



**3D-LASERLEIKKAUS**

**3D LASER CUTTING**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

Tatu Kemppainen

Tarkastaja(t): TkT Anna Unt

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Tatu Kemppainen

### **3D-laserleikkaus**

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

36 sivua, 9 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja(t): TkT Anna Unt

Avainsanat: 3D, laserleikkaus, teollisuusrobotti

Laserleikkaus on tuotantoteollisuudessa termineminen työstömenetelmä. 3D-laserleikkaus on yksi laserleikkauksen erikoismenetelmä, mutta tämän menetelmän täyttä potentiaalia ei olla vielä pystytty täysin hyödyntämään. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on määrittää 3D-leikkausprosessi käsitteenä ja kartoittaa siihen vaadittavaa laitteisto, ohjelmisto ja sovelluskohteet. Työssä selvitetään yleisellä tasolla laserin toimintaperiaate leikkaavassa työstössä.

Työ on kvalitatiivinen tutkimus, joka toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Tietokantoina käytetään soveltuvaa kirjallisuutta, verkkolähteitä, tieteellisiä artikkeleita ja julkaisuja. Lähteiden luotettavuus tiedonhaun aikana todetaan luotettavuustarkastelulla.

3D-laserleikkaus on tehokas työkalu tuotantoteollisuuden tarpeisiin, mahdollistaen monimutkaisten profiilien tarkan ja nopean leikkaamisen. Laserteknologia kehittyminen ja laitevalmistajien panostukset käyttäjäystävällisempään kokemuksen luomiseksi ovat lisänneet 3D-leikkauksen käyttöä. Tulevaisuudessa menetelmä tulee yleistymään edelleen.

## ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Tatu Kemppainen

### **3D laser cutting**

Bachelor's thesis

2023

36 pages, 9 figures and 2 tables

Examiner(s): D.Sc. Anna Unt

Keywords: 3D, laser cutting, industrial robot

Laser cutting has been utilized in the production industry for a long time, however one of its subcategories, 3D laser cutting, has not been utilized to its full potential. This bachelor's thesis aims to define the 3D cutting process as a concept and showcase the process's hardware and software requirements. The overview of applications of 3D laser cutting is provided.

This thesis is a qualitative study carried out as a literature review. Applicable literature, online sources, scientific articles, and publications are used to gather information regarding the subject of the study. The reliability of the sources is verified through a reliability review.

3D laser cutting is an effective tool in manufacturing, enabling accurate and fast cutting of complex and three-dimensional profiles. The development in laser technology and the efforts of manufacturers have increased the use of 3D laser cutting technology in production. In the future, the utilization of this technology will continue to grow.

## SYMBOLI- JA LYHENNYSLUETTELO

CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided Design)
CAM	Tietokoneavusteinen valmistus (Computer-aided manufacturing)
CFRP	Hiilikuituvahvisteinen muovi (Carbon fibre reinforced polymer)
CNC	Tietokoneistettu numeerinen ohjaus (Computerized Numerical Control)
HAZ	Lämmön tuonnin aikaansaama muutosvyöhyke (The heat affected zone)
I 4.0	Teollisuus 4.0 (Industry 4.0)
LASER	Valon vahvistaminen säteilyn stimuloitulla emissiolla (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
LASOX	Laser avusteinen happileikkaus (Laser-assisted Oxygen Cutting)
MOPA	(Master Oscillator Power Amplifier)
OLP	Offline-ohjelmointi (Off-line programming)
PLM	Tuotteen elinkaaren hallinta (Product Lifecycle Management)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto.....	6
1.1    Tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	6
1.2    Menetelmät, rakenne ja rajaukset.....	7
2 Teoria .....	8
2.1    Laser .....	8
2.2    Laservalo leikkaavassa työstössä .....	9
3 Laserleikkaus .....	12
3.1    Lasertyytit.....	12
3.1.1    CO <sub>2</sub> -laser .....	12
3.1.2    Kuitulaser .....	13
3.2    Leikkausprosessit .....	14
3.2.1    Lasertyypileikkaus .....	15
3.2.2    Laserhappileikkaus .....	15
3.2.3    Sublimaatioleikkaus .....	16
3.3    Tasoleikkaus .....	16
4 3D-leikkaus .....	17
4.1    Leikkuslaitteisto.....	17
4.1.1    3D-leikkusasemat .....	17
4.1.2    3D-leikkausrobotit.....	20
4.2    3D-leikkuspää .....	22
4.3    Leikkauksen ohjelmointi .....	24
4.3.1    Online-ohjelmointi .....	24
4.3.2    Offline-ohjelmointi.....	25
5 3D-laserleikkauksen sovellukset .....	29
6 Johtopäätökset ja yhteenveto.....	32
Lähteet .....	33

# 1 Johdanto

Lasertyöstö on pitkään teollisuudessa käytössä ollut menetelmä, joka on kehittynyt huimaa vauhtia. Perinteisen laserleikkauksen erikoismenetelmän, 3D-laserleikkauksen yleistyessä avautuu teollisuuden aloille monia uusia mahdollisuuksia. Tekniikan kehittyessä leikkauksenopeudet, lasertehot ja sääteenlaatu ovat parantuneet sekä laitteistojen hinnat laskeneet. Arviolta 90 % - 95 % laserleikkauksesta tapahtuu edelleen perinteisellä numeerisesti ohjatulla CNC-laitteistolla, jolla harvoin hyödynnetään sen 3D-leikkausmahdollisuuksia. Tämänhetkinen teollinen vallankumous Industry 4.0 tukee valmistusteollisuuden sovelluksia, kuten laserleikkauksen integrointia älykkäillä teknologioilla. (Gyasi, Antila, Owusu-Ansah, Kah & Salminen, 2022.)

Laserleikkausprosessi vaatii nopeutta, tarkkuutta ja vakautta, jotta siitä saadaan haluttu hyöty. Nykyisellä CNC-laitteistolla pystytään työstämään suuria kappaleita, mutta kappaleiden profiili on tyypillisesti levy. Robotteja käytettäessä saadaan lisättyä käytettävissä olevia vapausasteita, jolloin voidaan työstää hyvin monimutkaisia profiileja. Robottien suurin ongelma on ollut se, että niillä ei ole saavutettu samaa tarkkuutta, kuin vastaavalla CNC-laitteistolla. Syynä voidaan pitää, että teollisuusrobotteja ei ole alun perin suunniteltu äärimmäistä tarkkuutta vaativiin tehtäviin. Perinteiset teollisuusrobotit eivät ole tarpeeksi jäykkiä, jotta haluttu tarkkuus saavutettaisiin halutuilla nopeuksilla. (Gyasi, et al., 2022.)

## 1.1 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan 3D-laserleikkausta ja sen sovelluksia teollisuudessa. Työssä tutkitaan myös laserleikkauksen mahdollisuuksia sekä rajoituksia kolmiulotteisten profiilien työstössä, mitä vaaditaan onnistuneelta leikkaukselta sekä esitetään laitteisto- ja ylläpitokustannuksia. Työtä voidaan hyödyntää vaihtoehtoisten 3D-leikkausmenetelmien vertailuun ja saadaan koottua tietoa laserin käytön mahdollisuuksista tuotannossa.

Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miksi laseria hyödynnetään 3D-leikkauksessa?
- Miten 3D-laserleikkausta sovelletaan teollisuudessa?
- Mitä vaaditaan onnistuneelta leikkaukselta?

## 1.2 Menetelmät, rakenne ja rajaukset

Työ on kvalitatiivinen tutkimus, joka toteutetaan aiheesta löytyvän kirjallisuuden, verkkolähteiden, tieteellisten artikkelien ja tutkimusten avulla. Työ koostuu kuudesta luvusta. Ensimmäisessä luku on johdanto. Toisessa luvussa käsitellään yleistä teoriaa laserista ja miten sitä hyödynnetään leikkaavassa työstössä. Kolmas luku käy läpi yleisimmät käytössä olevat lasertyypit ja leikkausmenetelmät. Neljäs luku käsittelee 3D-laserleikkausta, siihen vaadittua laitteistoa ja leikkauksen ohjelmointia. Viidennessä luvussa tarkastellaan 3D-laserleikkauksen yleisimpiä sovelluskohteita. Kuudennessa luvussa esitellään johtopäätökset ja yhteenveto.

Aihe on rajattu laserleikkaukseen ja sen erikoismenetelmään 3D-laserleikkaukseen. Käsiteltävät lasertyypit on rajattu CO<sub>2</sub>-laseriin ja kuitulaseriin. Aineisto on rajattu tämänhetkiseen sekä teollisuudessa jo käytössä olevaan 3D-laserleikkauslaitteistoon. Työssä pyritään käyttämään mahdollisimman uutta aineistoa, mutta aiheen erityislaatuisen vuoksi aineiston ajanjakso ei ole rajattu.

## 2 Teoria

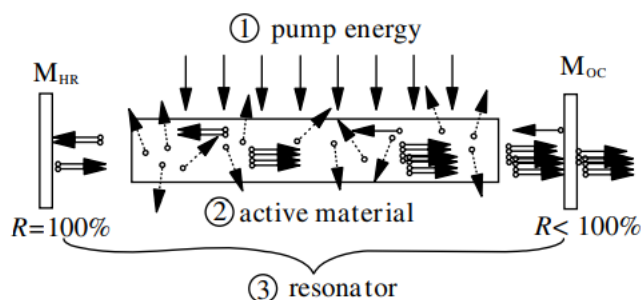
Tässä luvussa esitellään työn tutkimusaiheeseen liittyvää teoriaa. Käydään läpi mikä on laser ja sen toimintaperiaate. Lopuksi esitellään, miten leikkaavassa työstössä hyödynnetään laservalon ainutlaatuisia ominaisuuksia. Kappaleen tarkoitus on pohjustaa kandidaatintyön tutkimusta, niin että lukija ymmärtää tulevien lukujen asiayhteyden.

### 2.1 Laser

Laser on valonlähde, joka saa nimensä kirjainlyhenteestä Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Suomennettuna kirjanlyhenne tarkoittaa valon vahvistamista stimuloitulla emissiolla. Laser perustuu Albert Einsteinin vuonna 1916 kehittämään säteilyn kvanttiteoriaan. Ensimmäinen toimiva laserin rakensi vuonna 1960 Theodore H. Maiman. Laserin tuottama valo on koherenttia ja monokromaattista, jonka ansiosta laserit ovat tärkeimpiä laitteita fotonikan sovelluksissa. Luonnossa ei ole havaittavissa valoa, jolla olisi näitä ominaisuuksia. (Menzel, 2007.)

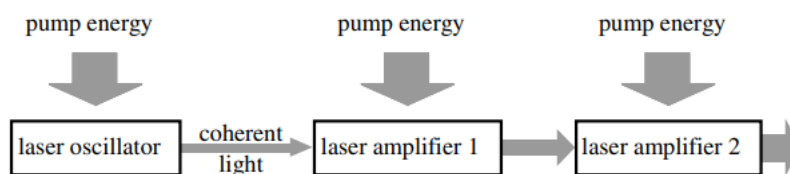
Lasereiden toiminta perustuu valon stimuloituun emissioon väliaineessa, jonka molekyyliä tai atomeja viritetään korkeammalle energiatasolle tuomalla siihen ulkoista energiaa. Molekyylin tai atomin palatessa normaalille energiatasolle se luovuttaa fotonin, eli valohiukkasen. Stimuloitu emissio tapahtuu laseroskillaattorissa, joka on laservalon päälähde. Oskillaattori yksinkertaisuudessaan muodostuu ulkoisesta energian lähteestä, väliaineesta ja resonaattorista. Oskillaattorin rakenne on nähtävissä kuvasta 1.





Kuva 1. Oskillaattorin rakenne. (Menzel, 2007.)

Laserin tuottamaa valoa voidaan lisäksi vahvistaa stimuloidulla emissiolla laservalon vahvistimessa. Vahvistimia voidaan kytkeä sarjaan oskillaattoreiden kanssa, muodostaen MOPA-järjestelmän. Kuvassa 2. nähdään esimerkki oskillaattorista ja kahdesta vahvistimesta. Vahvistimien ja/tai muiden konverttereiden avulla laservalon parametrejä, kuten aallonpituutta, pulssin kestoa ja polarisaatiota. (Menzel, 2007.)



Kuva 2. Pää-oskillaattorista ja kahdesta vahvistimesta muodostuva MOPA-järjestelmä. (Menzel, 2007.)

## 2.2 Laservalo leikkaavassa työstössä

Laserleikkaus hyödyntää koherentin ja monokromaattisen valon ominaisuuksia, jotka mahdollistavat säteen hyvän fokusoinnin. Lasersäde on myös kollimoitu, eli valon säteet ovat yhdensuuntaiset. Kollimoitu lasersäde ohjataan työstöoptiikalle, joka on yksinkertaisimmillaan fokuoiva linssi. Linssi fokuoii lasersäteen polttopisteeksi, joka asetetaan soveltuvaan asemaan työkappaleen pintaan nähden. Polttopisteen tehotiheyden ollessa riittävän suuri, kappale sulaa tai höyrystyy, muodostaen laserleikkausprosessissa

leikkausrailon. Fokusoitua sädettä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi laserhitsaukseen ja laserpintakäsittelyyn. Tehotiheys on suoraan verrannollinen laserin tehoon ja kääntäen verrannollinen polttopisteen kokoon. Leikkauksen yhteydessä voidaan käyttää erilaisia prosesseja leikkauksen tehostamiseksi, työstettävän materiaalin ominaisuuksien mukaan. (Caristan, 2004.) Näitä prosesseja käydään läpi tarkemmin luvussa 3.2 ja sen alaluvuissa.

Laserin edut leikkaavassa työstössä voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan, jotka ovat leikkauslaadulliset ominaisuudet ja prosessin ominaisuudet. Steen ja Mazumder (2010) ovat jakaneet kategoriat seuraavasti.

Leikkauslaadulliset ominaisuudet:

- Voidaan saavuttaa erittäin kapea leikkausrailo, joka mahdollistaa huomattavan säästön materiaalissa.
- Leikkauksessa ei tapahdu kulmien pyöristymistä, joka on tyypillistä muille termisille leikkausprosesseille. Kulmat suorakulmia.
- Saavutettava leikkajälki on tasainen ja puhdas. Kappaleita pystytään esimerkiksi hitsaamaan ilman jälkikäsittelyä.
- Leikkauspurseita ei muodostu.
- HAZ, eli leikkauksen lämpövaikutusvyöhyke on erittäin kapea, joten kappaleessa ei tapahdu muodonmuutoksia tai ne ovat merkityksettömät.

Prosessin ominaisuudet:

- Erittäin suuri leikkausnopeus.
- Työstöpäässä ei ole kuluvia osia. Fokusintilinssi tulee pitää puhtaana.
- Leikkaus voidaan tehdä missä suunnassa ja asennossa tahansa.
- Prosessi on helposti automatisoitavissa.

- Leikkauspäätä ei pääasiallisesti tarvitse vaihtaa. Muutokset tehdään ohjelmoinnin avulla, joten prosessi on erittäin joustava.
- Materiaaleja voidaan leikata useita kerrallaan kerroksissa, mutta kappaleet voivat hitsautua yhteen.
- Laserilla pystytään leikkaamaan lähes mitä vaan materiaalia. Ainoastaan materiaalit, jotka heijastavat valoa erittäin hyvin tuottavat ongelmia.

## 3 Laserleikkaus

Laserleikkaus on nykyään yleisin lasertyöstösovellus teollisuudessa. Laserin suosio pohjautuu sen tehokkuuteen, tarkkuuteen ja pieneen lämmöntuontiin. Sillä pystytään usein leikkaamaan huomattavasti nopeammin ja tarkemmin, kuin perinteisillä leikkausmenetelmillä (Steen, 2010, 131.) Tässä kappaleessa käydään tarkemmin läpi yleisimmät laserleikkaustyypit, eri laserleikkausprosessit ja laserleikkauksen sovelluksia.

### 3.1 Lasertyypit

Työ on rajattu käsittelemään vain CO<sub>2</sub>- ja kuitulaseria, koska ne ovat leikkaavassa lasertyöstössä yleisimmin hyödynnetyt lasertyypit.

#### 3.1.1 CO<sub>2</sub>-laser

CO<sub>2</sub>-laserissa resonaattorin väliaineena toimii kaasuseos, joka koostuu hiilidioksidista, tyyppistä ja heliumista. Nykyään kaasut ovat seostettu yleensä suhteessa 0.8:1:7 (Steen, et al., 2010). Hiilidioksidi toimii laseroivana väliaineena ja typpi sekä helium avustavina kaasuina. Typpi auttaa virittämään hiilidioksidimolekyylejä luovuttamalla niille energiaa molekyylien törmätessä. Helium auttaa hiilidioksidimolekyylejä palautumaan normaalille energiatasolle. Hiilidioksidin on palattava normaalille energiatasolle, sillä typpi ei voi virittää uudelleen osittain virittyntä molekyyliä. Prosessi onnistuu ilman heliumia, mutta se olisi varsin tehoton. Koska helium vastaanottaa ylimääräisen energian hiilidioksidilta, se alkaa lämmetä ja pitää jäähtyttää. (Powell, 1998.) Lasersäde johdetaan fokusointioptiikalle peileillä. CO<sub>2</sub>-laserin toimintaperiaatteella on useita variaatioita, joita ei tässä työssä tarkastella.

CO<sub>2</sub>-laser on jo vanha teknologia, joka on jäämässä uusien kuitulasereiden jälkeen kehityksessä. Se on kuitenkin edelleen yleisin materiaalityöstössä käytetty lasertyyppi. CO<sub>2</sub>-laser on halpa ja sillä voidaan työstää metallien lisäksi monia muita materiaaleja, kuten

muovia, puuta, kangasta ja muita orgaanisia materiaaleja. Se sopii erityisesti paksuille kappaleille. CO<sub>2</sub>-laserin käyttökustannukset huomattavan korkeat, koska ne eivät ole energiatehokkaita. Koska CO<sub>2</sub>-laser hyödyntää säteen siirrossa peilejä, vaatii laitteiston ylläpitäminen huomattavan määrän huoltoa.

### 3.1.2 Kuitulaser

Kuitulaserissa laservalo synnytetään suoraan optisen kuidun sisälle. Kuituun pumpataan valoa laserdiodilla. Valon säteet johdetaan fokuointi optiikan kautta optiseen kuituun, jonka ydin on tehty laseroivasta väliaineesta. Laseroivasta väliaineesta valmistettu ydin toimii resonaattorina. Oskillaattorina, eli laser valon lähteenä toimii optinen kuitu kokonaisuudessaan. Useamman laserdiodin tapauksessa valon säteet kootaan yhteen optiseen kuituun, ennen resonaattorikuitua. Kuitulaserin etu on se, että säteet lävistävät väliaineen kuidussa useita kertoja kulkiessaan kuidun läpi. Tämä mahdollistaa ytimen tekemisen pieneksi, jolloin saavutetaan erittäin hyvä säteenlaatu. Kuitulaserissa hyödynnetään optista kuitua lasersäteen kuljettamisessa työstettävälle kappaleelle. Yhtä pumpuna toimivan laserdiodin, fokuointi optiikan ja resonaattorin kokonaisuutta kutsutaan lasermoduuliksi. Modulaarisuutta hyödynnetään yhdistämällä lasersäteitä yhdeksi tehokkaammaksi säteeksi. (Kujanpää, Salminen & Vihinen, 2005.)

Nykyiset kuitulaserit ovat käyttökelpoisimpia lasereita, kun huomioidaan leikattavissa olevat materiaalit, leikkausnopeus ja leikkauksen laatu. Kuitulaserin etu pohjautuu sen kiinteään kuidussa olevaan väliaineeseen, joka mahdollistaa laitteistolle kompaktin ja huoltovapaan kokoonpanon. Kuitulaserin erinomaisen säteen laadun ansiosta 2 kW kuitulaserilla saavutetaan viisinertainen tehotiheys verrattuna 4 kW CO<sub>2</sub>-laseriin. Kuitulaserin leikkausnopeus on huomattavasti suurempi sekä käyttökustannukset alhaisemmat, kuin CO<sub>2</sub>-laserilla. Kuitulaserilla saavutettavat leikkausnopeudet ovat jopa viisi kertaa suuremmat teräksiä leikattaessa, leikattavan kappaleen paksuuden ollessa 6 mm. Suurin hyöty kuidun leikkausnopeudesta saadaan leikkauspaksuuden ollessa 8 mm tai alle ja käytössä on leikkausta avustava kaasu kuten typpi. (Zgripcea, Putan, Ardelean, & Birtok Baneasa, 2021.)

Taulukko 1. CO<sub>2</sub>- ja kuitulaserilla työstettävät metallit

Metalli	CO <sub>2</sub> -laser	Kuitulaser
Alumiini		✓
Anodisoitu alumiini	✓	✓
Hiiliteräs	✓	✓
Jalometallit (kulta, hopea, platina)		✓
Kromi		✓
Kupari		✓
Messinki		✓
Pikateräs		✓
Pinnoitettu metalli		✓
Ruostumaton teräs		✓
Titaani		✓

Korkeatehoiset kuitulaserit ovat vielä verrattain uutta teknologiaa, joten laitteistokustannukset ovat vielä korkeammat, kuin vastaavan tehoisella hiilidioksidilaserilla. Kuitulaserin suurin heikkous on paksut kappaleet. Kuitulaserilla voidaan leikata jopa 25 mm – 30 mm paksuja kappaleita, mutta leikkausnopeus on huomattavasti pienempi.

### 3.2 Leikkausprosessit

Laserleikkaus on terminen prosessi, jossa materiaalia poistetaan sulattamalla tai höyryttämällä. Leikkausta avustetaan usein paineistetulla leikkauskaasulla, joka auttaa poistamaan sulaa tai höyrystyntä ainetta leikkaurailosta. Kaasu johdetaan yleensä leikattavalle kappaleelle saman aikaisesti lasersäteiden kanssa. (Kujanpää, et al., 2005) Laserleikkaus jaotellaan kolmeen prosessiin, jotka ovat lasertyyppi-, laserhappi- ja sublimaatioleikkaus.

Laserilla voidaan myös toteuttaa hauraiden materiaalien leikkausta, jossa laser ei lävistä kappaletta. Näitä prosesseja ovat kontrolloidun jännityksen synnyttäminen kappaleeseen ja naarmutus. Näissä prosesseissa käsitelty alue on helppo mekaanisesti katkaista. Kaksi muuta laseria hyödyntävää leikkausprosessia ovat kylmäleikkaus ja laser assisted oxygen cutting (LASOX), eli laser-avustettu happileikkaus. (Steen, et al., 2010) Tässä työssä ei käydä näitä prosesseja tarkemmin läpi.

### 3.2.1 Lasertyppileikkaus

Lasertyppileikkauksessa leikkauskaasuna käytetään inerttikaasua, eli reaktiokyvyttöä kaasua. Reaktiokyvyttömät kaasut eivät reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa, joten ne sopivat erinomaisesti suojakaasuiksi leikkauksen aikana. Tyypillisesti suojakaasuna käytetään typpeä tai argonia. Käytettävä kaasun paine on 2 bar -20 bar. Kaasulla on kaksi tehtävää, puhalttaa sula aines pois leikkaurailosta ja suojata leikkauspintaa hapettumiselta. Lasertyppileikkauksessa leikkauspinta ei vaadi jälkikäsitelyä, mutta laitteiston on tuotettava kaikki leikkaukseen tarvittava energia itse. Tämän takia typpileikkauksella ei saavuteta yhtä suurta leikkausnopeutta, kuin muilla leikkausprosesseilla. (TRUMPF, 2023c.)

### 3.2.2 Laserhappileikkaus

Laserhappileikkauksessa leikkauskaasuna käytetään happea. Hapella avustetaan laserin leikkaamista, paineistamalla happikaasua leikkaurailoon. Happi reagoi kuumen aineksen kanssa vapauttaen paljon energiaa. Käytettävä kaasun paine on 0.1 bar – 6 bar. Laserhappileikkauksessa syntyvä kemiallinen reaktio voi lisätä leikkaustehoa jopa viisin kertaiseksi laserin tehoon nähden. Happiavusteinen leikkaus mahdollistaa paksujen kappaleiden leikkaamisen suurella leikkausnopeudella. (TRUMPF, 2023b.)

### 3.2.3 Sublimaatioleikkaus

Sublimaatioleikkauksessa työstettävä kappale sublimoituu, eli sen olomuoto muuttuu kiinteästä suoraan kaasuksi. Kaikki aines ei kuitenkaan ehdi sublimoitua ja osa aineksesta on sulaa. Sublimoitumisesta syntyvän kaasun paine pakottaa sulaa ainesta pois leikkaurailosta. Prosessi käytetään myös suojakaasua, tyypillisesti typpi, argon tai helium. Suojakaasun tarkoitus on suojata kappaletta hapettumiselta. Koska leikkauksessa syntyvä kaasun paine työntää sulaa pois, ei suoja kaasun tarvitse sitä tehdä. Riittävä kaasun paine on alhainen, 1 bar – 3 bar. Sublimaatioleikkaus vaatii suuren tehotiheyden, jotta mahdollisimman paljon kiinteää ainetta sublimoituisi. Prosessi tuottaa laadukkaan leikkauksen. (TRUMPF, 2023d.)

### 3.3 Tasoleikkaus

Tasoleikkaus on laserleikkauksen eniten hyödynnetty sovellus. Tasoleikkauksessa leikkaus tapahtuu 2D-leikkaukoneilla, X- ja Y-akselin suhteen. Z-akseli toimii korkeuden säätönä, mutta ei ole käytössä leikkauksen aikana. Leikkaus voidaan toteuttaa kolmella tapaa. Liikuttamalla työtasoa, liikuttamalla optiikkaa tai näiden yhdistelmällä (Kujanpää, et al., 2005.) Työtason liikuttaminen on näistä menetelmistä yksinkertaisin tapa liikuttaa työkappaletta.



## 4 3D-leikkaus

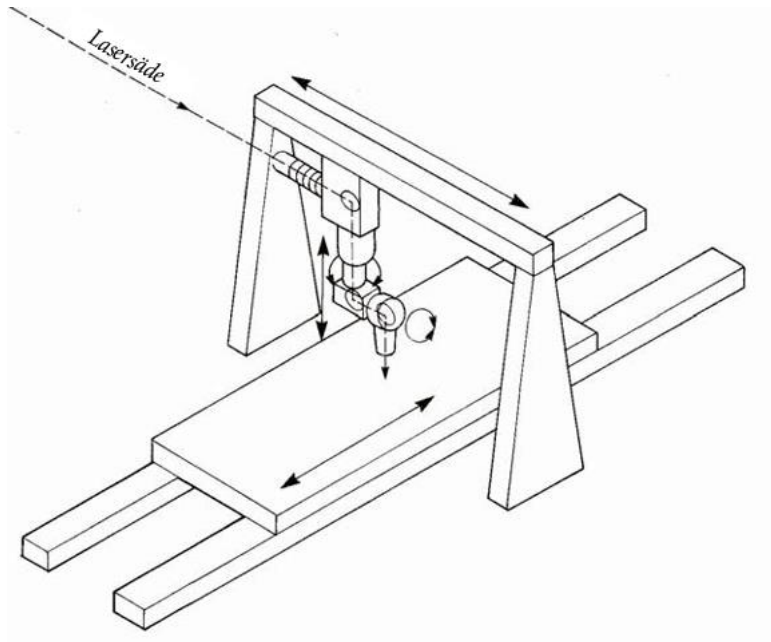
3D-laserleikkaus on laserleikkauksen erikoismenetelmä. Tässä luvussa käydään läpi kolmiulotteisten kappaleiden leikkauksessa käytettävää laitteistoa, laitteistolle asetettuja vaatimuksia ja leikkauslaitteiston ohjelmointimahdollisuuksia.

### 4.1 Leikkauslaitteisto

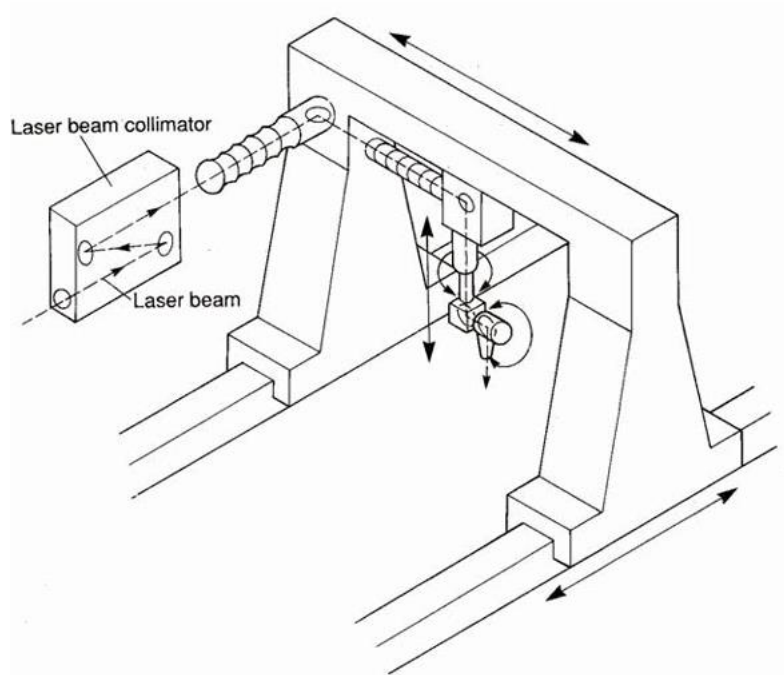
3D-työasemia on kahta tyyppiä: niin sanottu portaalityöasema ja nivelvarsirobotin käyttöön perustuva ratkaisu. Molemmat ratkaisut voidaan toteuttaa CO<sub>2</sub>- tai kuitulaserin avulla, mutta peilioptiikkaa hyödyntävä CO<sub>2</sub>-laserin yhdistäminen nivelvarsirobottiin on haastavaa. Kuitulaserin edut tulevat näkyville kuituoptiikan hyödyntämisellä tai suoralla prosessoinnilla. Edut huomataan varsinkin suurissa kokoonpanoissa. CO<sub>2</sub>-laserin käyttö saattaa vaatia ylimääräistä säteenohjausoptiikan käytön lisäksi ylimääräistä optiikkaa vakioimaan säteen halkaisijaa ja energijakaumaa. (Kujanpää, et al., 2005.) Nykyiset 3D-leikkausasemat hyödyntävät leikkauksessa kuitulaseria tai kiekkolaseria.

#### 4.1.1 3D-leikkausasemat

Portaalityöasemassa leikkauspäätä liikutetaan Y-akselilla sillan avulla, mutta X-akselin suuntainen liikutus voidaan toteuttaa kahdella tapaa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa työpöytää liikutetaan, kuva 3. Toinen vaihtoehto on liikuttaa siltakokonaisuutta, kuva 4. 3D-leikkausaseman leikkauspäälle tarvitaan kaksi akselia, jotka vaihtavat sen orientaatiota. Leikkauspää on kiinni Z-akselin päässä. Portaalityöaseman etuja on sen joustavuus ja tukevuus. Rajoitteena on kappaleenvaihto. (Kujanpää, et al., 2005.) Kuitulaserin ja muiden optista kuitua hyödyntävien lasertyyppien yleistyessä, lasersäteen kulkema matka ei ole enää merkittävä rajoitus leikkausasemille. Kuituoptiikka mahdollistaa lasersäteen joustavan kuljettamisen ilman merkittävää tehohäviötä.



Kuva 3. Portaalityöasema, jossa liikutettava työstöpöytä (Kujanpää, et al., 2005).



Kuva 4. Portaalityöasema, jossa liikkuva silta (Kujanpää, et al., 2005).

Toinen mahdollinen ratkaisu 3D-asemissa on niin sanottu puoliportaali, joka on useiden valmistajien suosima ratkaisu, kuva 5. Puoliportaaliasemassa silta on kiinni vain toisella puolella asemaa ja leikkaus tapahtuu kolmelta avoimelta sivulta. Avoimien sivujen ansiosta kappaleen käsittely on helppoa. Nykyisissä laitteistoissa sillan pituudet ovat 600 mm – 2100 mm (TRUMPF, 2023a).



Kuva 5. TRUMPF TruLaser Cell 5030, 3D-puoliportaalityöasema (TRUMPF, 2023a).

Kun leikkausasemalla voidaan työstää kolmiulotteisia kappaleita, tuo se mukanaan myös lisävaatimuksia leikkausasemalle verrattaessa tasoleikkausasemaan. Lisävaatimuksia avataan seuraavaksi.

### **Sädeturvallisuus:**

3D-työstö asettaa tiukemmat vaatimukset sädeturvallisuudelle ja asemissa tulee olla katto. (Kujanpää, et al., 2005) Pääsääntöisesti kaikki teollisuudessa käytettävät laserit ovat niin sanottuja korkeimman luokan 4 lasereita. Luokan 4 laserit vahingoittavat ihoa välittömästi ja silmät voivat vahingoittua jo säteen heijastuksesta. (STUK, 2019) Sädeturvallisuuteen liittyvät standardit, kuten IEC 60825-4 varmistavat asemien turvallisuuden. Standardit

varmistavat esimerkiksi, että leikkausaseman seinät kestävät häiriötilanteessa lasersädettä tietyn ajan.

### **Työasema:**

3D-aseman tulee olla vähintään 5-akselinen, jotta sillä voidaan työstää kolmiulotteisia profiileja. Vapausasteiden lisääntyessä, aseman runkorakenteesta tulee jäykempi, kuin tavallisen tasoleikkausaseman. Rakenteen ollessa stabiili, muotoa muuttamaton ja värähtelyjä vaimentava, saadaan aikaisesi nopea ja tarkka leikkaus.

### **Numeerinen ohjaus:**

3D-leikkausta ohjataan numeerisesti CAD/CAM-ohjelmistoilla. Nopea ohjaaminen on välttämätöntä onnistuneelle laserleikkaukselle. Ohjelmointipuolen vaatimuksia on offline- sekä online-ohjelmointi ja leikkauksen simulointi, joka helpottaa ohjelmoinnin toteuttamista. Numeerista ohjausta ja online- ja offline-ohjelmointi käydään läpi tarkemmin luvussa 4.3.

### **Leikkauspää:**

3D-laserleikkaus mahdollistaa monimutkaisten kappaleiden työstämistä, mutta asemalla täytyy olla työhön sopiva leikkauspää esimerkiksi viisteitä leikatessa. Leikkauspään suunnittelu riittävän hoikaksi, jolla varmistetaan leikkauspään luoksepääsy kappaleen pinnalle. 3D-leikkauspäitä käydään läpi tarkemmin kappaleessa 4.2.

#### 4.1.2 3D-leikkausrobotit

Kolmiulotteisten profiilien laserleikkaamiseen käytetyt robotit ovat yleensä 6-akselisia nivelvarsirobotteja. Leikkauslaitteisto muodostuu robotista, 3D-leikkauspäästä, laserista, leikkauskaasujärjestelmästä ja leikkausaitauksesta. Alla kuvassa 6, kuva laserleikkauksessa käytettävästä nivelvarsirobotista. Muita tarvittavia komponentteja ovat laserin jäähdytin, leikkaushöyryn poistojärjestelmä. (BLM Group, 2020a.) Tässä työssä näitä komponentteja

ei käydä tarkemmin läpi. Teollisuusrobotteja on ollut pitkään käytössä, mutta niiden hyödyntäminen laserleikkaus sovelluksissa on ollut vähäistä. Optista kuitua hyödyntävien laserin yleistyessä, säteen kuljetus robotille on helpottunut ja leikkausrobottien määrä teollisuudessa on kasvanut. Varsinkin nykyiset kuitulaserit ovat vakiinnuttaneet paikkansa 3D-leikkasrobottien pääasiallisena laserina. BLM Group:n verkkojulkaisussa (2020a) 3D-laserleikkausrobotin komponentteja on avattu seuraavasti:



Kuva 6. ABB:n 6-akselinen nivelsiirrobotti laserleikkaussoulussa. (BLM Group, 2020b)

### **Laser:**

Säteenkuljetuksen lisäksi kuitulaserin soveltuvuus 3D-leikkaukseen perustuu sen suureen leikkauksenopeuteen ohuilla materiaalipaksuuksilla. Roboteilla työstettävät kappaleet ovat tyypillisesti alle 6 mm paksuja. Kuitulaserilla voidaan myös leikkaamaan useita eri materiaaleja. Koska roboteilla ei leikata paksuja materiaaleja, laserin teho on tyypillisesti 1 kW – 3 kW.

**Leikkauskaasujärjestelmä:**

3D-laserleikkasurobotit hyödyntävät leikkauskaasuja normaalisti laserleikkauksen tapaan, katso luku 3.2.

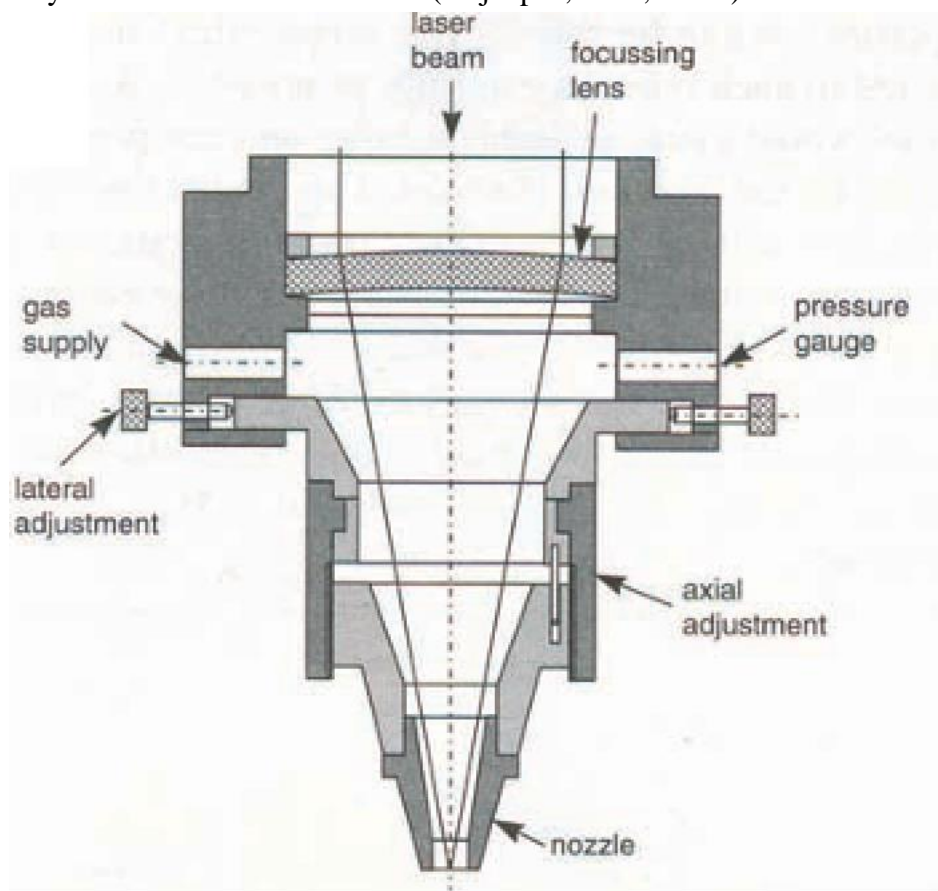
**Leikkaustila:**

Kuten leikkausasemien tapauksessa, myös robottileikkauksessa tulee leikkaussäde eristää operaattorista sädeturvallisuuden takaamiseksi. Robottien käyttökohteen mukaan valitaan mittatilauksena tehty suljettu työstötila tai valmis kokonaisuus. Mittatilaustyönä tehdyt työstötilat tarjoavat joustavuutta, mutta käyttöönottoaika on pidempi ja kustannukset suuremmat. Valmiiksi suunnitellut kokonaisuudet ovat standardisoituja, joka mahdollistaa halvemman ja nopeamman käyttöönoton.

#### 4.2 3D-leikkauspää

Laserleikkauspää on laservaloa fokusoiva laite. Työstöpään rakenne on lähes samanlainen kaikissa laserleikkauksen sovelluksissa, koska lasersäteen fokusoinnissa käytetään lähes aina linssiä. Havainnollistava kuva tyypillisestä leikkauspäästä kuvassa 7. Leikkauspään runko, johon ylimääräinen lämpö johtuu linnsiltä ja leikkauspäältä, on jäähdytetty. Rungossa on myös kaasukanavat, joita pitkin leikkauskaasut johdetaan linssin alapuolella olevaan painekammioon ja suuttimeen. Leikkauspään korkeutta seurataan esimerkiksi metalleja leikatessa kapasitiivisella korkeuden seurannalla, joka hyödyntää metallien hyvää

sähkönjohtavuutta etäisyyden määrittämiseksi. Korkeuden korjaukselle toteutetaan roboteissa yleensä erillisellä Z-akselilla. (Kujanpää, et al., 2005.)



Kuva 7. Tyypillinen lasertyöstössä käytettävä leikkauspää.

Koska laserleikkauspäiden perusrakenne on sama, ei myöskään 3D-leikkauspäältä vaadita erityisiä muutoksia sen rakenteeseen. 3D-leikkauspäähän tarvitaan normaalia hoikempi suutin, jotta sillä kyetään leikkaamaan viistossa. Hoikka suutin mahdollistaa pääsyn työstöpinnalle, kun työstetään muovattuja kappaleita. Kolmiulotteisia profiileja työstettäessä kapasitiiviselle korkeuden säädölle on asetettu erityisvaatimus. Leikkauspään ollessa vinossa työpintaa vasten, korkeuden korjaus tulee tapahtua kohtisuoraa työpintaan nähden, eikä vain korkeutta hallitsevan akselin suhteen. (Kujanpää, et al., 2005.)

### 4.3 Leikkauksen ohjelmointi

Leikkausrobotit ohjelmointiin käytetään kahta eri tapaa online- tai offline-ohjelmointia. Perinteinen online-ohjelmointi on täysin manuaalinen prosessi, jossa operaattorin täytyy liikuttaa robotti haluamallaan radalla. Se on yksinkertainen ja tehokas, mutta aikaa vievä menetelmä. Offline-ohjelmointi on täysin automaattinen ohjelmointi menetelmä. Offline-ohjelmoinnin on monimutkaisempaa ja vaatii suuremman investoinnin ohjelmistoon sekä robottisolun mallintamiseen. Ratkaisu sopii erityisesti suurille tuotantomäärille. Tässä luvussa käydään molemmat ohjelmointi menetelmät läpi tarkemmin.

#### 4.3.1 Online-ohjelmointi

Online-ohjelmointi toteutetaan perinteisesti ohjaamalla robotti haluttu liikerata robotin ohjauskapulalla. Tätä kutsutaan niin sanotuksi läpivientimenetelmäksi. Robotti tallentaa tiettyjä koordinaatteja radan varrella robotin ohjaimeen ja muodostaa niistä liikekomentoja. Läpivientimenetelmä on yksinkertainen ja laajalti käytössä oleva menetelmä, mutta siinä on useita haittapuolia. Ohjelmointi on hidasta ja työlästä, koska operaattorin pitää varmistaa, että työstöpää ei törmää kappaleen kanssa missään vaiheessa rataa. Tämä korostuu erityisesti monimutkaisten geometrioiden ja monivaiheisten prosessien kanssa. Kun ohjelmointi on suoritettu pitää sille suorittaa kattavat testaukset, jotta turvallisuus ja varmatoimisuus voidaan taata. Viimeinen ja merkittävin haittapuoli läpivientimenetelmässä on tuotantolinjan pysähtyminen. (Pan, Polden, Larkin, Van Duin, Norrish, 2012.)

Koska leikkausradan ohjelmointi pelkän ohjauskapulalla on vaikeaa ja työlästä, voidaan ohjelmointia avustaa eri keinoin. Yksinkertaisimmillaan operaattori avustaa robotin ohjausta työntämällä, vetämällä ja vääntämällä robotin haluttuun paikkaan. Erilaisilla sensoreilla varmistetaan, että robotin ohjain vastaanottaa työstöpään uudet paikkakoordinaatit. (Pan, 2012.)



### 4.3.2 Offline-ohjelmointi

OLP, eli offline-programming menetelmässä hyödynnetään CAD-mallilta, työkappaleesta saatavaa dataa robotin radan luomiseksi. Koko robottisolun mallinnetaan kolmiulotteisena ohjelmistossa, jossa käyttäjä pystyy testaamaan robotin ominaisuuksia ennen ohjelman luomista. OLP on online-ohjelmointia monimutkaisempaa, koska robottipään työstöpisteiden lisäksi myös robotin liikerata ja prosessin optimointi pitää tehdä ohjelmistolla. OLP koostuu seitsemästä päävaiheesta. (Pan et al., 2012) Seuraavaksi avataan vaiheita tarkemmin.

#### **3D-mallin luominen:**

Tyypillisesti työstettävälle kappaleelle on valmis 3D CAD-malli. Nykyiset OLP-ohjelmistot pystyvät konvertoimaan tehokkaasti eri CAD-ohjelmistoilla luotuja malleja, robotin ohjelmointi tehdessä. Jos mallia ei ole tai siihen on tehty muutoksia, voidaan tarvittava malli luoda muutamalla eri keinolla. Kappale voidaan 3D-skannata geometrian luomiseksi. Jos kappaleesta on vain 2D-malli, voidaan 3D-malli luoda käyttämällä useaa kuvakulmaa 2D-mallin piirustuksesta tai robotti voidaan ohjelmoida kaksiulotteisesti (Pulkkinen, Heikkilä, Sallinen, Kivikunnas & Salmi, 2008).

#### **Työstöpisteiden luominen:**

CAD-datasta määritetään robotille paikkakoordinaatit. Tämä vaihe on aikaa vievää ja voi vaatia toissijaista ohjelmointia, jotta koordinaatit saadaan määritettyä automaattisesti. Jotkut OLP-ohjelmistot kykenevät määrittämään koordinaatteja hyödyntämällä kappaleen pinnanmuotoja, kuten nurkkia ja kulmia. Työstökärjen orientaatio ja paikka määräytyy prosessin vaatimusten ja CAD-datasta hankittuja koordinaattien perusteella. Apupisteitä, kuten koti-, lähestymis- ja poistumispisteitä voidaan luoda manuaalisesti .

**Liikeradan suunnittelu:**

Koska liikeradalle on monta mahdollista ratkaisua, tulee optimaalisen liikeradan löytämiseksi huomioida seuraavia asioita, kuten varren ulottuvuus, liikkeiden minimointi ja liikeradan esteettömyys. Optimaalinen liikerata tulee usein luoda itse manuaalisesti. Jotkut OPL-ohjelmistot tarjoavat kuitenkin valmiita ratkaisuja liikeradan optimoimiseksi.

**Prosessin suunnittelu:**

Prosessin suunnittelu on koko tuotantolinjan laajempaa optimointia. Siihen kuuluu esimerkiksi resurssien hallintaa ja useiden robottien samanaikaista hyödyntämistä, jotta läpivientiaika saadaan minimoitua. Koska prosessin suunnittelu on asiakaskohtaista, kaupalliset OPL-ohjelmistot eivät tarjoa ratkaisuja prosessin suunnitteluun.

**Jälkikäsitteily:**

Jälkikäsitteilyssä laitteistolle lisätään ohjaukseen tarvittavat I/O, eli input-output signaalit sekä robotin liikerataa hienosäädetään, jos tarpeellista. Jälkikäsitteilyyn kuuluu myös ohjelman konvertoiminen robotin omalle ohjelmointikielelle.

**Simulointi:**

Simulointi on yksi OLP-ohjelmistojen hyödyllisimmistä ominaisuuksista, sillä se mahdollistaa luodun ohjelmiston tarkastelun ilman fyysistä robottia.

**Kalibrointi:**

Ideaalitulanteessa luotu ohjelma voitaisiin ladata suoraan robotille ja ottaa heti käyttöön. Todellisuudessa työstettävän kappaleen ja CAD-mallin mitoissa on poikkeamia, joka tekee kalibroinnista lähes pakollista.

OLP tarjoaa monia etuja online-ohjelmointiin verrattuna. Ensimmäiseksi OLP ei vaadi fyysisen robotin alas ajamista, joka mahdollistaa robotin käyttämisen ohjelmoinnin aikana. Ohjelmat saadaan myös heti käyttöön tuotannossa, koska ne voidaan luoda jo tuotteen kehitysvaiheessa. Toiseksi ohjelmia on helppo ja nopea muuttaa, koska muutoksia voidaan tehdä mihin tahansa kohtaan ohjelmaa. Kolmanneksi OLP tarjoaa mahdollisuuden simuloida luodun ohjelman, joka minimoi virheiden määrää, parantaen tuottavuutta ja turvallisuutta. Sen tarjoamista mahdollisuuksista huolimatta, OLP vaatii suuren taloudellisen sijoituksen, jotta sen käyttö olisi kannattavaa. (Pan et al., 2012)

OLP-ohjelmistoja on saatavilla robotteja valmistavien yritysten omia, yleisiä OPL-ohjelmistoja sekä avoimen lähdekoodin ohjelmistoja. Lähes jokainen robottivalmistaja tarjoaa oman OLP-ohjelmiston. Valmistajien ohjelmistot tarjoavat helpomman toissijaisen ohjelmoinnin, jolla voidaan luoda ohjelmiston sisäisiä lisäominaisuuksia, kuten liikeradan automaattinen optimointi. Nämä ohjelmistot ovat tyypillisesti myös halvempia, koska laitteisto ja ohjelmisto tulevat pakettina. (Pan et al., 2012) ABB:n oma RobotStudio on maailman käytetyin OLP-ohjelmisto. (ABB, 2023)

Taulukko 2 Käytössä olevia OLP-ohjelmistoja sekä ohjelmistojen kehittäjiä

Ohjelmiston nimi	Ohjelmiston kehittäjä/yritys
Valmistajien omat ohjelmistot	
RobotStudio	ABB
KUKA.Sim	KUKA
ROBOGUIDE	Fanuc
K-ROSET	Kawasaki
Yleiset ohjelmistot	
Delmia	Dassault Systèmes
Tecnomatix	Robcad

Avoimen lähdekoodin ohjelmistot	
ROS	ROS-Industrial

Yleiset ohjelmistot tarjoavat markkinoiden tehokkaimmat ohjelmistot, kuten Delmia ja RobCAD. Yleisten ohjelmiston etu on se, että ne ovat joustavampia laitteiston suhteen. Ne tarjoavat myös paremman integroitavuuden muiden teollisuudessa olevien, kuten PLM-ohjelmistojen (product lifecycle management). Tämä mahdollistaa suurten tuotantolinjojen automatisoinnin ja simuloinnin. Siksi suuret yritykset, esimerkiksi autoteollisuudessa hyödyntävät näitä ohjelmistoja. Myös avoimen lähdekoodin OLP-ohjelmistoja on kehitetty olemassa oleville CAD-ohjelmistoille, kuten SolidWorksille. (Pan et al., 2012)

## 5 3D-laserleikkauksen sovellukset

Laserleikkaukselle on ominaista hyvä leikkauks jälki ja suuri leikkausnopeus, jonka ansiosta sitä hyödynnetään erityisesti ohutlevyjen työstössä. 3D-laserleikkauksen kehittyessä yhä monimutkaisempia profiileita voidaan työstää, joka edelleen antaa suunnittelijoille vapaammat kädet tuotetta suunnitellessa. Laserleikkausta sovelletaan laaja-alaisesti, joten kaikkia käyttökohteita on mahdoton listata. (Steen, et al., 2010.) Tässä kappaleessa käydään läpi 3D-laserleikkauksen merkittävimpiä sovelluskohteita.

3D-laserleikkauksen sovellukset ovat pitkälti muovattujen profiilien aukottamista ja leikkaamista mittoihin. Laserleikkausradan muuttaminen on helppoa, joka tekee siitä erinomaisen menetelmän valmiiksi muovatun profiilin räätälöintiin erilaisiksi tuotteiksi. (Kujanpää, et al., 2005) Autoteollisuudessa 3D-laserleikkauksen sovelluskohteet ovat laajat. Alle on listattu esimerkki komponentteja, joita voidaan valmistaa laserleikkaamalla (Laser Specialist Inc, 2023).

- Erilaisen korin osat, kuten konepellit, kattopaneelit ja lokasuojat
- Moottorin lämpösuojat
- A-, B- ja C-pilarit
- Kojelaudan rungot
- Lämpömuovatut sisätilan muoviosat

Autoteollisuudessa tätä valmiin profiilin räätälöintiä on käytetty jo pitkään tuotannossa. Esimerkiksi auton kattoikkuna voidaan leikata robottilaserilla tuotantolinjalla, jos asiakas on valinnut sen optioksi. (Steen, et al., 2010) Auton korin aukottaminen vasta tuotannon loppuvaiheessa luo huomattavia säästöjä, kun saamaa linjaa voidaan hyödyntää eri tuotemallien aukottamiseen. (Kujanpää, et al., 2005). Auton korin aukottamisella voidaan tarkoittaa esimerkiksi lukkopesiä. Autoteollisuudessa robottilasereilla leikataan myös korien

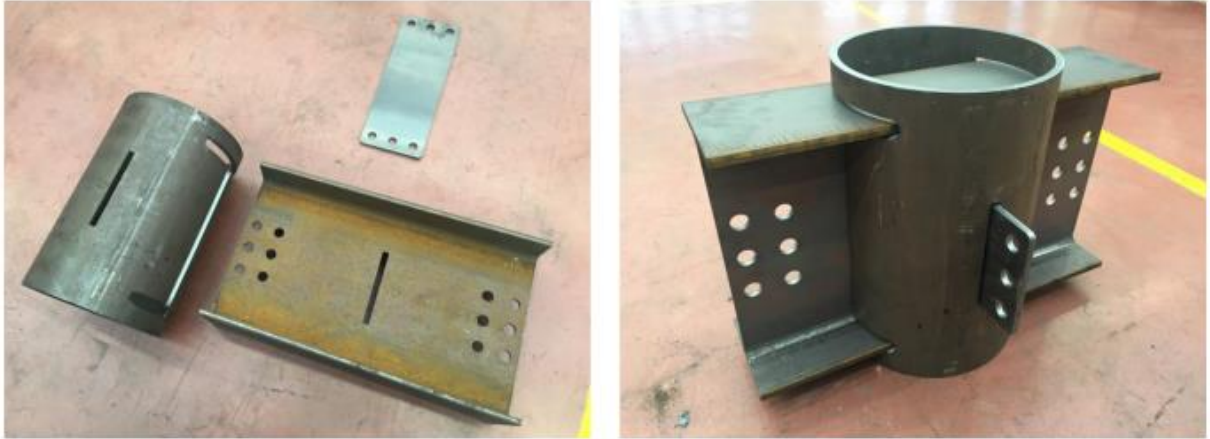
A- ja B-pilareita (ABB, 2022). Hyundai hyödyntää Stäublin nivelvarsirobotteja B-pilareiden valmistuksessa (Stäubli, 2023). Uusimpia sovelluskohteita autoteollisuudessa ovat CFRP-komposiittien, eli hiilikuituvahvistettujen polymeerien 3D-laserleikkaus. (Bluemel, Bastick, Staehr, Jaeschke, Suttman, Kaielerle & Overmeyer, 2018) 3D-laserleikkausta hyödynnetään myös muilla teollisuuden aloilla, kuten koneenvalmistuksessa ja ilmailualalla. Käyttökohteet ovat samoja, valmiiksi muovattujen kappaleiden ja profiilien aukottamista sekä muotoon leikkaamista. (SIL, 2019). Kuvassa 8. havainnollistava kuva valmiiksi muovattun muoviosan 3D-laserleikkauksesta.



Kuva 8. Mercedes-Benz autojen muovisen komponentin laserleikkaus (KUKA, 2023)

Putkiprofiilien leikkaus on toinen tärkeä 3D-laserleikkauksen sovellus. Laserleikkaamalla saadaan niin tarkkoja leikkauksia, että kokoonpano helpottuu ja jäykkyys sekä laatu paranevat. Profiilileikatut helpottaa esimerkiksi hitauskiinnikkeiden valmistusta. Koska leikkaus on tarkka, saadaan osat sijoitettua toisiinsa nähden tarkasti. Tämä vähentää hitsin laatuvaatimuksia ja kuormankantokyky paranee. (Kujanpää, et al., 2005). Putkiprofiilien 3D-laserleikkauksella voidaan suunnitella kokoonpanoja liitoksille, jotka mahdollistavat liitoksen elementtien välisen käyttäytymisen paremman ennustettavuuden. Numeerisen

ohjauksen avulla on mahdollista valmistaa läpivietyjä liitoksia, joissa palkki viedään sitä tukevan pilarin läpi (Kanyilmaz, 2019a). Kuvassa 9. esimerkki läpiviedystä liitoksesta.



Kuva 9. Prototyyppi läpiviedystä liitoksesta (Kanyilmaz, 2019a)

Putkilaserilla valmistettuja komponentteja hyödynnetään muun muassa huonekaluissa, kuntosalilaitteissa, rakennus-, auto- ja koneteollisuudessa sekä LVI-alan sovelluksissa (Cutlite Penta, 2020). Työstettävän kappaleen profiili ei rajoitu ainoastaan pyöreään, vaan nykyisillä laitteistoilla voidaan työstää lähes mitä tahansa putkiprofiilia. Myös putkien viistotus on tärkeä käyttökohde 3D-putkilasereille (Cutlite Penta, 2020). 3D-leikkauksen joustavuus mahdollistaa valtavan määrän erilaisten variaatioiden valmistamisen nopeasti, ilman ylimääräisiä työstökustannuksia, koska kaikki työvaiheet voidaan tehdä samalla laitteella.

## 6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä kandidaatin työssä tutkittiin laserleikkauksen erikoismenetelmää, 3D-laserleikkausta ja sen sovelluksia työstömenetelmänä tuotantoteknisessä ympäristössä. Työn tavoitteena oli määrittää 3D-leikkausprosessi käsitteenä ja kartoittaa siihen vaadittavaa laitteisto sekä ohjelmisto. Työssä pohjustettiin myös laserleikkausta yleisellä tasolla selvittämällä laserin merkitys leikkaavassa työstössä ja yleisimmät käytössä olevat lasertyypit sekä leikkausprosessit. Kolmiulotteisuus asettaa erityisvaatimuksia laitteistolle ja käyttö vaatii erityisosaamista operaattorilta, jotta turvallisuus sekä varmatoimisuus voidaan taata. Työssä selvitetään nämä vaatimukset ja perehdytään käytettävän laitteiston variaatioiden operointiin.

3D-laserleikkaus on tehokas menetelmä tuotantoteollisuuden tarpeisiin, mahdollistaen monimutkaisten profiilien ja prässättyjen kappaleiden tarkan sekä nopean leikkaamisen. Laserteknologian kehittyminen on mahdollistanut uusien tehokkaiden ratkaisujen tuonnin markkinoille. Etenkin nykyiset kuitulaserit ovat olleet avainasemassa 3D-laserien yleistyessä. Koska kuitulaseri hyödyntää optista kuitua säteenkuljetuksessa, soveltuu se erityisen hyvin 3D-laserleikkukseen. Leikkausosiemien ja -robottien ohjelmoinnista on tullut suoraviivaisempaa ja operaattorin ei enää tarvitse erikoistua tiettyyn ohjelmointikieleen. Laittevalmistajien OLP-ohjelmistot mahdollistavat joustavan offline-ohjelmoinnin. OLP-ohjelmistot pystyvät hyödyntämään valmiita CAD-malleja ja luomaan niiden avulla robotin liikeratoja ja simuloimaan leikkausta työsolussa. OLP-ohjelmistojä on saatavissa monia erilaisia, kuten laitevalmistajien omia, yleisiä kaupallisia ja avoimen lähdekoodin ohjelmia.

3D-laserleikkauksen sovellukset tuotantoteollisuudessa kohdistuu ohutlevyjen työstöön. Kolmiulotteisten profiilien laserleikkauksesta hyödytään erityisesti aloilla, joissa voidaan luoda yhdestä pohjatuotteesta useita eri malleja, kuten autoteollisuudessa. 3D-laserleikkausta hyödynnetään myös laajalti moottoripyörien, junien ja lentokoneiden tuotannossa sekä putkiprofiilien leikkaamisessa. 3D-leikkasulitteisto on varsin tehokas työkalu teollisuuden eri tarpeisiin, mutta sen täyttä potentiaalia ei vielä hyödynnetä.



## Lähteet

ABB (2022a). *Laser Cutting*. [online] Robotics. Saatavissa: <https://new.abb.com/products/robotics/industries/automotive/body-in-white/technologies-and-process-expertise/laser-cutting>. [Viitattu 27.3.2023].

ABB (2023b). *RobotStudio - ABB Robotics*. [online] new.abb.com. Saatavissa: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>. [Viitattu 28.3.2023].

BLM Group. (2020a). *From 3D laser cutting to part handling. Can the robot be the solution you're looking for?* [online] blog.blmgroup.com. Saatavissa: <https://blog.blmgroup.com/from-3d-laser-cutting-to-part-handling-can-the-robot-be-the-solution-youre-looking-for> [Viitattu 10.3.2023].

BLM Group. (2020b). *Use of the robot in 3D laser cutting*. [online] blog.blmgroup.com. Saatavissa: <https://blog.blmgroup.com/use-of-the-robot-in-3d-laser-cutting> [Viitattua 10.3.2023].

Caristan Charles L (2004). *Laser cutting guide for manufacturing*. Society of Manufacturing Engineers (SME), s. 16-19.

Cutlite Penta (2020). *The advantages of laser tube cutting* -. [online] Cutlite Penta. Saatavissa: <https://www.cutlitepenta.com/en/news/the-advantages-of-laser-tube-cutting/> [Viitattu 21.4.2023].

Kanyilmaz, A. (2019b). The problematic nature of steel hollow section joint fabrication, and a remedy using laser cutting technology: A review of research, applications, opportunities. *Engineering structures*, 183, s.1027–1048.

Kujanpää, V. (2005). *Lasertyöstö*. Teknologiainfo Teknova, s. 68, 95–99, 151–152.

KUKA (2023). *Improvement in cycle times thanks to the Reis laser gantry*. [online] KUKA AG. Saatavissa: <https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2016/07/solution-industries-voestalpine> [Viitattu 24.4. 2023].

Laser, S. (2017). *5 Types of Laser Cutting Machines*. [online] Scantech Laser. Saatavissa: <https://www.scantechlaser.com/5-types-laser-cutting-machines/> [Viitattu 9.3.2023].

Laser Specialist Inc (2023). *Michigan Automotive Industry Laser Cutting*. [online] Laser Specialists - Top MI Laser Cutting Company. Saatavissa: <https://www.laserspecialists.com/industries/automotive> [Viitattu 25.4.2023].

Menzel, R. (2007). *Photonics : Linear and nonlinear interactions of laser light and matter*. Second Edition. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 359–361.

Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Duin, V. and Norrish, J. (2012). Recent progress on programming methods for industrial robots. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 28, s.87–94.

Powell, J. (1998a). *CO<sub>2</sub> laser cutting*. 2nd ed. ed. Springer, s. 8-13.

Pulkkinen, T., Heikkilä, T., Sallinen, M., Kivikunnas, S. and Salmi, T. (2008). 2D CAD based robot programming for processing metal profiles in short series manufacturing. IEEE, s.156–162.

SIL (2019). *Robotic Laser Cutting Machine*. [online] SIL | SILASERS. Saatavissa: <https://silasers.com/robotic-laser-cutting-machine/> [Viitattu 24.4.2023].

Sołtysiak, R., Wasilewski, P., Sołtysiak, A., Troszyński, A. and Maćkowiak, P. (2019). The analysis of fiber and CO2 laser cutting accuracy. EDP Sciences, pp.03016-.

Steen, W.M. & Mazumder, J. (2010). *Laser material processing*. 4th Edition. ed. Springer London, s. 6, 131, 133, 166-168, 183, 185

Stäubli (2023). *Laser cutting body panels*. [online] [www.staubli.com](http://www.staubli.com). Saatavissa: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/industries/automotive/body-frame-biw/laser-cutting-B-pillars.html> [Viitattu 24.4. 2023].

STUK (2023). *Laserluokat*. [online] Laserluokat. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat> [Viitattu 9.3.2023].

TRUMPF (2023a). *3D laser cutting machines*. [online] [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com). Saatavissa: [https://www.trumpf.com/en\\_IN/products/machines-systems/3d-laser-cutting-machines/](https://www.trumpf.com/en_IN/products/machines-systems/3d-laser-cutting-machines/) [Viitattu 9.3.2023].

TRUMPF (2023b). *Flame cutting* / *TRUMPF*. [online] [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com). Saatavissa: [https://www.trumpf.com/vi\\_VN/solutions/applications/laser-cutting/flame-cutting/](https://www.trumpf.com/vi_VN/solutions/applications/laser-cutting/flame-cutting/) [Viitattu 30.3.2023].

TRUMPF (2023c). *Fusion cutting* / *TRUMPF*. [online] [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com). Saatavissa: [https://www.trumpf.com/en\\_CA/solutions/applications/laser-cutting/fusion-cutting/](https://www.trumpf.com/en_CA/solutions/applications/laser-cutting/fusion-cutting/) [Viitattu 30.3.2023].

TRUMPF (2023d). *Sublimation cutting* / *TRUMPF*. [online] [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com). Saatavissa: [https://www.trumpf.com/en\\_US/solutions/applications/laser-cutting/sublimation-cutting/](https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/laser-cutting/sublimation-cutting/) [Viitattu 30.3.2023].

Zgripcea, L., Putan, V., Ardelean, M. and Birtok Baneasa, C (2021). Technology of thin metal sheet cutting with fiber laser. *Journal of physics. Conference series*, 1781, pp.12059