Tampereen yliopisto

Anton Laine

SUURTEN PINTA-ALOJEN LASERSTRUKTUROINTI

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jorma Vihinen
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Anton Laine: Suurten pinta-alojen laserstrukturointi
kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
konetekniikan tutkinto-ohjelma
4.2020

Kandidaatintyöni tarkoituksena on muodostaa yhteenveto nykyään laserstrukturoinnissa käytettävistä laitteista ja laserstrukturoinnin sovelluskohteista. Lisäksi kandidaatintyössäni on tarkoituksena tutkia laserstrukturointitekniikoiden soveltuvuutta teollisuuden tarpeisiin. Laserstrukturoinnin laitteistojen käsittelyä painotetaan työssäni, joten sovelluskohteita on käsitelty suhteessa vähemmän kuin laitteistoja. Myös laserstrukturoinnin fysikaalista pohjaa ja laserstrukturoinnin mallintamista on tarkasteltu suppeasti työssäni. Tutkimuskysymyksiin on vastattu kirjallisuusselvityksen avulla, minkä vuoksi kokeellista osuutta ei ole. Kirjallisuusselvityksen lähdekirjallisuutena on käytetty viime vuosina julkaistuja tutkimusartikkeleita ja yritysten dokumentteja.

Laserstrukturointimenetelmät perustuvat fysikaalisesti laserablaatioon, jossa lasersäteilyn avulla muokataan materiaalia. Työssäni tarkastellaan suurten pinta-alojen käsittelyä, ja suureksi pinta-alaksi kirjallisuudessa katsotaan ympyrä, jonka säde on 10mm. Kirjallisuudessa laserstrukturointimenetelmät on jaettu kolmeen päämenetelmään: suorat työstömenetelmät, laserinterferenssi ja maskitekniikat. Suoriin työstömenetelmiin kuuluvat tavallinen suoratyöstö, galvanometrinen skannaus ja polygoniskannaus. Työstömenetelmistä kaikkein joustavimpia ja nopeimpia ovat galvanometrinen skannaus ja polygoniskannaus, minkä takia ne ovat parhaiten teollisuuden tarpeisiin soveltuvia tekniikoita. Tavallinen suoratyöstömenetelmä taas on menetelmistä hitain, eikä se sellaisenaan sovellu teolliseen käyttöön. Tavallista suoratyöstömenetelmää on kuitenkin mahdollista nopeuttaa huomattavasti kasvattamalla järjestelmän laserlähteiden määrää tai lisäämällä järjestelmään painatussylinteri. Nopeutensa vuoksi useita laserlähteitä sisältävät järjestelmät ja painatussylinterin sisältävät järjestelmät soveltuvat hyvin teollisuuteen. Painatussylinterin sisältävät järjestelmät soveltuvat varsinkin käyttötilanteisiin, joissa työstetään suuria määriä samaa pinnan mikrorakennetta kappaleen pintaan.

Maskitekniikat soveltuvat teollisuuden tarpeisiin huonoiten niiden monimutkaisuuden ja rajoitettujen käyttökohteiden vuoksi. Interferenssimenetelmä taas on osoittautunut parhaaksi menetelmäksi käyttökohteisiin, joissa halutaan työstää jaksollisesti toistuvia pintarakenteita. Laserstrukturointi on monimutkainen prosessi, jonka ymmärtämiseen ja optimoimiseen voidaan käyttää mallintamista. Mallinnuksessa voidaan käyttää joko analyyttisiä, kokeellisia tai tekoälyyn perustuvia malleja. Laserstrukturoinnilla on useita sovelluskohteita, joihin kuuluvat vettä hylkivät pinnat, tribologia, lääketiede ja optiikka.

Avainsanat: laserstrukturointi, laserablaatio, galvanometrinen skannaus, polygoniskannaus, laserinterferenssi, maskitekniikat

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Anton Laine: Laser structuring of large areas
bachelor's thesis
Tampere University
Degree programme of mechanical engineering
4.2020

The purpose of this bachelor's thesis is to examine what techniques are used in laser structuring at present and what are the applications of laser structuring. Another purpose of this bachelor's thesis is to examine the current laser structuring techniques suitability to industry. The equipment is emphasized so there is less information about the applications. Also the physics and modeling are briefly studied. The research questions are answered by a literature review and therefore there is no experimental part. Research articles published in recent years and enterprise documents have been used as sources of reference.

The laser structuring methods are physically based in laser ablation in which laser irradiation removes and melts material. This bachelor's thesis concentrates in large areas and in literature 10 mm radius circle is concerned to be a large area in laser structuring. In literature laser structuring methods are divided to three main methods: direct writing, laser interference and mask technique. Direct writing has three submethods: ordinary direct writing, galvanometer scanning and polygon scanning. The most flexible and fastest methods are galvanometer scanning and polygon scanning and therefore they are the most suitable methods for industrial applications. Ordinary direct writing is the slowest laser structuring method and it does not fit to industry. However it is possible to make ordinary direct writing system a lot faster by adding more laser sources or adding an embossing cylinder to the system. Systems with multiple laser sources and systems with embossing cylinder are suitable for industry since they have good productivity. Systems with embossing cylinder are especially suitable to cases where a large amount of the same microstructure is machined to the material.

Mask techniques are the least suitable methods for industry since they are complex and their applications are limited. The interference method has proved to be good in applications where periodically repeating microstructures are machined. Laser structuring is a complex process and modeling is used for understanding and optimizing the process. In modeling it is possible to use either analytical, empirical or artificial intelligence models. The application areas of laser structuring are hydrophobic surfaces, tribology, medicine and optics.

Keywords: laser structuring, laser ablation, galvanometer scanning, polygon scanning, laser interference, mask techniques

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. FYSIKAALINEN PERUSTA 2
3. MENETELMÄT 5
3.1 Suorat työstömenetelmät 7
3.1.1 Suoratyöstö 7
3.1.2 Galvanometrinen skannaus 9
3.1.3 Polygoniskannaus 13
3.2 Laserinterferessi 15
3.3 Maskitekniikat 17
4. MALLINNUS 20
5. SOVELLUSESIMERKKEJÄ 22
5.1 Vettä hylkivät pinnat 22
5.2 Tribologia 23
5.3 Lääketiede 23
5.4 Optiikka 24
YHTEENVETO 26
LÄHTEET 27

KUVALUETTELO

Kuva 1. *Nanosekuntilaserin ja femtosekuntilaserin vertailu, muokattu lähteestä [10, s. 9]* *3*

Kuva 2. *Suoratyöstöjärjestelmässä käytettävä rakenne. Muokattu lähteestä [9, s. 6]* *7*

Kuva 3. *Laserstrukturointi painatussylinterin avulla, muokattu lähteestä [2, s. 1]* *8*

Kuva 4. *Esimerkki galvanometrisestä skannauslaitteistosta, muokattu lähteestä [22, s. 3]* *9*

Kuva 5. *Kepleriläinen ja Galileolainen säteen laajennin, muokattu lähteestä [29]* *11*

Kuva 6. *Esimerkki polygoniskannauslaitteistosta, muokattu lähteestä [21, s. 2]* *14*

Kuva 7. *Esimerkki laserinterferenssiin perustuvasta strukturointijärjestelmästä. Muokattu lähteestä [6, s. 2].* *16*

Kuva 8. *Esimerkki maskitekniikkaan perustuvasta järjestelmästä. Muokattu lähteestä [14, s. 2]* *18*

Kuva 9. *Vesipisaran ja pinnan välinen kulma θ, muokattu lähteestä [15, s. 2]* *22*

Kuva 10. *Vesipisaran kontaktikulma, muokattu lähteestä [8, s. 6]* *22*

Kuva 11. *Luutumisen tehokkuus komposiittien pintaan. Muokattu lähteestä [13, s. 12]* *24*

Kuva 12. *Laserstrukturointi pinnan heijastavuuden pienentämiseksi. Muokattu lähteestä [28, s. 7]* *25*

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ANOVA	engl. analysis of variance, varianssianalyysi
BEM	engl. boundary element method
CAD	engl. computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CdSSe	Kadmiumsulfoselenidi
DOE	engl. design of experiment
FDM	engl. finite difference method
FEM	engl. finite element method
FSPC	femtosekuntilaserilla strukturoitu SPC
LBIA	engl. laser beam interference ablation
LIPSS	engl. laser-induced periodic surface structures
LSE	engl. line scan engine
LSFL	engl. low spatial frequency LIPSS
Nd:YAG	Lasermateriaali, jossa neodyymi-ioneita on sekoitettu yttrium-alumiini granaattiin.
PEKK	polyeetteriketoniketoni
SPC	piinitridistä ja polyeetteriketonista valmistettu bioaktiivinen komposiitti
Yb:YAG	Lasermateriaali, jossa ytterbiumioneita on sekoitettu yttrium-alumiini granaattiin.

.

1. JOHDANTO

Laserstrukturoinnilla tarkoitetaan materiaalin pintageometrian muokkaamista mikroskooppisella tasolla [1, s.1]. Viimeisen vuosikymmenen aikana pintojen laserstrukturointi on kehittynyt voimakkaasti ja se alkaa vähitellen näyttämään potentiaaliaan tieteessä, teknologiassa ja teollisuudessa [7, s.1]. Laserstrukturointi voidaan suorittaa monille erilaisille materiaaleille, kuten metalleille, keraameille, polymeereille, puolijohteille, ohutkalvoille ja edistyksellisille nanokomposiiteille [1, s.1]. Muun muassa tribologia [12], lääketiede [13] ja vettä hylkivät pinnat [8] ovat laserstrukturoinnin sovelluskohteita. Kirjallisuudessa 10 mm säteinen ympyrä katsotaan suuruudeltaan suureksi laserstrukturoitavaksi pinta-alaksi [3, s.8]. Laserstrukturointiin on olemassa useita eri menetelmiä ja laitteistoja [9].

Tämän työn tavoite on tutkia nykyään laserstrukturoinnissa käytettyjä laitteistoja sekä niiden soveltuvuutta teollisuuteen. Tämä työ käsittelee myös suppeasti laserstrukturoinnin sovelluskohteita. Tutkimuskysymyksiin on vastattu kirjallisuusselvityksen avulla. Työssä käytetyt lähteet koostuvat viime vuosien tutkimustiedosta ja yritysten dokumenteista. Aluksi käsitellään fysikaalista perustaa, jonka jälkeen siirrytään menetelmiin. Menetelmien jälkeen käsitellään mallinnusta ja sovellusesimerkkejä. Lopun yhteenvedossa menetelmiä on vertailtu.

2. FYSIKAALINEN PERUSTA

Materiaalin poistamista laserin avulla kutsutaan laserablaatioksi. Laserablaatiossa kappaleeseen kohdistettu lasersäteily aiheuttaa lasersäteilyn absorboineessa kohdassa materiaalin lämpenemisen ja materiaalin olomuodon muuttumisen. Kappaleen muoto muuttuu materiaalin olomuodon muuttumisen seurauksena kohdassa, johon lasersäteily on absorboitunut. Myös lasersäteen absorboiman kohdan ympäristössä kappaleen muoto muuttuu. Laserablaatioon pääasiassa vaikuttavia tekijöitä ovat laserin parametrit, materiaaliominaisuudet ja prosessin muuttujat. Laserin parametreihin kuuluvat muun muassa integroitu vuontiheys, laserin liikuttamisnopeus, pulssin pituus ja pulssin toistoväli. Laserablaatioon vaikuttavia materiaaliominaisuuksia ovat esimerkiksi absorptiokyky, lämpökapasiteetti ja lämmönjohtokyky. Apukaasun paine sekä suuttimen etäisyys kappaleeseen ovat esimerkkejä prosessimuuttujista. [1, s. 3]

Laserablaatio on terminen prosessi, koska sen laajuus riippuu laserpulssin kestosta. Laserin ja metallin välistä vuorovaikutusta voidaan kuvata alla olevilla yhtälöillä 1 – 4

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_i) + S \tag{1}$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma(T_e - T_i) \tag{2}$$

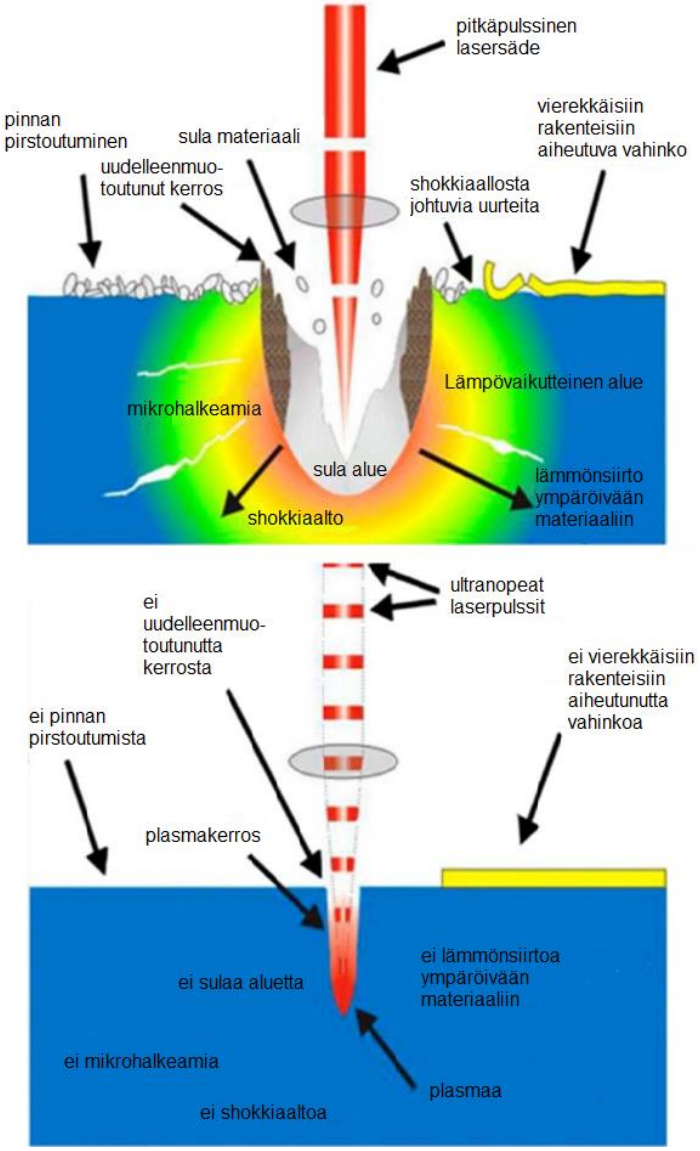
$$Q(z) = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \tag{3}$$

$$S = I(t) A \alpha e^{-\alpha z} \tag{4}$$

Nämä yhtälöt muodostavat yhdessä kahden lämpötilan yksiulotteisen diffuusiomallin. Yhtälöissä z on kohdepinnan kanssa kohtisuora suunta, $Q(z)$ on lämpövuo, S on lämpölähteen termi, $I(t)$ on laserin intensiteetti, $A = 1 - R$ on pinnan läpäisevyys, α on materiaalin absorptiovakio, C_e ja C_i ovat elektronin ja hilajärjestelmän lämpökapasiteetit tilavuusyksikköä kohden, γ on elektronihilasidoksia kuvaava vakio ja k_e on elektronin lämmönjohtavuus. [1, s. 3] Tehokas laserablaatio vaatii laitteistoilta suuria tehoja ja korkeita pulssien toistonopeuksia tai korkeita pulssienergioita. Kuitenkin työstettävän materiaalin liiallisen lämpenemisen estämiseksi tarvitaan laitteisto, jonka avulla tarvittava korkea teho jakaantuu työstettävälle pinta-alalle nopeasti. Tehon jakautumista työstettävälle pinta-alalle voidaan nopeuttaa lisäämällä työstöprosessin rinnakkaisuutta

tai kasvattamalla työstönopeutta. Työstönopeuden kasvattaminen vaatii matalia pulssienergioita ja korkeita toistonopeuksia. [20, s. 2]

Laserstrukturoinnissa hyvin olennainen tekijä on laserpulssin pituus. Laserstrukturoinnissa voidaan käyttää lasereita, joiden pulssipituus on joko nanosekunti (1 ns = 10^{-9} s), pikosekunti (1 ps = 10^{-12} s) tai femtosekunti (1 fs = 10^{-15} s) [9]. Myös attosekunnin (1 as = 10^{-18} s) pulssipituutta käyttävien lasereiden soveltamista strukturointiin tutkitaan [10, s.3]. Käytettäessä nanosekuntialueella olevia laserpulsseja sovelluskohteet ovat rajoitetut verrattuna lyhyempien laserpulssien käyttöön. Seuraava kuva havainnollistaa, miksi näin on.



Kuva 1. *Nanosekuntilaserin ja femtosekuntilaserin vertailu, muokattu lähteestä [10, s. 9]*

Yllä olevassa kuvassa 1 on vertailtu nano- ja femtosekuntilaseria. Nanosekuntilaser on kuvassa ylimmäisenä. Kuten kuvasta nähdään, nanosekuntialueella olevat laserpulssit

aiheuttavat työstettävään materiaaliin monia haitallisia vaikutuksia. Nanosekuntilaser aiheuttaa työstettävän materiaalin pinnan pirstoutumista, sulamista ja mikroskooppista halkeilua. Nanosekuntialueella olevat laserpulssit lämmittävät materiaalia, jolloin lämpöä siirtyy työstökohtaa ympäröivään alueeseen. Nanosekuntialueella olevien laserpulssien käytöstä aiheutuu myös shokkiaalto. Materiaalin lämpeneminen ja shokkiaalto ovat syynä materiaaliin syntyville vaurioille. Lyhennettäessä laserpulssien pituutta femtosekuntialueelle ei enää havaita samoja haitallisia vaikutuksia kuin nanosekuntialueella, koska femtosekuntialueella oltaessa materiaaliin aiheutuvat lämpövaikutukset jäävät pieniksi. [10, s. 8–9]

3. MENETELMÄT

Laserstrukturointiin on neljä eri päämenetelmää: suoratyöstö, laserinterferenssi, maskitekniikka ja materiaalin kiinnittäminen laserpulsseilla. Edellisen luettelon kolme ensimmäistä päämenetelmää ovat ainetta poistavia, kun taas viimeinen menetelmä on ainetta lisäävä [5][9, s. 6]. Kaikissa menetelmissä käytetään ultralyhyitä pulsseja lähettäviä lasereita, jotta lämmön vaikutus työstöön saataisiin minimoitua [20, s.2]. Laserstrukturoinnin menetelmillä voidaan strukturoida monia eri materiaalityyppejä. Teollisuudelle merkittävä materiaalityyppi on metallit, ja tulevaisuudessa laserstrukturointia voitasiinkin käyttää teollisuudessa metallipintojen strukturointiin. Kirjallisuudessa laserstrukturointimenetelmillä on metalleista strukturoitu ainakin nikkeliä, alumiinia, titaania, terästä ja kuparia. Myös edellä mainittujen metallien lejeerinkejä on strukturoitu. [11, s. 2–4]

Laserstrukturointimenetelmissä käytetään lasereita, joiden aallonpituusalue on ultraviolettialueelta infrapuna-alueelle. Sekä kiinteän olomuodon lasereita että kaasulasereita voidaan käyttää. [9, s. 2–3] Alla olevassa taulukossa 1 on luettelo laserstrukturoinnissa yleisesti käytetyistä lasereista ja niiden ominaisuuksista.

Taulukko 1. *Laserstrukturoinnissa käytettävät lasertyypit, muokattu lähteestä [9, s. 3].*

Lasertyyppi	**Lasermateriaali**	**Aallonpituus**	**Pulssin pituus**	**Taajuus**
Kiinteän olomuodon laser	Nd:YAG (ensimmäinen harmoninen yliaalto)	532 nm	100–10 ns	50 Hz
	Nd:YAG (toinen harmoninen yliaalto)	355 nm		
	Nd:YAG (kolmas harmoninen yliaalto)	266 nm		
	Nd:YVO4	1 064 nm	2,8–7,9 ps	84 MHz–77 GHz
	Nd:GdVO4	1 053 nm	37 ps	100 MHz
	Nd:BEL	1 070 nm	2,9–7,5 ps	250 MHz–20 GHz
	Nd:LSB	1 062 nm	1,6–208 ps	177–240 MHz
	Nd:lasi	1 054 nm	7 ps	
	Nd:VAN	750–870 nm		

	Nd:YLF	1 047–1 053 nm	1,5–37 ps	76 MHz–2,85 GHz
	Yb:YAG	1 030 nm	340–730 fs	35–81 MHz
	Yb:lasi	1 025–1 082 nm	58–61 fs	112 MHz
	Yb:GdCOB	1 045 nm	90 fs	100 MHz
	Yb:KGW	1 037 nm	176 fs	86 MHz
	Ti:safiiri	750–880 nm	6–150 fs	15 MHz–2 GHz
	Cr:LiCAF	800–820 nm	20–170 fs	90–95 MHz
	Cr:LiSGaF	830–895 nm	14–100 fs	71–119 MHz
	Cr:LiSCaF	860 nm	90 fs	140 MHz
	Cr:Forsteriitti	1,21–1,29 µm	14–78 fs	81–100 MHz
	Cr:YAG	1,52 µm	44–120 fs	81 MHz–1,2 GHz
	kuitulaserit	1 064 nm	100 ns	20–50 Hz
	diodilaserit	0,8 µm		
	mikrosirulaserit	1 064 nm	Vähemmän kuin 100 ps	100 kHz
kaasulaserit	ArF	193 nm	5–25 ns	1–1 000 Hz
	KrF	248 nm	2–60 ns	1–500 Hz
	XeCl	308 nm	1–250 ns	1–500 Hz
	XeF	353 nm	0.3–35 ns	1–1 000 Hz

Kiinteän olomuodon lasereihin kuuluvat kaikki optisesti pumpatut laserit, joissa laseroiva väliaine on kiinteässä olomuodossa. Aktiivinen laseroiva väliaine valmistetaan lisäämällä johonkin aineeseen jonkin alkuaineen ioneita epäpuhtaudeksi. Yllä olevassa taulukossa 1 lasermateriaali on ilmoitettu siten, että ennen kaksoispistettä on epäpuhtausioni ja kaksoispisteen jälkeen on aine, johon epäpuhtausioni lisätään. Esimerkiksi lasermateriaalissa Yb:YAG ytterbiumioneita on sekoitettu yttrium-alumiini-granaattiin ($Y_3Al_5O_{12}$) aktiivisen väliaineen muodostamiseksi. [25, s. 69]

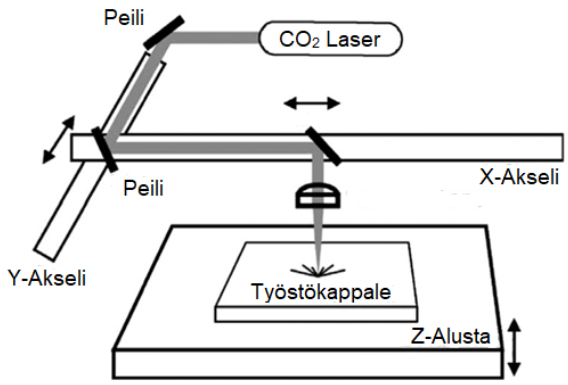
Seuraavissa luvuissa käsitellään laserstrukturoinnin menetelmien toimintaperiaatteita ja rakenteita. Yleisten toimintaperiaatteiden ja rakenteiden lisäksi seuraavissa luvuissa on tarkasteltu nykyään markkinoilla olevia laserstrukturointilaitteita. Tässä työssä käsitellään vain ainetta poistavia laserstrukturoinnin menetelmiä, koska ainetta lisäävät menetelmät ovat hyvin laaja aihe, jota ei voi riittävällä tasolla käsitellä tässä kandidaatintyössä.

3.1 Suorat työstömenetelmät

Suoriin työstömenetelmiin kuuluu kolme eri menetelmää: tavallinen suoratyöstö, galvanometrinen skannaus ja polygoniskannaus. Galvanometriset skannausjärjestelmät ja polygoniskannausjärjestelmät soveltuvat paremmin teolliseen käyttöön kuin tavalliset suoratyöstöjärjestelmät, koska galvanometristen skannausjärjestelmien ja polygoniskannausjärjestelmien tuottavuus on suurempi kuin tavallisten suoratyöstöjärjestelmien tuottavuus. Tämän luvun aliluvut käsittelevät erikseen suoratyöstön eri menetelmiä.

3.1.1 Suoratyöstö

Suoratyöstössä (kuva 2) lasersäde ohjataan useiden peilien kautta linssin läpi, ja linssin avulla keskitetty säde suunnataan muokkaamaan haluttua kohdetta. Suoratyöstössä haluttu pinnan rakenne saadaan aikaan liikuttamalla työstettävää kohdetta tai lasersädettä työstön aikana. Tässä tekniikassa strukturointiin vaikuttavat työstöetäisyys, polttopisteen koko ja polttopisteen korkeus. Suoratyöstössä työstettävää kohdetta tai laseria voidaan liikutella automaattisesti CAD- ohjelmiston ja mikroasemointilaitteiston yhteistoiminnan avulla. [9, s. 6]

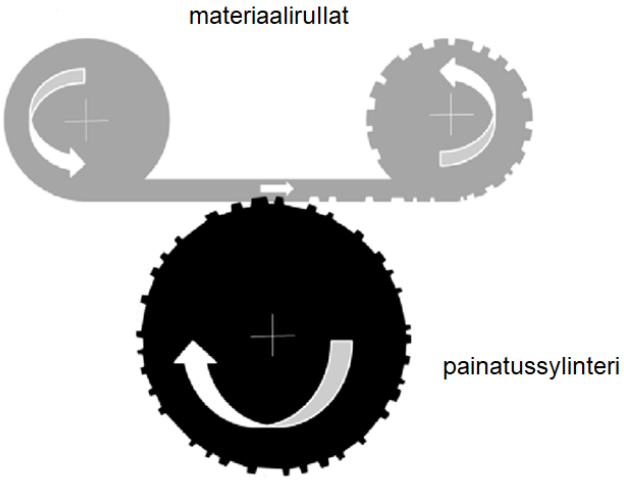


Kuva 2. *Suoratyöstöjärjestelmässä käytettävä rakenne. Muokattu lähteestä [9, s. 6]*

Suoratyöstö on menetelmänä suhteellisen hidas, eikä se hitautensa vuoksi sellaisenaan sovellu suurten pinta-alojen strukturoinnin teollisiin sovelluksiin. Suoraa työstämistä voidaan kuitenkin nopeuttaa lisäämällä järjestelmään monikulmiopeili tai käyttämällä monta lasersädettä samanaikaisesti. Tavallisen suoraa työstämistä hyödyntävän järjestelmän tuottavuutta ja yleistä suorituskykyä voidaan parantaa moninkertaisesti käyttämällä useita lasersäteitä. Suoran työstömenetelmän tuottavuus on suoraan verrannollinen järjestelmässä käytettyihin yksittäisiin lasersäteisiin. Järjestelmässä

voidaan hyödyntää jopa sataa yksittäistä lasersädettä, jolloin järjestelmän teho kasvaa kilowattien suuruiseksi. Laserlähteestä tuleva säde jaetaan yksittäisten säteiden joukoksi joko staattisella diffraktiivisella optisella elementillä tai dynaamisella valon paikan muuntimella. Säteisiin jako voidaan suorittaa myös hilan sisältävällä valoventtiilillä tai piezo-sähköisillä peileillä, mutta näiden kahden teknologian sovelluskohteet ovat rajoitetut. [4, s. 4]

Lisäksi ohuiden kalvojen laserstrukturointia suoralla työstömenetelmällä voidaan nopeuttaa painatussylinterijärjestelmän (kuva 3) avulla. Painatussylinterijärjestelmässä yksi tai useampi suoratyöstömenetelmän lasersäde työstää halutun pinnan rakenteen painatuspinnan painatussylinteriin. Työstettyä painatussylinteriä painetaan työstettävään ohueen kalvoon, jolloin kalvoon saadaan haluttu pinnan strukturointi. Painatussylinteriä pyöritetään, jotta koko kalvo saadaan käsiteltyä. Kyseinen menetelmä soveltuu laajojen pinta-alojen strukturointiin. [2, s. 1]

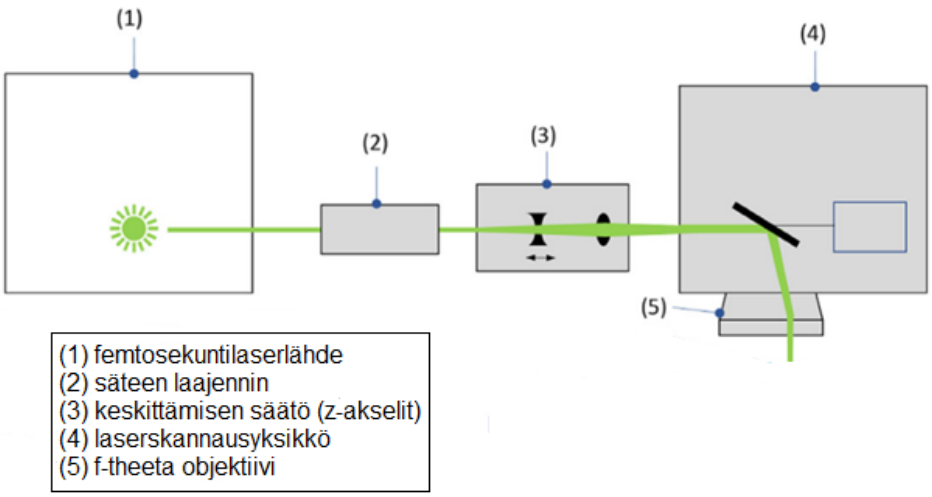


Kuva 3. *Laserstrukturointi painatussylinterin avulla, muokattu lähteestä [2, s. 1]*

Painatussylinterin sisältävällä järjestelmällä voidaan strukturoida esimerkiksi paperia, muovikalvoja ja metallikalvoja. Metallikalvon paksuus voi olla maksimissaan 2 mm. Painatussylinterijärjestelmässä työstönopeus voi parhaimmillaan olla 250 m^2 minuutissa paperille, 10 m^2 minuutissa muoville ja 4 m^2 minuutissa alumiinilevylle. Nämä työstönopeudet riittävät hyvin teollisuuden tarpeisiin. Järjestelmän toimintaa voidaan edelleen nopeuttaa kasvattamalla järjestelmän sylinterin painatuspinnan strukturoinnin työstönopeutta. Painatussylinterin työstön nopeuttamiseen on kaksi lähestymistapaa: joko järjestelmään asennetaan lisää laserlähteitä, tai yhden laserlähteen säde hajotetaan moneksi säteeksi optiikan avulla. [2, s. 1]

3.1.2 Galvanometrinen skannaus

Järjestelmä voidaan suoratyöstömenetelmässä koostaa myös galvanometrin hallinnoimista peileistä ja litteistä linsseistä. [9, s. 6] Tällöin järjestelmää kutsutaan galvanometriseksi skannausjärjestelmäksi (kuva 4) [1, s. 4]. Tyypillinen galvanometrinen laserskanneri koostuu kahdesta pyöritettävästä peilistä, joita ohjataan kahdella rajoitetun pyörimisliikkeen sähkömoottorilla. Laserlähteessä muodostettu lasersäde kohdistetaan peileihin, ja peilit muuttavat lasersäteen suuntaa. Galvanometrisestä skannerista ulostulevan työstösäteen suunta riippuu peilejä ohjaavien sähkömoottoreiden ohjausjännitteistä. Suuri työstönopeus, hyvä asemoinnin toistettavuus, matala hinta ja pieni koko ovat galvanometrisen laserskannausjärjestelmän etuja. [17, s. 1] Muita galvanometrisen skannausjärjestelmän hyviä puolia ovat hyvä tarkkuus, skannaustaajuus, amplitudi ja hinta skannausakselia kohti. [19, s. 1]



Kuva 4. *Esimerkki galvanometrisestä skannauslaitteistosta, muokattu lähteestä [22, s. 3]*

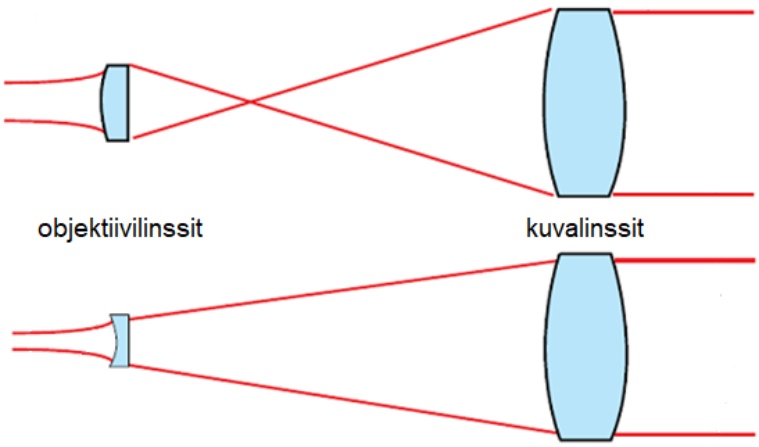
Galvanometrinen skanneri voi sisältää säteen laajentimen (engl. beam expander) ennen säteen siirtymistä skannausyksikköön (engl. scanning unit). Myös muissa laserstrukturoinnin järjestelmissä voi olla säteen laajennin. Kuvan 4 esimerkkijärjestelmässä on säteen laajennin osanumerolla 2. Nimensä mukaisesti säteen laajentimen tehtävä on suurentaa laserlähteestä tulleen säteen halkaisijaa. Säteiden laajentimet kasvattavat säteen poikkipinta-alaa neliöllisesti verrannollisesti laajentimen suurennuskykyyn nähden. Vain pieni osa lasersäteen energiasta menee hukkaan säteen laajentimessa. Säteen poikkipinta-alaa kasvattamalla voidaan pienentää säteen tehotiheyttä ja säteilyvoimakkuutta, minkä ansiosta järjestelmän komponenttien elinikä pitenee, laserin aiheuttamien vaurioiden todennäköisyys

pienenee ja järjestelmässä voidaan käyttää edullisempia pinnoitteita sekä edullisempaa optiikkaa. Lisäksi säteen laajenninta voidaan käyttää säteen poikkipinta-alan pienentämiseen etäisyydellä, joka on huomattavasti laserin apertuuria suurempi. Lyhyellä etäisyydellä säteen laajennin laajentaakin lasersädettä tietyn kertoimen mukaan, mutta pitkällä etäisyydellä lasersäteen koko pienenee saman kertoimen mukaisesti. [29]

Laserstrukturointijärjestelmässä keskitetyn laserpisteen koon minimointiin voidaan myös käyttää säteen laajenninta. Laserpisteen koko riippuu diffraktion ja säteen avaruudellisen poikkeaman yhdistelmästä. Keskittävän linssin muodostama laserpiste on sitä pienempi, mitä suurempi on keskittävään linssiin tuleva lasersäde. Säteen laajentimessa lasersäteen pinta-ala suurenee laajentamiskeroimen mukaan, ja keskittävän linssin muodostama laserpiste pienenee saman laajentamiskertoimen suuruisesti. Tietyllä keskittävään linssiin tulevalla lasersäteen halkaisijalla saavutetaan keskitetyn laserpisteen minimikoko, koska tietyn lasersäteen halkaisijan ylittyessä säteen pallomainen avaruudellinen poikkeama alkaa kasvattamaan keskitetyn laserpisteen kokoa. [29]

Säteen laajentimella voidaan myös suorittaa lasersäteen koon kompensointi. Laserlähteessä tuotetaan lasersäde, jolla on tietty halkaisija, mutta halkaisijalle on asetettu toleransseja. Säädettävällä säteen laajentimella voidaan kompensoida laserlähteen aiheuttama lasersäteen koon vaihtelu, jolloin saadaan muodostettua vakiohalkaisijainen lasersäde. [29]

Lasersäteen laajennin voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: Kepleriläisellä tavalla tai Galileolaisella tavalla. Kääntämällä Kepleriläisen teleskoopin tai Galileolaisen teleskoopin linssit toisin päin saadaan teleskoopista muokattua säteen laajennin. Kepleriläisellä tavalla toteutetussa säteen laajentimessa sisääntuleva lasersäde keskitetään kohtaan, joka on säteen laajentimen objektiivin ja kuvalinssin välissä. Laserin energia keskittyy kohtaan, johon säde on keskitetty. Säteen keskittymiskohdassa ilma lämpenee aiheuttaen muutoksia säteiden kulkureitteihin. Ilma voi myös ionisoitua säteen keskitymiskohdassa. Ilman lämpenemisestä ja ionisoitumisesta johtuen Kepleriläisellä tavalla toteutettuja säteen laajentimia ei juurikaan käytetä. Galileolaisella tavalla toteutetussa säteen laajentimessa lasersädettä ei keskitetä objektiivin ja kuvalinssin väliin, eli lasersäde laajenee lineaarisesti ennen kuvalinssiin tuloa. Alla olevassa kuvassa on Kepleriläisen ja Galileolaisen säteen laajentimen periaatteet. Kepleriläinen säteen laajennin on kuvassa ylimmäisenä. [29]



Kuva 5. *Kepleriläinen ja Galileolainen säteen laajennin, muokattu lähteestä [29]*

Galvanometrisissä skannereissa käytetään usein f-theeta linssejä. Skannerissa käytettävä linssi on valittava laserin ja strukturoitavan muodon perusteella. Käyttämällä f-theeta linssejä saadaan tasomainen tarkennuspinta ja lähes vakio laserpisteen suuruus koko skannauskentälle. Laserpisteen sijainti skannauskentällä riippuu suoraan skannauskulmasta. Skannausjärjestelmissä käytetyt f-theeta linssit jaetaan viiteen pääkategoriaan: optinen lasi, kvartsilasi, telesentrinen, värikorjattu ja monispektrinen. Optisten lasilinssien tapauksessa haasteena on se, että tavallisten optisten lasien ominaisuudet vaikuttavat voimakkaasti laserstrukturonitiprosessiin. Esimerkiksi lämpövaikutukset muuttavat optisessa lasissa sekä laserpisteen muotoa että työstöetäisyyttä. Kvartsilasista valmistetut linssit ovat vähemmän herkkiä lämpövaikutuksille kuin optisesta lasista valmistetut linssit, joten kvartsilasista valmistettujen f-theeta linssien käyttö laserstrukturoinnissa on suositeltavampaa kuin optisesta lasista valmistettujen linssien käyttö. Laserstrukturointijärjestelmän linssien lämpöominaisuuksien huomioiminen on tärkeää, sillä laserstrukturoinnissa käytetyt ultralyhytpulssiset laserit kohdistavat paljon lämpöenergiaa myös systeemin linsseihin. [26]

Telesentriset f-theeta linssit antavat lasersäteelle kohtisuoran tulokulman työstöpinnalle. Kolmiulotteisessa laserstrukturoinnissa lasersäteen on osuttava työstöpintaan kohtisuoraan, joten telesentrisiä linssejä voidaan käyttää kolmiulotteisessa laserstrukturoinnissa. Telesentrisen f-theeta linssin haittapuolena on kuitenkin yleisesti pienempi polttotaso kuin linsseissä, jotka eivät ole telesentrisiä. Pienempi polttotaso johtuu siitä, että telesentrisessä linssissä etulinssin elementtien koon on oltava suurempi kuin skannauspinta-ala. Lasersäteen kohtisuoran tulokulman lisäksi toinen huomioitava asia laserstrukturoinnissa on värivirhe. Vaikka femtosekunnin mittaisilla laserpulsseilla ei tapahdu dispersiota materiaaleissa, laserpulssin spektrin aiheuttama värivirhe on

kuitenkin merkittävä. Laserpulssin spektrin leveys kasvaa nopeasti pulssien pituuksien pienentyessä ja aallonpituuksien kasvaessa. Laserpulssin spektrin leveyden kasvamisesta aiheutuu värivirhe, jossa keskitetyn lasersäteen paikka vaihtelee eri väreillä. Lasersäteen paikan poikkeama halutusta paikasta riippuu polttovälistä ja aallonpituudesta. Esimerkiksi erityisesti femtosekunnin mittaisia laserpulsseja lähettäville lasereille on saatavilla värivirheen korjaavia linssejä. Linssi voi korjata värivirheen joko yhdellä aallonpituudella, usealla eri aallonpituudella tai jollakin aallonpituusvälillä. Värikorjatuksi linssiksi kutsutaan linssiä, joka korjaa värivirheen yhdellä aallonpituudella tai useammalla aallonpituudella. Jollakin aallonpitusvälillä värivirheen korjaavaa linssiä kutsutaan monispektriseksi linssiksi. [26]

Nykyään galvanometrisia skannausjärjestelmiä valmistavat muun muassa saksalaiset Gehring [23] ja SCANLAB [24]. SCANLABin tuotteisiin kuuluu XL SCAN, joka soveltuu erityisesti suurten pinta-alojen laserstrukturontiin. XL SCAN- laitteella on tällä hetkellä laserstrukturontilaitemarkkinoiden paras työstötarkkuus. Korkean työstönopeuden ja suuren tarkkuuden mahdollistaa synkronoitu skannauspään ja työstökappaleen alustan ohjaus ohjelmistolla, joka suunnittelee laserille älykkään kulkureitin. Lasersäteen liike työstettävän kappaleen päällä jaetaan automaattisesti skannauspään ja alustan välille, jolloin laitteiston dynamiikka saadaan parhaiten hyödynnettyä. Skannauspää on vastuussa lyhyistä nopeista liikeistä, kun taas alustan tehtävä on laajentaa skannauspään toiminta-aluetta. SCANLAB visioi, että useita XL SCAN- laitteita voitaisiin asettaa toimimaan yhteistyössä strukturoimaan samaa kappaletta, jolloin työstöprosessia saataisiin nopeutettua huomattavasti. [24]

XL SCAN- laitteessa galvanometrisen skannausyksikön lasersädettä ohjaavaa peiliä liikuttava sähkömoottori on kytketty erilliseen ohjausyksikköön EtherCAT-automaatioväylällä. Ohjausyksikön muodostamat sähkömoottorin ohjaukset siirtyvät siis sähkömoottorille omaa tiedonsiirtoväylää pitkin. Työstötiedot XL SCAN- laite saa käyttäjältä Windows-tietokoneeseen yhdistettyä automaatioväylää pitkin. Tietokoneelle täytyy asentaa lasertyöstökoneen ohjaukseen tarkoitettu ohjelma, jotta käyttäjä voi kommunikoida laitteen kanssa. Teoriassa esimerkkilaitteessa saavutetaan rajoittamaton työstöala, koska esimerkkilaitteen työstöalaa rajoittavat ainoastaan alustan akselien liikepituudet. [24]

Gehring valmistaa GLS 1000 -työasemaa, joka on tarkoitettu suurten pinta-alojen laserstrukturointiin. Gehringin työasema voi maksimissaan strukturoida 200 x 200 mm suuruisen pinta-alan. Työasemaan voidaan asentaa erilaisia laserlähteitä, joiden teho vaihtelee välillä 20 W – 200 W. Erilaisia työkappaletta ohjaavia akselisysteemejä voidaan asentaa laitteeseen. Laitteen ohjaus voi tapahtua kolmella tavalla: manuaalisesti,

puoliautomaattisesti tai täysin automaattisesti. Käyttäjä ohjaa laitetta siihen kytketyn tietokoneen avulla. Erillistä tietokonetta työasemaan ei liitetä, vaan laite kykenee toimimaan täysin itsenäisesti, koska se sisältää oman tietokoneen ohjausnappeineen. [23]

3.1.3 Polygoniskannaus

Asentamalla suoraan työstöön perustuvaan laitteistoon monikulmiopeili saadaan strukturointinopeutta kasvatettua yli sataan metriin sekunnissa. Monikulmiopeiliä pyöritetään vakionopeudella, ja haluttu pinnan rakenne muodostetaan kohdistamalla laserpulsseja monikulmiopeiliin sopivalla ajanhetkellä. Laserlähteen ohjaus monikulmiopeilin asennon mukaan voidaan toteuttaa esimerkiksi Field-programmable gate array- mikropiirin avulla. Suuren pinta-alan prosessoimiseksi lasersädettä ohjataan suoraa pitkin ja siirtämällä tätä suoraa saadaan suoritettua kaksiulotteinen prosessointi. Tällä tavoin koko työstettävä kappale voidaan prosessoida käyttämällä bittikarttoja. [4, s. 3-4] Kaksiulotteisen prosessoinnin vaatima lasersädesuoran liikuttaminen voidaan toteuttaa joko liikuttamalla työstettävää kohdetta tai käyttämällä järjestelmään lisättyä galvanometristä peiliä. [20, s. 2] Kuten galvanometrisissä skannereissa, myös polygoniskannereissa käytetään usein f-theeta linssejä.

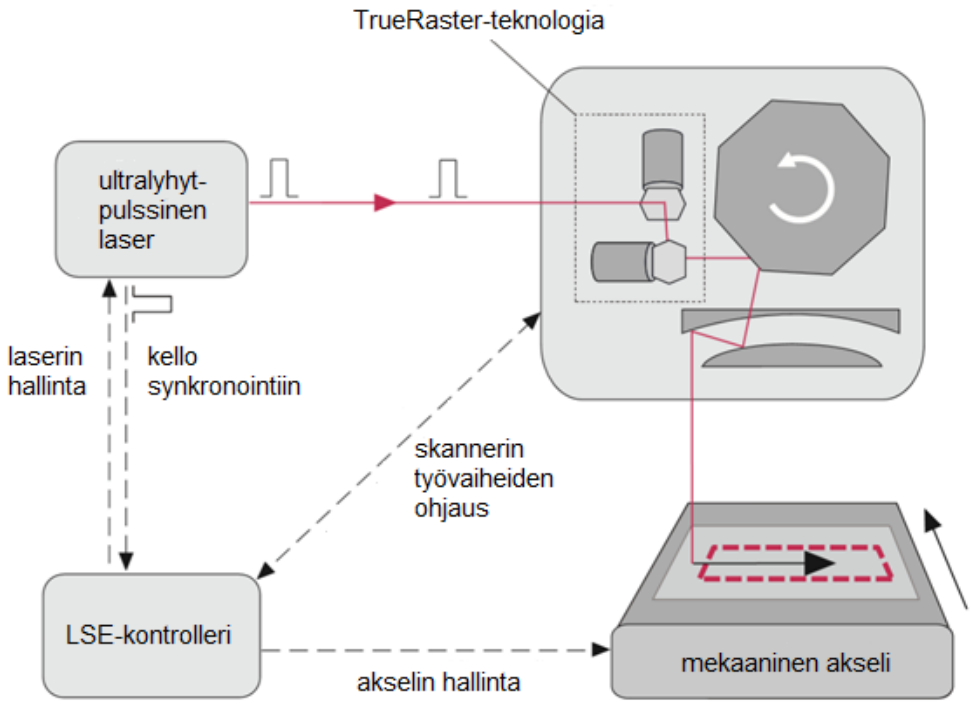
Polygoniskannauksen etuja galvanometriseen skannaukseen verrattuna ovat polygoniskannereiden nopea työstönopeus ja lineaarinen työstöliike. Muita polygoniskannauksen etuja ovat matala hinta ja korkea pinnan vaurioitumisen kynnysteho. Toisin kuin galvanometrisessä skannauksessa, polygoniskannauksessa työstönopeus on vakio järjestelmän monikulmiopeilin vakiopyörimisnopeuden seurauksena. [18, s. 1] Polygoniskannausjärjestelmän skannausnopeus riippuu järjestelmän monikulmiopeilin kulmataajuudesta ja monikulmiopeilin särmien määrästä. Nykyään Polygoniskannausjärjestelmien monikulmiopeilit voivat suurimmillaan pyöriä 60 000 kierrosta minuutissa, ja kehitteillä on järjestelmiä, joiden monikulmiopeili pyörii 120 000 kierrosta minuutissa. Kaupallisten polygoniskannausjärjestelmien monikulmiopeilin särmien lukumäärä vaihtelee välillä 5-128. Kaupallisissa järjestelmissä yleisin monikulmiopeilin särmien lukumäärä on 72. [19, s. 1]

Polygoniskannerijärjestelmillä ultralyhyitä pulsseja lähettävien laserien teho voidaan hyödyntää optimaalisesti ilman prosessoidun materiaalin liiallista lämpenemistä. Polygoniskannerijärjestelmissä pulssien päällekkäisyys on vähäistä, minkä ansiosta saavutetaan optimaalinen pinnan strukturoinnin tulos. [20, s. 2] Alla olevassa taulukossa on kooste polygoniskannausjärjestelmän tyypillisistä parametreista.

Taulukko 2. *Polygoniskannausjärjestelmän tyypilliset parametrit, muokattu lähteestä [20, s. 2]*

Aallonpituus	1030 nm – 1070 nm, 532 nm, 355 nm
Apertuuri	20 mm
Polttoväli	163 mm / 340 mm
Skannausnopeus	360 m/s / 750 mm/s
Skannauspituus	100 mm / 210 mm
Aikaresoluutio	12.5 ns / 1 µs
Aikaresoluution vaihtelu	25 ns / 5 µs

Avaruudellinen resoluutiokyky vaihtelee laitteistoissa ja se riippuu laitteiston hallintaan käytettävästä systeemistä sekä skannauspään rakenteesta. Esimerkiksi skannausnopeuden ollessa 100 m/s ja polttovälin ollessa 163 mm ± 3 µm:n avaruudellinen resoluutio on saavutettavissa hybridiskannerilla. Alla olevassa kuvassa 5 on esimerkki siitä, millainen polygoniskannausjärjestelmän rakenne voi käytännössä olla.



Kuva 6. *Esimerkki polygoniskannauslaitteistosta, muokattu lähteestä [21, s. 2]*

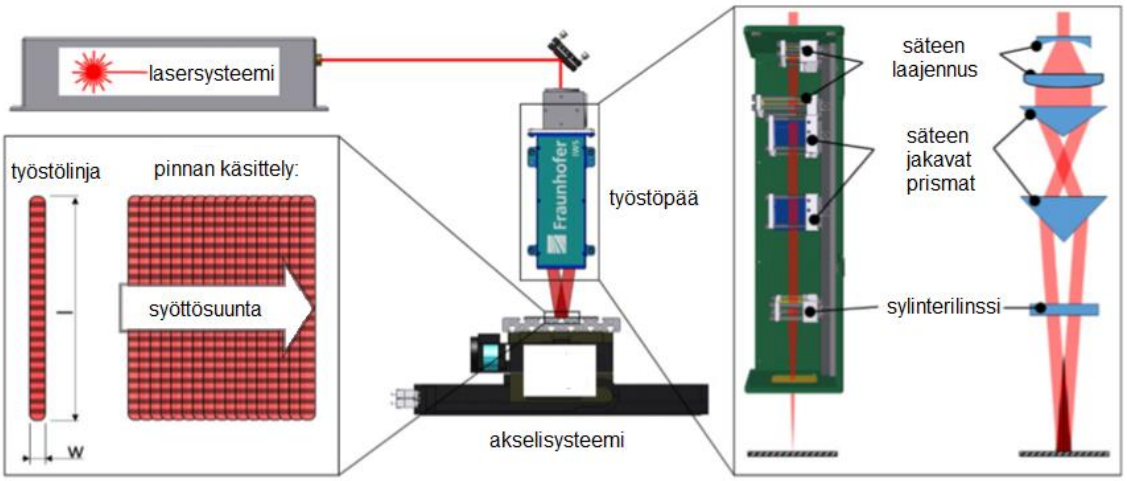
Kuvan 5 laitteisto on next scan technologyn valmistama kaupallinen laitteisto. Kyseisellä laitteistolla käyttäjä voi suorittaa haluamansa strukturoinnin laatimalla strukturoitavasta rakenteesta bittikartan. Käyttäjän laatima bittikartta syötetään laitteistolle, joka osaa ohjata laserlähdettä bittikartan pikselin tarkkuudella. Polygoniskannerin työvaiheiden ohjaus on esimerkkilaitteistossa toteutettu erillisellä Line Scan Engine (LSE) -

kontrollerilla. LSE-kontrolleri ohjaa myös työstettävän kohteen liikettä ja laserlähdettä. Itse polygoniskanneri pitää sisällään LSE-moduulin, jossa on telesentriset peilit sisältävä työstöpää. Peileihin perustuva konsepti mahdollistaa sovelluskohtaisen räätälöinnin portaittaisen tai jatkuvan määrittelyn kautta. Laitteiston tarkkuutta ja joustavuutta on parannettu TrueRaster-tekniikan avulla. TrueRaster- tekniikka koostuu kahdesta lasersädettä suuntaavasta ohjaimesta, joilla voidaan kompensoida monikulmiopeilin epätarkkuuksia ja kuvakentän vääristymiä. Laserskannausjärjestelmän tarkkuus ja toistettavuus ovat hyvin tärkeitä ominaisuuksia yksittäisten laserpulssien osumakohdan erottelussa, hyvässä työstölinjan suoruudessa ja identtisessä toistuvassa strukturoinnissa. [21, s. 2]

Polygonilaserskannereissa on usein sisäisen kellon sisältävä laserlähde. Laserlähteen sisäisellä kellolla säädellään laseremission ajankohtaa. Kuvan 3 esimerkkilaitteistossa laserlähteen sisäinen kello ja LSE-kontrollerin kello on synkronoitu keskenään, jotta laitteiston asemoinnille saavutetaan vaadittu toistettavuus. Lisäksi polygonilaserskanereissa älykkäillä skannauksen strategioilla voidaan parantaa laserstrukturoinnin laatua. Muun muassa lomittelu ja strukturoinnin työvaiheiden järjestyksen optimointi kuuluvat älykkäisiin laserstrukturoinnin strategioihin. [21, s. 2]

3.2 Laserinterferessi

Interferenssimenetelmässä (kuva 3) laserilla muodostetaan interferenssikuvio, jonka intensiteettikohdissa materiaalipinta strukturoituu. Interferenssikuvio saadaan muodostettua siten, että järjestelmän päälasersäde jaetaan useampiin yksittäisiin lasersäteisiin, jonka jälkeen yksittäiset lasersäteet asetetaan päällekkäin. [9, s. 6] Laserinterferenssimenetelmillä saavutetaan parempi työstötarkkuus kuin suoratyöstömenetelmillä: suoratyöstömenetelmien tarkkuuden ollessa 5–25 µm interferenssimenetelmien tarkkuus on alle 5 µm. Suuria materiaalialueita voidaan strukturoida erittäin nopeasti laserinterferenssiin perustuvilla laitteistoilla. [16, s. 1]



Kuva 7. *Esimerkki laserinterferenssiin perustuvasta strukturointijärjestelmästä. Muokattu lähteestä [6, s. 2].*

Laserinterferenssilaitteistojen tuottama pintageometria riippuu pääasiassa lasersäteiden määrästä. Pintageometria toistuu samanlaisena tietyn matkan välein, ja tätä matkaa voidaan vaihtaa muuttamalla järjestelmän lasersäteiden leikkauskulmaa. Tavallisella interferenssimenetelmällä voidaan työstää jaksollisia viivoja ja kolmio-, neliö- tai kuusikulmiomuodostelmassa olevia syvennyksiä. Työstettävissä olevat muodot ovat siis hyvin rajoitetut, kun käytetään tavallista interferenssimenetelmää. Työstettävissä olevien muotojen määrää voidaan kuitenkin kasvattaa kääntelemällä työstettävää kohdetta työstämisen aikana. Työstettävää kohdetta voidaan myös liikutella pienissä askelissa interferenssikuvioiden intensiteettikohtien välissä, jolloin mahdollisten pintarakenteiden määrää saadaan edelleen kasvatettua. Materiaalipinnan liikutteleminen intensiteettikohtien välissä mahdollistaa kaikkien jaksollisten pintarakenteiden muodostamisen, mutta se vaatii toimiakseen hyvin tarkkoja asemointisysteemeitä ja kalliita femtosekuntilasereita. [16, s. 1]

Materiaalipinnan kiertämisen ja liikuttamisen lisäksi interferenssimenetelmälle mahdollisten työstömuotojen määrää voidaan kasvattaa muuttamalla lasersäteiden ominaisuuksia. Muutettava lasersäteen ominaisuus on joko vaihe tai polarisaatio. Työstäminen pelkkää vaihetta muuttamalla ei kuitenkaan sovellu suurten pinta-alojen laserstrukturointiin, koska pinta strukturoituu vain pienessä osassa interferenssikohtaa. Polarisaatiota muutettaessa taas lasersäteen intensiteetti pysyy samana koko interferenssikohdan matkalla, joten polarisaation muuttaminen soveltuu laajojen pinta-alojen käsittelyyn. Lisäksi lasersäteen polarisaatiota kontrolloimalla saadaan työstömuodoille enemmän variaatioita kuin lasersäteen vaihetta muuttamalla. [16, s. 2]

Seuraavan sivun taulukossa on esitelty laserinterferenssimenetelmän tyypillisiä parametreja. Kuten taulukosta nähdään, interferenssimenetelmään perustuvissa

laitteistoissa työstöala on suhteellisen suuri verrattuna esimerkiksi galvanometriseen skannaukseen perustuviin laitteistoihin. Poiketen muista laserstrukturoinnin menetelmistä laserinterferenssimenetelmällä voidaan strukturoida myös kolmiulotteisia kappaleita. Prosessoitavat materiaalit interferenssimenetelmässä ovat täysin samat kuin muissakin laserstrukturoinnin menetelmissä.

Taulukko 3. *Laserinterferenssilaitteiston tyypilliset parametrit. Muokattu lähteestä [27, s. 2].*

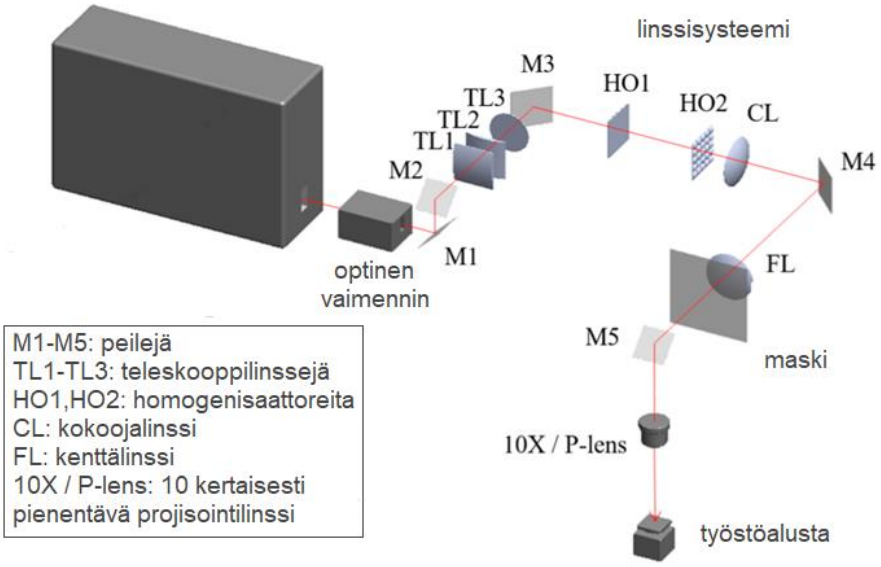
työstöetäisyys	5 – 60 cm
työstöala	enintään 500 x 500 mm
lasereiden aallonpituudet	1064, 532, 355 ja 266 nm
pulssin toistotaajuus	10 Hz – 50 kHz
työstöpään mitat	150 mm x 200 mm x 300 mm
strukturoitujen piirteiden etäisyys toisistaan	noin 150 nm – 30 µm
työstönopeus	0.001 – 0.700 m²/min
prosessoitavat geometriat	2D- ja 3D-osat
prosessoitavat materiaalit	polymeerit, keraamit, metallit, pinnoitteet

Nykyään ainoa laserinterferenssimenetelmään perustuvia laserstrukturointilaitteita myyvä taho on Fraunhofer-instituutti. Fraunhoferin tarjoamissa laitteissa yksi laserpulssi voi prosessoida usean neliösenttimetrin pinta-alan, mikä johtaa useiden neliösenttimetrien strukturointinopeuteen sekunnissa. Strukturointinopeus on riippuvainen käsiteltävästä materiaalista. Fraunhoferin laserinterferenssimenetelmään perustuviin laitteisiin voidaan liittää erilaisia lasersysteemeitä, jotta saadaan haluttu työstönopeus, pinnan geometria tai kyky käsitellä kolmiulotteisia kappaleita. Kolmiulotteisten kappaleiden työstäminen voidaan mahdollistaa esimerkiksi kiinnittämällä työstölaite robottikäsivarren päähän. Työstön aikana Fraunhoferin kehittämissä laitteissa voidaan muuttaa strukturoinnin toistuvuuden välimatkaa ja strukturointikuvioiden suuntaa. Tästä johtuen järjestelmillä voidaan saada aikaan suuri määrä erilaisia pintarakenteita. Fraunhoferin laitteisiin voidaan liittää painatussylinteri asiakkaan niin halutessa. Laitteiden hallintaan Fraunhofer tarjoaa erillistä ohjelmistoa. [27, s. 2]

3.3 Maskitekniikat

Kun järjestelmä perustuu maskitekniikkaan (kuva 7), lasersäde muodostaa ensin halutut piirteet maskille, jonka jälkeen piirteet projisoidaan maskilta käsiteltävään kappaleeseen. Käytetty projisointisysteemi ja maski vaikuttavat menetelmän tarkkuuteen. Koko maskin

alueelle halutaan samansuuruinen laserin intensiteetti, minkä vuoksi maskitekniikkaan perustuvassa menetelmässä lasersäteen on oltava homogeeninen. Maskitekniikan etuja ovat kyky käsitellä laajoja alueita, erinomainen syvyyden hallinta, erinomainen toistettavuus ja hyvä tarkkuus. [9, s. 6]



Kuva 8. *Esimerkki maskitekniikkaan perustuvasta järjestelmästä. Muokattu lähteestä [14, s. 2].*

Maskitekniikalla toimiva järjestelmä voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: binäärinen (engl. binary) tai harmaasävyasteikkoinen (engl. grey-scale). Luokittelu perustuu järjestelmässä käytettävän maskin ominaisuuksiin. Binäärisessä järjestelmässä maskin läpi lähetetään sarja laserpulsseja. Laserpulssien maskille muodostamia kuvioita ja työstön kohdetta liikutellaan sopivasti, jolloin saadaan aikaan haluttu pinnan rakenne. Binäärisenä maskina käytetään usein kromikuvioitua kvartsilevyä. Kolmiulotteinen pinnan rakenne muodostuu tässä menetelmässä siten, että kaksiulotteiset työstökuviot asetetaan päällekkäin tietyissä kohdissa ja tietyllä tavalla suunnattuina. Maskista heijastuva kuvio ja laserin kulkema reitti on suunniteltava tarkasti, jotta haluttu kolmiulotteinen rakenne saadaan muodostettua. [14, s. 2]

Harmaasävyasteikkoiseksi luokitellussa järjestelmässä käytetään nimensä mukaisesti joko harmaasävyistä tai puolisävyistä maskia. Näissä järjestelmissä kappaleeseen kohdistuvaa integroitua vuontiheyttä hallitaan maskilla, joka muuttaa laserin läpäisykerrointa maskin eri kohdissa. Haluttu pinnan rakenne saadaan työstettyä valitsemalla sopiva laserin integroitu vuontiheys ja laserin työstönopeus. Harmaasävyasteikkoisiksi luokitelluissa järjestelmissä käytetään kuitenkin yleensä mikrokuvioita sisältäviä binäärisiä maskeja, joiden mikrokuviot saavat aikaan halutun pintarakenteen. Binäärisiä maskeja käytetään usein harmaasävyisten tai puolisävyisten

maskien tilalla, koska harmaasävymaskin valmistaminen on käytännössä erittäin haastavaa. [14, s. 3]

Harmaasävyisillä järjestelmillä voidaan suorittaa monimutkaisia strukturointeja, joita on hyvin vaikeaa tai mahdotonta suorittaa binäärisillä järjestelmillä. Tämä johtuu siitä, että harmaasävyiset järjestelmät ovat yksinkertaisempia ja suorempia kuin binääriset järjestelmät. Harmaasävyiset järjestelmät ovat kuitenkin binäärisiä kalliimpia maskien mikrokuvioinnista johtuen. [14, s. 3]

Maskitekniikkaan perustuvassa järjestelmässä läserlähteen jälkeen lasersäde voidaan ohjata optiseen vaimentimeen (engl. optical attenuator). Edellisellä sivulla olevan kuvan 8 esimerkkijärjestelmään on liitetty optinen vaimennin. Optiset vaimentimet ovat laitteita, joita voidaan käyttää valonsäteen vaimentamiseen. Valonsäteen vaimentamisella tarkoitetaan valonsäteen optisen tehon pienentämistä. Optista vaimentamista mitataan usein optisen tiheyden tai desibelien avulla. [30]

Laserstrukturointijärjestelmässä voidaan käyttää kolmea erilaista optista vaimenninta: absorvoivaan suodattimeen perustuvaa vaimenninta, heijastavaa vaimenninta tai polarisaatioon perustuvaa vaimenninta. Absorboivaan suodattimeen perustuva vaimennin perustuu vaimentimessa olevan materiaalin kykyyn absorboida laservalon optista energiaa. Absorboivassa suodattimessa voidaan käyttää esimerkiksi lasia, johon on sekoitettu epäpuhtaudeksi toista ainetta. Epäpuhtautta käytetään lasissa kontrolloimaan optisen energian absorption määrää tietyllä aallonpituusalueella. Optista energiaa absorboiva materiaali on yleensä levynä vaimentimen sisällä. Useita levyjä voidaan kytkeä sarjaan vaimentumisen kasvattamiseksi. Vaihtelemalla vaimentimessa olevien levyjen määrää voidaan säätää vaimennuksen voimakkuutta. [30]

Heijastavissa optisissa vaimentimissa on sisällä levy, jonka kautta valo heijastetaan vaimentuneena. Fysikaalisesti heijastavat optiset vaimentimet perustuvat Fresnelin heijastumiseen. Tyypillisesti heijastavat optiset vaimentimet säilyttävät sisääntulevan lasersäteen tehosta vain muutaman prosentin. Polarisaatioon perustuvassa vaimentimessa taas käytetään lasersäteen polarisaatiosuuntaa muuttavaa levyä. Polarisaatiosuuntaa muuttavan levyn jälkeen lasersäde kohdistetaan polarisaattoriin. Muuttamalla lasersäteen polarisaatiosuuntaa saadaan polarisaattorissa aiheutuvaa optista vaimennusta säädeltyä. Polarisaatioon perustuvia optisia vaimentimia ei voida käyttää lasereille, joita ei ole polarisoitu. Myös lasereille, joiden polarisaatiotila on määrittämätön ei voida käyttää polarisaatioon perustuvia optisia vaimentimia. [30]

4. MALLINNUS

Laserstrukturoinnissa optimaalisen suorituskyvyn saavuttaminen on haastavaa, koska strukturointiprosessi on hyvin intensiivinen, lyhytaikainen, monimutkainen ja luonteeltaan stokastinen. Kuitenkin optimaalista suorityskykyä voidaan tavoitella selvittämällä laserlaitteistojen parametrien ja strukturointiprosessin suorituskyvyn välinen yhteys. Laitteistoparametrien ja strukturointiprosessin suorituskyvyn välisistä riippuvuuksista muodostetaan matemaattinen malli, ja optimointiin käytetään sopivaa optimointialgoritmia. Strukturoinnin matemaattista mallintamista ei tarvita ainoastaan strukturoinnin optimointiin, vaan sitä tarvitaan myös prosessin onnistuneeseen toimintaan ja tarkkaan hallintaan. Strukturointiprosessista muodostettu matemaattinen malli voi olla mekanistinen tai empiirinen. Mekanistiseksi malliksi kutsutaan mallia, jossa toiminnallinen yhteys sisääntulo-, ulostulo- ja prosessiparametrien välillä on määritetty analyyttisesti. Empiirinen malli taas määritetään kokeiden avulla. [9, s. 28]

Optimoinnissa käytetyt mallit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: tarkan ratkaisun antavat mallit, numeeriseen ratkaisuun perustuvat mallit ja stokastisen ratkaisun antavat mallit. Tarkkaan ratkaisuun perustuvat mallit eivät anna yleensä todellista ratkaisua, koska ne yleensä perustuvat johonkin hypoteesiin. Stokastisen ratkaisun antavat mallit taas eivät sovellu laserstrukturoinnin mallintamiseen niiden todennäköisyyteen perustumisen vuoksi. Kaikista käyttökelpoisimpia malleja ovat siis numeeriseen ratkaisuun perustuvat mallit, joissa monimutkaiset yhtälöt ratkaistaan esimerkiksi finite element method (FEM) -, finite difference method (FDM) - tai boundary element method (BEM) -periaatteella. Laserstrukturoinnin mallinnustekniikat perustuvat pääasiassa tilastolliseen regressioon, sumean joukon teoriaan ja keinotekoisiin hermoverkkoihin. Yhteenvetona laserstrukturoinnissa voidaan siis käyttää joko kokeellisia, analyyttisiä tai tekoälyyn perustuvia matemaattisia malleja. [9, s. 28]

Yleisimmin käytetty kokeellinen metodi on design of experiment, jolla määritetään tilastollisesti yhteys sisääntuloparametrien ja ulostulon käyttäytymisen välille. Design of experiment -metodissa käytetään systemaattista tapaa kokeen suunnitteluun, datan keräämiseen ja datan analysoimiseen. Sisääntuloparametrien ja ulostulon käyttäytymisen välisen yhteyden matemaattinen malli voidaan muodostaa muun muassa ANOVAn tai regressioanalyysin avulla. Design of experiment- metodin avulla voidaan suorittaa laserstrukturointiparametrien optimointi, tai sillä voidaan ennustaa laserstrukturointiprosessia. Useimmin käytettyjä design of experiment- tekniikoita ovat response surface modeling, central composite design, Taguchin metodi ja factorial

design. Esimerkiksi Taguchin metodia on aiemmin käytetty Nd:YAG laserilla tehtävän laserstrukturoinnin mallintamiseen. Kyseisessä esimerkissä laserstrukturointiprosessin sisääntuloparametreja olivat säteen laajennussuhde, polttopisteen etäisyys, laserin teho, laserpulssin toistotaajuus ja työstönopeus. Ulostulon käyttäytymisen parametrina taas oli työstölinjan leveys. [9, s. 28]

Laserstrukturoinnissa analyyttiset mallit ovat parhaita työkaluja alustavaan analyysiin. Kirjallisuudessa laserablaatiolle on kehitetty suuri määrä analyyttisiä malleja, jotka ottavat huomioon esimerkiksi eri aallonpituudet, säteilyvoimakkuuden, pulssin pituuden, kohdemateriaalin ja työstöympäristön. Yksi laserablaatiota kuvaava analyyttinen malli on kuvattu tämän työn alussa luvussa fysikaalinen perusta. [9, s. 28–29]

Laserstrukturointi on monimutkainen prosessi, jonka hyödyntämiseen voidaan löytää käyttökelpoisia ratkaisuja tekoälyn avulla. Ongelman ratkaisevaan tekoälyyn kehitetään asiantuntijasysteemi (engl. expert system), joka voi perustua sumeaan logiikkaan, hermoverkkoon tai geneettiseen algoritmiin. Asiantuntijatason tiedot jostakin tietystä asiasta sisältävää systeemiä kutsutaan tekoälyssä asiantuntijasysteemiksi. Tietojensa perusteella asiantuntijasysteemi osaa muodostaa oikean ratkaisun eri ongelmiin. Asiantuntijasysteemi koostuu kolmesta osasta: tietokannasta, päättelymoottorista (engl. inference engine) ja käyttöliittymästä. [9, s. 30]

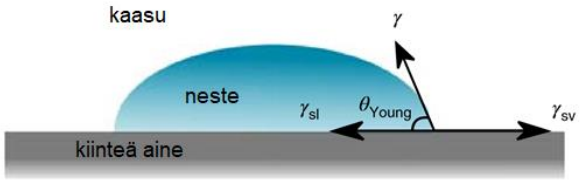
Sumeaan logiikkaan perustuvaa asiantuntijasysteemiä voidaan käyttää tilanteissa, joissa laskennan parametrit voidaan määritellä vain epämääräisesti. Alan asiantuntijoiden subjektiivisen tietämyksen tai mielipiteen ollessa merkittävässä asemassa sumeaan logiikkaan perustuvan tekoälysysteemin käyttö ongelmanratkaisussa on suositeltavaa. Ammattitaitoisen käyttäjän subjektiivisen tietämyksen tai mielipiteen muuntaminen matemaattiseen muotoon voi olla tehokasta sumeaan logiikkaan perustuvalla tekoälyllä. [9, s. 30]

Hermoverkkoon perustuvassa tekoälyssä tekoäly osaa johtaa suoraan datasta lineaarisia ja epälineaarisia riippuvuuksia sisään- ja ulostulojen välille. Hermoverkot koostuvat yksinkertaisista ohjelmistorakenteista, jotka toimivat samanaikaisesti toistensa rinnalla. Hermoverkkoon perustuvaa tekoälyä on käytetty useissa lasermikrotyöstämisen laiteparametrien optimointia käsittelevissä tutkimuksissa. [9, s. 31] Geneettiset algoritmit taas ovat funktion maksimi- ja minimikohdan etsimisessä käytettyjä työkaluja. Hyvin lähellä tarkkaa oikeaa ratkaisua oleva arvo löydetään geneettisissä algoritmeissa iteratiivisesti. Geneettisiä algoritmeja voidaan käyttää optimointisovelluksissa, joissa lähes optimaaliset olosuhteet ovat hyväksyttävät. [9, s. 31]

5. SOVELLUSESIMERKKEJÄ

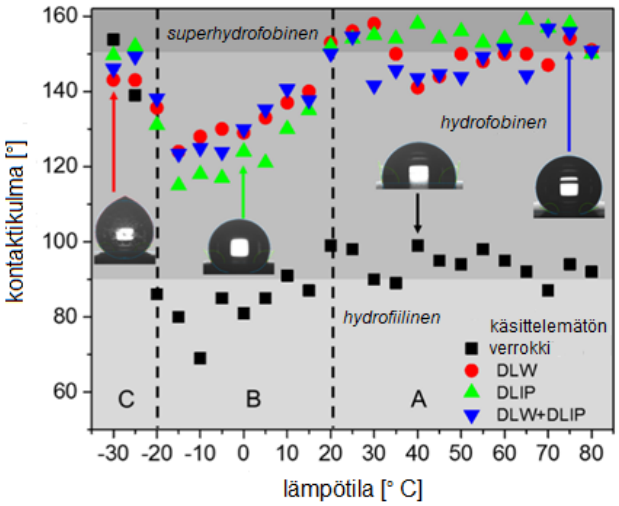
5.1 Vettä hylkivät pinnat

Materiaalipinnasta voidaan tehdä voimakkaasti vettä hylkivä materiaalipinnan strukturoinnin avulla. Esimerkiksi Millesin tutkimusryhmä strukturoi Al2024 alumiinipintaan kolmiomaisia, pilarimaisia ja hierarkkisia mikrorakenteita käyttämällä suoratyöstöä sekä interferenssimenetelmää erikseen ja yhdessä. Alumiinipinnan vettymistä tutkittiin 95 päivän ajanjaksolla useissa eri lämpötiloissa. Kaikki kolme strukturoitua pintarakennetta osoittautuivat superhydrofobisiksi vesipisaran ja alumiinipinnan välisen kulman ollessa yli 150° 12-15 päivän jälkeen. [8, s. 9] Kuvassa 8 on havainnollistettu, miten vesipisaran ja pinnan välinen kulma θ määritellään.



Kuva 9. *Vesipisaran ja pinnan välinen kulma θ, muokattu lähteestä [15, s. 2]*

Kuvassa 10 on kuvaaja vesipisaran kontaktikulmasta lämpötilan funktiona. Kuvaajasta huomataan strukturoitujen näytteiden vettymisen selvä ero käsittelemättömään näytteeseen verrattuna. Kuvaajassa on myös havainnollistettu, miltä vesipisarat ovat näyttäneet kullakin kontaktikulmalla.



Kuva 10. *Vesipisaran kontaktikulma, muokattu lähteestä [8, s. 6]*

Millesin tutkimusryhmä teki myös kokeita, joissa strukturoiduille pinnoille tiputettiin vesipisara. Tiputetun vesipisaran käyttäytymistä tutkittiin ajan funktiona. Tutkimusryhmä

sai selville, että sekä suoratyöstömenetelmällä että laserinterferenssimenetelmällä tuotetut hierarkkisia mikrorakenteita sisältävät pinnat ponnauttivat tiputetun vesipisaran takaisin ylöspäin. Muita pinnan mikrorakenteita sisältävät strukturoidut pinnat taas eivät ponnauttaneet vesipisaraa takaisin tulosuuntaan.

5.2 Tribologia

Pinnan strukturoinnilla voidaan vaikuttaa useisiin tribologisiin ominaisuuksiin [5,12]. Muun muassa Rungin tutkimusryhmä sai muunneltua materiaalipinnan kitkakerrointa materiaalipinnan strukturoinnilla. Rungin tutkimusryhmä strukturoi 100Cr6 teräksen pintaan jaksollisia pintarakenteita kahdella eri menetelmällä: LBIA ja LSFL. LBIA-menetelmässä käytettiin laitteistoa, jossa oli erityinen interferometriin perustuva optinen systeemi. LSFL- menetelmässä taas materiaalipintaan strukturoitiin tihein välimatkoin olevia rakenteita, jotka työstettiin käyttämällä tavallista laserinterferenssilaitteistoa. Strukturoinnin vaikutusta teräspinnan kitkaan tutkittiin pallon sisältävällä tribometrillä. Tribometrissä käytettiin sekä 100Cr6 teräksestä että volframkarbidista valmistettuja palloja. Tutkijat tekivät mittaukset kuivalle ja ohuella 5W40 koneöljykerroksella päällystetylle materiaalipinnalle. Taulukossa 4 on tutkimuksen tulokset. [12, s. 1–4]

Taulukko 4. laserstrukturoinnin vaikutus materiaalipinnan kitkakertoimeen. [12, s. 11]

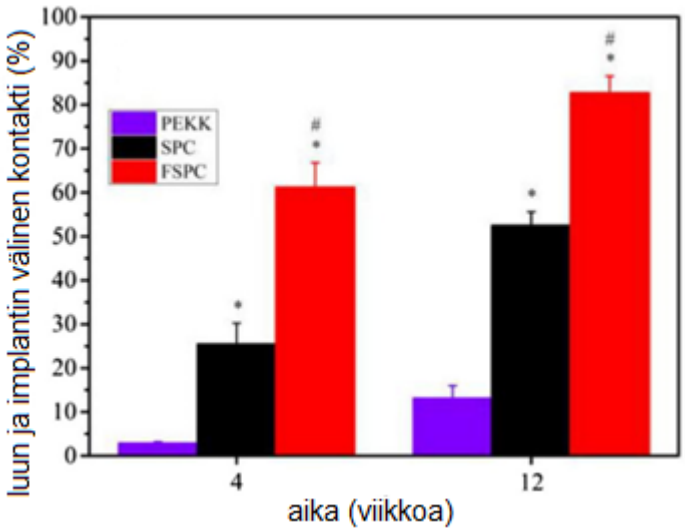
pallo	kuiva				voideltu			
	LBIA		LSFL		LBIA		LSFL	
	90	0	90	0	90	0	90	0
teräs	0	- -	+	+	++	+	0	-
WC	-	- -	++	+	+	++	- -	- -

Taulukossa 4 luku 0 tarkoittaa, että strukturoinnilla ei ollut vaikutusta kitkakertoimeen, + tarkoittaa kitkakertoimen suurenemista ja ++ merkitsee kitkakertoimen voimakasta suurenemista. Vastaavasti - tarkoittaa kitkakertoimen pienenemistä ja -- kitkakertoimen voimakasta pienenemistä. [12, s. 11] Kitkakertoimen pienentämiseen ja kulumisen vähentämiseen kohdistuu suurta mielenkiintoa, koska noin 23% maailman energiankulutuksesta aiheutuu kitkasta ja kulumisesta. [12, s. 1]

5.3 Lääketiede

Han Wun tutkimusryhmän mukaan laserstrukturoinnilla on merkittäviä hyötyjä ortopedisissa sovelluksissa. Tutkimusryhmä valmisti ensin piinitridistä ja polyeetteriketoniketonista yhdistämällä ja puristusmuovaamalla bioaktiivisia komposiitteja. Valmistettujen komposiittien pintaan tehtiin laserstrukturointi femtosekuntilaserilla, jolloin pintaan muodostui terälehtimäisiä neulamaisista

piinitridinanopartikkeleista koostuvia rakenteita. Strukturoinnin jälkeen komposiittien pinnankarheus, hydrofiilisyys ja proteiinien imeytyvyys parantuivat merkittävästi. Laserstrukturoimalla käsitellyt komposiittipinnat myös estivät bakteerikasvua voimakkaammin kuin käsittelemättömät komposiittipinnat. Wun tutkijaryhmä päätteli, että bakteerikasvun voimakkaampi estyminen johtui pinnan rakenteen, kemiallisten funktionaalisten ryhmien ja hydrofiilisyyden yhteisvaikutuksesta. Lisäksi havaittiin, että laserstrukturoidut komposiitit helpottivat rotanluun mesenkymaalisten kantasolujen kiinnittymistä, kasvua ja osteogeenistä erilaistumista käsittelemättömiin komposiitteihin verrattuna. Tiivistettynä siis komposiittien pintaan laserstrukturoimalla muodostettujen mikro/nanorakenteiden todettiin vaikuttavan solujen reaktioihin ja luun muodostumiseen. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu luutumista laserstrukturoitujen komposiittien ja käsittelemättömien komposiittien pintaan.



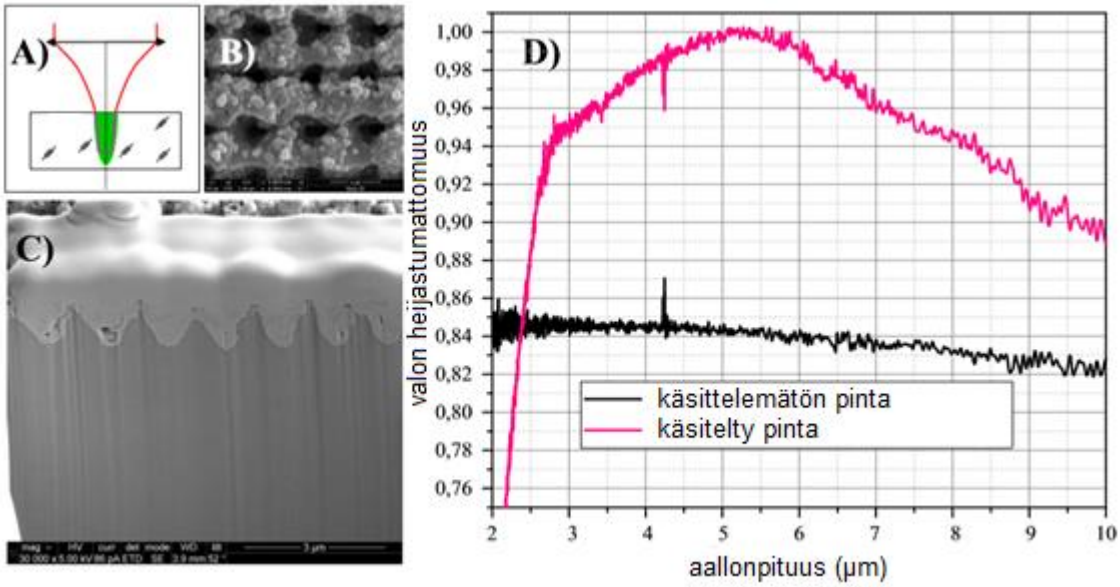
Kuva 11. *Luutumisen tehokkuus komposiittien pintaan. Muokattu lähteestä [13, s. 12]*

Kuvassa PEKK tarkoittaa tavallista käsittelemätöntä polyeetteriketoniketonikomposiittia. SPC taas tarkoittaa piinitridistä ja polyeetteriketoniketonista valmistettuja bioaktiivisia komposiitteja. Femtosekuntilaserilla strukturoiduista SPC-komposiiteista taas on käytetty merkintää FSPC. Kuten kuvasta nähdään, laserstrukturoiduille pinnoille luun kiinnittyminen oli merkittävästi nopeampaa kuin käsittelemättömille verrokeille. Tulevaisuudessa ortopedisiä implantteja voitaisiin laserstrukturoida niiden ominaisuuksien parantamiseksi. [13, s. 14]

5.4 Optiikka

Optiikassa laserstrukturoinnin yksi sovelluskohde on valoa heijastamattomat pinnat. Eräässä tutkimuksessa kehitettiin yksinkertainen ja suoraviivainen valmistustekniikka,

jolla valmistettiin valoa heijastamattomia pintoja. Valon heijastuminen estettiin työstämällä kappaleen pintaan mikrorakenteita. Työstettyjen kappaleiden materiaali oli kadmiumsulfoselenidi. Kyseisessä tutkimuksessa käytettiin neljää eri tekniikkaa mikrorakenteiden valmistamiseksi, ja neljästä tekniikasta parhaaksi tekniikaksi osoittautui suoratyöstö femtosekuntilaserilla. Femtosekuntilaserilla suoratyöstämällä päästiin hyvin lähelle valon heijastumattomuuden teoreettista maksimia 5 µm aallonpituudella. Valon heijastumattomuuden teoreettinen maksimi on 100%. Femtosekuntilaserilla tehdyssä suoratyöstössä saavutettiin 99% heijastumattomuus aallonpituusalueella 4.5-6 µm ja 97% keskimääräinen heijastumattomuus aallonpituusalueella 2.7–10 µm. Tutkimuksessa kehitetyssä suoratyöstömenetelmässä voidaan käyttää kaupallisesti saatavilla olevia lasereita. Kehitettyä tekniikkaa voidaan hyödyntää sovelluksiin, joissa heijastamaton pinta tehdään infrapunavalon aallonpituuksien keskivälille. Kehittämällä tutkimuksessa käytettyä menetelmää voidaan valmistaa valoa heijastamattomia pintoja myös lyhyemmille aallonpituuksille. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu parhaaksi todettua menetelmää. [28]



Kuva 12. *Laserstrukturointi pinnan heijastavuuden pienentämiseksi. Muokattu lähteestä [28, s. 7]*

Kuvassa kohdassa A esitetään parhaan menetelmän säteen keskittämisen periaate. Kohdassa B on pyyhkäisyelektronimikroskoopilla otettu kuva työstetystä kappaleen pinnasta ylhäältä katsottuna. Myös pinnan läpileikkauksesta on otettu kuva pyyhkäisyelektronimikroskoopilla kohdassa C. Viimeisenä kuvassa on kuvaaja, jossa vertaillaan käsitellyn ja käsittelemättömän pinnan heijastavuutta eri aallonpituuksilla. [28, s. 7]

YHTEENVETO

Laserstrukturoinnissa on siis kolme päämenetelmää: suorat työstömenetelmät, laserinterferenssi ja maskitekniikat. Suoriin työstömenetelmiin kuuluvat tavallinen suoratyöstö, galvanometrinen skannaus ja polygoniskannaus. Parhaiten teollisuuden tarpeisiin soveltuvat galvanometrinen skannaus ja polygoniskannaus, koska ne ovat työstömenetelmistä kaikkein joustavimpia ja nopeimpia. Menetelmistä hitain on tavallinen suoratyöstö, eikä se sellaisenaan sovellu teollisiin sovelluksiin. Kuitenkin tavallisen suoratyöstömenetelmän työstönopeutta voidaan parantaa, kun järjestelmään lisätään useampia laserlähteitä tai kun järjestelmään lisätään painatussylinteri. Hyvän tuottavuutensa takia useita laserlähteitä sisältävät järjestelmät ja painatussylinterin sisältävät järjestelmät soveltuvat hyvin teollisuuteen. Erityisen hyödyllisiä painatussylinterin sisältävät järjestelmät ovat tilanteissa, joissa samaa pinnan mikrorakennetta työstetään suuria määriä. Menetelmistä kaikkein huonoiten teollisuuteen soveltuvat maskitekniikat, koska ne ovat suhteellisen monimutkaisia ja niiden työstettävissä olevia pintarakenteita on vähemmän kuin muissa menetelmissä. Interferenssimenetelmät taas ovat hyödyllisimpiä käyttötilanteissa, joissa työstetään kappaleeseen jaksollisesti toistuvaa pintarakennetta.

Mallinnuksen avulla pyritään ymmärtämään ja optimoimaan laserstrukturontiprosessia. Mallinnusta tarvitaan myös laserstrukturontiprosessin onnistumiseen ja tarkkaan hallintaan. Mallintamisessa voidaan käyttää kolmenlaista mallinnusta: analyyttistä, kokeellista tai tekoälyyn perustuvaa. Kaikista käyttökelpoisimpia malleja ovat numeeriseen ratkaisuun perustuvat mallit. Tilastollinen regressio, sumean joukon teoria ja keinotekoiset hermoverkot ovat laserstrukturoinnin mallintamisessa pääasiassa käytettyjä mallinnustekniikoita.

Laserstrukturonnin sovelluskohteita ovat vettä hylkivät pinnat, tribologia, lääketiede ja optiikka. Tribologiassa laserstrukturoinnilla voidaan vähentää kitkaa ja kulumista. Myös kitkan lisääminen on mahdollista. Varsinkin kitkan vähentämiseen kohdistuu suurta mielenkiintoa, koska vähentämällä kitkaa saadaan vähennettyä energiankulutusta ja lisättyä energiatehokkuutta. Lääketieteessa taas ortopedisiä implantteja voitaisiin strukturoida luutumisen parantamiseksi. Ortopedisten implanttien strukturoinnissa on hyötynä myös se, että strukturotujen implanttien pinnassa bakteerikasvu on vähäisempää kuin käsittelemättömissä implanteissa. Optiikassa laserstrukturointia voidaan käyttää sovelluksissa, joissa halutaan valmistaa valoa heijastamattomia pintoja.

LÄHTEET

[1] A. Bharatish, S. Soundarapandian, Influence of Femtosecond Laser Parameters and Environment on Surface Texture Characteristics of Metals and Non-Metals – State of the Art, Lasers in Manufacturing and Materials Processing, Vol. 5, No. 2, 2018, pp.143–167, https://doi.org/10.1007/s40516-018-0059-1.

[2] S. Bruening, M. Jarczynski, K. Du, A. Gillner, Large Scale Ultrafast Laser Micro Texturing with Multi-Beams, Journal of Laser Micro Nanoengineering, Vol. 13, No. 3, 2018, pp. 254–262, https://doi.org/10.2961/jlmn.2018.03.0019.

[3] F. Fraggelakis, G. Mincuzzi, J. Lopez, I. Manek-Hönninger, R. Kling, Controlling 2D laser nano structuring over large area with double femtosecond pulses, Applied Surface Science, Vol. 470, 2019, pp. 677–686, https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.106.

[4] A. Gillner, J. Finger, P. Gretzki, M. Niessen, T. Bartels, M. Reininghaus, High Power Laser Processing with Ultrafast and Multi-Parallel Beams, Journal of Laser Micro Nanoengineering, Vol. 14, No. 2, 2019, pp.129–137, https://doi.org/10.2961/jlmn.2019.02.0003.

[5] K. Hilgenberg, M. Rethmeier, K. Steinhoff, Surface structuring by pulsed laser implantation, Materials Science Forum, Vol. 879, 2017, pp.750–755, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.750.

[6] V. Lang, B. Voisiat, T. Kunze, A. Lasagni, Fabrication of High Aspect-Ratio Surface Micro Patterns on Stainless Steel using High-Speed Direct Laser Interference Patterning, Advanced Engineering Materials, Vol. 21, No. 7, 2019, https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1002/adem.201900151

[7] M. Malinauskas, A. Žukauskas, S. Hasegawa, Y. Hayasaki, V. Mizeikis, R. Buividas, S. Juodkazis, Ultrafast laser processing of materials: from science to industry, Light: Science & Applications, Vol. 5, No. 8, 2016, https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133.

[8] S. Milles, M. Soldera, B. Voisiat, A. Lasagni, Fabrication of superhydrophobic and ice-repellent surfaces on pure aluminium using single and multiscaled periodic textures, Scientific Reports, Vol. 9, 2019, pp.1-13, https://doi.org/10.1038/s41598-019-49615-x.

[9] S. Mishra, V. Yadava, Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review, Optics and Lasers in Engineering, Vol.73, 2015, pp. 89–122, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.03.017.

[10] K. Phillips, H. Gandhi, E. Mazur, S. Sundaram, Ultrafast laser processing of materials: a review, Vol. 7, No. 4, 2015, pp. 684–712, https://doi.org/10.1364/AOP.7.000684.

[11] D. Raj, B.V.R. Reddy, S.R Maity, K.M. Pandey, Laser Beam Micromachining of Metals: A Review, Materials Today: Proceedings, Vol.18, 2019, pp.98–103, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.281.

[12] S. Rung, K. Bokan, F. Kleinwort, S. Schwarz, P. Simon, J. Klein-Wiele, C. Esen, R. Hellmann, Possibilities of dry and lubricated friction modification enabled by different ultrashort laser-based surface structuring methods, Lubricants, Vol. 7, No. 5, 2019, https://doi.org/10.3390/lubricants7050043.

[13] H. Wu, T. Liu, Z. Xu, J. Qian, X. Shen, Y. Li, Y. Pan, D. Wang, K. Zheng, A. Boccaccini, J. Wei, Enhanced bacteriostatic activity, osteogenesis and osseointegration of silicon nitride/polyetherketoneketone composites with femtosecond laser induced micro/nano structural surface, Applied Materials Today, Vol.18, 2020, https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100523.

[14] Y. Hung, H. Chien, Y. Lee, Excimer Laser Three-Dimensional Micromachining Based on Image Projection and the Optical Diffraction Effect, Applied Sciences, Vol. 8, No. 9, 2018, http://search.proquest.com/docview/2321988380/

[15] T. Huhtamäki, X. Tian, J. Korhonen, R. Ras, Surface-wetting characterization using contact-angle measurements, Nature Protocols, Vol.13, No.7, 2018, pp.1521–1538, http://search.proquest.com/docview/2068339577/

[16] B. Voisiat, C. Zwahr, AF. Lasagni, Growth of regular micro-pillar arrays on steel by polarization-controlled laser interference patterning, Applied Surface Science, Vol.471, 2019, pp.1065–1071.

[17] J. Tu, L. Zhang, Effective Data-Driven Calibration for a Galvanometric Laser Scanning System Using Binocular Stereo Vision, Sensors, Vol.18, No.1, 2018, http://search.proquest.com/docview/2002813778/

[18] Y. Ji, B. So, D. Kim, High-speed time-domain characterization method for polygon scanners, Measurement, Vol.135, 2019, pp.278–286, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.039

[19] V. Duma, Polygonal mirror laser scanning heads: Characteristic functions, Proceedings of the Romanian Academy - Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science, Vol.18, No. 1, 2017, pp.25-33,

https://www.researchgate.net/publication/313987004_Polygonal_mirror_laser_scanning_heads_Characteristic_functions

[20] Polygon Scanners for Laser Material Processing, Fraunhofer Institute for Laser Technology, 2018, saatavissa (luettu 21.2.2020): https://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/brochure-polygon-scanners-for-laser-material-processing.html

[21] Polygon Scanner Systems, Next Scan Technology BVBA, 2018, saatavissa (luettu 24.2.2020): https://nextscantechnology.com/wp-content/uploads/2018/12/NST_PolygonScannerSystems_2018.pdf

[22] R. Barnett, S. Mueller, S. Hiller, F. Pérez-Willard, J. Strickland, H. Dong, Rapid production of pillar structures on the surface of single crystal CMSX-4 superalloy by femtosecond laser machining, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 127, 2020, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105941

[23] Laser structuring GLS 1000, Gehring, 2019, saatavissa (luettu 25.2.2020): https://www.gehring-group.com/en-ww/downloads/brochures-and-flyers/technologies

[24] XL SCAN, SCANLAB, 2019, saatavissa (luettu 25.2.2020): https://www.scanlab.de/en/products/advanced-scanning-solutions/xl-scan#slideshow-1

[25] Abramczyk H., Introduction to laser spectroscopy 1st ed., Elsevier, Amsterdam, Alankomaat, 2005.

[26] f-Theta lenses, Sill optics, saatavissa (luettu 27.2.2020): https://www.silloptics.de/en/products/laser-optics/f-theta-lenses-1

[27] DLIP-systems, Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology, saatavissa (luettu 26.2.2020): https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/microtechnology/surface_functionalization/products_projects/dlip-systems.html

[28] A. Bushunov, M. Tarabrin, V. Lazarev, V. Karasik, Y. Korostelin, M. Frolov, Y. Skasyrsky, V. Kozlovsky, Fabrication of anti-reflective microstructures on chalcogenide crystals by femtosecond laser ablation, Optical Materials Express, Vol. 9, No. 4, 2019, https://doi.org/10.1364/OME.9.001689

[29] Laser Beam Expanders, Edmund optics, saatavissa (luettu 12.3.2020): https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/beam-expanders/

[30] R. Paschotta, Optical attenuators, RP Photonics encyclopedia, saatavissa (luettu 12.3.2020): https://www.rp-photonics.com/optical_attenuators.html