



**Vaasan yliopisto**  
UNIVERSITY OF VAASA

Jukka Rantamäki

# **Kuitulaserin optimointi sähköteräksen leikkauksessa paineistetulla ilmalla**

ABB Oy, IEC LV Motors

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Diplomityö  
Energiatekniikka

Vaasa 2024

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Jukka Rantamäki		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Kuitulaserin optimointi sähköteräksen leikkauksessa paineistetulla ilmalla : ABB Oy, IEC LV Motors		
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri		
<b>Oppiaine:</b>	Energiatekniikka		
<b>Työn valvoja:</b>	Anne Mäkiranta		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Teemu Ovaska & Pertti Alamartimo		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2024	<b>Sivumäärä:</b>	<b>104</b>

---

**TIIVISTELMÄ:**

Laserleikkaus on noussut yhdeksi maailman johtavimmista leikkausmuodoista. Tässä diplomityössä tarkastellaan kuitulaserin optimointia sähköteräksen leikkauksessa paineistetulla ilmalla. Paineistettu ilma edustaa uusinta teknologiaa laserleikkauksessa, mikä luo tutkimukselle merkittävän pohjan sen ominaisuuksien vuoksi. Sen edullisuus ja kyky tuottaa huippulaatuista leikkauks jälkeä tekee siitä lupaavan vaihtoehdon tulevaisuuden leikkausprosesseille. Tämä diplomityö on tehty ABB Oy, IEC LV Motors -yksikölle. Työn tavoitteena on selvittää, miten kuitulaser optimoidaan paineistetulle ilmalle, kun leikataan 0,5 mm sähköterästä. Samalla tavoitteena on tutkia, miten kuitulaserin optimointi vaikuttaa sen tuottavuuteen ja tehokkuuteen ja parantaako kuitulaserin optimointi paineistetulla ilmalla sen tekemän työn laatua sähköteräksen leikkauksessa. Kuitulaser on puolalaisen Eaglen valmistama iNspire 1530 F4. Tutkimus tehdään osana tiivistä yhteistyötä ABB:n, Fraunhofer IPT:n ja Eagle Lasersin kanssa, ja siinä hyödynnetään alan tuoreimpia tieteellisiä tutkimuksia, kirjallisuutta sekä Fraunhoferin ja Eaglen Lasersin materiaaleja ja tutkimuksia. Lisäksi työssä käytetään apuna simulaatioita ja kuvioita, jotka tukevat tulosten luotettavuutta.

Työssä käytettävä tutkimusmenetelmä perustuu kokeelliseen lähestymistapaan, Design of Experiment -menetelmään, jossa suoritetaan sarja erilaisia kokeita laajalla parametrikirjolla. Menetelmän tulokset analysoidaan käyttäen apuna optista Aliconan G5 InfiniteFocus -mikrokoordinaattimittalaitetta. Näitä tuloksia vertaillaan kokollisesti saatuihin tuloksiin. Tulosten analysoinnissa ja niiden luotettavuuden arvioinnissa käytetään apuna Fraunhoferin luomaa konepohjaista numeerista tietojen analysointiohjelmaa (NC Profile). Nämä ovat tärkeä apu tulosten tulokinnassa ja ymmärtämisessä. Työssä käsitellään linjatestejä ja demonstraatioita, joissa leikkausparametreja sovelletaan BP280 malliin.

Työn keskeisenä johtopäätöksenä on se, että kokeellisen suunnittelun ja NC Profiler -koneohjelman käyttö auttaa löytämään optimaaliset prosessiparametrit kuitulaserin optimoimiseksi. Kuitulaserin optimointi parantaa leikkauks jäljen laatua, lisää laserin tuottavuutta ja vähentää leikkauksesta aiheutuvaa absorptiota levyyn. Lisäksi kuitulaserin optimointi tuottaa parannuksia leikkauslaatuun ja tuottavuuteen leikattaessa 0,5 mm sähköterästä, kun leikkauskaasuna käytetään paineistettua ilmaa. Samalla käyttökustannukset laskevat. Työn avulla löydettiin optimaaliset prosessiparametrit, joilla saavutettiin kuitulaserin parempi tuottavuus, leikkauks jäljen laatu ja vähäisempi absorptio levyyn, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa.

---

**AVAINSANAT:** Kuitulaser, laserteknologia, optimointi, paineistettu ilma, DoE, parametri-sointi, absorptio, leikkausnopeus.

---

**UNIVERSITY OF VAASA****School of Technology and Innovation**

**Author:** Jukka Rantamäki  
**Thesis of title:** Fiber Laser Optimization In Cutting Electrical Steel With Compressed Air : ABB Oy, IEC LV Motors  
**Degree:** Master of Science in Technology  
**Degree program:** Energy Technology  
**Supervisor:** Anne Mäkiranta  
**Instructor:** Teemu Ovaska & Pertti Alamartimo  
**Year of graduation:** 2024      **Pages:**      **104**

---

**ABSTRACT:**

Laser cutting has emerged as one of the world's leading cutting methods. This diploma thesis examines the optimization of a fiber laser in cutting electrical steel with pressurized air. Pressurized air represents the latest technology in laser cutting, creating a significant foundation for research due to its properties. Its affordability and ability to produce top-quality cutting results make it a promising alternative for future cutting processes. This diploma thesis was completed for ABB Oy, IEC LV Motors. The purpose of the work is to determine how to optimize a fiber laser for pressurized air when cutting 0.5 mm electrical steel. The fiber laser used is an iNspire 1530 F4 manufactured by the Polish company Eagle. The aim of the diploma thesis is to delve into the optimal utilization of the fiber laser in the electrical steel cutting process, particularly by examining the use of pressurized air as a cutting gas. The research is supported by close collaboration with ABB, Fraunhofer IPT, and Eagle Lasers, utilizing the latest scientific research in the field, literature, and materials and studies from Fraunhofer and Eagle Lasers. Additionally, simulations and figures that support the reliability of the results are used in the work.

The research method used in this work is based on an experimental approach, specifically the Design of Experiment method, which involves conducting a series of different experiments with a wide range of parameters. The results of the method are analyzed using the optical Alicona G5 InfiniteFocus micro-coordinate measurement device. These results are compared with the empirically obtained results. The analysis of the results and the assessment of their reliability are assisted by Fraunhofer's machine-based numerical data analysis program (NC Profile). These tools are essential for interpreting and understanding the results. The work deals with line tests and demonstrations where cutting parameters are applied to the BP280-model.

The main conclusion of the work is that the use of experimental design and the NC Profiler machine program helps to find the optimal process parameters for optimizing the fiber laser. Optimizing the fiber laser improves the quality of the cut, increases laser productivity, and reduces the absorption caused by the cutting process on the sheet. Additionally, fiber laser optimization results in improvements in cutting quality and productivity when cutting 0.5 mm electrical steel using pressurized air as the cutting gas. At the same time, operating costs decrease. The work identified the optimal process parameters, which achieved better fiber laser productivity, cutting quality, and reduced absorption on the sheet when pressurized air was used as the cutting gas.

---

**KEYWORDS:** Fiber laser, laser technology, optimize, compressed air, DoE, parametrization, absorption, cutting speed.

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:lle, IEC LV Motors Vaasan yksikölle. Työ tehtiin yhteistyönä Fraunhofer IPT:n ja Eagle Lasersin kanssa. Haluan kiittää kaikkia tutkimustyöhön osallistuneita sekä muita osallisia, jotka mahdollistivat työn etenemisen ja päättämisen.

Erytysmaininnan haluan osoittaa diplomityöni ohjaajana toimineelle Pertti Alamartimolle ja esihenkilölleni Johan Kalanderille sekä muille, jotka antoivat työhön arvokasta tietoa ABB:n, IEC LV Motors -yksikön puolesta. Tämän lisäksi haluan kiittää tutkimukseen osallistuneita henkilöitä heidän omasta panoksestaan projektin etenemisen aikana. Erityisesti haluan osoittaa kiitokseni kuitulaserin käyttäjälle Mika Päällysaholle joustavasta aikataulusta ja tuesta. Haluan kiittää Vaasan yliopiston henkilökuntaa arvokkaista opeista opiskelujeni aikana. Erityiskiitokset haluan antaa diplomityöni valvojana toimineelle yliopistonlehtori Anne Mäkirannalle ja ohjaajana toimineelle yliopistonopettaja Teemu Ovaskalle.

Viimeisenä haluan kiittää perhettäni, ystäviäni ja läheisiäni tuesta ja kannustuksesta koko opiskelujeni ajalta. Matka on ollut pitkä ja antoisa, mutta kaikki hyvä loppuu aikanaan.

*Vaasassa 17.5.2024*

*Jukka Rantamäki*

## Sisällys

Alkusanat	4
1 Johdanto	12
1.1 Työn tavoitteet ja rajaus	13
1.2 Työn eteneminen	13
1.3 Yritysselvitys	14
1.4 IEC LV Motors Vaasa	14
1.5 Fraunhofer IPT	15
1.6 Eagle Lasers	15
2 Lasersäde leikkauksessa	16
2.1 Lasersäteen toimintaperiaate	16
2.2 Lasersäteen ominaisuudet	17
2.3 Lasersäde ja Gaussin säde	18
2.4 Lasersäteen laatu ja tarkkuus	22
2.5 Lasersäteen ja materiaalin vaikutus	24
2.6 Optinen kuitu	27
2.7 Resonaattori	31
2.8 Laserin linssit	32
2.9 Paineistettu ilma laserleikkauksessa	33
2.10 Leikkuupään toiminta	34
3 Kuitulaserin parametrit leikkauksessa	36
3.1 Laserin ohjausparametrit	37
3.1.1 Polttopisteen paikka	37
3.1.2 Leikkausnopeus	38
3.2 Kaasuparametrit	39
3.2.1 Kaasun koostumus	39
3.2.2 Apukaasun virtausnopeus ja sen vaikutukset leikkausprosessissa	40
3.2.3 Suuttimen kohtisuoruus leikkauspintaan nähden	45
3.3 Sädeparametrit	46

3.3.1	Lasersäteen teho	46
3.3.2	Polttopisteen moodi ja koko	46
3.3.3	Numeerinen mallinnus laserteknologiassa	47
3.3.4	Aallonpituus	51
3.3.5	Taajuus	51
3.3.6	Pulssien päällekkäisyys	52
3.4	Materiaaliparametrit	53
3.4.1	Absorptio laserleikkauksessa	53
3.4.2	Leikkausrailo	54
4	Menetelmät	55
4.1	NC Profile -koneohjelma	55
4.2	Kuitulaserin optimoinnin vaiheet	55
4.3	Kokeellisen suunnittelun lähtökohdat	56
4.4	Leikkausparametrien valinta	58
4.5	Lasersäteen pulssien päällekkäisyys ja etäisyys	59
4.6	Oletukset	62
5	Tulokset	63
5.1	Linjatesti A1 paineistetulla ilmalla	63
5.2	Linjatesti A2	64
5.3	Linjatesti A3	65
5.4	Linjatesti B1 tyellä	67
5.5	Linjatesti B2	68
5.6	Linjatesti B3	69
5.7	BP280-demonstraation leikkaus paineistetulla ilmalla	71
5.8	BP280-demonstraation leikkaus tyellä	72
5.9	BP280-demonstraatioiden reikien analysointi paineistetulla ilmalla ja tyellä leikattuna	74
5.10	BP280-demonstraatioiden suorien ja kaarrostien analysointi paineistetulla ilmalla ja tyellä leikattuna	75
5.11	Linjatestien ja BP280-demonstraatioiden tulosten tarkastelu	76

5.12	BP280-demonstraatioiden tulosten analysointi	78
6	Tulosten pohdinta	85
7	Johtopäätökset	91
8	Yhteenveto	93
	Lähteet	96
	Liitteet	102
	Liite 1. BP80-demonstraation purskeen esiintyvyys tyypellä leikattuna taulukon 9 arvoilla (ABB, 2023d)	102
	Liite 2. BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leikkausuran leveysero tyypellä leikattuna taulukon 9 arvoilla (ABB, 2023d)	103
	Liite 3. BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leveyseron keskiarvo tyypellä leikattuna taulukon 9 arvoilla (ABB, 2023d)	104

## Kuvat

Kuva 1.	Gaussin säteen vyötärö määritellään paikaksi, jossa irradianssi on $1/e^2$ (13,5 %) sen maksimiarvosta (mukaillen Self, 1983, s. 21).	19
Kuva 2.	Gaussin säteet määritellään niiden säteen vyötäröllä ( $w_0$ ), Rayleighin alueella ( $z_R$ ) ja hajontakulmalla ( $\theta$ ) (mukaillen Self, 1983, s. 17).	20
Kuva 3.	Gaussin säteen aaltorintaman kaarevuus on lähellä nollaa, kun se on sekä hyvin lähellä että hyvin kaukana säteen vyötäröstä (mukaillen Macdonald, 1986, s. 65).	21
Kuva 4.	Lasersäde, jonka säteen laatu on huono. Toisin kuin ihanteellisessa Gaussin säteessä, aaltorintamat ovat hieman sekoitettuja, mikä vaikeuttaa säteen tarkennusta (mukaillen Siegman, 1993, s. 45).	23
Kuva 5.	Optiset absorptiosyvyydet materiaaleille eri aallonpituuksilla (mukaillen Brown & Arnold, 2010).	26
Kuva 6.	Säteen eteneminen tasaisessa ja epätasaisessa materiaalissa (mukaillen Brown & Arnold, 2010).	27
Kuva 7.	Optisen kuidun poikkileikkauskuva (mukaillen William Steen, 2010, s. 48).	28

Kuva 8. Kuitulaserin toiminta pääpiirteittäin (mukaillen Himeno, 2015, s. 26).	29
Kuva 9. Kuitulaserin kuidun rakenne (mukaillen Himeno, 2015, s. 3).	30
Kuva 10. Resonaattorin toimintaperiaate (mukaillen Kujanpää ja muut, 2005, s. 35).	31
Kuva 11. Ylemmässä tilanteessa on stabiilin ja alemmassa epästabiilin resonaattorin toimintaperiaatteet (Kujanpää ja muut, 2005, s. 52).	32
Kuva 12. Kuitulaserin leikkuupään linssi, joka tarkentaa säteen lopulliseen muotoonsa (mukaillen William Steen, 2010, s. 111).	33
Kuva 13. Kuitulaserin polttopisteen paikat (mukaillen Wewinlaser, 2021).	37
Kuva 14. Tehon vaikutus laserin leikkausnopeuteen kuitulaserin ja tavallisen CO <sub>2</sub> -laserin välillä. Keskellä esitetty esimerkki kuitulaserin optimaalisesta laadusta (mukaillen William Steen, 2010, s. 169).	39
Kuva 15. Sulan materiaalin vaikuttavat voimat laserleikkausprosessin aikana (mukaillen Riveiro ja muut, 2019, s. 157).	41
Kuva 16. Erilaisia TEM tilankuvioita kuitulaserilla (mukaillen William Steen, 2010, s. 101).	47
Kuva 17. BP280-malli (ABB, 2023a).	58
Kuva 18. Linjatesti vakio parametreilla (ABB, 2023c).	59
Kuva 19. Gauss-funktion FWHM ja lasersäteen halkaisija (mukaillen Ahi & Anwar, 2016, s. 32).	61
Kuva 20. BP280 mallin leikkausajo optimoiduilla parametreilla vasemmalla esitettynä ja alkuperäisillä parametreilla oikealla esitettynä (ABB, 2023d).	84

## Kuviot

Kuvio 1. Linjatestien A1-3 parametrien yhteenveto (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).....	67
Kuvio 2. BP80-demonstraation purskeen esiintyvyys paineistetulla ilmalla leikattuna taulukon 8 arvoilla (ABB, 2023d). .....	78
Kuvio 3. BP280-demonstraatio leikkauksen ylä- ja alapinnan leveysero paineistetulla ilmalla leikattuna taulukon 8 arvoilla (ABB, 2023d). .....	79
Kuvio 4. BP280-demonstraatio leikkauksen ylä- ja alapinnan leveyseron keskiarvo paineistetulla ilmalla leikattuna taulukon 8 arvoilla (ABB, 2023d).....	80

Kuvio 5. BP280-demonstraation vertailu purskeen keskiarvosta paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna taulukon 8 ja 9 arvoilla (ABB, 2023d). .....	81
Kuvio 6. BP280-demonstraatio leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero keskikohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna taulukon 8 ja 9 arvoilla (ABB, 2023d). .....	82
Kuvio 7. BP280-demonstraatio leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero aloituskohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna taulukon 8 ja 9 arvoilla (ABB, 2023d). .....	83

## Taulukot

Taulukko 1. Laskelma lasersäteiden pulssien päällekkäisyydestä ja etäisyydestä (ABB, 2023b). .....	62
Taulukko 2. Linjatestin A1 parametrit (ABB, 2023c). .....	64
Taulukko 3. Linjatestin A2 parametrit (ABB, 2023c). .....	65
Taulukko 4. Linjatestin A3 parametrit (ABB, 2023c). .....	66
Taulukko 5. Linjatestin B1 parametrit (ABB, 2023c). .....	68
Taulukko 6. Linjatestin B2 parametrit (ABB, 2023c). .....	69
Taulukko 7. Linjatestin B3 parametrit (ABB, 2023c). .....	70
Taulukko 8. BP280-demonstraatio paineistetulla ilmalla (ABB, 2023d). .....	71
Taulukko 9. BP280-demonstraatio typellä (ABB, 2023e). .....	73

## Lyhenteet

BPP	Säteiden parametritulo
DoE	Design of Experiment
FDHM	Full Duration at Half Maximum
FWHM	Full Width at Half Maximum
HWHM	Half Width at Half Maximum
IEC	International Electrotechnical Commission

LV	Low Voltage
M <sup>2</sup>	Säteen laatutekijä
NC	Numerical Control
ns	Nanosekunti
TEM	Transverse Electromagnetic Mode

## Symboliluettelo

$\alpha$	Säteen kulma [°]
$\beta$	Absorptiokerroin
$C_f$	Kitkakerroin nesteen ja kaasun rajapinnassa
$d_f$	Pulssin halkaisija [ $\mu\text{m}$ ]
$d$	Säteen halkaisija [ $\mu\text{m}$ ]
$F_n$	Dynaaminen voima [N]
$F_t$	Staattinen voima [N]
$f_{\text{taajuus}}$	Taajuus [Hz]
$f_{\text{turbulenssi}}$	Turbulenttisen rajakerroksen kitkakerroin
$h$	Lämmönsiirtokerroin [ $\frac{W}{m^2} \cdot K$ ]
$h_c$	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $\frac{W}{m^2} \cdot K$ ]
$h_r$	Säteilylämmönsiirtokerroin [ $\frac{W}{m^2} \cdot K$ ]
$I$	Intensiteetti pinnan sisällä heijastushäviön jälkeen
$I_0$	Huippuradianssi sateen keskellä
$k$	Lämpövirta [ $W/(K \cdot m^2)$ ]
$n_1$	Ilmakehän taitekerroin
$n_2$	Materiaalin taitekerroin
$P$	Säteen teho [W]
$p$	Kaasun paine [bar]
$\rho_g$	Kaasun tiheys [ $kg/m^3$ ]
$Re$	Reynoldsin luku

$r$	Radiaalinen etäisyys [ $\mu\text{m}$ ]
$R_p$	Säteen p-polarisoitunut komponentti
$R_s$	Säteen s-polarisoitunut komponentti
$s_p$	Pulssien välinen etäisyys [ $\mu\text{m}$ ]
$T$	Lämpötila [K]
$T_a$	Ympäristön lämpötila [K]
$T_{sur}$	Pinnan lämpötila [K]
$T_{sisään}$	Lämpötila sisään [K]
$T_{ulos}$	Lämpötila ulos [K]
$t$	Aika [s]
$\tau$	Leikkausjännitys [N]
$\theta$	Säteen approksimaatio [ $^\circ$ ]
$\Delta H_m$	Fuusiolämpötila [K]
$\Delta H_v$	Kiehumislämpötila [K]
$u_g$	Kaasun virtausnopeus [m/s]
$u_l$	Nesteen virtausnopeus [m/s]
$v_c$	Leikkausnopeus [mm/min]
$w$	Leikkausuran leveys [ $\mu\text{m}$ ]
$w(z)$	Gaussin säteen leveys [ $\mu\text{m}$ ]
$w_0$	Gaussin säteen vyötärön säde [ $\mu\text{m}$ ]
$x$	Leikkausrintaman etäisyys [ $\mu\text{m}$ ]
$z$	Lasersäteen säde [ $\mu\text{m}$ ]
$z_r$	Säteen Rayleighin alue
$\partial$	Osittaisderivaatta
$\lambda$	Aallonpituus [ $\mu\text{m}$ ]
$BPP$	Sädeparametritulo [mm*rad]

## 1 Johdanto

Laserleikkaus on noussut yhdeksi maailman johtavimmista leikkausmuodoista, erityisesti metalliteollisuudessa, joka muodostaa merkittävän osan teollisuustuotannosta (Konekuriiri, 2020). Tänä päivänä teollisuus kohtaa ennennäkemättömiä haasteita energia- ja materiaaliresurssien kysynnän kasvaessa. Raaka-aineiden saantivaikeudet ja hintojen nousu vaativat yrityksiä kehittämään innovatiivisia strategioita minimoimaan lisäkustannuksia, jotka aiheutuvat hukkaan menneistä osista. Tässä tilanteessa yritysten on investoitava huippulaatuun ja tuotantoprosessien tehokkuuteen, sillä virheisiin ei ole varaa materiaalikustannusten jatkaessa nousuaan (Konekuriiri, 2020).

Kuitulaserin kehitys, pienitehoisista alle 1 kW:n hiilidioksidilasereista aina nykypäivän suuritehoisiin 100 kW:n kuitulaseriin, on ollut valtava teknologinen harppaus (Ultracut, 2022). Tämä kehitys on vaikuttanut koneiden mekaniikkaan, parametreihin ja automaatioon. Kuitulaser edustaa merkittävää edistysaskelta perinteiseen hiilidioksidilaseriin verrattuna. Kuitulaserin leikkaussäde luodaan kuidussa, josta se ohjataan leikkauspäähän. Tämä mahdollistaa huomattavasti suuremman tehon tuottamisen samalla jännitteellä verrattuna hiilidioksidilaseriin. Lisäksi kuitulaserin energiankulutus on merkittävästi alhaisempi. Tämä on erityisen tärkeää ottaa huomioon nykyisen energiakriisin yhteydessä, mikä korostaa energiansäästöratkaisujen merkitystä (Ultracut, 2022).

Tässä diplomityössä tarkastellaan kuitulaserin optimointia sähköteräksen leikkauksessa paineistetulla ilmalla. Paineistettu ilma edustaa uusinta teknologiaa laserleikkauksessa, mikä luo tutkimukselle merkittävän pohjan sen ominaisuuksien vuoksi. Sen edullisuus ja kyky tuottaa huippulaatuista leikkausjälkeä tekee siitä lupaavan vaihtoehdon tulevaisuuden leikkausprosesseille. Työssä hyödynnetään aihealueen uusinta tieteellistä tutkimusta ja kirjallisuutta sekä ABB:n, Fraunhofer IPT:n ja Eagle Lasersin tuottamia materiaaleja, tutkimuksia, simulaatioita ja kuvia.

Tutkimuksen tavoitteena on optimoida kuitulaser paineistetulle ilmalle, tunnistaa ja löytää kokeellisen suunnittelun (DoE, Design of Experiment) menetelmällä optimaaliset

prosessiparametrit 0,5 mm:n sähköteräkselle ja optimoida kuitulaser valitulle geometrialle sekä parantaa kuitulaserin tuottavuutta, leikkausjäljen laatua ja leikkauksesta aiheutuvaa absorptiota levyyn. Näin pyritään tukemaan teollisuuden tarvetta entistä tehokkaammille ja taloudellisemmille leikkausprosesseille, jotka vastaavat nykypäivän resurssi- ja energiahaasteisiin.

## **1.1 Työn tavoitteet ja rajaus**

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:lle, IEC LV Motors Vaasan yksikölle. Tavoitteena on optimoida Vaasan ABB:n Motors and Generators -yksikön kuitulaser käyttämällä paineistettua ilmaa, kun leikataan 0,5 mm:n sähköterästä. Lisäksi tavoitteena on parantaa kuitulaserin tuottavuutta, leikkausjäljen laatua ja vähentää leikkauksesta syntyvää absorptiota levyyn. Absorptio tarkoittaa tässä tapauksessa kuitulaserin säteen kohdistamaa lämpövaikutusta levyn leikkausuraan ja seinämiin.

Kuitulaser on puolalaisen Eaglen valmistama iNspire 1530 F4. Kuitulaseria ei ole suunniteltu ohuiden levyjen leikkaamiseen. Optimoinnin tavoitteena on optimoida kuitulaser paineistetulle ilmalle, löytää DoE-menetelmällä optimaaliset parametrit 0,5 mm sähköteräkselle ja optimoida kuitulaser valitulle geometrialle. Optimointi suoritetaan ABB:n, Fraunhofer IPT:n ja Eagle Lasersin yhteistyönä. Fraunhofer IPT suorittaa simuloinnit yhdessä ABB:n kanssa ja ABB kuitulaserin optimoinnin, parametrien säätämisen ja laskelmat. Eagle Lasers antaa lisätietoja liittyen koneen kinematiikkaan. ABB suorittaa lisäksi asetusten tarkastelun ja tulosten oikeellisuuden. Optimointiin käytetään apuna Fraunhoferin luomaa NC Profile -koneohjelmaa. Tämä diplomityö toteutettiin laadullisena eli kvalitatiivisena tutkimuksena. Kvalitatiivinen tutkimus pohjautuu todellisen elämän tapahtumien kuvaamiseen, jonka takia siinä pyritään kokonaisvaltaiseen tutkimiseen.

## **1.2 Työn eteneminen**

Tässä työssä kuitulaserin käyttöä sähköteräksen leikkauksessa lähestytään optimoinnin näkökulmasta, kun leikkauskaasuna käytetään paineistettua ilmaa. Optimoinnissa

keskitytään laserin parametreista polttopisteen paikkaan, suuttimen paikkaan, kaasun paineeseen, leikkausnopeuteen, absorptioon ja taajuuteen. Edellä mainitut parametrit vaikuttavat oleellisesti haluttuihin tavoitteisiin, kuten kuitulaserin tuottavuuteen, leikkausjäljen laatuun ja leikkauksesta aiheutuvaan absorptioon levyssä. Eaglen valmistaman kuitulaserin optimoinnista ei ole aikaisempia tutkimuksia tai niitä on hyvin vähän. Tämän vuoksi aihe on suhteellisen haastava. Toisaalta tämä lisää aiheen tutkimisen kannattavuutta.

Työ etenee seuraavien pääpiirteiden mukaisesti. Ensimmäisessä pääluvussa käydään läpi teoriaa kuitulaserista ja sen kehityksestä aina nykypäivään saakka. Toisessa luvussa perehdytään syvällisesti kuitulaserin toimintaperiaatteeseen. Kolmannessa luvussa käydään läpi kuitulaserin parametrit ja niiden merkitys leikkauksessa. Neljännessä luvussa keskitytään analysointiin. Viidennessä luvussa käydään läpi tutkimuksen tuloksia. Kuudennessa luvussa pohditaan mistä tulokset johtuvat. Seitsemännessä luvussa esitetään työn johtopäätökset ja kahdeksannessa lopuksi työn yhteenveto.

### **1.3 Yritysselvitys**

ABB on maailman johtavimpia teknologiayrityksiä (ABB, 2024). ABB tuottaa pääsääntöisesti teollisuuden ja yksityisten asiakkaiden vaatimusten mukaisia sähkömoottoreita. ABB tukee kestävästä kehityksestä ja on mukana maailmalla kehitteillä olevissa kestävästä kehityksen projekteissa. ABB on toiminut maailmalla jo yli 130 vuotta. Lisäksi ABB on merkittävä työnantaja Suomessa (ABB, 2024)

### **1.4 IEC LV Motors Vaasa**

IEC LV Motors -divisioona Vaasassa vastaa pienjännitemoottoreiden valmistuksesta yhdessä tuotekehityksen kanssa (ABB, 2024). Vaasan IEC LV Motors panostaa korkean hyötysuhteen moottoreiden tuotekehitykseen ja niiden tutkimiseen. Yksikkö valmistaa asiakkaiden vaatimusten mukaisia räätälöityjä IEC-pienjännitemoottoreita erilaisille teollisuuden aloille ja sovellutuksille maailmanlaajuisesti (ABB, 2024).

IEC LV Motorsin Vaasan yksiköllä on merkittävä vastuu pienjännitemoottoreiden valmistuksessa ja tuotekehityksestä vaativiin käyttökohteisiin (ABB, 2024). Laajalla asiantunteumuksella ja kattavalla tuotevalikoimalla edistetään teollisuuden asiakkaita parantamaan energiatehokkuuttaan ja sitä kautta tuottavuuttaan. Vaasan yksikössä työskentelee yli 600 korkeasti koulutettua alan ammattilaista, jotka oman alansa osaamisellaan suunnittelevat ja valmistavat moottorit asiakkaiden toiveiden mukaisesti (ABB, 2024).

### **1.5 Fraunhofer IPT**

Fraunhofer-Gesellschaft perustettiin edistämään soveltavaa tutkimusta ja se on menestynyt teknologian alalla jo yli 60 vuotta. Fraunhofer IPT on tehnyt yhteistyötä Fraunhofer Center for Manufacturing Innovation CMI:n kanssa Yhdysvalloissa vuodesta 1994 asti parantaakseen teknologian siirtoa Amerikan ja Euroopan välillä. Yhdysvalloissa, Bostonissa sijaitseva yhtiö edistää kansainvälistä yhteistyötä ja tiivistää yhteyksiä yhdysvaltalaisiin asiakasyrityksiin (IPT, 2023).

### **1.6 Eagle Lasers**

Eagle Lasers on toiminut kansainvälisillä markkinoilla jo 16 vuoden ajan (Eagle-Group, 2023a). Tänä aikana yritys on erottunut muista laservalmistajista yrityksen kyvystä ymmärtää ja hyödyntää kuitulaserteknologian etuja aina sen varhaisista vaiheista lähtien.

Eagle on suunnitellut ja kehittänyt jokaisen komponentin huolellisesti, mikä on mahdollistanut tehokkaiden ja tarkkojen 6 kW:n, 8 kW:n, 10 kW:n, 12 kW:n ja 20 kW:n koneiden tuottamisen markkinoille yhteistyössä IPG Photonicsin kanssa (Eagle-Group, 2023a). Yrityksen uusin saavutus on 30 kW:n kuitulaserjärjestelmä.

## 2 Lasersäde leikkauksessa

Kuitulaser on vakiinnuttanut paikkansa teollisuuden erilaisissa sovellutuksissa, erityisesti materiaalin leikkauksessa (William Steen, 2010, s. 131; Ultracut, 2023). Sen monipuolisuus ja suuri teho mahdollistavat useiden eri materiaalien käsittelyn, kuten leikkauksen, hitsauksen, porauksen ja merkkauksen. Kuitulaserin kyky leikata lähes kaikkia teollisuuden raaka-aineita tekee siitä merkittävän työkalun erilaisissa tuotantoprosesseissa (William Steen, 2010, s. 131; Ultracut, 2023).

Laserleikkauksen merkitys on korostunut nykypäivänä, erityisesti kahdessa dimensiossa tehtävien leikkausten osalta, missä levyarkkeja muokataan tarkasti haluttuihin muotoihin ja mittoihin (William Steen, 2010, s. 131; Ultracut, 2023). Tämä menetelmä tarjoaa tarkan ja tehokkaan tavan leikata monenlaisia materiaaleja. Tyypillisiä leikkausmateriaaleja ovat metallit, muovit, puut, paperit ja kartongit.

Laserleikkauksen periaate on yksinkertainen mutta tehokas: lasersäde keskitetään polttopisteeseen, joka kohdistetaan leikattavaan materiaaliin (William Steen, 2010, s. 133–138). Tämän polttopisteen avulla laser pystyy leikkaamaan materiaalin tarkasti haluttuun muotoon. Yksi merkittävä etu laserleikkauksessa on se, että työväline ei kosketa leikattavaa materiaalia, mikä vähentää työkalun kulumista ja poistaa tarpeen työkalun vaihtamiselle, mikä parantaa prosessin tehokkuutta ja tarkkuutta (William Steen, 2010, s. 133–138).

### 2.1 Lasersäteen toimintaperiaate

Laser on valoa, joka vahvistetaan stimuloitun emission avulla (William Steen, 2010, s. 11–17; Himeno, 2015, s. 1–3). Laserin säteen muodostaminen perustuu pohjimmiltaan säteilyn emissioon eli kvanttimekaaniseen ilmiöön. Tämä ilmiö mahdollistaa valon voimistamisen tietyntyylisessä väliaineessa, jolloin syntyy voimakas ja keskittynyt valonsäde.

Lasersäteen muodostaminen tapahtuu käyttämällä kahta keskeistä väliainetta: aktiivista väliainetta ja pumpattavaa väliainetta (William Steen, 2010, s. 11–17; Himeno, 2015, s. 2–4). Aktiivinen väliaine on aine, joka voi saada energiaa ulkoisesta lähteestä, esimerkiksi valosta tai sähkömagneettisesta säteilystä. Pumpattava väliaine puolestaan toimii aktiivisen väliaineen stimuloijana, antaen lisäenergiaa prosessiin.

Laserin toimintaan tarvitaan myös peilejä, jotka heijastavat valonsäteen edestakaisin aktiivisen väliaineen läpi (William Steen, 2010, s. 11–13; Himeno, 2015, s. 2–3). Tämä prosessi luo voimakkaan ja keskitetyn valonsäteen, joka voidaan sitten ohjata haluttuun suuntaan. Energialähde antaa tarvittavan energian väliaineille, jotta laserin toiminta voi käynnistyä.

Materiaalien leikkauksessa laser on erinomainen työkalu, koska se pystyy kohdistamaan suuren määrän energiaa hyvin pienelle alueelle (William Steen, 2010, s. 11–14; Himeno, 2015, s. 5–6). Tämä mahdollistaa tarkan ja tehokkaan leikkauksen erilaisille materiaaleille. Lisäksi laserin säde on yhdensuuntainen ja keskitetty, mikä tekee siitä erinomaisen työkalun monenlaisiin sovellutuksiin.

## **2.2 Lasersäteen ominaisuudet**

Lasersäde tarjoaa monia etuja leikkauksessa (Kujanpää ja muut, 2005, s. 33–35). Sen voimakas intensiteetti ja tarkka keskittyminen mahdollistavat tehokkaan energian siirron pienelle alueelle. Tämä ominaisuus tekee kuitulaserista tehokkaan työkalun paksujen materiaalien leikkaamiseen, mikä on erityisen hyödyllistä teollisuuden sovelluksissa, kuten metallintyöstössä ja materiaalien valmistuksessa (Kujanpää ja muut, 2005, s. 33–35).

Kuitulaserin tuottamat aallonpituudet vaihtelevat välillä 0,1–10,6  $\mu\text{m}$ , mikä mahdollistaa monipuolisen käytön (Kujanpää ja muut, 2005, s. 41). Näkyvän valon alueella on useita eri aallonpituuksia, joista jokaisella on oma värinsä, kun taas kuitulaserin aallonpituudet ulottuvat näkyvän valon ulkopuolelle.

Kuitulaserin optinen säteily on luonteeltaan aaltomaista, ja sen tarkka aallonpituus tarjoaa erinomaisen säteen laadun ja stabiilisuuden (Kujanpää ja muut, 2005, s. 41–42). Tämä tekee siitä ihanteellisen valinnan yrityksille, jotka vaativat tarkkaa ja vakaata sädetä.

### 2.3 Lasersäde ja Gaussin säde

Kuitulaserin laseroptiikan eri sovellutuksissa lasersäteen oletetaan olevan Gaussin säteilyprofiilin kaltainen, mikä noudattaa niin kutsuttua ihanteellista Gaussin jakaumaa (Self, 1983; Vaveliuk ja muut, 2007; Siegman, 1993, s. 40–47). Voidaan sanoa, että kaikilla lasersäteillä on poikkeamaa ihanteellisesta Gaussin säteen käyttäytymisestä ja sen mallista. Tämän mallin kuvaamiseen käytetään termiä *säteen laatutekijä*, jota kuvataan symbolilla  $M^2$ . Tämän termin avulla voidaan verrata lasersäteen todellista suorituskykyä diffraktiorajoitetun Gaussin säteen suorituskykyyn. Gaussin irradianssiprofiilit ovat säteen keskipisteestä katsottuna symmetrisiä toistensa suhteen ja pienenevät tästä keskipisteestä, kun säteen etäisyys säteen keskipisteestä kasvaa kohtisuorasti etenemissuunnassa (Kuva 1) (Self, 1983; Vaveliuk ja muut, 2007; Siegman, 1993, s. 40–47). Tätä jakaumaa kuvataan seuraavalla yhtälöllä :

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{(w(z))^2}\right) = \frac{2P}{(\pi w(z))^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{(w(z))^2}\right), \quad (1)$$

missä

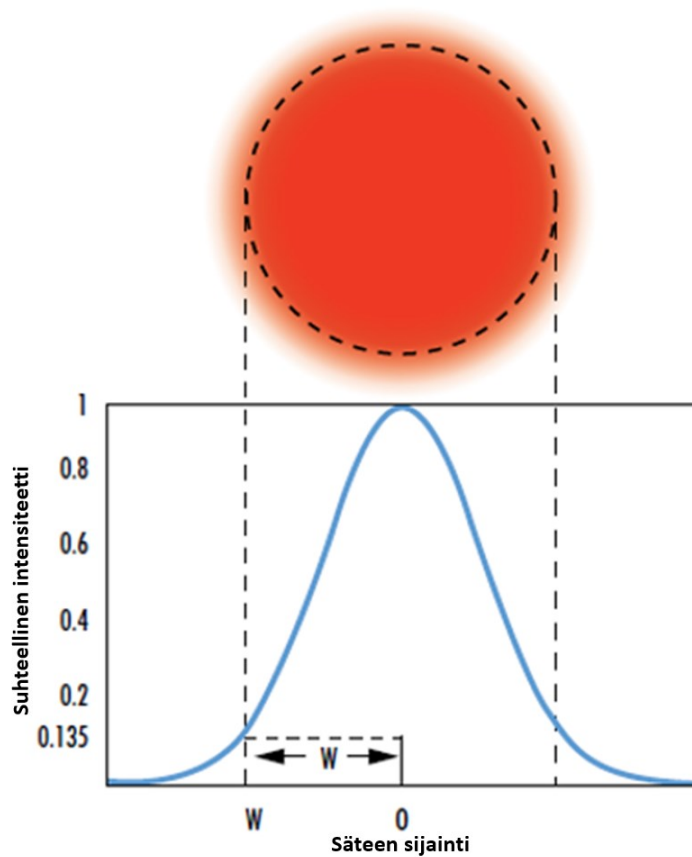
$I_0$  = huippuirradianssi säteen keskellä,

$r$  = radiaalinen etäisyys akselista,

$w(z)$  = lasersäteen säde,

$z$  = etäisyys tasolta, jossa aaltorintama on tasainen,

$P$  = säteen kokonaisteho.



**Kuva 1.** Gaussin säteen vyötärö määritellään paikaksi, jossa irradianssi on  $1/e^2$  (13,5 %) sen maksimiarvosta (mukaihen Self, 1983, s. 21).

Edellä mainittu irradianssiprofiili, kuvan 1 kaltainen profiili, ei pysy kuitenkaan vakiona, minkä vuoksi on kaavassa 1 on otettu huomioon muuttuja  $w(z)$ , sillä diffraktion takia säde kaartuu (Self, 1983; Vaveliuk ja muut, 2007). Gaussin säteen poikkeamaa sen keskiosassa kutsutaan säteen vyötäröksi  $w(0)$ . Tässä kohtaa säteen halkaisija saavuttaa minimiarvonsa. Säde alkaa suppenemaan ja hajoaa Gaussin säteen vyötärön kohdan molemmin puolin divergenssikulman  $\theta$  verran (Self, 1983; Vaveliuk ja muut, 2007). Säteen vyötärö (Kuva 2) ja edellä mainittu hajontakulma mitataan  $z$  akselin molemmilta puolilta ja näiden muuttujien suhde voidaan esittää alla olevien yhtälöiden 2 ja 3 tavalla :

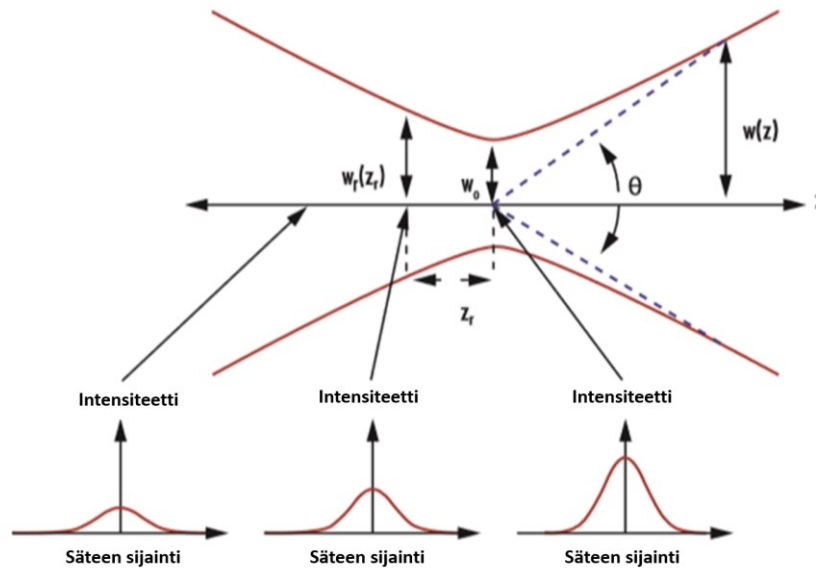
$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi\theta} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad (3)$$

missä

$\lambda$  = säteen aallonpituus,

$\theta$  = kaukokentän approksimaatio.



**Kuva 2.** Gaussin säteet määritellään niiden säteen vyötäröllä ( $w_0$ ), Rayleighin alueella ( $z_R$ ) ja hajontakulmalla ( $\theta$ ) (mukaiillen Self, 1983, s. 17).

Yhtälön 2 laserin aallonpituus  $\lambda$  on kaukokentän approksimaatio  $\theta$  (Self, 1983). Tämän vuoksi kaukokentän approksimaatio  $\theta$  ei anna tarkasti säteen divergenssiä, kun ollaan lähellä säteen vyötärön kohtaa. Tarkempi tulos saadaan, kun etäisyys säteen vyötäröstä on suurempi. Pieni säteen vyötärö antaa suuremman hajontakulman, ja puolestaan suuri säteen vyötärö antaa pienemmän hajontakulman, kuten yhtälöstä 3 voi päätellä. Tämä selittää ilmiön, miksi lasersäteiden hajauttajat voivat joissain tapauksissa vähentää säteen hajaantumista lisäämällä samalla lasersäteiden halkaisijaa (Self, 1983).

Gaussin säteen  $w(z)$  halkaisijan vaihtelu säteen vyötäröalueella määritetään seuraavalla kaavalla :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (4)$$

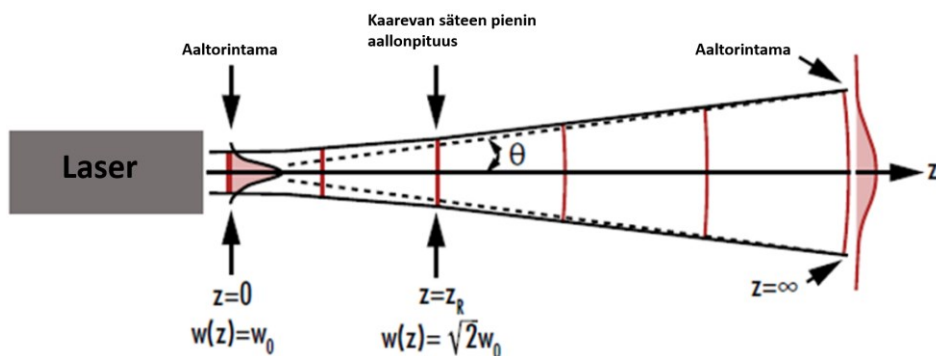
Gaussin säteen tunnettu Rayleighin alue määritellään  $z$ :n arvoksi (Self, 1983). Tässä koh-  
taa säteen poikittainen pinta-ala kaksinkertaistuu, kun  $w(z)$  on saavuttanut arvon  $\sqrt{2}w_0$ .  
Yhtälöä 4 hyväksikäyttämällä voidaan ilmaista selkeästi Rayleighin alue  $z_r$  alla olevan  
kaavan 5 mukaisesti :

$$z_r = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (5)$$

Kaavan 5 perusteella voidaan ilmaista, että  $w(z)$  on riippuvainen muuttujasta  $z_r$  alla ole-  
van kaavan mukaisesti :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2} = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2} \quad (6)$$

Säteen muodostama aaltorintamasarja on levymäinen säteen vyötärön kohdalta ja saa-  
vuttaa lopullisen muotonsa, kun säteen vyötärön alueen etäisyys kasvaa suhteessa al-  
kuperäiseen etäisyyteen (Macdonald, 1986). Ilmiö johtuu siitä, kun kaarevuussäde alkaa  
lähestyä ääretöntä aaltorintaman suhteen. Kun aaltorintaman kaarevuussäde pienenee  
äärettömyydestä lähestyessä säteen vyötärön kohtaa, saavuttaa se silloin minimiarvonsa.  
Ja kun etäisyys kasvaa laserista katsottuna, kaarevuus palaa jälleen äärettömän suureksi.  
Kyseinen ilmiö tapahtuu  $z$ -akselin molemmiin puolin, kuten kuvasta 3 voidaan nähdä  
(Macdonald, 1986).



**Kuva 3.** Gaussin säteen aaltorintaman kaarevuus on lähellä nollaa, kun se on sekä hyvin lähellä että hyvin kaukana säteen vyötäröstä (mukaillen Macdonald, 1986, s. 65).

## 2.4 Lasersäteen laatu ja tarkkuus

Kuitulaserin säteen laatu on ensiarvoisen tärkeä näkökulma säteen karakterisoinnissa (Siegman, 1993, s. 47–49; Kujanpää ja muut, 2005, s. 72–73). Säteen laatu voidaan määrittää useilla eri tavoilla. Yleisesti säteen laatu määritetään siten, kuinka tarkasti se voidaan kohdistaa tietyissä olosuhteissa. Tavallisimmat tekijät säteen laadun kvantisoimiseksi ovat seuraavat menetelmät:

- $M^2$ -tekijä, määritellään sädeparametrin tulona jaettuna sitä vastaavalla tulolla diffraktiorajoitetulla Gaussin säteelle, jolla on vastaava aallonpituus
- $BPP$ , säteen parametritulo. Säteen tulo säteen vyötärön alueella kaukokentän säteen hajaantumiskulman kanssa.

$M^2$ -tekijä lasketaan alla olevan kaavan mukaan:

$$M^2 = \frac{1}{K} \quad (7)$$

$BPP$  eli säteen parametritulo lasketaan alla olevan kaavan mukaan:

$$BPP = \frac{D\theta}{4}, \quad (8)$$

missä

$BPP$  = sädeparametritulo [mm\*rad],

$D$  = säteen halkaisija [mm],

$\theta$  = säteen divergenssi [mrad].

$K$ -luku kuitulaserille lasketaan alla olevan kaavan mukaan:

$$K = \frac{\lambda}{\pi BPP}, \quad (9)$$

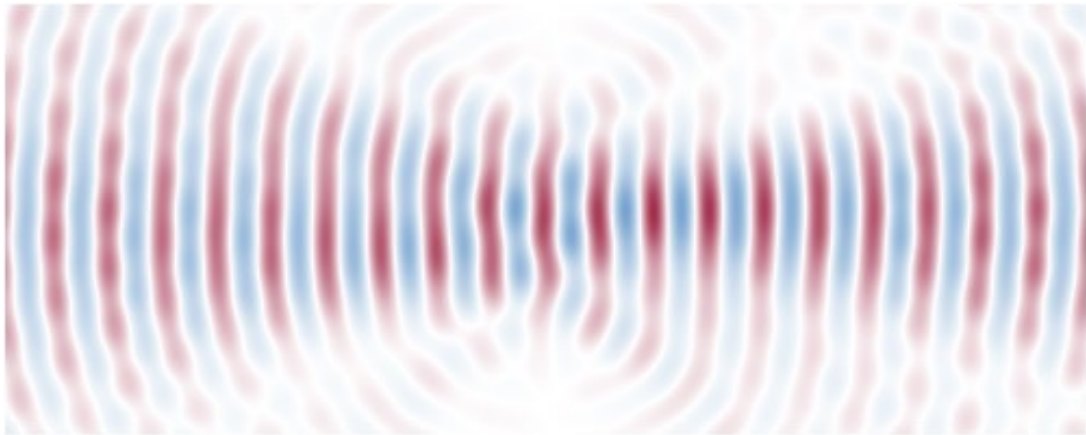
missä

$K$  = K-luku,

$\lambda$  = säteen aallonpituus [nm],

$BPP$  = säteen parametritulo [mm\*rad].

Alhaiset arvot tekijöille  $M^2$  tai  $BPP$  tarkoittavat erinomaista säteen laatua (Siegman, 1993, s. 47–49; Kujanpää ja muut, 2005, s. 72–73). Hyvä säteen laatu vaatii tasaista aaltorintamaa, eli hyvin intensiivisiä vaihdekorrelaatioita säteen profiiliin lävitse. Tällä tavoin säteen tarkennus linssien avulla antaa parhaan mahdollisen tarkennuksen, jossa aaltorintamat ovat tasaisia tasoja ja limittyneet hyvin lähelle toisiaan. Yleisin syy huonolle lasersäteelle on salattujen aaltorintamien aiheuttamat säteen hajaantumiset tietyn pisteen kohdalla, esimerkki tilanteesta kuvassa 4 (Siegman, 1993, s. 47–49; Kujanpää ja muut, 2005, s. 72–73).



**Kuva 4.** Lasersäde, jonka säteen laatu on huono. Toisin kuin ihanteellisessa Gaussin säteessä, aaltorintamat ovat hieman sekoitettuja, mikä vaikeuttaa säteen tarkennusta (mukaillen Siegman, 1993, s. 45).

Teoreettisesti suurin mahdollinen säteen laatu suhteessa tekijään  $M^2$  saavutetaan diffraktiorajoitetulle Gaussin säteelle (Siegman, 1993, s. 47–49). Tässä tilanteessa  $M^2 = 1$ . Tätä tilannetta käyttävät lähes kaikki nykypäivän yhdellä poikittaismodulilla toimivat kuitulaserit.

Lasersädettä täytyy tarkentaa, koska resonaattorilta tuleva säde on yleensä liian suuri käytettäväksi (Kujanpää ja muut, 2005, s. 80–81). Sädettä pienennetään, jotta säteen intensiteetti saadaan riittävän suureksi leittavalle materiaalille. Säteen laatu otetaan huomioon polttopisteen laskennassa K-luvun avulla. Ideaaliselle säteelle K-lukua ei huomioida.

## 2.5 Lasersäteen ja materiaalin vaikutus

Laserin suurin etu materiaalinkäsittelyssä on sen kyky hallita tarkasti energian jakautumista leikattavan materiaalin pinnalle (Brown & Arnold, 2010, s. 92). Energian ohjaus tapahtuu laserin prosessiparametrien oikeoppisella valinnalla. Tähän vaikuttavat haluttu materiaali ja sen geometria.

Tulevan energian hallitseminen halutulle alueelle materiaalin pinnassa saavutetaan ohjaamalla laserin spatiaalista intensiteettiprofiilia (Brown & Arnold, 2010, s. 92). Ohjausmenetelmiä ovat säteen ohjaus galvanometrisillä tai kiinteillä peileillä, säteen tarkennus konvergoivan tai teleskooppi optiikan avulla ja lopuksi säteen muodon muuttaminen homogenisoijalla, diffraktiivisella optiikalla tai amplitudimaskeilla.

Materiaalin kyky heijastaa tulevaa sädettä riippuu säteen taajuudesta ja taitekertoimen suuruudesta (Brown & Arnold, 2010, s. 92–93). Kun tuleva säde osuu materiaalin pintaan, osa säteestä heijastuu rajapinnasta todellisen taitekertoimen epäjatkuvuuden takia. Loput tulevasta säteestä haijastuu itse materiaaliin. Pinnasta  $R$  heijastuvan säteen voimakkuus riippuu säteen tulokulmasta  $i$  ja polarisaatiosta. Lisäksi voimakkuuteen vaikuttavat ilmakehän taitekerroin  $n_1$  ja materiaalin taitekerroin  $n_2$ .

Säteen s-polarisoidun ja p-polarisoidun komponentin heijastuskertoimet voidaan laskea Fresnelin yhtälön avulla (Brown & Arnold, 2010, s. 93). P-polarisoitu komponentti on polarisoitunut yhdensuuntaisesti tulotason kanssa ja s-polarisoitunut kohtisuorasti tulotaso vastaan. Fresnelin yhtälö s- ja p-polarisoidun komponentin heijastuskertoimet ovat seuraavanlaiset :

$$R_s = \left[ \frac{E_r}{E_i} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right]^2 \quad (10)$$

$$R_p = \left[ \frac{E_r}{E_i} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2 \quad (11)$$

Normaalissa tilanteessa pinnalle tasaisesti tulevan säteen tilanteessa yllä olevat yhtälöt supistuvat muotoon :

$$R = R_s = R_p = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (12)$$

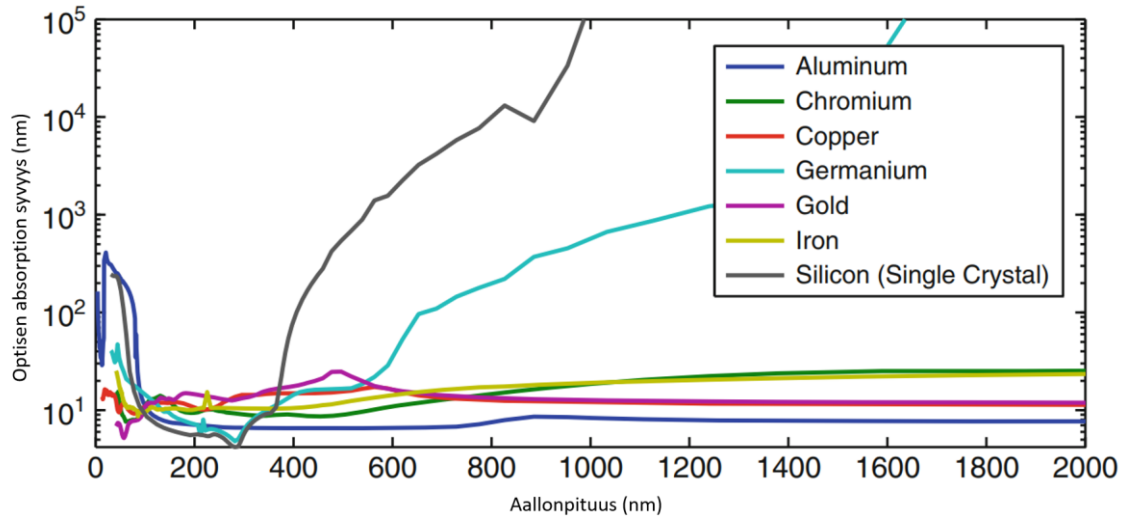
Materiaalin kyky heijastaa riippuu säteen taajuudesta ja taitekertoimen dispersiosuhteesta (Brown & Arnold, 2010, s. 93). Normaalissa ilmaantuvuuden tilanteessa metallien heijastuvuuden arvot näkyvän spektrin alueella ovat yleisesti välillä 0,4–0,95. Näiden lisäksi materiaalin pinnan heijastuvuus riippuu materiaalin permittiivisyydestä ja lämpötilasta.

Materiaalin absorboima säde heikkenee syvyyden myötä (Brown & Arnold, 2010, s. 93–94). Kuvassa 5 on esitetty optiset absorptiosyvyydet materiaaleille eri aallonpituuksilla. Tätä kuvataan absorptiokertoimen  $\alpha$  määrittämällä nopeudella. Normaalisti  $\alpha$  on lämpötilan ja aallonpituuden funktio ja sen intensiteetti  $I$  vähenee eksponentiaalisesti syvyydellä  $z$  Beer-Lambertin määräämän lain mukaisesti :

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}, \quad (13)$$

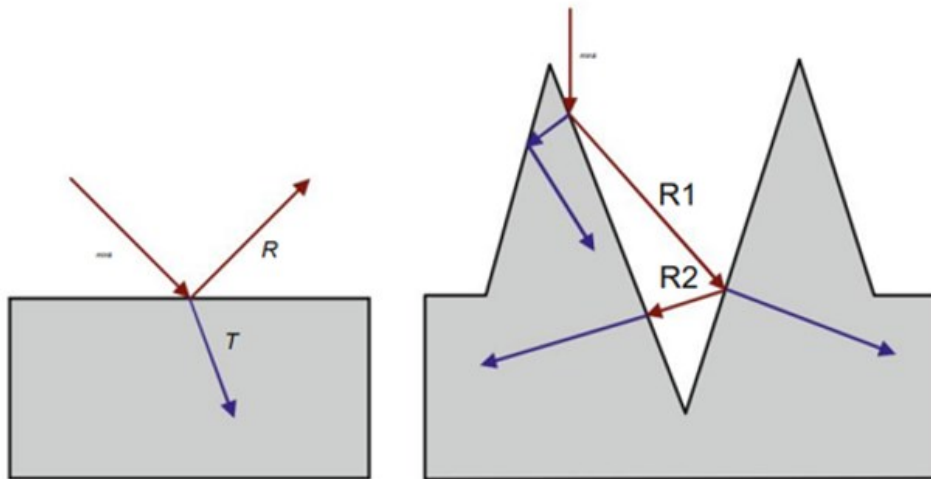
missä

$I$  = Intensiteetti pinnan sisällä heijastushäviön jälkeen,  
 $\alpha$  = säteen kulma.



**Kuva 5.** Optiset absorptiosyvyydet materiaaleille eri aallonpituuksilla (mukailen Brown & Arnold, 2010).

Materiaalin pinnan epätasaisuus vaikuttaa merkittävästi säteen heijastumiseen ja hajomiseen (Brown & Arnold, 2010, s. 105–106). Tämä puolestaan johtaa parempaan absorptioon, kun verrataan sileää pintaa. Kuvassa 6 on esitetty, kuinka osa tulevasta säteestä heijastuu pinnasta ja osa absorboituu materiaaliin. Jos pinta on epätasainen, kuten kuvan 6 oikeanpuoleisessa tilanteessa, osa säteestä heijastuu pinnasta ja osa heijastuneesta säteestä heijastuu takaisin pinnan epätasaisuuksien vuoksi. Materiaalien epätasaisuus lisää säteen optisen reitin pituutta ja täten parantaa säteen absorptiota materiaaliin (Brown & Arnold, 2010, s. 105–106).

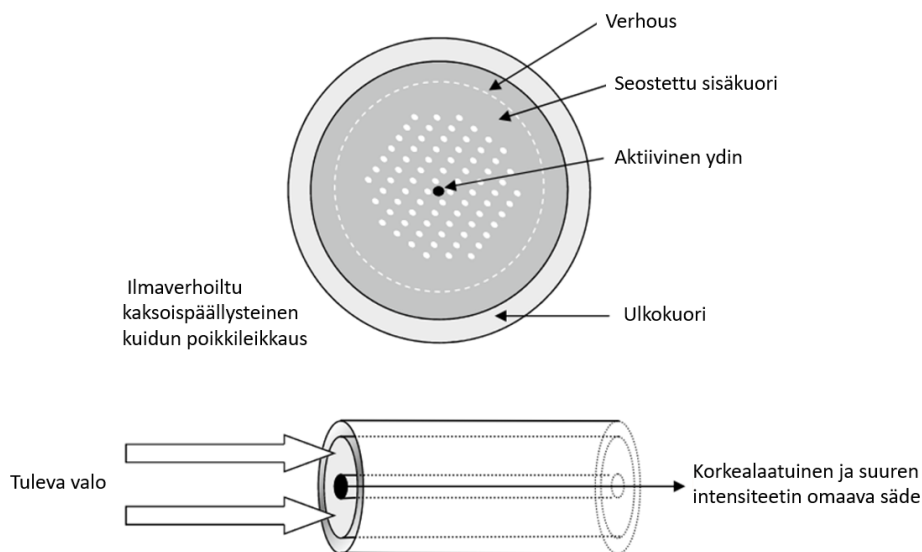


**Kuva 6.** Säteen eteneminen tasaisessa ja epätasaisessa materiaalissa (mukaillen Brown & Arnold, 2010).

## 2.6 Optinen kuitu

Kuitulaserissa optista kuitua käytetään aktiivisena vahvistusväliaineena ja kuidun sisäytymeen seostettu alkuaine toimii laseroivana väliaineena tai resonaattorina (William Steen, 2010, s. 12–15; Himeno, 2015, s. 2–5). Tyypillisiä alkuaineita ovat neodyymi, ytterbium, erbium, praseodyymi, holmium, tulium tai dysprosium. Yleisesti käytetään piidioksidilasiin seostettua ytterbiumia, joka mahdollistaa laserin aallonpituuden pienentämisen. Ytterbiumilla on korkein taitekerroin seosaineista, mikä tekee siitä optimaalisen valinnan kuitulaserin seostusaineeksi.

Kuitulaser on solid-state -laser, joka hyödyntää optista kuitua vahvistusaineena (William Steen, 2010, s. 41–42; Himeno, 2015, s. 4–5; Eagle-Group, 2023b). Optinen kuitu, johon on seostettu laseroiva väliaine, toimii keskeisenä komponenttina kuitulaserin toiminnassa. Se mahdollistaa suuren tehon tuottamisen pienessä tilassa ja tarjoaa samalla erinomaisen säteen laadun ja stabiiliuden. Kuitulaserin toimintaperiaate perustuu optisen kuidun kykyyn vahvistaa laserin sädettä ja kulkeutumista kuidussa. Tämän ansiosta kuitulaserit ovat suosittuja monissa sovelluksissa, kuten laserleikkauksessa, merkinnässä, hitsauksessa ja lääketieteellisissä sovelluksissa.



**Kuva 7.** Optisen kuidun poikkileikkauskuva (mukaillen William Steen, 2010, s. 48).

Kuitulaserin kuidun rakenne koostuu kahdesta pääkerroksesta (Tonshoff ja muut, 1998; Kujanpää ja muut, 2005, s. 66–69; Eagle-Group, 2023b), kuten kuvassa 7 havainnollistetaan. Sisempi kerros toimii laseroivana ytimenä, kun taas ulompi kerros estää säteen etenemisen kuidun läpi. Uloin kerros, ulkokuori, muodostuu muovikerroksesta, joka suojaa ja vaimentaa ulkoisia iskuja sekä estää kuidun ydintä liialliselta taipumiselta. Kuidun ytimen halkaisija on noin 8  $\mu\text{m}$ , ja sen pituus voi ulottua jopa 200 metriin.

Säteen muodostuminen kuidussa tapahtuu pumppaamalla kuidun seostettua ydintä diodilaserin valolla kuidun sisällä (Tonshoff ja muut, 1998; Kujanpää ja muut, 2005, s. 66–69; Eagle-Group, 2023b). Kuidun molemmissa päissä sijaitsevat resonaattoripeilit, ja pumppausenergia vietään kuituun kuidun päistä. Tällöin pumppausenergia etenee kuidun sisällä kokonaisheijastuksen avulla, kulkeutuen ytimen läpi lukuisia kertoja. Kokonaisheijastuksen ansiosta tapahtumasarjassa ei tapahdu tehohäviöitä. Tämän seurauksena syntyvä säde on halkaisijaltaan pieni ja säteen laatu erinomainen.

Laserin rakenne on kokonaisuudessaan modulaarinen (Tonshoff ja muut 1998; Kujanpää ja muut, 2005, s. 66–69; Eagle-Group, 2023b). Kuitulaseria voidaan pumpata usealla laserimoduulilla, mikä mahdollistaa useamman kilowatin tehon, jota voidaan hyödyntää

laserleikkauksessa erityisesti ominaisuuksiltaan tiheiden ja paksujen materiaalien leikkaamiseen. Kuvassa 8 esitetään vasemmalla kuitulaserin diodipumppulaser, keskellä seostettu kuitu ja heijastavat raot, ja oikealla nähdään ulos saatu lasersäde.



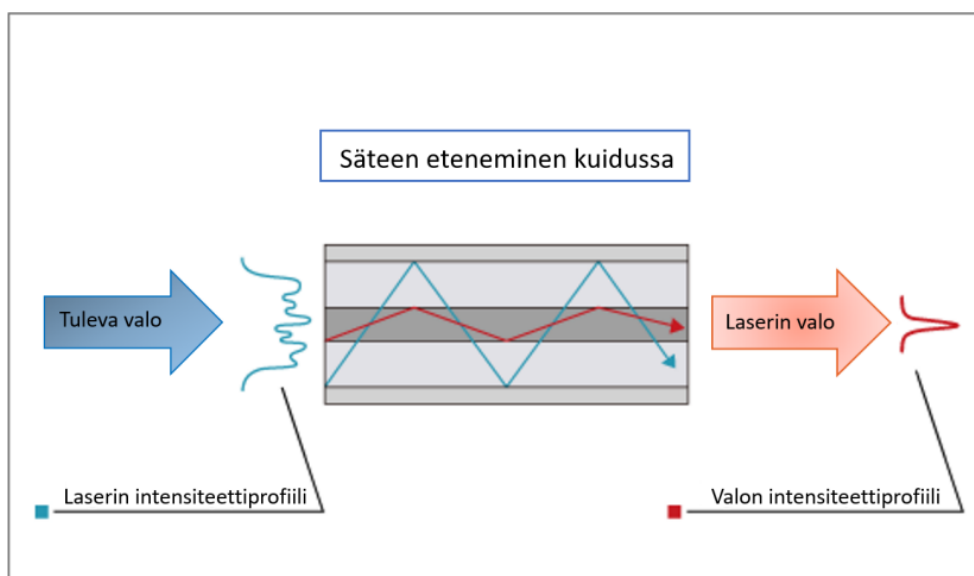
**Kuva 8.** Kuitulaserin toiminta pääpiirteittäin (mukaiillen Himeno, 2015, s. 26).

Kuitulaserit, jotka hyödyntävät ytterbiumia ytimen seosaineena, tarjoavat optimaalisen aallonpituuden laserleikkaukseen (William Steen, 2010, s. 6–7, 12, 46–47 ; Himeno, 2015, s. 5). Tämä mahdollistaa suuren tehon, erinomaisen säteen laadun ja laajan dynaamisen tehoalueen sekä säteen tarkan kohdistuksen leikkausmateriaaliin. Säteen kohdistus säilyy vakiona, vaikka laserin käyttämää tehoa muutettaisiin. Leikkuupään ja optiikan vaihtaminen tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet erilaisiin polttopisteisiin (William Steen, 2010, s. 6–7, 12, 46–47; Himeno, 2015, s. 5).

Kuitulaserin moodi ja säteen laatu mahdollistavat laadukkaan, pienen polttopisteen, mikä vastaa metalliteollisuuden yritysten vaatimuksia (William Steen, 2010, s. 511–512; Himeno, 2015, s. 3–4). Optimaalisen säteen pulssituksen yhdistäminen leikkaukseen mahdollistaa ohuiden materiaalien leikkaamisen ilman epätasaisuuksia ja railoja. Säteen pulssituksen avulla ylimääräinen aine, kuten porsche, siirtyy levyn leikkauspinnan alapuolelle ja irtoaa sieltä leikkauskaasun virtausnopeuden ansiosta. Kuitulaserin suurella teholla, tarkalla säteellä ja oikealla säteen moodilla saavutetaan erinomainen

leikkausjälki. Tällä voidaan vähentää leikattujen kappaleiden jälkikäsittelytarvetta (William Steen, 2010, s. 511–512; Himeno, 2015, s. 3–4).

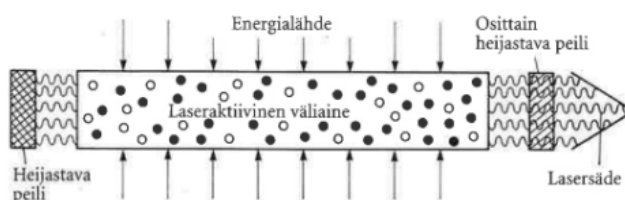
Valon taittuminen kuidussa on keskeinen periaate kuitulaserin toiminnassa (William Steen, 2010, s. 25–25, 55–56, 81–84, 123–124; Eagle-Group, 2023b). Tämä perustuu optisen materiaalin taitekertoimeen, joka kuvaa valon nopeutta materiaalissa ja sen muutoksia. Optisessa kuidussa hyödynnetään heijastusta kuidun sisällä, mikä mahdollistaa valon pysymisen kuidun ytimessä. Tämä saavutetaan valitsemalla sopivat materiaalit kuidun ytimeen ja verhouskerrokseen, joilla on oikeat taitekertoimet. Kun valo osuu kuidun pintaan tietyn kulman alla, se heijastuu takaisin sisälle ja kulkee pitkin kuitua. Tätä ilmiötä kutsutaan täydelliseksi sisäiseksi heijastukseksi. On olemassa tietty kulma, joka määrittää kuidun sisäisen kokonaisheijastuksen. Kulman ollessa suurempi kuin tämä kriittinen kulma, valonsäde taittuu edelleen, mutta ei heijastu takaisin ytimeen, vaan katoaa kuidun kuoreen. Kulman alapuolella valo heijastuu takaisin ytimeen ja kulkee kuidun läpi sen päähän. Kuvassa 9 havainnollistetaan valonsäteen etenemistä kuidun sisällä (William Steen, 2010, s. 55–56, 81–84, 123–124; Eagle-Group, 2023b).



**Kuva 9.** Kuitulaserin kuidun rakenne (mukaillen Himeno, 2015, s. 3).

## 2.7 Resonaattori

Kuitulaserin resonaattori tarkoittaa peilien ja väliaineen muodostamaa rakennetta, jossa valo tuodaan järjestelmään. Resonaattori on putkimainen rakenteen omaava järjestelmä (kuva 10), jonka päissä on peilit. Toinen pää läpäisee valoa osittain. Putki sisältää laseroivan väliaineen. (Kujanpää ja muut, 2005, s. 51–55).

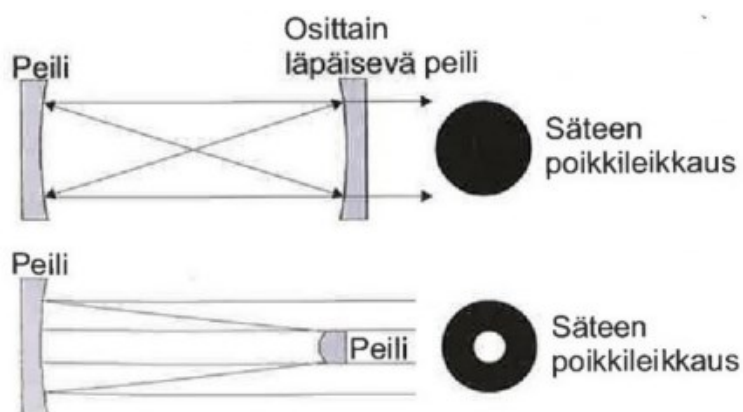


**Kuva 10.** Resonaattorin toimintaperiaate (mukaiillen Kujanpää ja muut, 2005, s. 35).

Resonaattori on laserjärjestelmän keskeinen osa (William Steen, 2010, s. 7–8, 11–14, 173; Edmundoptics, 2024 ; Hanning ja muut, 2017, s. 2–5). Resonaattori vaikuttaa laser säteen muotoon. Tyypillisesti resonaattorit rakennetaan erittäin heijastavista dielektrisistä peileistä tai monoliittisista kiteistä, jotka hyödyntävät täydellistä kokonaisheijastusta estääkseen valon pääsemisen ulos järjestelmästä. Alla on esitelty yleisimmät resonaattorigeometrit :

- Tasosuuntainen resonaattori koostuu kahdesta litteästä peilistä, jotka ovat asetettu niin, että niiden välinen etäisyys vastaa tarkasti puolta tai monikertaa laserin käyttämästä valon aallonpituudesta.
- Samankeskinen resonaattori koostuu kahdesta pallomaisesta peilistä, joilla on identtinen kaarevuussäde ja keskipisteet sijaitsevat samassa kohdassa.
- Konfokaalinen resonaattori koostuu kahdesta pallomaisesta peilistä, joilla on sama kaarevuussäde ja samat polttopisteet.
- Renkasresonaattori koostuu kahdesta heijastimesta muodostetusta renkaasta. Tässä rakenteessa heijastuneen valon polku muodostaa suljetun silmukan, ja tämän silmukan kokonaispituus vastaa tarkasti puolta tai monikertaa käytetyn laserin valon aallonpituudesta.

Resonaattorit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin eli stabiileihin ja epästabiileihin, riippuen resonaattorin ulostulopuolen rakenteesta (kuva 11) (William Steen, 2010, s. 7-8, 11-14, 173; Edmundoptics, 2024; Hanning ja muut, 2017, s. 2–5; Kujanpää ja muut, 2005, s. 53). Yleisesti ottaen stabiileja resonaattoreita käytetään laajasti kaikissa muissa lasseissa paitsi hiilidioksidilasereissa, joissa hyödynnetään epästabiilia resonaattoria. Epästabiilissa resonaattorissa ulostulossa on pienempi peili keskellä, joka heijastaa valon takaisin resonaattorin alkupäähän. Valo, joka menee peilin ohi, jatkaa matkaansa kohti laserin suutinta ja luo rengasmaisen säteen poikkileikkauksen. Resonaattorin peilit suurentavat sädekokoaa. Alla olevassa kuvassa 11 on esitetty stabiilin ja epästabiilin resonaattorin toimintaperiaatteet (William Steen, 2010, s. 7-8, 11-14, 173; Edmundoptics, 2024; Hanning ja muut, 2017, s. 2–5; Kujanpää ja muut, 2005, s. 53).

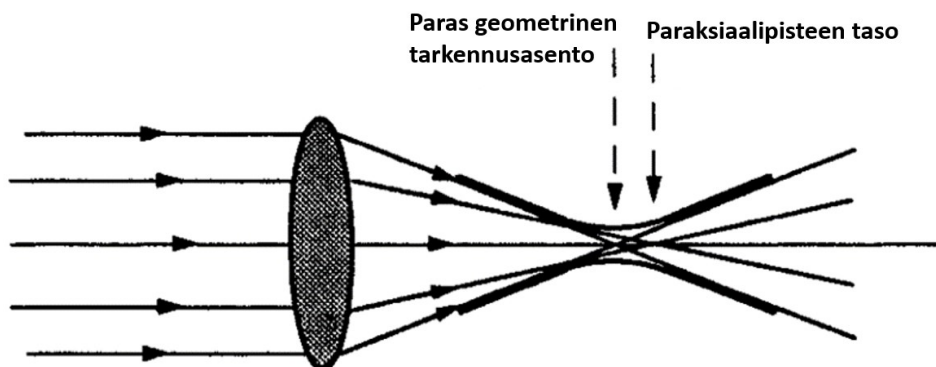


**Kuva 11.** Ylemmässä tilanteessa on stabiilin ja alemmassa epästabiilin resonaattorin toimintaperiaatteet (Kujanpää ja muut, 2005, s. 52).

## 2.8 Laserin linssit

Optisen kuidun läpi kulkeva säde on liian suuri sen tullessa resonaattorilta (Kujanpää ja muut, 2005, s. 80–83). Tämän takia tarvitaan linsejä, jotka tarkentavat säteen pienemmäksi, jotta säde saataisiin mahdollisimman tarkaksi ja tehokkaaksi. Säteen tarkennus voidaan tehdä tarkentavilla linseillä tai peileillä. Tarkentava linssi (Kuva 12) on parempi vaihtoehto, sillä se on helpompi puhdistaa ja vaihtaa. Kun laserin säde on

laadultaan hyvä, sen energiajakauman intensiteetti keskittyy säteen keskelle, jolloin saavutetaan optimaalinen tarkennus säteessä (Kujanpää ja muut, 2005, s. 80–83).



**Kuva 12.** Kuitulaserin leikkuupään linssi, joka tarkentaa säteen lopulliseen muotoonsa (mukailen William Steen, 2010, s. 111).

## 2.9 Paineistettu ilma laserleikkauksessa

Laserleikkauksessa leikkauskaasut, kuten ilma, typpi ja happi, ovat merkittäviä tekijöitä leikkausprosessissa (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Amanda, 2023). Laserleikkaus hyödyntää kaasusuihkua, jotta koko prosessi saadaan optimoitua ja sen lopputuloksena leikkauksen laatu maksimoitua. Leikkauksen tehokkuus ja tulokset ovat riippuvaisia käsiteltävän materiaalin ominaisuuksista, kuten paksuudesta ja käytetystä kaasusta (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Amanda, 2023).

Leikkausprosesseissa inerttien kaasujen käyttö luo voimakkaan vuorovaikutussuhteen sulan materiaalin kanssa, mikä aikaansaa puhtaan leikkaurailon (Mushtaq ja muut, 2020; Machinemfg, 2023; Amanda, 2023). On tärkeää huomata, että joillakin materiaaleilla on taipumus jähmettyä nopeasti, minkä vuoksi kaasun virtausnopeus ja laatu on ensiarvoisen tärkeässä asemassa hyvän leikkausjäljen aikaansaamiseksi (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Amanda, 2023).

Laserleikkauksessa eniten käytettyjä kaasuja ovat happi ja typpi (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Riveiro ja muut, 2019; Amanda, 2023). Viime aikoina paineilmaa on alettu käyttää laajasti vaihtoehtona aiemmin mainituille leikkauskaasuille, kuten typelle. Nykyteknologian kehityttyä ja laserien parannuttua on päädytty käyttämään uusimman teknologian myötä paineistettua ilmaa leikkauskaasuna. Tämä siksi, koska ilma koostuu pääosin typestä (78 %) ja hapesta (21 %). Tavoitteena on ollut yhdistää näiden kaasujen edut leikkausprosessissa samalla, kun alennetaan leikkauksesta aiheutuvia käyttökustannuksia. Paineilma on osoittautunut tehokkaimmaksi ratkaisuksi monille prosesseille, vaikka perinteisiä kaasuja käytetään edelleen useissa tapauksissa. Paineistetulla ilmalla leikkaus on nopeuttanut erilaisten metallien työstöä samalla kun se on alentanut käyttökustannuksia (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Riveiro ja muut, 2019; Amanda, 2023).

Nykyään leikkaus paineistetulla ilmalla on vakiintunut leikkauskaasu tehokkuuteen pyrkiville yrityksille (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Amanda, 2023). Laaja materiaalivalikoima, kuten alumiini, ruostumaton teräs ja pehmeä teräs, takaa paineistetulla ilmalla parhaat olosuhteet leikkauksessa. Paineistetulla ilmalla leikatessa saavutetaan huomattava vaikutus tuotteiden laatuun ja käyttökustannuksiin niin tuotannon tehokkuuden, kuin liiketoiminnankin näkökulmasta (Mushtaq ja muut, 2020; He ja muut, 2022; Amanda, 2023).

## **2.10 Leikkuupään toiminta**

Kuitulaserin leikkuupää on keskeinen osa kuitulaserjärjestelmää, ja sen toiminnalla on keskeinen vaikutus leikkausprosessin onnistumiseen ja laatuun (Mushtaq ja muut, 2020). Leikkuupää vastaa lasersäteen muodosta ja suuntaamisesta leikattavaan materiaaliin. Generaattori tuottaa diodilaserilla valoa, joka suunnataan peilin avulla kohti tarkentavaa linssiä. Tämä linssi kokoaa lasersäteen pienemmäksi ja tarkemmaksi ennen sen ohjaamista suuttimen kautta kohti leikattavaa materiaalia. Jokainen vaihe, alkaen valon tuottamisesta generaattorissa aina lasersäteen lopulliseen suuntaamiseen leikkuupäästä, on olennainen osa prosessia (Mushtaq ja muut, 2020).

Optimaalisen leikkuupään säädön avulla voidaan varmistaa, että lasersäde osuu halutulle alueelle materiaalissa ihanteellisella voimalla ja tehokkuudella, johtaen parempiin leikkaustuloksiin (Mushtaq ja muut, 2020).

Leikkuupään toiminnan ymmärtäminen auttaa tunnistamaan mahdolliset pullonkaulat leikkausprosessissa ja mahdollistaa tehokkaiden säätöjen tekemisen (Mushtaq ja muut, 2020). Leikkuupään optimaalinen säätö takaa, että leikkausprosessi sujuu tehokkaasti ja luotettavasti eri leikkausparametreilla ja materiaaleilla. Kuitulaserin leikkuupään toiminta on keskeinen osa leikkausprosessia, ja sen toiminnan ymmärtäminen on välttämätöntä parhaiden mahdollisten leikkaustulosten saavuttamiseksi.

### 3 Kuitulaserin parametrit leikkauksessa

Kuitulaserleikkauksessa on monia parametreja, jotka vaikuttavat leikkauksen lopputulokseen (William Steen, 2003, s. 168–182). Parametrien säätäminen oikeanlaisiksi kullekin leikkausmateriaalille ja menetelmälle on haastavaa, sillä kaikki käytetyt parametrit vaikuttavat toisiinsa. Leikkaukseen vaikuttavat parametrit voidaan esittää William M. Steeniä mukaillen :

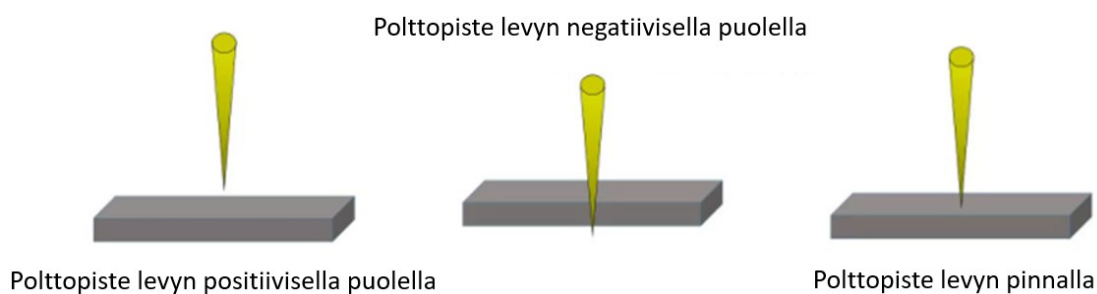
- Ohjausparametrit
  - Polttopisteen paikka
  - Leikkausnopeus
- Kaasuparametrit
  - Kaasun koostumus
  - Virtausnopeus
  - Suuttimen kohtisuoruus leikkauspintaan, paikka ja muoto
- Sädeparametrit
  - Polttopisteen moodi ja koko
  - Teho, pulssitettu
  - Taajuus
  - Aallonpituus
- Materiaaliparametrit
  - Lämmönjohtavuus
  - Absorptio
  - Leikkaurailo

ABB:llä keskitytään yllä listatuista parametreista erityisesti leikkauskaasuun ja sen vaikutukseen leikkauksessa sekä leikkausnopeuteen. Nämä tekijät ovat valikoituneet tarkasteluun siitä syystä, että niillä on suora vaikutus kuitulaserin leikkausuran ylä- ja alapinnan leveyseroon, tuottavuuteen, leikkaujäljen laatuun sekä absorption vaikutukseen levyssä. Tässä työssä tarkennutaan niihin seuraavissa kappaleissa.

### 3.1 Laserin ohjausparametrit

#### 3.1.1 Polttopisteen paikka

Kuitulaserin lasersäteen polttopisteen paikka on säteen tarkennuskohdan eli polttopisteen ja työkappaleen välinen suhteellinen asema (Turkkan ja muut, 2023; Mushtaq ja muut, 2020). Levyn yläpuolella on positiivinen puoli ja alapuolella negatiivinen. Polttopisteen paikka vaikuttaa leikkausjäljen karheuteen, raon kaltevuuteen ja railon leveyteen sekä kuonan jäännöksen tarttumiseen levyn alapinnalla. Kuvassa 13 esitetty polttopisteen paikka levyn positiivisella puolella, levyn negatiivisella puolella ja levyn pinnalla nolapisteessä (Turkkan ja muut, 2023; Mushtaq ja muut, 2020).



**Kuva 13.** Kuitulaserin polttopisteen paikat (mukaillen Wewinlaser, 2021).

Jos polttopisteen paikka on liian ylhäällä leikattavaan kappaleeseen nähden, lisää se tällöin leikattavan työkappaleen alapään absorboimaa lämpöä, kuvan 13 vasemmanpuoleinen tilanne (Turkkan ja muut, 2023; Mushtaq ja muut, 2020). Leikkausnopeuden ja kaasun paineen ollessa vakiot, saa se leikatun ja sulaneen materiaalin virtaamaan leikatun sauman lähellä nestemäisessä tilassa ja sulanut materiaali kiinnittyy jäähtyttyään palloina leikatun kappaleen alapintaan. Näin tapahtuu, koska polttopiste on liian korkealla leikattavan kappaleen paksuuteen nähden, jolloin sulanut materiaali ehtii jäähtyä leikkausrailon alaosaan kiinni (Turkkan ja muut, 2023; Mushtaq ja muut, 2020).

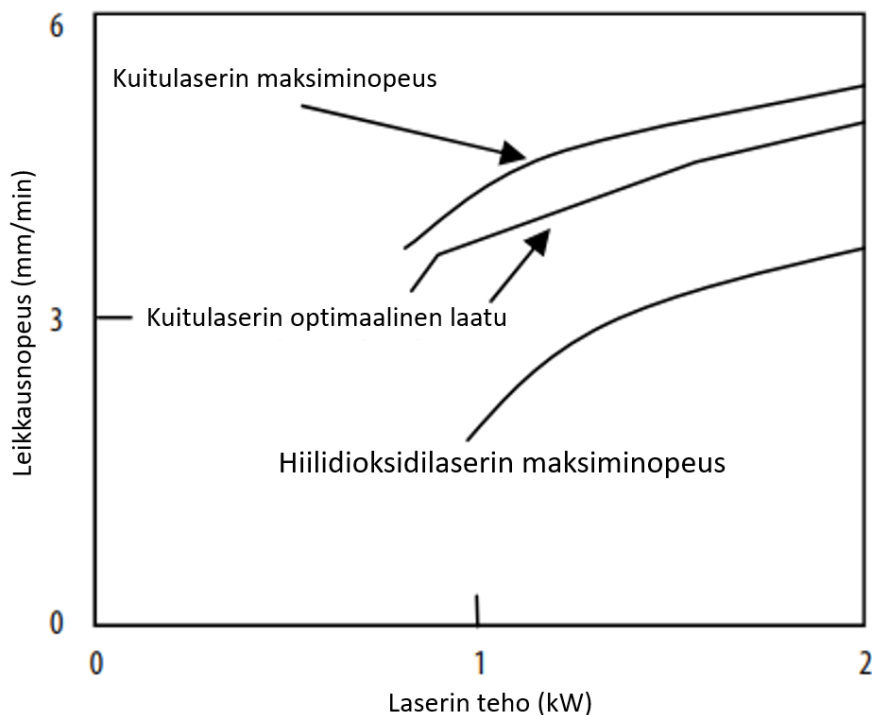
Kun polttopisteen paikka on liian alhaalla leikattavaan kappaleeseen nähden, leikattavan materiaalin alapuolen absorboima lämpö vähenee, ja railossa oleva materiaali ei sula

kokonaan ja levyn alapintaan tarttuu kiinni lyhyitä ja teräviä metallijäämiä, kuten keskimäisessä tilanteessa kuvassa 13 (Turkkan ja muut, 2023). Yleisesti tarkennusasento asetetaan levyn pintaan tai hieman alemmaksi, kuten oikeanpuoleisessa tilanteessa kuvassa 13. Eri materiaalien vaatimukset ovat kuitenkin erilaisia, eikä tämä toimenpide ole aina toimiva. Tähän vaikuttavat kaasun tyyppi, paine ja lasersäteen teho.

### 3.1.2 Leikkausnopeus

Materiaalin paksuudella on suora vaikutus käytettävään leikkausnopeuteen (Ion, 2005, s. 357–359; William Steen, 2010, s. 156–164; Mushtaq ja muut, 2020). Mitä paksumpi leikattava kappale on, sitä pienempi leikkausnopeus on oltava. Leikkausnopeus tulee olla oikea leikkauskaasun virtausnopeuden ja tehon suhteen. Leikkausnopeuden kasvaessa liian suureksi, juovista tulee näkyvämpiä, pursketta muodostuu todennäköisemmin ja leikkaussyvyys pienenee. Liian pieni leikkausnopeus aiheuttaa reunojen liiallista palamista, mikä huonontaa reunan laatua ja kasvattaa lämpövyöhykettä.

Yleisesti ottaen leikkausnopeus on kääntäen verrannollinen leikattavan materiaalin paksuuteen (Ion, 2005, s. 350–357; William Steen, 2010, s. 156–164; Mushtaq ja muut, 2020). Leikattaessa kulmia tai teräviä muotoja, leikkausnopeutta tulee vähentää ja säteen tehoa tulee pienentää. Yleissääntönä pidetään, että mitä nopeampi leikkausnopeus on, sitä vähemmän lämpövaikutus pääsee vaikuttamaan materiaaliin, mikä tarkoittaa yleisesti parempaa leikkauslaatua. Alla oleva kuva 14 kuvaa hyvin tehon vaikutusta laserin leikkausnopeuteen kuitulaserin ja perinteisen hiilidioksidilaserin välillä.



**Kuva 14.** Tehon vaikutus laserin leikkausnopeuteen kuitulaserin ja tavallisen CO<sub>2</sub>-laserin välillä. Keskellä esitetty esimerkki kuitulaserin optimaalisesta laadusta (mukaillen William Steen, 2010, s. 169).

## 3.2 Kaasuparametrit

### 3.2.1 Kaasun koostumus

Inertit kaasut, kuten typpi, estävät teräksen, ruostumattoman teräksen, titaanin ja alumiinin pintojen hapettumisen (Riveiro ja muut, 2019; Mushtaq ja muut, 2020). Kun leikkauskaasuna käytetään typpeä, työntää se ympäröivän hapen pois reagoimasta metallin kanssa estäen hapettumisen. Metallin hapettumisen estäminen tuottaa laadukkaamman lopputuloksen. Lisäksi typpi auttaa estämään ylimääräistä lämmönmuodostusta. Korkeimpia kaasun paineita ja virtausnopeuksia käytetään ominaisuuksiltaan tiheissä ja paksuissa metalleissa. Lisäksi laserleikkausprosessissa tarvitaan puhdas lasersäde, jotta vältetään huono leikkausjälki. Leikkauskaasua käytetään estämään lasersäteen ”likaantuminen” puhdistamalla putki, jonka läpi lasersäde kulkee leikattavaan kappaleeseen (Riveiro ja muut, 2019; Mushtaq ja muut, 2020).

Nykypäivänä paineistettu ilma on saanut suurta suosiota laserleikkauksessa (Mushtaq ja muut, 2020; Riveiro ja muut, 2019). Paineistettu ilma on yksinkertaisin kaikista apukaasuista. Paineistettu ilma on kuitenkin puhdistettava kosteudesta ja öljystä erillisellä järjestelmällä. Paineistettu ilma on happipitoisuutensa takia reaktiivinen kaasu, mutta huomattavasti vähemmän reaktiivinen kuin happi. Tyypeen verrattaessa paineistettu ilma aiheuttaa joissain tapauksissa materiaalista riippuen materiaalin hapettumisen.

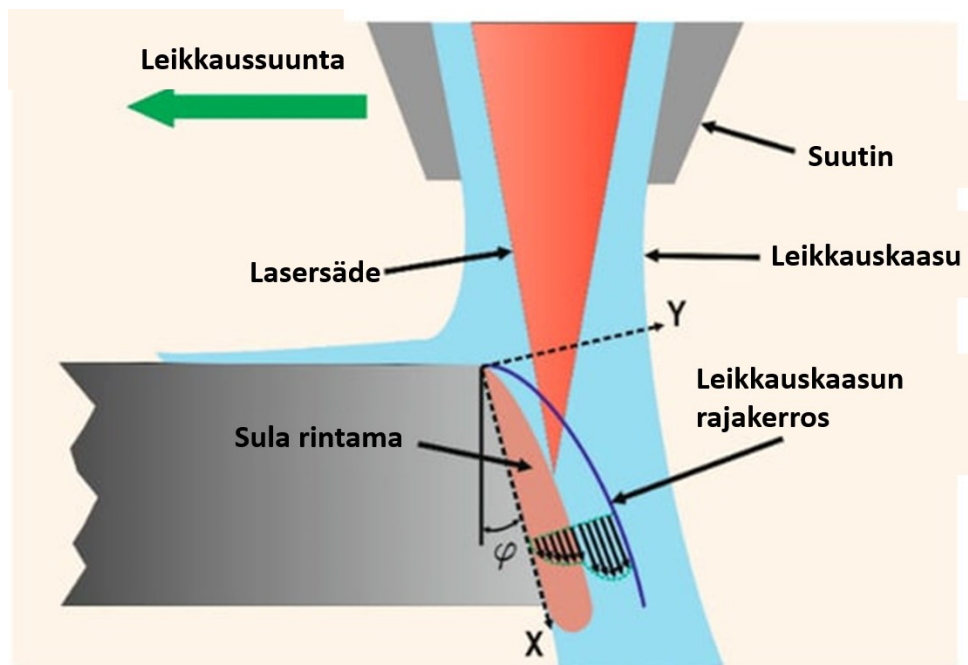
### **3.2.2 Apukaasun virtausnopeus ja sen vaikutukset leikkausprosessissa**

Kaasun virtausnopeus ja paine ovat merkittävässä asemassa leikattaessa eri metallilaitteita (Kujanpää ja muut, 2005, s. 129–135; Riveiro ja muut, 2019). Kuitulaserin leikkauksessa lasersäteiden sulattama metalli puhalletaan pois inertillä kaasulla. Kaasun paineen täytyy olla riittävän korkea, jotta kaikki sulanut materiaali poistuu leikkausurasta, muutoin sulanut materiaali pääsee jäähtymään leikkausuraan ja urasta tulee epätasainen. Kaasun paine voi nousta tehokkaissa lasereissa jopa 15–20 baariin (Kujanpää ja muut, 2005, s. 129–135; Riveiro ja muut, 2019).

Olsen on määrittänyt tutkimuksessaan maksimileikkausnopeuden tietyn työkappaleen eri paksuuksille lasertehon ja apukaasun (arkikielessä leikkauskaasun) paineen funktiona (Olsen, 2006, s. 188–196; Olsen & Alring, 1989, s. 215–218). Hän käytti teoreettista mallia, joka oli suunnattu erityisesti laserleikkaukseen. Tärkein havainto oli, että suurin leikkausnopeuteen vaikuttava rajoittava tekijä on apukaasun kohdistama voima leikkausuran sisällä lasertehon sijaan. Tämä korostaa kaasun merkitystä laserleikkausprosessissa. Teorian tärkeys korostuu etenkin silloin, kun leikataan paksumpia materiaaleja. Vicanek ja Simon kehittivät mallin Olsenin tutkimuksen pohjalta, joka osoittaa, että nämä voimat määräävät sulaneen materiaalin paksuuden leikkausrintamalla ja käytettävän leikkausnopeuden (Vicanek & Simon, 1987, s. 1191–1196). Jos nämä voimat ovat liian pieniä, sulanut materiaali kerääntyy ja kiinnittyy leikkausuraan. Tämän lisäksi leikkauslaatu heikkenee, kun rakoon kertyy liikaa sulaa materiaalia. Kun leikkauskaasu virtaa leikkattuun uraan, muodostaa se rajakerroksen sulan ja kiinteän materiaalin välille, jolloin

sulanut materiaali ei pääse kiinnittymään leikkausuraan (Tirumala & Nath, 2002, s. 569–575).

Kun leikkauskaasu virtaa leikkausuraan, kuten alla olevassa kuvassa 15 esitetään, muodostuu rajakerros sulaneen ja kiinteän materiaalin välille (Tirumala & Nath, 2002, s. 569–575). Liikemäärän siirto apukaasusta sulaan materiaaliin tapahtuu tämän rajakerroksen lävitse. Apukaasun sulan materiaalin liikuttavan voiman maksimoimiseksi sulaan materiaaliin, on rajakerros pidettävä laminaarisessa tilassa. Virtaus on laminaarista, kun nopeudet eivät sisällä makroskooppisia vaihteluita missään virtauskentän kyseisessä pisteessä. Tasaisen laminaarisen virtauksen tapauksessa kaikki nopeudet virtauskentän paikallaan olevassa pisteessä pysyvät vakioina ajan suhteen, mutta nopeudet voivat poiketa eri pisteissä. Tämä vaatimus täyttyy, jos virtauksen Reynoldsin luvut ( $Re$ ) ovat alle kriittisen arvon ( $Re_g < Re_{g,kriittinen} = 3,2 \cdot 10^5$ ). Kun  $Re_g > Re_{g,kriittinen}$  virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. Pistettä kutsutaan erotuspisteeksi tai rajakerroksen erotukseksi (Tirumala & Nath, 2002, s. 569–575).



**Kuva 15.** Sulan materiaalin vaikuttavat voimat laserleikkausprosessin aikana (mukaillen Riveiro ja muut, 2019, s. 157).

Vicanek ja Simon tutkivat leikkauskaasun sulaan materiaaliin kohdistuvia voimia ja kehittivät sen perusteella tälle dynaamisen mallin sulan materiaalin irtoamisesta laserleikkauksessa (Vicanek & Simon, 1987, s. 1991–1996). Leikkausrintamalla havaitut voimat tulkittiin painegradientin aiheuttamiksi ja leikkausjännitykseksi. Nämä voimat syntyvät leikkauskaasun viskositeetin ja sulan materiaalin välisestä kitkasta. Toisin sanoen, kun leikkauskaasu vaikuttaa sulaa materiaalia vasten, se aiheuttaa sekä paineen että leikkausjännityksen, mikä ohjaa leikkausprosessia. Ohuiden levyjen leikkausprosessissa oletetaan, että leikkausurassa tapahtuu laminaarista kaasuvirtausta. Tämä johtuu siitä, että leikkausuran lyhyt pituus estää kaasusuihkun sekoittumisen ympäröivään ilmaan. Lisäksi rajakerroksen ominaisuuksia pidetään laminaarisina, koska Reynoldsin luku on kolme suuruusluokkaa alle kriittisen arvon, mikä tarkoittaa, että virtaus on pääosin tasaista ja järjestynyttä. Kaasuvirtaus rakoön jaetaan kahteen alueeseen, koskemattomaan alueeseen ja rajakerrokseen kaasun ja sulan materiaalin välillä (Vicanek & Simon, 1987, s. 1991–1996). Pääoletusten pohjalta painegradientin ja leikkausjännityksen skaalauslausekkeet johdettiin käyttäen konformisia kartoitustekniikoita ja rajakerrosteoriaa alla olevien kaavojen mukaisesti:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = - \left( \frac{p_0}{d} \right) a \left( \frac{x}{d' \varphi} \right); p_0 = \frac{1}{2} \rho_g u_g^2 \quad (14)$$

$$\tau = \tau_0 b \left( \frac{x}{d' \varphi} \right); \tau_0 = (\mu_g \rho_g u_g^3 d^{-1})^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

missä

$a$  = funktio,

$b$  = funktio,

$x$  = leikkausrintaman etäisyys,

$\varphi$  = leikkausrintaman kaltevuus tasoon nähden,

$\rho_g$  = kaasun tiheys,

$u_g$  = kaasun virtausnopeus,

$\mu_g$  = kaasun viskositeetti.

Yllä olevien yhtälöiden perusteella kummatkin voimat ovat samaa suurusluokkaa ja kasvavat kaasun virtausnopeuden kasvaessa (Chen ja muut, 2006, s. 519–524).

Leikkausurassa syntyvä leikkausjännitys voidaan puolestaan arvioida seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\tau_{kiinteä} = \frac{C_f}{2} \rho_g u_g^2, \quad (16)$$

missä

$\tau_{kiinteä}$  = kitkakerroin kiinteässä aineessa,

$C_f$  = arvioitu kitkakerroin nesteen ja kaasun rajapinnassa.

Mikäli kitkakerroin  $C_f$  arvioidaan sulassa metallissa, laserin kaasusuihkusta johtuva suulaan metalliin vaikuttava leikkausjännitys voidaan määrittää alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\tau_{sula} = \frac{f_{turbulenssi}}{4} \frac{\rho_g u_g^2}{2}, \quad (17)$$

missä

$\tau_{sula}$  = kitkakerroin sulassa aineessa,

$f_{turbulenssi}$  = turbulenttisen rajakerroksen kitkakerroin.

Ja niin ikään voidaan laskea kitkakerroin turbulenttiselle rajakerrokselle tasaisessa putkessa seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\frac{1}{f} \sim 2 \log \left( \frac{Re_g \sqrt{f}}{2.5} \right) \quad (18)$$

Eroavaisuus yhtälöiden 16 ja 17 välillä johtuu kitkakertoimen arvioinnista, sillä yhtälössä 16 kitkakerroin  $C_f$  on arvioitu nesteen ja kaasun rajapinnassa, kun puolestaan kaavassa 17  $C_f$  on arvioitu sulassa metallissa, minkä vuoksi sitä ei arvioida samalla tavalla (Mas ja muut, 2003, s. 145–152; Kaplan, 1996, s. 2198–2208).

Leikkausjännityksestä ja painegradientista aiheutuvien voimien yhtälöiden avulla voidaan laskea dynaamisesta ja staattisesta paineesta johtuvat voimat leikattavaan kappaaleeseen (Kaplan, 1996, s. 2198–2208). Voimat jakautuvat pinnan normaalin ja tangentialisen voiman takia leikkausuraan alla olevien kaavojen mukaisesti:

$$\begin{aligned} F_0 &= dw \frac{\pi}{2} \rho_g \\ F_n &= dw \frac{\pi}{2} \rho_g u_g^2 \tan \varphi \\ F_t &= \sqrt{d} w \frac{\pi}{2} \sqrt{\rho_g \mu_g} 2u_g^{\frac{3}{2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

missä

$F_n$  = dynaaminen voima,

$F_t$  = staattinen voima,

$w$  = uurreleveys.

Prosessissa käytetyn apukaasun tiheys ja viskositeetti vaikuttavat merkittävästi sulan materiaalin poistumiseen leikkausurasta (Kaplan, 1996, s. 2198–2208). Kuten yhtälöistä 16–18 voidaan päätellä, kaasun poistava vaikutus on suurempi, kun sulan materiaalin yli virtaavan kaasun Reynoldsin luku on riittävän suuri. Tämä luku voidaan esittää seuraavalla kaavalla:

$$Re_g = \frac{\rho_g u_g w}{\mu_g} \quad (20)$$

On tärkeää huomioida leikkauskaasun vaikutukset laserleikkausprosessi, sillä leikkauskaasu on yksi tärkeimmistä tekijöistä onnistuneessa leikkausprosessissa. Esimerkiksi suuremman tiheyden omaavat apukaasut ovat tehokkaampia syrjäyttämään sulanutta materiaalia leikkausurasta, koska Reynoldsin luku kasvaa tiheyden ollessa suurempi. Tämän vuoksi typpi, happi sekä ilma ovat yleistyneet merkittävästi nykypäivän laserleikkausmenetelmissä (Chen, 1999, s. 57–66).

On tärkeää huomata, että tutkimusten pohjalta, jotka keskittyvät leikkauskaasun vaikutukseen sulan materiaalin poistamisessa ja niihin liittyvien voimien laskemisessa, että tuloksista voidaan tehdä useita päätelmiä (Chen, 1999, s. 57–66). Sulan materiaalin poistamista edistetään lisäämällä käytettävän leikkauskaasun virtausnopeutta. Näissä ei kuitenkaan oteta huomioon leikkauskaasun kokoonpuristuvuutta, mikä on väistämätöntä korkealla virtausnopeudella ja leikattaessa paksua materiaalia. Laskelmissa oletetaan, että apukaasun virtaus on laminaarinen, mikä on kaavojen yksinkertaistamista, kun otetaan huomioon suuri virtausnopeus ja kaasun vuorovaikutus työstettävän kappaleen kanssa (Chen, 1999, s. 57–66).

Aiemmin mainitun perusteella, jos oletetaan, että kaasumaiset vastusvoimat ovat pieniä kokonaispaineeseen nähden, leikkaussyvyyden läpi tapahtuva kaasun virtausnopeus  $v_c$  saadaan likimain alla olevan energiataseen avulla:

$$v_c = \left( \frac{2\Delta P}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

### 3.2.3 Suuttimen kohtisuoruus leikkauspintaan nähden

Kuitulaserin suutin toimii leikkauskaasun puhaltajana ja estää sulan metallin joutumista laserin tarkennuspeiliin (Mushtaq ja muut, 2020; Riveiro ja muut, 2019). Se ohjaa myös kaasun diffuusioaluetta ja kokoa, mikä vaikuttaa leikkausjäljen laatuun. Keskitetty lasersäde ohjataan leikattavaan kappaleeseen kuparisen suuttimen lävitse. Leikattavan kappaleen ja laserin suuttimen välistä etäisyyttä sanotaan suuttimen paikaksi. Etäisyys suuttimesta leikattavan kappaleen pintaan mitataan virtauksen ja kaasun paineen perusteella. Jos suutin on liian kaukana, kaasun virtausnopeus on liian suuri, mikä aiheuttaa roiskeita levyn pinnalle. Yleisesti sopiva etäisyys on 0,80–1,00 mm (Mushtaq ja muut, 2020; Riveiro ja muut, 2019).

Pienen suuttimen etuja ovat hyvä leikkausrailon reunan laatu, sileys ja vähäinen lämpövaikutus (Mushtaq ja muut, 2020; Riveiro ja muut, 2019). Huonoina puolina on hidas

leikkausnopeus ja huono kyky leikata paksuja ja tiheitä materiaaleja. Pieni suutin on yleisesti kooltaan 0,8–1,2 mm. Ison suuttimen etuja ovat nopea leikkausnopeus ja kyky leikata tiheitä ja paksuja materiaaleja. Huonoina puolina on huonompi leikkaurailon laatu ja epätasaisuus. Iso suutin on yleisesti kooltaan 1,2–2,0 mm (Mushtaq ja muut, 2020; Riveiro ja muut, 2019).

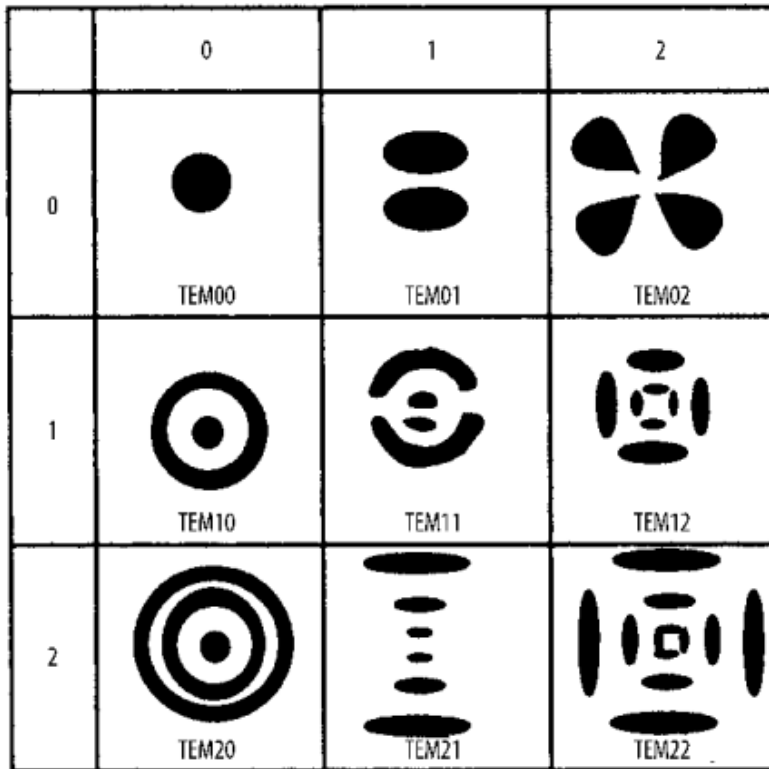
### **3.3 Sädeparametrit**

#### **3.3.1 Lasersäteen teho**

Laserin tehon lisääminen kasvattaa yleisesti ottaen leikkausnopeutta ja leikkaussyvyyyttä (Steen, 2003, s. 127–130). Tämä voi kuitenkin johtaa leikkausuran levenemiseen, leikkauspinnan palamiseen sekä terävien reunojen pyöristymiseen. Nämä haittapuolet voidaan vähentää tai poistaa pulssittamalla lasersädettä. Pulssittamalla lasersädettä saadaan tehointensiteettiä pidettyä tarpeeksi korkealla, mutta vähennetään samalla kokonaislämpövaikutusta leikattavaan kappaleeseen (Steen, 2003, s. 127–130).

#### **3.3.2 Polttopisteen moodi ja koko**

Lasersäteen tehojakauma eli intensiteetti ei ole tasaisesti jakautunut lasersäteen poikki-leikkauksessa (Kujanpää ja muut, 2005, s. 36). Tätä ilmaistaan TEM-luvulla (Transverse Electromagnetic Mode), ja se kuvaa lasersäteen moodia. Alla olevassa kuvassa 16 on esitetty TEM-tilankuvioita kuitulaserilla. TEM-luvun alaindekseillä ilmaistaan tehojakauman tehuhiippujen lukumäärä sekä symmetrisyys. TEM<sub>00</sub> moodilla saavutetaan paras teho- tiheys säteen keskellä. Tämä moodi on useimmissa leikkaussovelluksissa ideaalinen, sillä se mahdollistaa säteen tarkentamisen mahdollisimman pieneksi. Moodi soveltuu etenkin ohuiden ja tarkkuutta vaativien materiaalien leikkaukseen (Kujanpää ja muut, 2005, s. 36–37).



**Kuva 16.** Erilaisia TEM tilankuvioita kuitulaserilla (mukaillen William Steen, 2010, s. 101).

### 3.3.3 Numeerinen mallinnus laserteknologiassa

On olemassa kaksi pääasiallista numeerista tekniikkaa, differenssimenetelmä ja elementtimenetelmä (William Steen, 2010, s. 272–278). Molemmat ratkaistaan säilymisyhtälöllä, kuten Fourierin toinen laki määrää kaikille sisäisille pisteille. Differenssimenetelmän ero elementtimenetelmään on se, että malli jakaa tarkasteltavan tilan pieniin laatikoihin, kun taas elementtimalli jakaa tilan viivoilla (William Steen, 2010, s. 272–278).

Numeeriset menetelmät poistavat monia analyttisiä rajoituksia menetelmästä (William Steen, 2010, s. 272–278). Tämä johtuu siitä, että analysoitava tilavuus on jaettu pieniin osiin eli kontrollitilavuuksiin, joissa jokaisella osalla voi olla oma lämmönjohtavuus-, tiheys-, pintajännitys tai lämmöntuotto. Esimerkiksi lämmönlähteen ei tarvitse olla keskitetty pisteeseen, viivaan tai suoraan tasoon. Lämpötilasta riippuvat termodynaamiset ominaisuudet ja todelliset rajaehdot voidaan sisällyttää tähän. Huolimatta numeeristen menetelmien eduista, vain muutama numeerinen malli lämpövirtauksesta

laserleikkauksessa on kehitetty tähän mennessä. Tämä johtuu osittain tällaisten mallien rakentamisen monimutkaisuudesta. Mallin analyttinen ratkaisu näyttäisi esimerkiksi pinnan lämpötilan olevan kääntäen verrannollinen ajan  $t$  neliöjuureen. Pinnan lämpötilan käyttäytyminen ei puolestaan näkyisi niin selvästi numeerisessa ratkaisussa, joka on aikaan verrannollinen. Trendin saamiseksi malli olisi suoritettava useita kertoja, kuten oikeaa koetta tehtäessä. Toisaalta numeerinen ratkaisu voi sisältää enemmän yksityiskohtia ongelman fysiikkaan ja siten paljastaa eri ilmiöiden vaikutukset leikkausprosessiin. Ongelman siirtäminen simuloivan tietokoneen käsiteltäväksi vaatii sen, että ongelma ilmaistaan differentiaaliyhtälöiden avulla elementtimenetelmän muodossa. (William Steen, 2010, s. 272–278). Esimerkiksi elementin lämpötase, joka joko lämpenee tai jäähtyy, voidaan määrittää Fourierin toisen lain mukaan:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t} - u \frac{\partial T}{\partial z} \quad (22)$$

Tämä voidaan ilmaista elementtimenetelmän eron muodossa seuraavalla tavalla:

$$\alpha \left\{ \frac{\left[ \frac{(T_{sisään} - T)}{\Delta z} \right] - \left[ \frac{(T - T_{ulos})}{\Delta z} \right]}{\Delta z} \right\} \approx \frac{T' - T}{\Delta t} - u \left( \frac{T_{sisään} - T_{ulos}}{2\Delta z} \right), \quad (23)$$

missä

$T_{sisään}$  = lämpötila sisään [K],

$T_{ulos}$  = lämpötila ulos [K],

$u_l$  = nesteen virtausnopeus [m/s].

Tämän myötä lämpötila  $T'$  on yhden aikavälin jälkeen  $\Delta t$ :

$$T' = \left[ u \left( \frac{T_{sisään} - T_{ulos}}{2\Delta z} \right) + \alpha \left( \frac{T_{sisään} + T_{ulos} - 2T}{\Delta z^2} \right) \right] \Delta t + T \quad (24)$$

Tämän yhtälön kolmiulotteinen versio on ratkaistu kaikkien sisäisten pisteiden löytämiseksi lämpötila yhden aikavälin jälkeen eli  $\Delta t$  (William Steen, 2010, s. 272–278). Tämä tehdään kaikkialla koko matriisissa. Epävakautta voi syntyä, jos kaksi gradienttitermiä on sidottu aikaan  $t = t$ , kun taas lämpötilan vaihtelu aikatermillä keskittyy kohtaan  $t = t + \frac{\Delta t}{2}$ . Crank-Nicholsonin menetelmää käytetään toisinaan tämän ongelman ratkaisemiseksi. Jos ongelma on luonteeltaan lähes stabiili, kuten leikkausura suhteessa lasersäteeseen, niin aikatermi voidaan jättää huomioimatta ja ratkaisu löydetään relaksaatioprosessin avulla (William Steen, 2010, s. 272–278).

Kun sulamista tapahtuu, syntyvää lämpöä käsitellään epänormaalina ominaislämpönä (William Steen, 2010, s. 272–278). Sulamisvaiheet huomioiden ominaislämpö  $C_p$  voidaan määrittää askelfunktiona lämpötilan suhteen alla olevan kaavan mukaisesti:

$$C_p(T) = \begin{cases} C_{p0} + \frac{\Delta H_m}{\Delta T_m}, & \text{kun } T_m \leq T \leq T_m + \Delta T'_m \\ C_{p0} + \frac{\Delta H_v}{\Delta T_v}, & \text{kun } T_v \leq T \leq T_v + \Delta T'_v \end{cases}, \quad (25)$$

missä  $C_{p0}$  on vakio ominaislämpö,  $\Delta H_m$  ja  $\Delta H_v$  ovat fuusio- ja kiehumislämpöt, ja  $\Delta T'_m$  ja  $\Delta T'_v$  ovat lämpötila-alueet, joiden yli kyseinen siirtymä tapahtuu.

Rajapisteillä on samanlainen lämpötilatasapaino kuin sisäpisteillä, mutta vyöhykkeen ulkopuolelle ulottuviin gradientteihin on tehtävä muutoksia, joissa lämpötiloja ei lasketa (William Steen, 2010, s. 272–278). Pintapisteet lasketaan virtuaalisesta pintalämpötilagradientista, joka antaa määrätyn lämpövirran seuraavan kaavan mukaisesti:

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x,y,1} = P_{x,y} (1 - r_f) - (h_c + h_r) (T_{surf} - T_a), \quad (26)$$

missä  $T_a$  on ympäristön lämpötila ja  $T_{surf}$  on pinnan lämpötila.  $P_{xy}$  y:n arvo riippuu valitusta tehosta. Jos moodirakenne on esimerkiksi Gaussinen,  $TEM_{00}$ , niin  $P_{xy}$  määritetään seuraavalla tavalla:

$$P_{x,y} = \frac{P_{tot}}{r_b^2 \pi} \exp\left(\frac{-2r^2}{r_b^2}\right), \quad (27)$$

missä  $r^2 = x^2 + y^2$ . Pinnan kiehuminen voidaan ottaa huomioon olettamalla, että jos kiehumispiste saavutetaan tietyssä matriisipisteessä, kyseinen piste katoaa, jolloin teho putoaa sen alapuolella olevaan matriisipisteeseen, ja sen absorptiohäviö otetaan huomioon Beer-Lambertin absorptiolain tai Bouguerin eksponentiaalilain avulla seuraavan kaavan mukaisesti:

$$P_{x,y} = P_0 e^{-\beta \Delta z}, \quad (28)$$

jossa  $\beta$  on absorptiokerroin, jonka yksikkö on käänteisometri. Sivupisteiden katsotaan olevan riittävän kaukana, jotta  $\partial T/\partial x \approx 0$  ja  $\partial T/\partial y \approx 0$ : paksujen alustojen pisteiden oletetaan olevan  $\partial T/\partial z \approx 0$ ; mutta ohuempien alustojen pisteet lasketaan arvioidun z-gradientin perusteella koko syvyydellä g alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{x,y,g} = -\frac{(h_c + h_r)(T_{surf} - T_a)}{k}, \quad (29)$$

missä

$k$  = lämpövirta,

$h_c$  = konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ja

$h_r$  = säteilylämmönsiirtokerroin.

Numeeriset mallit ovat erittäin monipuolisia työvälineitä ja lähes kaikki fysikaaliset ilmiöt voidaan lisätä ja ottaa huomioon tällä tavalla (William Steen, 2010, s. 272–278). Tämä ominaisuus osoittaa selvästi tämän menetelmän voiman prosessimekanismien

arvioinnissa ja tutkimuksessa. Menetelmä ei ole hyödyllinen malli jokapäiväiseen työhön monien muuttujien vuoksi, mikä aiheuttaa hitautta laskennassa. Menetelmällä on tarkasteltu useita tilanteita, jotka osoittavat numeeristen tekniikoiden mahdollistaman laskennan vapauden. Numeeriseen mallinnukseen perustuvat numeerinen ohjaus ja numeerinen laskenta, jota käytetään esimerkiksi optimointiprosesseissa, kun halutaan optimoida numeerista ohjausta käyttäviä työstökoneita, kuten kuitulasereita, jota tässä työssä tutkitaan (William Steen, 2010, s. 272–278).

### **3.3.4 Aallonpituus**

Aallonpituus vaikuttaa myös oleellisesti laserin toimintaan (William Steen, 2003, s. 98–99). Aallonpituus muuttuu stimuloitun emission aiheuttamien muutosten seurauksena. Doppler-ilmiö voi muuttaa aallonpituutta, koska valoa emittoiva materiaali liikkuu, tai esimerkiksi molekyyliä tai niihin liittyviä siirtymiä kohti korkeampia kvanttitiloja, kuten CO-laserissa tapahtuu. Yleisesti ottaen laserin säteily kuuluu spektrisiin säteilymuotoihin, jotka ovat puristettuja ja rajoitettuja. Erittäin korkea spektripuhtaus voidaan saavuttaa käyttämällä taajuusvalintaa laserissa. Tämä tarkoittaa, että silloin laserin tuottama valo on hyvin tarkkaa tietyllä aallonpituusalueella. Jos halutaan tuottaa hyvin lyhyitä pulsseja, kuten femtosekunnin (noin 0,3 mikrometrin pituinen valonsäde), ei ole mahdollista valmistaa laseria. Laserin tulisi tuottaa ensin laajemman aaltokaistan omaava säde, kuten Fourier-sarja vaatii, jotta niin lyhyt pulssi voitaisiin muodostaa (William Steen, 2003, s. 98–99).

### **3.3.5 Taajuus**

Kuitulaserin lasersäteen taajuus on yksi tärkeimmistä parametreista laserleikkuun suorituskyvyn määrittämisessä (Mushtaq ja muut, 2020; William Steen, 2010, s. 38–45). Korkea taajuus mahdollistaa tehokkaamman leikkauksen, mutta myös heikentää leikkausjäljen laatua. Pieni taajuus puolestaan parantaa leikkausjäljen laatua, mutta hidastaa leikkauksen nopeutta. Kuitulaserin käyttämä taajuus voi vaihdella 1–100 kHz välillä. Taajuus määrittää, kuinka paljon laserpulseja syntyy sekunnissa. Pulssien kesto on hyvin pieni,

yleensä noin 50–100 ns. Korkea taajuus tarkoittaa suurempaa leikkausnopeutta, mutta myös suurempaa lämpövaikutusta leikattavassa materiaalissa. Optimoinnin kannalta taajuuden valinnassa on siis tärkeää tasapainoilla tavoiteltavan leikkausnopeuden ja laadun välillä (Mushtaq ja muut, 2020; William Steen, 2010, s. 38–45).

### 3.3.6 Pulssien päällekkäisyys

Kuitulasereissa pulssien päällekkäisyys viittaa siihen, kuinka paljon kaksi tai useampi laserpulsso osuvat toistensa päälle (Mushtaq ja muut, 2020; William Steen, 2010, s. 150–152). Kun pulssit osuvat päällekkäin, yhden pulssin energia vaikuttaa seuraavan pulssin energiaan ja ominaisuuksiin, mikä muuttaa lasersäteen käyttäytymistä kyseisen pulssin aikana. Pulssien päällekkäisyydellä on merkittävä vaikutus kuitulaserjärjestelmissä, sillä se vaikuttaa suoraan leikkauksen laatuun ja lopputulokseen. Jos pulssit ovat esimerkiksi liian lähellä toisiaan, seurauksena voi olla suurempi leikkausura kuin on alun perin suunniteltu. Toisaalta, jos pulssit ovat liian kaukana toisistaan, lasersäde ei ehkä ole riittävän tehokas, jolloin se ei pysty leikkaamaan materiaalia tehokkaasti. Pulssien päällekkäisyyttä voidaan säätää muokkaamalla laserin säteen halkaisijaa, taajuutta ja leikkausnopeutta (Mushtaq ja muut, 2020; William Steen, 2010, s. 150–152).

Leikkausprosessissa pulssien päällekkäisyydellä on ratkaiseva rooli leikkausjäljen laadun ja tarkkuuden kannalta (Mushtaq ja muut, 2020; William Steen, 2010, s. 150–152). Optimaalinen pulssien välinen etäisyys on tärkeä säätöparametri, joka vaikuttaa suoraan leikkaustulokseen. Sopiva pulssien välinen etäisyys varmistaa, että leikkausura säilyy halutun kokoisena ja muodoltaan tarkkana.

Kuitulaserin optimoinnissa paineistetulla ilmalla tulee ottaa huomioon pulssien päällekkäisyys ja sen vaikutus leikkausprosessiin (Mushtaq ja muut, 2020; William Steen, 2010, s. 150–152). Tarkka säätö pulssien välisestä etäisyydestä auttaa hallitsemaan leikkausprosessia ja varmistamaan parhaan mahdollisen leikkausjäljen laadun. Säätämällä laserin sädettä, leikkausnopeutta ja taajuutta voidaan optimoida pulssien välinen etäisyys

vastaamaan optimaalisia leikkausparametreja ja siten parantaa leikkaustuloksia. Puls-  
sien päällekkäisyys lasketaan seuraavanlaisella kaavalla:

$$\dot{U} = 1 - \frac{s_p}{d_f}, \quad (30)$$

missä

$\dot{U}$  = pulssien päällekkäisyys [%],

$s_p$  = pulssien välinen etäisyys [ $\mu\text{m}$ ],

$d_f$  = pulssin halkaisija [ $\mu\text{m}$ ],

$f$  = taajuus [Hz].

Pulssien välinen etäisyys lasketaan seuraavanlaisella kaavalla:

$$s_p = \frac{v_c}{\frac{60 \frac{1}{\text{min}}}{f}}, \quad (31)$$

missä

$v_c$  = leikkausnopeus [mm/min].

## 3.4 Materiaaliparametrit

### 3.4.1 Absorptio laserleikkauksessa

Absorptio on suuri ongelma laserleikkauksessa (Wang ja muut, 2019). Korkea absorptio-  
taso aiheuttaa ongelmia leikkauksessa, koska se huonontaa kuitulaserin leikkausuran sei-  
nämien laatua. Lisäksi absorptio johtaa negatiivisiin vaikutuksiin, kuten vääntymiin tai  
epätasaisuuksiin leikatussa materiaalissa. Tarvitaan täsmällistä säätöä ja hallintaa, jotta  
saavutetaan paras mahdollinen leikkaustulos (Wang ja muut, 2019).

Absorptioon liittyvien edellä mainittujen haasteiden voittamiseksi on välttämätöntä op-  
timoida kuitulaserin käyttämät leikkausparametrit, kuten teho, leikkausnopeus ja kaasun  
paine (Steen, 2003, s. 127–130; Kujanpää ja muut, 2005, s. 129–135; William Steen, 2010,

s. 156–164). Lisäksi on tärkeää huomioida leikattavan materiaalin ominaisuudet ja sen vuorovaikutus leikkausprosessin kanssa. Tehokas absorptioon perustuva säätö ja hallinta voivat parantaa huomattavasti leikkausnopeutta ja leikkausjäljen laatua.

### **3.4.2 Leikkausrailo**

Laserleikkausprosessissa laserin oma leveys aiheuttaa ylimääräistä materiaalin syrjäytymistä (William Steen, 2010, s. 133, 155–163). Tämä pois sulanut materiaali tunnetaan nimellä leikkausrailo. Leikkausrailon leveys vaihtelee lasersäteestä ja materiaalityypistä riippuen 0,08 mm–1 mm välillä. Esimerkiksi messingin leikkausura on leveämpi kuin teräksen. Syynä tähän on se, että messinki on ominaisuuksiltaan pehmeämpää kuin teräs. Leikkausrailo täytyy huomioida suunnittelussa, jotta pysytään oikeassa mittakaavassa. Tämän vuoksi jokaiselle materiaalille tarvitaan oma kalibrointi, jotta lopputuloksena saataisiin toivotunlainen leikkausrailo (William Steen, 2010, s. 133, 155–163).

## 4 Menetelmät

### 4.1 NC Profile -koneohjelma

Eaglen valmistaman kuitulaserin Eagle iNspire 1530 F4 optimointi suoritetaan yhdessä Fraunhofer IPT:n ja Eagle Lasersin kanssa yhteistyönä (ABB & Fraunhofer IPT, 2022a). Optimointi suoritetaan Fraunhoferin konepohjaisella numeerisella tietojen NC Profile -analysointiohjelmalla. NC Profile mahdollistaa numeerisesti ohjattujen (NC, Numerical Control) työstökoneiden tietojen konekohtaisen analyysin ja optimoinnin jokaista tuotanto-prosessia varten. Analyysissa otetaan huomioon työstökoneen liikerataa kuvaavien akselien dynaamiset rajoitukset, ohjausominaisuudet ja koneen kinematiikka (ABB & Fraunhofer IPT, 2022a).

### 4.2 Kuitulaserin optimoinnin vaiheet

Kuitulaserin optimointi on jaettu kolmeen eri vaiheeseen (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b). Analysointivaiheessa ABB ja Fraunhofer tekevät tuoteportfolion ja prosessiketjun analyysin tuotannosta. ABB antoi Fraunhoferille simulointia varten piirustuskuvia optimoinnin kannalta tärkeimmästä mallista, BP280-tyypin mallista. Etuliitteen kaksi kirjainta tarkoittaa mallitunnistetta ja luku levyn halkaisijaa millimetreinä (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b).

Mekaanisessa vaiheessa ABB ja Fraunhofer analysoivat laserleikkausjärjestelmän konekinematiikkaa ja digitaalista käyttöliittymää (ABB & Fraunhofer IPT, 2022d). Lisäksi analysoidaan konekinematiikkaa ja NC-koodiin perustuvan simulointimallin kehittämistä ja integrointia NC-Profler-ohjelman ohjelmistoympäristöön sekä simulaatiomallin testaus ja validointi referenssigeometrialla. Simulointimallin tavoitteena on optimoida prosessin tuottavuus ilman virheellisiä laskelmia ja nykäyksiä.

Sisällön analyysin vaiheessa tunnistetaan ABB:n prosessi ja komponenttivaatimukset (ABB & Fraunhofer IPT, 2022e). Tässä prosessissa käsitellään seuraavat menetelmät. Ensimmäisenä menetelmänä on prosessin rajojen tunnistaminen koesuunnittelun

perustaksi. Tämän jälkeen suoritetaan kokeellisen suunnitelman kehittäminen käyttämällä kokeellista suunnittelua eli DoE-menetelmää optimaalisiin prosessiparametreihin. Kolmanneksi on demonstraatioiden mittausarvojen tulkinta ja arviointi sekä tunnistaa optimaaliset prosessiparametrit laserleikkauksessa (ABB & Fraunhofer IPT, 2022e).

### **4.3 Kokeellisen suunnittelun lähtökohdat**

Tämän diplomityön tavoitteena oli optimoida Vaasan ABB:n Motors and Generators-yksikön kuitulaser käyttämällä paineistettua ilmaa leikkauskaasuna, kun leikataan 0,5 mm:n sähköterästä. Optimoinnin tavoitteena on optimoida kuitulaser paineistetulle ilmalle, löytää DoE-menetelmällä optimaaliset parametrit 0,5 mm:n sähköteräkselle ja optimoida kuitulaser valitulle geometrialle. Samalla tavoitteena on parantaa kuitulaserin tuottavuutta, leikkausjäljen laatua ja vähentää leikkauksesta syntyvää absorptiota levyyn (ABB & Fraunhofer IPT, 2022a; ABB & Fraunhofer IPT, 2022b).

Työn ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan kattava prosessianalyysi, jonka tarkoituksena on syventyä nykyisen kuitulaserin toimintaan ja sen käyttämän leikkauskaasun ominaisuuksiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022c). Tämä analyttinen lähestymistapa antaa tarkemman käsityksen laserin parametreista, kuten leikkausnopeudesta, kaasun paineesta ja muista relevanteista parametreista. Tämä vaihe on kriittinen, sillä se tarjoaa perustan ymmärrykselle ja sille, miten paineistettu ilma vaikuttaa leikkausprosessiin ja millaisia muutoksia on tehtävä laserin parametreissa, jotta päästään haluttuihin tavoitteisiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022c).

Työn alkuvaiheessa Fraunhoferin asiantuntijat vierailivat ABB Oy:n IEC LV Motors -yksiköllä kolmen päivän ajan (ABB & Fraunhofer IPT, 2022c). Tapaamisen aikana käytiin läpi projektin tausta, tavoitteet ja suunnitelma optimoinnin toteuttamiseksi. ABB:n ja Fraunhoferin asiantuntijat suorittivat prosessianalyysin, jossa tarkasteltiin mahdollisia tuotannon virheitä ja haasteita.

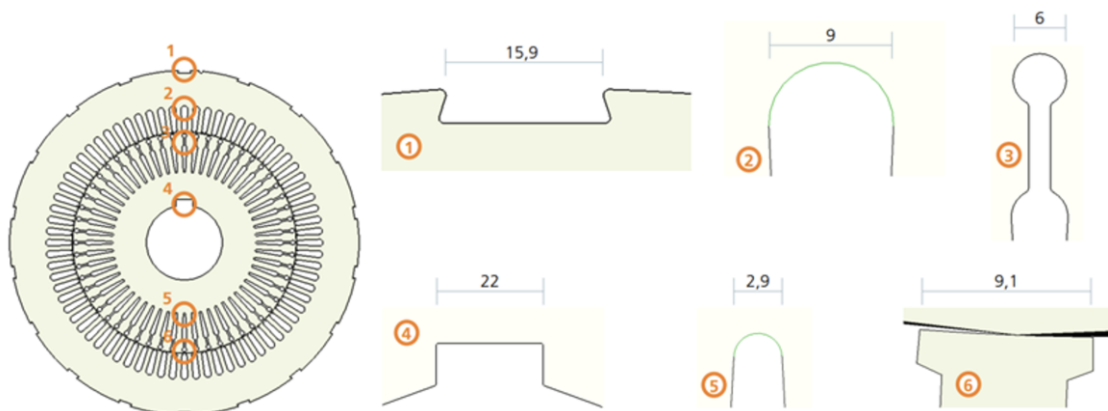
Seuraavaksi suoritettiin kartoitettu prosessianalyysi, jossa määriteltiin yksittäisten prosessivaiheiden kulku, arvioitiin niiden väliset vuorovaikutussuhteet ja visualisoitiin

prosessin vaiheet (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b). Tämä syvälinen analyysi paljasti heikkouksia prosessivirrassa, erityisesti NC-koodissa ja kuitulaserin parametrien määrityksissä. Tämä tarjosi arvokasta tietoa siitä, mihin osa-alueeseen käytetään eniten aikaa ja resursseja.

Työn alussa ABB lähetti Fraunhoferille DXF- ja NC-tiedostojen eri variaatioita BP280 mallista (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022e). Kuvassa 17 on esitettyä BP280 malli. ABB:n ja Fraunhoferin yhteistyönä tehtiin simulaatio ABB:n kriteerien, aikaisempien tulosten ja DXF- ja NC-tietojen perusteella. Simulaation perusteella säädettiin suuttimen paikkaa, polttopisteen paikkaa, leikkausnopeutta, taajuutta ja kaasun painetta. Polttopisteen paikka määritettiin NC-tiedostoissa. Lisäksi NC-tiedostoa muutettiin, että leikkaus olisi terävää, tasaisempaa ja pehmeämpää sitä vaativissa kohdissa (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022e).

Alkuperäisessä NC-ohjelmassa ilmeni jerk-efektiä, mikä tarkoittaa kiihtyvyyden äkillisiä muutoksia ja tämä efekti aiheutti nykäyksiä terävissä ja nopeissa käänöksissä, kun numeerinen ohjelma laski väärin leikkaukseen vaikuttavat parametriarvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022e). Ongelmana oli myös hitaus, sillä järjestelmä ei aina ehtinyt laskea oikeaa nopeutta tilanteeseen, mikä johti siihen, että leikkaus pääsi etenemään liian pitkälle, näkyen notkona leikkauksessa. Näiden ongelmien korjaamiseksi NC-tiedostoissa hidastettiin leikkausnopeutta terävissä kulmissa ja kaarroksissa. ABB:n omiin tarpeisiin kehitettyä NC-tiedostoa käytettiin 0,5 mm:n paksun sähköteräksen leikkaamiseen (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022e).

ABB suoritti BP280-mallista demonstraation. Demonstraatiosta tehtiin useita versioita erilaisilla parametriarvoilla, jotta saataisiin monipuolisia tuloksia ja laaja parametrikirjo (ABB & Fraunhofer IPT, 2022b; ABB & Fraunhofer IPT, 2022e). Näissä malleissa keskityttiin ensisijaisesti akseliuraan, roottorin ja staattorin uriin sekä kaarroskohtiin ja staattorin kiinnitysuriin aikaisempien tulosten ja kokemuksen perusteella, sillä nämä kohdat ovat moottorin valmistuksen kannalta kriittisimpiä.



Kuva 17. BP280-malli (ABB, 2023a).

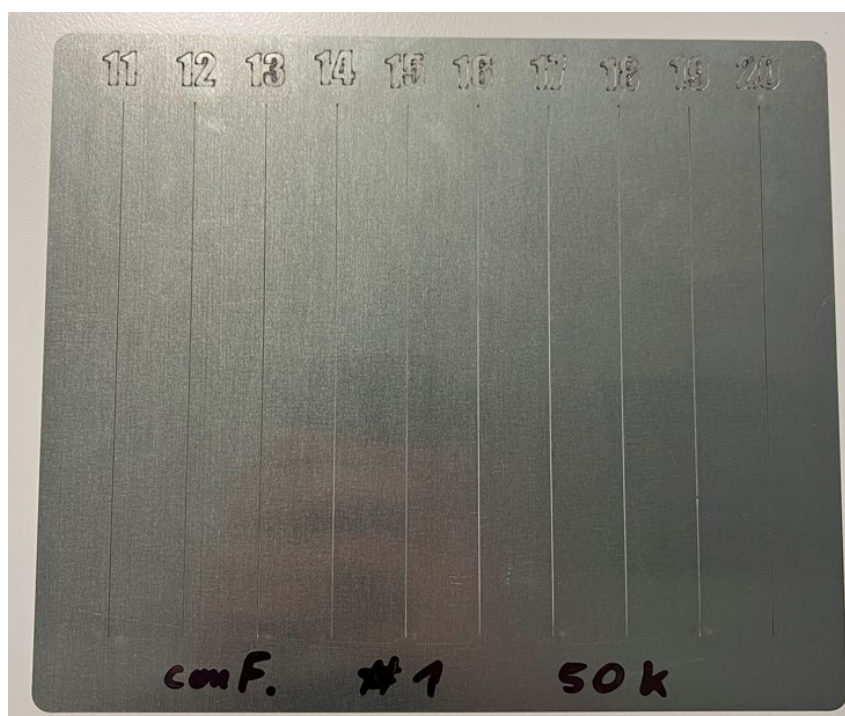
#### 4.4 Leikkausparametrien valinta

ABB ja Fraunhofer päättivät yhdessä, mitkä parametrit olivat merkittävimpiä ja oleellisimpia kuitulaserin optimoinnissa (ABB & Fraunhofer IPT, 2022d). Näistä parametreista valittiin suuttimen paikka, polttopisteen paikka, leikkausnopeus, taajuus ja kaasun paine. Ensimmäisessä vaiheessa ABB teki ensimmäisen demonstraation ja konemallin simulatiota varten BP280-mallista. BP280-mallin visualisoinnin jälkeen analysoitiin kuitulaserin geometriaan liittyviä asetuksia, kuten leikkausnopeuden käyttäytymistä käänöksissä (ABB & Fraunhofer IPT, 2022d).

Ennen demonstraatioihin siirtymistä ABB suoritti kokeelliset linjatestit A1-3 ja B1-3 (ABB & Fraunhofer IPT, 2023a). Linjatesteissä leikkausparametreja etsittiin suurella skaalalla, sillä leikkauskaasun vaihdon takia parametrien hakeminen olisi ollut liian vaikeaa suppealla parametrikirjolla. Linjatestissä B1-3 ABB halusi tehdä kokeellisen testin tyypellä, jotta tuloksia voitaisiin verrata paineistetun ilman leikkaustuloksiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023a).

Linjatesteissä laser leikkasi 11 kappaletta suoria viivoja ennalta määrätyillä parametreilla. Alla olevassa kuvassa 18 esitetty linjatesti, jossa kappaletta on leikattu tyypellä ja kuitulaserin vakio parametreilla leikkausnopeudella 50 000 mm/min, 7,0 barin kaasun paineella

ja 0,20 mm polttopisteen etäisyydellä levyn pinnasta (ABB & Fraunhofer IPT, 2023a; ABB & Fraunhofer IPT, 2023b). Tämä testi on erinomainen menetelmä laserin parametrien kokeelliseen testaamiseen ja arvioimiseen, sillä linjatestin 15 cm viivasta pystytään arvioimaan tarkasti leikkauksen aloituksen laatu, leikkauksen keskikohdan laatu sekä lope- tuksen laatu. Lisäksi viivasta pystytään arvioimaan leikkausuran ylä- ja alapinnan leveys- ero sekä leikkauspinnan suhteellinen karkeus purskeen osalta. Linjatestien perusteella voidaan suorittaa tarkat alustavat parametrit jatkotoimenpiteille. Tämän vaiheen jälkeen siirrytään halutun geometrian parametrien optimointiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023a; ABB & Fraunhofer IPT, 2023b).



**Kuva 18.** Linjatesti vakio parametreilla (ABB, 2023c).

#### 4.5 Lasersäteen pulssien päällekkäisyys ja etäisyys

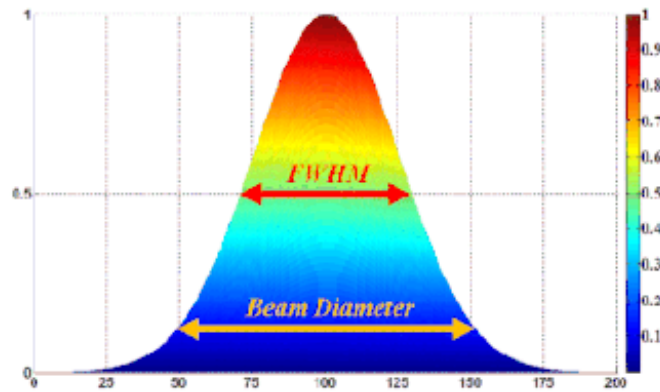
Gaussin säteen leveyden  $w(z)$  perusteella aikaisempi leikkausura ei ollut suora ja leveys oli väärä, sillä laserin säteen polttopiste ei ollut optimaalisessa asemassa ohuen sähkö- teräksen leikkauksen kannalta (ABB & Fraunhofer IPT, 2023c). Syynä tähän oli se, että

kuitulaseria ei oltu suunniteltu ohuiden levyjen leikkaamiseen. Tästä syystä ABB päätti yhdessä Fraunhoferin ja Eagle Lasersin kanssa suorittaa leikkausparametrien tarkemman muutostyön. Lisäksi paineistetun ilman aiheuttamat muutokset kaasun koostumuksessa ja käyttäytymisessä leikkausurassa vaikeuttivat laskelmia. Myös pinnan karheuden  $R_a$  luku vaikeutti laskelmia. ABB:lla käytettävän sähköteräksen pinta on pinnoitettu lakalla, jotta se eristäisi levyt toisistaan, kun moottori kasataan. Lakan vaikutuksen takia säde vaikuttaa tehokkaammin levyyn, sillä epätasaisen pinnan takia säde heijastuu useita kertoja levyn pinnassa, jolloin säteen intensiteetti kasvaa. Edellä mainittujen asioiden perusteella oli haasteellista laskea riittävä pulssien päällekkäisyys laserille kyseisellä levyllä. Koska pulssien päällekkäisyyteen vaikuttavat määritetty leikkausnopeus ja käytetty taajuus sekä säteen halkaisija, tuotti se haastavan yhdistelmän toteuttaa optimointi (ABB & Fraunhofer IPT, 2023c).

Laskuissa merkittävässä asemassa oli puoliarvoveveys (FWHM, Full width at half maximum) (Ganguly ja muut, 2023; Jia ja muut, 2023; Bellucci ja muut, 2022). Jakaumassa FWHM on riippumattoman muuttujan kahden arvon välinen ero, jossa riippuvainen muuttuja on yhtä suuri kuin puolet sen maksimiarvosta. Toisin sanoen se on spektrikäyrän leveys mitattuna niiden y-akselin pisteiden välillä, jotka ovat puolet maksimi-amplitudista. Alla olevassa kuvassa 19 on esitetty Gauss-funktion FWHM ja lasersäteen halkaisija. Eaglen ilmoittama kuitulaserin lasersäteen pulssin leveys on  $169 \mu\text{m}$ . Koska tämä ilmoitettu säde on ilmoitettu puolileveytenä, täytyy laskea säteen todellinen halkaisija, jotta voidaan laskea laserin pulssien päällekkäisyys oikeilla todellisilla arvoilla (Ganguly ja muut, 2023; Jia ja muut, 2023; Bellucci ja muut, 2022).

Gaussin säteen leveys  $w(z)$  missä tahansa kohdassa  $z$  säteen varrella viittaa säteen halkaisijaan tai leveyteen kyseisessä pisteessä (Garbellotto, 2021, s.11–27). Tämä säteen leveys suhteessa intensiteettijakauman koko leveyteen puolimaksimissa määritellään seuraavasti:

$$w(z) = \frac{FWHM}{\sqrt{2\ln 2}} = \frac{169 \cdot 10^{-6} \text{m}}{\sqrt{2\ln 2}} = 159 \mu\text{m} \quad (32)$$



**Kuva 19.** Gauss-funktion FWHM ja lasersäteen halkaisija (mukaillen Ahi & Anwar, 2016, s. 32).

Tämän perusteella voimme laskea todellisen pulssien päällekkäisyyden. Pulssein päällekkäisyys lasketaan, jotta varmistetaan riittävä pulssien päällekkäisyys ja tasainen leikkauks jälki. Pulssien päällekkäisyys alla olevassa taulukossa 1 on laskettu kaavojen 33 ja 34 mukaan:

$$\ddot{U} = 1 - \frac{s_p}{d_f} \quad (33)$$

Pulssien välinen etäisyys alla olevassa taulukossa 1 on laskettu seuraavanlaisella kaavalla:

$$s_p = \frac{v_c}{60 \frac{1}{s}} \frac{1}{f} \quad (34)$$

**Taulukko 1.** Laskelma lasersäteen pulssien päällekkäisyydestä ja etäisyydestä (ABB, 2023b).

Kokeiluajo	Leikkauskaasu	Leikkausnopeus (mm/min)	Taajuus (Hz)	Pulssien päällekkäisyys	Pulssien etäisyys (µm)
1	Ilma	10000	3000	65 %	55,6
2	Ilma	50000	5000	-5 %	166,7
3	Ilma	10000	5000	79 %	33,3
4	Ilma	50000	3000	-75 %	277,8
5	Ilma	30000	4000	21 %	125,0
6	Ilma	30000	4000	21 %	125,0
7	Ilma	50000	5000	-5 %	166,7
8	Ilma	10000	3000	65 %	55,6
9	Ilma	10000	5000	79 %	33,3
10	Ilma	50000	3000	-75 %	277,8

Taulukon 1 arvot on laskettu Eaglen antamien tietojen perusteella, kun leikataan 0,5 mm sähköterästä (ABB & Fraunhofer IPT, 2023c). Laskelmien pohjalta on määritetty demonstraatioiden parametritaulukoiden valittu taajuus ja pohjatiedot.

#### 4.6 Oletukset

Työssä toteutetaan kokeellinen suunnittelu, jonka avulla pyritään hankkimaan lisätietoja laserjärjestelmän lineaarisesta käyttäytymisestä (ABB & Fraunhofer IPT, 2023a; ABB & Fraunhofer IPT, 2023b). Tämän tiedon perusteella pyritään löytämään optimaaliset leikkausparametrit 0,5 mm:n sähköteräksen leikkauksessa. Koska kokeellisessa suunnittelussa käytetyt tiedot ovat karkeita ja suuntaa antavia, laskelmissa käytetyt arvot ovat likimääräisiä. Laserpulssien välinen etäisyys on arvioitu teoreettisesti käytetyn taajuuden ja laserin etenemismatkan suhteen. Parametritaulukoiden arvoja on pyöristetty ylöspäin.

Pulssien päällekkäisyyden laskelmien perusteella paras pulssien päällekkäisyys saavutettiin 5000 Hz:n taajuudella (ABB & Fraunhofer IPT, 2023b). Valinta perustui maksimaaliseen leikkausnopeuteen, minkä vuoksi kaikki seuraavat kokeelliset leikkaukset suoritetaan kyseisellä taajuudella. Taulukon yksi laskelmien perusteella 5000 Hz: taajuus osoitautui parhaaksi valinnaksi, kun haluttiin nopeaa leikkausnopeutta hyvällä pulssien päällekkäisyydellä.

## 5 Tulokset

Tässä luvussa esitellään tulokset, jotka on saatu kokeellisen suunnittelun sisällön analyysin vaiheesta. Ensimmäisenä esitetään tulokset linjatesteistä A1-3 ja B1-3, joissa tutkittiin paineistetun ilman ja typen sekä erilaisten prosessiparametrien vaikutuksia leikkauslaatuun ja tehokkuuteen. Seuraavaksi esitetään demonstraatioiden tulokset, jotka toteutettiin todellisissa käyttöolosuhteissa optimoiduilla parametreilla. Viimeisenä esitetään tulosten tarkastelu ja analysointi (ABB & Fraunhofer IPT, 2022e).

### 5.1 Linjatesti A1 paineistetulla ilmalla

Ensimmäisenä ABB aloitti linjatesteillä A1-3 (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Linjatestissä A leikattiin 0,5 mm 6W M600 korealaista sähköterästä, kuten kaikissa muissakin linjatesteissä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Linjatesteissä laser leikkasi 11 kappaletta suoria viivoja ennalta määrätyillä parametreilla (ABB & Fraunhofer IPT, 2023a; ABB & Fraunhofer IPT, 2023b) Linjatestien perusteella voitiin suorittaa tarkat alustavat parametrit jatkotoimenpiteille. Alkuperäinen leikkausnopeus 50 000 mm/min nostettiin laskeutuvasti arvioituun 100 000 mm/min ja nopeus porrastettiin 5000 mm/min välein. Tällöin kaikki muut parametrit pidettiin vakioina, jotta saataisiin mahdollisimman tarkkoja ja vertailukelpoisia tuloksia. Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty linjatestin A1 parametrien arvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).

**Taulukko 2.** Linjatestin A1 parametrit (ABB, 2023c).

Kokeiluajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	Ilma	7	50 000	0,20	5000
2	Ilma	7	55 000	0,20	5000
3	Ilma	7	60 000	0,20	5000
4	Ilma	7	65 000	0,20	5000
5	Ilma	7	70 000	0,20	5000
6	Ilma	7	75 000	0,20	5000
7	Ilma	7	80 000	0,20	5000
8	Ilma	7	85 000	0,20	5000
9	Ilma	7	90 000	0,20	5000
10	Ilma	7	95 000	0,20	5000
11	Ilma	7	100 000	0,20	5000

Linjatesti A1:n leikkausnopeus oli 50 000 mm/min – 100 000 mm/min porrastettuna 5 000 mm/min välein (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Kaikki muut parametrit olivat vakiot tässä tilanteessa. Parhaaksi nopeudeksi leikkausuran laadun, purskeen, tasaisuuden ja absorption vaikutuksen perusteella valikoitui 90 000 mm/min.

## 5.2 Linjatesti A2

Linjatestin A1 perusteella valituksi leikkausnopeudeksi valittiin 90 000 mm/min (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Seuraavaksi suoritettiin linjatesti A2, jossa keskityttiin etsimään optimaalinen kaasun paine, kun leikkauskaasuna käytetään paineistettua ilmaa. Alkuperäinen kaasun paine on 7,0 baaria. Nyt kaasun paine oli 4–14 baaria yhden baarin porrastuksella. Kaikki muut parametrit pidettiin vakioina, paitsi valittu 90 000 mm/min leikkausnopeus, jotta saimme mahdollisimman tarkkoja ja vertailukelpoisia tuloksia muute- tuilla arvoilla. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty linjatestin A2 parametrien arvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).

**Taulukko 3.** Linjatestin A2 parametrit (ABB, 2023c).

Kokeiluajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	Ilma	4	90 000	0,20	5000
2	Ilma	5	90 000	0,20	5000
3	Ilma	6	90 000	0,20	5000
4	Ilma	7	90 000	0,20	5000
5	Ilma	8	90 000	0,20	5000
6	Ilma	9	90 000	0,20	5000
7	Ilma	10	90 000	0,20	5000
8	Ilma	11	90 000	0,20	5000
9	Ilma	12	90 000	0,20	5000
10	Ilma	13	90 000	0,20	5000
11	Ilma	14	90 000	0,20	5000

Linjatestissä A2 kaasun paine valikoitiin 4–14 baarin väliltä yhden baarin välein porrastettuna (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Lisäksi parhaaksi valikoitunut leikkausnopeus 90 000 mm/min oli käytössä, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Parhaaksi kaasun paineeksi leikkausuran laadun, purskeen, tasaisuuden ja absorption vaikutuksen perusteella valikoitui 8,0 baaria. 8,0 baarin kaasun paineella kaasun virtausnopeus oli optimaalisin, sillä silloin kaikki materiaali oli huuhtoutunut leikkausurasta pois jättäen sileän ja tarkan leikkausuran seinämän. Tätä alhaisemmilla paineilla purske jäi leikkausuran seinämiin ja kiinnittyi niihin lujasti kiinni. 8,0 baaria suuremmilla nopeuksilla kaasun virtausnopeuden takia sulanut materiaali pääsi jäähtymään leikkausuraan, ja tällöin sulanut materiaali jäi leikkausuraan teräviksi purkeiksi (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).

### 5.3 Linjatesti A3

Linjatestin A1 perusteella valituksi leikkausnopeudeksi valittiin 90 000 mm/min (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Linjatesti A2 perusteella valituksi optimaaliseksi kaasun virtausnopeudeksi valittiin 8,0 baaria. Seuraavaksi suoritettiin linjatesti A3, jossa keskityttiin etsimään optimaalinen laserin säteen polttopisteen paikka. Alkuperäinen säteen polttopisteen paikka on 0,20 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna. Polttopisteen paikka

asetettiin nyt 0,05 – 0,30 mm ja 0,025 mm porrastuksella. Nyt leikkausnopeus oli valittu optimaalinen 90 000 mm/min ja kaasun virtausnopeus 8,0 baaria, jotta saimme mahdollisimman tarkkoja ja vertailukelpoisia tuloksia, kun arvoja on muutettu. Alla olevassa taulukossa 4 on esitetty linjatestin A3 parametrien arvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).

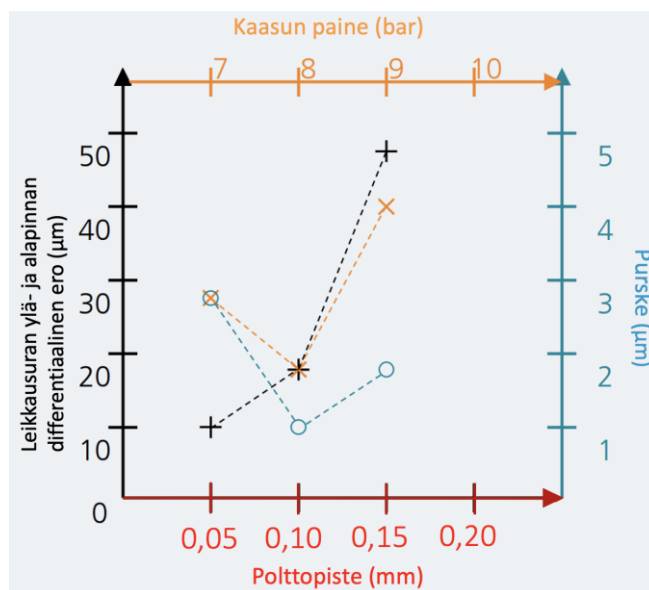
**Taulukko 4.** Linjatestin A3 parametrit (ABB, 2023c).

Kokeiluajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	Ilma	8	90 000	0,050	5000
2	Ilma	8	90 000	0,075	5000
3	Ilma	8	90 000	0,100	5000
4	Ilma	8	90 000	0,125	5000
5	Ilma	8	90 000	0,150	5000
6	Ilma	8	90 000	0,175	5000
7	Ilma	8	90 000	0,200	5000
8	Ilma	8	90 000	0,225	5000
9	Ilma	8	90 000	0,250	5000
10	Ilma	8	90 000	0,275	5000
11	Ilma	8	90 000	0,300	5000

Linjatestissä A3 laserin säteen polttopisteen paikka oli asetettu 0,05 mm – 0,30 mm ja 0,025 mm porrastuksella (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Lisäksi valittu leikkausnopeus 90 000 mm/min ja 8,0 baarin optimaalinen kaasun paine otettiin huomioon, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Parhaaksi säteen polttopisteen etäisyydeksi leikkausuran laadun, purskeen, tasaisuuden, absorption vaikutuksen ja ennen kaikkea leikkausuran ylä- ja alapinnan leveyseron perusteella valikoitui 0,10 mm. Tällä säteen etäisyydellä säde oli optimaalisella korkeudella levyyn nähden. Tätä alhaisemmillä etäisyyksillä leikkausuran yläpinta oli kapeampi kuin alapinta. Puolestaan tätä korkeammilla etäisyyksillä leikkausuran alapinta oli kapeampi kuin yläpinta (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).

Linjatesteissä käytettiin laajaa parametrikirjoa, jotta saataisiin mahdollisimman kattava kokeilu leikkausnopeuden, kaasun paineen ja polttopisteen parametrien vaikutuksia eri

asetuksilla laserissa (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d). Kokeilujen perusteella paras leikkausnopeus on 90 000 mm/min, optimaalisin kaasun paine 8,0 baaria ja suurin leikkausura saadaan 0,10 mm polttopisteen etäisyydellä. Alla havainnollistava kuviossa 1 on esitetty linjatestien tuloksien yhteenveto. Purskeen laatu on esitetty asteikolla 1–5, jossa yksi on välttävä ja viisi on erinomainen purskeen arvo.



**Kuvio 1.** Linjatestien A1-3 parametrien yhteenveto (ABB & Fraunhofer IPT, 2023d).

## 5.4 Linjatesti B1 tyypellä

Seuraavaksi ABB teki linjatestejä tyypellä, jotta tuloksia voidaan verrata paineistetun ilman tuloksiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e). Alkuperäinen leikkausnopeus 50 000 mm/min nostettiin laskennallisesti arvioituun 100 000 mm/min ja nopeus porrastettiin 5000 mm/min välein. Tällöin kaikki muut parametrit pidettiin vakioina, jotta saataisiin mahdollisimman tarkkoja ja vertailukelpoisia tuloksia. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty linjatestin B1 parametrien arvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e).

**Taulukko 5.** Linjatestin B1 parametrit (ABB, 2023c).

Kokeiluajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	N2	7	50 000	0,20	5000
2	N2	7	55 000	0,20	5000
3	N2	7	60 000	0,20	5000
4	N2	7	65 000	0,20	5000
5	N2	7	70 000	0,20	5000
6	N2	7	75 000	0,20	5000
7	N2	7	80 000	0,20	5000
8	N2	7	85 000	0,20	5000
9	N2	7	90 000	0,20	5000
10	N2	7	95 000	0,20	5000
11	N2	7	100 000	0,20	5000

Linjatesti B1:n leikkausnopeus oli 50 000 mm/min – 100 000 mm/min porrastettuna 5000 mm/min välein (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e). Kaikki muut parametrit olivat vakiot tässä tilanteessa. Parhaaksi nopeudeksi leikkausuran laadun, purskeen, tasaisuuden ja absorption vaikutuksen perusteella valikoitui 50 000 mm/min, joka on kuitulaserin vakio leikkausnopeus.

## 5.5 Linjatesti B2

Linjatestin B1 perusteella valituksi leikkausnopeudeksi valittiin 50 000 mm/min (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e). Seuraavaksi suoritettiin linjatesti B2, jossa keskityttiin etsimään optimaalinen kaasun paine, kun leikkauskaasuna käytetään typpeä. Alkuperäinen kaasun paine on 7,0 baaria. Nyt kaasun paine asetettiin 4–14 baaria yhden baarin porrastuksella. Kaikki muut parametrit pidettiin vakioina, paitsi valittu 50 000 mm/min leikkausnopeus, jotta saimme mahdollisimman tarkkoja ja vertailukelpoisia tuloksia muutetuilla arvoilla. Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty linjatestin B2 parametrien arvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e).

**Taulukko 6.** Linjatestin B2 parametrit (ABB, 2023c).

Kokeiluajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	N2	4	50 000	0,20	5000
2	N2	5	50 000	0,20	5000
3	N2	6	50 000	0,20	5000
4	N2	7	50 000	0,20	5000
5	N2	8	50 000	0,20	5000
6	N2	9	50 000	0,20	5000
7	N2	10	50 000	0,20	5000
8	N2	11	50 000	0,20	5000
9	N2	12	50 000	0,20	5000
10	N2	13	50 000	0,20	5000
11	N2	14	50 000	0,20	5000

Linjatestissä B2 kaasun paine oli valikoitu 4–14 baaria yhden baarin välein porrastettuna (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e). Lisäksi parhaaksi valikoitunut leikkausnopeus 50 000 mm/min oli käytössä, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Parhaaksi kaasun paineeksi leikkausuran laadun, purskeen, tasaisuuden ja absorption vaikutuksen perusteella valikoitui 6,0 baaria. Tällä kaasun paineella kaasun virtausnopeus oli optimaalisin. Tätä alhaisemmilla paineilla purske jäi leikkausuran seinämiin ja kiinnittyi niihin lujasti kiinni. 6,0 baaria suuremmilla nopeuksilla kaasun virtausnopeuden takia sulanut materiaali pääsi jäähtymään leikkausuraan, ja tällöin sulanut materiaali jäi leikkausuraan teräviksi purkeiksi (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e).

## 5.6 Linjatesti B3

Linjatestin B1 perusteella valituksi leikkausnopeudeksi valittiin 50 000 mm/min (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e). Linjatestin B2 perusteella valituksi optimaaliseksi kaasun virtausnopeudeksi valittiin 6,0 baaria. Seuraavaksi suoritettiin linjatesti B3, jossa keskityttiin etsimään optimaalinen laserin säteen polttopisteen paikka. Alkuperäinen säteen polttopisteen paikka on 0,20 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna. Polttopisteen paikka asetettiin nyt 0,05 mm – 0,30 mm ja 0,025 mm porrastuksella. Leikkausnopeudeksi oli valittu

optimaalinen 60 000 mm/min ja kaasun virtausnopeudeksi 6,0 baaria, jotta saimme mahdollisimman tarkkoja ja vertailukelpoisia tuloksia, kun arvoja on muutettu. Alla olevassa taulukossa 7 on esitetty linjatestin B3 parametrien arvot (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e).

**Taulukko 7.** Linjatestin B3 parametrit (ABB, 2023c).

Kokeiluajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	N2	6	50 000	0,050	5000
2	N2	6	50 000	0,075	5000
3	N2	6	50 000	0,100	5000
4	N2	6	50 000	0,125	5000
5	N2	6	50 000	0,150	5000
6	N2	6	50 000	0,175	5000
7	N2	6	50 000	0,200	5000
8	N2	6	50 000	0,225	5000
9	N2	6	50 000	0,250	5000
10	N2	6	50 000	0,275	5000
11	N2	6	50 000	0,300	5000

Linjatestissä B3 laserin säteen polttopisteen paikka oli valikoitu 0,05 mm – 0,30 mm ja 0,025 mm porrastuksella (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e). Lisäksi valittu leikkausnopeus 50 000 mm/min ja 6,0 baarin optimaalinen kaasun paine otettiin huomioon tässä kokeilussa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Parhaaksi säteen polttopisteen etäisyydeksi leikkausuran laadun, purskeen, tasaisuuden, absorption vaikutuksesta ja ennen kaikkea leikkausuran ylä- ja alapinnan leveyseron perusteella valikoitui 0,25 mm. Tällä säteen etäisyydellä säde oli optimaalisella korkeudella levyyn nähden. Tätä alhaisemmilla etäisyyksillä leikkausuran yläpinta oli kapeampi kuin alapinta. Puolestaan tätä korkeammilla etäisyyksillä leikkausuran alapinta oli kapeampi kuin yläpinta (ABB & Fraunhofer IPT, 2023e).

## 5.7 BP280-demonstraation leikkaus paineistetulla ilmalla

Linjatestien A1-3 tulosten jälkeen siirryttiin viimeisiin kokeisiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023f). Tässä kokeilussa laskennallisesti todistettuja ja testattuja parametriarvoja käytettiin todelliseen malliin eli BP280-malliin. BP280-mallista on luotu eri demonstraatioita eri parametreilla ja leikkauskaasuilla. Tässä osiossa leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa.

Ensin suoritettiin BP280-demonstraation leikkaus paineistetulla ilmalla. Tässä vaiheessa käytettiin laskennallisesti todistettuja ja linjatestien perusteella saatuja parametriarvoja ABB:n mallimoottorista BP280, josta tehtiin eri demonstraatioita (ABB & Fraunhofer IPT, 2023f). BP280 mallin geometria on huomattavasti haastavampaa, sillä mallissa on useita tiukkoja käännöksiä ja puhkaisuja. Tästä syystä parametrien arvoja muutettiin alla olevan taulukon 8 mukaisiksi. Taulukkoon valittiin linjatesteissä paineistetulle ilmalle parhaiksi todetut parametrien arvot. Koska todellisten parametrien etsiminen on haastavaa, parametrien arvoja nostettiin ja laskettiin tavoitearvosta, jotta mahdollisiin poikkeavuuksiin voitaisiin perehtyä tarkemmin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023f).

**Taulukko 8.** BP280-demonstraatio paineistetulla ilmalla (ABB, 2023d).

Kokeiluajo	Leikkausajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	11	Ilma	7,50	86 000	0,12	5000
2	10	Ilma	7,50	94 000	0,08	5000
3	7	Ilma	7,50	94 000	0,12	5000
4	6	Ilma	7,50	86 000	0,08	5000
5	5	Ilma	8,00	90 000	0,10	5000
6	3	Ilma	8,00	90 000	0,10	5000
7	1	Ilma	8,00	90 000	0,10	5000
8	8	Ilma	8,50	94 000	0,12	5000
9	9	Ilma	8,50	86 000	0,12	5000
10	4	Ilma	8,50	94 000	0,08	5000
11	2	Ilma	8,50	86 000	0,08	5000

BP280-mallin tulokset osoittavat, että paineistetun ilman käyttö vaikuttaa huomattavasti leikkausprosessiin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023f). Parametreihin valittiin säätövaraa kumpaankin suuntaan parhaaksi todetun parametrin arvon mukaan, jotta varmistuttaisiin, että kyseiset parametrit soveltuvat varmasti BP280-demonstraatioon. Paineistetun ilman avulla saavutettiin selkeä parannus leikkaustuloksissa verrattuna tyypeen. Parhaisiin tuloksiin BP280-demonstraatiossa paineistetulla ilmalla päästiin 90 000 mm/min leikkausnopeudella, 8,0 baarin kaasun paineella ja säteen polttopisteen paikan ollessa 0,10 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna.

Leikkausreunojen laatu parani huomattavasti, mikä johti sileämpiin ja tarkempiin leikkausreunoihin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023f). Paineistetun ilman avulla vähennettiin leikkausreunojen karheutta ja minimoitiin absorptiovaikutusta, mikä johti puhtaampiin ja terävämpiin leikkausreunoihin. Paineistetun ilman käyttö mahdollisti leikkausprosessin nopeuttamisen ja tehokkuuden parantamisen. Paineistetun ilman avulla saavutettiin nopeampi leikkausnopeus, mikä johti kokonaisvaltaiseen tuottavuuden kasvuun leikkausprosessissa. Leikkaustulokset olivat tasaisempia ja vähemmän alttiita virheille, mikä paransi lopputuotteiden laatua ja vähensi hukkaa. Näin ollen paineistetun ilman käyttö BP280-mallissa osoittautui tehokkaaksi keinoksi parantaa leikkausprosessin laatua, nopeutta ja tehokkuutta, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon teollisuudessa sähköteräksen leikkauksessa (ABB & Fraunhofer IPT, 2023f).

## **5.8 BP280-demonstraatio leikkaus tyellä**

Seuraavaksi suoritettiin BP280-demonstraatio leikkaus tyellä. Tässä vaiheessa käytettiin laskennallisesti todistettuja ja linjatestien perusteella saatuja parametriarvoja (ABB & Fraunhofer IPT, 2023g). BP280-mallin geometria on huomattavasti haastavampaa, sillä mallissa on useita tiukkoja käänköksiä ja puhkaisuja. Tästä syystä parametrien arvoja muutettiin alla olevan taulukon mukaisiksi. Vertailun vuoksi BP280-demonstraatio suoritetaan myös tyellä. Linjatestien B1–3 perusteella ei voida käyttää samoja parametrien arvoja kuin paineistetulla ilmalla (ABB & Fraunhofer IPT, 2023g).

**Taulukko 9.** BP280-demonstratio tyellä (ABB, 2023e).

Kokeiluajo	Leikkausajo	Kaasutyyppi	Kaasun paine (bar)	Leikkausnopeus (mm/min)	Polttopiste (mm)	Taajuus (Hz)
1	11	N2	6,50	40 000	0,25	5000
2	10	N2	6,50	70 000	0,15	5000
3	7	N2	6,50	40 000	0,25	5000
4	6	N2	6,50	50 000	0,15	5000
5	5	N2	7,00	40 000	0,20	5000
6	3	N2	7,00	50 000	0,20	5000
7	1	N2	7,00	60 000	0,20	5000
8	8	N2	7,50	70 000	0,25	5000
9	9	N2	7,50	50 000	0,25	5000
10	4	N2	7,50	70 000	0,15	5000
11	2	N2	7,50	50 000	0,15	5000

BP280-mallin tulokset tyellä leikattuna osoittavat, että typen käyttö leikkausprosessissa tuotti huonompaa leikkausjälkeä verrattuna paineistetun ilman tuloksiin. Tulokset olivat huonompia kuin paineistetulla ilmalla, sillä tyyppi jäähdyttää leikkausuraa suhteessa enemmän kuin paineistettu ilma. Tämän vuoksi leikkausura oli purskeisempi. Lisäksi typen ominaisuutena on tehdä leikkausurasta juovaisempi.

Parametrien arvoihin valittiin säätövaraa kumpaankin suuntaan parhaaksi todetun parametrin arvon mukaan, jotta varmistuttaisiin, että kyseiset parametrit soveltuvat varmasti BP280-demonstraatioon. Parhaisiin tuloksiin BP280-demonstraatiossa tyellä päästiin 50 000 mm/min leikkausnopeudella, 6,5 baarin kaasun paineella ja säteen polttopisteen paikan ollessa 0,25 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna (ABB & Fraunhofer IPT, 2023g). Tyellä leikkauksen laatu kärsi, sillä pursketta muodostui enemmän, leikkauksen juovat olivat näkyvämpiä ja leikkausnopeus oli huomattavasti hitaampi (ABB & Fraunhofer IPT, 2023g).

## 5.9 BP280-demonstraatioiden reikien analysointi paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna

Linjatestien ja BP280-demonstraation jälkeen siirryttiin seuraavaan vaiheeseen, jossa tarkasteltiin BP280-demonstraatiota tarkemmin (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j). Tässä vaiheessa tarkasteltiin BP280-demonstraation leikattuja reikiä, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa ja typpeä. Tässä vaiheessa arvioitiin taulukon 8 ja 9 parametreilla leikattuja malleja. BP280-demonstraation reikiä arvioitiin purskeen esiintyvyyden perusteella aiemmin muokattujen leikkausparametrien perusteella. Analysoinnissa reiät kuvattiin Aliconan G5 mikrokoordinaattimittalaitteella saadun 3D simulaation perusteella. Purskeen esiintyvyyden korostamisessa käytettiin erikoisväriainetta, mikä tarttui levyn pinnan ylä- ja alapuolella yli menevien purskeen osiin. Erityisaine näytti selkeästi poikkeamat leikkauksen tasaisuudesta ja purskeesta. Tavoitteena oli ymmärtää, miten BP280:n laatu ja leikkauksen suorituskyky vaihtelivat eri leikkausparametreilla (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j).

BP280-demonstraation reikien analysoinnissa käytettiin aiemmin todistettujen leikkausparametrien arvoja, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa sekä typpeä (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j). Tuloksia vertailtiin alkuperäisiin leikkausparametrien arvoihin eri leikkausnopeudella ja alkuperäisellä leikkauskaasulla, typellä. Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästiin paineistetulla ilmalla leikkausnopeudella 94 000 mm/min, kaasun paineella 8,5 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,12 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli minimaalista ja juovia esiintyi vähiten. Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästiin puolestaan typellä leikkausnopeudella 50 000 mm/min, kaasun paineella 6,5 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,25 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli minimaalista ja juovia esiintyi vähiten. BP280-demonstraatioiden perusteella reikien leikkau jälki parani huomattavasti verrattuna typellä leikattaessa (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j).

## 5.10 BP280-demonstraatioiden suorien ja kaarrostien analysointi paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna

Seuraavassa vaiheessa keskityimme analysoimaan BP280-demonstraation suorien viivojen ja kaarrostien ominaisuuksia erityisaineen avulla (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j). Tässä vaiheessa tarkasteltiin BP280-demonstraation leikattuja reikiä, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa ja typpeä. Tässä vaiheessa arvioitiin taulukoiden 8 ja 9 parametreilla leikattuja malleja. Optisella Aliconan G5 mikrokoordinaattimittalaitteella analysoitiin saatua 3D-simulaatiota, jotta leikkauspintojen tasaisuutta ja purskeen muodostuminen voitiin havaita. Erityisväriainetta käytettiin purskeen esiintyvyyden korostamiseen, mikä mahdollisti selkeiden poikkeamien havaitsemisen. Tavoitteenamme oli tässä vaiheessa syventää ymmärrystämme siitä, miten BP280:n laatu ja leikkauksen suorituskyky vaihtelevat eri leikkausparametrien ja leikkauskaasun vaikutuksesta (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j).

BP280-demonstraation suorien kohtien ja kaarroksien analysoinnissa käytettiin aiemmin todistettujen leikkausparametrien arvoja, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa sekä typpeä (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j). Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästään paineistetulla ilmalla leikkausnopeudella 90 000 mm/min, kaasun paineella 8,0 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,10 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli minimaalista ja juovia esiintyi vähiten. Leikkausnopeuden kasvaessa yli 90 000 mm/min havaittiin, että kaarrostien laatu alkoi heikkenemään. Tämä näkyi huojuvana leikkauksena kulmassa, jolloin leikkaus kulman käännöksen jälkeen ei ollut suora. Samalla absorption ja purskeen määrä kasvoi.

Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästiin typellä leikkausnopeudella 50 000 mm/min, kaasun paineella 6,0 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,25 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli minimaalista ja juovia ei esiintynyt merkittävästi (ABB & Fraunhofer IPT, 2023j).

Tulokset osoittavat paineistetun ilman parantavan leikkaustuloksia ja vähentävän purskeen muodostumista verrattuna tyypellä leikattuun.

### **5.11 Linjatestien ja BP280-demonstraatioiden tulosten tarkastelu**

Linjatesteissä A ja B suoritettiin laaja kokeilusarja eri leikkausparametreilla, jotta voitaisiin löytää optimaaliset parametrit leikkausnopeudelle, kaasun paineelle ja polttopisteen etäisyydelle (ABB & Fraunhofer IPT, 2023h). Linjatesti A:ssa paras leikkausnopeus oli 90 000 mm/min, optimaalinen kaasun paine oli 8,0 baaria ja polttopisteen etäisyys leikkausurasta oli 0,10 mm. Linjatesti B:ssä paras leikkausnopeus oli 50 000 mm/min, optimaalinen kaasun paine oli 6,5 baaria ja polttopisteen etäisyys leikkausurasta oli 0,25 mm. Näillä optimaalisilla asetuksilla saavutettiin tasaisimmat ja laadukkaimmat leikkausurat, ja purskeen esiintyminen oli vähäisintä. Linjatesteissä käytetyt parametrit tarjosivat tärkeää tietoa kuitulaserin optimaalisten leikkausparametrien määrittämisessä demonstraatioita varten (ABB & Fraunhofer IPT, 2023h).

BP280-demonstraation tulosten perusteella voidaan todeta, että paineistetun ilman käyttö vaikutti leikkausprosessiin. Optimaalisilla paineistetun ilman parametreilla saavutettiin parannuksia leikkaustuloksissa verrattuna perinteiseen leikkausmenetelmään, kun leikkauskaasuna käytetään typpeä. Parhaisiin tuloksiin päästiin käyttämällä leikkausnopeutta 90 000 mm/min, 8,0 baarin kaasun painetta ja säteen polttopisteen paikkaa 0,10 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna. Paineistetun ilman avulla leikkausreunojen laatu parani, mikä johti sileämpiin ja tarkempiin leikkausreunoihin. Lisäksi paineistetun ilman käyttö mahdollisti nopeamman leikkausnopeuden ja siten kokonaisvaltaisen tuottavuuden kasvun leikkausprosessissa.

Typen käyttö leikkausprosessissa tuotti huonompia leikkaustuloksia verrattuna paineistettuun ilmaan. Typpi jäähdytti leikkausuraa enemmän kuin paineistettu ilma, mikä johti purskeisempaan leikkausuraan ja juovaisempaan leikkausjälkeen. Tyypellä parhaisiin tuloksiin päästiin käyttämällä leikkausnopeutta 50 000 mm/min, 6,5 baarin kaasun painetta ja säteen polttopisteen paikkaa 0,25 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna.

Typellä leikkauksen laatu kärsi, sillä pursketta muodostui enemmän, leikkauksen juovat olivat näkyvämpiä ja leikkausnopeus oli huomattavasti hitaampi.

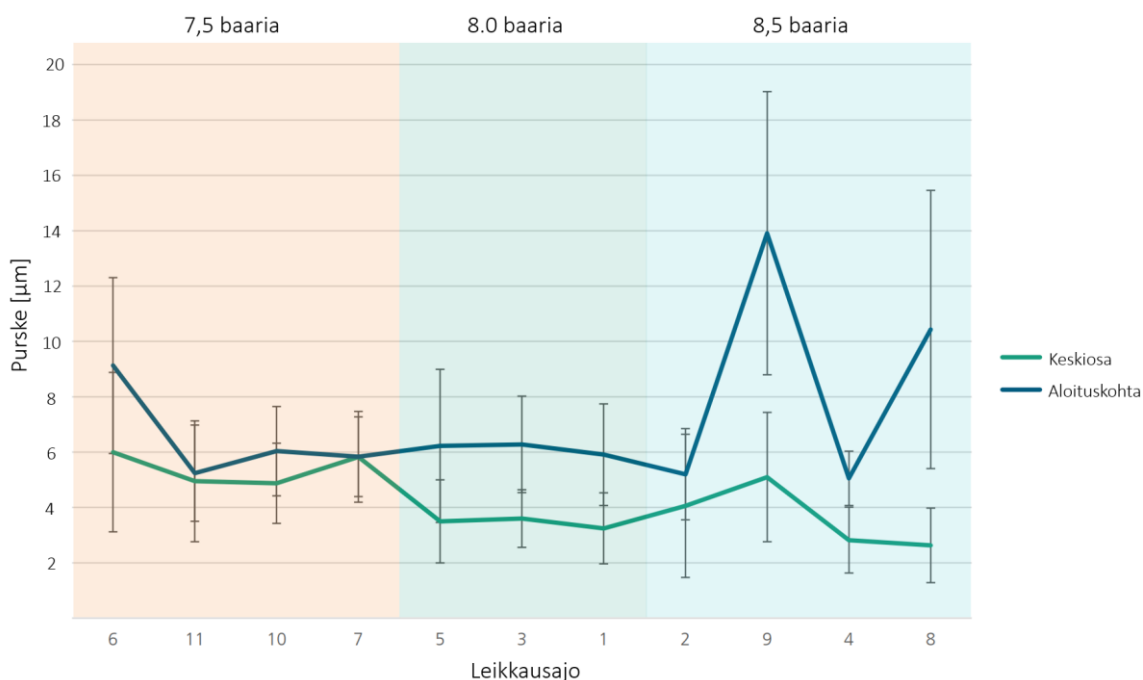
BP280-demonstraation reikien, suorien ja kaarrostien analysointi tarjoaa arvokasta tietoa leikkausprosessin tehokkuudesta ja laadusta eri leikkausparametreilla sekä eri kaasutyypeillä. Tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan reikien, suorien ja kaarrostien ominaisuuksia sekä vertailemaan paineistetun ilman ja typen vaikutuksia leikkaustuloksiin.

Reikien analysoinnissa käytettiin erikoisväriainetta purskeen esiintyvyyden korostamisessa, mikä mahdollisti poikkeamien havaitsemisen leikkauspinnalta. Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästiin paineistetulla ilmalla leikattaessa leikkausnopeudella 94 000 mm/min, kaasun paineella 8,5 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,12 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli vähäisintä ja juovia ei esiintynyt. Vastaavasti typellä leikattaessa parhaaseen tulokseen päästiin leikkausnopeudella 50 000 mm/min, kaasun paineella 6,5 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,25 mm. Tulokset osoittivat, että paineistettu ilma tuotti parempia leikkaustuloksia, sillä se vähensi purskeen muodostumista ja absorption vaikutusta leikkausuraan.

Suorien ja kaarrostien analysoinnissa havaittiin myös, että paineistetulla ilmalla saavutettiin parhaimmat leikkausnopeudella 90 000 mm/min, 8,0 baarin kaasun paineella ja säteen polttopisteen etäisyydellä 0,10 mm. Leikkausuran laatu oli hyvä, pursketta ei esiintynyt merkittävästi, absorption vaikutus oli vähäistä ja juovia esiintyi vähän. Vastaavasti typellä leikattaessa parhaaseen tulokseen päästiin leikkausnopeudella 50 000 mm/min, kaasun paineella 6,0 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,25 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli minimaalista ja juovia ei esiintynyt merkittävästi.

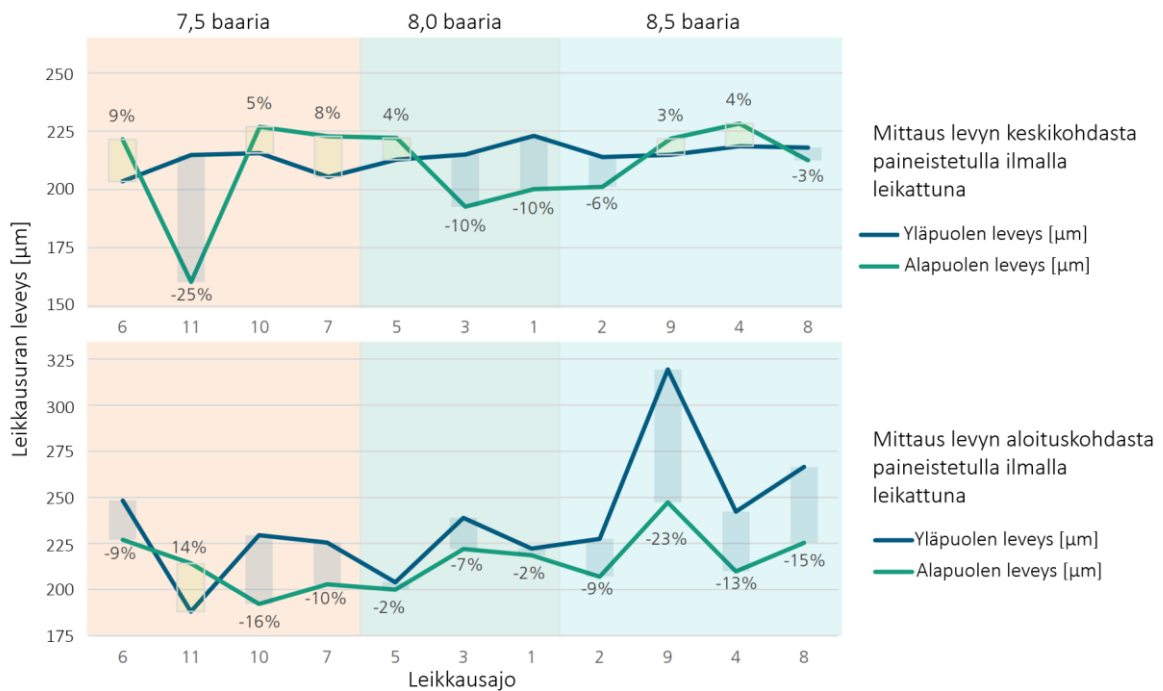
## 5.12 BP280-demonstraatioiden tulosten analysointi

Tulosten analysoinnissa analysoitiin ensimmäiseksi BP280-demonstraation leikkauksessa syntynyttä pursketta, ja kuinka käytetyn paineistetun ilman kaasun paine vaikutti purskeen esiintymiseen (ABB & Fraunhofer IPT, 2023h; ABB & Fraunhofer IPT, 2023i). Demonstraatioiden tulokset analysoitiin optisella Aliconan G5 mikrokoordinaattimittalaitteella. Paineistetulla ilmalla arvoina käytettiin taulukon 8 ja tyypellä taulukon 9 BP280-demonstraation arvoja. Kuviossa 2 x-akselilla on esitetty leikkausajojärjestys ja y-akselilla purskeen korkeus. Analyysissä havaittiin, että paineistetulla ilmalla leikattuna 8,0 baarin kaasun paineella purskeen esiintyvyys oli vähäisintä demonstraation keskeltä mitattuna ja aloituskohdasta katsottuna. Tällöin pursketta oli keskikohdasta ja aloituskohdasta mitattuna alhaisimmillaan 5,0  $\mu\text{m}$ . Puolestaan liitteessä 1 on esitetty, kuinka tyypellä leikattuna parhaaseen leikkaustulokseen päästiin 6,0 baarin kaasun paineella, jolloin pursketta oli vähimmillään aloituskohdasta mitattuna 3,5  $\mu\text{m}$  ja keskikohdassa puolestaan 3,0  $\mu\text{m}$ .



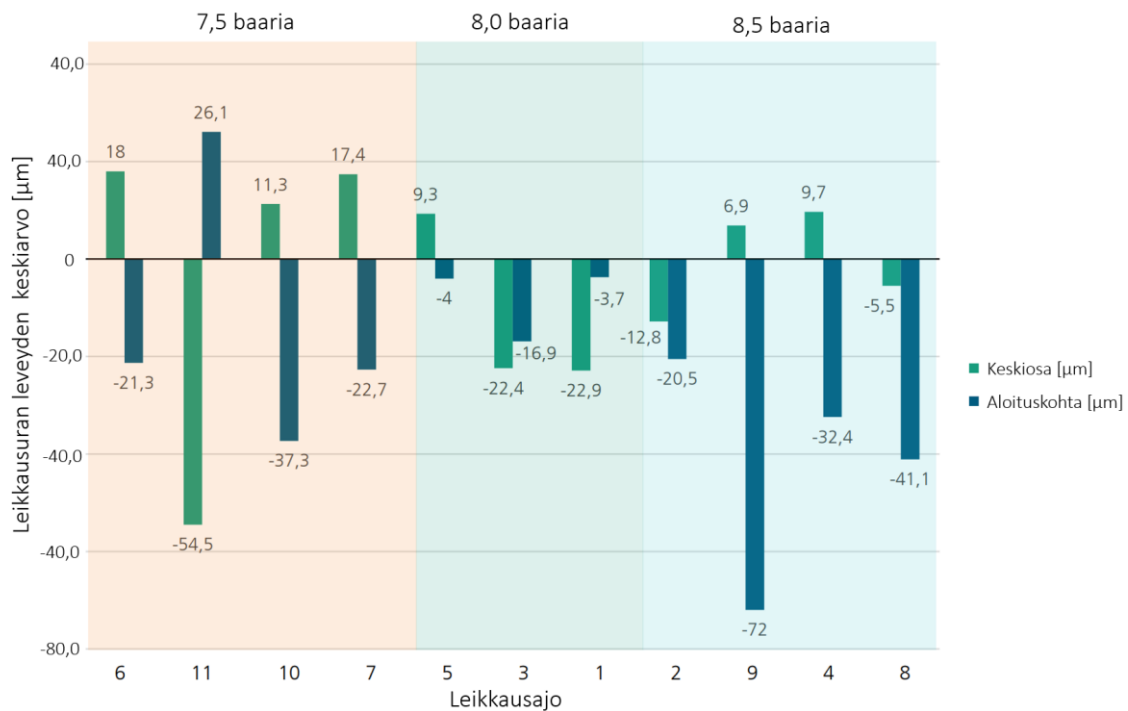
**Kuvio 2.** BP80-demonstraation purskeen esiintyvyys paineistetulla ilmalla leikattuna taulukon 8 arvoilla (ABB, 2023d).

Seuraavaksi analysoitiin BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leveysero taulukon 8 arvoilla (ABB & Fraunhofer IPT, 2023h; ABB & Fraunhofer IPT, 2023i). Tässä analyysissä keskityttiin seuraamaan leikatun levyn ylä- ja alapinnan leveyden muuttamista kaasun paineen mukaan. Kuviossa 3 x-akselilla on esitetty leikkausajojärjestys ja y-akselilla leikatun uran leveys. Analyysissä huomattiin, että paineistetulla ilmalla levyn keskikohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,5 baarin kaasun paineella, jolloin ero oli alhaisimmillaan 4,0 %. Tällöin leikkausuran ylä- ja alapinnan erot olivat pienimmillään. Puolestaan levyn aloituskohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,0 baarin kaasunpaineella eron ollessa vain -2,0 %. Miinusmerkki johtuu siitä, että alapuolen leveys on pienempi kuin yläpuolen. Puolestaan liitteessä 2 on esitetty, kuinka tyypellä leikattuna parhaaseen leikkaustulokseen päästiin levyn keskikohdasta mitattuna 6,5 baarin kaasun paineella, jolloin ero oli alhaisimmillaan vain 5,0 %. Levyn aloituskohdasta mitattuna ero oli alhaisin 6,0 baarilla eli 4,2 %.



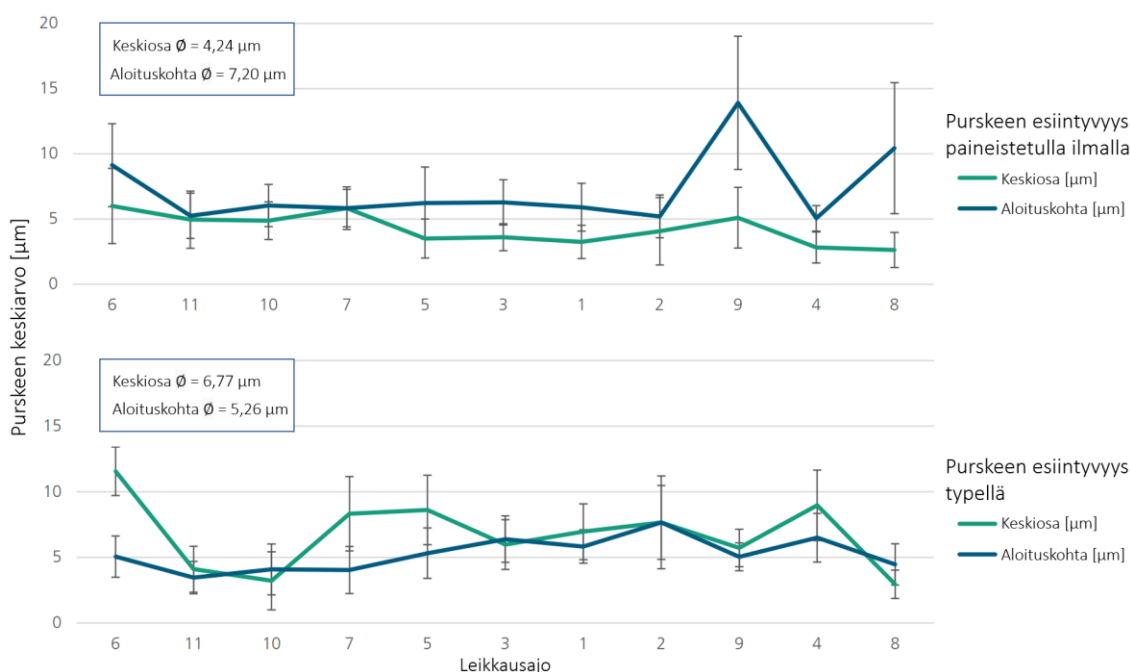
**Kuvio 3.** BP280-demonstraatioleikkauksen ylä- ja alapinnan leveysero paineistetulla ilmalla leikattuna taulukon 8 arvoilla (ABB, 2023d).

Kolmanneksi analysoitiin BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leveys-eroa ja tulokset esitetään kuviossa 4 (ABB & Fraunhofer IPT, 2023h; ABB & Fraunhofer IPT, 2023i). Tässä analyysissä keskityttiin seuraamaan leikatun levyn ylä- ja alapinnan leveyseron muuttumista keskiarvillisesti. Kuviossa 4 x-akselilla on esitetty leikkausajojärjestys ja y-akselilla leikatun uran leveyden keskiarvo. Analyysissä huomattiin, että painistetulla ilmalla levyn keskikohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,5 baarin kaasun paineella, jolloin ylä- ja alapinnan leveysero oli alhaisimmillaan  $-5,5 \mu\text{m}$ . Puolestaan levyn aloituskohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,0 baarin kaasunpaineella eron ollessa vain  $-3,7 \mu\text{m}$ . Miinusmerkki johtuu siitä, että alapuolen leveys on pienempi kuin yläpuolen. Puolestaan liitteessä 3 on esitetty, kuinka tyypellä leikattuna parhaaseen leikkaustulokseen päästiin levyn keskikohdasta mitattuna 7,0 baarin kaasunpaineella, jolloin ero oli alhaisimmillaan  $12,2 \mu\text{m}$ . Levyn aloituskohdasta mitattuna ero oli alhaisin 6,0 baarilla, jolloin ero oli  $-1,0 \mu\text{m}$ .



**Kuvio 4.** BP280-demonstraatio leikkauksen ylä- ja alapinnan leveyseron keskiarvo paineistetulla ilmalla leikattuna taulukon 8 arvoilla (ABB, 2023d).

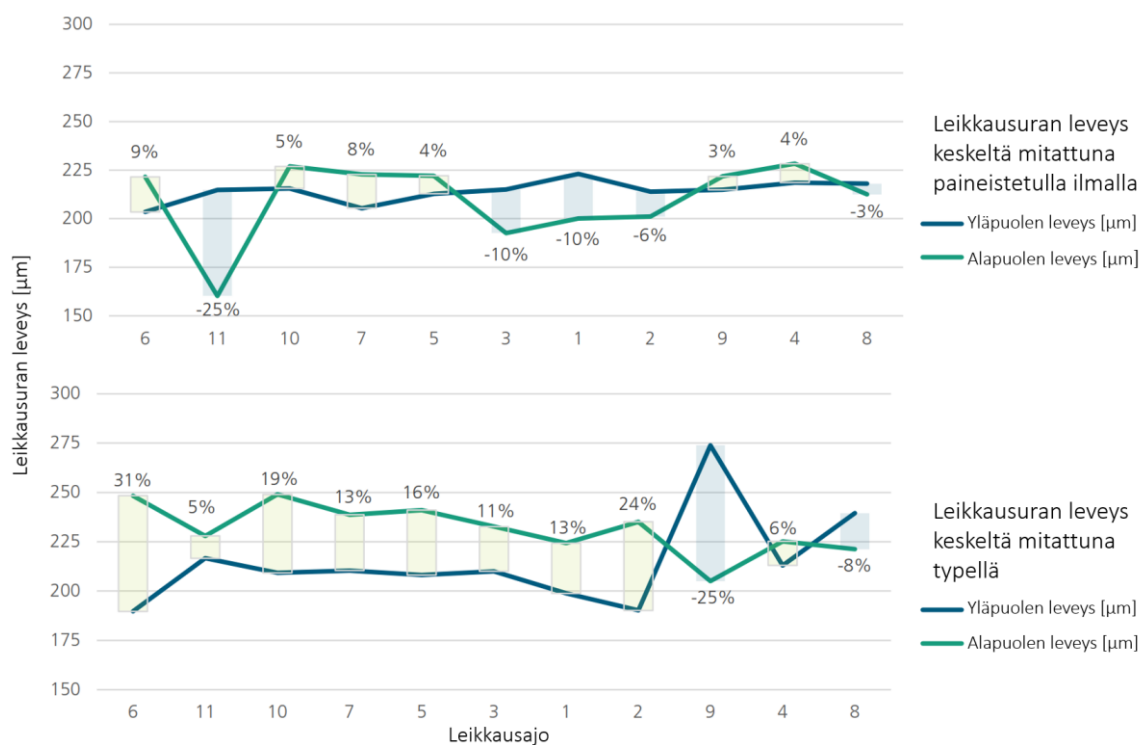
Lopuksi esitetään vertailu paineistetun ilman ja typen tuloksista. Kuviosta 5 havaitaan, että paineistetulla ilmalla taulukon 8 arvoilla leikkauksen purskeen keskiarvo on huomattavasti vähäisempää levyn keskeltä mitattuna kuin typellä. Taulukon 8 arvoilla paineistetulla ilmalla saavutettiin purskeen keskiarvo 4,24  $\mu\text{m}$  levyn keskeltä mitattuna ja aloituskohdasta mitattuna 7,20  $\mu\text{m}$ . Purske mitattiin levyjen ylä- ja alapuolelta ja laskettiin keskiarvo. Purskeen muodostuminen oli korkeampaa paineistetulla ilmalla leikkauksen aloituskohdissa ja kaarroksissa. Pienin purskeen muodostuminen oli leikkausajon 8 parametreilla, jossa purske oli 2,63  $\mu\text{m}$ , leikkausnopeudella 94 000 mm/min, 8,5 baarin kaasun paineella ja 0,12 mm säteen polttopisteellä. Kokonaisuudessaan paineistetun ilman purskeen esiintyvyys oli pienempää kuin typellä leikattuna. Typen arvot on leikattu taulukon 9 arvoilla.



**Kuvio 5.** BP280-demonstraation vertailu purskeen keskiarvosta paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna taulukon 8 ja 9 arvoilla (ABB, 2023d).

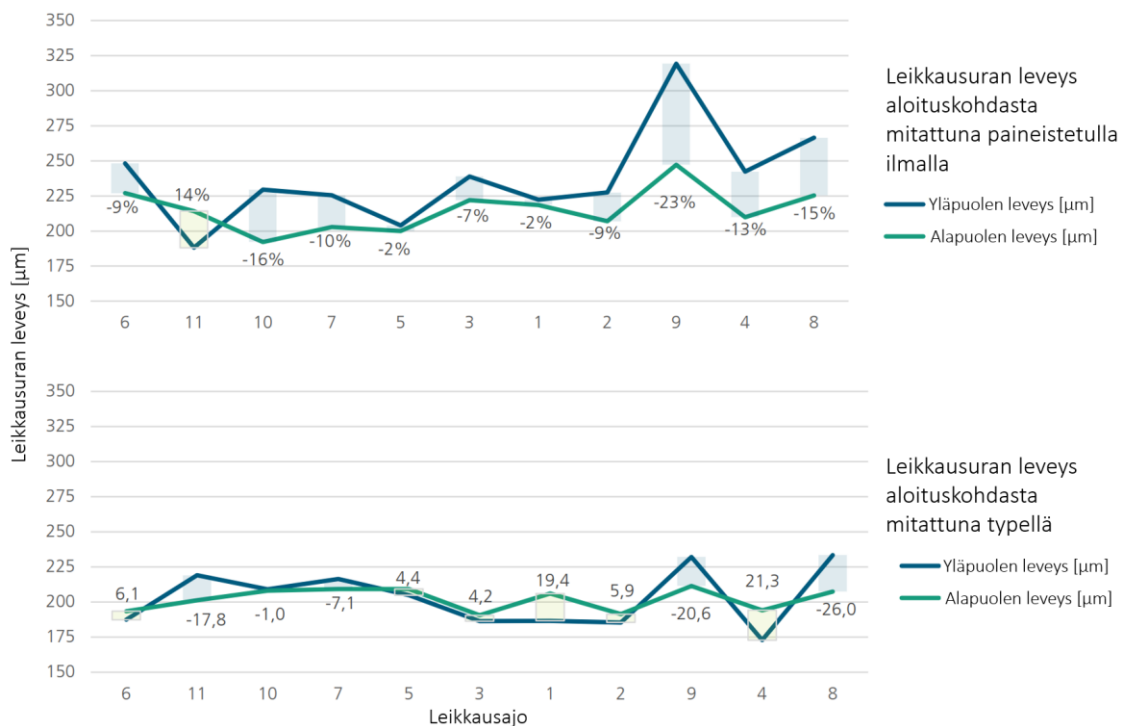
Kuviossa 6 esitetään tulokset BP280-demonstraation leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero keskikohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna. Tuloksista havaitaan, että paineistetulla ilmalla leikkausajossa 9 saavutettiin pienin ero levyn ylä- ja alapinnan leikkausuran leveydessä, leikkausnopeuden ollessa 86 000 mm/min,

8,5 baarin kaasun paineella ja 0,12 mm säteen polttopisteen etäisyydellä levystä. Tässä kohtaa ylä- ja alapinnan ero oli vain 3,0 %. Puolestaan tyypellä leikattuna parhaaseen tulokseen päästiin leikkausajossa 11, jossa ero oli lähes kaksinkertainen verrattuna paineistetulla ilmalla leikattuna.



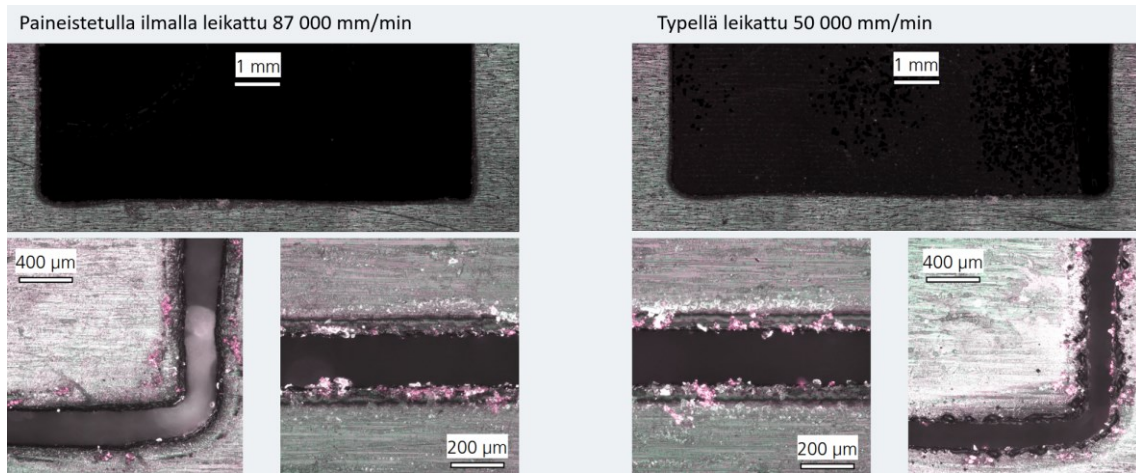
**Kuvio 6.** BP280-demonstraatio leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero keskikohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja tyypellä leikattuna taulukon 8 ja 9 arvoilla (ABB, 2023d).

Kuviossa 7 esitetään tulokset BP280-demonstraatio leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero aloituskohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja tyypellä leikattuna. Tuloksista havaitaan, että paineistetulla ilmalla leikkausajossa 1 ja 5 saavutettiin pienin ero levyn ylä- ja alapinnan leikkauksen leveydessä, leikkauksen nopeuden ollessa 90 000 mm/min, 8,0 baarin kaasun paineella ja 0,10 mm säteen polttopisteen etäisyydellä levystä. Tässä kohdalla ylä- ja alapinnan ero oli -2,0 % eli yläpuolen leveys oli hieman pienempi kuin alapuolen. Puolestaan tyypellä leikattuna paras tulos saavutettiin leikkausajossa 3, jossa ero oli 4,2 %.



**Kuvio 7.** BP280-demonstraation leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero aloituskohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja typellä leikattuna taulukon 8 ja 9 arvoilla (ABB, 2023d).

Keskiarvillisesti parhaaksi leikkausnopeudeksi valikoitui 87 000 mm/min, 8,0 baarin kaasun paineen ja 0,12 mm säteen polttopisteen etäisyys levystä. Optimaalisten parametrien arvoilla ajettiin viimeinen koekappale, jossa käytettiin erikoisväriainetta tuomaan esille poikkeamat leikkausuran seinämiltä. Alla olevassa kuvassa 20 vasemmalla optimaalisten parametrien mukaan ajettu BP280 mallin suora ja kaarroskohta kuvattuna, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa. Oikealla alkuperäisillä laserin parametreilla ajettu BP280-malli, kun leikkauskaasuna käytettiin typellä. Kuvasta nähdään selkeästi, että paineistetulla ilmalla optimaalisilla asetuksilla purskeen esiintyminen on vähäisempää ja leikkausura on puhtaampi.



**Kuva 20.** BP280 mallin leikkausajo optimoiduilla parametreilla vasemmalla esitettynä ja alkupe-  
räisillä parametreilla oikealla esitettynä (ABB, 2023d).

## 6 Tulosten pohdinta

Työn tulokset antavat syvällisen katsauksen kuitulaserin käytön haasteista ja mahdollisuuksista ohuiden levyjen leikkauksessa. Tutkimuksessa todettiin, että Gaussin säteen leveyden  $w(z)$  vaikutus on keskeinen tekijä aiempien leikkausongelmien taustalla. Työssä havaittiin, että leikkausuran epätasaisuudet johtuivat laserin säteen polttopisteen virheellisestä asemasta, mikä heijastui suoraan leikkaustuloksiin. Tämä virhe johtui siitä, että kuitulaseria ei alun perin ollut suunniteltu ohuiden levyjen leikkaamiseen. Lisäksi havaittiin, että paineistetun ilman käyttö leikkauskaasuna vaikutti leikkausprosessin laatuun ja tehokkuuteen. Kaasun koostumuksella oli suuri rooli leikkaustulosten laadun ja tarkkuuden kannalta.

ABB:n käyttämän sähköteräksen pinnalla oli lakkaa, mikä eristää levyt toisistaan moottorin kokoamisen aikana. Lakan vaikutus oli oleellista, koska epätasainen pinta aiheutti säteen heijastumisen useita kertoja levyn pinnassa. Tämä johti säteen intensiteetin kasvuun, ja säteen tehokkaampaan vaikutukseen levyssä. Nämä tekijät yhdessä tekivät pulssien päällekkäisyyden laskemisesta haastavaa kyseisellä levytyypillä. Pulssien päällekkäisyyteen vaikuttivat useat tekijät, kuten leikkausnopeus, käytetty taajuus ja säteen halkaisija. Nämä tekijät muodostivat monimutkaisen yhdistelmän, mikä vaikeutti riittävän pulssien päällekkäisyyden määrittämistä. Tämän kokonaisuuden ymmärtäminen ja hallinta olivat keskeisiä tekijöitä työssä.

Työssä suoritettiin kattava kokeilusarja linjatesteillä A1-3 ja B1-3, joissa pyrittiin löytämään optimaaliset leikkausparametrit kuitulaserin käytölle. Linjatesti A:ssa optimaaliset tulokset paineistetulla ilmalla saavutettiin 90 000 mm/min leikkausnopeudella, 8,0 baarin kaasunpaineella ja 0,10 mm:n polttopisteen etäisyydellä levyn pinnasta mitattuna. Linjatesti B:ssä optimaaliset tulokset tyypellä saavutettiin puolestaan 50 000 mm/min leikkausnopeudella, 6,5 baarin kaasun paineella ja 0,25 mm polttopisteen etäisyydellä levyn pinnasta mitattuna.

Linjatestien jälkeen siirryttiin seuraavaan vaiheeseen, jossa linjatestien optimaalisimpien parametrien arvoja käytettiin BP280-malliin. Ensimmäisenä tutkittiin paineistetun ilman vaikutuksia parametreihin. Paineistetun ilman avulla saavutettiin selkeä parannus leikkaustuloksissa leikkausnopeuden kannalta. Parhaisiin tuloksiin BP280-demonstraatiossa paineistetulla ilmalla päästiin 90 000 mm/min leikkausnopeudella, 8,0 baarin kaasun paineella ja säteen polttopisteen paikan ollessa 0,10 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna.

Seuraavaksi tutkittiin typen vaikutuksia samassa BP280-demonstraatiossa. Parhaisiin tuloksiin typellä päästiin 50 000 mm/min leikkausnopeudella, 6,5 baarin kaasun paineella ja säteen polttopisteen paikan ollessa 0,25 mm leikattavan levyn pinnasta mitattuna. Typellä leikkauksen laatu kärsi, sillä pursketta muodostui enemmän, absorption vaikutus oli suurempaa ja leikkauksen juovat olivat näkyvämpiä sekä leikkausnopeus oli huomattavasti hitaampi kuin paineistetulla ilmalla leikattaessa.

Linjatestien ja BP280-demonstraatioiden jälkeen siirryttiin vaiheeseen, jossa tarkasteltiin BP280-demonstraatiota tarkemmin. Tässä vaiheessa tarkasteltiin BP280-demonstraation leikattuja reikiä, suoria kohtia ja kaarroksia, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa sekä tyyppiä. BP280-demonstraation reikiä arvioitiin purskeen esiintyvyyden perusteella aiemmin muokattujen leikkausparametrien mukaisesti. Analysoinnissa reiät kuvattiin optisella Aliconan G5 mikrokoordinaattimittalaitteella 3D simulaation perusteella. Purskeen esiintyvyyden korostamisessa käytettiin erikoisväriainetta, mikä tarttui levyn pinnan ylä- ja alapuolella yli menevien purskeen osiin. Erityisaine näytti selkeästi poikkeamat leikkauksen tasaisuudesta ja purskeesta.

Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästiin paineistetulla ilmalla leikkausnopeudella 94 000 mm/min, kaasun paineella 8,5 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,12 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorption vaikutus oli vähäisintä ja juovia ei esiintynyt. Leikkausnopeuden kasvaessa yli

94 000 mm/min havaittiin, että kaarrostojen laatu alkoi heikkenemään. Tämä näkyi huojuvana leikkauksena kulmassa, jolloin leikkaus kulman käännyksen jälkeen ei ollut suora. Tulosten perusteella havaittiin, että parhaaseen lopputulokseen päästiin tyypellä leikkauksella 50 000 mm/min, kaasun paineella 6,5 baaria ja säteen polttopisteen ollessa 0,25 mm. Tällöin leikkausura oli suora, pursketta esiintyi vähiten, absorptiovaikutus oli vähäisintä ja juovia ei näkynyt.

Leikkausten tulosten tarkastelun jälkeen suoritettiin tulosten analysointi. Tulosten analysoinnissa analysoitiin ensimmäiseksi BP280-demonstraatioleikkauksessa syntyneitä pursketta, ja kuinka paineistetun ilman kaasun virtausnopeus ja paine vaikuttivat purskeen esiintymiseen. Analyysissä huomattiin, että paineistetulla ilmalla leikattuna 8,0 baarin kaasun paineella purskeen esiintyvyys oli vähäisintä demonstraation keskeltä mitattuna ja aloituskohdasta katsottuna. Tällöin pursketta oli keskikohdasta mitattuna alhaisimmillaan 5,0 µm ja aloituskohdassa myös 5,0 µm. Puolestaan tyypellä leikattuna parhaaseen leikkaustulokseen päästiin 6,0 baarin kaasun paineella, jolloin pursketta oli vähimmillään aloituskohdasta mitattuna 3,5 µm ja keskikohdassa puolestaan 3,0 µm.

Seuraavaksi analysoitiin BP280-demonstraatioleikkauksen ylä- ja alapinnan leveyseroa taulukon 8 arvoilla. Tässä analyysissä keskityttiin seuraamaan leikatun levyn ylä- ja alapinnan leveyden muuttumista kaasun paineen mukaan. Analyysissä huomattiin, että paineistetulla ilmalla levyn keskikohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,5 baarin kaasun paineella, jolloin ero oli alhaisimmillaan 4,0 %. Tällöin leikkausuran ylä- ja alapinnan erot olivat pienimmillään. Puolestaan levyn aloituskohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,0 baarin kaasunpaineella eron ollessa vain -2,0 %. Miinusmerkki johtuu siitä, että alapuolen leveys on pienempi kuin yläpuolen. Tyypellä leikattuna parhaaseen leikkaustulokseen päästiin levyn keskikohdasta mitattuna 6,5 baarin kaasun paineella, jolloin ero oli alhaisimmillaan vain 5,0 %. Levyn aloituskohdasta mitattuna ero oli alhaisin 6,0 baarilla, jolloin ero oli vain 4,2 %.

Kolmanneksi analysoitiin BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leveyseroa ja tulokset esitetään kuviossa 5. Tässä analyysissä keskityttiin seuraamaan leikatun levyn ylä- ja alapinnan leveyseron muuttumista keskiarvolla. Analyysissä huomattiin, että paineistetulla ilmalla levyn keskikohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,5 baarin kaasun paineella, jolloin ylä- ja alapinnan leveysero oli alhaisimmillaan  $-5,5 \mu\text{m}$ . Puolestaan levyn aloituskohdasta mitattuna parhaaseen tulokseen päästiin 8,0 baarin kaasunpaineella eron ollessa vain  $-3,7 \mu\text{m}$ . Miinusmerkki johtuu siitä, että alapuolen leveys on pienempi kuin yläpuolen. Puolestaan tyellä leikattuna parhaaseen leikkaustulokseen päästiin levyn keskikohdasta mitattuna 7,0 baarin kaasun paineella, jolloin ero oli alhaisimmillaan  $12,2 \mu\text{m}$ . Levyn aloituskohdasta mitattuna ero oli alhaisin 6,0 baarilla, jolloin ero oli  $-1,0 \mu\text{m}$ .

Lopuksi tulosten analysoinnissa esitettiin vertailu paineistetun ilman ja typen tuloksista. Kuviossa 6 havaittiin, että paineistetulla ilmalla taulukon 8 arvoilla leikkauksen purskeen keskiarvo on huomattavasti vähäisempää levyn keskeltä mitattuna kuin tyellä. Taulukon 8 arvoilla paineistetulla ilmalla saavutettiin purskeen keskiarvo  $4,24 \mu\text{m}$  levyn keskeltä mitattuna ja puolestaan reunoista mitattuna  $7,20 \mu\text{m}$ . Purske mitattiin levyjen ylä- ja alapuolelta ja laskettiin keskiarvo. Purskeen muodostuminen oli korkeampaa paineistetulla ilmalla leikkauksen reunoissa ja kaaroksissa. Pienin purskeen muodostuminen oli leikkauksen 8 parametreilla, jossa purske oli  $2,63 \mu\text{m}$ , leikkausnopeudella  $94\,000 \text{ mm/min}$ , 8,5 baarin kaasun paineella ja  $0,12 \text{ mm}$  säteen polttopisteellä. Kokonaisuudessaan paineistetun ilman purskeen esiintyvyys oli pienempää kuin tyellä leikattuna. Typen arvot on leikattu taulukon 9 arvoilla.

Kuviossa 6 esitettiin tulokset BP280-demonstraation leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero keskikohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja tyellä leikattuna. Tuloksista havaittiin, että paineistetulla ilmalla leikkauksessa 9 saavutettiin pienin ero levyn ylä- ja alapinnan leikkausuran leveydessä, leikkausnopeuden ollessa  $86\,000 \text{ mm/min}$ , 8,5 baarin kaasun paineella ja  $0,12 \text{ mm}$  säteen polttopisteen etäisyydellä levystä. Tässä kohtaa ylä- ja alapinnan ero oli vain 3,0 %. Puolestaan tyellä leikattuna parhaaseen tulokseen

päästiin leikkausajossa 11, jossa ero oli lähes kaksinkertainen verrattuna paineistetulla ilmalla leikattuna.

Kuviossa 7 esitettiin tulokset BP280-demonstraation leikkausuran ylä- ja alapinnan leveysero aloituskohdasta mitattuna paineistetulla ilmalla ja tyellä leikattuna. Tuloksista havaittiin, että paineistetulla ilmalla leikkausajossa 1 ja 5 saavutettiin pienin ero levyn ylä- ja alapinnan leikkausuran leveydessä, leikkausnopeuden ollessa 90 000 mm/min, 8,0 baarin kaasun paineella ja 0,10 mm säteen polttopisteen etäisyydellä levystä. Tässä kohdalla ylä- ja alapinnan ero oli -2,0 % eli yläpuolen leveys oli hieman pienempi kuin alapuolen. Puolestaan tyellä leikattuna paras tulos saavutettiin leikkausajossa 3, jossa ero oli 4,2 %.

Tulosten perusteella geometria ja tiukat käännökset vaikuttivat huomattavasti demonstraatioiden tuloksiin. Tulosten ja analysoinnin perusteella keskiarvallisesti parhaaksi leikkausnopeudeksi valikoitui 87 000 mm/min, 8,0 baarin kaasun paineella ja 0,12 mm säteen polttopisteen etäisyys levystä. Näillä parametrien arvoilla ja paineistetulla ilmalla leikattuna päästiin optimaalisimpaan tilanteeseen, jolloin saavutettiin laserin parempi tuottavuus, leikkausjäljen laatu ja vähennettiin leikkauksesta syntyvää absorptiota levyn. Samalla näillä parametreilla leikkausura oli suora, juovia ei esiintynyt sekä purskeen esiintyvyys oli vähäisintä.

Työn tulosten perusteella paineistetulla ilmalla leikattaessa leikkausnopeutta kasvatettiin alkuperäisestä 50 000 mm/min optimaaliseen 87 000 mm/min. Kokonaisuudessaan leikkausnopeus kasvoi 42,50 %. Puolestaan purskeen keskiarvollinen esiintyvyys levyn keskikohdasta mitattuna väheni alkuperäisestä 6,77 µm optimaalisten parametrien ansiosta 4,24 µm. Purskeen määrä väheni paineistetun ilman demonstraatioissa 37,37 % verrattuna tyellä leikatun tuloksiin. Puolestaan purskeen keskiarvollinen esiintyvyys levyn aloituskohdasta mitattuna kasvoi 5,26 µm optimaalisten parametrien takia 7,20 µm. Purskeen määrä kasvoi tässä tapauksessa 26,94 %. Tämä ei kuitenkaan vaikuta lopullisen tuotteen laatuun, sillä yleisesti aloituskohta on leikatun levyn jätepalassa.

Demonstraatioiden perusteella leikkausuran leveyden ylä- ja alapuolen leveyserossa saavutettiin parannusta. Optimaalisilla asetuksilla paineistetulla ilmalla leikattuna keskiarvillisesti laskettuna yläpuolen leveys oli 213,09  $\mu\text{m}$  ja alapuolen 210,14  $\mu\text{m}$ , eli ero oli vain 1,38 %. Puolestaan tyypellä leikattuna yläpuolen leveys oli 231,96  $\mu\text{m}$  ja alapuolen 223,34  $\mu\text{m}$ , eli ero oli 3,72 %.

## 7 Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin kuitulaserin optimointia sähköteräksen leikkauksessa paineistetulla ilmalla. Tämän työn päätarkoituksena oli selvittää, miten kuitulaserin optimointi suoritetaan. Lisäksi tässä työssä selvitettiin sitä, miten kuitulaserin optimointi vaikuttaa sen tuottavuuteen ja tehokkuuteen. Kolmantena tarkoituksena oli selvittää parantaako kuitulaserin optimointi paineistetulla ilmalla sen tekemän työn laatua sähköteräksen leikkauksessa. Tavoitteena oli parantaa kuitulaserin tuottavuutta, leikkausjäljen laatua ja vähentää leikkauksesta syntyvää absorptiota levyyn. Työn perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- DoE-menetelmän ja NC Profiler-koneohjelman käyttö kuitulaserin optimoinnissa auttaa löytämään optimaaliset prosessiparametrit.
- Kuitulaserin optimointi parantaa leikkausjäljen laatua, lisää laserin tuottavuutta ja vähentää leikkauksesta aiheutuvaa absorptiota levyyn.
- Kuitulaserin optimointi tuottaa parannuksia leikkauslaatuun ja tuottavuuteen leikattaessa 0,5 mm sähköterästä, kun leikkauskaasuna käytetään paineistettua ilmaa. Samalla käyttökustannukset laskevat.
- Työn avulla löydettiin optimaaliset prosessiparametrit, joilla saavutettiin kuitulaserin parempi tuottavuus, leikkausjäljen laatu ja vähäisempi absorptio levyyn, kun leikkauskaasuna käytettiin paineistettua ilmaa. Optimaalisimmiksi parametreiksi valikoitui 5000 Hz:in taajuus, 87 000 mm/min leikkausnopeus, 8,0 baarin kaasun paine ja 0,12 mm polttopisteen etäisyys levyn pinnasta.
- Leikkausnopeus pystyttiin kasvattamaan paineistetulla ilmalla leikattaessa alkuperäisestä 50 000 mm/min optimaaliseen 87 000 mm/min. Leikkausnopeus kasvoi kokonaisuudessaan 42,50 %.
- Optimaalisten parametrien käyttö vähensi paineistetulla ilmalla leikattaessa purskeen keskiarvollista esiintyvyyttä levyn keskikohdasta mitattuna, alentuen 6,77 µm:sta 4,24 µm:iin. Tämä johti 37,37 %:n vähenemiseen purskeen määrässä

- Paineistetulla ilmalla leikattuna levyn aloituskohdasta mitattuna purskeen keskiarvollinen esiintyvyys kasvoi optimaalisten parametrien käytön myötä 5,26  $\mu\text{m}$ :sta 7,20  $\mu\text{m}$ :iin, mikä merkitsi 26,94 %:n kasvua purskeen määrässä leikatessa paineistetulla ilmalla.
- Leikkausuran leveyden ylä- ja alapuolen leveysero pieneni optimoinnin myötä. Optimaalisilla asetuksilla paineistetulla ilmalla leikatessa keskiarvollisesti lasketuna yläpuolen leveys oli 213,09  $\mu\text{m}$  ja alapuolen 210,14  $\mu\text{m}$ , mikä tuotti vain 1,38 %:n eron. Typellä leikatessa vastaavat leveydet olivat 231,96  $\mu\text{m}$  ja 223,34  $\mu\text{m}$  ja ero oli 3,72 %.

Tutkimustyötä voitaisiin jatkossa laajentaa kaikkiin geometrioihin, joita ABB:lla on tavoitteena leikata kuitulaserilla. Samalla voitaisiin optimoida kuitulaseri useammalle levypaksuudelle ja tyypille. Lisäksi tekoälyä ja syvää koneoppimista voitaisiin hyödyntää prosessin optimoinnissa. Koneoppimismenetelmien avulla voitaisiin kehittää algoritmeja, jotka pystyvät automaattisesti optimoimaan kuitulaserin leikkausparametreja. Tekoälyn avulla voitaisiin analysoida suuria määriä dataa leikkausprosesseista ja oppia tunnistamaan optimaaliset parametrit eri materiaaleille ja leikkausolosuhteille. Koneoppimisen avulla voitaisiin myös tunnistaa prosessin aikana tapahtuvia muutoksia ja säätää leikkausparametreja automaattisesti vastaamaan optimaalisia olosuhteita.

Tekoälyyn ja koneoppimiseen perustuvat järjestelmät voitaisiin käyttää ennakoivan huollon ja vianmäärityksen toteuttamiseen kuitulaserleikkauskoneissa. Analysoimalla sensordataa laitteelta ja prosessin parametreja koneoppimismenetelmien avulla, voitaisiin havaita mahdolliset tulevat ongelmat ennakkoon ja ehkäistä niihin liittyvät seisokit ja tuotantohäiriöt.

## 8 Yhteenveto

Kuitulaserin rooli laserleikkauksessa on kehittynyt merkittävästi nykypäivänä, tarjoten tehokkaan tavan leikata lähes mitä tahansa materiaalia. Alkuperäisistä pienitehoisista alle 1 kW:n hiilidioksidilasereista on edetty nykypäivän suuritehoisiin 100 kW:n kuitulaserjärjestelmiin, jotka ovat mullistaneet alan niin koneen mekaniikan, parametrien kuin automaation puolesta. Kuitulaserin monipuolisuus on ilmeistä sen kyvystä leikata lähes tulkoon mitä materiaalia tahansa nopeasti ja tarkasti. Lisäksi kuitulaserilla on korkea hyötysuhde ja matalat käyttö- ja kunnossapitokustannukset, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon perinteisiin hiilidioksidilasereihin verrattuna.

Kuitulaserin suosion kasvu teollisuudessa, erityisesti metalliteollisuuden yrityksissä, heijastaa tarvetta tuottavuuden ja laadun parantamiseen. Nykyinen energiakriisi korostaa entisestään tarvetta kehittää ratkaisuja energian säästämiseksi, sillä teollisuus käyttää valtavia määriä energiaa ja materiaaleja. Raaka-ainepulan ja hintojen nousun vuoksi yrityksillä on entistä suurempi paine minimoida hukkaan menevät tuotteet, jotka aiheuttavat lisäkustannuksia. Kuitulaserin optimointi on avain tehokkaaseen ja laadukkaaseen leikkausprosessiin, joka vähentää virheiden määrää ja siten lisäkustannuksia. Tehokkaan optimoinnin avulla saavutetaan entistä parempia leikkaustuloksia, varmistaen resurssien mahdollisimman tehokkaan ja kestäväen käytön.

Tässä diplomityössä kuitulaserin käyttöä sähköteräksen leikkauksessa lähestyttiin optimoinnin näkökulmasta, jossa tavoitteena oli parantaa kuitulaserin tuottavuutta ja leikkaustulosten laatua. Tämä saavutettiin tarkastelemalla laserin erilaisia parametreja, kuten polttopisteen paikkaa, suuttimen sijaintia, kaasun painetta, leikkausnopeutta ja taajuutta. Nämä parametrit ovat keskeisiä haluttujen tavoitteiden, kuten tuottavuuden, leikkauks jäljen laadun ja leikkauksesta aiheutuvaan absorptioon levyssä, saavuttamisessa.

Tämä työ toteutettiin ABB Oy:lle, IEC LV Motors Vaasan yksikölle. Työn tavoitteena oli optimoida kuitulaserin leikattaessa 0,5 mm sähköterästä paineistetulla ilmalla. Käytetty laite oli puolalaisen Eaglen valmistama iNspire 1530 F4. Yhteistyössä ABB:n, Fraunhofer

IPT:n ja Eagle lasersin kanssa onnistuttiin parantamaan laserin tuottavuutta, leikkausjäljen laatua ja vähentämään leikkauksen aiheuttamaa absorptiota levyyn. ABB ja Fraunhofer IPT vastasivat yhdessä simuloinneista ja kuitulaserin optimoinnista, kun taas Eagle antoi tietoa laitteen kinematiikasta. ABB vastasi asetusten tarkastelusta ja tulosten oikeellisuudesta. Optimointi toteutettiin Fraunhoferin kehittämällä NC Profile -ohjelmistolla ja DoE-menetelmällä.

Optimointityön tulokset vahvistivat, että paineistetun ilman käyttö leikkauskaasuna paransi leikkaustulosten laatua ja tuottavuutta, erityisesti sähköteräksen leikkauksessa. Paineistetun ilman avulla sulan materiaalin poisto leikkausurasta tehostui, mikä paransi leikkausreunojen tarkkuutta ja laatua. Lisäksi paineistetun ilman avulla saavutettiin parempi lämpötilan hallinta leikkausprosessissa, mikä puolestaan pienensi lämpövaikutusvyöhykkeen kokoa ja vähensi täten absorption vaikutusta levyssä. Kokeelliset ja laskennalliset menetelmät olivat keskeisessä roolissa parametrien optimoinnissa ja leikkaustulosten analysoinnissa, tarjoten syvällistä ymmärrystä leikkausprosessin monimutkaisuudesta ja optimoinnin vaikutuksesta tuloksiin.

Työn tulokset tarjoavat arvokasta tietoa kuitulaserin optimaalisten leikkausparametrien määrittämiseksi eri tilanteissa. Optimaaliset asetukset voivat vaihdella leikattavan materiaalin, leikkausgeometrian ja muiden tekijöiden mukaan. Paineistetun ilman käyttö osoittautui tehokkaaksi keinoiksi parantaa leikkausprosessin laatua ja tehokkuutta. Työn tulokset osoittavat, että kuitulaserin optimointi paineistetulla ilmalla tuottaa parannuksia tuottavuudessa. Tämä tarkoittaa, että laserleikkausjärjestelmä pystyy leikkaamaan enemmän materiaalia samassa ajassa kuin ennen optimointia. Kuitulaserin tuottavuus lähes kaksinkertaistui alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Tämä parannus tuottavuudessa johtaa merkittäviin kustannussäästöihin ja tehokkuuden lisäämiseen tuotannossa.

Paineistetun ilman käyttö leikkauskaasuna tarjosi useita etuja sähköteräksen leikkauksessa. Uusi leikkauskaasu auttoi poistamaan sulan materiaalin leikkausurasta tehokkaammin. Tämä parantaa leikkausuran reunojen tarkkuutta ja puhtautta. Lisäksi

paineistetun ilman avulla voidaan saavuttaa parempi lämpötilan hallinta leikkausproses-  
sissa. Tämä vähentää absorptiovaikutusta ja minimoi materiaalin altistumisen liialle  
lämmölle, mikä edistää tarkempia ja tasaisempia leikkaustuloksia.

ABB:n kuitulaserin optimointityö osoittaa, että kuitulaserin optimointi ja oikeiden leik-  
kausparametrien löytäminen on haastavaa, erityisesti kun käytetään kuitulaseria, jota ei  
ole suunniteltu sähköteräksen leikkaukseen. Pienikin muutos yhdessä parametrissa vai-  
kuttaa merkittävästi muihin parametreihin. Työn tuloksia hyödynnetään jatkossa ABB:llä  
kuitulaserin käytössä, ja laserleikkauksen optimointia voidaan laajentaa myös muihin toi-  
mipisteisiin. Työn avulla löydettiin optimaaliset prosessiparametrit, jotka paransivat kui-  
tulaserin tuottavuutta, leikkausjäljen laatua ja vähensivät materiaalin absorptiota levyyn.

## Lähteet

- ABB & Fraunhofer IPT. (2022a). Commissioning of Laser Cutting Machine. [rajattu pääsy]. Noudettu 10.1.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2022b). WP1: Process analysis. [rajattu pääsy]. Noudettu 15.1.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2022c). WP1: Process analysis – Failure List. [rajattu pääsy]. Noudettu 7.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2022d). WP2: Machine model for simulation NCPProfiler. [rajattu pääsy]. Noudettu 7.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2022e). WP3: Design of Experiments (DoE). [rajattu pääsy]. Noudettu 14.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2022f). WP3: Design of Experiments (DoE) Initial DoE – Gas Type. [rajattu pääsy]. Noudettu 25.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023a). DoE Approach: Measurement of BP280 – Compressed Air. [rajattu pääsy]. Noudettu 7.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023b). DoE Report Procedure. [rajattu pääsy]. Noudettu 14.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023c). WP3: Design of Experiments (DoE) – Meeting with Eagle Lasers. [rajattu pääsy]. Noudettu 14.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023d). DoE Approach: Linetests compressed air and measurements. [rajattu pääsy]. Noudettu 25.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023e). DoE Approach: Linetests nitrogen and measurements. [rajattu pääsy]. Noudettu 25.2.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023f). DoE Approach: Measurement of BP280 compressed air. [rajattu pääsy]. Noudettu 10.3.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023g). DoE Approach: Measurement of BP280 nitrogen. [rajattu pääsy]. Noudettu 10.3.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023h). DoE Approach: Review of linetests and BP280 demonstration. [rajattu pääsy]. Noudettu 10.3.2024.

- ABB & Fraunhofer IPT. (2023i). DoE Approach: Analyzing cutting quality. [rajattu pääsy].  
Noudettu 26.3.2024.
- ABB & Fraunhofer IPT. (2023j). DoE Approach: BP280-demonstrator features. [rajattu pääsy]. Noudettu 26.3.2024.
- ABB (2023f). BP280-demonstrator cutting strategy. [rajattu pääsy]. Noudettu 26.3.2024.
- ABB. (2023a). BP280-demonstrator. [rajattu pääsy]. Noudettu 1.4.2024.
- ABB. (2023b). Eagle iNspire 1530 F4 fiberlaser pulse overlap calculations. [rajattu pääsy].  
Noudettu 26.3.2024.
- ABB. (2023c). DoE: Linetests parameters. [rajattu pääsy]. Noudettu 31.3.2024.
- ABB. (2023d). DoE: BP280-demonstrator cutting parameters and analysis of the results  
compressed air. [rajattu pääsy]. Noudettu 31.3.2024.
- ABB. (2023e). DoE: BP280-demonstrator parameters nitrogen. [rajattu pääsy]. Noudettu  
1.4.2024.
- ABB. (2024). *ABB Oy, IEC LC Motors*. Noudettu 3.1.2024 osoitteesta  
<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/iec-lv-motors>
- Ahi, K., & Anwar, M. (2016). *Developing terahertz imaging equation and enhancement  
of the resolution of terahertz images using deconvolution*.  
<https://doi.org/10.1117/12.2228680>
- Bellucci, S., Fitio, V., Smirnova, T., Yaremchuk, I., Vernyhor, O., & Bobitski, Y. (2022). Spectral and Angular Characteristics of the High-Contrast Dielectric Grating under the Resonant Interaction of a Plane Wave and a Gaussian Beam. *Materials*, 15(10), 3529. <https://doi.org/10.3390/ma15103529>
- Brown, M. & Arnold, C. (2010). *Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification*, 91-120. Noudettu 3.1.2024 osoitteesta  
<https://spikelab.mycpanel.princeton.edu/papers/book02.pdf>
- Chen, J., Lu, L., Li, L., & Zhao, H. (2006). *Nozzle design and assistant-gas flow analysis in the co2 laser cutting*. [https://doi.org/10.1007/0-387-34403-9\\_71](https://doi.org/10.1007/0-387-34403-9_71)
- Chen, S. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO2 laser cutting. *Journal of materials processing technology*, 88(1-3), 57-66.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00402-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00402-6)

- Eagle-Group. (2023a). *Company*. Noudettu 2.10.2023 osoitteesta <https://eagle-group.eu/en/company>
- Eagle-Group. (2023b). *How does a fiber laser work?* Noudettu 29.1.2024 osoitteesta <https://eagle-group.eu/en/how-does-a-fiber-laser-work>
- Edmundoptics. (2024). *Laser Resonator Modes*. Noudettu 2.1.2024 osoitteesta <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/laser-resonator-modes/>
- Fraunhofer IPT. (2023). *The Fraunhofer IPT - a profile*. Noudettu 2.10.2023 osoitteesta <https://www.ipt.fraunhofer.de/en/Profile.html>
- Ganguly, N., Dwivedi, R., D'Amico, C., & Stoian, R. (2023). Asymmetric Shaping for Ultrafast Elliptical Bessel-like Beams. *Photonics*, 10(6), 651. <https://doi.org/10.3390/photonics10060651>
- Garbellotto, C. (2021). *A versatile light-sheet microscope, platform for advanced 3D fluorescence imaging and research*. [väitöskirja, Glasgowin yliopisto]. Noudettu 1.4.2024 osoitteesta <https://theses.gla.ac.uk/82429/1/2021GarbellottoPhD.pdf>
- Hannig, S., Mielke, J., Fenske, J. A., Misera, M., Beev, N., Ospelkaus, C., & Schmidt, P. O. (2017). A highly stable monolithic enhancement cavity for SHG generation in the UV. *arXiv.org*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1709.07188>
- He, Y., Xie, H., Ge, Y., Lin, Y., Yao, Z., Wang, B., . . . Sun, Y. (2022). Laser Cutting Technologies and Corresponding Pollution Control Strategy. *Processes*, 10(4), 732. <https://doi.org/10.3390/pr10040732>
- Himeno, K. (2015). *Basic and Features of High-Power Fiber Lasers*. Noudettu 1.4.2024 osoitteesta [https://www.fujikura.co.jp/eng/rd/gihou/backnumber/pages/\\_icsFiles/afield-file/2015/04/13/44e\\_01.pdf](https://www.fujikura.co.jp/eng/rd/gihou/backnumber/pages/_icsFiles/afield-file/2015/04/13/44e_01.pdf)
- Ion. (2005). *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*, Elsevier Butterworth-Heinemann. Burlington 2005. ISBN 0 7506 6079 1.

- Jia, L., Qian, X., & Ai, L. (2023). Fourier Ptychography-Based Measurement of Beam Divergence Angle for Vertical Cavity Surface-Emitting Laser. *Photonics*, 10(7), 777. <https://doi.org/10.3390/photonics10070777>
- Kaplan, A.F.H. (1996). *An analytical model of metal cutting with a laser beam*. *J. Appl. Phys*, 79, 2198–2208.
- Kitsios, F., & Kamariotou, M. (2021). Artificial Intelligence and Business Strategy towards Digital Transformation: A Research Agenda. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 13(4), 2025. <https://doi.org/10.3390/su13042025>
- Konekuriiri. (2020). 20 kW pudottaa 80 % kuitulaserleikkeiden kustannuksista. Noudettu 3.1.2024 osoitteesta <https://konekuriiri.fi/2020/10/26/20-kw-pudottaa-80-kuitulaserleikkeiden-kustannuksista/>
- Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. (2005). *Lasertyöstö*. Tampere, Tammer-Paino Oy. ISBN 951-817-876-3
- Macdonald, J. (1986). Elements of Modern Optical Design. *Optica acta*, 33(11), 1339. <https://doi.org/10.1080/713821885>
- Mas, C., Fabbro, R., & Gouédard, Y. (2003). Steady-state laser cutting modeling. *Journal of laser applications*, 15(3), 145–152. <https://doi.org/10.2351/1.1567749>
- Mushtaq, R. T., Wang, Y., Rehman, M., Khan, A. M., & Mia, M. (2020). State-Of-The-Art and Trends in CO2 Laser Cutting of Polymeric Materials-A Review. *Materials*, 13(17), 3839. <https://doi.org/10.3390/ma13173839>
- Nikolov, A. S., Balchev, I. I., Nedyalkov, N. N., Kostadinov, I. K., Karashanova, D. B., & Atanasova, G. B. (2017). Influence of the laser pulse repetition rate and scanning speed on the morphology of Ag nanostructures fabricated by pulsed laser ablation of solid target in water. *Applied physics. A, Materials science & processing*, 123(11), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1328-0>
- Olsen, F. (2006). An evaluation of the cutting potential of different types of high power lasers, 188–196. <https://doi.org/10.2351/1.5060824>
- Olsen, F. O., & Alting, L. (1989). Cutting Front Formation in Laser Cutting. *CIRP annals*, 38(1), 215–218. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62688-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62688-2)

- Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., del Val, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*, *12*(1), 157. <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
- Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., Val, J. D., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*, *12*(1), 157. <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
- Self, S. A. (1983). FOCUSING OF SPHERICAL GAUSSIAN BEAMS. *Applied Optics*, *22*(5), 658-661. <https://doi.org/10.1364/AO.22.000658>
- Siegman, A. E. (1993). *Defining, measuring, and optimizing laser beam quality*. <https://doi.org/10.1117/12.150601>
- Tătaru, O. S., Vartolomei, M. D., Rassweiler, J. J., Virgil, O., Lucarelli, G., Porpiglia, F., . . . Ferro, M. (2021). Artificial intelligence and machine learning in prostate cancer patient management—current trends and future perspectives. *Diagnostics (Basel)*, *11*(2), 354. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11020354>
- Taye, M. M. (2023). Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow, Applications and Future Directions. *Computers (Basel)*, *12*(5), 91. <https://doi.org/10.3390/computers12050091>
- Tirumala Rao, B., & Nath, A. K. (2002). Melt flow characteristics in gas-assisted laser cutting. *Sadhana (Bangalore)*, *27*(5), 569–575. <https://doi.org/10.1007/bf02703295>
- Turkkan, Y. A., Aslan, M., Tarkan, A., Aslan, Ö., Yuce, C., & Yavuz, N. (2023). Multi-Objective Optimization of Fiber Laser Cutting of Stainless-Steel Plates Using Taguchi-Based Grey Relational Analysis. *Metals (Basel)*, *13*(1), 132. <https://doi.org/10.3390/met13010132>
- Ultracut. (2023). Fiber laser cutting. Noudettu 15.11.2023 osoitteesta <https://www.ultracut.fi/en/fiber-laser-cutting/>
- Vaveliuk, P., Ruiz, B., & Lencina, A. (2007). Limits of the paraxial approximation in laser beams. *Optics letters*, *32*(8), 927-929. <https://doi.org/10.1364/OL.32.000927>
- Vicanek, M., & Simon, G. (1987). MOMENTUM AND HEAT TRANSFER OF AN INERT GAS JET TO THE MELT IN LASER CUTTING. *Journal of physics. D, Applied physics*, *20*(9), 1191-1196. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/20/9/016>

Wang, J., Bae, N., Lee, S. B., & Lee, K. (2019). Effects of ion clustering and excited state absorption on the performance of Ho-doped fiber lasers. *Optics express*, 27(10), 14283-14297. <https://doi.org/10.1364/OE.27.014283>

Wewinlaser. (2021). How to determine the focus position of laser cutting machine? Nou-dettu 3.1.2024 osoitteesta

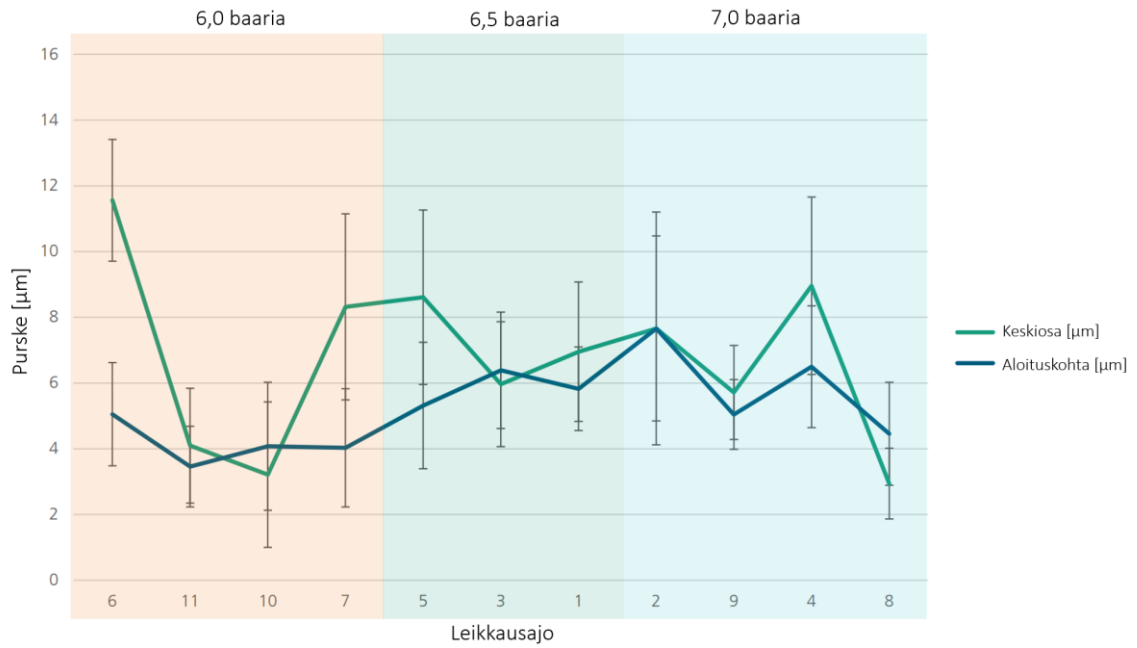
<https://wewinlaser.com/how-to-determine-the-focus-position-of-laser-cutting-machine/>

William Steen. (2003). *Laser Material Processing*. Springer-Verlag, Lontoo 2003. ISBN-1-85233-698-6.

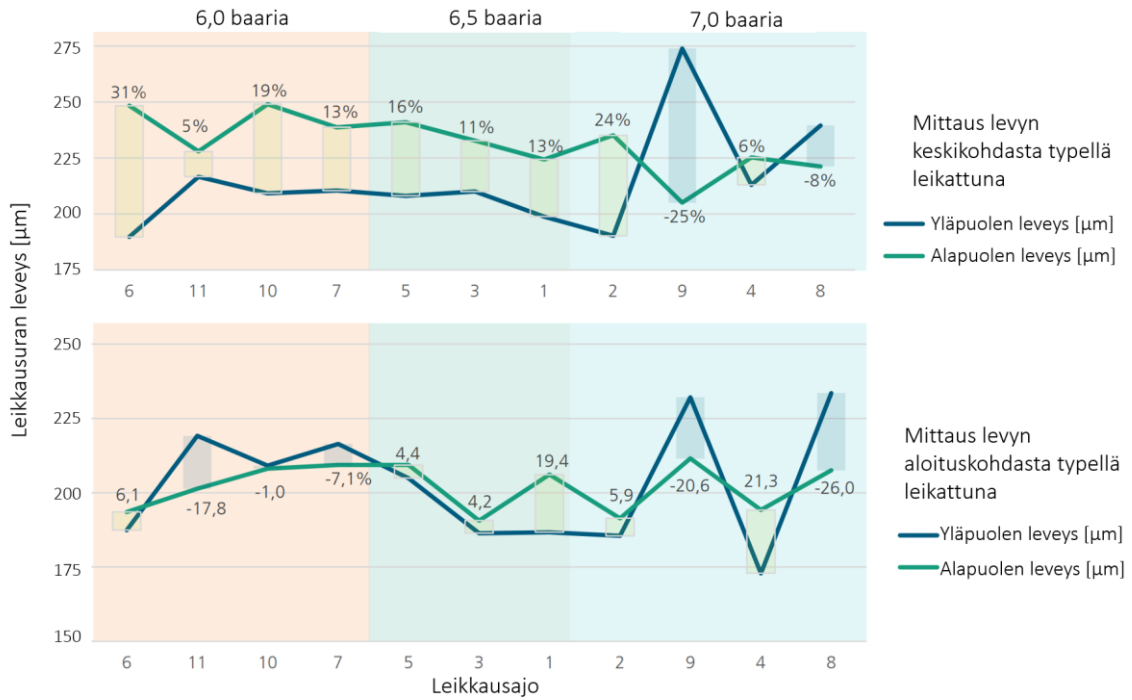
William Steen. (2010). *Laser Material Processing*. Fourth Edition. Springer-Verlag London Limited 2010. e-ISBN 978-1-84996-062-5.

## Liitteet

### Liite 1. BP80-demonstraation purskeen esiintyvyyttä tyypellä leikattuna tau- lukon 9 arvoilla (ABB, 2023d)



**Liite 2. BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leikkausuran leveysero tyypellä leikattuna taulukon 9 arvoilla (ABB, 2023d)**



**Liite 3. BP280-demonstraation leikkauksen ylä- ja alapinnan leveyseron keskiarvo tyypellä leikattuna taulukon 9 arvoilla (ABB, 2023d)**

