, APD- ja MSM-fotodiodit (Kilpelä 2004, 47). PIN-fotodiodissa on lisätty sivun 25 kuvion 12 mukaiseen yksinkertaiseen PN-fotodiodiin eristävä I-kerros puolijohdemateriaalien väliin. Käytännössä eriste kasvattaa tyhjennysalueen kokoa, mistä on useita hyötyjä. Kun tyhjennysalueen kokoa kasvatetaan, fotonit todennäköisemmin osuu siihen. Myös pn-liitoksen kapasitanssi pienenee materiaalien etäisyyden kasvaessa, jolloin fotodiodin nopeus kasvaa. (Saleh & Teich 1991, 660.)

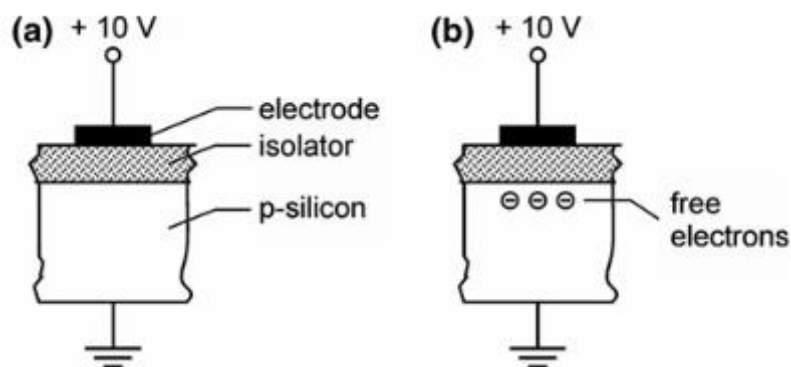
APD-fotodiodi (Avalanche Photodiode) vahvistaa fotonien tuottamaa sähkövirtaa pn-liitoksen yli, jolloin sen herkkyys kasvaa ja voidaan havaita heikompiakin valo. Toiminta perustuu vyörypurkaus-ilmiöön, jossa voimakkaan sähkökentän avulla kiihdytetään elektroneja, jolloin niiden energia nousee. Jos elektronin energia on tarpeeksi suuri, sen törmätessä toiseen elektroniin tapahtuu iskuionisaatio, jossa toinenkin elektroni vapautuu. Nämä elektronit kiihtyvät uudelleen ja voivat aiheuttaa uusia iskuionisaatioita, jolloin sähkövirran voimakkuus kasvaa huomattavasti. Ionisoinnissa syntyvät aukot kiihtyvät toiseen suuntaan ja voivat myös aiheuttaa iskuionisaatiota. (Saleh & Teich 1991, 666.)

MSM-fotodiodissa (Metal-semiconductor-metal) on metallin ja puolijohteen liitos. Käytännössä toinen pn-fotodiodin materiaaleista on korvattu ohuella, osittain valoa läpäisevällä, metallista tai metalli-puolijohdeyhdisteestä tehdyllä kerroksella.

Koska diodin pinnan ja tyhjennysalueen välissä on vain ohut kerros metallia, fotonien absorboitumisesta vapautuneet elektronit päätyvät helpommin tyhjennysalueelle, eivätkä katoa pinnan lähellä oleviin koloihin. MSM-fotodiodin toiminta on myös nopeampaa kuin pn-fotodiodin. (Saleh & Teich 1991, 662–663.)

#### 4.2.2 MOSFET-kanavatransistori

MOSFET eli metallioksidipuolijohdekanavatransistori (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) on puolijohdekomponentti, jolla voidaan havaita fotoneita fotodiodin tavoin. MOSFET koostuu kolmesta kerroksesta. Positiivisen p-tyyppin materiaalin päällä on eristekerros, jonka päällä on elektrodi. Kuvion 14 kohdassa a) on havainnollistava kuva MOSFET:in rakenteesta. (Donges & Noll 2015, 134.)



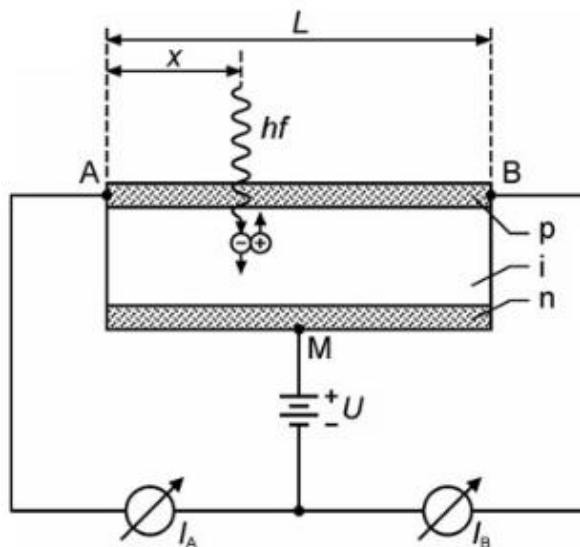
KUVIO 14. MOSFET-kanavatransistorin rakenne (Donges & Noll 2015, 134)

Elektrodiin syötetään 10 V jännitettä. P-tyyppin materiaaliin osuva valo tuottaa materiaaliin vapaita varauksenkuljettajapareja eli elektroneja ja aukkoja. Koska elektrodiin syötetään positiivista 10 V jännitettä, positiivisesti varautuneet aukot kulkeutuvat p-tyyppin materiaalista maahan, ja negatiivisesti varautuneet elektronit kulkeutuvat kohti elektrodia. Eristekerroksen takia elektronit eivät pääse elektrodiin asti, vaan ne kerääntyvät materiaalien rajalle, kuten kuvion 14 kohdassa b). Kerääntyneiden elektronien määrä on verrannollinen kanavatransistorille osuvan valon määrään. (Donges & Noll 2015, 134.)

### 4.2.3 Valoherkkä kenno

Erityyppisiä mittalaitteissa käytettäviä valoherkkiä kennoja ovat mm. PSD, CCD ja CMOS. PSD-kennoksi (Position Sensitive Device) kutsutaan sensoria, joka on yksiulotteinen. PSD-kennossa kaikki kennolle tuleva valo huomioidaan, ja lähtösignaalina saadaan kaiken vastaanotetun valon keskiarvosijainti. Vastaanotetut häiriöt aiheuttavat siis helposti mittausrvirheen. (Donges & Noll 2015, 260; OMRON 2017.)

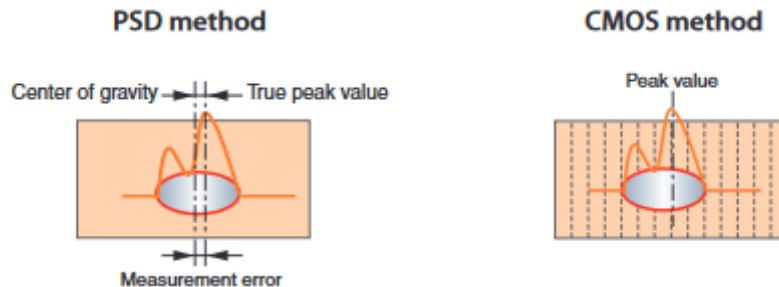
Yksiulotteinen valoherkkä kenno voi olla pitkä PIN-fotodiiodi, jossa on kolme sähköistä liitosta  $A$ ,  $B$  ja  $M$ , kuvion 15 mukaan. Kun kohteesta heijastuva valo  $hf$  osuu fotodiodin tyhjennysalueelle eli  $i$ -alueelle kohtaan  $x$ , muodostunut sähkövirta jakautuu kahteen haaraan,  $I_A$  ja  $I_B$ . Haarojen välisten virtojen suhteesta voidaan laskea kohta  $x$  eli heijastuneen valopisteen sijainti. (Donges & Noll 2015, 137.)



KUVIO 15. Pitkä PIN-fotodiiodi ja sen sähköiset liitokset (Donges & Noll 2015, 137)

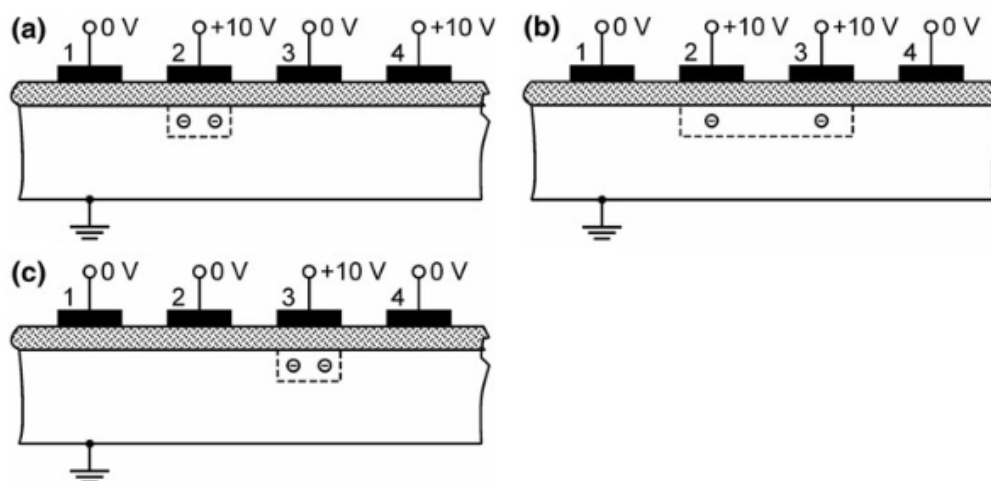
CCD- (Charge-Coupled Device) ja CMOS- (Complementary Metal Oxide Semiconductor) kennot koostuvat useista fotodiodeista tai MOSFET-kanavatransistoreista muodostaen tason, jossa jokainen fotodiodei tai MOSFET on yksi pikseli. Pikseleiden sähkövaraukset luetaan, jolloin saadaan pikselikohtainen tieto kennolle laskeutuneen valon määrästä. Kennojen ero perustuu näiden varausten lukemiseen käytettävän piirin toimintaan. Kaksiulotteisella kennolla voidaan erottaa

häiriösignaalit todellisesta heijastuksesta valitsemalla se kohta valokennosta, johon kohdistuu korkein valon intensiteetti (OMRON 2017). Kuviossa 16 on havainnollistettu eri kennotyyppien havaitsema valo ja kuinka häiriöt voidaan rajata pois CCD- ja CMOS-kennoilla. (Donges & Noll 2015, 134–135.)



KUVIO 16. Yksiulotteisen PSD-kennon ja kaksiulotteisen CCD- tai CMOS-kennon ero häiriösignaalien havaitsemisessa (OMRON 2017, muokattu)

CCD-kennossa on MOSFET-kanavatransistoreista muodostuva taso. Transistorien varaukset siirretään transistoreita pitkin yhteiseen lähtöön, josta varauksen määrä luetaan pikseli kerrallaan. Kuviossa 17 selvitetään yksinkertaistetusti varausten siirtyminen transistorien välillä kolmessa vaiheessa. Ensinnäkin kohdassa a) vain transistorissa 2 on elektroneja ja siihen syötetään 10 V jännitettä. Kohdassa b) myös transistoriin 3 syötetään 10 V jännite, jolloin elektronit jakautuvat transistorien välille. Kohdassa c) transistorille 2 ei enää syötetä jännitettä, jolloin kaikki elektronit kerääntyvät transistoriin 3. (Donges & Noll 2015, 136.)



KUVIO 17. CCD-kennon varausten siirtyminen yksinkertaistetusti (Donges & Noll 2015, 136)

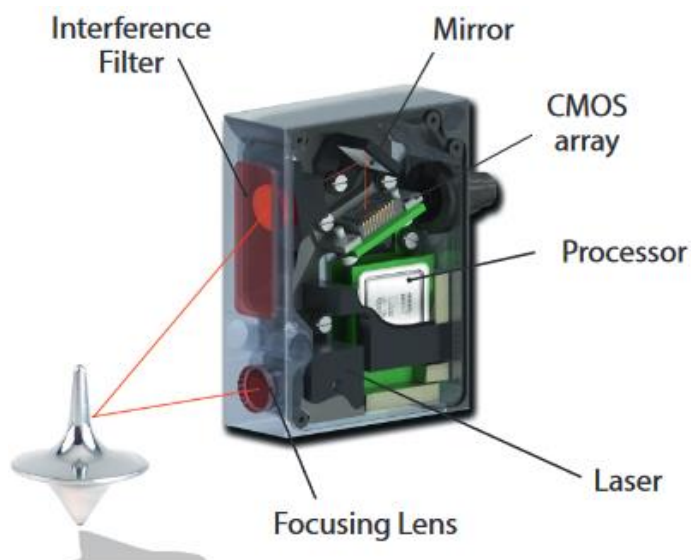
Varausten siirtyminen on käytännössä häviötöntä, joten noin 100 % elektroneista siirtyy transistorista toiseen. CCD-kennossa voi olla jopa miljardeja pikseleitä ja pikselitiheys voi olla jopa 100 pikseliä millimetrillä. Nykyaikaisissa kennoissa varausten siirtyminen transistorista toiseen kestää joitain kymmeniä nanosekunteja. (Donges & Noll 2015, 136.)

CMOS-kenno voi koostua fotodiodeista tai MOSFET-kanavatransistoreista. Toisin kuin CCD-kennossa, CMOS-kennossa jokaisen pikselin varaus luetaan suoraan pikseliltä. Koska varauksia ei täydy siirtää transistorilta toiselle, CMOS-kenno toimii nopeammin, jolloin sillä voidaan saavuttaa nopeampi kuvataajuus kameroissa. Sen virrankulutus on pienempi ja tuotanto on halvempaa. Nykyään CCD- ja CMOS-kennot ovat yhtä hyviä vaihtoehtoja mittaustekniikkaan. (Donges & Noll 2015, 137.)

#### **4.3 Laseretäisyysmittauksen toimintaperiaate**

Laseria hyödyntävissä laitteissa käytetään yleensä puolijohdelaseria pienen koon, suhteellisen edullisen hinnan, kestävyuden ja tehokkuuden ansiosta (Kilpelä 2004, 29). Yleisimmin käytetty punainen laservalo tuotetaan tyypillisesti gallium-arsenidi- eli GaAs -puolijohdelaserilla. Etäisyysmittalaitteissa käytetään yleensä noin 660 nm aallonpituuden tuottavaa puolijohdelaseria (Keyence 2008; Omron 2017). Kyseinen aallonpituus tuotetaan yleensä alumiini-gallium-indium-fosfidi- eli AlGaInP -puolijohdelaserilla. (Silfvast 2004, 579–580.)

Itse laserin lisäksi mittalaitteessa on yleensä ainakin linssyjä, suodattimia, vastaanotin ja prosessori. Kuviossa 18 on esimerkki laseretäisyysmittalaitteen rakenteesta. (Riftek 2020.)

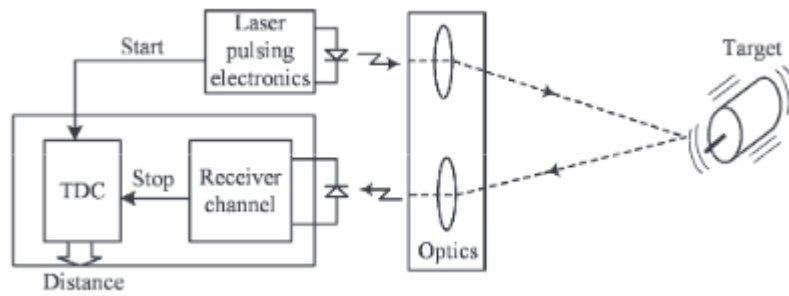


KUVIO 18. Esimerkki laseretäisyysmittalaitteen rakenteesta (Riftek 2020, 2)

Linsseillä, peileillä ja muilla optisilla komponenteilla lasersäde voidaan kohdistaa halutulla tavalla. Suodattimilla voidaan suodattaa häiriötä aiheuttavat säteilyn aallonpituudet pois. Valoherkällä kennolla tai fotodiodilla havaitaan kohteesta heijastunut säteily. Prosessorilla ja muulla elektroniikalla suoritetaan tarvittava lasenkenta ja muut mittalaitteen toiminnot, kuten laserlähettimen hallinta. Lasermittalaitteen rakenne riippuu myös laitteen toimintaperiaatteesta. (Keyence 2008; Omron 2017.)

#### 4.3.1 Valopulssin kulkuaikaan perustuva mittaus

Valopulssin kulkuaikaan perustuvassa mittauksessa (Time of Flight, TOF) mitataan valopulssin lähettämisen ja sen vastaanottamisen välillä kulunutta aikaa. Koska valon nopeus on tunnettu vakio, saadaan mittalaitteen ja kohteen välinen etäisyys laskettua helposti. Kuviossa 19 on esitetty TOF-lasermittalaitteen yksinkertainen rakenne ja toiminta. (Kilpelä 2004, 13.)



KUVIO 19. Valopulssin lähettämisen ja vastaanottamisen välissä kuluvan ajan mittaamiseen perustuva TOF-lasermittaus (Hintikka 2019, 21)

Haasteena on valon nopeuden takia riittävän nopean ajanottopiirin kehittäminen ja mahdollisimman lyhyen laserpulssin tuottaminen. Yhden millimetrin muutos mitatussa matkassa vastaa 6,7 pikosekuntia. TOF-menetelmää käytetään etenkin silloin, kun mittaustarkkuudeksi riittää noin 1 – 10 mm ja kun mittausetäisyys on pitkä, jopa kilometrejä. (Kilpelä 2004, 13; SICK 2018.)

#### 4.3.2 Lasersäteen modulaatioon perustuva mittaus

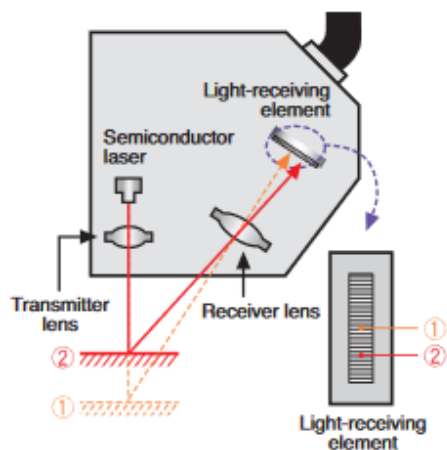
Lasersäteen taajuus- tai amplitudimodulaatioon perustuva mittaus hyödyntää myös valonnopeutta. Tästä huolimatta yleensä ainoastaan valopulssin kulkuai- kaan perustuvaa mittausta kutsutaan TOF-mittaukseksi. Näissä menetelmissä laser lähettää jatkuvaa aaltoa (Continuous Wave, CW), jonka taajuutta tai amplitudia muutetaan. Kohteen etäisyys lasketaan lähetettävän ja kohteesta heijastu- neen vastaanotettavan signaalin taajuus- tai amplitudierosta. (Kilpelä 2004, 19.)

Taajuusmodulaatioon perustuvassa mittauksessa jatkuvan lasersäteen taajuutta muutetaan tietyllä välillä. Kun lähetettävän ja vastaanotettavan signaalin taa- juusero tiedetään, voidaan laskea kohteen etäisyys. Perinteisesti taajuutta on muutettu säätämällä laserin kaviteetin pituutta, jolloin aallonmuoto ei ole ollut täy- dellinen. NykYTEknologialla voidaan käyttää korkeataajuisia laseria ja sähköop- tista modulaattoria, joka tuottaa sarjan harmonisia taajuuksia. Näistä taajuuksista poimitaan haluttu taajuus optisella kaistanpäästösuodattimella. Säätämällä säh- köoptisen modulaattorin sähkövirtaa voidaan tuottaa lähes täydellinen lineaari- nen kolmioaalto, jolloin mittaustarkkuus on alle 1 mm. (NASA n.d.; Kilpelä 2004, 19.)

Amplitudimodulaatioon perustuvassa mittauksessa jatkuvaan lasersäteeseen lisätään sinimuotoinen signaali. Lähetettävän ja vastaanotettavan signaalin vaiheeron perusteella voidaan laskea kohteen etäisyys. Yksiselitteinen mittaustulos saadaan vain, jos mitattava etäisyys on alle puolet moduloidusta aallonpituudesta. Pitkillä etäisyyksillä voidaan käyttää useita modulaatiotaajuuksia. Korkeataajuisella modulaatiotaajuudella saadaan tarkempi mittaustulos, mutta mitaustetäisyys on pienempi. (Kilpelä 2004, 19–20.)

### 4.3.3 Kolmiomittaus

Geometriaan perustuvassa kolmiomittauksessa (Triangulation) mittalaitteen lähettämä lasersäde heijastuu mitattavasta kohteesta takaisin mittalaitteen valokennolle. Koska heijastuvan säteen kulma riippuu kohteen etäisyydestä, myös heijastuneen valopisteen sijainti valokennolla riippuu kohteen etäisyydestä. Valokennolta lähtevä signaali riippuu pisteen sijainnista. Signaalista voidaan päätellä kohteen etäisyys. Erilaisilla linsseillä voidaan kohdistaa ja kaventaa lasersädettä, mikä parantaa havainnointitarkkuutta (Keyence 2008). Kuviossa 20 on havainnollistettu kolmiomittauksen toimintaa. (Donges & Noll 2015, 248.)



KUVIO 20. Havainnollistava kuva kolmiomittauksen toimintaperiaatteesta (Keyence 2008)

Kolmiomittausmenetelmällä mitataan yleensä lyhyitä etäisyyksiä. Lyhyillä etäisyyksillä mittaustarkkuus on huomattavasti parempi kuin monissa muissa menetelmissä. Mittaustarkkuus huononee merkittävästi etäisyyden kasvaessa, toisin

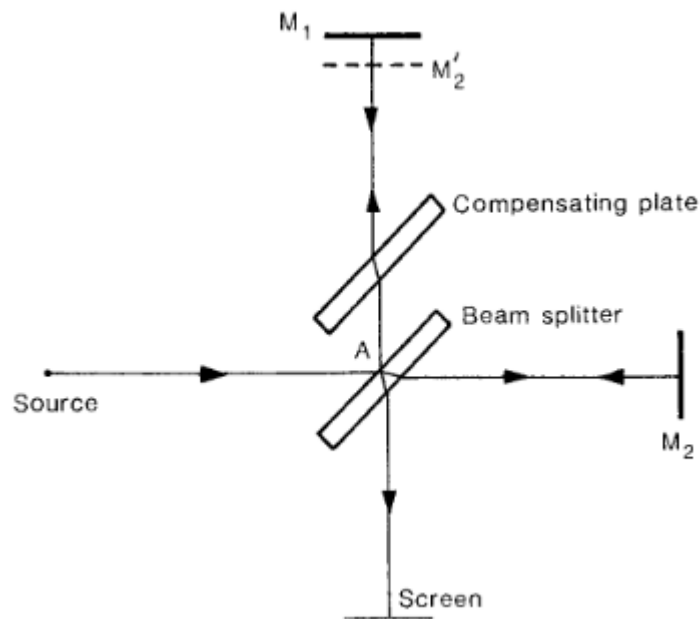
kuin valonnopeuteen perustuvissa mittauksissa. Tämän takia jo alle metrin etäisyydellä toimiva laite luokitellaan pitkän etäisyyden mittalaitteeksi. Myös mittausalue on yleensä melko pieni, sillä sekin vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Kun mitausalue on lyhyt, valokennolla on enemmän pikseleitä suhteessa etäisyyteen, jolloin tarkkuus on parempi. (Acuity n.d.)

#### 4.3.4 Interferometria

Interferometria on mittausmenetelmä, jossa hyödynnetään kahden eri matkan kulkeneen valoallon interferenssiä. Näiden aaltojen interferenssikuvioista voidaan päätellä kuljetun matkan ero. Interferometrillä voidaan mitata etäisyyttä jopa puolikkaan aallonpituuden tarkkuudella. Koska näkyvän valon aallonpituus on noin puoli mikrometriä, optisella interferometrillä voidaan mitata etäisyyttä todella tarkasti. Laserin keksimisen myötä interferometrillä on saatu mitattua moninkertaisia pituuksia paremmalla tarkkuudella, sillä laserin tuottama säteily on vahvaa ja koherenttia. (Hariharan 2007, 1; Donges & Noll 2015, 145.)

Jotta interferenssikuvio olisi vakaa ja siitä voitaisiin mitata aaltojen kulkeman matkan ero, aaltojen vaihe-ero ei saa muuttua. Aalloilla täytyy siis olla täsmälleen sama taajuus. Tämän vuoksi molempien aaltojen täytyy lähteä samasta säteilylähteestä. Yksi tapa on jakaa valonsäde kahteen osaan optisilla komponenteilla. Yleisin menetelmä on läpinäkyvä levy, joka on päällystetty osittain heijastavalla materiaalilla. Kun alkuperäinen säde osuu levyyn, osa siitä läpäisee levyn ja osa heijastuu, muodostaen kaksi sädettä. (Hariharan 2007, 13–14.)

Kuviossa 21 näkyy yksinkertainen, ns. Michelsonin interferometri. Siinä valonsäde jaetaan kahteen ja yhdistetään takaisin yhdeksi samalla osittain heijastavalla levyllä. Toinen säde heijastuu takaisin tunnetun matkan etäisyydellä olevasta referensspeilistä. Toinen säde taas heijastuu mitattavan kohteen etäisyydellä olevasta mittauspeilistä. Aallot yhdistyvät ja interferoivat, ja koska aallot kulkevat eri matkan peileille ja takaisin, niiden välillä on vaihe-eroa. Interferenssikuvioista voidaan päätellä mitattavan kohteen etäisyys. (Hariharan 2007, 16.)



KUVIO 21. 1880-luvulla keksitty Michelsonin interferometri (Hariharan 2007, 16)

Koska toiselle peilille syötetty säde kulkee jakavan levyn läpi vain kerran ja toiselle peilille kulkeva säde kolme kertaa, yhden peilin edessä on kompensatiolevy. Näin molempien säteiden optinen reitti on identtinen etäisyyttä lukuun ottamatta, ja ainoastaan peilien etäisyysero aiheuttaa interferenssikuvioon muutoksia. Michelsonin interferometri keksittiin jo 1880-luvulla. Vaikka nykyaikaiset laitteet ovat kehittyneet siitä pidemmälle, mittausmenetelmän periaate on silti sama. (Renishaw n.d.; Hariharan 2007, 16.)

## 5 TEOLLISUUSROBOTIIKKA

Lasermittauksen lisäksi myös teollisuusrobotiikka liittyy vahvasti opinnäytetyön käytännön osuuteen. Tässä osiossa tutustutaan hieman teollisuusrobotiikkaan. Osiossa käydään läpi yleisiä teollisuusrobottityyppejä. Erityisesti tutustutaan kiertäväniveliseen robottiin, jota käytetään myös työn käytännön osuudessa. Osiossa käsitellään myös teollisuusrobotin toimintaperiaatetta ja ohjelmointia.

### 5.1 Teollisuusrobotiikka yleisesti

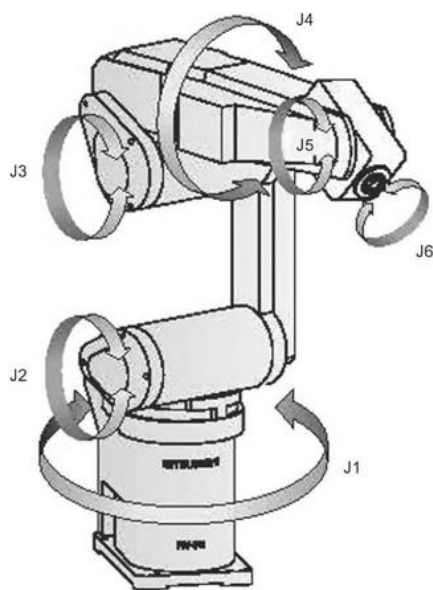
Teollisuusrobotti on mekaaninen laite, joka voidaan ohjelmoida tekemään monenlaisia toimintoja. Aina ei ole selvää, mitkä laitteet lasketaan roboteiksi. Esimerkiksi numeerisesti ohjattua NC-sorvia ei yleensä lasketa robotiksi, vaikka se voidaan ohjelmoida tekemään tietynlaisia mekaanisia liikkeitä. Teollisuusrobotit eroavat muusta automatiikasta siten, että ne voidaan ohjelmoida joustavasti erilaisiin tehtäviin. Monipuolisten liikkeiden lisäksi ne voidaan ohjelmoida reagoimaan ympäristöönsä sensorien avulla ja kommunikoidaan muiden laitteiden kanssa. (Craig 2005, 3, 14.)

Teollisuusrobotissa on kiinteitä akseleita, jotka on yhdistetty toisiinsa nivelillä. Liikuttamalla niveliä saadaan akselit liikkumaan toisiinsa nähden. Nivelissä on yleensä sensorit, joilla tarkkaillaan niiden asentoa. Nivelet voivat olla kiertyviä tai lineaarisia. Lisäksi robotissa on jonkinlainen työkalu, jolla toteutetaan haluttu toiminto. Työkalu voi olla esimerkiksi tarttuja, hitsauspoltin, sähkömagneetti tai jokin laite. Jotta työkalun olisi mahdollista olla missä tahansa pisteessä ja missä tahansa asennossa robotin työskentelyetäisyydellä, tarvitaan kuusi akselia. (Craig 2005, 5; Wilson 2015, 21.)

## 5.2 Teollisuusrobottien rakenne

On olemassa rakenteeltaan monenlaisia teollisuusrobotteja, ja jokaisella robotityypillä on omat vahvuutensa. Varhaisissa teollisuusroboteissa käytettiin hydraulikkaa tai pneumatiikkaa liikkeiden toteutukseen. Robotin reagointi ja tarkkuus olivat kuitenkin heikkoja. Myös sähköisiä tasajänniteservomootoreita ja askelmootoreita on käytetty aikaisemmin, mutta niillä saavutettiin melko pieni kantokyky. Kun vaihtojänniteservomootorit ovat yleistyneet, suurin osa teollisuusroboteista toimii niillä. Nykyään teollisuusroboteilla voidaan tehdä erittäin tarkkoja ja toistettavia liikkeitä, ja niiden kantokyky on korkea. (Wilson 2015, 21.)

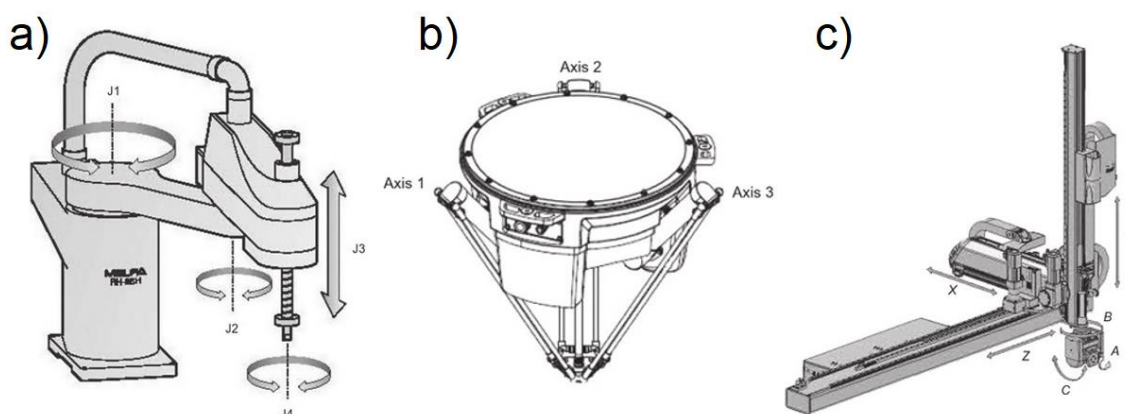
Yleisin teollisuusrobotityyppi on kiertyvänivelinen robotti. Myös tässä opinnäytetyössä käytetään kuusiakselista kiertyvänivelistä robottia. Niissä on yleensä kuusi tai seitsemän pyörivää niveltä ja akselia. Jokainen akseli on kiinnitetty edellisen nivelen päähän, muodostaen pitkän, ihmisen käden kaltaisen rakenteen. Niillä voidaan tehdä erittäin monipuolisia liikkeitä ahtaissakin olosuhteissa. Työkalu voi yleensä olla missä tahansa pisteessä ja missä tahansa asennossa robotin työalueen rajoissa useammalla tavalla. Kaksi robottikättä voidaan myös liittää yhteen robottiin, jolloin voidaan tehdä hyvin ihmisen kaltaisia liikkeitä, jotka vaativat kahta kättä. Kuviossa 22 on esimerkki kuusiakselisen kiertyvänivelisen robotin rakenteesta. (Wilson 2015, 24.)



KUVIO 22. Ihmisen käsivartta muistuttava kuusiakselinen kiertyvänivelinen teollisuusrobotti (Wilson 2015, 23)

Kiertyvänivelisen robotin rakenteen takia jokainen nivel joutuu kantamaan sitä seuraavien nivelten ja akselien painon. Tämä huonontaa robotin kantokykyä sekä tarkkuutta ja toistettavuutta. Nykyaikaisella tekniikalla saavutetaan kuitenkin tarpeeksi hyvä suorituskky monenlaisiin käyttötarkoituksiin. Tyypillisesti robotin kantama on noin 0,5 m ja 3,5 m väliltä ja kantokyky noin 3 kg ja 1000 kg väliltä. Kiertyvänivelistä robottia käytetään yleensä esimerkiksi kappaleenkäsittelyyn, hitsaukseen ja maalaukseen. (Wilson 2015, 24.)

Muita teollisuusrobottityyppejä ovat mm. SCARA, rinnakkainen eli delta ja suorakulmainen. Niillä on erilaisia käyttötarkoituksia, mutta monia voidaan käyttää keskenään samanlaisiin prosesseihin. Kuviossa 23 on esimerkki a) SCARA-robotista, b) delta-robotista ja c) suorakulmaisesta robotista. (Wilson 2015, 25–28.)



KUVIO 23. a) SCARA-robotti, b) delta-robotti ja c) suorakulmainen robotti (Wilson 2015, 25–27, muokattu)

SCARA- ja delta-robotit ovat yleensä pieniä ja nopeita. Kantokyky on yleensä vain muutamia kilogrammoja. Pienen kantokyvyn sekä rajattujen ja nopeiden liikkeiden ansiosta ne soveltuvat hyvin yksinkertaisiin kokoonpano- ja pakkaustehtäviin. Suorakulmaisissa roboteissa on ainoastaan lineaarisia niveliä, ja akseleita on yleensä vain kolme. Suorakulmaisten robottien kantokyky on yleensä suuri, jopa 3000 kg. Ne voidaan yleensä asentaa työskentelytilansa päälle, joka säästää lattiatilaa. (Wilson 2015, 25–28.)

### 5.3 Teollisuusrobotin toiminta

Robotin laskennassa tarkastellaan jatkuvasti sen akselien, nivelten, työkalujen ja ympäristön sijaintia ja asentoa kolmiulotteisessa tilassa. Kaikki esineet voidaan kuvata niiden sijainnin ja asennon mukaan. Robotille määritellään kolmiulotteisia koordinaatistoja, joiden avulla asioiden sijainti ja asento määritetään. Maailma-koordinaatisto voidaan määrittää esimerkiksi robotin liikkumattomaan jalustaan, ja muut koordinaatistot perustuvat maailmakoordinaatistoon. Robotin käyttämälle työkalulle määritetään työkalupiste TCP (Tool Center Point), joka liikkuu työkalun mukana. Työkalupisteessä on työkalukoordinaatisto, joka kuvaa työkalun sijaintia ja asentoa. (Craig 2005, 4–5, 14.)

Kinematiikka on tieteen ala, joka tutkii liikettä ilman sitä aiheuttavia voimia. Kinematiikassa käsitellään sijaintia, nopeutta ja kiihtyvyyttä. Robotin työkalukoordinaatisto voidaan laskea suoran kinematiikan avulla. Kun tiedetään kaikkien akselien asento ja pituus, voidaan helposti laskea työkalun sijainti ja asento maailmakoordinaatistoon nähden. Käänteisellä kinematiikalla puolestaan voidaan laskea akselien kaikki mahdolliset asennot, kun työkalun sijainti ja asento tiedetään. Käänteinen kinematiikka vaatii paljon vaikeampaa laskentaa kuin suora kinematiikka. (Craig 2005, 4–6.)

### 5.4 Teollisuusrobotin ohjelmointi

Robotin liikkeet määritellään yleensä työkalupisteen koordinaatteina halutussa koordinaatistossa. Haluttu liikerata saadaan, kun määritetään matkan varrelle tarpeelliset pisteet, joiden kautta työkalupisteen tulee kulkea. Liike voidaan toteuttaa yksinkertaisesti liikuttamalla jokaista niveltä tarvittava määrä, jolloin työkalun liikerata on yleensä kaareva. Liikerata voidaan myös määrittää lineaariseksi, jolloin akselien liikkeiden määrittämiseksi tarvitaan enemmän laskentaa. Kunkin pisteen välisen nopeuden voi määrittää ohjelmassa. Liikkeisiin voidaan monesti myös määrittää esimerkiksi kiihtyvyyttä ja liikkeen sulavuutta määrittävät parametrit. Näiden tietojen perusteella robotti laskee tarvittavat nivelten liikkeet. Ohjelmassa voi lisäksi olla mm. tulojen ja lähtöjen käsittelyä, yksinkertaista laskentaa, silmukkarakenteita sekä ehtolauseita. (Craig 2005, 10, 14.)

Perinteisesti robottien ohjelmointia on tehty ns. opettamalla pisteet robotille. Opettamisessa robotti liikutetaan haluttuun pisteeseen halutussa asennossa. Robotin asento tallennetaan muistiin, jolloin robotti voidaan liikuttaa ohjelmassa automaattisesti samaan pisteeseen. Robottia liikutetaan yleensä kädessä pidettävällä ohjaimella, jossa on painikkeita mm. robotin liikuttamiseen ja ohjelmointiin. (Craig 2005, 340.)

Nykyään robotin ohjelmointi tietokoneella yleistyy jatkuvasti. Yleensä käytetään robotin ohjelmointiin tehtyjä ohjelmointikieliä, joissa on siihen hyödyllisiä ominaisuuksia. Robotin ohjelmointikieli voi olla täysin uusi, nimenomaan robotin ohjelmointiin tehty kieli. Robotin ohjelmointikieli voi myös pohjautua johonkin olemassa olevaan yleiseen ohjelmointikieleen, johon lisätään robotiikkakirjasto. Vaikka robotti käyttäisi tiettyä ohjelmointikieltä, yleensä siinä on myös käsiohjain. Ohjelmointia voidaan tehdä sekä tietokoneella, että käsiohjaimella. (Craig 2005, 341.)

Offline-ohjelmoinnissa käytetään tietokoneella ohjelmointi- ja simulointiympäristöä robotin ohjelmointiin, jolloin varsinaista robottia ei tarvita. Offline-ympäristössä voidaan ohjelmoida robottia kesken tuotannon. Tällöin robotin ohjelmiin tehtävät muutokset eivät aiheuta yhtä suurta tuotantokatkosta. Se myös helpottaa robottisolun suunnittelussa luotujen CAD-mallien käyttöä robotin ohjelmoinnissa, joka voi merkittävästi nopeuttaa ohjelmointia. (Craig 2005, 15.)

## 6 MITTAUSJÄRJESTELYT

Tässä osiossa käsitellään opinnäytetyöhön kuuluvaa käytännön mittausta. Työssä mitattiin laserantureilla metallilevyssä olevan reiän sijaintia kolmiulotteisesti. Näin voitiin testata mittalaitteiden suorituskyky reunantunnistuksessa ja etäisyysmittauksessa. Mittauksissa vertailtiin kolmea laseranturia erilaisissa olosuhteissa. Laseranturit kiinnitettiin teollisuusrobotin laippaan, ja robotti käytti kukin anturia vuorotellen reiän sijainnin mittaamiseen. Reiän sijainti laskettiin robotin mittausohjelmassa. Jokaisessa olosuhteessa mitattiin vähintään 100 toistoa kullakin anturilla, jotta tulokset olisivat luotettavia. Tulokset kirjattiin automaattisesti robotin kontrollerissa olevalla usb-tikulla olevaan tiedostoon.

### 6.1 Lasermittalaitteet

Testissä olevien lasermittalaitteiden valmistajia ja malleja ei kerrota työn toimeksiantajayrityksen toiveesta. Tämän takia niistä käytetään nimiä laseranturi 1, laseranturi 2 ja laseranturi 3. Laseranturi 1 on työn tekohetkellä yleisin Fastemsin robottisoluiissa käytettävä anturi. Laseranturista 2 ei ole ollut aiempaa kokemusta. Laseranturi 3 on ollut käytössä joissain Fastemsin robottisoluiissa.

Kaikki anturit mittaavat etäisyyttä kolmiomittausperiaatteella. Laseranturin 1 mittauasetäisyys ei ole tarpeeksi pitkä kaikkiin tarvittaviin robottisolujen mittauksiin, joten kahden muun anturin mittauasetäisyys on pidempi. Kolmiomittausmenetelmässä anturin mittauasetäisyys ja -alue vaikuttavat tarkkuuteen. Yksi työn tavoite onkin selvittää, voidaanko yhtä anturia käyttää sekä lyhemmillä että pidemmillä etäisyyksillä niin, että mittaustarkkuus on hyvä molemmilla etäisyyksillä.

Laseranturin 1 ja sen vahvistimen lähtösignaalit ovat analogisia, joka voi aiheuttaa sähköisiä häiriötä mittaustulokseen. Laseranturissa 2 ei ole erillistä vahvistinta, ja laite käyttää digitaalista IO-Link-kommunikointitekniikkaa. Laseranturin 3 lähtösignaali vahvistimelle on analoginen. Vahvistimeen lisättiin moduuli, jonka avulla se käyttää digitaalista EtherCAT-kenttäväylää ohjelmoitavan logiikan ja vahvistimen väliseen tiedonsiirtoon.

## 6.2 Mittausolosuhteet

Mittausolosuhteiksi valittiin todellisia robottisolujen lasermittauksia vastaavia tilanteita sekä käytännön kokemusten perusteella lasermittausta haaitavia tekijöitä. Monista olosuhteista olisi voitu tehdä äärimmäisempiä, jolloin niiden vaikutus olisi voinut olla selvempi. Olosuhteiden haluttiin kuitenkin olevan sellaisia, että ne ovat realistisia todellisissa mittaustilanteissa. Normaaliolosuhteina pidettiin tilannetta, jossa mittausetäisyys on 400 mm, mittauspintana musta 8 mm paksu levy, taustana vaaleanharmaa levy ja ylimääräisiä valaistus- ja heijastushäiriöitä ei ole.

Valaistushäiriöt ovat olleet yleisiä robottisolujen käyttöönotto-tilanteissa. Valaistushäiriöitä aiheuttavat kirkkaat kattovalaisimet, etenkin silloin, kun mitattava kohde on korkealla eli lähellä kattovalaisimia. Lasermittaus perustuu valoon, joten on oletettavissa, että ulkoiset valonlähteet voivat vaikuttaa mittaukseen. Työssä testattiin valaistuksen vaikutusta lisäämällä valaistusta sekä pimentämällä mittaussympäristöä. Valaistusta lisättiin asettamalla LED-työvalaisin laseranturien taakse noin 1,5 m etäisyydelle niin, että se osoittaa mittauspintoja. Valaisin asetettiin myös mittauspintojen taakse noin 2 m etäisyydelle niin, että se osoitti laserantureihin. Mittausympäristö pimennettiin normaalia valaistusta pimeämmäksi rakentamalla erilaisista levyistä ja sermeistä seinät ja asettamalla niiden päälle suuri pahvilevy. Mittausympäristö ei ollut täysin pimeä, mutta silti paljon hallin normaalia valaistusta pimeämpi.

Myös heijastukset ovat aiheuttaneet häiriöitä lasermittaukseen. Heijastushäiriöitä voi aiheuttaa mikä tahansa heijastava kappale. Vaikka laserin valo on hyvin kohdistettua, leviää se silti jonkin verran ympärilleen. Säteilyn osuessa heijastavaan pintaan, lähes kaikki säteily heijastuu samaan suuntaan. Jos heijastus osuu laseranturin valokennolle, säteily voi olla niin voimakasta, että anturi tulkitsee sen oikeana heijastuksena mitattavasta kohteesta. Heijastavat kappaleet ja kirkas valaistus voivat myös lisätä toistensa vaikutusta. Erilaisia olosuhteita heijastusten tutkimiseen olivat mittauspinnan materiaali, taustamateriaali, heijastava kappale lähellä mittauspisteitä sekä leikkuuneste mittauspinnassa. Mittauspintoja ja taustalevyjä käsitellään tarkemmin kohdassa 6.3. Heijastavana kappaleena käytettiin alumiinilevyä, joka asetettiin noin 3 cm mitattavan reiän yläpuolelle. Tämä vastaa

todellista tilannetta, jonka on aiemmin todettu aiheuttavan ongelmia lasermittaukseen. Leikkuuneste tai muu heijastava öljy mittauspinnassa on yleinen ongelma, jonka vaikutusta haluttiin tutkia.

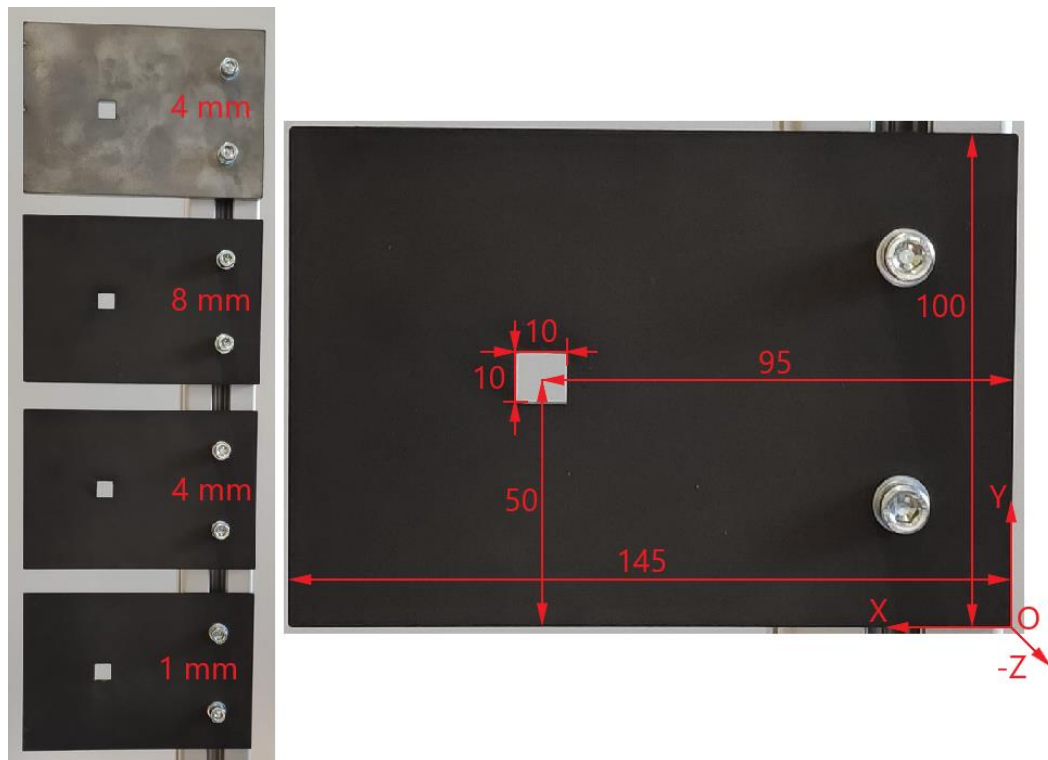
Muita olosuhteita olivat mittauspinnan paksuus ja mittausetäisyys. Jos mittauspinta on paksu, lasersäde voi heijastua osittain takaisin reiän sisäpinnasta. Mittausetäisyyksiksi valittiin 400 mm ja 600 mm, jotka ovat lähellä yleisiä mittausetäisyyksiä robottisoluisissa. 600 mm etäisyydellä tehdyt mittaukset tehtiin ainoastaan laserantureilla 2 ja 3, koska laseranturin 1 mittausetäisyys ei ole tarpeeksi pitkä. 400 mm etäisyydellä tehdyt mittaukset tehtiin kaikilla kolmella anturilla. Myös mekaaniset viat ovat aiheuttaneet ongelmia, mutta niitä ei tutkittu tässä työssä.

### **6.3 Mittauspinnat ja taustalevyt**

Mittauksissa oli neljä erilaista metallista mittauspintaa. Pinnoista kolme käsiteltiin mangaanifosfatoinnilla ja yksi oli käsittelemätöntä ruostumatonta terästä. Mangaanifosfatoidut pinnat ovat mustia ja karheampia kuin heijastava käsittelemätön teräspinta. Lasermittaus onnistuu vain, jos mitattavassa pinnassa on tarpeeksi karheutta. Tällöin lasersäteen osuessa pintaan tapahtuu hajaheijastumista. Laserin osuessa mustiin pintoihin pitäisi tapahtua enemmän hajaheijastumista kuin heijastavammalla pinnalla. Mustat pinnat myös absorboivat enemmän valoa kuin käsittelemätön heijastava pinta.

Antureita vertailtiin myös puisen ja muovisen kappaleen mittaamisessa. Puisella ja muovisella kappaleella ei tehty samanlaisia mittauksia kuin metallisilla. Niistä etsittiin ainoastaan yksi reuna ja mitattiin kappaleen etäisyys. Puisen ja muovisen kappaleen mittaus vastaa esimerkiksi materiaalilavan paikan mittaamista.

Mittauspintojen mitat olivat samat paksuutta lukuun ottamatta. Mustien pintojen paksuudet olivat 1 mm, 4 mm ja 8 mm ja käsittelemättömän 4 mm. Mittauspinnat kiinnitettiin alumiiniprofiiliin päällekkäin. Mittauspintoihin määritettiin robotin käyttäjäkoordinaatistot mittausten helpottamiseksi. Kuvassa 1 näkyy pintojen kiinnitys alumiiniprofiiliin, niiden mitat millimetreinä sekä käyttäjäkoordinaatisto oikeassa alakulmassa.



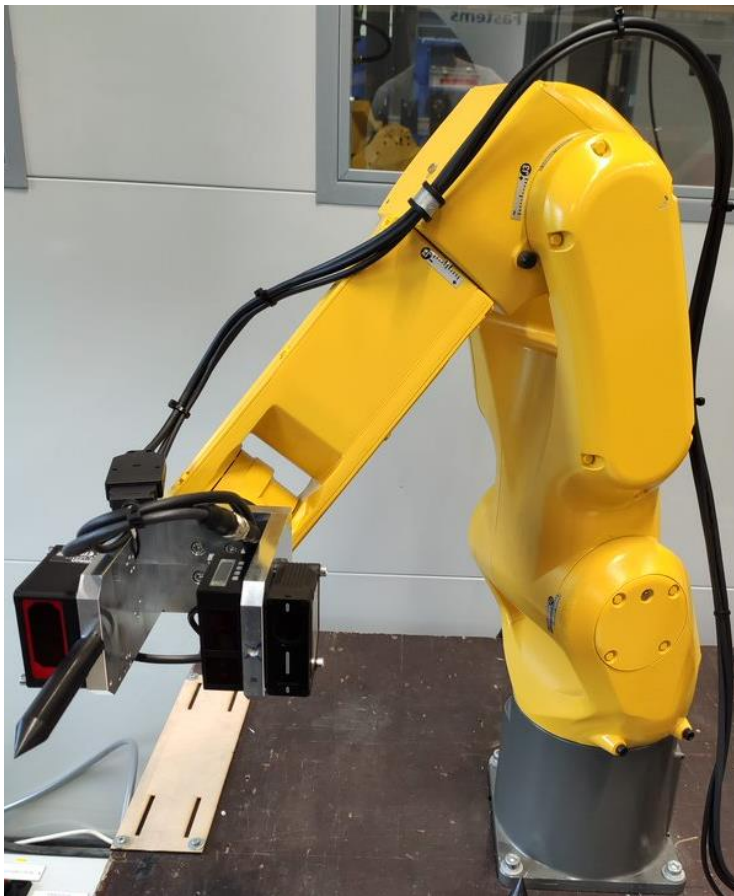
KUVA 1. Mittauspintojen mitat millimetreinä, käyttäjäkoordinaatiston orientaatio sekä pintojen kiinnitys alumiiniprofiiliin

Taustalevyinä käytettiin samalla mangaanifosfatoinnilla käsiteltyä mustaa karheaa levyä, vaaleanharmaaksi maalattua heijastavampaa levyä sekä lasilevyä. Taustalevy asetettiin mittauspintojen taakse 45 cm etäisyydelle mittauspinnoista niin, että laserien osoittaessa mittausreiän läpi pintaa on joka puolella laserin pistettä. Mittauksia tehtiin myös ilman taustalevyä, jolloin taustana oli useiden metrien etäisyydellä oleva kaappi. Tarkoitus oli selvittää, aiheuttaako taustasta heijastuva lasersäde häiriöitä mittauksiin. Taustamateriaali vaikuttaa myös mittauspinnan ja taustan värieroon, joka voi vaikuttaa mittaukseen.

#### 6.4 Laseranturien asennus ja kytkentä

Robotin laippaan suunniteltiin välikappale, johon laseranturit kiinnitettiin. Välikappaleessa on anturien kiinnitysreikien kohdilla kierteet ruuveille. Anturien kaapelit kiinnitettiin robottiin nippusiteillä ja pehmustetulla kiinnityslenkillä niin, että kaapeleissa on tarpeeksi ylimääräistä pituutta robotin liikkeisiin. Välikappaleessa on myös kierteet opetuspiikille, jonka avulla mittauspintojen käyttäjäkoordinaatistot määritettiin.

Työssä käytetty robotti on kuusiakselinen kiertyvänivelinen FANUC LR Mate 200iD. Robotti on pieni kiertyväniveliseksi robotiksi, mutta soveltuu hyvin kyseiseen mittaukseen, koska työssä ei vaadita suurta kantokykyä ja ulottuvuutta. Pidempi ulottuvuus olisi kuitenkin helpottanut laseranturien työkalupisteiden määrittämistä. Robotin datalehden mukaan sen toistotarkkuus on  $\pm 0,01$  mm, joka on parempi kuin isommilla roboteilla (FANUC n.d.). Kuvassa 2 näkyy työssä käytetty robotti, johon on asennettu laseranturit, opetuspiikki ja kaapelit.

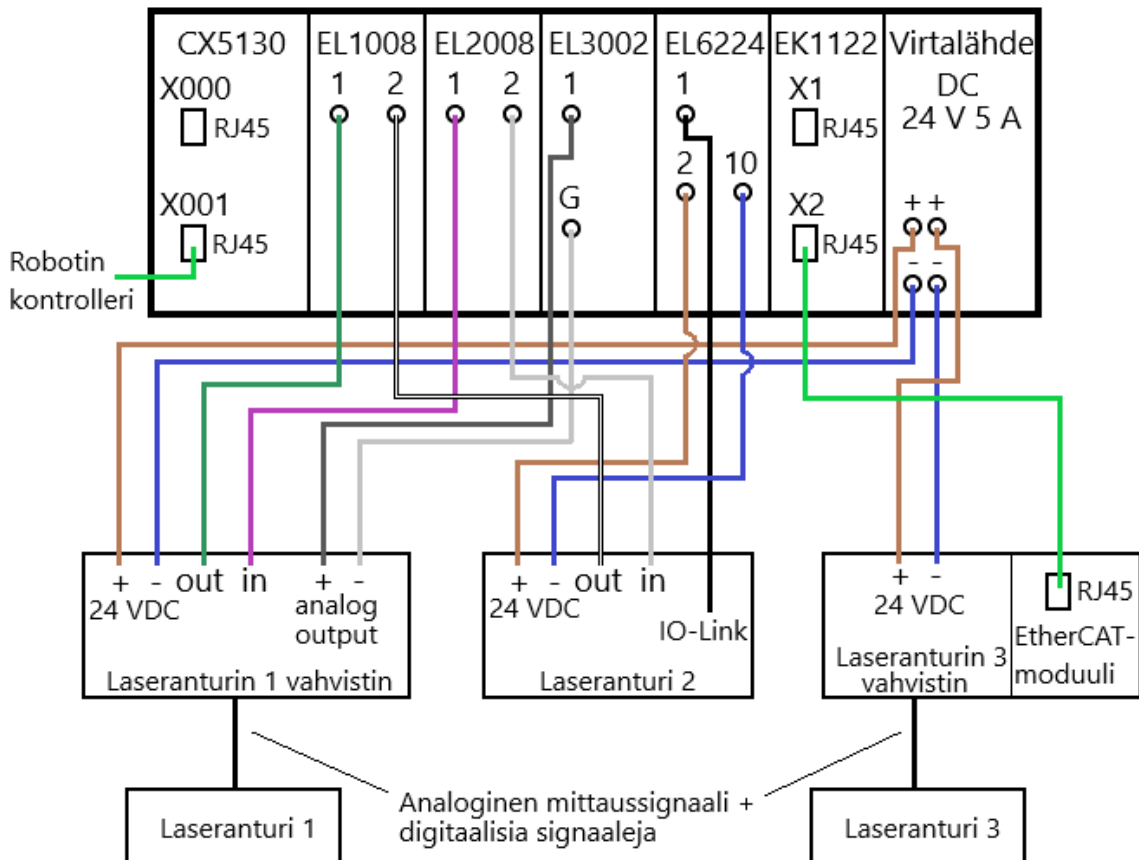


KUVA 2. Työssä käytetty FANUC LR Mate 200iD -robotti ja siihen asennetut anturit, kaapelit ja opetuspiikki

Laseranturit kytkettiin Beckhoff CX5130 -ohjelmoitavaan logiikkaan. Ohjelmoitava logiikka on yhteydessä robotin kontrolleriin. Analogista mittaussignaalia käyttävän laseranturin 1 mittaussignaali kytkettiin vahvistimelta Beckhoff EL3002 analogiseen tulokorttiin. IO-Linkiä käyttävän laseranturin 2 mittaussignaali kytkettiin EL6224 IO-Link-korttiin. EtherCAT-kenttäväylää käyttävä laseranturi 3 kytkettiin EK1122 EtherCAT-korttiin.

Mittausetäisyyden lisäksi antureilta tarvittiin robotille signaali mittauspinnan tunnistamisesta. Lisäksi haluttiin, että anturien laserlähettimet voidaan kytkeä päälle ja pois päältä robotin digitaalisilla lähdöillä. Laserantureilta 1 ja 2 kytkettiin mittauspinnan tunnistussignaali EL1008 digitaaliseen tulokorttiin. Laserantureilta 1 ja 2 kytkettiin myös laserlähettimen käynnistys-signaalit EL2008 digitaaliseen lähtökorttiin. Kaikki laseranturin 3 signaalit kulkivat EtherCAT-kenttäväylässä, joten käyttöjännitteen lisäksi muita kytkentöjä ei tarvittu.

Robotin ja ohjelmoitavan logiikan välillä olevan rajapinnan avulla anturien signaalit välitettiin robotin tuloihin ja robotin lähdöt anturien tuloihin. Näin robotti ja laseranturit kommunikoivat keskenään ohjelmoitavan logiikan kautta. Mittaussignaalit välitettiin robotille ilman käsittelyä ja todellinen etäisyys laskettiin robotilla. Kuviossa 24 on laseranturien, vahvistinten ja logiikan korttien kytkentäkaavio. Anturien out-signaali tarkoittaa mittauspinnan tunnistussignaalia ja in-signaali laserin käynnistys- ja sammutussignaalia. Laitteiden välillä käytettiin anturien ja vahvistimien omia kaapeleita. Kaaviossa ei ole kaapelien kytkemättömiä johtimia.

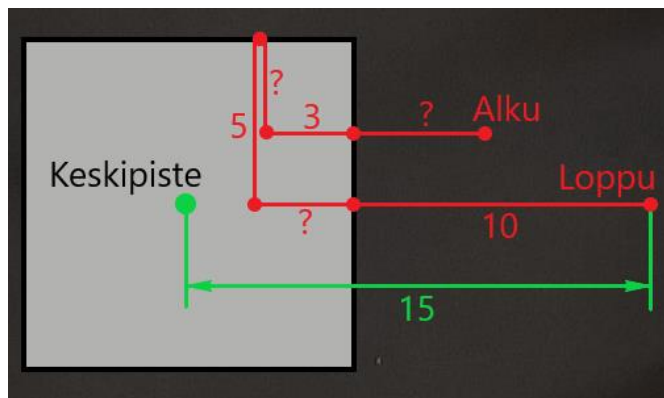


KUVIO 24. Laseranturien, vahvistinten ja logiikan korttien kytkentäkaavio

Asennusten ja kytkentöjen jälkeen jokaiselle laseranturille määritettiin työkalupiste 400 mm etäisyydelle neljän pisteen menetelmällä. Myös opetuspiikin kärkeen määritettiin työkalupiste. Opetuspiikin avulla määritettiin käyttäjäkoordinaatistot mittauspinnolle. Käyttäjäkoordinaatiston avulla reiän sijainti käytetyssä koordinaatistossa tiedetään tarkasti. Reikä on X-suunnassa 95 mm ja Y-suunnassa 50 mm koordinaatiston origosta. Opetuspiikki irrotettiin käyttäjäkoordinaatistojen määrittämisen jälkeen, jotta se ei häiritse mittauksia.

## 6.5 Robotin ohjelmat

Robotin mittausohjelmat valmistettiin Fanucin offline-ohjelmointiympäristö Roboguidessa ja siirrettiin robotille työn alkaessa. Mittausohjelmien aloituspisteessä laseranturi osoittaa mittauspintaa reiän vieressä. Tällöin pinnan tunnistuksesta kertova anturin lähtö on päällä. Robotti alkaa liikkua reiän suuntaan. Kun laseranturi kohtaa reiän, anturi ei enää tunnista pintaa ja robotti pysähtyy reiän reunalle. Tästä liikutaan 3 mm reikää kohti ja aletaan liikkua ylöspäin eli käyttäjäkoordinaatiston Y-suuntaan. Kun laseranturi tunnistaa mittauspinnan, robotti pysähtyy ja liikkuu 5 mm alaspäin. Työkalupiste on tällöin korkeussuunnassa reiän keskellä. Robotti alkaa liikkua oikealle eli käyttäjäkoordinaatiston -X-suuntaan. Kun laseranturi tunnistaa mittauspinnan, robotti pysähtyy reiän rajalle. Tästä robotti liikkuu 10 mm oikealle, jotta pinnasta voidaan luotettavasti mitata etäisyys Z-suunnan määrittämiseksi. Tällöin työkalupiste on 15 mm oikealla reiän keskipisteestä, joka otetaan huomioon laskennassa. X- ja Y-arvoihin vaikuttaa siis anturien reuntunnistuskky ja Z-arvoon anturien etäisyysmittaus. Reiän mitatuista koordinaateista vähennetään reiän todellinen sijainti, jolloin mittaustuloksena saadaan ero todelliseen sijaintiin. Tulokset X- Y- ja Z-suunnassa tallennetaan robotin numerorekisteriin muistiin. Kuviossa 25 on havainnollistettu laserin työkalupisteen liikerataa sekä pysähtymiskohtia. Kunkin matkan pituus on merkitty millimetreinä, ja kysymysmerkillä merkityt matkat riippuvat siitä, milloin anturi tunnistaa reunan.



KUVIO 25. Laseranturin työkalupisteen kulkema reitti alkupisteestä loppupisteeseen

Kun häiriötä aiheuttavia olosuhteita lisätään, mittaus ei välttämättä toimi yhtä luotettavasti. Heijastukset ja kirkkaat valot voivat häiritä reunan tunnistamista. Anturi ei välttämättä tunnista reikää ollenkaan. Anturi voi myös tunnistaa reunan ennenaikaisesti. Pinnan ja taustan värieron takia reunantunnistus voi myös hidastua, jolloin mittaukseen tulee kiinteä virhe tiettyihin suuntiin. Olosuhteet voivat myös vaikuttaa laseranturin etäisyysmittaukseen loppupisteessä. Jos anturi tunnistaa pinnan keskellä reikää tai ei tunnista pintaa, kun sen pitäisi, mittaustulos merkitään virheelliseksi mittausohjelmassa. Virheellisille mittauksille annetaan mitaustulokseksi nolla.

Kun reiän sijainti on mitattu jokaisella laseranturilla, robotin numerorekisterissä olevat tulokset tallennetaan robotin kontrollerissa olevalla usb-tikulla olevaan tiedostoon. Tulokset tallennetaan KAREL-ohjelmointikielellä tehdyllä ohjelmalla. Ohjelma avaa usb-tikulla olevan csv-tiedoston ja kirjoittaa määritettyjen numerorekisterien arvot omalle rivilleen.

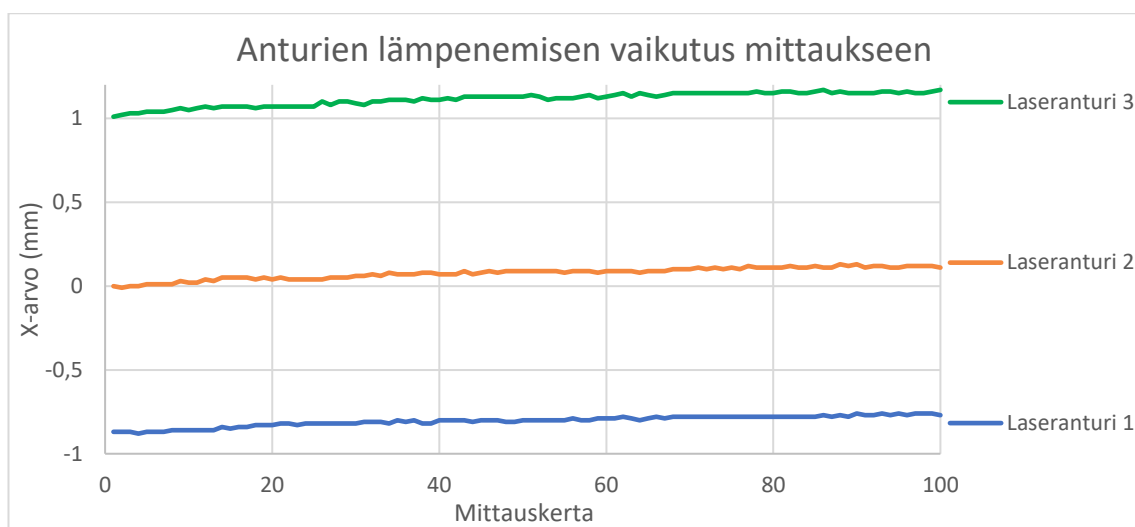
## 7 MITTAUSTULOKSET

Tässä osiossa käsitellään mittausten tuloksia. Mittaustulokset kopioitiin Excel-pohjaan, jossa käsiteltiin kunkin laseranturin mittaaman pisteen X- Y- ja Z-arvoja erikseen. Taulukkoon laskettiin tulosten keskiarvo, mediaani, maksimiarvo, minimiarvo, suurin poikkeama keskiarvosta sekä vaihteluväli. Virheelliseksi merkittyjä mittauksia ei huomioitu laskuissa. Mitatuista arvoista luotiin myös kuvaajat tulosten visualisoimiseksi. Robotin kappaleenkäsittelyssä vaadittu tarkkuus ei ole aivan selkeä. Yleensä alle 0,5 mm virheen ei pitäisi haitata toimintaa. Tärkeintä on se, ettei yksittäisissä mittauksissa ole suuria virheitä.

### 7.1 Yleisiä huomioita mittaustuloksista

Mittaustuloksissa on kiinteitä eroja laseranturien välillä. Z-arvojen ero johtuu siitä, että anturien työkalupisteissä on pientä epätarkkuutta. Työkalupisteitä ei ole laskettu, vaan ne on opetettu neljän pisteen menetelmällä, jolloin niihin tulee aina pieni virhe. X- ja Y-arvojen erot johtuvat siitä, että jokainen anturi tunnistaa mitattavan reiän reunan eri ajassa. Jokainen reunanhakuliike tehtiin nopeudella 1 mm/s, joten anturien välillä on selvästi eroa reunantunnistusnopeudessa. Tämä oli myös helposti nähtävissä mittausta seuraamalla. Työkalupisteiden epätarkkuus voi myös aiheuttaa kiinteää virhettä X- ja Y-arvoihin. Kiinteillä eroilla ei ole vaikutusta tulosten käsittelyyn, sillä kiinteät mittausrvirheet voidaan ottaa huomioon laskennassa. Tuloksissa vertailtiin mitattujen arvojen toistettavuutta.

Laseranturien käyttöohjeissa ohjeistetaan yleensä käynnistämään laite vähintään puoli tuntia ennen mittausten aloittamista, jotta anturi ehtisi lämpenemään. Joissakin mittaussarjoissa anturien lämpeneminen on selvästi havaittavissa. Kuviossa 26 on ensimmäisen mittaussarjan X-arvojen kuvaajat. Kuvaajista nähdään selvästi anturien lämpeneminen. X-arvot kasvavat noin 0,15 mm mittaussarjan aikana. Kuviossa näkyy myös anturien välinen kiinteä ero. Laseranturi 1 tunnistaa reunan hitaimmin, joten X-arvoa etsiessään se ehtii mennä lähes millimetrin reunan yli. Laseranturi 3 puolestaan tunnistaa reunan nopeimmin, jo ennen kuin laserin säde on kokonaan mittauspinnan päällä.



KUVIO 26. Laseranturien välistä kiinteää eroa sekä anturien lämpenemistä havainnollistava kuvaaja

Robotti jätettiin välillä tekemään mittauksia yön ajaksi, jolloin toistoja saatiin enemmän. Yön yli kestävät mittaukset tehtiin noin klo 16-8 välisenä aikana. Mittaustulokset muuttuivat hieman vuorokaudenajan mukaan. Luultavasti muutokset johtuivat lämpötilan muutoksesta vuorokaudenajan mukaan sekä siitä, että hallin valot sammutettiin iltaisin. Teoriaosuudessa selvitettiin, että ympäristön lämpötila vaikuttaa laseranturien etäisyysmittaukseen. Muutos oli kuitenkin melko pientä verrattuna vaadittuun tarkkuuteen. Eniten vaikutusta oli Z-arvoon, jonka keskiarvo saattoi muuttua noin 0,1 mm. Laseranturin 3 tulokset eivät juurikaan muuttuneet 400 mm etäisyydellä. Suurin muutos oli laseranturin 2 mittaustuloksissa.

## 7.2 Laseranturien asetusten vaikutus

Kaikkien laseranturien asetukset pyrittiin pitämään mahdollisimman samanlaisina. Viiveet ja hystereesit poistettiin kaikista antureista. Kaikkien anturien etäisyysmittausten arvo näytettiin 0,01 mm tarkkuudella. Laseranturilla 1 voidaan muuttaa paljon enemmän asetuksia kuin laserantureilla 2 ja 3. Suurin osa asetuksista ei vaikuttanut mittaustuloksiin.

Kaikissa laserantureissa käytettiin etäisyysmittauksen keskiarvosuodatusta, jonka tarkoitus on tasoittaa mittaussignaalia. Laserantureilla 2 ja 3 hyväksittiin

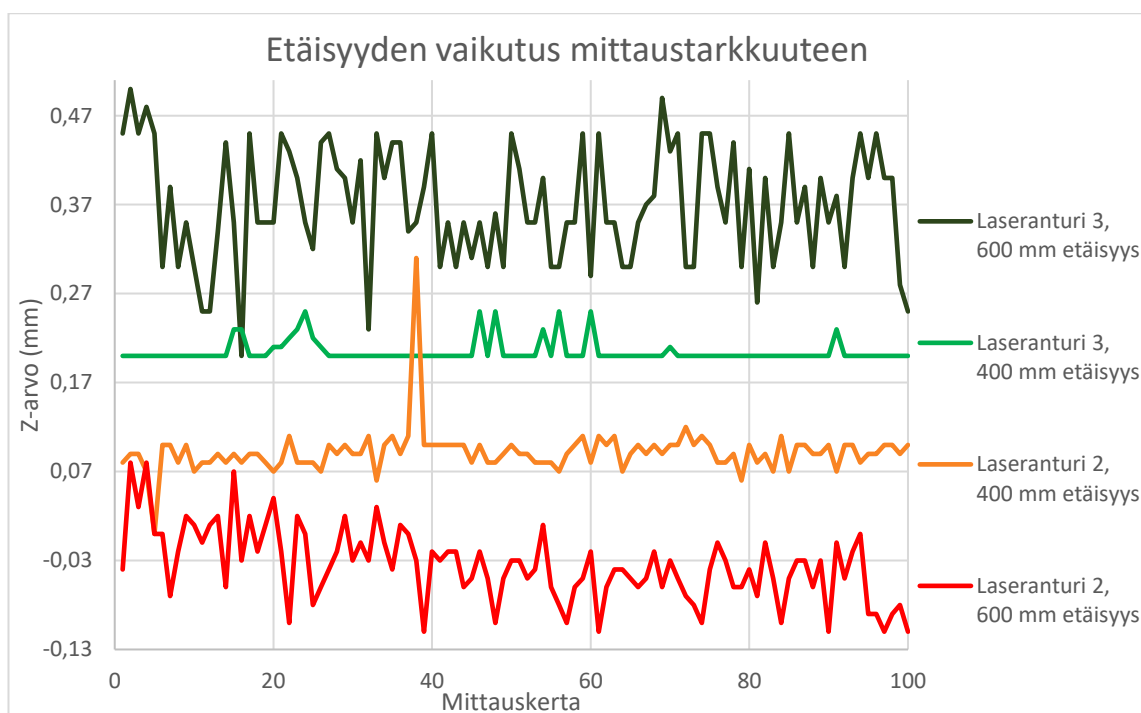
räksi osoittautui 16 mittauksen keskiarvo. Laseranturilla 1 hyvä määrä oli oletusasetus 128. Laseranturin 1 näytteenottotaajuus oli suurempi, jonka takia keskiarvoon voidaan laskea enemmän mittauksia. Reunantunnistusnopeus hidastui suuremmalla suodatuksen arvolla, koska mittaussignaali ei muuttunut yhtä nopeasti. Etäisyysmittauksessakin oli kiinteä ero, vaikka anturien annettiin olla paikallaan 2 sekuntia ennen etäisyysmittauksen arvon lukemista. Sen sijaan etäisyysmittauksen pitäisi olla vakaampi, mutta se ei ollut.

Laseranturin 1 lasersäteen voimakkuutta sekä vastaanottimen herkkyyttä voidaan muuttaa asetuksista. Vastaavia asetuksia ei ole laserantureilla 2 ja 3. Lasersäteen voimakkuuden pienentäminen auttoi heijastavan pinnan mittaamisessa, mutta se voi jopa olla haitaksi muissa olosuhteissa. Reunantunnistusnopeus hidastui, kun lasersäteen voimakkuutta pienennettiin.

### **7.3 Mittausetäisyyden vaikutus**

Mittausetäisyydellä oli suuri vaikutus mittausten tarkkuuteen. Laserantureilla 2 ja 3 tehtiin useita mittauksia 400 mm ja 600 mm etäisyydeltä. Laseranturilla 1 ei voida mitata 600 mm etäisyydeltä, joten mittauksia tehtiin vain 400 mm etäisyydeltä. Mittausetäisyys ei juurikaan vaikuttanut reunantunnistukseen, mutta etäisyyden mittauksessa sillä oli suuri vaikutus. Vaikka laseranturien 2 ja 3 mittausalue on 200 – 1000 mm ja 600 mm on keskellä aluetta, etäisyyden mittauksessa oli paljon enemmän vaihtelua kuin 400 mm etäisyydellä. Vertailun vuoksi tehtiin myös yksi mittaussarja 800 mm etäisyydeltä, jossa ei ollut merkittävää eroa 600 mm etäisyyteen nähden.

Kuviossa 27 on laseranturien 2 ja 3 Z-arvon mittaustulokset mustalla mittauspinnalla 400 mm ja 600 mm etäisyyksillä. Lyhyemmällä mittausetäisyydellä vaihtelu on paljon pienempää kuin pidemmällä. Etäisyyden kasvattaminen vaikuttaa enemmän laseranturiin 3 kuin laseranturiin 2. Laseranturin 2 tuloksissa esiintyy kuitenkin yksittäinen suurempi poikkeama myös lyhyemmällä mittausetäisyydellä.



KUVIO 27. Laseranturien 2 ja 3 etäisyyden mittaustulos lyhyemmällä ja pidemmällä mittausetäisyydellä

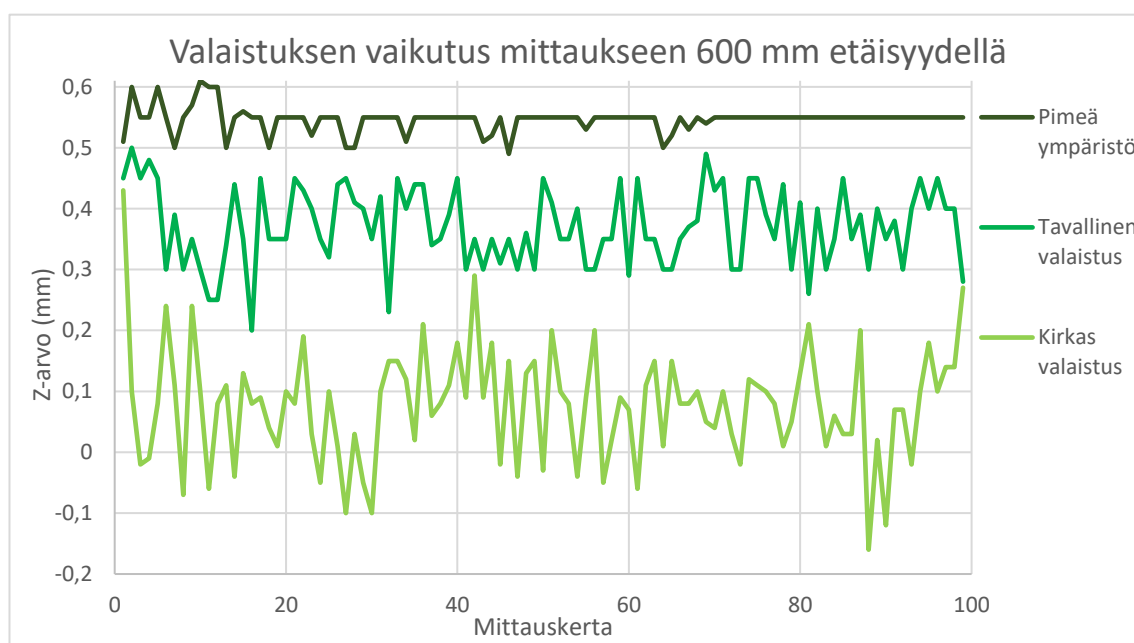
Kolmiomittausmenetelmällä mittausetäisyys vaikuttaa tiedettävästi tarkkuuteen. On kuitenkin mielenkiintoista, että laseranturit 2 ja 3 ovat tarkempia 400 mm etäisyydellä, vaikka 600 mm on niiden mittausalueen keskellä. Tulosten perusteella yli 600 mm etäisyydeltä voidaan tarvittaessa mitata. Jos robotti on mahdollista tuoda lähelle mitattavaa kohdetta, mittaustarkkuus on luultavasti parempi. Kaukaa mitattaessa mittaolosuhteiden täytyy olla paremmat kuin lähempää mitattuna. Mittausta häiritsevät olosuhteet korostuvat pidemmällä mittausetäisyydellä, ja yhdessä ne voivat tehdä mittauksesta liian epäluotettavan.

#### 7.4 Valaistuksen vaikutus

Ympäristön valaistuksella oli joissain tapauksissa vaikutusta mittaustuloksiin. 400 mm etäisyydellä vaikutukset olivat pieniä, eikä niillä käytännössä olisi merkitystä mittausten onnistumiseen. Kirkas valaistus ei vaikuttanut negatiivisesti laseranturin 1 mittaustuloksiin. Heijastavaa mittauspintaa mitattaessa kirkas valaistus jopa paransi mittauksen toistettavuutta. Laserantureilla 2 ja 3 kirkas valaistus lisäsi lähes kaikissa olosuhteissa hieman mittaustulosten kohinaa. Pimeässä mittaustilauksessa puolestaan kohina oli pienempää.

600 mm etäisyydellä valaistusolosuhteilla oli enemmän vaikutusta. Pidempi etäisyys itsessään aiheutti suuren muutoksen mittaustarkkuuteen, ja kirkas valaistus huononsi tilannetta entisestään. 600 mm etäisyydellä laseranturi 2 ei tunnistanut mitattavaa reikää ollenkaan, kun mittauspintaa osoitettiin valaisimella. Laseranturi 3 pystyi mittaamaan mustan mittauspinnan, mutta mittaustuloksessa oli suurempaa vaihtelua. Heijastavan mittauspinnan kanssa ilmeni molemmilla antureilla niin paljon häiriöitä, että mittausta ei voitu tehdä.

Kuviossa 28 on laseranturin 3 Z-arvon mittaustulokset 600 mm etäisyydellä mustalla mittauspinnalla tavallisessa valaistuksessa, kirkkaassa valaistuksessa ja pimentetyssä mittaussympäristössä. Kuviosta nähdään selkeästi, että kirkkaassa valaistuksessa mittaustulos vaihtelee enemmän kuin tavallisessa valaistuksessa. Vastaavasti ympäristön pimentäminen parantaa tarkkuutta.



KUVIO 28. Valaistuksen vaikutus laseranturin 3 etäisyysmittaukseen 600 mm mittausetäisyydellä

Lasermittalaite toimii tietyn taajuisella valolla, ja LED-valaisimen tuottama valkoinen valo sisältää kaikkia näkyvän valon taajuuksia. Oli siis oletettavissa, että valaistuksella olisi vaikutusta mittaustarkkuuteen. Lähtökohtaisesti kirkas valaistus huonontaa mittaustarkkuutta. Tämä on huomattu aiemminkin ja mittaussympäristöä on yritetty pimentää. Lyhyellä mittausetäisyydellä valaistuksella ei kuitenkaan

ole kovin suurta vaikutusta. Valaisin oli melko lähellä, noin 1,5 m päässä mitattavista pinnoista. Todellisuudessa olisi harvinaista, että esimerkiksi kattovalaisin olisi niin lähellä mitattavaa kohdetta. Jos työvalaisin on lähellä mitattavaa kohdetta, se kannattaa mahdollisuuksien mukaan sammuttaa tai siirtää.

## **7.5 Heijastusten vaikutus**

Heijastusten vaikutusta kokeiltiin usealla tavalla. Heijastavan mittauspinnan vaikutusta käsitellään kohdassa 7.7. Yksi tapa tutkia heijastusten vaikutusta oli asettaa alumiininen heijastava kappale noin 3 cm mitattavan reiän yläpuolelle. Tämä ei aiheuttanut huomattavia muutoksia mittaustuloksiin. Kyseinen tilanne on aiemmin aiheuttanut sen, ettei laseranturi tunnistanut mitattavaa reikää ollenkaan. Samaa vaikutusta ei kuitenkaan saatu toistettua. Tuolloin käytössä oli eri laseranturi, joka saattoi olla herkempi heijastuksille. Kun heijastuksen kanssa lisättiin kirkas valaistus, laseranturien 2 ja 3 Z-arvoissa ilmeni jonkin verran enemmän vaihtelua kuin pelkällä heijastuksella tai pelkällä valaistuksella.

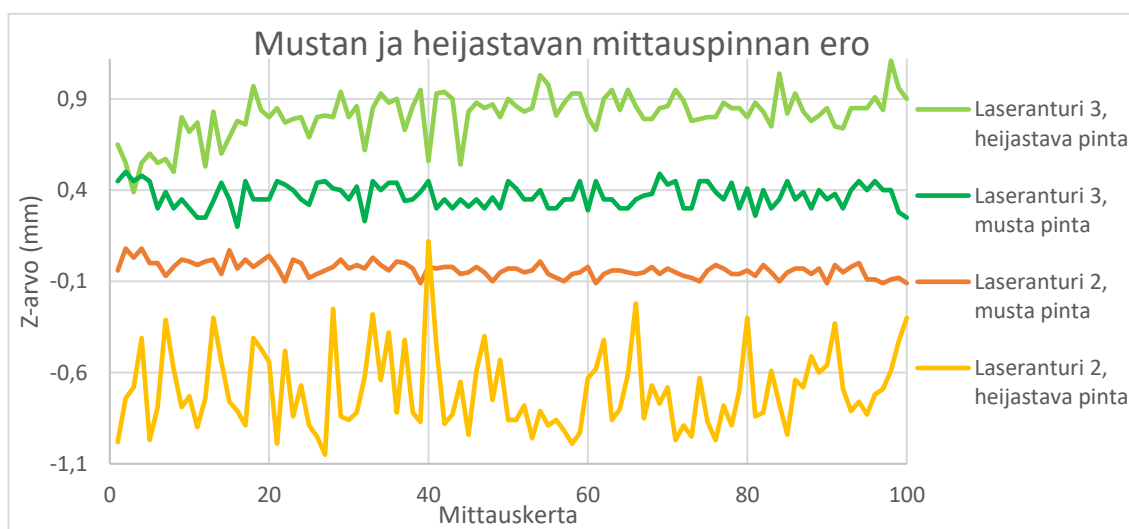
Toinen tapa tutkia heijastusten vaikutusta oli lisätä metallintyöstössä käytettävää leikkuunestettä mittauspintaan. Ensin leikkuunestettä oli liikaa, jolloin mikään anturi ei tunnistanut mittauspinnassa olevaa reikää. Suuri määrä heijastavaa likaa teki siis mittauksista mahdottoman. Pinnasta pyyhittiin paperilla kaikki leikkuuneste, mikä voitiin pyyhkiä pelkällä paperilla. Tällöin mittaukset onnistuivat, mutta Z-arvoissa oli tavallista suurempaa vaihtelua. Testin perusteella pinnassa oleva lika täytyy pyyhkiä rasvanpoistoaineen avulla, sillä pelkällä paperilla pyyhittäessä pintaan jää tasainen kerros rasvaa, joka tekee pinnasta kiiltävän.

## **7.6 Mittauspinnan vaikutus**

Mitattavan pinnan paksuudella ei ollut vaikutusta. 8 mm, 4 mm ja 1 mm paksuisten mustien pintojen tuloksissa ei ollut merkittäviä eroja. Jos lasersäde osuisi mitattavaan pintaan vinosti eikä kohtisuorasti, pinnan paksuudella voisi olla enemmän vaikutusta. Lasersäde voisi heijastua takaisin, jos se osuisi enemmän reiän sisäpintaan.

Mittauspinnan materiaalilla oli vaikutusta mittaustarkkuuteen. Reunantunnistukseen pinnan materiaali ei vaikuttanut, mutta etäisyysmittauksessa heijastavalla pinnalla ja mustalla pinnalla oli eroa. 400 mm etäisyydellä laseranturien 2 ja 3 tuloksissa ei juurikaan ollut eroja. Oletusasetuksilla heijastava mittauspinta aiheutti suurta vaihtelua laseranturin 1 etäisyysmittaukseen. Lasersäteen voimakkuutta täytyi rajata pienemmäksi, jolloin heijastavalla mittauspinnalla saatiin jopa hieman tarkempia mittauksia kuin mustalla pinnalla.

600 mm mittausetäisyydellä mittauspinnan materiaalilla oli vaikutusta myös laseranturien 2 ja 3 tuloksiin. Heijastavalla pinnalla molempien anturien etäisyysmittaus vaihteli huomattavasti enemmän kuin mustalla pinnalla. Kuviossa 29 on laseranturien 2 ja 3 etäisyysmittauksen tulokset mustalla mittauspinnalla ja heijastavalla mittauspinnalla 600 mm mittausetäisyydellä. Heijastava mittauspinta aiheutti molempien anturien mittaukseen häiriötä.



KUVIO 29. Mustan ja heijastavan mittauspinnan ero laseranturien 2 ja 3 etäisyysmittaukseen 600 mm mittausetäisyydellä

Tulosten perusteella heijastava mittauspinta aiheuttaa häiriötä silloin, kun muutkin mittaolosuhteet ovat huonot. Jos lasersäteen voimakkuutta voi vähentää, se voi parantaa mittausten luotettavuutta heijastavalla pinnalla. Jos mittauspinnan materiaaliin tai käsittelyyn voidaan vaikuttaa, kannattaa valita heijastamaton pinta. Testissä käytetty ruostumaton teräs ei kuitenkaan ollut liian heijastava lasermittaukseen, sillä hajaheijastumista oli tarpeeksi mittauksen onnistumiseen.

Puisen pinnan mittaamisessa ei ollut eroja metallisiin pintoihin. Tämä voi johtua siitä, että kaikki mittaukset tehtiin samasta paikasta. Puu ei siis materiaalina aiheuta ongelmia lasermittauksen. Puinen pinta on kuitenkin monesti epätasainen. Esimerkiksi puulavassa on yleensä lastuja. Jos laseranturi mittaa lavan juuri lastun kohdalta, mittaustulos voi erota useita millimetrejä lavan todellisesta pinnasta.

Muovista pintaa mitattaessa laseranturi 1 ei ensin onnistunut mittaamaan etäisyyttä pinnasta. Kohdassa, johon laseranturin 1 lasersäde osui, näkyi selvästi suuri kirkas ympyrä. Vähentämällä laseranturin 1 lasersäteen voimakkuutta mitaus onnistui. Mittaustulokset olivat hyvin samanlaisia kuin muillakin pinnoilla.

## **7.7 Taustan vaikutus**

Taustamateriaalilla ei ollut merkittävää vaikutusta mittauksissa. Tämä voi johtua siitä, että mitattava reikä oli vain 10 mm korkea. Taustasta heijastunut säteily ei osunut anturin valokennolle, vaan mitattavan pinnan takapuolelle. Lasinen tausta oli selvästi heijastavin, sillä siitä heijastui selvästi näkyvä lasersäteen piste mitattavien levyjen takapuolelle.

Koska taustan vaikutusta ei voitu kunnolla todeta varsinaisissa mittauksissa, testattiin sitä toisella tavalla. Taustalevyt asetettiin noin 850 mm päähän laserantureista ilman mittauspintaa. 850 mm on laseranturin 1 mitta-alueen ulkopuolella, ja laseranturit 2 ja 3 oli asetettu tunnistamaan pinta vain 350 – 450 mm etäisyydeltä. Lasisella taustalla saatiin jokainen anturi tunnistamaan tausta, vaikka se oli reilusti tunnistusetäisyyden ulkopuolella. Vaaleanharmaalla taustalla ei onnistuttu aiheuttamaan virheellistä tunnistusta, vaikka vastaava tilanne on aiheuttanut ongelmia oikeissa mittauksissa.

## **7.8 Laseranturien väliset erot**

Mittauksissa käytettyjen laseranturien välillä oli joitakin eroja, jotka toistuivat lähes kaikissa mittauksissa. Reunantunnistuksessa eli X- ja Y-arvojen mittauksessa eroja ei juurikaan ollut tunnistusnopeuden lisäksi. Etäisyysmittauksessa eli

Z-arvon mittauksessa oli enemmän anturikohtaisia eroja. Monissa mittausolosuhteissa anturien väliset erot olivat kuitenkin niin pieniä, että jokaisen anturin tulokset olisivat tarpeeksi tarkkoja käytettäväksi.

Laseranturin 1 Z-arvoissa oli lähes poikkeuksetta suurinta vaihtelua mittauskerrojen välillä. Ero voi johtua siitä, että laseranturin 1 mittausetäisyys on lyhyempi, jolloin käytetty etäisyys on sille suhteessa kauempana kuin muille antureille. Yleensä vaihtelu ei ollut haitallisen suurta. Se kuitenkin osoittaa sen, että yleisesti käytetyllä etäisyydellä laseranturi 1 on muita epävakampi. Kirkas valaistus ja heijastukset eivät yleensä vaikuttaneet negatiivisesti laseranturiin 1, toisin kuin muihin antureihin. Heijastavalla mittauspinnalla valot jopa paransivat tarkkuutta. Laseranturissa 1 on enemmän asetuksia kuin muissa antureissa. Esimerkiksi lasersäteen voimakkuutta voidaan säätää, jolloin sillä voidaan mitata luotattavammin myös heijastavampaa mittauspintaa.

Laseranturilla 2 oli vaikeuksia tunnistaa mittauspinnassa oleva reikä. Valokenno voi olla herkempi kuin muissa antureissa. Lasersäde voi myös levitä enemmän, jolloin tarpeeksi säteilyä osuu mittauspintaan ja heijastuu valokennolle. Laseranturin 2 reunantunnistusta täytyi muuttaa niin, että anturi lähettää lyhyen signaalin, kun se huomaa mittausetäisyydessä tarpeeksi suuren eron. Tästä huolimatta reunantunnistuksessa ilmeni satunnaisia ongelmia. Lähes jokaisessa mittaussarjassa oli ainakin yksi mittaus, joka erosi noin 1 – 3 mm muista. Myös Z-arvojen tuloksissa ilmeni välillä yksittäisiä poikkeamia. Valtaosa mittauksista oli todella tarkkoja, mutta yksittäisten poikkeamien takia laseranturi 2 oli epäluotettavin.

Laseranturi 3 oli monissa mittauksissa luotettavin. Z-arvon maksimipoikkeama keskiarvosta mittaussarjan aikana oli monesti alle 0,05 mm. Yön yli tehdyissä mittauksissa ei ollut yhtä suurta muutosta kuin muilla antureilla. Kirkas valaistus vaikutti kuitenkin enemmän laseranturiin 3 kuin muihin antureihin. Pidempi mittausetäisyys vaikutti laseranturiin 3 enemmän kuin laseranturiin 2, mutta laseranturin 3 tuloksissa ei ollut yksittäisiä suurempia poikkeamia. Laseranturin 3 lasersäteen halkaisija on selvästi pienempi kuin muilla antureilla. Lasersäde on mahdollisesti kohdistettu paremmin kohteeseen, eikä se leviä ympärilleen yhtä paljon.

## 8 POHDINTA

Opinnäytetyön ensisijainen tavoite oli selvittää mittausolosuhteiden vaikutus lasermittaukseen. Useimpien tekijöiden, kuten mittausetäisyyden, valaistuksen, heijastusten ja mittauspinnan materiaalin, todettiin selkeästi vaikuttavan mittaus-tarkkuuteen toistuvasti. Yksittäin mittausolosuhteiden vaikutus oli kuitenkin oletettua pienempi. Käytännössä kaikissa mittausolosuhteissa saatiin tarpeeksi tarkkoja mittaustuloksia, ja merkittäviä vaikutuksia saatiin vasta yhdistämällä useampia olosuhteita. Todellisissa mittaustilanteissa olosuhteet ovat todennäköisesti lievempiä, mutta niitä voi olla useita samanaikaisesti.

Toisena tavoitteena oli löytää ratkaisuja ongelmia aiheuttaviin olosuhteisiin. Laseranturien asetuksien muuttamisella ei lähtökohtaisesti ollut vaikutusta. Laserantureissa 2 ja 3 oli myös melko vähän muutettavia asetuksia. Yleensä ainoa ratkaisu oli poistaa ongelmia aiheuttavat tekijät, joka ei välttämättä ole aina mahdollista. Mittauksista kävi kuitenkin ilmi, että yleensä yksittäinen mittausta haittaava tekijä ei aiheuta liian suurta mittausvirhettä. Jos mittausolosuhteet ovat muuten hyvät, ei jokaista haittaavaa tekijää välttämättä tarvitse poistaa. Etenkin lyhyemmällä mittausetäisyydellä laseranturien 2 ja 3 mittaus-tarkkuus oli hyvä myös huonommissa olosuhteissa.

Yksi tavoite oli myös selvittää, voidaanko samaa laseranturia käyttää lyhyempien ja pidempien matkojen mittaamiseen. Oletus oli, että mittausalueen keskellä oleva 600 mm olisi optimaalinen mittausetäisyys laserantureille 2 ja 3. 400 mm etäisyydellä oli tarkoitus kokeilla, ovatko pidemmän matkan anturit tarpeeksi tarkkoja myös lyhyemmällä etäisyydellä. Tuloksista kävi selkeästi ilmi, että mittaus-tarkkuus on paljon parempi 400 mm etäisyydellä. Lisäksi 400 mm etäisyydellä laseranturien 2 ja 3 mittaus-tarkkuus oli parempi kuin laseranturilla 1. Pidemmän matkan anturit soveltuvat siis hyvin myös lyhyemmälle mittausetäisyydelle.

Jotkin mittaustulokset olivat erityisen mielenkiintoisia. Valaistuksen vaikutus laseranturiin 1 heijastavalla pinnalla oli päinvastainen kuin muihin antureihin. Mittaustulos parani, kun valaistusta lisättiin. Vastaavasti mittaustulos oli epävaakaampi, kun mittausympäristö pimennettiin. Myös mittausetäisyyden vaikutus oli

yllättävä. 400 mm ja 600 mm etäisyydellä oli yllättävän suuri ero laseranturien 2 ja 3 mittaustarkkuuteen. Myös se, että lyhyemmällä etäisyydellä mittaus oli tarkempi, oli yllättävää, sillä 600 mm on anturien mittausalueen keskellä. Anturien lämpenemisestä johtuva mittausvirhe oli myös mielenkiintoinen. Todellisuudessa käytetään vain yhtä anturia, joten anturi lämpenee nopeammin kuin testimittauksissa. Anturi kannattaa ehdottomasti käynnistää hyvissä ajoin ennen mittauksia.

Mittausolosuhteita oli useita, joten mittauksiin meni luonnollisesti paljon aikaa. Pian mittausten aloittamisen jälkeen huomattiin, että olosuhteita täytyy yhdistellä suunniteltua enemmän. Onneksi mittauksia saatiin nopeutettua hieman optimoimalla mittaushjelmia, jolloin suunnitellussa aikataulussa pysyttiin melko hyvin. Taustamateriaalin vaikutusta ei pystytty kokeilemaan suunnitellulla tavalla, joten sekin toi työhön lisää tekemistä. Mittauksiin olisi voinut käyttää vieläkin enemmän aikaa, mutta oleelliset tulokset saatiin varmasti selvitettyä. Mittaukset itsessään eivät vie paljoa aktiivista työaikaa, joten halutessa voidaan käyttää jatkosakin samaa mittausympäristöä yksityiskohtaisempien olosuhteiden tutkimiseen. Ympäristössä voidaan myös testata uusia laserantureita tai mittausmenetelmiä.

Opinnäytetyön tarkoitus oli kehittää ja vakioda Fastems Oy:n robottisolujen automaattista mittausta. Työ oli onnistunut, sillä mittauksissa todettiin selvästi tiettyjen tekijöiden haittaavan lasermittausta. Myös laseranturien välisiä eroja löydettiin. Ongelmiin ei kuitenkaan yleensä löydetty ratkaisuja anturien asetuksista. Työssä kävi myös ilmi se, että pidemmän mittausetäisyyden laserantureita voidaan hyvin käyttää myös lyhyemmällä etäisyyksillä. Tämä mahdollistaa sen, että kaikissa robottisoluissa voidaan käyttää samaa laseranturia.

Tulosten perusteella laseranturi 3 on luotettavin, kun otetaan huomioon kaikki mittaolosuhteet. Yksittäisiä suuria poikkeamia ei juurikaan ollut, joka tekee anturista luotettavan. Laseranturilla 3 voidaan myös käyttää digitaalista EtherCAT-kenttäväylää, jolloin mittaustuloksessa ei ole sähköisiä häiriöitä. Laseranturin kytkeminenkin on helppoa kenttäväylän ansiosta. Kyseiselle anturille on myös varmasti saatavilla tukea maahantuojalta ja valmistajalta. Laseranturi 3 on hieman kalliimpi kuin muut testatut anturit. Hinnasta huolimatta testin perusteella voidaan suositella, että laseranturi 3 otettaisiin käyttöön kaikkiin mittausta vaativiin robottisoluihin. Jos anturi tulee käyttöön, sille tehdään selkeät käyttöohjeet.

## LÄHTEET

Acuity. n.d. Laser Triangulation Sensors. Luettu 24.2.2021

<https://www.acuitylaser.com/sensor-resources/laser-triangulation-sensors/>

Al-Azzawi, A. 2006. Light and Optics. Principles and Practices. 1. painos. Boca Raton: CRC Press.

Alternative Physics. n.d. Diffraction of Light. Luettu 11.3.2021.

<http://www.alternativephysics.org/book/Diffraction.htm>

Bohren, C. & Huffman, D. 2004. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Weinheim: Wiley-VCH.

Chapman, M. 2013. Environmental compensation of linear laser interferometer readings. New Mills: Renishaw plc. Luettu 22.3.2021.

<https://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-environmental-compensation-of-linear-laser-interferometer-readings--94445>

Craig, J. 2005. Introduction to Robotics. Mechanics and Control. 3. painos. Upper Saddle River: Pearson Education Inc.

Donges, A. & Noll, R. 2015. Laser Measurement Technology. Fundamentals and Applications. Berlin Heidelberg: Springer.

FANUC. LR Mate 200iD. Luettu 19.4.2021.

<https://www.fanuc.eu/hu/en/robots/robot-filter-page/lrmate-series/lrmate-200-id>

Hariharan, P. 2007. Basics of Interferometry. 2. painos. New York: Academic Press.

Hintikka, M. 2019. Integrated CMOS receiver techniques for sub-ns based pulsed time-of-flight laser range finding. Oulun yliopiston tutkijakoulu. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, Sähkötekniikka. Oulun yliopisto. Väitöskirja.

Karpalos, B., Jenkin, M. & Milios, E. 2005. Acoustical diffraction modeling utilizing the Huygens-Fresnel principle. Ottawa: IEEE. Luettu 11.3.2021.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/1545649>

Keyence. 2008. Laser Displacement Sensor Technology Book, Innovative Measurement Accuracy and Stability. Luettu 23.2.2021.

[https://www.controldesign.com/assets/10WPpdf/100208\\_Keyence\\_LaserSensor.pdf](https://www.controldesign.com/assets/10WPpdf/100208_Keyence_LaserSensor.pdf)

Kilpelä, A. 2004. Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications. Teknillinen tiedekunta, Sähkö- ja tietotekniikan osasto. Oulun yliopisto. Väitöskirja.

Mini Physics. 2016. The Electromagnetic Spectrum. Päivitetty 22.5.2016. Luettu 11.3.2021.

[https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum\\_25.html](https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html)

Mitofsky, A. 2018. Direct Energy Conversion. A.T. Still University

NASA. n.d. Laser Linear Frequency Modulation System. Luettu 19.2.2021.  
<https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-95>

OMRON. 2014. Contact-type Smart Sensor. E9NC-T. Luettu 4.3.2021.  
[https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v4/e434\\_e9nc-t\\_datasheet\\_en.pdf](https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v4/e434_e9nc-t_datasheet_en.pdf)

OMRON. 2017. Displacement Sensor Technical Guide (The Basics). Luettu 23.2.2021.  
[https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/q257\\_displacement\\_sensor\\_technical\\_manual\\_en.pdf](https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/q257_displacement_sensor_technical_manual_en.pdf)

Pedrotti, F. & Pedrotti, L. 1993. Introduction to Optics. 2. painos. Englewood Cliffs: Prentice-Hall

Pedrotti, F., Pedrotti, L. & Pedrotti, L. 2018. Introduction to Optics. 3. painos. Cambridge: Cambridge University Press.

Physics and Radio-Electronics. Depletion region. Luettu 23.2.2021.  
<https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/depletion-region.html>

Renishaw. n.d. Interferometry explained. Luettu 23.3.2021.  
<https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>

Riftek. 2020. Product Catalog 2020. Luettu 26.2.2021.  
[https://riftek.com/upload/medialibrary/f99/RIFTEK\\_Catalog\\_ENG\\_site\\_21\\_09\\_2020.pdf](https://riftek.com/upload/medialibrary/f99/RIFTEK_Catalog_ENG_site_21_09_2020.pdf)

Saleh, B. & Teich, M. 1991. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley & Sons.

SICK. 2018. Distance Sensors. Precision for Measuring Tasks. Luettu 23.2.2021.  
[https://cdn.sick.com/media/docs/3/93/393/product\\_segment\\_overview\\_distance\\_sensors\\_precision\\_for\\_measuring\\_tasks\\_en\\_im0061393.pdf](https://cdn.sick.com/media/docs/3/93/393/product_segment_overview_distance_sensors_precision_for_measuring_tasks_en_im0061393.pdf)

Siegman, A. 1986. Lasers. 1. painos. Sausalito: University Science Books.

Silfvast, W. 2004. Laser Fundamentals. 2. painos. Cambridge: Cambridge University Press.

Wavelength Electronics. 2020. Photodiode Basics: Selection & Operation. Luettu 23.2.2021.  
<https://www.teamwavelength.com/photodiode-basics/>

Wilson, M. 2015. Implementation of Robot Systems. An Introduction to robotics, automation, and successful systems integration in manufacturing. Lontoo: Butterworth-Heinemann Inc.