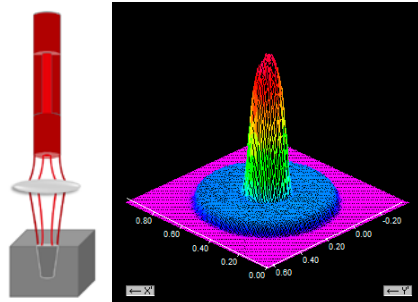


Laserhitsaus sähköajoneuvojen valmistuksessa

Jari Hovikorpi, Oliver Bocksrocke, Tim Hess, Tracey Ryba

Autoteollisuuden tuotannon siirtyessä vähäpäästöisiin sähköajoneuvoihin, avaa tämä mahdollisuuden soveltaa laajasti laserhitsausta niiden valmistusmenetelmänä. Sähköajoneuvoissa käytetään paljon perinteisille hitsausmenetelmille haastavia materiaaleja, kuten kuparia ja alumiinia. Näiden materiaalien teollinen laserhitsaus on kuitenkin mahdollista käyttäen uusimpia innovaatioita laserhitsaus teknologian saralla. Tässä artikkelissa esittelemme laserhitsauksen soveltamista sähköajoneuvojen valmistuksessa teknologiatrendien ja käytännön esimerkkien avulla.

Sähköajoneuvojen ja niiden tuotannon mahdollistavien teknologioiden, kuten laserlaitteiden, kehitys kiihtyy myös nopeasti. Tämä näkyy myös siinä, että polttomootoreihin liittyvän ajoneuvoteollisuuden patenttihakemusten määrä on laskenut viime vuosina jyrkästi, kun taas sähköajoneuvoteollisuuden patenttihakemusten määrän kasvu on kiihtynyt viime vuosina [1]. Sähköautojen moottorien kehitystä ohjaa pääasiassa staattorin laserhitsauksen perustuva hairpin-teknologia, joka on korvaamassa perinteisen staattorin käämityksen. Akkuteollisuutta ohjaavat erilaiset kennoformaatit, jotka kaikki vaativat niiden tuotantoa varten kehitettyjä laserhitsausteknologioita. Yksi esimerkeistä laserkehityksestä, joka sopii täydellisesti sähköajoneuvojen tehoelektronikan liittösten laserhitsaukseen, on vihreän aallonpituuden laser [2].



Kuva 1. Brightline Weld laserhitsausmenetelmän kaksiosaisen kuidun ytimen ja kehän muodostaman polttopisteen lasertehojakauma.

siosaista kuitu, jossa ydinkuidusta fokuusoitu pieni polttopiste on päällekkäin rengaskuidun isomman polttopisteen kanssa. Menetelmässä voidaan portaattomasti säätää lasertehoa ytimen ja kehän välillä, tämä stabiloi keyholen ja hillitsee laserhitsauksen roiskeita. Menetelmällä voidaan säätää myös halutun

Taulukko 1. Prismaattisen akkukennon liittimien laserhitsausparametrit.

Parametri	Arvo
Laser (aallonpituus)	TruDisk 6000 (1030 nm)
Optiikka	PF033-2
Kuidun halkaisija ydin / kehä	50 µm / 200 µm
Optinen suurennos	1.7: 1 – 3:1
Laserteho P	6 kW
Tehojakauma ydin/kehä	Cu: 80% ydin 20% kehä Al: 40% ydin 60% kehä
Polttopisteen asema	Kappaleen pinassa
Hitsausnopeus	Cu: > 14 m/min Al: > 20 m/min
Vaaputusgeometria	Ympyrä
Ainevahvuus	0.5 – 1.5 mm

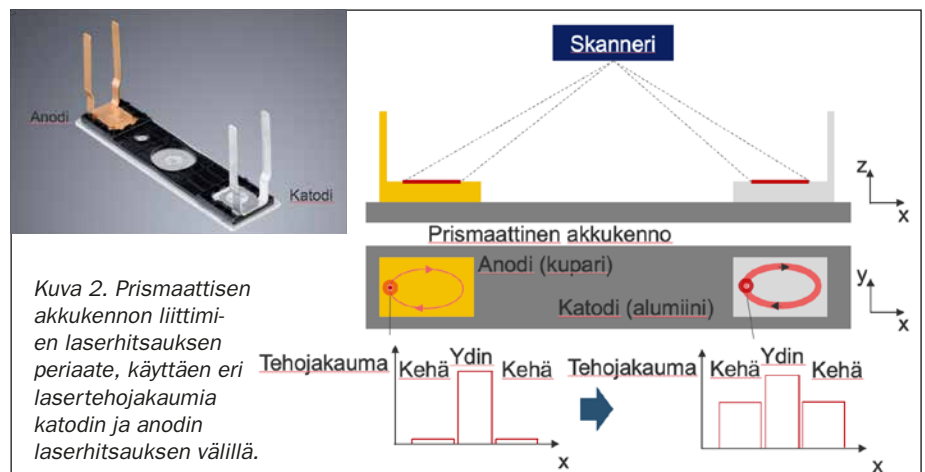
hitsin muotoa. Tehonjako ytimen ja kehän välillä optimoidaan sen mukaan hitsataanko anodia (Cu) vai katodia (Al). Kupari-anodin hitsauksessa ytimessä käytetään huomattavasti enemmän lasertehoa, kun taas alumiinikattodien hitsauksessa tehojakaumaa siirretään enemmän kehän puolelle. Kehän tehojakoa lisäämällä myös hitsin leveys ja siten lujuus ja sähköjohtavuus myös lisääntyvät. Tehon-

Akkukennon laserhitsaus

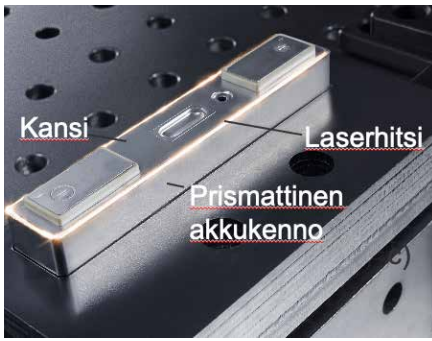
Lieriö- ja pussikennon lisäksi autoteollisuudessa käytetään usein myös prismaattisia akkukenoja. Prismaattisille akkukennoille on nyt olemassa yli 30 eri laserhitsaussovelusta, ja lisää on tulossa. Ohessa käymme läpi näistä kolme.

Akkukennoliittimien laserhitsaus

Vähäisen laserhitsauksen roiskeiden ja tarkan tunkeuman hallinnan takia käytetään prismaattisten akkukennon liittimien laserhitsauksessa Brightline Weld laserhitsausmenetelmää (kuva 1.). Siinä käytetään kak-



Kuva 2. Prismaattisen akkukennon liittimien laserhitsauksen periaate, käyttäen eri lasertehojakaumia katodin ja anodin laserhitsauksen välillä.



Kuva 3: Prismaattisen akkukennon kannen laserhitaus.

jakoa muutos on nopeaa, kun vaihdetaan katodin laserhitauksesta (alumiini) anodin laserhitaukseen (kupari) tai päinvastoin.

Prismaattisen akkukennon liittimien laserhitauksen periaate on hahmoteltu kuvassa 2. Menetelmässä tyypillisesti käytetyt laserhitausparametrit on esitetty taulukossa 1.

Akkukennokotelon laserhitaus

Toinen haastava laserhitaussovellus akkukennojen valmistuksessa on esitetty kuvassa 3: kannen hitaus prismaattisen alumiinisen kennokotelon sulkemiseksi.

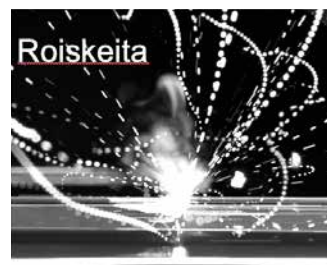
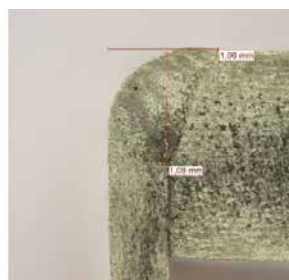
Prismaattinen akkukennokotelo täytetään ensin nestemäisellä elektrolyytillä, minkä jälkeen siihen asetetaan kansi ja sitten se suljetaan laserhitaamalla. Laserhitsin tunkeuman, jatkuvuuden ja tiiveyden laatuvaatimukset ovat erityisen korkeat. Laserhitauksen avimenreikäprosessin optimointia varten on testattu erilaisia BrightLine Weld kuituja.

Kuvassa 4 on esitetty kuvat laserhitausprosesseista, joissa käytetään 50/200 µm kuitua ja kuvassa 5 100/260 µm kuitua. Optiikan suurennot on valittu niin, että polttopisteen koko työkappaleella oli molemmissa kokeissa lähes sama. Kuvista näkyy, että hitausroiskeita on paljon enemmän, jos käytetään 100/260µm kuitua. Tämä havainto johtuu siitä, että ytimen ja renkaan halkaisijan suhde on epäsuotuisa. Rengas on liian pieni ytimeen nähden, jotta avimenreikä saataisiin riittävää vakautta. Suuri



TruDisk – BrightLine Weld
LLK 50/200µm, m = 1,5:1, d0 = 75/300µm, P = 1500 W, v = 10 m/min

Kuva 4. Prismaattisen akkukennon kannen laserhitaus stabiililla BrightLine Weld prosessikonfiguraatiolla (ei roiskeita).



TruDisk – BrightLine Weld
LLK 100/260µm, m = 1:1, d0 = 100/260µm, P = 1700 W, v = 7 m/min

Kuva 5. Prismaattisen akkukennon kannen laserhitaus epästabiililla BrightLine Weld prosessikonfiguraatiolla (roiskeita).

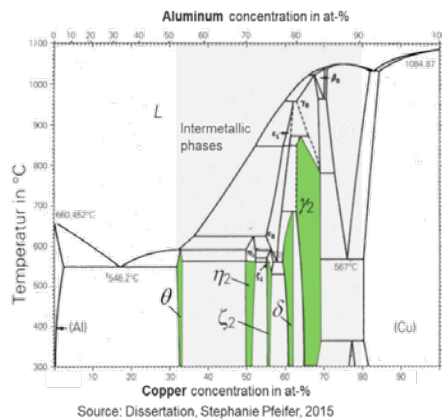
roiskemäärä 100/260 µm kuidulla viittaa siihen, että avimenreikä on erittäin epävakaa, mikä näkyy myös hitausvyödytyksen suuressa vaihtelussa.

Sitä vastoin 50/200 µm kuidulla saavutetaan vakaa laserhitausprosessi, jossa roiskeet ovat erittäin alhaiset. Lisäksi havaitaan, että 50/200 µm kuidulla tarvitaan 200 W vähemmän lasertehoa ja saavutettu hitausnopeus on 40 % nopeampi (tunkeumasyyvyys ja polttopisteen koko olivat lähes samat). Näin ollen tulokset osoittavat, että oikea BrightLine Weld kuidun ytimen ja renkaan suhde ei vaikuta ainoastaan laserhitauksen laatuun, vaan myös sen tehokkuuteen ja tuottavuuteen.

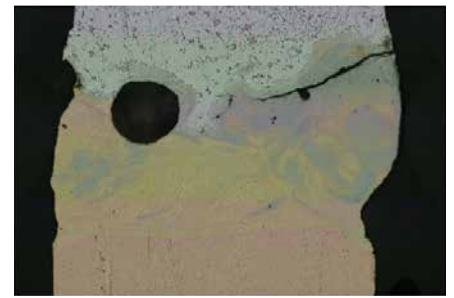
Virtakiskon Al-Cu eripariiliitohitaus

Akkukennojen virtakiskoissa käytetään yleensä, joko puhdasta kuparia ja tai alumiinia. Alumiinin ja kuparin eripariiliitoksen laserhitaamisessa on huomioitava, että seokseen muodostuu helposti metallien välisiä hauraita yhdisteitä.

Kuvassa 6 on esitetty kuparin ja alumiinin faasidiagrammi [3]. Siitä voidaan nähdä, että alumiinin ja kuparin välille voi muodostua metallien välisiä yhdisteitä (kuvassa vihreällä), jos kuparia on seoksessa 30–80 %.



Kuva 6. Alumiinin ja kuparin faasidiagrammi, metallien väliset hauraat yhdisteet kuvassa vihreällä [3].

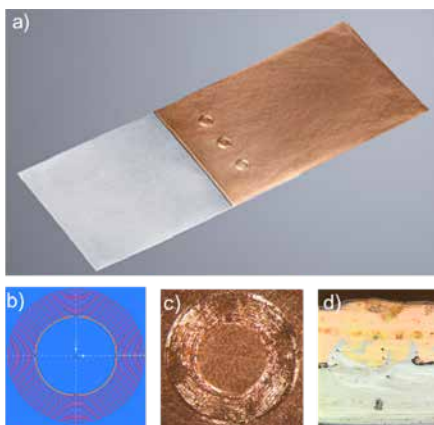


Kuva 7. Poikkileikkaus alumiinin ja kuparin välisestä laserhitausta eripariiliitoksesta, missä näkyy myös halkeama, joka on muodostunut metallien väliseen hauraaseen yhdisteeseen.

Metallien väliset yhdisteet ovat erittäin hauraita, ja niille on ominaista myös korkea sähkövastus. Kuvassa 7. on esitetty poikkileikkaus kuparin ja alumiinin laserhitausta eripariiliitoksesta. Kuvassa näkyy myös halkeama, joka on muodostunut hauraaseen metallienväliseen yhdisteeseen. Metallien välisten yhdisteiden välttämiseksi kuparin ja alumiinin seostumisen laserhitauksessa tulee olla vähäistä, jotta saadaan seos, joka on lähellä faasidiagrammin reunaa.

Taulukko 2. Virtakiskon laserhitauksen Al-Cu eripariiliitoksen parametrit.

Parametri	Arvo
Laser (aallonpituus)	TruFiber 2000 (1075 nm) SingleMode
Optiikka	PFO 20; PFO33
Kuidun halkaisija	26 µm
Moodin halkaisija	21 µm
Optinen suurennot	1.5: 1 – 3:1
Laserteho P	500 - 2000 W
Polttopisteen asema	Kappaleen pinassa
Vaaputus	ei käytetä
Ainevahvuus	0.1 – 0.5 mm



Kuva 8. Akkukennon virtakiskoon Al-Cu eripariliitokseen täyttöstrategialla toteutettu laserhitsi. a) virtakiskon koekappale, b) laserhitsausradat, c) laserhitsi ja d) pieni energian tuonti johtaa sulan nopeaan jäähtymiseen ja siten eripariliitoksen metallien vähäiseen sekoittumiseen.

Kuvassa 8 on akkukennon virtakiskoon Al-Cu eripariliitokseen täyttöstrategialla toteutettu laserhitsi. Parametrit ovat annettu taulukossa 2. Menetelmässä hitsauspiste koostuu useista sisäkkäisistä ympyrän kehistä, joista jokainen kehä hitsataan pienellä (TruFiber single-mode-kuitulaser) polttopisteellä ja suurella hitsausnopeudella. Pieni energian tuonti johtaa sulan nopeaan jäähtymiseen ja siten eripariliitoksen metallien vähäiseen sekoittumiseen kuva 8d). Näin syntyy vain pieni määrä hauraita, metallien välisiä yhdisteitä. Hitsi on sitkeät ja sillä on alhainen sähkövastus. Lisäksi liitoksen poikkipinta-alaa voidaan tarvittaessa kasvattaa rajoittamattomasti lisäämällä ympyrän kehien määrää kuvan 8b) mukaisesti. Samanlaisen laserhitsauksen lopputulokseen ei ole mahdollista päästä käyttämällä vaaputettua lasersädettä.

Sähkömoottorin staattorin laserhitsaus

Kuparista valmistetut hairinnit mahdollistavat staattorin johtimien tiivimmän sijoittelun verrattuna perinteiseen käännytykseen. Jokaisen hairinni-parin etupää on laserhitsattu kiinni toisiinsa.

Kuparin laserhitsauksessa perinteisesti yhdellä polttopisteellä (kuva 9-a) muodostuu siinä paljon roiskeita prosessiväyhykkeen avaimenreiän epävakauden vuoksi. Tämä lisää staattorin osien ja laitteen likaantumisen riskiä. Lisäksi epävakaa avaimenreikä johtaa myös hitsin huokoisuuteen, jotka heikentävät hitsin lujuutta sekä sähköjohtavuutta [4].

Käyttämällä hairinniparin laserhitsauksessa BrightLine Weld laserhitsausteknologiaa (ytimen ja sitä ympäröivän kehän muodostama lasersäteen polttopiste), avaimenreikä

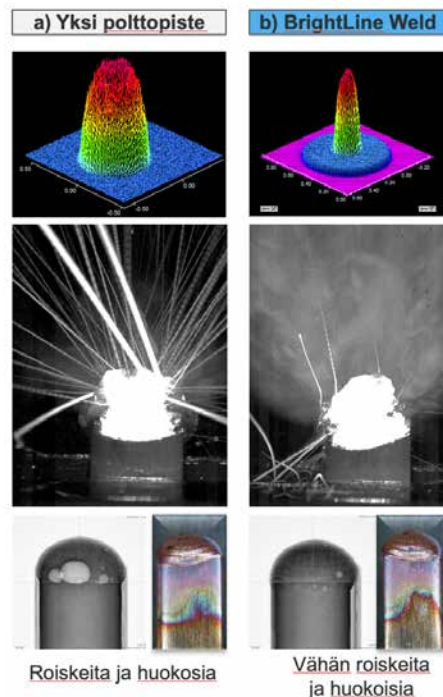
Taulukko 3. Staattorin hairinniparin laserhitsausparametrit.

Parametri	Arvo
Laser (aallonpituus)	TruDisk 6-8000 (1030 nm)
Optiikka	PF033
Kuidun halkaisija	50/200 µm
Optinen suurenno	1.7: 1 – 3:1
Laser teho P	6 - 8 kW
Polttopisteen asema	Kappaleen pinnassa
Vaaputus geometria	Ympyrä
Cu-hairinnin poikkileikkausala	4 mm x 4 mm

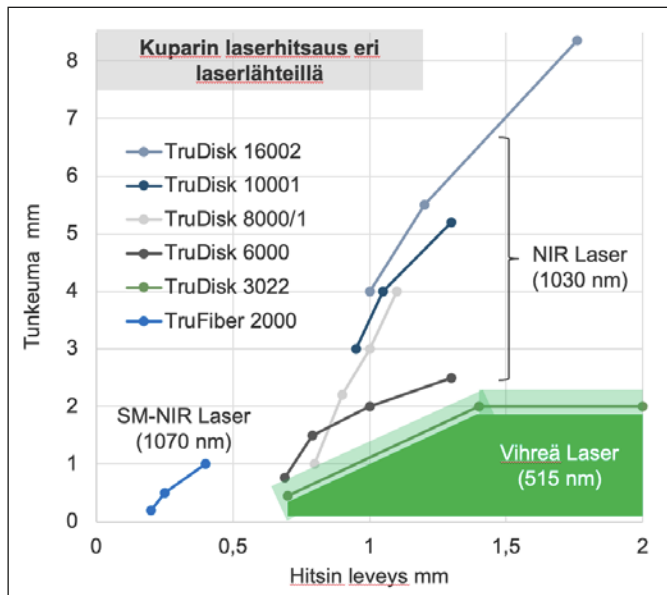
stabiloituu, jolloin prosessista johtuvien roiskeet sekä hitsiin syntyvät huokokset voidaan lähes eliminoida (kuva 9-b).

Kupariitosten laserhitsaus vihreän aallonpituuden laserilla

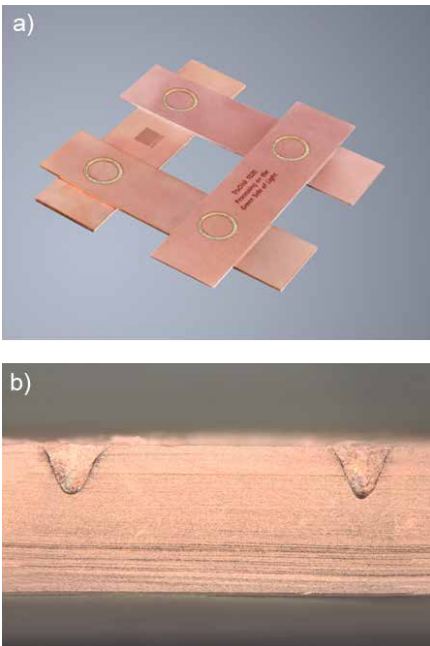
Kuparin laserhitsauksen mekanismeja NIR-lasereilla (~1000nm aallonpituus) on tutkittu paljon yksityiskohtaisesti [5, 6]. Viimevuosina kuparin laserhitsauksen tutkimusta on tehty myös vihreällä laserilla (~500nm aallonpituus) [7]. Vihreä laser tarjoaa mahdollisuuden kehittää uusia prosessimenetelmiä erityisesti kuparissa, koska vihreä laser absorboituu kupariin noin kymmenen kertaa paremmin kuin lähi-infrapuna-laser (NIR).



Kuva 9. Sähkömoottorin staattorin kuparisen hairinnin laserhitsaus a) perinteisellä yhdellä polttopisteellä, jolloin syntyy paljon roiskeita sekä hitsiin jää isoja huokoisia b) BrightLine Weld laserhitsausteknologiaalla, jolloin syntyvien roiskeiden ja huokosten määrä voidaan minimoida. [4].



Kuva 10. Kuparin laserhitsauksen tunkeuma / hitsin levydet riippuvuus eri lasereilla hitsatessa kunkin laserlähteen optimi parametreilla.



Kuva 11. a) kupariliittimen laserhitsaus vihreän aallonpituuden laserilla. b) hitsauksen poikkileikkaushie.

ero pienenee avaimenreiän syvyyden kasvaessa, koska avaimenreiässä olevien heijastusten määrä kasvaa tasaisesti (useita heijastuksia).

Tyypillinen vihreän aallonpituuden laserin hitsaussovellus on ohuen kupariliittimen laserhitsaus kuvan 11-a mukaisesti ja tyypillinen hitsin poikkileikkaushie on kuvassa 11-b.

Yhteenveto

Tämä artikkeli antaa yleiskatsauksen laserhitsaussovelluksista, jotka ovat kiihdyttäneet sähköisen ajoneuvoteollisuuden nopeaa kasvua. Ja ovat myös osaltaan parantaneet sen käyttämiä teknologioita, kuten laserhitsauksen käyttö sähkömoottorien tuotannossa (hairpin). Toisaalta sähköisen liikkuvuuden tiukat vaatimukset, kuten kuparin hitsaus, ovat johtaneet innovaatioihin laserteknologiassa, minkä johtanut esimerkiksi vihreän aallonpituuden laserien kehitykseen.

Referenssit

- [1] Deutsches Patent- und Markenamt DP-MA. Jahresbericht 2019. Published May 2020. <https://www.dpma.de/docs/dpma/veroeffentlichungen/jahresberichte/jahresbericht2019.pdf> . Web 30 August 2021
- [2] Alter, L., Heider, A., Bergmann, J.-P., 2018. Investigations on copper welding using a frequency-doubled disk laser and high welding speeds. *Procedia CIRP* 74, pages 12–16
- [3] Pfeifer, S., Einfluss intermetallischer Phasen der Systeme Al-Cu und Al-Ag auf den Widerstand stromtragender Verbindungen im Temperaturbereich von 90 °C bis 200 °C. Dissertation, 2015. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-211232>
- [4] Bocksrocker, O., Speker, N., Beranek, M., & Hesse, T. (2019). „Reduction of spatters and pores in laser welding of copper hairpins using two superimposed laser beams,”. In *Laser in Manufacturing Conference*, Munich.
- [5] Heider, A., Sollinger, J., Abt, F., Boley, M., Weber, R., Graf, T., 2013. High-speed X-Ray analysis of spatter formation in laser welding of copper, *Phys. Procedia* 41, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.058>
- [6] Heider, A., Stritt, P., Weber, R., Graf, T., 2014. High-power laser sources enable high-quality laser welding of copper. In: *Proceedings of ICALEO*, Paper 401
- [7] Kaiser, E., Pricking, S., Stolzenburg, C., & Killi, A. (2015). Sputter-free and reproducible laser welding of electric or electronic copper contacts with green laser. In *Lasers in Manufacturing Conference*, Munich.

Jari Hovikorpi¹, Oliver Bocksrocker², Tim Hesse², Tracey Ryba³

¹ Apricon Oy, Riihimäki, Käännös artikkelista LASER-BASED MANUFACTURING IN E-MOBILITY – INNOVATION DRIVER FOR LASER TECHNOLOGY, ICALEO 2021

² Alkuperäisen artikkelin kirjoittajat: TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Ditzingen, Germany

³ Alkuperäisen artikkelin kirjoittaja: TRUMPF Laser Technology Center, Plymouth Township, USA

ALANSA AINOAA AMMATTILEHTI

**Teemat ja aikataulut
2022:**

NRO	TEEMA
2/2022	Hitsaustalous ja tuottavuus
3/2022	Laatu ja NDT
4/2022	Alihankinta
5/2022	Eri materiaalit ja niiden hitsaus
6/2022	Älykäs hitsaus ja digitalisaatio

Ilmoitusvaraukset	ilmestyy
18.3.2022	22.4.2022
20.5.2022	16.6.2022
19.8.2022	16.9.2022
14.10.2022	11.11.2022
18.11.2022	16.12.2022

Muutokset mahdollisia.

Ilmoitusmyynti:

Hanna Torenius / T:mi Petteri Pankkonen
 puh. **040 152 4241**
hanna.torenius@pp-marketing.fi