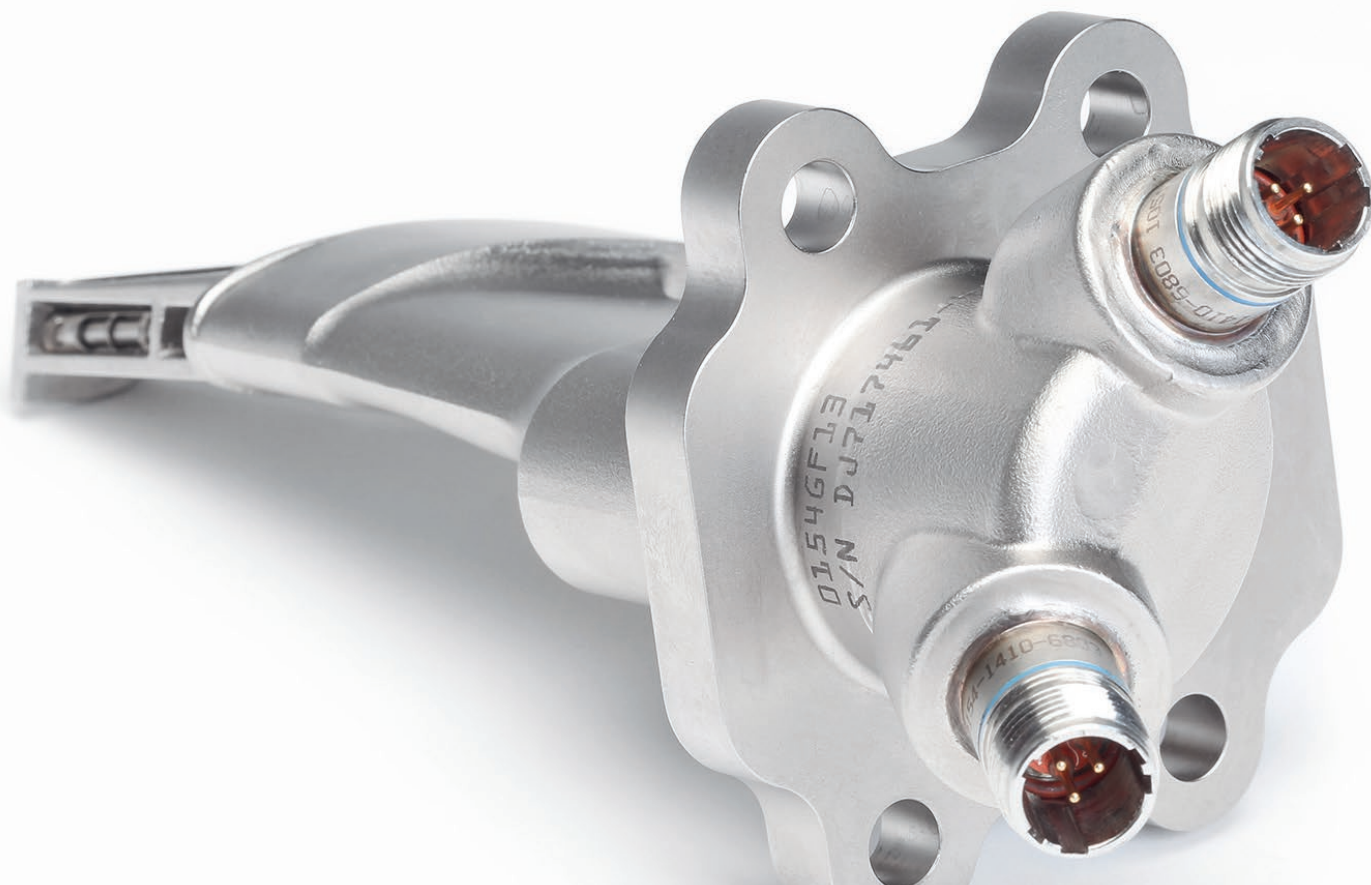


Lasernytt



1-2019



ETT SYDAFRIKANSKT SAMARBETE

– som stärker utvecklingen av additivt tillverkade komponenter inom flyg- och rymdindustri



LAF 2018



ISAM 2019

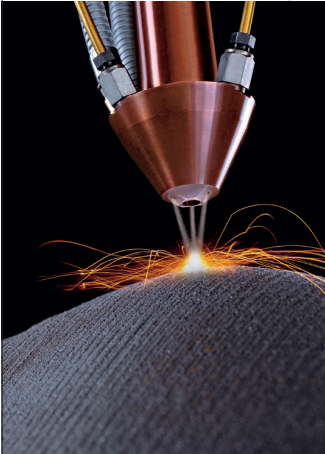


Samtal kring lasertrender

Additive Manufacturing: by TRUMPF

LMD: Laser Metal Deposition &

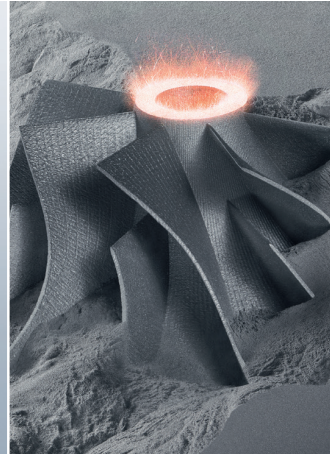
LMF: Laser Metal Fusion: only by TRUMPF



Laser Metal Deposition



TruLaser Cell 3000



Laser Metal Fusion



TruPrint 1000

Lasernytt utkommer med 3 nummer/år och ges ut av

Lasergruppen c/o Svetskommissionen
Box 5073, 102 42 Stockholm
Telefon: 08-120 304 03

Redaktör

Hans Engström
Telefon: 070-626 90 96
E-post: hans.engstrom@levitronics.se

Redaktionellt arbete och kansli

Per Westerhult
Telefon: 08-120 304 03
E-post: per.westerhult@svets.se

Ansvarig utgivare

Per Westerhult

Lasernytt på Internet

www.lasergruppen.eu

Omslagsbild

Sensorenhet till GE Aviations nya LEAP-jetmotor.

Produktion: BrandFactory

Tryck: BrandFactory, Stockholm
www.brandfactory.se

LASER
LASERGRUPPEN

INNEHÅLL

ISAM 2019	2
Expertforum i Dresden diskuterade den additiva tillverkningens framtidsutsikter och affärspotential	
GRÖN HÖGEFFEKTLASER	7
- ett genombrott vid svetsning av koppar.	
LAF 2018. DEL-1	10
Aktuella teman som digitalisering och additiv tillverkning utgjorde tyngdpunkterna vid LAF2018 i Bremen	
LAF 2018. DEL-2	22
Avancerad laserforskning vid BIAS ger fördelar inom många olika branscher i Bremen-regionen	
ICALEO 2018	28
En inspirerande sammankomst av laserprocessexperter	
ETT SYDAFRIKANSKT SAMARBETE	31
- som stärker utvecklingen av additivt tillverkade komponenter inom flyg- och rymdindustri	
NYTT ANVÄNDNINGSMÅL FÖR LASER OCH OPTIK	34
SAMTAL KRING LASERTRENDER	36
Del 32	
FRÅGA LASERDOKTORN	40

Tankar från styrelsen

Genom att studera vår historia kan vi på ett bättre sätt utforma vår framtid. Ska vi vara med om att påverka vårt samhälle och våra liv måste vi känna till historien.

Vi lever idag i en tid där teknikutveckling går oerhört fort. Artificiell intelligens, industri 4.0, internet of things och additiv tillverkning är bara några av de områden som växer kraftigt, men knappt existerade för 10-20 år sedan. Nya företag bildas inom dessa områden men samtidigt är många av de traditionsrika svenska storbolagen bland de bästa i världen på att utnyttja förändringar, följa med i teknikskiften och skapa nya affärsmöjligheter. Enligt Veckans Affärer har de flesta av Sveriges största företag varit verksamma redan före andra världskriget och flera av dem grundades redan under 1800-talet. Jag har personligen förmånen att arbeta på ett av de äldsta svenska företagen med en historia som tog sin början som Höganäs Stenkolsverk år 1797. Höganäs AB:s tillkomst räknas från detta år. Från gruvbrytning via produktion av eldfast tegel och senare saltglaserat lergods börjar man i början av 1900-talet att tillverka järnsvamp. Efter andra världskrigets slut påbörjas så järnpulvertillverkning i stor skala och idag tillverkas också andra metallpulver för olika ändamål såsom pulvermetallurgi, ytbeläggning och additiv tillverkning. Nyckeln för Höganäs AB's och många andra svenska

storbolags framgångar har varit att leda teknikutvecklingen inom sitt specialområde, men också att kunna anpassa sin verksamhet efter omvärlden. Vad tror du kommer att bli nästa stora tekniksprång? Kanske något inom laserområdet!



TANKAR FRÅN STYRELSEN

DR. CONNY LAMPA, HÖGANÄS AB



Expertforum i Dresden diskuterade den additiva tillverkningens framtidsutsikter och affärspotential

Johnny K Larsson
Autokropolis Engineering

Vi som deltog vid ISAM 2019 [3rd International Symposium on Additive Manufacturing] hade kvällen innan den egentliga konferensen startade bjudits in till ett s.k. Business Forum. Detta var förlagt till arrangerande Fraunhofer IWS' [Institut für Werkzeuge und Strahltechnik] lokaler på Winterbergstraße 28, och där det efteråt bjöds på möjligheten att besöka laboratorie-faciliteterna vid AMCD [Additive Manufacturing Centre Dresden, **Fig. 1**] för att där bekanta sig med den forskning kring AM [Additive Manufacturing] som bedrivs där.

Vi hälsades välkomna av professor Christoph **Leyens** som nu tagit över ledningen av verksamheten efter legendaren professor Eckhard **Beyer**. Som en parentes kan det nämnas att den senare kommer att stötta en annan gammal bekant, nämligen professor Claus **Emmelmann**, i dennes roll som institutionsföreståndare vid Fraunhofer IAPT [Institut für Additive ProduktionsTechnologien], tidigare känt som LZN [LaserZentrum Nord] i Hamburg. Sympatiska Christoph glädde sig över det stora antalet deltagare som visat intresse för detta "Business Forum", innan han i tur och ordning lämnade över ordet till sex kompetenta föredragshållare som representerade olika verksamheter kopplade till additiv tillverkning [**Fig. 2**].

Först i raden var Andreas **Stapelmann** från thyssenkrupp AG som inledde med att adressera digitaliseringens möjligheter och risker. För att eliminera det senare har thyssenkrupp lanserat "Hackathon", ett projekt där avancerade data-hackers en-



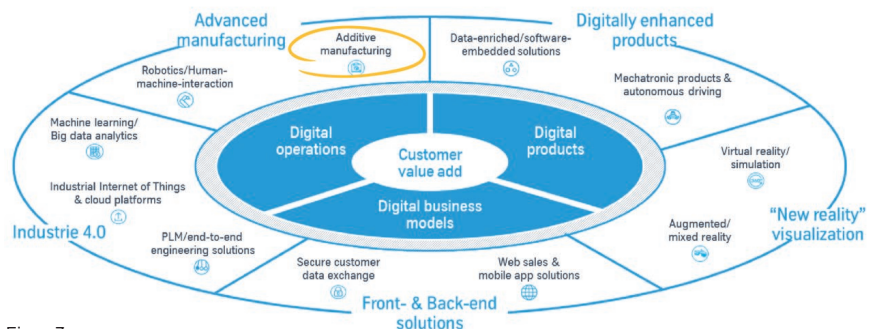
Figur 1. Dr. Christoph Leyens är relativt ny som institutionsföreståndare vid Fraunhofer IWS i Dresden dit han hälsade oss välkomna till ett synnerligen intressant kvällsarrangemang.



Figur 2. Föredragshållarna vid "Business Forum" representerade vitt skilda branscher; fr.v. Andreas Stapelmann (thyssenkrupp AG), Carl Fruth (Fit AG), Takashi Ishide (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.), Stefanie Brickwede (Deutsche Bahn AG), Christoph Blanc (TÜV Süd) och Chang-Woo Lee (KITECH).

rollerats för att förbättra företagets digitala säkerhet. Samtidigt använder man IDS [Intrusion Detection System] för säker kommunikation vid utbyte av datafiler. Digitaliseringen används i form av digitala produkter, processer och affärsmodeller [**Fig. 3**]. Beträffande additiv tillverkning,

vilken Herrn Stapelmann räknade som en av koncernens succéfaktorer, har thyssenkrupp inrättat ett "TechCenter" för detta i Mülheim, vilket är uppkopplat mot flera s.k. print-hubs runt om i världen. Här erbjuder man experthjälp längs hela värdekedjan vid AM-tillverkning



Figur 3. Hos thyssenkrupp anser man att framtiden ligger i digitala affärsmodeller, produkter och processer, där bland de senare additiv tillverkning räknas bland succéfaktorerna.

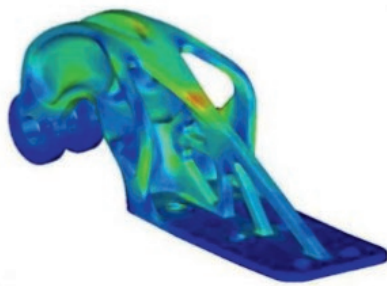
i såväl metaller som plastmaterial. För det ändamålet har man en imponerande utrustningspark som innefattar de metallbaserade processerna SLM [Selective Laser Melting], LMD [Laser Metal Deposition] och EAW [Electric Arc Welding], samt FDM [Fused Deposition Modelling] och SLS [Selective Laser Sintering] för additiv tillverkning med plaster.

Typiska forskningsområden handlar om ”bionic design”, topologioptimering och gitterstrukturer tillverkade med pulverbäddsteknik [SLM, **Fig. 4**]. Bland intressanta applikationer lyfte han fram ett hydraulikblock i rostfritt material [1.4404 och 1.3964, **Fig. 5**] till en undervattensbåt, och ett hydraulventilhus, tillverkat i AlSi10Mg alternativt Scalmalloy®, avsett för bilindustrin.

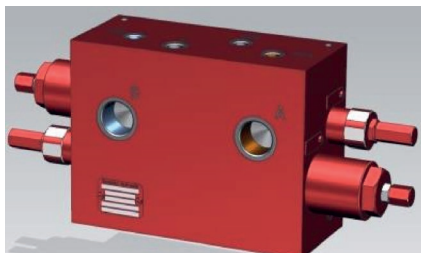
Eftersom nämnda ”TechCenter” redan idag levererar komponenter till olika branscher är produktkvalitet och –säkerhet viktiga aspekter vid AM-tillverkning. Därför avslutade Herrn Stapelmann med några ord kring certifiering och standarder rörande additiv tillverkning, vilket skulle visa sig vara ett nog så intressant, och kontroversiellt, ämne under den efterföljande paneldiskussionen.

Därefter tog Carl **Fruth** från Fit AG till orda. Hans företag etablerades 1995 och har idag 280 anställda, varav hela 44 stycken arbetar med forskning och utveckling på heltid. Man kan ju fråga sig hur en sådan verksamhet finansieras, men misstanken om omfattande bidrag från BMBF [Bundesministerium für Bildung und Forschung] föreligger så klart. Hur som helst hade verksamheten startat med att tillverka additivt framtagna prototypdetaljer, men numera utgör reservdelstillverkning en större del av verksamheten. Företaget har 21 maskiner för SLM, 4 enheter för EBM [Electron Beam Melting] och en utrustning för WAAM [Wire Arc Additive Manufacturing]. Lägg därtill 21 olika maskiner för AM-tillverkning i polymera material, så blir det lätt att förstå varför Herrn Fruth är så övertygad om dessa teknologiers framtid [**Fig. 6**].

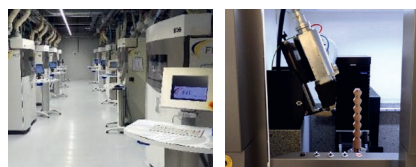
Han menade att företagets inställning till framtagning av objekt och produkter kom att förändras över en natt. Vid prototyp-tillverkning, som mest handlar om att skapa visualiseringsobjekt, är ett företags produktansvar väldigt ringa, medan det ställs helt andra ansvarskrav då det gäller att tillverka funktionsdugliga reservdelar. Därför är företagets laboratorium utrustat med en mängd olika kontrollverktyg som exempelvis CT [Computed Tomo-



Figur 4. Några klassiska exempel på topologioptimering; Simulering av konsolen till ett nacelle-gångjärn (t.v.) och ett motorblock tillverkat med en minimal materialmängd.



Figur 5. T.v. dagens utformning av hydraulikblocket till en ubåt, och t.h. hur det med bibehållen funktion kan utformas med hjälp av topologioptimering och SLM, och därmed reducera vikten med hela 83%.

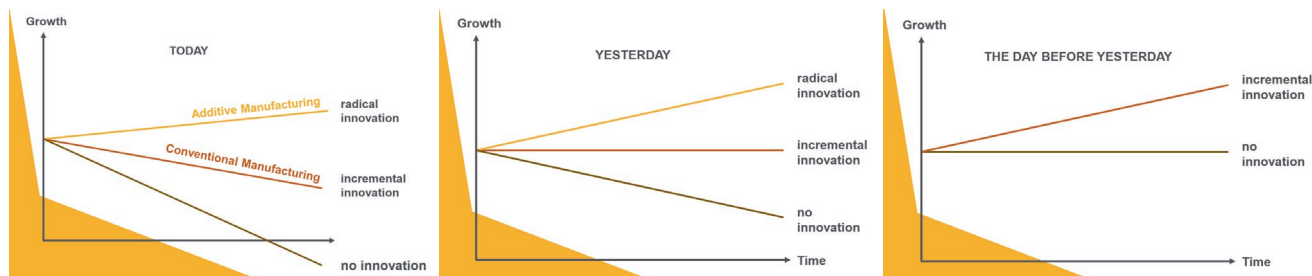


Figur 6. Maskinparken hos Fit AG är imponerande med utrustningar för additiv tillverkning med såväl metalliska som polymera material. Även på kontrollsidan (t.h.) är man välförsedd, något som blivit nödvändigt när tillverkningen lagts om från prototyp-tillverkning till produktion av reservdelar.

graphy) -skanner, koordinatmätmaskin, optisk profilometer, densitetsmätare, hårdhetsmätare, olika mikroskop o.s.v. För att kunna få sin affärsverksamhet att växa måste ett företag upprätthålla en viss innovationsgrad för att inte bli utkonkurrerat på marknaden. Här skilde Herrn Fruth mellan stegvis innovation, för vilken man kan använda sig av konventionella tillverkningsmetoder och i bästa fall bibehålla sin marknadsandel, i motsats till radikal innovation, som kräver nytänkande i form av exempelvis AM [**Fig. 7**]. Endast i det senare fallet finns det möjlighet att expandera sin affärsverksamhet.

Näste talare var en gammal bekant i form av Takashi **Ishide** [Mitsubishi Heavy Industries Ltd.], som jag senast träffade vid LAF [Laser AnwenderForum] –konferensen i Bremen i november förra året [se referat på annan plats i detta nummer av LaserNytt]. Liksom då visade han upp en pedagogisk översikt över tillgängliga AM-processer, och många av hans andra

exempel kände vi igen från LAF’18. Sålunda kunde vi på nytt bekanta oss med världens största SLM-kammare som vi hittar hos GE Aviation och som mäter 1,1×1,1×0,3 meter och betjänas av fyra stycken 1,5 kW-lasrar. En AM-metod som vi laserentusiaster sällan kommer i kontakt med är s.k. binder jet, där en adherent sammanbinder pulverpartiklarna. Här bedriver Mitsubishi ett intensivt forskningssamarbete med CITIM GmbH, som numera är en del av Oerlikon-koncernen. Vid det sistnämnda institutet har man också utvecklat en lösning där enskilda, 50 µm stora metalldroppar manipuleras till rätt plats med hjälp av ett magnetfält. Liksom vid LAF’18 presenterade den gode Ishide den hybridmaskin som finns vid Qinghua University i Kina, och som kombinerar elektron- och laserstråle vid AM-tillverkning. En annan innovation hittar vi hos företaget Veloz med vars hjälp man kan bygga SLM-strukturer utan något behov av dessa förhatliga stödstrukturer.

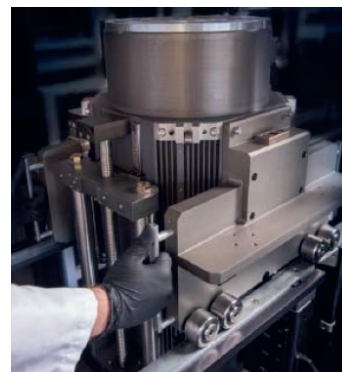


Figur 7. Herr Carl Fruths filosofi om hur ett företag kan expandera sin verksamhet och förbli konkurrenskraftigt genom radikal innovation och tillverkningsmetoder som SLM.

Detta låter sig göras genom att byggplattformen kan vinklas i alla riktningar så att man utnyttjar gravitationsfördelarna vid byggnationen [Fig. 8]. Additiv tillverkning med tre trådar och en med 150 Hz frekvens skannad laserstråle kände vi också igen från LAF'18. Slutligen kunde vi höra om Mitsubishis senaste laserinvestering i form av en 10 kW SM [Single Mode] fiberlaser med stråldistribution genom en fotonik-kristallfiber!

En märkbar skillnad mellan additiv tillverkning och andra laserprocesser är att den förstnämnda tycks ha en större attraktionskraft hos kvinnor, vilket bevisades av det förhållandevis stora antalet kvinnliga deltagare, och inte minst av Stefanie Brickwede som var nästa föredragshållare. Hon arbetar för Deutsche Bahn AG, men är även ordförande i nätverket "Mobility goes Additive e.V." [Fig. 10] där vi hittar medlemmar som SJ, GKN och VW. Nätverket har nio olika arbetsgrupper, vilka bl.a. behandlar standarder, normer och godkännanderutiner. Hon underströk vikten av att ändra på inställningen hos beslutsfattare om additiv tillverkning skall nå de tillväxtsiffror som tidigare prognostiserats. Bland praktikfall som presenterades fanns tillverkning till sjöss av reservdelar för fartyg, aluminiumkonsoler till mekanismen för det öppningsbara taket på roadster-varianten av BMW:s i8-modell, samt olika AM-tillverkade fixturer till Fords slutmonteringsfabriker [Fig. 9].

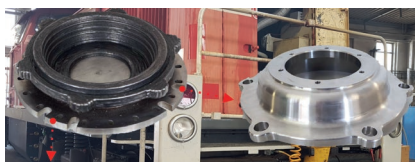
Ett annat nätverk, fyndigt döpt till "Railiability", riktar sig speciellt till järnvägsbranschen och omfattar de flesta europeiska bolagen såsom DB, SJ, SNCF, ÖBB och Trenitalia. En imponerande komponent som tagits fram i detta konsortium var ett 25 kilo tungt lagerlock som tillverkats med ljusbåge och nedsmält trådbaserat material, en annan utgjordes av ett 3D-printat hölje monterat i boggi-ramen till DB:s höghastighetståg [Fig. 10]. En intressant iakttagelse var hur man kunde påverka slutproduktens prestanda genom att variera processhastigheten och därmed sträckenergin för att skräddarsy



Figur 8. Företaget Veloz har utvecklat ett maskin-koncept för SLM där en rörlig byggplattform gör att man inte behöver använda sig av s.k. stödstrukturer.



Figur 9. Då det gäller bilkomponenter tillverkade med AM-teknik är exemplen begränsade till nisch-produkter som BMW i8 Roadster. Däremot är 3D-printade plastfixturer för monteringshjälp vanliga, bl.a. i Fords slutmonteringslinjer (t.h.).



Figur 10. Inom ramen för nätverket "Mobility goes Additive e.V." har vidstående komponenter utvecklats. T.v. ett 25 kg tungt lagerlock tillverkat med ljusbåge och nedsmält trådmateriel, och t.h. ett 3D-printat hölje för elektroniska komponenter monterat i boggi-ramen på ett höghastighets-tåg.

exempelvis komponentens densitet.

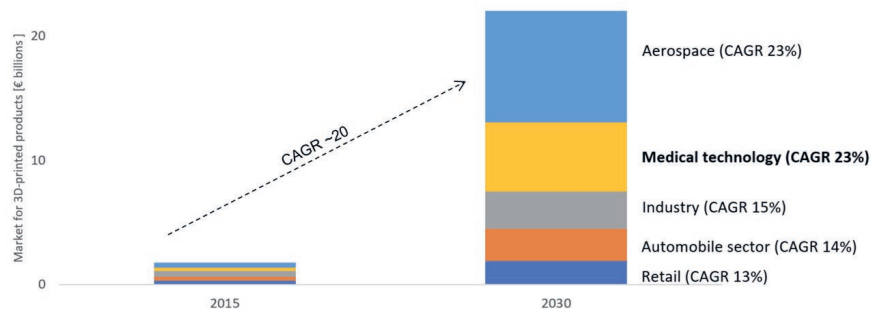
Idag uppvisar aerospace och medicinteknik den högsta årliga tillväxten, eller 23%, då det gäller AM-tillverkade komponenter, medan bilindustrin här ligger på mer moderata 14% [Fig.11]. Frau Brickwedens framtidsvisioner handlade om

att man med endast ett knapptryck skulle starta den skanning-process som krävs för att beskriva geometrin hos en komponent som skall omkonstrueras eller repareras med LMD, samt önskemål om en helautomatiserad efterbearbetningsprocess vilken inkluderade avlägsnandet av stödstruk-

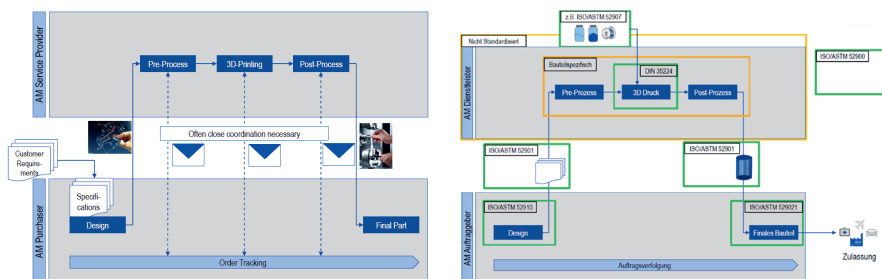
turer. Hon pekade också på nyttan av att samgruppera olika AM-kompetenser för att nå synergieffekter, vilket IAM [International Advanced Manufacturing] i Berlin är ett lysande exempel på. Här hittar vi en blandad kompott av företag som i gemensamma laboratorier tillsammans hittar nya användningsområden för AM-tekniken.

Att det idag finns ett tämligen omfattande regelverk och standarder för additiv tillverkning är kanske inte allmänt känt, och därför blev kanske Christoph Blancs [TÜV Süd] föredrag en ”ögonöppnare”. Troligtvis kommer många företag i framtiden inte själva att satsa på additiv tillverkning utan istället upphandla denna hos specialiserade företag utifrån en väl specificerad order. Framgent kommer därför ett viktigt område att vara hur företag skall kunna certifieras som godkända tillverkare av produkter i sådana fall där någon additiv tillverkningsteknik används [Fig. 12]. I internationell standardisering finns en mängd AM-relevanta regler och här nämnde Dr. Blanc speciellt ISO/ASTM 52901 som är en norm för hur bl.a. kommunikation skall ske mellan olika aktörer i tillverkningskedjan. Detta kan röra sig om vilka filformat som skall användas, vilka dokument som kan delas mellan aktörerna och vem som äger data [IP = Intellectual Property], hur data skall lagras och revideras, samt hur data kan transfereras på ett säkert sätt. Ett praktiskt fall där ett dylikt angreppssätt efterföljs hittar vi hos DB som decentraliserat sin reservdelstillverkning i form av lokalt AM-tillverkade komponenter i den region där dessa efterfrågas.

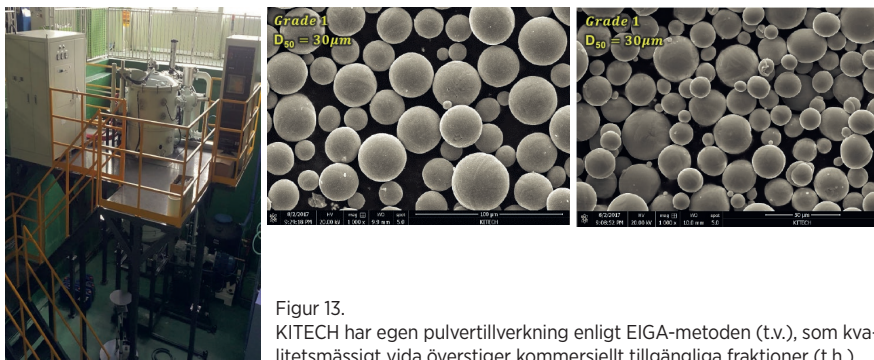
Siste talare var Chang-Woo Lee från KITECH [Korea Institute of Industrial Technology] som visade upp några intressanta AM-applikationer i metall inom medicinteknik. KITECH är alltså ett forskningsinstitut som i första hand riktar in sig på att supportera små- och medelstora företag som inte kan finansiera en egen forskning. Man har även en intern utrustning för pulvertillverkning enligt metoderna VIGA [Vacuum Induction Gas Atomization] och EIGA [Electrode Induction Melting Gas Atomization, Fig. 13], där den gode Chang-Woo kunde utlova ett lägre pris än vad kunder brukar betala hos traditionella pulvertillverkare. Här underströk han särskilt nödvändigheten av att hålla syremängden i pulvret på en minimal nivå, då oxygen tenderar att höja smälttemperaturen hos pulvermetallen och därmed kräver en högre energitillförsel.



Figur 11. Aktuella prognoser pekar på en minst 20%-ig årlig tillväxt av additiv tillverkning inom branscher som aerospace och medicinteknik, medan transportsektorns volymbehov medför en mera moderat ökning.

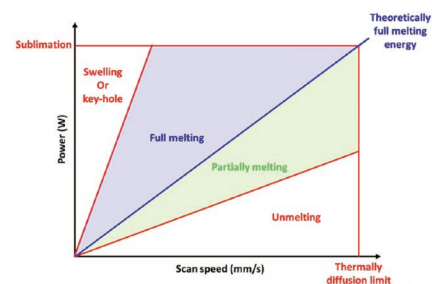


Figur 12. Den klassiska tillverkningskedjan med ”in-house”-tillverkning lär snart bytas ut mot konceptet t.v., som involverar företag som specialiserat sig på additiv tillverkning. Detta medför nya regler för kommunikation mellan de inblandade parterna, något som regleras i ISO/ASTM 52901 (t.h.).



Figur 13. KITECH har egen pulvertillverkning enligt EIGA-metoden (t.v.), som kvalitetsmässigt vida överstiger kommersiellt tillgängliga fraktioner (t.h.).

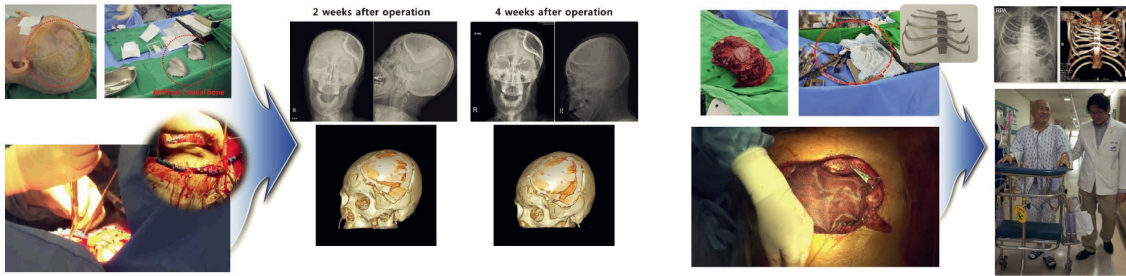
Förutom DfAM [= Design for Additive Manufacturing] är materialvalet viktigt vid tillverkning av dessa artiklar, vilket illustrerades med designutformning och optimering av en artificiell knäled. Komponenterna får inte innehålla skadliga substanser, och sålunda diskvalificeras aluminium som annars borde ha varit ett attraktivt lättviktsalternativ, detta för att forskning visat att materialet accelererar riskerna för Alzheimer-sjukdom. Andra viktiga konstruktions- och tillverkningskriterier vid implantattillverkning är styvhet [E-modul], korrosionsmotstånd och nötbeständighet, egenskaper som bör ligga så nära den utbytta kroppsdel som möjligt, något som pekar mot Titan som det ultimata materialet. De processparametrar med vilka man kan optimera sagda egenskaper är främst lasereffekt och skanning-hastighet [Fig. 14]. Titanimplantat tillverkade med SLM-metoden bör ges en efterföljande HIP [Hot Isostatic Press] –behandling för att uppnå de bästa meka-



Figur 14. Viktiga processparametrar för att erhålla en fullgod uppsmältning av pulverpartiklarna och därigenom få de specificerade mekaniska egenskaperna hos ett implantat är lasereffekt och skanning-hastighet.

niska egenskaperna.

Två avslutande praktikfall skapade ett visst illamående hos några i publiken då de visade hur AM-tillverkade implantat opererades in på några patienter. Det ena exemplet visade upp ett skallimplantat, medan det andra visualiserade ett bröstbensdito där hela bröstkorgen hade öppnats upp [Fig. 15].



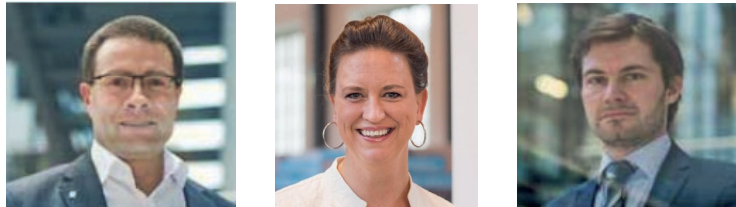
Figur 15. Några framgångsrika exempel på inopererade AM-implantat; T.v. ett 95 g lätt skallimplantat i ren Titan (grade 2), och. t.h. revbensimplantat med en totalvikt på 190 g och patienten "up and running" redan en vecka efter utförd operation!

Paneldebatt kring additiv tillverkning

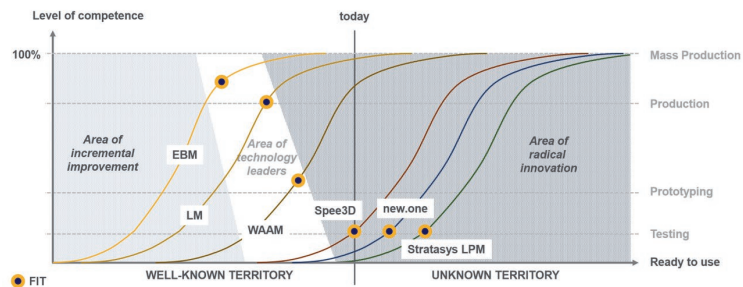
Detta expertforum avslutades med en paneldebatt mellan de olika föredragshållarna under ledning av Frau **Brickwede**, professor **Leyens** och hans IWS-kollega Frank **Brueckner** [Fig. 16], som just nu upprätthåller en gästprofessur hos professor Alexander **Kaplan** vid LTU [Luleå Technical University]. Här satte den kontroversielle Carl **Fruth** tonen genom att förklara att alla former av standarder hämmar innovationsgraden [Fig. 17]. Han eftersökte ett mer flexibelt angreppssätt och jämförde med exemplet matlagningsrecept där man förvisso har en viss förutbestämd rekommendation på ingående ingredienser och mängden av dessa, men som sedan tillåter en viss frihet för den som skall laga maten. Det viktiga är ju inte receptet i sig utan vad middagsgästen förväntar sig.

På en berättigad fråga från auditoriet kring vilka affärsmodeller som AM-tillverkning kan förväntas göra störst succé, menade Dr. **Leyens** att det handlade om produkter med utomordentliga prestanda, vilka tillverkas i små och begränsade volymer. Sådana hittar man idag främst inom aerospace- och flygindustrin, där man också ligger långt framme då det gäller att utbilda ingenjörerna i konstruktionsteknik för AM. Dr. **Stapelmann** från thyssenkrupp AG vurmade för integrationen av additiv tillverkning i befintliga produktionssystem, men ondgjorde sig samtidigt över den variation i komponentprestanda som är ett resultat av att varje AM-maskin levererar olika resultat. Här inflikade Dr. **Brueckner** att toleransangivelser är viktiga för att ta hand om oundvikliga defektvariationer. För att minimera sådana riskfaktorer kräver därför flygindustrin att det finns standarder för AM-maskiner [Fig. 18].

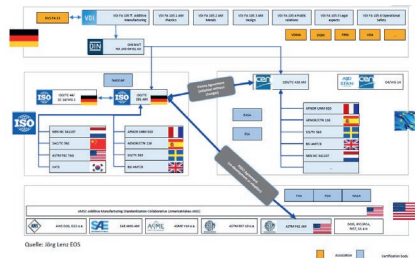
Även om teknikinnehållet fick stå tillbaka för mer marknadsinriktade resonemang kring additiv tillverkning fick vi åhörare goda inblickar i en komplex verksamhet som sträcker sig långt förbi



Figur 16. Sammanhållande av paneldebatten var Frau Stefanie Brickwede och IWS-doktorerna Cristoph Leyens (t.v.) och Frank Brueckner (t.h.).



Figur 17. Precis som för all ny teknikutveckling följer de additiva processerna ovanstående "S-kurvor", där gula cirkular indikerar var Carl Fruths företag Fit AG befinner sig i dagsläget.



Figur 18. Hur standarder för additiv tillverkning hänger samman kan för den oinvigde tyckas vara ett "lapptäcke", men framtida brukare gör nog klokast i att sätta sig in i ärendet!

själva tillverkningsprocesserna. Månde vi i framtiden få se ett helt nytt affärslandskap inom tillverkningsindustrin, som kommer att revolutionera konstruktionsprocess, kravsättning, regler och standarder m.m. Onekligen står vi nu inför den så länge emotsedda "Industry 4.0". ■



Grön högeffektlaser – ett genombrott vid svetsning av koppar.

Mikael Olsson
Trumpf Maskin AB

I samband med den växande marknaden för elektromobilitet observeras en kraftigt ökande efterfrågan på lasersvetsning av koppar (Cu). Det är emellertid välkänt att lasersvetsning av koppar med fastkroppslaser av hög effekt vid ~ 1 µm kan vara en utmanande uppgift. Den begränsade absorptionen av IR-våglängden i Cu ger upphov till flera oönskade effekter, t.ex. bildning av svetssprut och ett beroende av ytbedingungen hos materialet (oxidation). Disklasrar av hög effekt och med grön våglängd är en lovande lösning på problemet. Absorptionen av den gröna våglängden i fast Cu är ~ 5 gånger högre än för IR. I detta sammanhang är det självklart att forskare och ingenjörer på fältet idag satsar ännu mer uppmärksamhet på att förbättra svetskvaliteten i stället för att öka svets hastigheten.

Den pulsade gröna lasern TruDisk Pulse 421 finns redan etablerad på marknaden. I den här artikeln presenteras applikationsresultat av kopparsvetsning med ett nytt kraftigt CW-lasersystem från TRUMPF med 1 kW uteffekt vid 515 nm. Svetskurvor (svets hastighet som funktion av svetsdjup) för grön och IR våglängd jämförs. Svets direkt genom plåt och överlappssvetsar har utförts på ETP-Cu plåtar i intervallet 0,25 mm till 5 mm tjocklek (full penetration och partiella penetrationssvetsar). Vi diskuterar påverkan av effektfördelningen på formen av svetsens tvärsnitt både för grönt och IR. I samband

Parameter	TruDisk 1000	TruDisk 1020
Pulse peak power	1 kW	1 kW
Average power	1000 W	1000 W
Wavelength	1030 nm	515 nm
Pulse duration	cw	cw
LLK diameter	≥ 50 µm	≥ 50 µm
No. of outputs	max. 2	max. 2
BPP	2 mm·mrad	2 mm·mrad
WPE	33 %	25 %

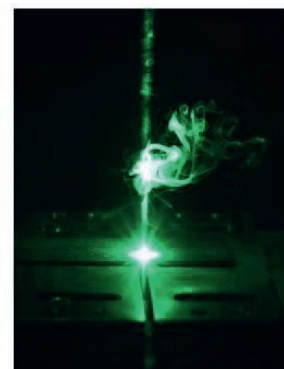
Fig 1.
Teknisk specifikation för TruDisk 1000 och TruDisk 1020

med detta studeras även bildandet av sprut vid svetsning vid olika fokalpositioner. Dessutom undersöks beroendet av arbetsstyckets geometri för det uppnåeliga penetrationsdjupet.

Strålkällans egenskaper

På grund av den växande efterfrågan på högkvalitativa lasersvetsningar av koppar har TRUMPF utvecklat ett kraftigt CW-lasersystem i grön våglängd (515 nm): TruDisk 1020. Den baseras på en frekvensfördubblad Yb: YAG-disk laserplattform. I motsats till andra laserkoncept (dvs fiberlaser) möjliggör den modulära uppställningen av disklasern för intrakavitetsfrekvensdubbling. Detta gör konceptet enkelt och robust eftersom ingen yttre kavitet för resonansförbättring av den andra harmoniska generationen behövs.

TruDisk 1020 är en CW-laser som levererar en maximal uteffekt på 1 kW vid 515 nm. Så långt är detta den mest kraftfulla industriella grönvåglängdslasern som hittills visats på marknaden. Tack vare CW-driften med TruDisk 1020 är svets sömmens längd inte begränsad. Denna



funktion breddar vidare spektrat av kopparsvetsapplikationer som kan adresseras och gör CW-systemet till ett perfekt komplement till den ovan nämnda pulsade lasern. För att visa påverkan av våglängden jämförs nedan TruDisk 1020 med TruDisk 1000 som har samma egenskaper utom en våglängd på 1030 nm. **Figur 1** visar en översikt över viktiga parametrar i TruDisk 1000 och TruDisk 1020.

För strålleverans är TruDisk 1020 utrustad med två utgångar för pluggbara fiberkablar för att möjliggöra maximal flexibilitet i maskinkonceptet. En utmärkt strålkvalitet på 2 mm × mrad finns tillgänglig i båda utgångarna vilket möjliggör en anslutning av en multimode fiber med en minsta kärndiameter på 50 µm. En fiber som optimeras för låg absorption i det gröna spektrat används. Värdet på 1 kW ska förstås ses som den effekt som är tillgänglig vid arbetsstycket dvs. efter fiberkabel och bearbetningsoptik.

Jämförelse mellan grön och IR

För att jämföra grön och IR utfördes svetsprov med koppar med grönvåglängd TruDisk 1020 och en IR-våglängd TruDisk

1000. Svetsningen utfördes med arbetsstyckets yta vid FL = 0. Den använda effekten var 1 kW vid båda våglängderna. På grund av absorption av 515 nm våglängden i kopparånga utfördes alla test med grönt ljus med ett munstycke med luftflöde.

För reproducerbara resultat är det nödvändigt att hålla munstycksinställningen konstant. Som framgår av **figur 2** är svetsdjupet vid användning av 515 nm cirka 50% högre jämfört med 1030 nm. Det betyder också att med den gröna våglängden kan en signifikant ökad matningshastighet tillämpas samtidigt som man får samma svetsdjup som vid IR. Observera att delat i svetsdjupet mellan grönt och IR inte nödvändigtvis är så högt. Det kan avvika från detta värde för andra stråldiametrar och reflektioner i ångkanalen.

En grundläggande skillnad mellan grön och IR i Cu-svetsning är att med den gröna lasern utfördes värmeledningssvetsning med framgång men med IR-lasern var det omöjligt, **figur 3**.

Smälta och nyckelhåform

I ett annat test undersöktes nyckelhålsstabilitet vid 515 nm. Flera olika typer av kraftfördelning leder till en sprutfri jämn svetsning. Alla har gemensamt att det finns en korona som ger smältpunkten på nyckelhålets omgivning för att bilda en smältavsättning och / eller producerar förångningstemperatur runt nyckelhålet för att öppna den till en V-form. För en gaussisk form uppstår båda effekter samtidigt.

Det enklaste sättet att producera en smältdeposition är defokusering och därigenom ändras kraftfördelningen från topphatt till gaussform. Med en smältring runt toppen av nyckelhålet ändras riktningen av smältflödet och smältan som kommer upp från botten av nyckelhålet införlivas av ringen i stället för att den slås ut. Effekten illustreras av bilder som tagits med en höghastighetskamera enligt **Figur 4** och ritningen i **Figur 5 (a)** och **(b)**. Storleken på smältavsättningen bör anpassas till smältmängden i poolen genom att välja stråldiameter och kantbredd. I detta test valdes en fiber med en diameter av 200 μm och ett optiskt förhållande av 1: 1.

Den andra anledningen till bättre kvalitet är formen på nyckelhålet. Om nyckelhålets väggar är V-formade istället för I-formade är nyckelhålet mycket stabilare och kokningen minskar. Återigen uppnås detta genom att välja stråldiameter och kantbredd. Form och stabilitet hos nyckelhålet upptäcktes genom att titta på

svetsen via höghastighetsvideor. En orsak till mindre turbulens och mindre sprut kan vara den vinkelberoende absorptionen eller det sätt som ångtrycket verkar på smältytan. Detta beteende beskrivs i **figur 5 (c)** och **(d)**. Båda effekterna minskar produktionen av humping. Humping leder till hög dynamik inuti nyckelhålet och utdrivning.

Påverkan av värmeledning

Med 1-kW och grönt laserljus erhålls lämpligt kopparsvetsresultat med plåttjocklekar från 0,2-0,5 mm. Med tjockare plåt (≥ 1 mm) kan den höga värmeledningsförmågan hos Cu (~ 5 gånger högre än stål) vara en utmaning vid lasersvetsning. Vi påpekar att detta inte beror på våglängden utan är en allmän effekt. För 5 mm tjocka kopparplåtar eller i fall där fixturen tar bort mycket värme är inkopplingen inte tillfredsställande. Därför ligger en stor potential i svetsar som kräver mindre värmeledning. I **figur 6** är alla parametrar utom plåttjocklek och hastighet konstanta. Vid större materialtjocklekar minskar penetrationsdjupet avsevärt. Det är intressant att notera att med högre hastighet är förhållandet mellan djupreduktion högre (20% vid 1 m / min och 50%

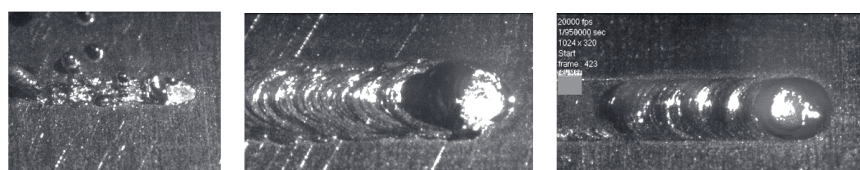


Fig. 4. Stabilisering av nyckelhålet genom att byta kraftfördelning från topphatt till gauss (via defokusering). (a) FL = 0; dOf = 0,2 mm: sprut är tydligt synliga; (b) FL = 2zR; BD = 0,45 mm: sprut reduceras avsevärt, mjukare smältpool; (c) FL = 4zR; BD = 0,82 mm: inget sprut mycket smidig smältpool.

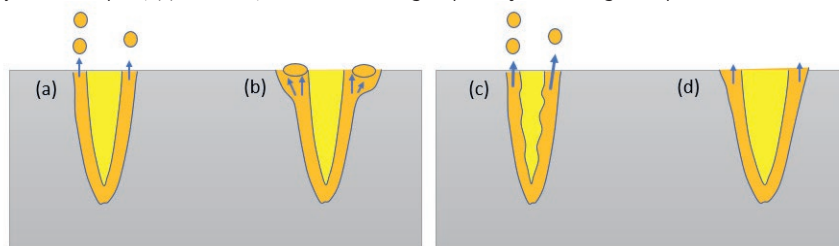


Fig. 5. Tvärsnitt utan smältdeposition (a) och med smältavsättning (b). Tvärsnitt med I-format (c) och V-format nyckelhål (d). Med gaussisk kraftfördelning uppstår båda effekterna samtidigt.

vid 3 m / min.)

Resultaten som presenteras i detta avsnitt bekräftar att vid lasersvetsning av Cu spelar arbetsstyckets geometri en avgörande roll vad gäller det uppnåeliga svetsdjup. Detta skiljer sig från lasersvetsning av stål där påverkan av arbetsstyckets geometri på svetsdjup är försumbar. För pulserad grön svetsning (med TruDisk Pulse 421) ses värmeledning och värmeackumulering men har betydligt mindre inflytande

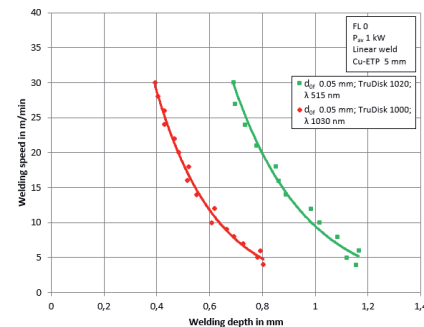


Fig. 2. Svets genom plåt av koppar för grön (515 nm) och IR (1030 nm) våglängd med en effekt av 1 kW.

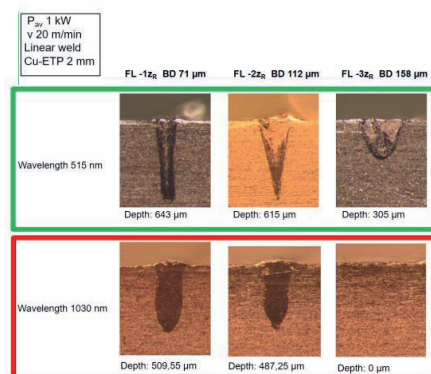


Fig. 3. Jämförelse av tvärsnitt för Cu svetsning med 515 nm och 1030 nm TruDisk vid olika fokuspositioner / stråldiametrar. Matningshastigheten var 20 m / min i båda fallen. Med IR-lasrar är en tillförlitlig värmeledningssvetsning inte möjlig, vilket kan ses på bilden till höger.

jämfört med CW.

Figur 7 visar två exempel på Cu-foliesvetsning gjord med TruDisk 1020 som linjära svetsningar. Jämfört med avsnitt 3.1 utfördes testen här med en större fokusdiameter av 0,1 mm (LLK 50 μm , optiskt förhållande 2: 1) och dessutom med defokusering för ännu större stråldiameter på arbetsstycket och bättre kantbredd. I dessa tester kunde vi uppnå en utmärkt svetskvalitet vid höga matningshastighe-

ter. Inga porer eller utstötningar observerades.

Resultaten visar att TruDisk 1020 är speciellt lämpad för denna typ av applikation. Det här skiljer CW-grönvågslängdkällan från IR-lasrar i kombination med wobbling eller BrightLine Weld. I sådana tunna Cu-foliesvetsapplikationer kan en mycket god kvalitet vid höga bearbetningshastigheter uppnås.

Jämförelse med svetsprocesser med IR-lasrar

För penetrationer djupare än ~ 1 mm är en högeffektiv IR-laser en bra lösning. För god kvalitet bör hastigheten vara mellan 15 och 30 m/min. För att generera ett större svetsdjup bör IR multi-kW lasereffekt appliceras. För förbättrad svetskvalitet kan man använda TRUMPF:s patenterade BrightLine Weld teknik som möjliggör flexibel anpassning av kraftfördelningen med en 2-1-fiber. En enkelmodig fiberlaser (t ex en TruFiber från TRUMPF) i kombination med en scanner kan vara ett alternativ, särskilt när ganska breda tvärsnitt är önskade eller när matningshastigheten begränsas av maskin eller kontur.

Observera att dessa påståenden är giltiga under antagandet att kraften hos den gröna laserkällan är begränsad till 1 kW. Medan det här är den nuvarande situationen kan vi förvänta oss att ha ett lasersystem med ännu högre effekt med 515 nm inom en snar framtid. Det förväntas generera en ännu mer signifikant nytta av grönvåglängdssvetsning av Cu.

TruDisk 1020 är ett nytt och unikt CW-lasersystem som levererar 1 kW uteffekt vid 515 nm som är särskilt lämpad för Cu-svetsapplikationer. Genom att använda TruDisk 1020 kan kopparsvetsning bli möjlig i applikationer som är otillgängliga för IR-lasrar såsom tex. värmeledningssvetsning. Dessutom kan den gröna laserkällan bilda en annan typ av nyckelhål för djup penetrationssvetsning. Detta nyckelhål är mycket stabilare och minskar därför sprut och smältutstötningar. Även om mekanismerna för smältutstötningar för grön och IR-våglängd är desamma ligger fördelen med grönt i det sätt som den kopplar in i kopparmaterialet. Vi har visat att smältutstötningar kan undvikas genom att formen av ångkanalen ändras från I-formad till V-formad och genom att bilda en smältavsättning. Vidare visade vi att med Cu är det uppnåeliga penetrationsdjupet vid fasta processparametrar mycket känsligare för arbetsstyckets geometri jämfört t ex med stål. Detta beteende är en

Fig. 6. Påverkan av värmeledning vid Cu-svetsning. Vid en plättjocklek på 0,7 mm kan en full penetrationssvetsning uppnås. Medan matningshastighet, laserkraft och fokusposition hålls konstant minskar det uppnådda svetsdjupet med ökande materialtjocklek. Detta beror på den höga värmeledningseffekten hos Cu.

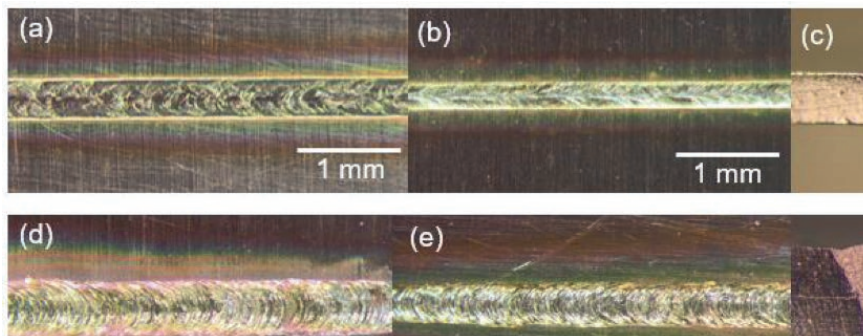
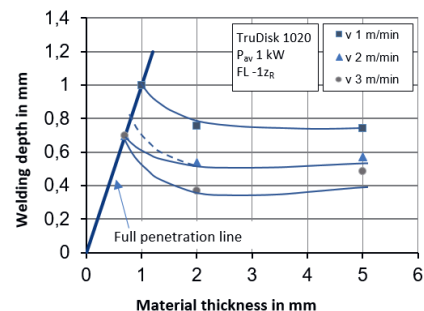


Fig. 7. (a) - (c) Svets direkt på plåt och värmeledningssvetsning av Cu-folie (materialtjocklek = 0,25 mm, $v = 10$ m/min, $BD = 0,51$ mm): a) övre sida, b) undersida, c) tvärsnitt; (d) överlapp och djup penetrations-svetsning (materialtjocklek = $2 \times 0,25$ mm, $v = 8$ m/min, $BD = 0,316$ mm): d) övre sida, e) undersida, f) tvärsnitt

följd av den goda värmeledningseffekten hos Cu och kan observeras både med IR och gröna lasrar.

Våra applikationsresultat visar att TruDisk 1020 för närvarande är lämplig för penetrationsdjup < 1 mm i Cu. Högeffektlasrar med grön våglängd erbjuder en stor potential. I framtiden förutser vi att kunna utvinna högre effektnivåer utifrån denna typ av system. Detta möjliggör större svetsdjup i koppar vilket gör gröna våglängdslasrar till ett ovärderligt verktyg för massproduktion av komponenter på den snabbväxande elektromobilitetsmarknaden. ■

Aktuella teman som digitalisering och additiv tillverkning utgjorde tyngdpunkterna vid LAF2018 i Bremen

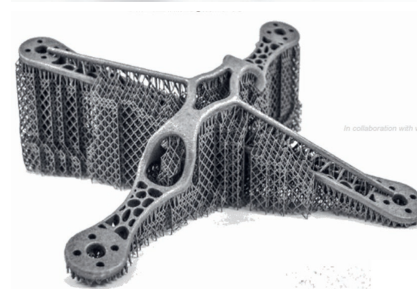
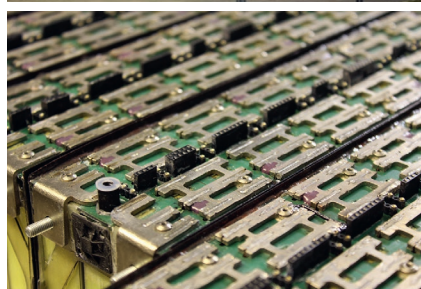
Johnny K Larsson
Autokropolis Engineering

För elfte gången i ordningen arrangerade BIAS [Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik] den 28-29 november i föl den populära LAF [Laser Anwender Forum] -konferensen. Denna gång hade rekordmånga 137 deltagare från 9 olika länder sökt sig till Bremen Congress Centrum.

Tidigare har vi ju hållit till i anrika Park Hotel, men då framförallt utställaryrorna där är begränsade hade programkommittén för LAK [Laser AnwenderKreis] valt att förlägga årets evenemang till de mer spaciösa lokalerna i Congress Centrum. Detta gav utrymme för hela 31 utställare att visa upp sina senaste produkter och diskutera dessa med potentiella kunder. Dyliga koncept röner alltid stor uppskattning och detta var inget undantag för LAF2018. Bland utställarna hittade vi även många av konferensens sponsorer där professor Frank **Vollertsen**, institutionsföreståndare vid BIAS, vid sitt inledningsanförande speciellt lyfte fram företagen Trumpf och Laserline som var s.k. guld- respektive silversponsorer. Sympatiske Frank berättade vidare att fokus vid de flesta tidigare LAF-konferenser legat på lasersvetsning, men där man i år som huvudteman valt digitalisering vid laserbearbetning samt det alltid lika "heta" ämnet additiv tillverkning.

Industri 4.0 och digitalisering innefattar även laserprocesserna

Sammanlagt kunde vi lyssna till 28 högtintressanta presentationer, och först i raden stod välbekante Dr. Reiner **Ramsayer**, forskningschef vid Robert Bosch



GmbH. Denna jättekonglomerat förfogar idag över mer än 250 produktionsenheter och har levererat komponenter till cirka 800.000 FEVs [Full Electric Vehicle] och HEVs [Hybrid Electric Vehicle]. E-mobili-

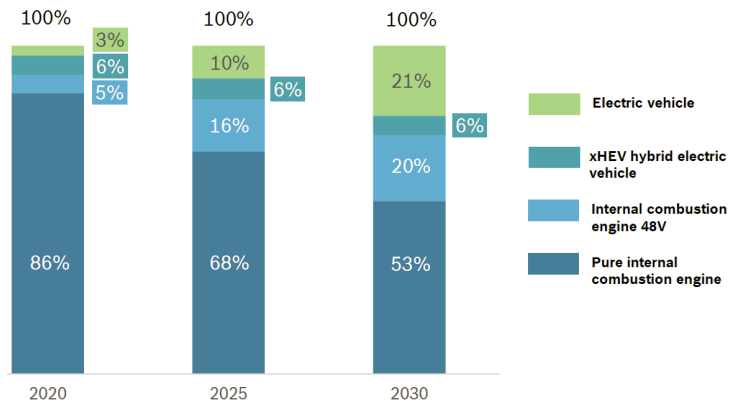
ty tycks ju bli en nödvändighet i framtiden och prognosen är att år 2030 kommer var femte personbil att vara elektrifierad [Fig. 1]! Det kommer då mycket att handla om svetsning av kopparmaterial, och vi fick en

repetition av de forskningsresultat i ämnet som presenterats vid andra laserkonferenser av Bosch-medarbetare som Dr. Andreas Heider och Lukas Alter. I dessa sammanhang rekommenderas ju lasrar i de korta gröna och blå våglängdsområdena, men det är fullt möjligt att svetsa koppar med IR [InfraRed] -lasrar, men då under förutsättning att man använder en liten fokuspunkt och hög framföringshastighet.

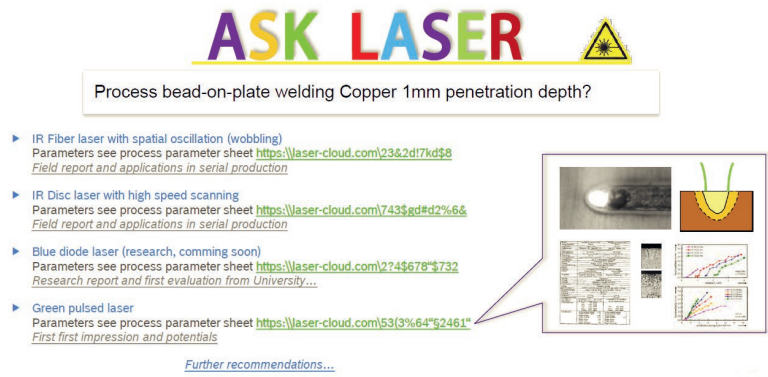
Därefter fortsatte den gode Reiner med att tala kring ämnesområdet ”Industry 4.0”, vilket drivs på av kundernas önskemål om flexibilitet, ökad variantflora och frekventare produktförnyelse. Detta kräver snabba omställningar i produktionsflödet och här såg han lasern som det perfekta, flexibla verktyget. För att ytterligare effektivisera lasersvetsningen har Bosch utvecklat en intern mjukvara som man döpt till SimCoLas [Simulation Controlled Laser Welding] med vars hjälp man bl.a. kan anpassa laserfogens start- och stoppositioner för att minimera värmedistorsioner. Dr. Ramsayer avslutade med en vision av att skapa ett hjälpmedel av typen ”Ask Laser” eller ”Google for Laser” [Fig. 2]. Idag använder vi mycket tid för att söka laserinformation eller att vänta på resultaten från utförda laserexperiment, något som med framtidens digitalisering kan minimeras.

En annan talare med innovativa budskap var Adrian Raidt från det unga företaget Laserhub, som har blott 1½ år på nacken. Deras koncept går ut på att via Internet förmedla och förlägga laserarbeten där ledig maskinkapacitet finns tillgänglig för tillfället, [Fig. 3]. Man har hittills varit tämligen framgångsrika i detta, men det finns en hel del fallgropar med ett sådant upplägg. Därför var det inte överraskande att auditoriet hade en hel del synpunkter och frågor kring detta, t.ex. hur man i ett sådant nätverk hanterar konfidentiella produkter?

Välkände Dr. Markus Kogel-Hollacher [Precitec GmbH & Co. KG] hade denna gång valt att fördjupa sig kring sensorer och digitalisering vid additiv tillverkning. Han inledde emellertid med att beskriva den ”djungel” som förekommer då det gäller terminologin för dessa tillverkningsmetoder. Här om någonsin får begreppet ”Kärt barn har många namn” sitt berättigande, men den gode Markus lyfte samtidigt fram de lovvärda insatser som gjorts inom främst ASTM [American Society for Testing and Materials] där man kreerat åtskilliga standarddokument för



Figur 1. Prognosen beträffande framtida elektrifiering av personbilar pekar på att år 2030 kommer var femte bil att vara en FEV, och blott hälften att utgöras av konventionellt framdrivna fordon med förbränningsmotor.



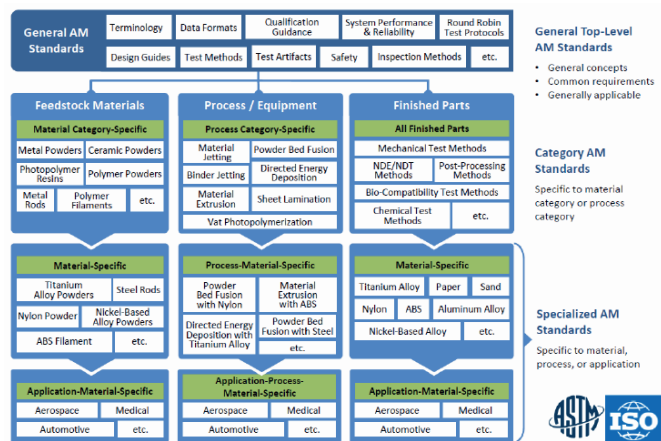
Figur 2. En framtida vision i en digital värld; ”Google for Laser” eller ”Ask Laser” enligt en idé från Bosch.



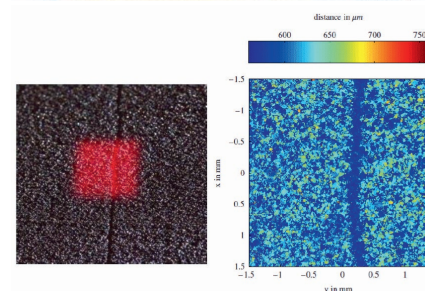
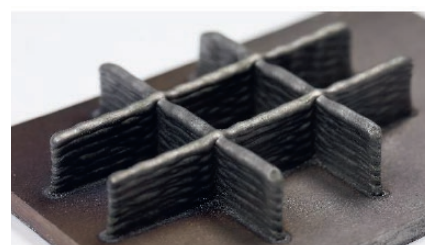
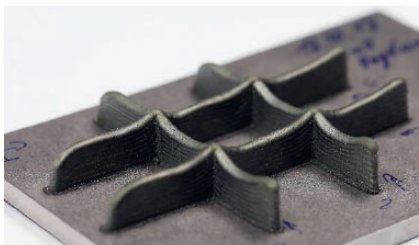
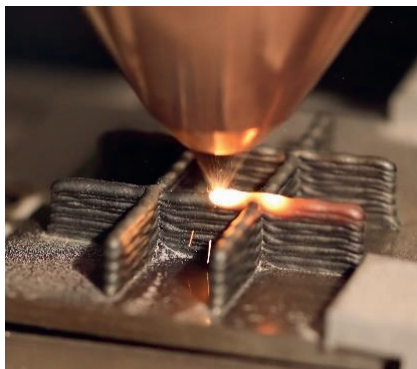
Figur 3. Schematisk skiss över flödet i Laserhub's affärsmodell, där man utnyttjar ledig maskinkapacitet hos olika företag för enklare laserbearbetning.

att underlätta användningen av additiv tillverkning [Fig. 4].

Då det gäller monitorering av LMD [Laser Metal Deposition] –processen har man hittills mest använt sig av pyrometrar och höghastighetskameror, men då inte så mycket för processövervakning i realtid utan mest som ett hjälpmedel att kontrollera processens status samt till förebyggande underhåll i form av prediktering av lämpliga serviceintervall. Nu börjar dock OCT [Optical Coherence Topography] användas för att mäta höjden på påläggningssträngarna, en metodik som undersöks inom ramen för det 3,7 miljo-



Figur 4. Terminologin inom den additiva tillverkningen kan ibland synas något förvirrande, men här har bl.a. amerikanska ASTM gjort lovvärda insatser för att strukturera såväl nomenklatur som standardisering.



Figur 5. Inom EU-projektet PARADISSE har man tagit fram ett påläggningsverktyg med "closed-loop"-funktion som säkerställer en konstant skiktuppbyggnad vid såväl pulver- som trådanvändning. Metodiken bygger på OCT och har visat sig även vara användbar vid pulverbäddts-tillverkning för att upptäcka defekter i de enskilda stelnings-skikten (t.h.).

ner euros stora projektet "PARADISSE". En av de tongivande parterna är Siemens som med sin mjukvara "Sinumerik 840D sl" avser att lansera ett LMD-verktyg, för såväl pulver som tråd, med inbyggd "closed-loop"-funktion som reglerar framföringshastigheten [Fig. 5]. Även vid SLM [Selective Laser Melting] kan OCT användas för processövervakning, både för att kontrollera byggplattformens horisontella orientering, men också då det gäller att upptäcka defekter i de olika stelnings-skikten.

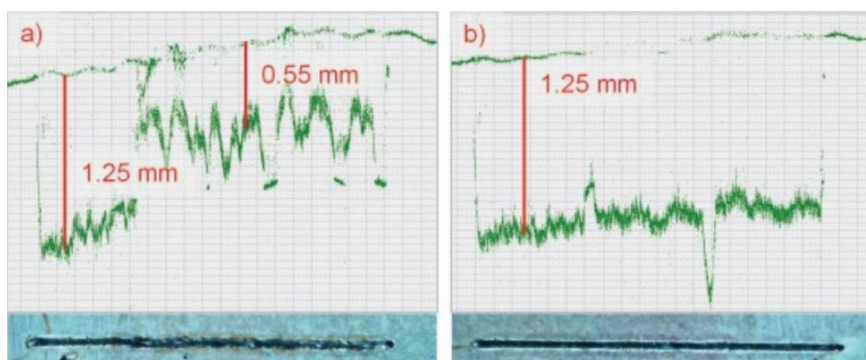
Som avslutning passade Dr. Kogel-Hollacher på att visa några av Precitecs påläggningsverktyg i form av varianterna YC52 och YC30 vilka kan utrustas med munstycken för såväl kontinuerlig som diskret pulvertillförsel. Vi fick även se ett annat innovativt munstycke från företaget POM [Precision Optical Manufacturing] utvecklat av dess grundare och laserguru, professor Jyoti Mazumder, vilket var försett med tre stycken integrerade kameror för processövervakning [Fig. 6].

Fjärrlasersvetsningen kräver alltmer sofistikerade verktyg

Nästa temablock under konferensen handlade om den senaste utvecklingen av verktyg för fjärrlasersvetsning, och innehöll tre intressanta föredrag från representanter från företag som tillhandahåller sådan utrustning. Först ut var Thibault Bautze från Blackbird Robotersysteme GmbH, som på senaste tiden varit en frekvent återkommande presentatör vid olika laserkonferenser, inte minst vid EALA [European Automotive Laser Applications Workshop] i Bad Nauheim. Även hans föredrag kom till stora delar att handla om OCT där den initiala funktionen har varit att mäta nyckelhålets djup och därmed övervaka penetrationsdjupet

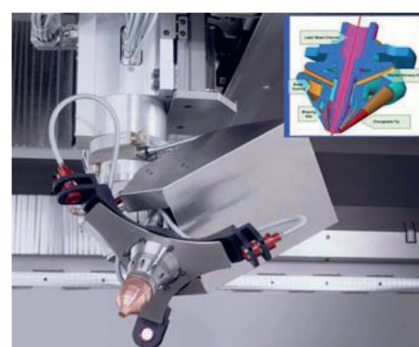
vid lasersvetsning. Eftersom mätningen sker koaxiellt med laserstrålen i ett trångt nyckelhål kan mätpunktens diameter inte överstiga 100 µm. Mätmetoden har hög upplösning och en av dess största fördelar är att den är immun mot övrig strålning och förekommande emissioner. Blackbird har bedrivit forskning kring OCT sedan 2007 och kunde marknadsföra sin första kommersiella lösning 2013 att användas vid linjär svetsning. Här påpekade Herrn Bautze att en förutsättning för att OCT skall fungera vid adaptiv lasersvetsning är att processen är någorlunda stabil [Fig. 7]!

För fjärrlasersvetsning har man nyligen lanserat ett unikt verktyg, vilken bygger



Figur 7. Utan en stabil svetsprocess fungerar OCT ej som processövervakningsverktyg, vilket framgår av dessa signalresponser. Endast vid svetsning av zinkbelagd plåt i skyddsgasatmosfär (t.h.) kan verkliga svetsdefekter urskiljas.

på att OCT-strålen har sin egen koaxiella 3D-"scanner". Resultat från dylik svetsning presenterades vid fjolårets AKL [Aachen Kolloquium Lasertechnik]-konferens där Florian Hanschmann [Cosma Engineering Europe] visade lösningen integrerad i ett intelliWELD-verktyg från företaget Scanlab, kopplat till en adaptiv reglering av lasereffekten. Detta gjorde att svetsprocessen anpassades till ändrade förutsättningar i form av ändrad ytbelägg-



Figur 6. Ett nytt, innovativt påläggningsverktyg från företaget POM med tre stycken integrerade kameror vilka monitorerar skiktjockleken. Verktöget medger en återkoppling i realtid så att lasereffekten kan justeras i de fall avvikelser från ett "bör"-värde uppstår.

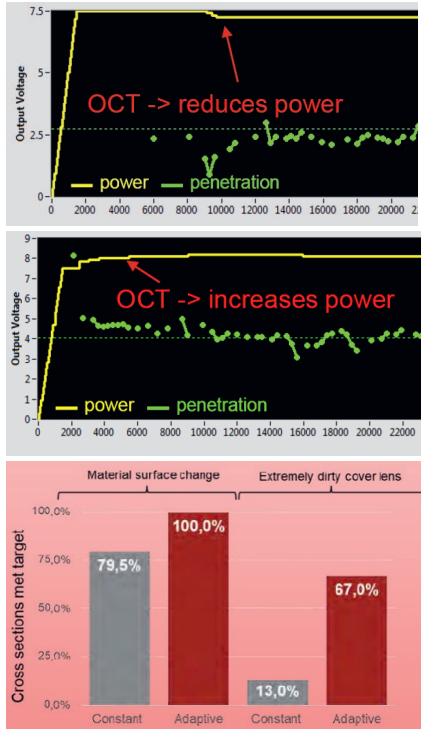
ning hos den bearbetade komponenten eller gradvis kontaminering av skyddsglaslet [Fig. 8]. Nya användningsområden för OCT som omnämndes var fogföljning, mätning av geometrin hos svetsens toppyta och som hjälp för att överbygga spalter vid lasersvetsning av kälfgogar. I det sistnämnda fallet låter man OCT-strålen, med sin fokuspunkt, rotera i ett cirkulärt mönster.

Näste talare var Matthias Kühnel från

II-VI HighYag. Företagsnamnet härrör från den andra och sjätte kolumnen i det periodiska systemet, vars grundämnen [Zn, Cd, S, Se och Te] möjliggör skapandet av en optisk kristallsammansättning som kan generera IR-strålning. Bland nyheterna lyfte Herrn Kühnel fram mjukvaran "RLSK Studio" för fjärrlaserbearbetning som möjliggör såväl fogsökning som fognöjning, där det senare klarar processhastigheter långt över 10 m/min. Mjukvaruprogrammet är kompatibelt med "welding-on-the-fly", och "scanner"-verktygets arbetsfält uppgår till 200×300×200 mm. Verktöget möjliggör också videoinspelning av svetsprocessen. En annan facilitet i den nya programvaran, utvecklad i samarbete med Lear Corporation, gör att man utifrån ett "bibliotek" automatiskt kan skapa och märka DMC [Data Matrix Code]- eller QRC [Quick Response Code]-koder där märkningstiden ligger under 1 sekund [Fig. 9]!

En annan nyhet var verktöget "HIGHmotion 2D", främst avsett för e-mobility-applikationer som exempelvis svetsning av batterier. Verktöget kan hantera laserstrålar i såväl det infraröda [1.030-1.100 nm] som gröna [515 nm] våglängdsområdet, och lasereffekter upp t.o.m. 6 kW [Fig. 10]! Arbetsfältet är 200×300 mm med ett arbetsavstånd på mer än 0,5 meter. "HIGHmotion 2D" är försett med en f-theta lens, med minimal fokalpunktsförskjutning, vilken Herrn Kühnel ansåg vara nödvändig vid just batterisvetsning då linstypen medger en flack infallsvinkel mot arbetsstycket för laserstrålen, något som är nödvändigt för att undvika skuggningseffekter från fixturelement.

Sessionen avslutades med en bekantning från LANE [Laser Assisted Net Shape Engineering] –konferensen i Fürth förra året, nämligen diplomingenjören Daniel Schwab från ARGES GmbH. Denne gentleman var nämligen en av talarna vid den session kring nya laserkällor och –verktyg som jag hade förmånen att moderera vid sagda laserkonferens. Den gången visade Daniel upp företagets s.k. sammansatta "scanner"-verktyg, men nu fokuserades presentationen inledningsvis på den mer välkända produkten "Remote Welding Elephant" – ett verktyg avsett för fjärrlaser-svetsning med fiberlasrar i det infraröda våglängdsområdet [Fig. 11]. Verktöget, som är vattenkyllt, kan fås med tre olika öppningar, 21, 36 och 50 mm, beroende på vilket arbetsområde som önskas. Vidare ingår en snabb och styv z-axel för att täcka in större arbetsfält och



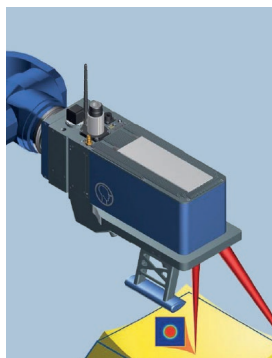
Figur 8. Genom att använda OCT i s.k. adaptiv mode kan man bibehålla avsett penetrationsdjup vid svetsning även om plåtens beläggning varierar eller fokuseroptiken kontamineras.



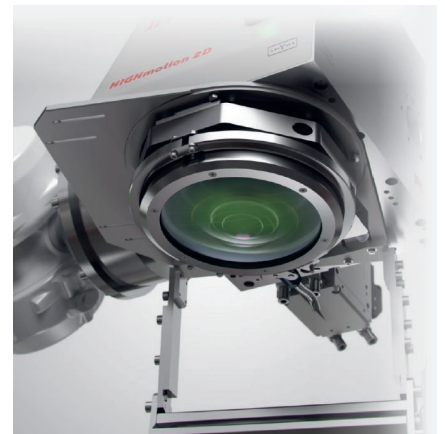
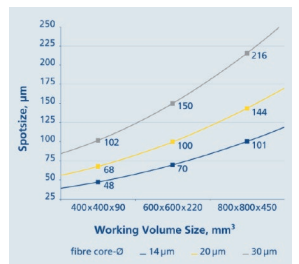
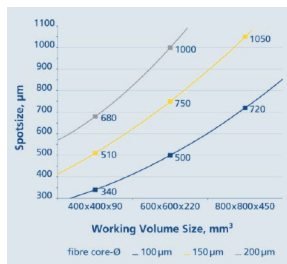
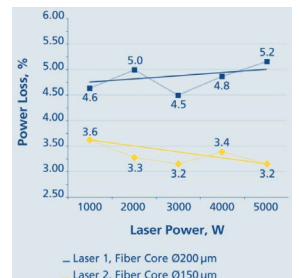
Figur 9. Med mjukvaruprogrammet "RLSK Studio" kan man märka önskad QRC- eller DMC-kod på mindre än en sekund



Figur 11. Diplomingenjören Daniel Schwab presenterade ARGES' "Remote Welding Elephant" där effekt-förlusterna ligger under 5%.



Figur 12. Arbetsområdet för "Remote Welding Elephant" som funktion av fokalpunktsdiameter vid fjärrlaser-svetsning med "Multi Mode" (t.v.) respektive "Single Mode" (t.h.).



Figur 10. II-VI HighYags senaste verktyg "HIGHmotion 2D" är tillverkat i läcker, rostfri design, och försett med en f-theta lens som ger minimal fokalpunktsförskjutning även vid så höga lasereffekter som 6 kW. Denna typ av lens är också fördelaktig då den ger en flack infallsvinkel för laserstrålen och därmed undviker fixturelements skuggningseffekter vid exempelvis batterisvetsning.

samtidigt kompensera för fokalpunktsförskjutningar, och effektförlusterna sades ligga under 5%. Långtidsegenskaperna är stabila med positioneringstoleranser inom 3 µm, och har utprovats inom temperaturintervallet -40 - +150 °C. ”Remote Welding Elephant” kan kopplas till såväl SM [Single Mode]- som MM [Multi Mode] –fiberlasrar beroende på vilka fokalpunktsstorlekar och arbetsområden som är aktuella [Fig. 12].

Huvudsakliga användare av ”Remote Welding Elephant” hittar vi i bilindustrin med kunder som Daimler, Toyota, BMW och Audi. ARGES’ senaste produkt i portföljen heter ”Fiber Tiger”, som är ett kompakt och lätt verktyg för tredimensionell bearbetning i form av RLW [Remote Laser Welding], RLC [Remote Laser Cutting] och SLM. Öppningen för laserstrålen har en diameter på 36 mm och z-axeln är extremt snabb med en accelerationskapacitet på 800 m/sek². Typiska fokalpunktsdiametrar är 40-80 µm, arbetsavståndet ligger mellan 300-600 mm med ett arbetsfält på 350×350×100 mm. Som option erbjuds en sensorport för pyrometer- eller plasmaövervakning, och vidare finns möjlighet att integrera OCT med en upplösning på 8 µm och datainsamlingsfrekvens i kHz-området.

Industriell laseranvändning

Det följande temablocket bestod av mer applikationsinriktade presentationer, och här var det meningen att vi inledningsvis skulle få höra något kring den senaste utvecklingen av laserlödning inom VW-koncernen. Dock hade min gamle kollega Thorge **Hammer** tvingats lämna återbud i sent skede, men ersattes nu på ett föredömligt sätt av en annan bekant LAF-profil, nämligen Dr. Oliver **Meier** från Laser on Demand. Han inledde med att berätta om en trend inom branschen som han observerat, nämligen att kombinera gamla och nya laserutrustningar, vilket exemplifierades med en låginvesteringsanläggning för LMD i Estland [Fig. 13]. Här hade man återanvänt robot [KUKA KR 30 Jet], lägesomställare och en 4 kW diodlaser [Laserline LDF-4000-40], medan nyinvesteringar gjorts i påläggningsverktyg, distributionsfiber och pulvermatare [GTV]. Själv avslöjade den gode Oliver i en privat konversation med mig att han just köpt på sig två begagnade diskasrar på vardera 4 kW från Volvo Personvagnars Torslanda-fabrik.

Vi kände igen mycket från hans presentationer vid tidigare LAF-konferenser



Figur 13. Ett exempel på en låginvesteringsanläggning för laserpåläggning i Estland, där man återanvänt laserkälla och robot men nyinvesterat i de unika komponenterna för LMD.

såsom praktikfallet med aluminiumbehållare [AlMg4,5Mn] för rallybilar, av vilka man tillverkat en lågvolymsserie om 20 enheter som lasersvetsats med hjälp av en ILV-”scanner” och en fokalpunktsdiameter på blott 150 µm. Laserkällan utgjordes av en 2 kW fiberlaser från Rofin-Sinar [FL-020]. En annan bekant applikation handlade om lasersvetsning av en ångpanna för produktion av biomassa där man lasersvetsade 75 stycken 3 m långa rör i materialen P235GHTC2/P265GH med en vägg tjocklek på 4 mm. För att förbättra noggrannheten vid lasersvetsning har Laser on Demand inlett ett samarbete med företaget IBS Automation med målsättningen att ligga inom ett toleransområde på ±70 µm vid svets hastigheter kring 6 m/min. Annars är ju Dr. Meiers affärsidé att tillhandahålla mobila utrustningar, som gör att man kan utföra det laserrelaterade arbetet ute hos kunderna [Fig. 14]. Dessa mobila enheter transporteras cirka 15.000 km per år, och här fick vi se en dylik container utrustad med en 5 kW diodlaser [Laserline LDF-5.000-40] och 30 meter optisk fiber med 400 µm diameter.

Olivers avslutning visade på ett nytt användningsområde för lasertekniken. Under andra världskriget fälldes 1,3 miljoner ton bomber över Tyskland. Av dessa var mellan 12-25% s.k. blindgångare av vilka man till dags dato återfunnet och desarmerat färre än 60%. Årligen hittar man cirka 25 grovkalibriga blindgångare i Berlin och ungefär 300 stycken i förbundslandet Nordrhein-Westfalen. I samarbete med LZH [LaserZentrum Hannover] har man tagit fram en prototyp [DEFLAG] för att med laserstrålen desarmera bomben genom s.k. deflagration, som resulterar i lägre sprängkraft och därmed utgör en säkrare desarmeringsmetod. Av förklarliga skäl använder man sig av en lågkostnadsvariant för ett sådant verktyg [Fig. 15]!

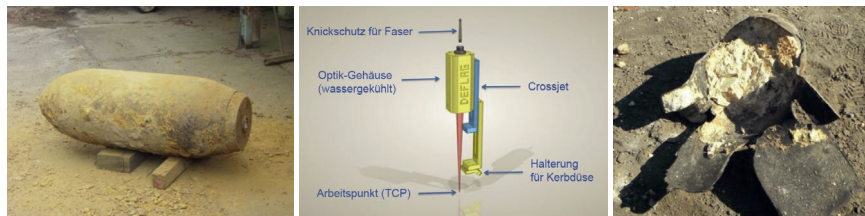


Figur 14. Affärsidén hos företaget Laser on Demand är att med mobila enheter kunna utföra arbeten ute hos kunderna, något som underlättar då stora, svårlyftade komponenter skall bearbetas.

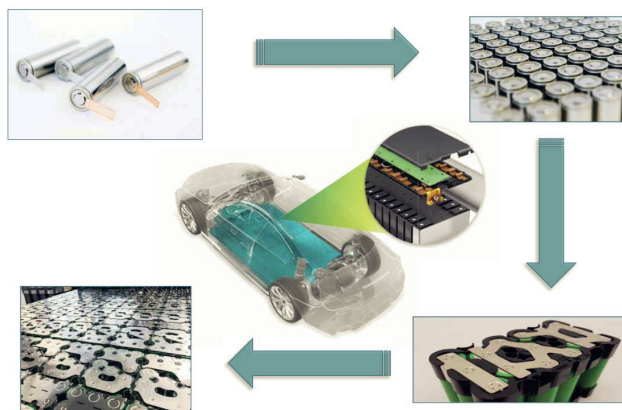
En av de mera intressanta presentationerna hölls av Dr. Dmitrij **Walter** från företaget Manz AG och handlade om lasersvetsning vid batteriproduktion. Företaget har 17.000 medarbetare ”worldwide” och huvudsäte i Reutlingen nära Stuttgart. Man tillverkar tre olika typer

av battericeller [cylindriska, prismatiska och s.k. påsceller], vilka sammanfogas till moduler, och dessa byggs sedan samman till vad vi kallar batteripack [Fig. 16]. De prismatiska cellerna omsluts av ett aluminiumhölje som lasersvetsas med höga krav på vibrationstålighet och täthet. 16 kW hög lasereffekt och en svets hastighet kring 880 mm/sek är gynnsamt då det gäller att undertrycka porbildning och här refererade Dr. Walter till de forskningsresultat som tidigare presenterats av Florian Fetzer [Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), se LaserNytt 2-2018].

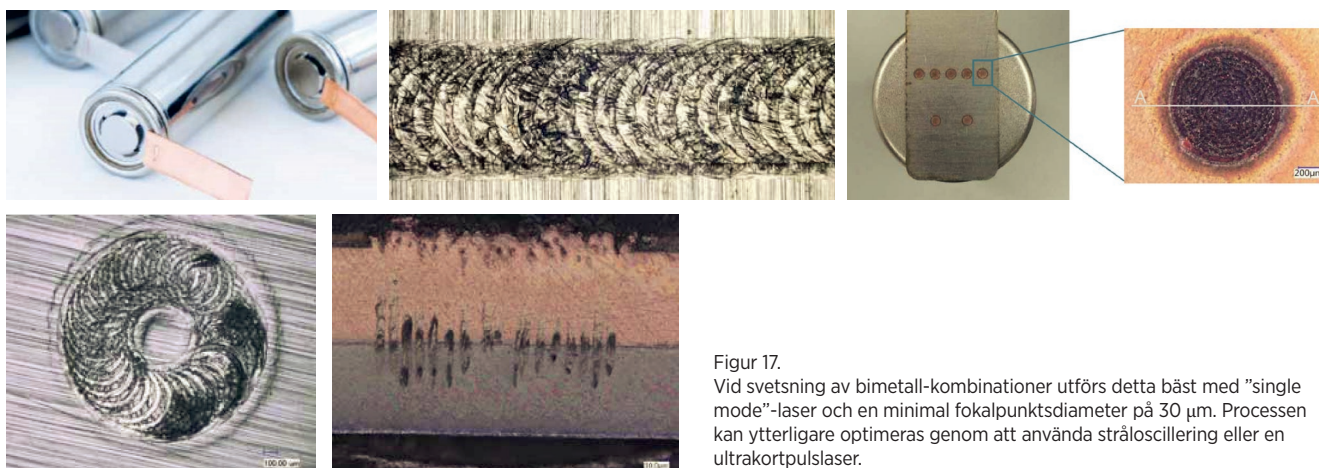
Vid kontaktering av de cylindriska cellerna rör det sig om en svårare materialkombination för lasersvetsning, nämligen koppar till nickelpläterat stål/alternativt aluminium. Här är ett kontrollerat penetrationsdjup viktigt, samtidigt som det föreligger höga krav på hållfasthet och duktilitet, lågt elektriskt motstånd över fogen samt tolerans mot temperaturväxlingar. Initialt svetsades dessa komponenter med multimode, fokalpunktsdiameter mellan 600-700 µm och hög lasereffekt.



Figur 15. Ytterligare ett användningsområde för lasertekniken! Med verktygen "DEFLAG", som har en extremt lång fokallängd, har man på ett säkert sätt kunnat desarmera blindgångare från andra världskriget.



Figur 16. Framtidens e-mobility tycks bli nästa stora användningsområde för lasersvetsning, då såväl kontaktering som sammanbyggnad av, i det här fallet, cylindriska celler till moduler kan ske med högsta produktivitet.

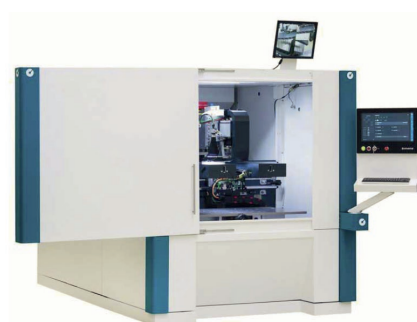


Figur 17. Vid svetsning av bimetall-kombinationer utförs detta bäst med "single mode"-laser och en minimal fokalpunktsdiameter på 30 µm. Processen kan ytterligare optimeras genom att använda stråloscillering eller en ultrakortpuls laser.

Men för att minimera uppkomsten av tjocka intermetalliska faser i fogen har det visat sig vara gynnsamt att använda "single mode" och en liten fokalpunkt med blott 30 µm diameter. Detta minskar även risken för porbildning och minimerar värmepåverkan. Om man dessutom oscillerar laserstrålen resulterar detta i en betydligt stabilare svetsprocess [Fig. 17]. Dr. Walter redogjorde också för några försök där man använt ultrakortpuls laser för svetsning av koppar till rostfritt. Laserkällans medeleffekt låg på 200 W, men där pulseffekterna uppgick till mellan 10-15 kW! Inkopplingsmekanismen för laserstrålen tycks bli gynnsam trots det högreflektiva kopparmaterialet, samtidigt som man får ett stabilt svetsdjup och minimala intermetalliska faser i fogen.

Avslutningsvis presenterades den egenutvecklade maskinen BLS500 [Battery Laser System, Fig. 18] för lasersvetsning av cylindriska celler där den extremt korta svetstiden per cell [50-100 µs] gör att en modul som består av 600 celler färdigställs på under 90 sekunder! På en fråga från auditoriet rörande kvalitetssäkring av lasersvetsarna menade Dr. Walter att man förlitar sig på att ha kontroll över processparametrarna, varför man för närvarande inte överväger att integrera OCT-funktionen i sina maskiner.

Vi har vid åtskilliga andra laserkonferenser hört om nyttan med att lasersvetsa i vakuum eller åtminstone under reducerat lufttryck kring 10 mbar. Detta utgjorde temat vid nästa presentation som hölls av Peter Leipe från maskinbyggeriet



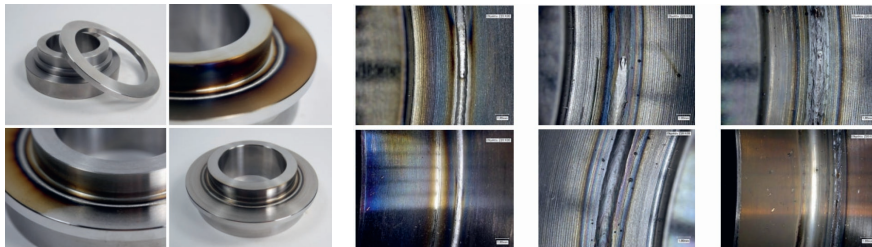
Figur 18. Företaget Manz' egenutvecklade maskin för lasersvetsning av battericeller är försedd med såväl stationär optik som "scanner"-verktyg, vilka båda klarar olika våglängder och lasereffekter upp till 6 kW.

SITEC där han talade om att på detta sätt, som han kallade "Clean Welding", lasersvetsa "svåra" material sprutfritt. I SITECs Technologiezentrum förfogar man över

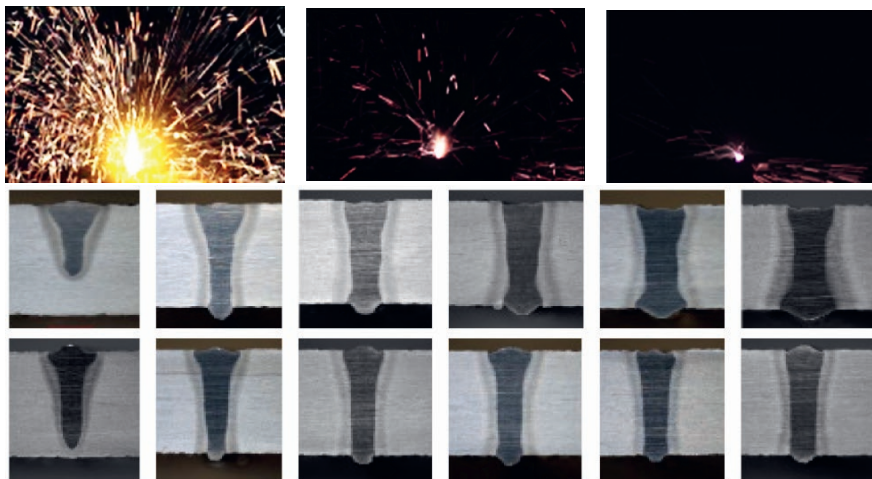
inte mindre är 15 laserkällor, och här hade man svetsat 3,9 mm tjockt 16MnCr5-material med synnerligen god kvalitet med parametrarna 2,1 kW lasereffekt och en svets hastighet kring 3 m/min. Eftersom svetsningen måste ske i en sluten kammare finns vissa begränsningar vad gäller komponenternas storlek, och Herrn Leipe menade att processen passar bäst vid svetsning av rotationssymmetriska detaljer under ett stationärt laserverktyg [Fig. 19].

TU [Technisches Universität] Braunschweig, under professor Klaus Dilgers ledning har ju bedrivit forskning inom detta område under många år och därför har SITEC ett intimt samarbete med detta universitet, vilket bl.a. resulterat i att man kunnat svetsa samman aluminiumlegeringarna AA400A-72 med AA6082-T6 helt porfritt. Andra fördelar med att svetsa under reducerat lufttryck är en djupare penetration, lägre värmepåverkan och därmed mindre distorsion hos komponenterna, vilket innebär minimerad efterbearbetning [Fig. 20]. Herrn Leipe menade också att svetsa under reducerat lufttryck kan vara ekonomiskt fördelaktigt då det krävs lägre lasereffekt och man inte heller behöver ha speciella rökgasutsug. I en jämförelse mellan "Clean Welding" och konventionell lasersvetsning i atmosfär skulle man på så sätt kunna reducera energiförbrukningen med 19% och investeringskostnaden med motsvarande 6,5%. SITEC lanserar nu sin LS-serie med två separata kammare för denna typ av svetsning [Fig. 21], och man förväntar sig nå stora fördelar med en sådan utrustning vid svetsning av aluminium- och kopparlegeringar.

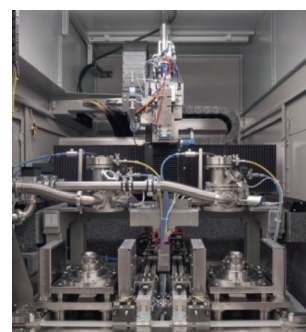
Inom ämnesområdet laserhybrid-svetsning finns det väl knappast någon auktoritet som är större än Dr. Herbert Staufer från Fronius International GmbH i österrikiska Wels. Denna gång berättade den gode Herbert om en metod där laserstrålen kombinerades med en tandem-uppställning för MAG [Metal Active Gas] –svetsning främst avsedd för tillverkning av axlar till fordon. Laserstrålen riktas här 5° "stickande" för att undvika reflexioner, medan de två brännarna positioneras med 30° respektive 38° lutning och med 8 mm mellan de båda ljusbågarna och 18 mm utstick. I grundläggande försök på S355J-material hade man använt tillsatstråd av G3Si1, vars diameter var 1,2 mm för den främre brännaren och 1,0 mm för den bakre, och svetsningen hade utförts "fallande" med 10° lutning [Fig. 22]. Finessen i detta kombinationsverktyg ligger i att



Figur 19. Eftersom svetsning i vakuum kräver en kammare av begränsad storlek passar metodiken bäst för rotationssymmetriska detaljer där svetsningen utförs med stationär laserstråle. Detaljfotona visar fr. v. svetsning med "Clean Welding", med skyddsgasen Argon samt helt utan skyddsgas.



Figur 20. Överst fr. v. svetsning av 16MnCr5 i atmosfär (1.000 mbar), 100 mbar och 10mbar. Under ses skillnaden i penetrationsdjup vid svetsning i atmosfär (överst) och 10 mbar vid en ökande lasereffekt från 1,5 till 6 kW.



Figur 21. SITECs LS-serie har dubbla vakuum-kammare för ökad produktivitet vid svetsning av t.ex. aluminium- och kopparlegeringar.

båda trådarna matas med samma motor och är synkroniserade vid 155 Hz och en fasomriktning på 180°. Med en gemensam motor kan svetsverktygets volym och vikt minimeras. Skyddsgasmiljön utgjordes av en blandning av Argon [96%] och Oxygen [4%]. P.g.a. laserns goda penetrationsförmåga kan överlappet vid kälsvetsar reduceras med 40%, och inverkan av spalt mellan plåtarna får mindre betydelse för svetsens statiska hållfasthet. Däremot visade det sig att man fick en 50 Hv3 lägre hårdhet i svetsgodset då det förelåg en spalt mellan plåtarna [Fig. 23]!

Två praktikfall avslutade presentationen där det första handlade om svetsning av bilramar i stål, vilken hade utförts med 6 kW lasereffekt, 7 kW effekt från MAG-

processen och en framföringshastighet på 5,2 m/min. Det andra exemplet var aluminiumsvetsning av batterihöljen i AA6xxx-legering med väggjocklekar mellan 2-6 mm. Höljenas ramar mäter 2,2x1,6 m, och här använde man AlSi5 som tillsatsmaterial [Fig. 24]

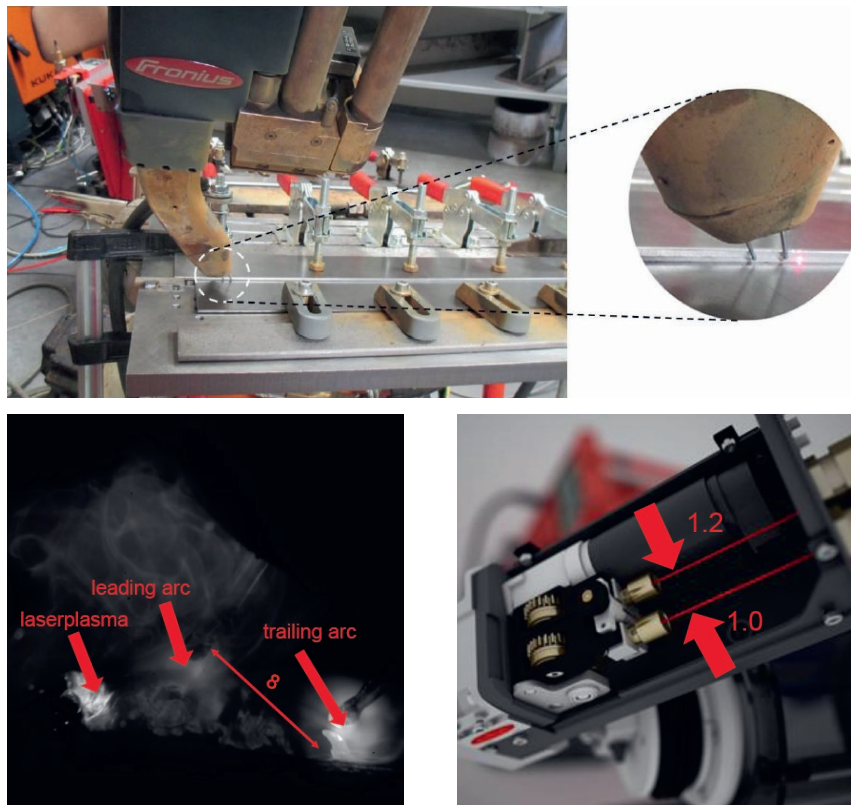
Verktyg för stråldiagnostik

Ytterligare en bekant från sessionen kring nya laserkällor och –verktyg vid LA-NE-konferensen 2018 dök nu upp i form av Stephan Holesch från PRIMES, vilket gjorde att vi fick en repetition av företagets nya verktyg för stråldiagnostik vid fjärrlaserbearbetning [se LaserNytt 3-2018]. Det finns en mängd verktyg på marknaden för diagnostik av laserstrålens kaustik, men

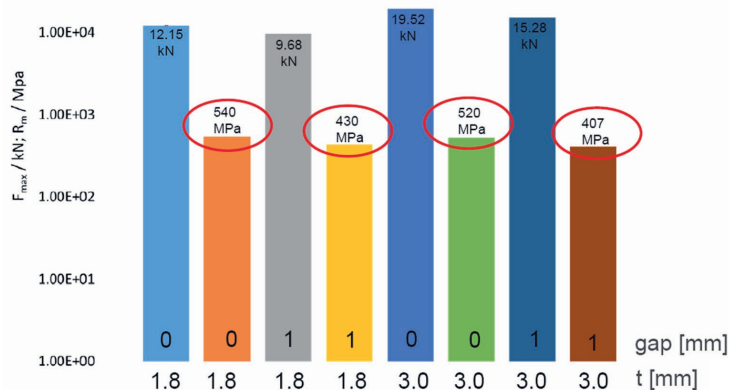
inget som är speciellt utvecklat för exempelvis SLM där strålen har en varierande infallsvinkel mot arbetsstycket. Därför har PRIMES tagit fram en prototyp där en fotodiod registrerar den ljusintensitet som sprids då laserstrålen passerar ett rastermönster i en glasplatta. Via en diffusionsplatta kan en andra fotodiod fungera som en "on-off"-knapp så länge plattan belyses av laserljuset [Fig. 25]. Prototypen har yttermått 12×12×9 cm och kan hantera lasereffekter upp till 1,5 kW med en energitäthet i fokalpunkten på 100 MW/cm². Stråldiametern måste dock vara större än 50 µm, samtidigt som "scanning"-hastigheten är maximerad till 10 m/s och infallsvinkeln mot horisontalplanet inte får överstiga ± 20°. Herrn Holesch visade ett applikationsexempel där verktyget hade integrerats i en SLM-maskin som betjänades av en 400 W SM-fiberlaser och ett "intelliScan20"-verktyg med en theta-lins med 420 mm brännvidd.

Genom att mäta stråldiametern tre Rayleigh-längder ovanför fokalplanet kan man snabbt identifiera en fokalpunktsförskjutning då en minskning av laserstrålens diameter innebär att fokalpunkten lyfts upp i förhållande till den yta som bearbetas. Även hur startpunkten för t.ex. en kort svets påverkas av varierande "scanning"-hastighet kan identifieras med detta verktyg [Fig. 26]. För att skapa en kalibreringskurva som tar hand om denna tidsförskjutningspåverkan krävs normalt ett 20-tal olika hastigheter var och en utförd med 10 repetitioner. Denna information kan nu införskaffas inom en tidrymd på blott 3 sekunder med detta nya PRIMES-verktyg. Herrn Holesch avslutade med att säga att för SLM-maskiner med flera "scanner"-verktyg och överlappande arbetsfält kan man lämpligtvis använda ett analysverktyg för varje.

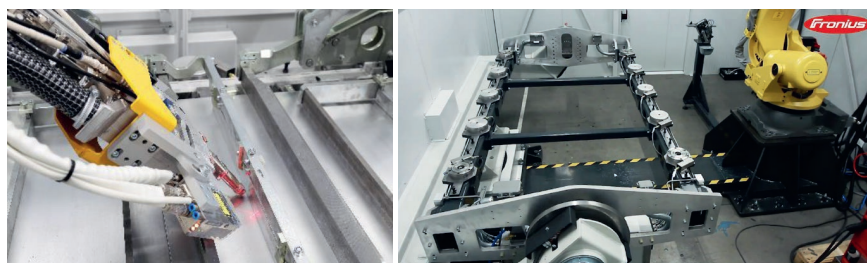
Ett från fjolårets EALA-konferens känt ansikte var Christian Dini från MKS Instruments Ophir Spiricon Europe GmbH som ingår i Newport-koncernen. Han menade att vare sig fokalpunktens z-position, energitätheten i densamma samt strålgeometrin förhåller sig konstanta under långvarig laserbearbetning, varför det krävs verktyg som kan garantera en reproducerbar process. Detta underlättar också då processdata framtagna i laboriemiljö skall överföras till en produktionsdito. Ett sådant verktyg är MKS-Ophirs "Beam Watch AM", som kontaktlöst kan analysera laserstrålens kaustik vid upp till 100 kW effekt, där verktyget uppfyller mätstandarder som ISO13694 och ISO11146, och



Figur 22. Det innovativa svetsverktyget för "laser-tandem-hybrid" från Fronius kombinerar laserstrålen med en twin-MAG-uppställning. Trådarna, vilka kan ha olika diametrar, matas med en gemensam motor, och laserstrålen orienteras något "stickande", medan avståndet mellan ljusbågarna från MAG-brännarna är 8 mm och trådutstickan 18 mm.



Figur 23. Att svetsa med spalt mellan plåtarna har minimal inverkan på fogens statistiska hållfasthet när man använder "laser-tandem-hybrid"-metoden.

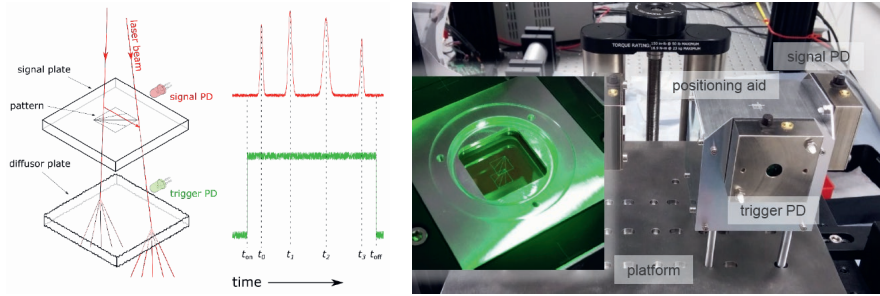


Figur 24. Svetsning av batterihöljen och -ramar för e-mobility, tillverkade i aluminium, svetsas bäst med "laser-tandem-hybrid"-metoden med detaljerna förmonterade i en vridfixtur.

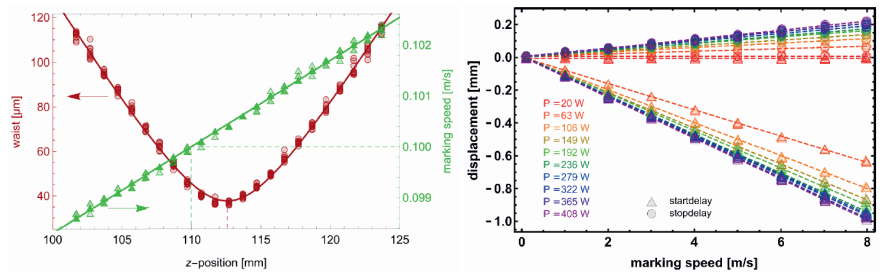
kan betecknas som underhållsfritt [Fig. 27]. Det mäter fokalpunktsförskjutningar i realtid och är enkelt att använda då det kalibreras inom loppet av några minuter och själva mätningen sker på sekunder. Våglängder mellan 900-1.100 nm är mätbara, men Herr Dini menade att kortare våglängder ger den bästa mät noggrannheten. Verktöget kan exempelvis mäta en kontinuerlig lasereffekt på 1 kW under 2 minuter utan någon form av kylning! Just vid additiv tillverkning är fokalpunktsförskjutningar viktiga att kunna kontrollera, och ett exempel med en 75 µm stor fokalfunkt och 400 W lasereffekt visade sig ge en förskjutning på en hel millimeter redan efter 30 sekunder [Fig. 27]. För att ha utvecklat "Beam Watch AM" tilldelades MKS-Ophir det prestigefyllda "Platinum Innovation Award" för 2018 som delas ut av facktidskriften Laser Focus World.

Additiv tillverkning med laser

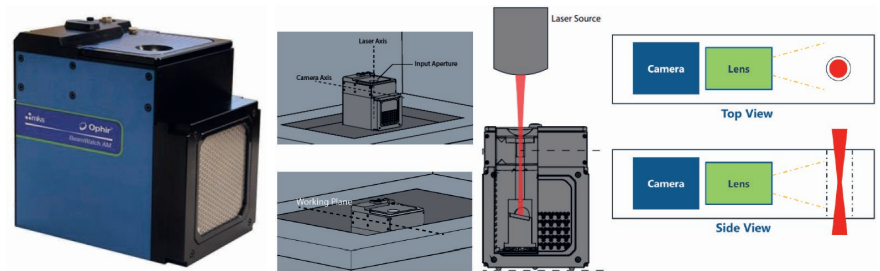
Vid LAF2014 kunde vi lyssna till en redogörelse från Dr. Takashi Ishide [Mitsubishi Heavy Industries Ltd.], och nu återkom denne herre som förste talare i en session som handlade om additiv tillverkning med hjälp av laserteknik. Tydligt har Dr. Ishida en viss förkärlek för den laserforskning som sker i USA, som han menade ligger i täten just då det gäller AM [Additive Manufacturing]. Därför inledde han med en bred exposé över olika amerikanska tillverkare av dylika maskiner, innan han gick vidare med att beskriva state-of-the-art och några intressanta innovationer. GE Aviation är en ledande aktör då det gäller additiv tillverkning och man har idag tillgång till en SLM-maskin med en arbetsvolym på 1.100×1.100×300 mm som betjänas av fyra laserkällor om vardera 1,5 kW för att på så vis öka produktiviteten. Ett annat innovativt exempel var hämtat från Qinghua University, som tagit fram en utrustning där de tillverkade objektens kontur utförs med laser medan fyllnaden med bulkmaterial görs med elektronstråle [Fig. 28]. Då det gäller LMD-tillverkning med tråd erbjuder företaget Markforged pulverfyllda trådar för ändamålet, medan Mitsubishi självt mest är intresserat av uppbyggnad och påläggning med pulver. Här har man bl.a. studerat gasatomiseringsprocessen vid tillverkning av själva pulvret och kunnat konstatera att ett ökat gastryck i processen ger en finare kornstruktur. Dr. Ishide visade också upp ett imponerande exempel på flödessimulering i mikroskala på partikelnivå, som ett stöd för proces-



Figur 25. T.v. principen för PRIMES' diagnostikverktyg med vars hjälp man kan analysera laserstrålens kaustik, och t.h. en prototyp med ett detaljfoto på glasplattan med dess rastermönster.



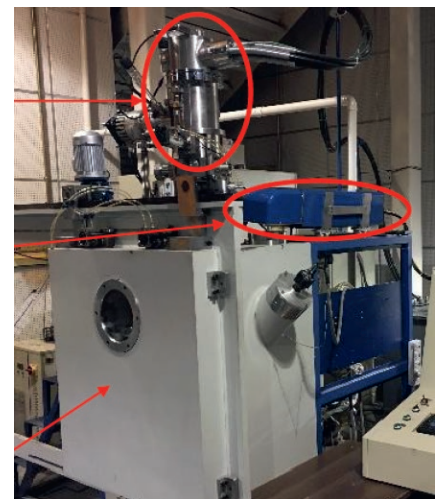
Figur 26. Några av de parametrar som kan mätas med PRIMES' strålanalysator; t.v. fokalpunktspositionering som funktion av stråldiameter och svets hastighet, t.h. tidsfördröjningens inverkan på start- och stoppositioner vid korta lasersvets utförda med olika "scanning"-hastigheter och lasereffekter.



Figur 27. MKS-Ophirs strålanalysverktyg "Beam Watch AM" är avsett att användas vid SLM-tillverkning där en förskjutning av fokalfunkten är mindre önskvärd. Exempelvis kan 400 W leda till en sådan på en hel millimeter redan efter 30 sekunders bearbetning.

soptimering [Fig. 29]. Tillsammans med BIAS bedriver Mitsubishi ett samarbete för att utveckla processövervakning vid SLM-tillverkning som bygger på en kombination av s.k. fringe-teknologi och pyrometerkontroll, men enligt Dr. Ishide är även OCT ett intressant hjälpmedel för detta. Avslutningsvis sade han att det ur konstruktiva aspekter är bra att integrera stödstrukturerna i komponenterna för att på så sätt minimera tidskrävande efterarbete i form av avlägsnandet av dessa.

Näste talare i sessionen som handlade om additiv tillverkning var Dr. Rainer Beccard från LUNOVU GmbH, grundat 2013 som ett avknopningsföretag från ILT [Institut für Lasertechnik] i Aachen. Man tillverkar egna lasermaskiner och -system, främst för LMD där man med denna teknik fokuserar på att skapa tredimensionella påbyggnader på tredimensionella komponenter [Fig. 30]. Målsättningen är att utrustningarna skall vara lika enkla att handha som exempelvis



Figur 28. Ett annorlunda exempel på hybridmaskin! Vid Qinghua University i Kina har man tagit fram en AM-maskin där en laserstråle med 200 W effekt skapar komponentens kontur, medan fyllnaden med bulkmaterial sker med elektronstråle och 3 kW effekt. Pulverbädden kan värmas upp till 1.000 °C och byggvolymen är 200x200x200 mm.

en fräsmaskin.

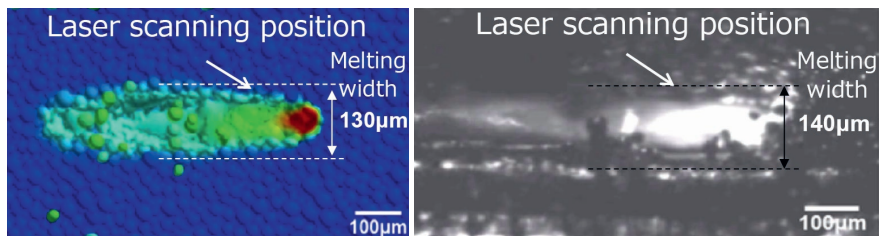
Dr. Beccard påpekade vikten av att ha en komplett, intelligent processkedja vid LMD där man inleder med att ”scanna” geometrin av den artikel som skall repareras eller korrigeras i de fall den tillverkade komponenten fått en felaktig form. Därefter visualiseras det hela i ett CAD [Computer Aided Design] –program, varefter ett CAM [Computer Aided Manufacturing] –program definierar verktygsrörelser och övriga processparametrar. Beträffande framtiden såg Dr. Beccard en växande marknad för kombinationsmaskiner för AM-tillverkning där t.ex. 95% av produktionstiden utgjordes av konventionell bearbetning och kanske endast 5% av LMD. Andra framtidsvisioner var att använda olika pulvermaterial för att optimera komponenterna, samt att maskinerna kommer att bli mer intelligenta och självlärande.

Min gode vän Dr. Peter Hoffmann hade fått förhinder med kort varsel, varför hans kollega vid ERLAS Erlanger Lasertechnik GmbH, Stefan **Gropp**, fick ta över den planerade presentationen. Han inledde med att beskriva det kombinationsverktyg för laserhårdning och –påläggning ”HardClad”, vilket jag beskrev i förra numret av LaserNytt. Med ett enkelt verktygsbyte kan man även använda detta för invändig beläggning av rör [Fig. 31].

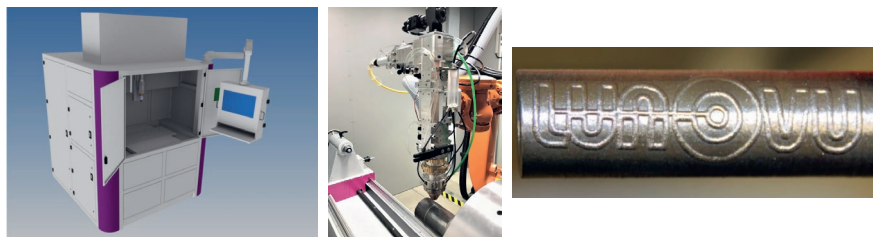
Eftersom sessionen handlade om additiv tillverkning kom hans presentation att fokusera på LMD, och här kunde vi se ett praktikfall där man via ”off-line”-programmering av robotbanan reparerar ett pressgjutningsverktyg. ERLAS’ senaste verktyg för LMD är försett med pendlingsfunktion och pyrometer för temperaturövervakning i området 600-2.300 °C. Det är försett med en spegelrevolver för 4 speglar som kan ge olika fokuspunktsstorlekar och –geometrier; en rund med 4 mm diameter samt tre stycken fyrkantiga: 15×15 mm, 45×6 mm och 35×8 mm. Arbetsavståndet är 269,5 mm och verktyget är kompakt med yttermått 250×200×150 mm och väger cirka 15 kg [Fig. 32].

I laboratoriet har man vidare installerat en mobil portalrobot med lägesomställare för laserpåläggning med det imponerande arbetsomfånget 1×1×0,6 m [Fig. 33]. Accelerationen för såväl x- som y- och z-axel ligger på 5 m/s², och maskinen klarar framföringshastigheter upp till 1 m/sek och positioneringsnoggrannheten är $\leq \pm 0,1$ mm.

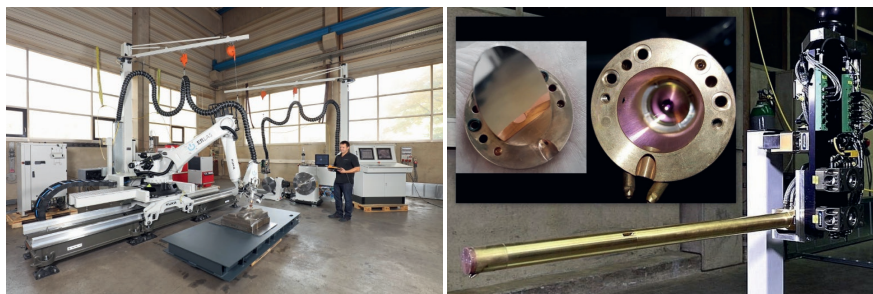
Avslutningsvis kunde vi höra om hur



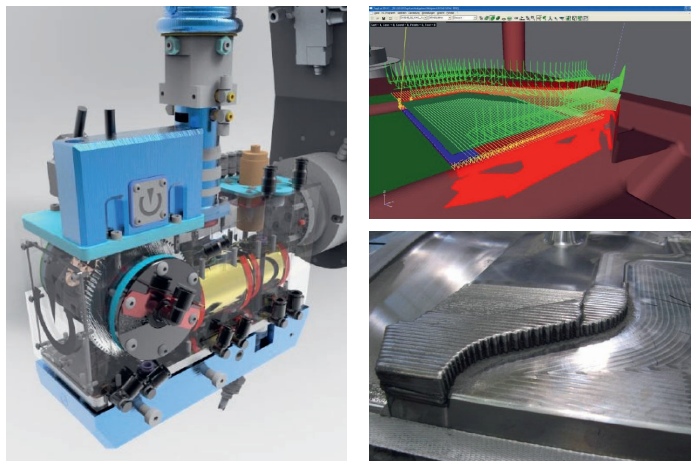
Figur 29. Imponerande överensstämmelse mellan flödessimulering och höghastighetsfilmning av en SLM-process.



Figur 30. Företaget LUNOVO i Herzogenrath tillverkar egna AM-maskiner, främst för pulverdeponering, där man fokuserar på att bygga 3D-strukturer på tredimensionella objekt (t.h.).



Figur 31. Med ett enkelt verktygsbyte kan ERLAS’ verktyg ”HardClad” även användas för invändig beläggning av rör.



Figur 32. ERLAS’ senaste verktyg för pulverdeposition är försett med pendlingsfunktion och temperaturövervakning via en pyrometer. Verktyget är kompakt och väger cirka 15 kg, och kan t.ex. användas då ett pressgjutningsverktyg repareras med LMD via ”off-line”-programmering från en CAD-modell (t.h.).

man visualiserade pulverflödet genom att belysa det med laser och sedan registrera detsamma med en höghastighetskamera. Detta hade lett fram till ett innovativt pulvmunstycke med variabelt pulverfokus och adaptiv anpassning av detsamma [Fig.34]!

Dr. Henry **Köhler** från företaget innojoin GmbH spann vidare på temat laserpåläggning, och då med målsättningen att nå hög deponeringseffektivitet.

Ett exempel handlade om beläggning av rör i en anläggning för avfallskonvertering där dessa är utsatta för extremt höga temperaturer. Grundmaterial utgjordes av 16Mo3-stål vilket belades med ett 0,5 mm tjockt skikt av Inconel625 [Fig. 35]. Resultatet blev helt sprick- och porfria beläggningar där den sammanlagda påläggningssträngen kunde mäta hela 0,5-1,5 km! Andra exempel handlade om slitskydd av wolframkarbid i avgasanlägg-

ningar samt valsar i stålverk.

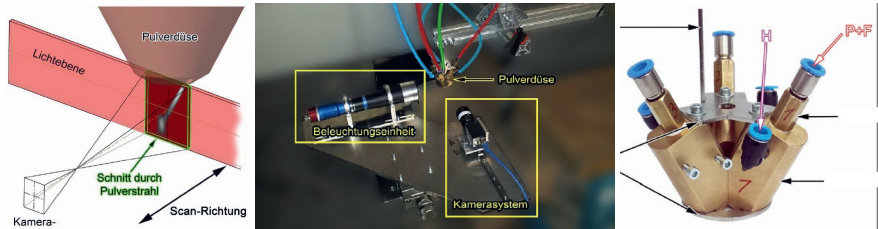
En del jämförelser hade gjorts mellan LMD och SLM, bl.a. vid tillverkning av provkroppar i AlSi10Mg där båda metoderna kunde presentera densiteter kring 98%, men där det föreligger risk att processen medför en alltför hög värmetillförsel. För SLM är objektstorleken begränsad av kammaren, medan LMD i princip inte har några rumsliga begränsningar, samt uppvisar ett cirka tre gånger högre uppsmältningstal, i det aktuella fallet 180 mot 70 cm³/tim, jämfört med SLM. Då det gäller att bygga lutande strukturer har dock SLM vissa fördelar. Avslutningsvis fick vi höra lite om det EU-finansierade projektet "EcoMat", som är speciellt inriktat mot den flyg- och rymdindustri som hör hemma i Bremen-regionen. Ett delprojekt inom ramen för "EcoMat" heter @ALL [Additive Manufacturing of Aluminium Launcher Structures, **Fig. 36**] och är inriktat på additiv tillverkning i aluminium. Just nu råder det stor efterfrågan på detta lättviktsmaterial i AM-sammanhang, varför Dr. Köhler menade att vi kan förvänta oss att få se en utveckling av nya aluminiumlegeringar.

Siste talare i temablocket kring additiv tillverkning var långväga gästen från "down under", Neil Wilson från Romar Engineering Pty Ltd., ett företag som grundades redan 1968 och då främst som underleverantör av plast- och gummiartiklar till bilindustrin. På senare år har dess verksamhet inriktats mer mot kunder inom gruvnäring, militär och medicinteknik. För några år sedan införskaffades en kombinationsmaskin, Lasertec65 från DMG-Mori, för additiv och subtraktiv tillverkning, och med denna utrustning arbetar man idag med att producera detaljer, samt reparera och ytbelägga komponenter med hjälp av LMD [**Fig. 37**]. Här används olika material och man har utvecklat ett "closed-loop"-system för påläggning som i realtid varierar lasereffekten.

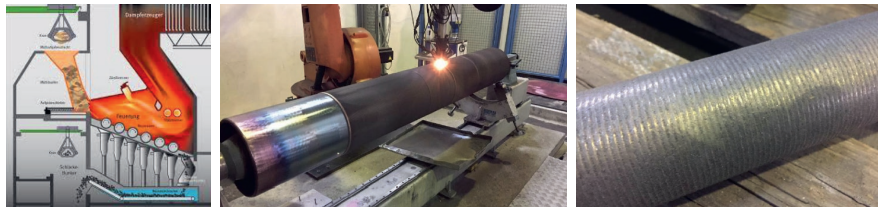
Ett intressant verktyg är Zander-Q, som används vid oförstörande provning av additivt tillverkade komponenter. Det bygger på röntgenstrålning och detekterar oönskade oxider, porer och inneslutningar. Ett omfattande samarbete sker med företaget CSIRO och RMIT [Royal Melbourne Institute of Technology], det senare främst då det gäller att utveckla nya pulverlegeringar. En spännande lösning som integrerats i Mori-maskinen är en gasomslutande lädergardin som gör det möjligt att minimera syremängden i kammaren vid bearbetning av Ti6Al4V-ma-



Figur 33. En imponerande anläggning för LMD med portalrobot och lägesomställare, där robotaccelerationen i samtliga axlar ligger på 5 m/s².



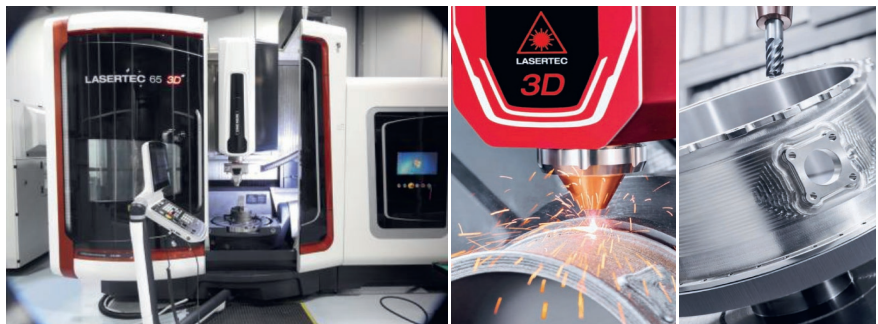
Figur 34. Tv. princip och uppställning för att visualisera pulverflödet med hjälp av en laserstråle och höghastighetskamera, och t.h. det innovativa pulvermunstycket med variabelt pulverfokus.



Figur 35. Rören i en förbränningsanläggning för restavfall utsätts för extremt höga temperaturer, varför dessa beläggs med ett 0,5 mm tjockt skikt av Inconel625.



Figur 36. I delprojektet @ALL deltar organisationer och företag som ArianeGroup, Airbus, Materialise, innojoin m.fl. där ett starkt fokus ligger på additiv tillverkning med aluminium. Hittills har man lyckats nå imponerande > 98% i densitet hos byggda provstavar i AlSi10Mg (t.h.).



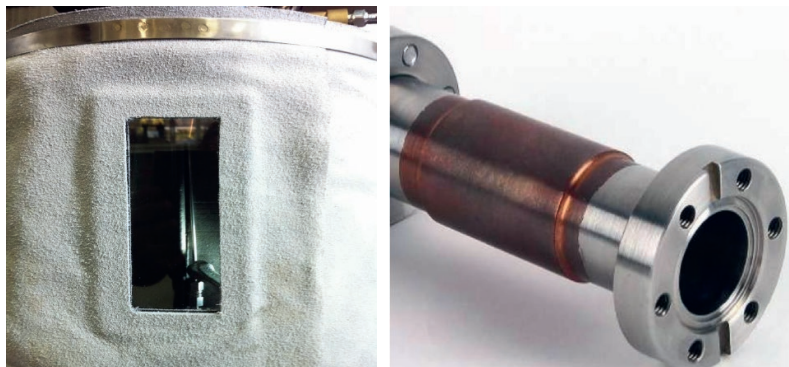
Figur 37. I en kombinationsmaskin från DMG-Mori med beteckningen Lasertec65 är det möjligt att utföra såväl laserpåläggning som mer konventionella bearbetningsmetoder som exempelvis fräsning.

terial i maskinen [**Fig. 38**]. Tillsammans med företaget Sauer har man integrerat två separat kontrollerade pulvermatrare,

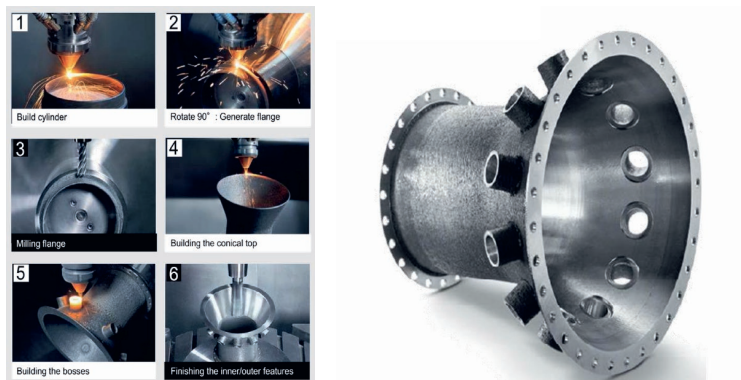
vilket illustrerades i ett praktikfall där rostfritt och koppar kombinerats i en och samma detalj [**Fig. 38**].

Avslutningsvis skickades ett fysiskt exemplar av ett LMD-tillverkat turbinhus i rostfritt material runt i salen. Komponenten mätte 180 mm i diameter, var 150 mm hög med en väggjocklek på 3 mm [Fig. 39]. Den additiva uppbyggnaden hade tagit 230 minuter, efterföljd av en 76 minuter lång fräsoperation för att nå fram till den slutgiltiga produkten.

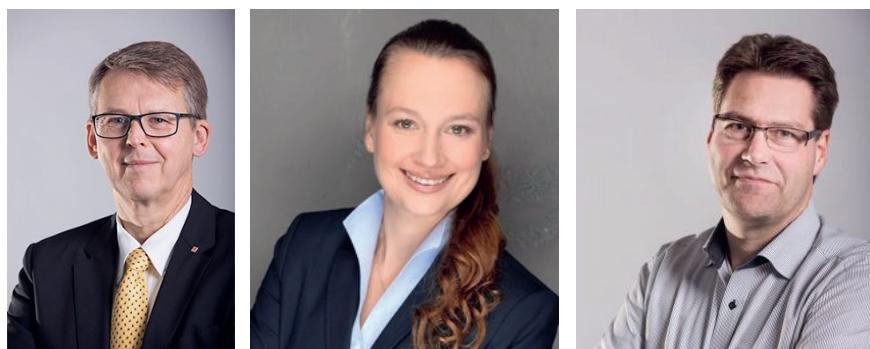
Slutintrycken från LAF2018 är enbart positiva med en blandad kompott av många applikationsinriktade presentationer. Personligen kan jag väl sakna lite av det intimare, mindre format som den här konferensen tidigare haft, men kombinationen av industriell användning och laserforskning vid BIAS är ett vinnande koncept. Förutom de tekniska presentationerna är besöket i BIAS' laboratorier i LION-byggnaden och den kompletterande leverantörsutställningen verkliga höjdpunkter. Här ges många möjligheter för den laserintresserade att bygga kompetens, nätverka och föra intressanta diskussioner med likasinnade. Alltså hatten av för professor Dr. Frank Vollertsen och hans främsta medhjälpare Frau Christine Steffens och alltid lika trevliga Dr. Thomas Seefeld, vilka alla bidrog till att än en gång göra LAF-konferensen till en succé [Fig. 40]. ■



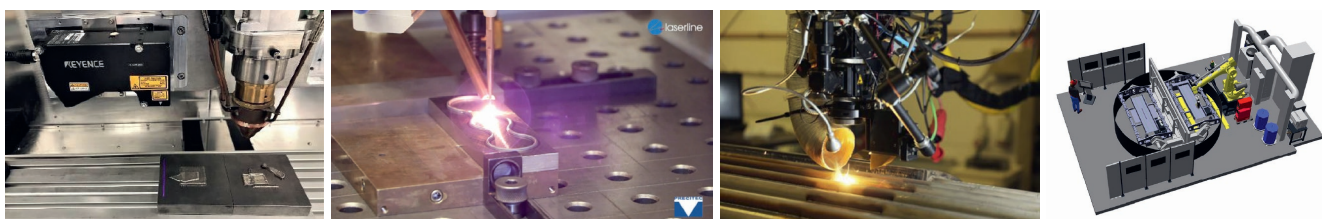
Figur 38. Två innovativa lösningar som bär företaget Romars signum; närmast en lädergardin med vars hjälp syremängden i kammaren minimeras vid användning av Titan-material, och t.h. en detalj som byggts upp av rostfritt och koppar med två separata pulvermatare från företaget Sauer.



Figur 39. De olika momenten vid LMD-tillverkning av ett turbinhus i rostfritt material, och t.h. den färdiga detaljen vilken totalt tog cirka fem timmar att tillverka.



Figur 40. Professor Dr. Frank Vollertsen hade god hjälp av BIAS-kollegorna Frau Steffens och Herrn Seefeld med att göra LAF2018 till en succéartad konferens.

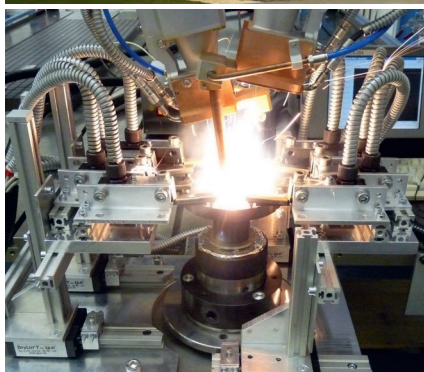


Avancerad laserforskning vid BIAS ger fördelar inom många olika branscher i Bremen-regionen

Johnny K Larsson
Autokropolis Engineering

Under rubriken "Made in BIAS" inledde institutionsföreståndaren professor Dr. Frank **Vollertsen** med att filosofera kring begreppen kvalitet och fysikaliska grundlagar vilka skall beaktas i allt arbete som utförs vid institutet. Samtidigt vill han utmana forskarstudenterna att överraska och att vara modiga och innovativa i sitt arbete. Därefter gick han vidare med att adressera fyra områden vilka är föremål för omfattande forskning vid BIAS [Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik]; laserlödning, additiv tillverkning, lasersvetsning och laserformning.

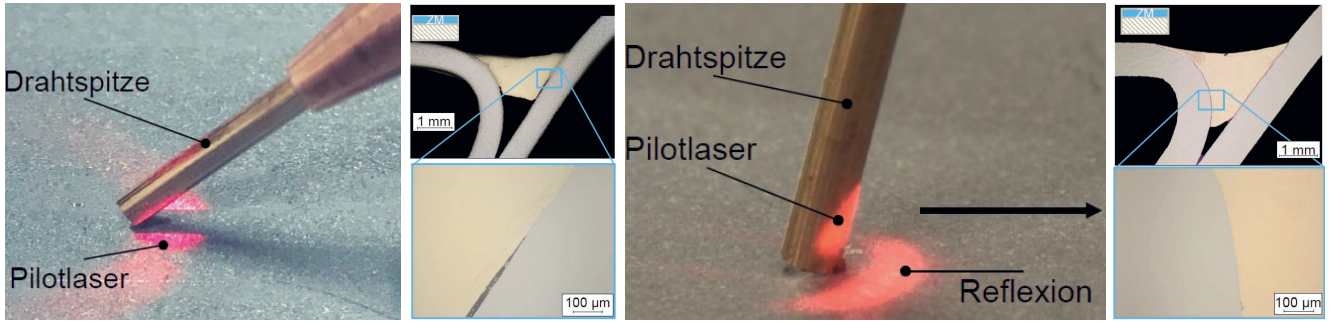
Vid karosstillverkning inom bilindustrin undersöker man idag möjligheterna att ersätta traditionellt elektrolytiskt- eller varmförzinkat plåtmaterial med en ytbeläggning som består av Zink-Magnesium. Fördelarna med detta koncept är att det ger ett bättre korrosionsskydd och en mer reptålig yta. På minussidan ligger dock beläggningens dåliga vätningsförmåga, något som blir en nackdel vid laserlödning av dylika ytor och leder till bindfel och andra defekter. Här visade nu Dr. Vollertsen upp den lösning som doktoranden Christoph **Mittelstädt** redogjorde för redan vid EALA [European Automotive Laser Applications Workshop] -konferensen i februari 2018 där man låter den infallande laserstrålen träffa tillsatstråden en bit ovanför arbetsstycket, varpå en del av strålningens energi reflekteras mot ytan och därmed tjänar som en form av förvärmning av denna inför lödprocessen [Fig. 1]. Därmed får man en betydlig



förbättring av lödfogens kvalitet samtidigt som processhastigheten kan ökas.

Nästa ärende handlade om additiv tillverkning av stora detaljer för vilket BIAS utvecklat ett särskilt munstycke med tre diskreta öppningar för pulvermatningen. Munstycket kan även förses med en enhet

som adderar en koncentrisk skyddsgastillförsel till den gas som strömmar genom munstycksöppningen [Fig. 2]. Försök i aluminium hade utförts med att bygga upp en struktur i 15 lager av AA7075 på ett AA5083-substrat. Den använda lasereffekten varierade mellan 1,5-2,0 kW, fram-



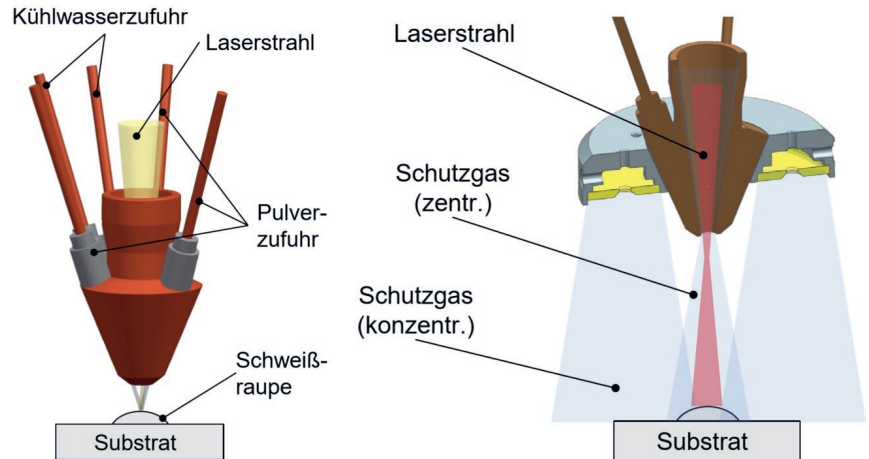
Figur 1. T.v. konventionell laserlödning som mot en Zink-Magnesium-yta ger dålig vätning med risk för bindfel, medan man med en mer upprättstående inmatning av lödtråden kan utnyttja laserstrålens reflexion i densamma till att förvärma ytan.

föringshastigheten låg på 0,5 m/min och pulvermatningen uppgick till 7,4 g/min. Resultaten såg lovande ut med undantag för strukturens hårdhet, vilken endast uppmättes till 68 Hv_{0,5}, något som emellertid gick att förbättra till 110 Hv_{0,5} med en efterföljande värmebehandling i två steg. En annan åtgärd kan vara att integrera ett hårdare material i specifika områden under LMD [Laser Metal Deposition]-processen, något som illustrerades med en uppbyggd struktur som huvudsakligen utgjordes av legeringen CuAl10Ni5Fe4 vilken lokalt upplegerats med Wolframkarbid som har en hårdhet på 3.000 Hv_{0,1}. Här hade man använt 3 kW lasereffekt, påläggningshastigheten 300 mm/min och ett pulverflöde på 25 g/min.

Redogörelsen för forskning kring lasersvetsning handlade om simuleringar som validerade den observation som f.d. LTU [Luleå Technical University]-teknologen och numera GKN-medarbetaren Ingeger Eriksson gjorde för några år sedan, nämligen förekomsten av ett s.k. knapphål i smältan vid nyckelhållsvetsning. Simuleringarna baserades på experiment utförda på 1 mm tjockt AA6082-material och en 1,2 mm grov tillsatstråd i legering AlSi5 [Fig. 3]. Lasereffekten, som uppgick till 3 kW, fokuserades till en 100 µm stor brännfläck, och laserstrålen oscillerades med 250 Hz och en pendlingsvidd på 1,4 mm. Svetsningshastighet och trådmatning uppgick till 6 respektive 9 m/min.

Ett spännande exempel som den gode Frank visade upp handlade om hur man medelst omsmältning lyckats skapa invändiga M2-gångor i hål med 0,5 mm diameter applicerade i 0,2 och 0,4 mm tjocka plåtar av rostfritt 1.4301-material [Fig. 4]. Utdragningskraften för skruvar monterade i sådana hål låg på ungefär 200 N, vilket med råge översteg kraften för en självgående skruv av samma dimension.

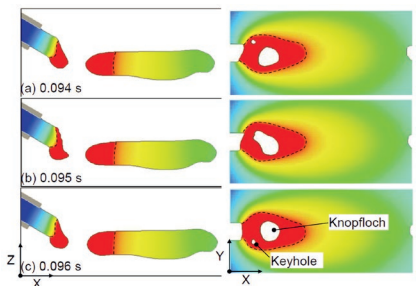
Vi har ju tidigare sett en BIAS-teknik som handlat om att smälta om änden på en metallpinne så att man får ett övermått



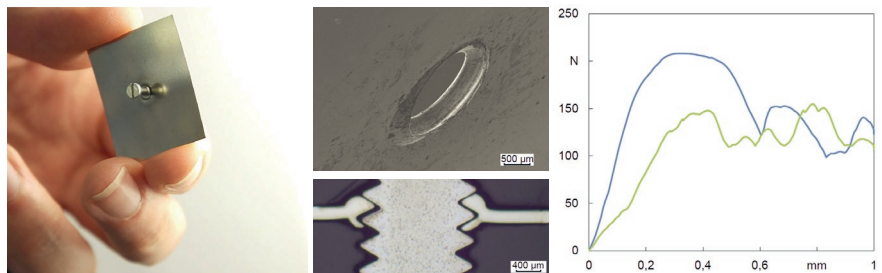
Figur 2. Ett nyutvecklat påläggningsmunstycke med tre diskreta öppningar för pulvermatningen kan kompletteras med en enhet som tillför ett koncentriskt skyddsgasflöde.

i form av en sfär som sedan kan användas för kallomformning av pinnens ände. Nu hade man applicerat metoden på plåtkanter, vilket gav fördelar vid såväl falsning som då det rörde sig om att överbygga spalter vid kälsvetsning [Fig. 5].

Därefter lämnade professor Vollertsen över ordet till tio av sina kompetenta forskare [Fig. 6] som i s.k. flash talks på två minuter fick lov att redogöra för sina forskningsområden och -resultat. Påföljande dag fick vi konferensdeltagare möjlighet till en djupare insyn i dessa och andra forskningsuppdrag under det mycket uppskattade ”öppna hus” som arrangerades i BIAS-laboratorierna vid Klagenfurterstrasse 5.



Figur 3. Simulering av lasersvetsning av legeringen AA6082 med AlSi5-tillsatstråd avslöjar uppkomsten av ett s.k. knapphål i smältan vid nyckelhållsvetsning, något som upptäcktes av Ingeger Eriksson under dennes doktorandarbete vid LTU.



Figur 4. Med laseromsmältning går det att skapa gängor i hål applicerade i plåttjocklekar mellan 0,2-0,4 mm. Utdragningskraften för en monterad skruv (blå kurva) överstiger dessutom den för en självgående dito med motsvarande dimension.

Först ut var Villads **Schultz** som hade studerat effekterna av att svetsa aluminiumlegeringen AA6082 i tjocklek 1,5 mm med respektive utan s.k. knapphål. Initialt svetsades provplåtarna med 2 kW effekt och 2 m/min i framföringshastighet med hjälp av en TruDisc12002 från Trumpf och ”scanner”-verktyget ILV DC. Det senare hade manipulerats med 250 Hz och en pendlingsvidd på 1,1 mm. Som tillsatsmaterial användes en 1,2 mm grov tråd vilken matades med 1,4 m/min. Med dessa



Villads Schultz

parametrar åstadkom man en synnerligen instabil nyckelhålsprocess, men genom att öka lasereffekten till 4 kW uppnåddes den önskade knapphåleffekten. Denna visade sig vara ytterst gynnsam för den här typen av svetsoperation då den gav en lugnare process som resulterade i bättre ytjämnhet och mindre vågighet [Fig. 7] när svetsens toppyta mättes upp med verktyget VHX-1000D från företaget Keyence.

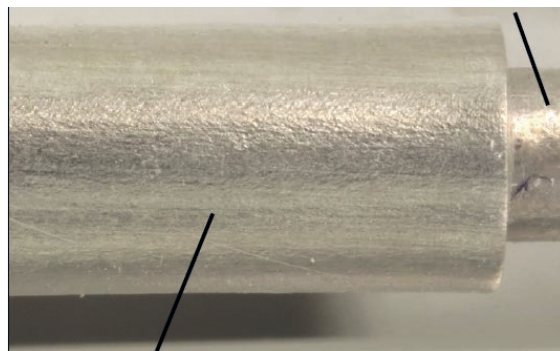
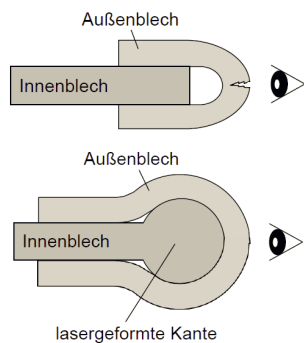
Näste talare var gamle bekantingen Christoph **Mittelstädt**, som i princip repeterade den presentation han gjorde vid LANE [Laser Assisted Net Shape Engineering] -konferensen i Fürth i september



Christoph Mittelstädt

2018, och som handlade om lasersvetsning av dolda T-fogar med hjälp av penetrationskontroll. Medelst IDM [In-Depth Monitoring], i form av en pilotlaser vars återreflekterade längd från nyckelhålets botten jämförs med en referenslängd, kan man säkerställa penetrationsdjupet. I de fall då laserstrålen missar T-fogen får man en helt avvikande responssignal, varpå svetsverktygets positionering kan justeras via en ”closed-loop”-funktion [Fig. 8].

Den ökande miniatyriseringen av



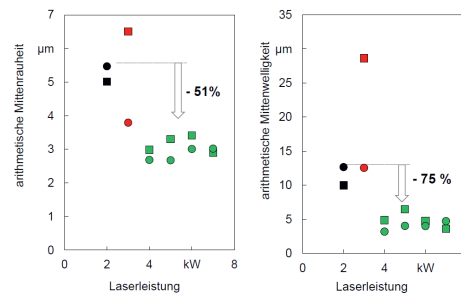
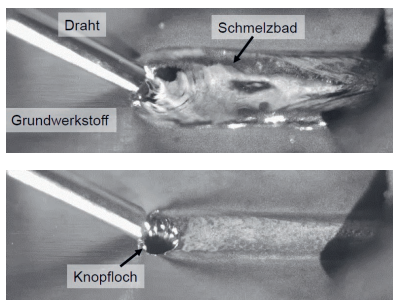
Figur 5.

Att smälta om kanten på en plåt så att denna får en cylindrisk tvärsnittsform underlättar såväl falsning som förmågan att överbrygga spalter vid svetsning av kälffogar.



Figur 6.

Nio av de tio unga forskare från BIAS som i s.k. flash talks fick redogöra för sina forskningsresultat



Figur 7.

Ovan aluminiumsvetsning utan ”knapphåleffekt” vid 2 kW lasereffekt, och därunder uppkomsten av ”knapphål” då 4 kW används. Det senare ger en avsevärt stabilare svetsprocess och resulterar i en 50%-ig reduktion av råheten på svetsens toppsida och 75% lägre långvågighet (gröna markeringar).

komponenter som möjliggörs genom de additiva tillverkningsmetoderna ställer höga krav på mätteknik i samband med mikroformning och -svetsning. Här hade Alexandar **Simic** använt sig av digital holografi för att kunna identifiera före-



Alexandar Simic

kommande defekter ner till 5 µm storlek. Man genomför just nu en utvärdering av

systemet i industriell miljö där analysen sker genom belysning av objektet med laser och uppmätning av geometrier och defekter med hjälp av ett mikroskopobjektiv och två stycken CCD [Charge Coupled Device] -kameror [Fig. 9]. Uppmätning och defektdetektering sades ligga kring 1 sekund per analyserat objekt!

Tobias **Czotscher** presenterade ett ämne som jag kände igen från mitt senaste besök vid BIAS, nämligen formning med hjälp av chockvågor som genererats med en TA-CO₂-laser, [Fig. 10]. Chockvågorna skapades med 100 ns långa pulser med ett energiinnehåll på 6 J, vilket gav en energitäthet på 1,5 GW/cm². Tre olika substratmaterial hade ingått i studien; 100Cr6, Al99.5 och Al₂O₃, och genom att ansätta chockvågen mot en kula med 4

mm diameter fick man en reproducerbar intryckning i de olika materialen, vilken var störst i det rena aluminiumet och



Tobias Czotscer

minst i krommaterialet.

Ett annat välkänt forskningsområde vid BIAS är mikroperforering av flygplansvingar med hjälp av laserborrning, i akt och mening att öka den laminära strömningen kring vingarna, på bekostnad av den turbulenta dito, och därigenom reducera bränsleförbrukningen. Här fick vi nu en uppdatering av Andreas



Andreas Stephen

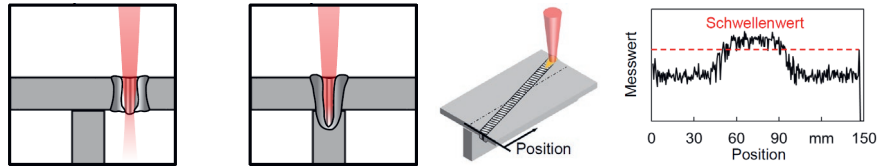
Stephen, där han berättade att man nu förfogar över en prototypanläggning där man avser att fabricera 6 miljoner hål med en diameter på $50 \pm 1,5 \mu\text{m}$ [Fig. 11], och där tiden för borrningsoperationen inte får överstiga 1,8 ms per hål. Därför har man utvecklat en övervakningslösning som i realtid kan kontrollera genomslags-tiden via förändringar i en gasvolym som illumineras med dioder och analyseras med en höghastighetskamera [Fig. 12]. I en privat konversation med Herr Stephen fick jag veta att Airbus avser att sätta



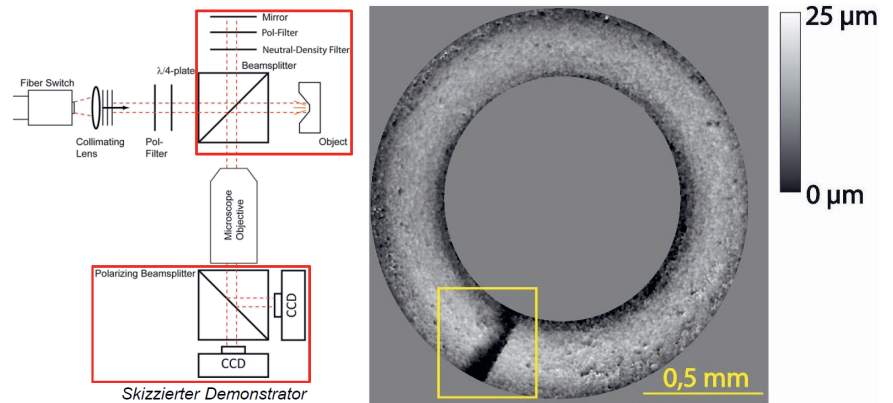
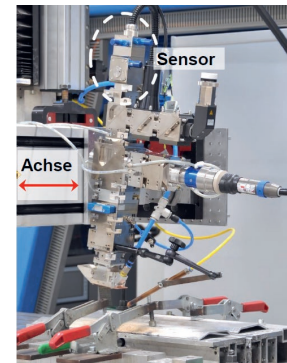
Nena Blanke

in denna teknik i produktion år 2020.

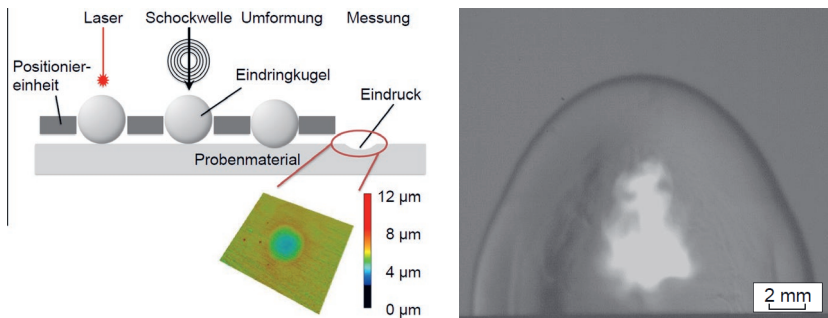
Enda kvinnliga forskare i dessa "flash talks" var Nena Blanke, vars studier



Figur 8. IDM använt som fogsökningsverktyg vid svetsning av dolda T-fogar, där man kan se en klar skillnad i responssignal om laserstrålen ligger rätt i fogen. T.h. den försökssupställning som användes vid experimenten med adaptivitet, där sensorsignalen aktiverar en linjärrörelse hos robotaxeln för att justera fokuspunktens position.



Figur 9. Schematisk skiss över en försökssupställning för att identifiera defekter hos SLM [Selective Laser Melting]-tillverkade mikroobjekt med digital holografi och två CCD-kameror. Upplösningen är så hög att det går att hitta defekter ner till $5 \mu\text{m}$ storlek!



Figur 10. Närmast principen för formning med chockvågor som genereras av en TA-CO₂-laser, och t.h. en ögonblicksbild då laserpulsen, som har en energitäthet kring $1,5 \text{ GW/cm}^2$, aktiveras.

innefattar efterbearbetning av LMD-tillverkade objekt. Oftast häftar osmälta pulverpartiklar fast vid de tillverkade detaljerna, och Frau Blanke hade använt EDX (Energy-Dispersive X-ray)-analys för att fastställa ytornas råhet och vågighet före och efter bearbetning av ytan [Fig. 13]. Denna skedde i form av laseromsmältning där den bästa "as built"-ytan med ett Sa-värde på $13,06 \mu\text{m}$ därigenom kunde nå ett $\text{Sa} = 0,55 \mu\text{m}$, vilket innebär en förbättring med hela 95,8%!

Konstantin Vetter hade lyckats åstadkomma homogena legeringsvarianter

genom att djuplegera med hjälp av en laserstråle. På ett C15-grundmaterial hade man först byggt upp ett 0,2 mm tjockt



Konstantin Vetter

skikt av legeringen X2CrNiMo17-12-2 med SLM-teknik. Därefter hade man ansatt en laserstråle med 4 kW effekt mot ytan, och låtit denna beskriva en cirkelrörelse med en hastighet av 5 m/min, för att på så sätt få legeringen att breda ut sig på djupet i grundmaterialet [Fig. 14].

Ett intressant angreppssätt för att förbättra miljön vid plåtformning presenterades av Hannes Freiße, där han



Hannes Freiße

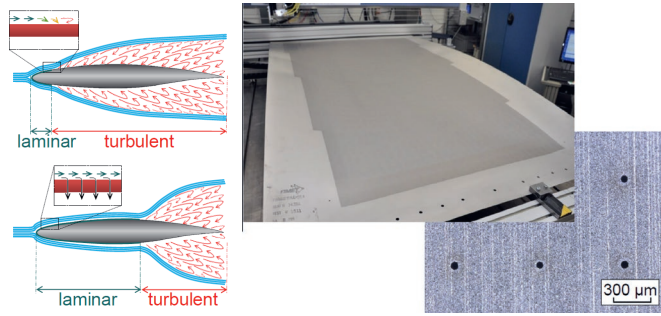
avsåg att kunna exkludera användandet av pressoljor genom att med laser modifiera verktygsytorna. I ett första processteg tillfördes hårda partiklar, typ volframkarbider, vilka med laser dispergerades in i verktygets matrismaterial CuAl10Ni5Fe4. Därefter lät man laserstrålen förång det yttersta lagret av matrismaterialet ner till ett djup kring 20µm [Fig. 15]. Härigenom reduceras kontaktytan mellan formverktyg och plåtämne i och med att det enbart är de hårda partiklarna som ligger an mot det senare. Med en mindre kontaktyta följer lägre friktion, något som i förlängningen gör att pressoljor inte behövs för plåtformningsoperationen.

Dieter Tyrallas forskning handlade om laserpåläggning med varmtråd som

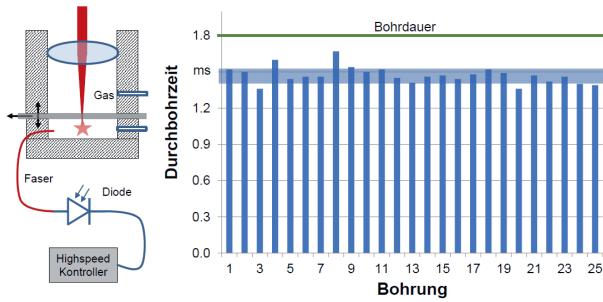


Dieter Tyrallas

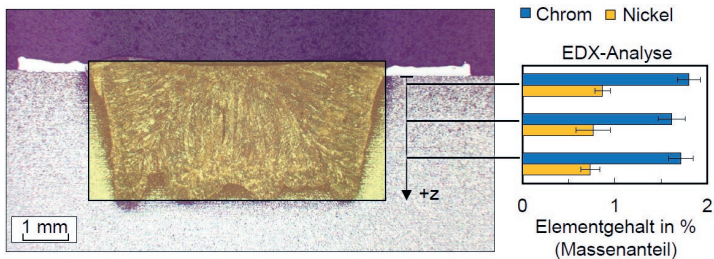
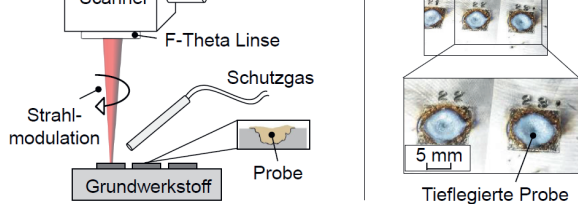
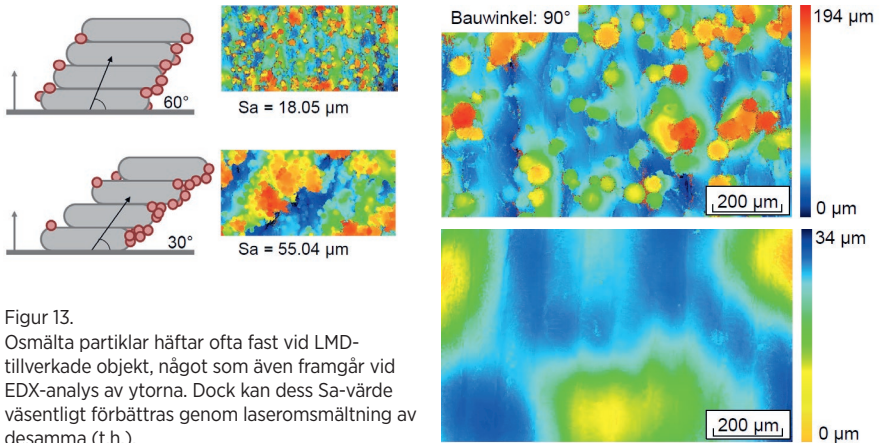
möjliggör en ökad deponeringseffektivitet. Risken är emellertid att processtemperaturen blir alltför hög, något som medför en högre inlösning av påläggningspulvret i substratmaterialet. Därför hade han skapat en uppställning för processövervakning som bestod av en 2-kanals pyrometer och en 2-kanals pyrometerkamera. Här kunde man se en mycket god överensstämmelse mellan värmeeffekten just framför laserns fokuspunkt och längden på



Figur 11. Genom mikroperforering av flygplansvingarnas framkant kan man öka den laminära luftströmmen kring dessa och på så sätt reducera bränsleförbrukningen. Detta är tänkt att utföras i form av miljontals 50 µm stora laserborrade hål.



Figur 12. En idé hur man kan övervaka genomslagstiden vid hållborrning genom att kontrollera och analysera förändringar i en gasvolym med hjälp av en hög-hastighetskamera.



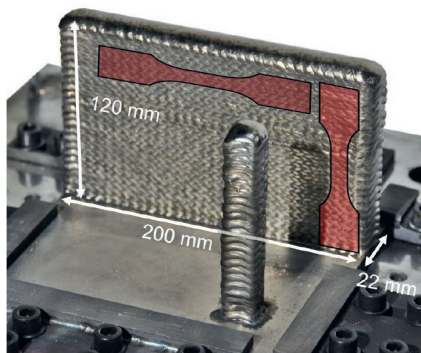
Figur 14. T.v. principen för djuplegering med hjälp av en modulerad laserstråle. Det insmälta materialet når ett djup på över 2 mm med bibehållen elementfördelning av Krom och Nickel, vilket framgår av EDX-analysen ovan.

smältan [Fig. 16]. Vid det senare besöket i laboratorierna kunde jag se en ytterligare effektivisering av pålägningsprocessen där tre trådar kombinerades i ett matarverk och där laserstrålen oscillerades över dessa.

Slutligen kunde vi lyssna till hur Christoph Halisch beskrev 3D-printning av komponenter i olika titanlegeringar avsedda för luftfartsindustrin, som exempelvis förstärkningsribbor kring dörröppningen på en flygplanspanel. Det deponerade pulvret smältes i det här fallet inte samman med laser utan istället med en ljusbåge. Hos BIAS har man tillgång till en dedikerad maskin för den här tekniken, levererad av företaget Gefertec, och med beteckningen arc403 [Fig. 17]. Målsättningen med detta projekt är att man skall kunna förutsäga materialegenskaperna i de skapade objekten genom en temperaturövervakning "on-line" av arbetsområdet. Denna utförs med en HDR [High Dynamic Range] pyrometerkamera, som har en så pass hög upplösning att porer



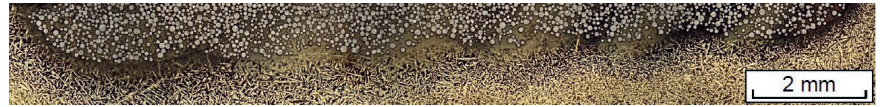
Christoph Halisch



Figur 17.

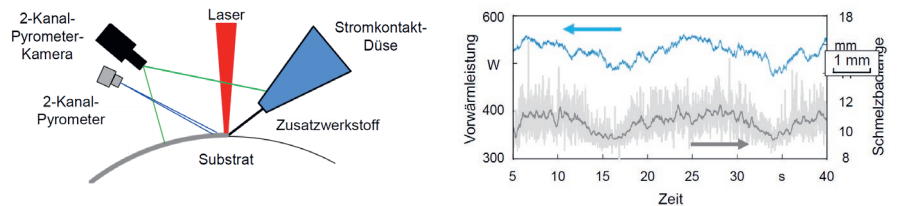
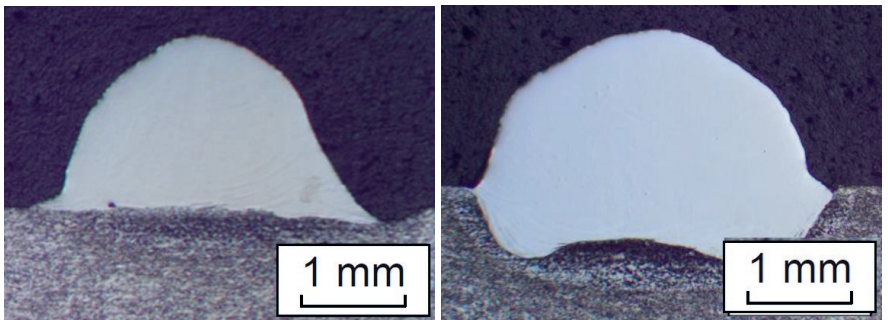
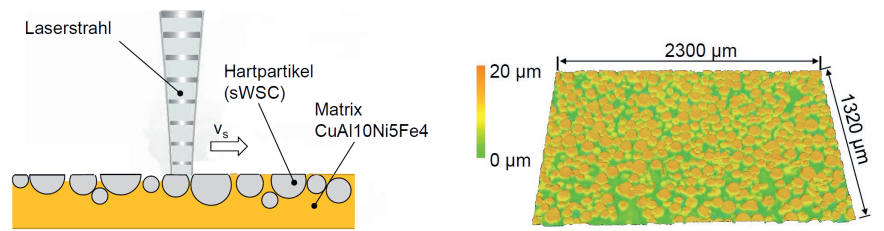
BIAS förfogar över en maskin från Gefertec där en ljusbåge används vid uppbyggnad av strukturer med pulver, men metoden kan även användas för att skapa lokala förstövningar på paneler (t.h.).

ner till en storlek av 25 μm kan upptäckas. Värt att nämna är att jag under aktiviteten "BIAS Open House" fick möjlighet att diskutera med Helge Kügler, en annan av alla dessa lovande laserforskare som arbetar vid institutet. Han har just fått anslag för ett projekt där man i stället för besvärlig lasersvetsning av aluminiumar-



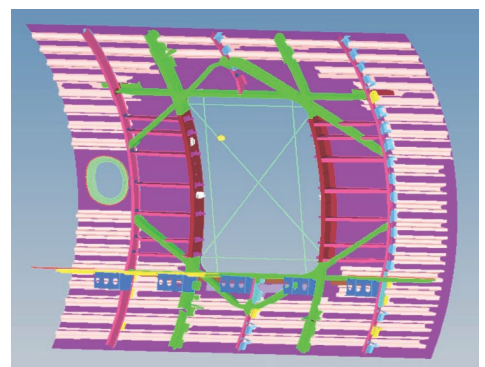
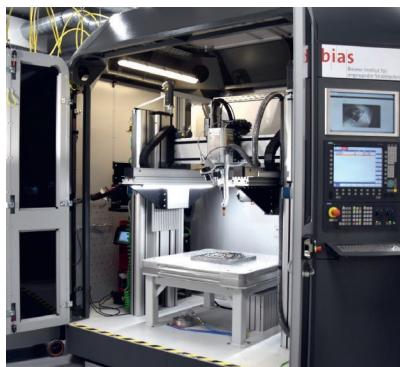
Figur 15.

En laserbaserad tvåstegsprocess där först hårda partiklar av volframkarbid dispergeras in i ytan på ett formverktyg (ovan), varpå det mellanliggande matrismaterial förångas av laserstrålen ner till ett djup av 20 μm (nedan t.h.). På så sätt minskas friktionen och behovet av pressolja vid plåtförning



Figur 16.

För att undvika en alltför hög inlösning i substratmaterial vid laserpåläggning med varmråd är processövervakning nödvändig. Den kan utföras enligt uppställningen nedan där man kan se en god överensstämmelse mellan tillförd värme (grå kurva) och längden på smältan (blå kurva).



tiklar avser att istället laserlöda dessa med hjälp av tillsatsstråd i form av den välbekanta AlSi12-legeringen. Jag bedömer det som ytterst intressant om man kan påvisa någon form av realiserbarhet av en dylik process, som i så fall kommer att innebära att det går att skapa en högkvalitativ fog till en betydligt lägre kostnad än vad som

är fallet vid lasersvetsning. Därför blir det intressant att följa Helges experiment, vars resultat jag säkert kommer att referera i kommande nummer av LaserNytt. ■

En inspirerande sammankomst av laserprocessexperten

Jan Frostevarg
Luleå tekniska universitet

Årets ICALEO (International Congress on Applications of Lasers&Electro-Optics, 2018) hölls vid Rosen Center Hotel i Orlando (14-18 oktober). Deltagarantalet var inte lika högt i år som vissa tidigare år, men innehållet höll en hög nivå. Det var också kul att träffa så pass många svenska och tyska deltagare. Som Organisationen håller på att göras om så det fanns lite oklarheter i ex schemat, men allt flöt ändå på bra i slutändan. Som väntat var det stort fokus på additiv tillverkning, inte bara i metall utan även i organiska material. Det är en spännande och mångfacetterad utveckling vi går igenom nu och det är väldigt intressant att se vad andra jobbar på.

I år var vi ganska många från vår grupp vid Luleå tekniska universitet som deltog och presenterade, men vi träffade också många gamla ansikten men dessutom några svenska nykomlingar som vi gärna träffar igen. Mellan presentationerna var det många intressanta och livliga diskussioner, så fast att jag nästan tappat rösten har jag kanske aldrig pratat så mycket som under dessa dagar. Konferenslokalerna höll en bra nivå, men området runt omkring var inte särskilt inspirerande. Under tiden som konferensen var fick några av oss se en raketuppskjutning nattetid på lite avstånd, en spännande upplevelse.

Övergripande vad jag tyckte och balans mellan olika ämnen som presenterades, varav många var riktigt intressanta och lärorika. Här är ett litet urval av som jag

tycker var intressanta men som också täcker flera aspekter;

Inom området additiv tillverkning sker det just nu många studier med vitt spridda tillämpningar och metoder. Även om konferensen brukar handla om metaller, behandlas även andra material. Exempel på andra material är polymerer, keramer och trä, men även vissa biologiska. Shao-chen Chen vid UC San Diego berättade om en intressant metod där levande organ kan byggas, vilket är ett steg mot så kallad regenerativ medicin. De har utvecklat en metod där komplexa arkitekturer kan byggas med valda biofysiska egenskaper. Med en femtosekundslaser och biomaterial kan mikroarkitektur uppnås med varierande mekaniska (ex böjlighet) och sensorer kan byggas in, men även något de kallar för nanomotorer. Med denna metod visade de att det går att bygga små mikroroboter, som de valde att forma efter olika sorters fiskar, som kan guidas med magnetiska fält för att fånga upp skadliga ämnen i blodomlopp.

Exempel på andra exotiska material är från Swizz Federal Institute of Technology, som visade att det med laser går forma diamanter genom ablation med ultrakorta laserpulser. Studien är en utveckling av teori för ablation av transparenta material och detta stämmer väl överens med de experimentella resultaten. I höga fluensområden betar sig diamanter på samma sätt som metaller och går därför att processa och forma på liknande sätt, vilket möjliggör processande och skapande av nya former av diamanter. Om detta leder till något optiskt genombrott återstår att se. I mikrobearbetning presenterades det även metoder för att skapa vattenavstötande

ytor, men även hur ytor för implantat kan skapas (där jag själv presenterade en sådan).

När det gäller interaktion laser-material finns det fortfarande vissa oklarheter som behöver utvärderas. Helge Kügler från BIAS berättade om en studie där de undersökte absorptionseffekt av laserenergin på grova ytor. Absorptionen för rostfritt stål påverkas starkt av multipel laserbearbetning och ytornas grovlek. De kom fram till att mätvärdena Sa och Sq har betydligt bättre korrelation mot laserabsorption än vad maxvärde för Sz. Det är viktigt att veta, speciellt för laserhärtningsprocesser.

Laserskärning är ett intressant ämne som fortfarande utvecklas eftersom det finns industriell önskan om snabbare processer och samtidigt ha ökad kvalitet på skärnsnittet. Dennis Arntz berättade om ett nytt verktyg de utvecklat i Aachen, som de kallar trim-cut. De har med hjälp av höghastighetskamera och glas observerat hur smältflödet i skärfronten ser ut för tjocka material, **Bild 1**. Genom att spåra geometrin och ta fram medelvärden för flödet har de skapat en modell, där de för olika processinställningar kan förutspå beteendet på skärfronten och därigenom justera geometrin för det slutliga utfallet. Simuleringen bygger på samband mellan hastighetsfördelningar vid olika skärddjup. En jämnare stelningsyta från skärsmältan kan uppnås genom snabba smältvågor som konstant motverkar ytspänningen och ge jämnare skärytor.

Ett annat tillvägagångssätt handlar om att använda en så kallad Goniometer (ett slags temperaturmätare) för att mäta geometri på skärfronten, **Bild 2**. Michael Sawanna et al presenterade detta

tillvägagångssätt, som bygger på en del antaganden. Bland annat är att där det är som varmast är där vågorna är som längst ut, dvs där de exponeras som mest för laserstrålen blir de också varmast. Det är logiskt och använda temperaturfält för att mäta ytgeometri är ett intressant tillvägagångssätt som för just laserskärning kan ge relevanta resultat. Det blir intressant att se hur tekniken utvecklas och vilka insikter som kan möjliggöras.

Margot Lison från Bryssels universitet visade två metoder för att mäta temperaturfält som kan användas för en mängd laserbearbetningsmetoder. Den första metoden går ut på att använda en termisk SWIR-kamera för att konvertera uppmätt strålning till absoluta temperaturer genom att anta grå kropp och en konstant emission för hela det observerade området. För den andra metoden användes en VNIR linjekamera som jämförs mot svartkroppsstrålningsmodell med en spektral emissivitet som minskar linjärt med våglängd. Detta resulterar i en övre och undre gräns för temperaturområde för småtpölen som går att observera

För lättviktskonstruktioner brukar sandwichpaneler vara ett bra konstruktionssätt för att få ner vikten i större konstruktioner. Ett alternativ är att istället för tvärgående stöd att skapa ett slags skumliknande struktur. Mellan två skivor läggs ett aluminiumpulver med ett skummande ämne som vid nära smältemperatur delvis smälter metallpulvret som börjar skumma och fyller utrymmet mellan skivorna och metallisk bindning ges. Med laser kan dessa paneler formas (bändas) med laser, speciellt om en större laserdiameter används, **Bild 3**. Det är intressant att dessa paneler faktiskt går lättare att böja med laser än klassiska paneler, fast att de är väldigt styva.

Numer börjar det finns fler och fler lösningar och tillverkare för anpassad stråloptik. Trumpf har utvecklat ett sådant system, där energifördelningen kan ändras kring den fokuserade laserstrålen, vilket möjliggör uppvärmning av basmaterialet nära småtpölen och därigenom förbättra vätningsgenskaper som resulterar i jämnare svetsråge, **Bild 4**. De visade hur denna optik framgångsrikt har förbättrat svetsar inom tåg och fordonsapplikationer.

Något som speciellt var i fokus för årets ICALEO är additiv tillverkning. Exempel på detta är den powerline som Fraunhofer utvecklat och använder upp till 20kW laser för att med hög pulverpåsprutningshastighet göra breda spår >120g/min.

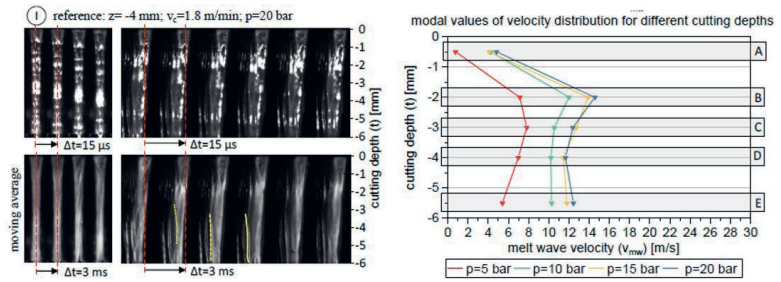


Bild 1. Höghastighetsfilmning av skärytor och hastighetsmätningar av vågrörelser på olika djup

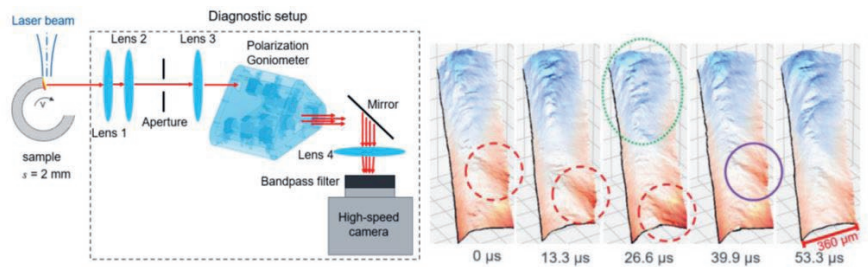


Bild 2. Höghastighetskamera som med utrustning fungerar som en Goniometer och kan därmed avbilda temperaturfält över en laserskärfrent

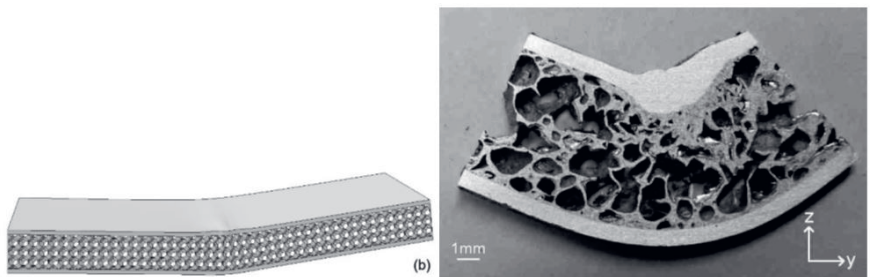


Bild 3. Profil för skumfylld Sandwichpanel för simulering och en med laser böjd skum profil

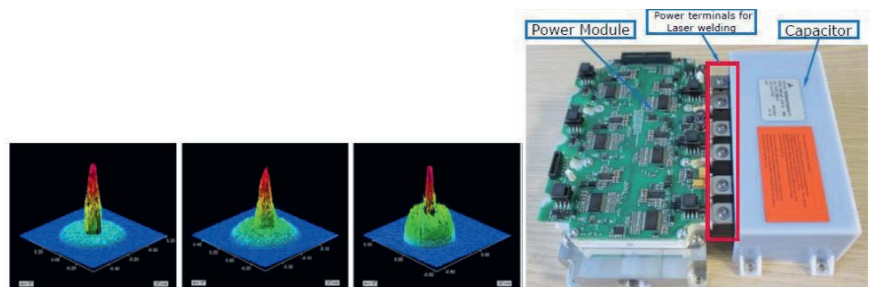


Bild 4. Strålfiler som kan skapas och exempel på tillämpning för kraftmodulsenhet på tåg

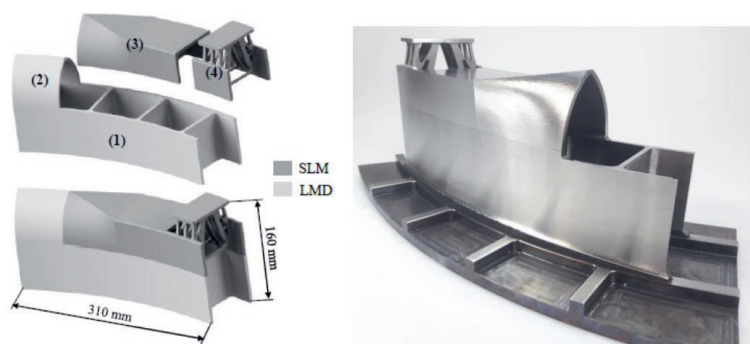


Bild 5. Kombination av delar från pulverbädds- och påsvetsningsmetoder för att skapa en större komponent

Ett annat exempel från Fraunhofer är där både pulverbäddprocesser och påsvetsningsprocesser kombineras. Detta görs på så sätt att de bygger olika delar av en komponent som därefter sammanfogas för att nyttja styrkorna för vardera metod och dessutom byggs i olika material, **Bild 5**.

Den ökade aktiviteten inom additiv tillverkning syns även genom att mängden bidrag från vår grupp vid Luleå tekniska universitet ökar. Ett exempel är studier om grundläggande mekanismer för additiv tillverkning med pulverbädd (SLM) som kan bidra till hur processen kan förbättras. Det visades att mängden tillgängligt pulver per spår signifikant påverkar spårgeometrin. Denna effekt leder till att en stor del av materialsmältningen görs i onödan, dvs att många spår blir "översvetsade" och inte längre syns i materialgeometrin, **Bild 6**.

Påsvetsningsprocessen är också i detalj undersökt med hjälp av höghastighetsfilmning och tidigare okända mekanismer har uppdagats gällande pulverinfångning av smältpölen. Bland annat visade det sig att pulverpartiklar ofta flyter på ytan en kort stund innan de smälter och blir en del av smältpölen, dess rörelser blev också kartlagda, **Bild 7**.

För högre matningshastigheter går det använda tråd och ljusbåge för att smälta den på plats. Denna process har begränsad hastighet längs ytan för att resultatet inte ska bli vågigt. Om en laser tillsätts kan flödet stabiliseras och högre matningshastigheter möjliggörs med ökad kvalitet på de byggda strukturerna, **Bild 8**.

Avslutningsvis

Avslutningsvis vill jag återigen säga att detta års ICALEO-konferens organisatoriskt kunde ha skötts bättre, men innehållet och diskussionerna vad bland det bästa jag upplevt vid någon konferens. Jag hoppas att deltagarantalet återigen ökar och att presentationernas nivå fortsätter att öka. Att införa indexerad publicering av artiklar visade sig vara ett bra sätt att öka nivån på det material som presenteras, men också möjliggör för vissa att ens kunna delta (där sådana krav finns och ökar, ex i Finland). ■

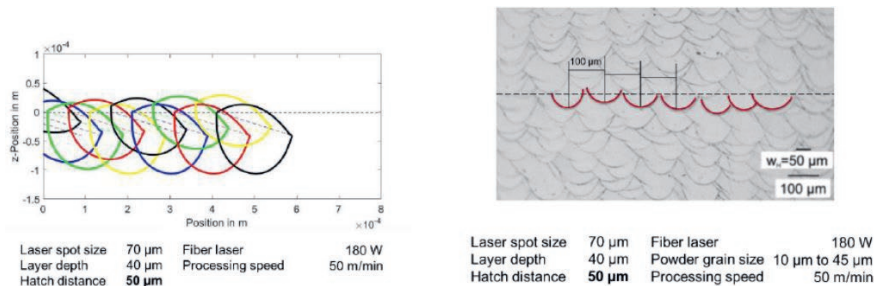


Bild 6. Tvärsnitt som visar geometrin som skapas genom påsvetsning av varje pulverlager. Vissa av spårn går inte längre se i materialet när det är färdigbyggt

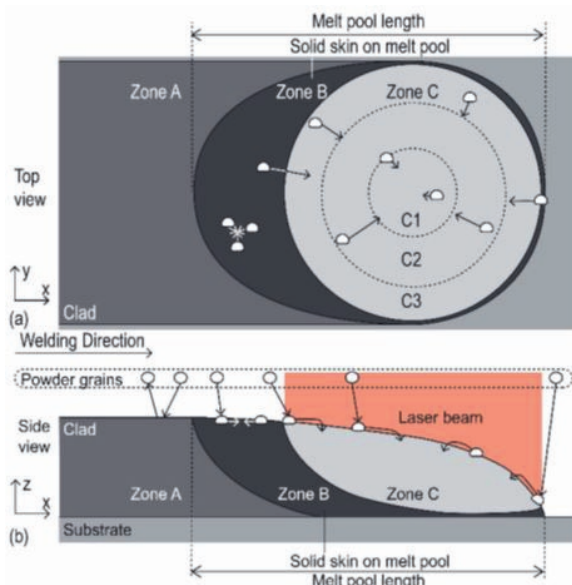


Bild 7. Pulverinfångning av smältpölen, rörelser hos partiklar på smältpörens yta och vad som händer pulverpartiklar på olika avstånd från processfronten när de träffar ytan

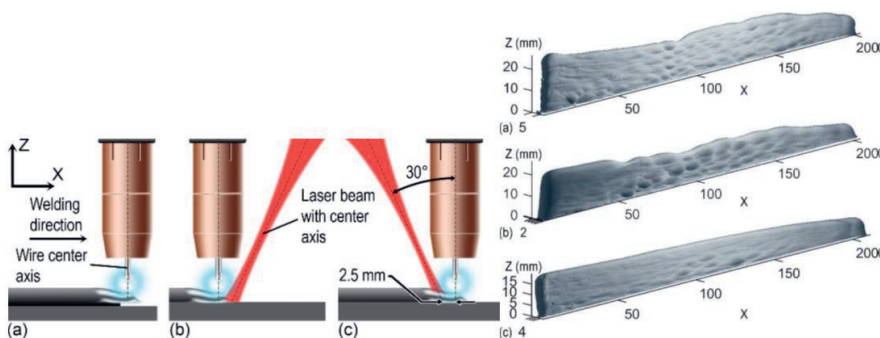


Bild 8. Additiv tillverkning med klassisk svetsmetod, fast med CMT process. Med laser applicerat på rätt sätt kan processen stabiliseras och högre hastigheter uppnås med bra kvalitet på byggda strukturer



Ett sydafrikanskt samarbete

– som stärker utvecklingen av additivt tillverkade komponenter inom flyg- och rymdindustri

Johnny K Larsson,
Autokropolis Engineering



Just nu pratas det mycket om additiv tillverkning med laser, och därför kan det kanske vara på sin plats att även i den här artikelserien adressera detta intressanta teknikområde. För den skull förflyttar vi oss till Sydafrika för att titta närmare på ett framgångsrikt samarbete som syftar till att industrialisera pulverbäddstillverkning [SLM = Selective Laser Melting] av aerospacekomponenter.

Hardus **Greyling** från Sydafrikas CSIR [Council for Scientific and Industrial Research] och Marius **Vermeulen** [Aerosud Innovation and Training] har båda välviligt ställt upp för att närmare beskriva forskningsprojektet "Aeroswift". Detta omfattar utvecklingen av en av de största AM [Additive Manufacturing] –maskinerna i världen för att med denna kunna beskriva och industrialisera SLM-tekniken vid tillverkning av högkostnadskomponenter till flyg- och rymdindustrin.

En storskalig pulverbäddsanläggning för additiv tillverkning

Via ett forskningssamarbete mellan företaget Aerosud Innovation Centre [IC] i Pretoria och CSIR etablerades forskningsprojektet "Aeroswift" för att påskynda den



Figur 1.
Aerosud IC har kraftfullt bidragit vid utvecklingen av spaningsplanet AHRLAC

additiva tillverkningstekniken i Sydafrika. "Det officiella programmet startade redan 2011 med finansiering från landets DST [Department of Science and Technology] och andra forskningsutförare" säger herr Vermeulen.

"Programmets kärnpunkt är att bättre kunna utnyttja Sydafrikas titaniumresurser, samtidigt som vi kan stödja ett växande industrisegment, nämligen tillverkning av värdefulla komponenter både här och i övriga världen", fortsätter han.

"Vi har utvecklat kompetens inom laserbaserad additiv tillverkning här vid CSIR under många år", flikar Hardus Greyling in. "Vi håller nu på att kommersialisera LMD [Laser Metal Deposition] –tekniken för reparationsuppgifter inom industrin, vilket inkluderar ett arbete vi gör åt vår lokala elkraftförsörjare ESKOM [Electricity Supply Commission]. Resultatet är ett mobilt system för LMD, som kan utföra lagningsarbeten på plats, som t.ex.

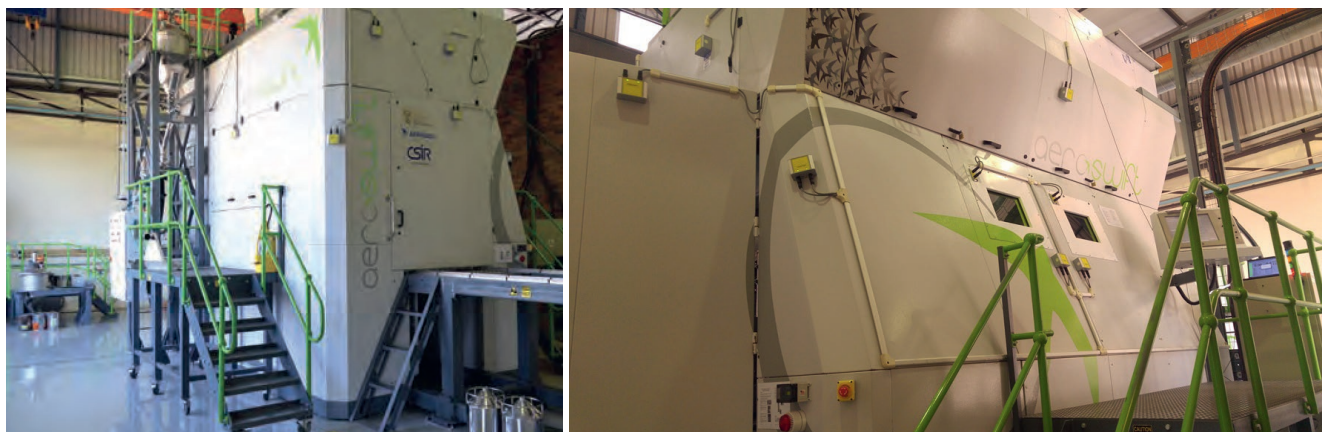
reparation av stora, svårflyttbara komponenter vid kraftstationer", fortsätter han.

Aerosud Innovation Centre är en "nyckelspelare" vid utvecklingen av AHRLAC, ett avancerat, högeffektivt och lätt spaningsplan konstruerat som



Figur 2.
Med pulverbäddsteknik har man inom "Aeroswift"-projektet tillverkat ett antal komponenter till AHRLAC, såsom olika handtag och luftkanaler.

ett allsidigt och robust flygvapen vilket kan utföra olika stridsuppgifter [Fig. 1]. "För att åstadkomma lägsta möjliga vikt och en ökad livslängd hade vi hela tiden



Figur 3. Pulverbäddsmaskinen "Aeroswift" använder avsevärda pulvermängder för att tillverka större aerospace-komponenter och partier av mindre titanartiklar.

additiv tillverkning i baktankarna vid konstruktionen av AHRLAC [Advanced High-performance Reconnaissance Light Aircraft]. Med den pulverbäddsteknik som vi utvecklade i "Aeroswift"-projektet har vi redan börjat tillverka kommersiella komponenter till AHRLAC, såsom gasreglagehandtag, ett handtag till en hävstång med vars hjälp man öppnar en inspektionslucka för motorn, samt några rörledningar i titan [Fig. 2]", säger Marius Vermeulen.

Han fortsätter: "Aeroswift" utgör en forskningsplattform för laserbaserad additiv tillverkning men vi kan också betrakta den som en prototyp. I slutändan siktar vi på att kunna konstruera skräddarsydda SLM-maskiner för specifika artiklar, och även om vi just nu fokuserar på titanpulver skall maskinen inte vara begränsad till detta material".

Processen för pulverbäddsteknik eller SLM [Selective Laser Melting]

Pulverbäddsmaskinen "Aeroswift" konstruerades för att kunna hantera stora pulvermängder med en kammarstorlek som mäter 2.000×600×600 mm, vilket möjliggör tillverkning av större aerospace-komponenter eller partier av mindre titanartiklar [Fig. 3]. "Aerospace är ett affärsområde som innebär små antalsvolymer med högt förädlingsvärde och hög integreringsgrad hos ingående komponenter, där additiv tillverkning blir en idealisk metod för att uppfylla produkternas krav" säger Mr. Vermeulen.

Själva maskinen konstruerades, utvecklades och byggdes upp från grunden av oss själva, där vi fokuserade på de mekaniska och optiska systemen, och där vi använde oss av kommersiellt tillgängliga komponenter som vi i vissa fall fick justera för att de skulle passa och svara bättre mot avsedd funktion.



Figur 4. Världens största SLM-maskin under installation hos Aerosud IC i Pretoria, RSA.

"SLM-maskinens storlek gör projektet extra intressant. Pulverbädden är större än vad som är kommersiellt tillgängligt på marknaden idag, och även om vi känner till att andra tillverkare också håller på att lansera stora maskiner, kan jag konstatera att vårt koncept erbjuder världens största byggvolym", säger Vermeulen [Fig. 4]. "Vi använder oss av en 5 kW fiberlaser från IPG Photonics för att med dess hjälp öka produktiviteten och minska tillverkningskostnaderna" tillägger han.

Byggvolymen konstruerades för största möjliga flexibilitet med en rörlig pulverbädd, vilket möjliggör en anpassningsbar längd för det tillverkade objektet. Via processövervakning kan vi finjustera samtliga parametrar som används vid SLM-tillverkning; fokalpunktstorlek och lasereffekt, galvo-speglarnas "scanning"-frekvens och linjärmotorernas hastighet, överlappet mellan de olika påläggningssträngarna, skiktjockleken hos det uppbyggda pulverlagret, olika påläggningsmönster samt sammansättningen hos process- och

skyddsgas. "Sådan avancerad kontroll möjliggör en flexibel övervakning och optimering av de individuella parametrarna", noterar Mr. Greyling.

P.g.a. de snabba avkylningsförhållanden som råder vid laserbearbetning får titan-komponenter tillverkade med additiv teknik en härdad och finkornig martensitisk mikrostruktur. Detta medför höga hållfasthetsvärden, men sämre duktilitet och slagseghet. "Om egenskaperna måste motsvara dem hos en smidd detalj måste vi i regel utföra en aducerande värmebehandling för att mjuka upp strukturen och tillåta korntillväxt", säger Greyling. Och kollegan Vermeulen tillägger: "Totalt sett är vår avsikt att optimera processparametrarna för att uppnå bästa möjliga materialegenskaper med hög produktivitet, vilket är precis det som aerospace-industrin efterfrågar."

Titanium, Sydafrika och aerospace

Sydafrika har den näst största råvarutillgången av titanium i världen, men

titan-metall produceras inte i landet. CSIR undersöker möjligheterna att producera metallen ur lokal malm, men försöker då undvika att använda sig av den traditionella men energikrävande Kroll-processen genom att i stället tillverka pulver från titanium-tetraklorid.

”Det pulver som hittills tillverkats i CSIR’s pilotanläggning är inte lämpligt för additiv tillverkning då vi måste ha pulverpartiklar i sfäroidiserad form av en titanlegering. Men så snart detta har kunnat realiserat kan vi se en försörjningskedja som utgår från lokal malmutvinning, och via sfäroidiserat tillverkat pulver och maskiner för additiv tillverkning som ”Aeroswift”, resulterar i fullgoda titan-komponenter”, säger Marius Vermeulen.

”Om man skall förstå varför titan har blivit så viktigt inom flyg och aerospace måste vi gå tillbaka ungefär 20 år i tiden då de flesta flygplan tillverkades i aluminium (cirka 95% av vikten utgjordes av aluminium och 5% av övriga material). Idag använder emellertid flygplan som Boeing 787 och Airbus 350 mer än 50% kolfiberförstärkta kompositmaterial i sina strukturer, och om detta material kombineras med aluminium uppstår galvanisk korrosion mellan materialen”, förklarar han.

Titan är då en perfekt ersättare för aluminium då materialet är reaktionströgt mot omgivande luft eftersom det bildar ett passiverande oxidskikt på ytan. Upp emot 14% av de material som ingår i moderna flygplan utgörs av titan, medan aluminiumandelen minskat i motsvarande grad. Dessutom har titan en överlägsen s.k. relativ styrka [hållfasthet dividerad med vikt] samt uppvisar utmärkta prestanda då materialet utsätts för höga temperaturer.

Emellertid är titan ett både dyrt och svårbehandlat material då traditionella tillverkningsmetoder används. Vid exempelvis gjutning är titan reaktivt och känsligt för syre och de material som används i formverktyg. När materialet sedan är kallt är det mycket svårt att maskinbearbeta och sliter snabbt ut de verktyg som används, och allt detta leder till att slutprodukterna blir extremt dyra.

”Det är därför som den moderna aerospace-industrin och företag som tillhandahåller produkter eller utrustningar avsedda för additiv tillverkning funnit ett gemensamt intresseområde. De additiva metoderna innebär en förenklad tillverkning utan de begränsningar som man hade vid tidigare tillverkning. Såväl materialspill som bearbetningstid kan minskas, och additiv tillverkning blir ett



självljukt val då det gäller att producera lättviktskonstruktioner”, kommenterar Mr. Vermeulen.

Att reducera antalet singeldetaljer i en konstruktion har också varit en drivande faktor för en utökad användning av additiv tillverkning. Detta illustreras t.ex. av en nyutvecklad, avancerad turboprop-motor från GE Aviation som tidigare bestod av 855 detaljer, men nu har ersatts av blott 12 stycken SLM-tillverkade artiklar. Resultatet har blivit lägre sammansättnings- och logistikkostnader med hänsyn till inspektion, hantering, lagerhållning och transporter. Motorn, som är planerad att användas i Cessnor och andra mindre flygplan, är också lättare och har en högre verkningsgrad jämfört med tidigare varianter, vilket går att härleda till att cirka 30% av dess komponenter är additivt tillverkade.

Ett annat exempel är det 3D-printade insprutningsmunstycket till GE:s nya LEAP-jetmotor där 20 tidigare konventionellt tillverkade delar nu fabriceras som en enda enhet med hjälp av SLM [Fig. 5]!

Ur ett kostnadsperspektiv menar Marius Vermeulen att styckpriset för SLM-tillverkade artiklar nu kommer att sjunka snabbt. ”Med ’Aeroswift’s stora byggplattform, kraftfulla laserkälla och snabbt reagerande ”scanner”-optik är maskinen mellan 6-10 gånger snabbare än andra för närvarande kommersiella maskiner. Detta sänker tillverkningskostnaderna per detalj till blott en tredjedel av priset för vad som idag traditionellt offereras. Dessutom kommer dessa priser att ytterligare kunna reduceras då vi skalar ner maskinstorleken till att matcha specifika komponentkrav och kostnadsscenarioer.”

”Om Sydafrika kan börja producera titan till lägre kostnader sitter vi med ett



Figur 5. Några SLM-tillverkade komponenter till GE Aviations nya LEAP-jetmotor; en sensorenhet (överst) och det numera klassiska insprutningsmunstycket (underst.).

globalt trumfkort på hand då det gäller pulverbäddsbaserad additiv tillverkning med laser. Potentialen är redan stor, men kommer med all sannolikhet att vara enorm i framtiden”, tror den gode Marius till sist. ■

Nytt användningsområde för laser och optik

Bengt Johansson
Teknikcentrum i Gnosjö AB

I Sverige har vi en ren och miljövänlig elproduktion. Nästan inga utsläpp av fossila rökgaser sker från vår egen elproduktion. Vi tror lätt att vi är ensamma. Verkligheten är dock en annan då världen totalt producerar sin el till 70-80% av kol, gas och olja.

Vi pratar ständigt om att vi skall ha strömsnåla kylskåp, förbud mot glödlampor mm. Inom industrin har man också vaknat och återvinner värmen och nya maskiner är mer energisnåla. Dock finns det en typ av snabbt växande storkonsument av el som vi kanske inte tänker på!

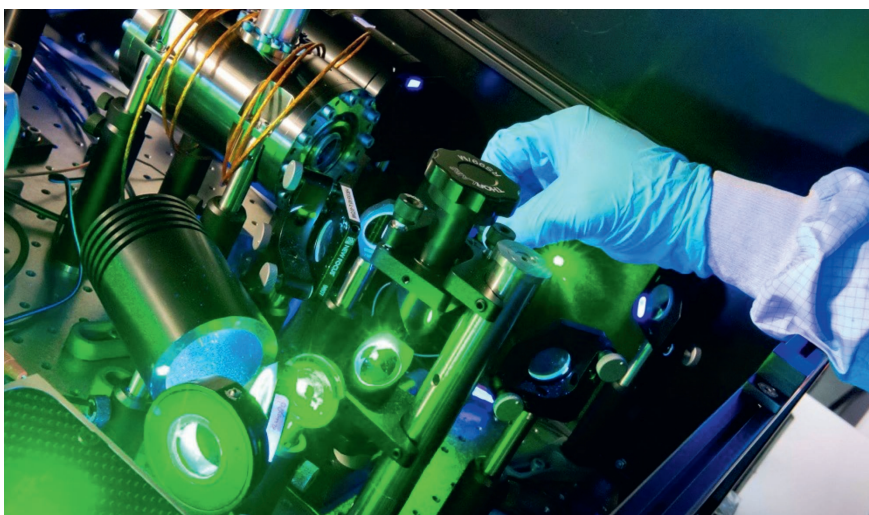
Alla använder vi idag internet på något sätt. Google, Facebook Twitter, Youtube för att nämna några. Så fort vi handlar något i affären sker transaktionerna via nätet. Våra datorer tycker vi inte förbrukar så mycket. Vi tror också de har blivit effektivare. Men har de det?

År 2004 lanserades Pentium 4 med 3,8Ghz och idag sitter vi med I7 3,8Ghz.

Visserligen har de nya datorerna 4-8 kärnor och mycket bättre minneskapacitet. Men skillnaden är inte enorm med tanke på tiden som gått.

På något sätt har Moores lag (att antalet transistorer på ett chip fördubblas varje 24 månad) börjat mattas av. Det går helt enkelt inte att göra transistorerna i processorn mycket mindre och effektivare längre. Samtidigt som behovet av datakapacitet bara växer.

Amazons nya datacenter i Eskilstuna kommer att skapa problem med energiförsörjningen i regionen och stoppa nyetablering av fler energikrävande företag i Mälardalen. Det har vi ju sett på nyhe-



Figur 1.
Del av optikbänken där laserstråle kommer in i systemet.

terna.

Bara i USA förbrukar landets datacenters energi motsvarande 34 st 500 MW kolkraftverk.

Bara Facebooks "face recognition" och "Google translate" betalar miljardbelopp i elkostnad varje år.

Världens största datacenter finns förstås i Kina och det förbrukar ensamt 150 MW plus många andra i +100 MW klassen. Idag står datacenter för nästan 3% av all världens energikonsumtion. Det låter inte mycket, men tänk då att detta är världens snabbast växande bransch. År 2025 väntas datacenters förbruka 1/5 del av all världens energi!

Kraften i dagens datacenter går allt mer mot s.k. artificiell intelligens (Även kallat AI, Machine learning, deep learning etc.). Det kanske låter exotiskt, men är redan extremt mycket implementerat i alla plattformar på internet. Ja kanske den dominerande faktorn idag. Googlesökningar,

språköversättning, ansiktigenkänning, och så förstås att kartlägga användarens intressen och ge "rätt typ" av reklam till användaren via banners som dyker upp överallt. Uppspårning av kriminell verksamhet, olämpligt innehåll på Youtube och inte minst diagnostik av sjukdomar och tolkning av vetenskapliga labbresultat.

AI är också den allra mest energislukande formen av dataanvändning. "Vanliga" processorer är inte speciellt duktiga på den här typen av beräkningar. Grunden och motorn i artificiell intelligens är s.k. neurala nätverk. Nätverket består av en massa små noder som är korskopplade till varandra. Ingen vet heller riktigt vad som sker inuti själva det neurala nätverket. Bara att det fungerar.

Allt detta sker idag i kraftfulla grafik-kort. Grafikort består av tusentals små processorer. Dessa utgör noderna i det neurala nätverket. Alltså har man använt en produkt till något annat än den var

tänkt för från början. Inte bara att driva en bildskärm för datorspelade ungdomar.

Men vad har då laser och optik med detta att göra?

Redan på 1960-70-talet experimenterade man med att använda laserljus och optik för att göra logiska beräkningar.

Laserljus är koherent och kan interferera och bilda sk interferensmönster. Man kan alltså tillvarata kvantfysikaliska egenskaper hos laserljuset. Ljuset "vet" när det är observerat eller inte och antar då också olika kvanttillstånd beroende på vilket. När ljusets status inte mäts eller observeras antar det en vågform medan då det är "observerat" antar det partikelform. Det kan då ta en s.k. "superpositionerad form" där det representerar noll och ett samtidigt. Dvs något som är relaterat till kvant-datorer.

Det har dock visat sej mycket svårt, eller helt omöjligt att göra en optisk "vanlig" processor med den typen av bit arkitektur som har används i alla processorer sedan datorn uppfanns i början av 40 talet.

När det gäller neurala nätverk är det dock annorlunda.

Andy Rubin och Wiliam Andregg på Fathom Computing har lyckats göra ett neuralt nätverk med hjälp av lasrar speglar och optiska komponenter! Fathom är ännu ett litet spinn-off företag från MIT (Massachusetts Institute of Technology) med bara 11 personer.

"Datorerna" är komplexa optikbänkar och för den oinvidge ser det ut som ett "exploderat" teleskop med gröna laserstrålar som studsar runt på mängder av speglar och linser, **figur 1-2**.

Ljusdatorn (LPU, Light Processing Unit) utför extremt snabba AI beräkningar till bara en liten bråkdel av energimängd som skulle behövas om de utförts elektriskt av ett grafikkort. Något som är mer än välkommet i ett datacenter.

Normalt behöver traditionella grafikkort "tränas" i dagar/veckor för att bli bra på sina uppgifter.

Träningstiden för ett optiskt nätverk är minimal och begränsas bara av de elektriska gränssnitten till optiken samt långtidsminnet som givetvis måste vara av en traditionell typ.

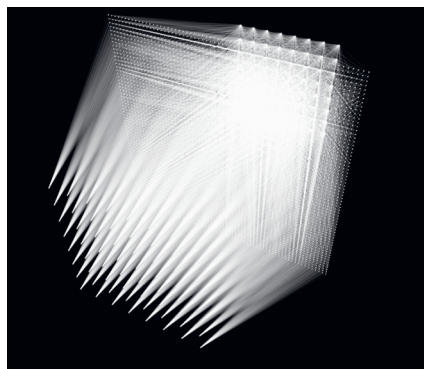
De nätverk man nu jobbar med hos Fathom är av typen RNN (Recurrent Neural Network) och LSTM (Long/short Therm Memory Network) vilka kanske är de vanligaste varianterna i nom AI.

Naturligtvis kan man inte ha stora optikbänkar i serverhallar eller i självkörande bilar, men tekniken är egentligen relativt

enkel och kan miniaturiseras till samma storlek som ett vanligt grafikkort.

Neurala nätverk, **figur 3**, är till skillnad från traditionella datorer inte helt exakta (likt våra hjärnor) Ljusdatorn är inte det heller det pga att den just är ett neuralt nätverk. T.ex. 1+1 är exakt 2 för en vanlig aritmetisk dator, men en AI ger svaret "Sannolikt 2 till 90% säkerhet".

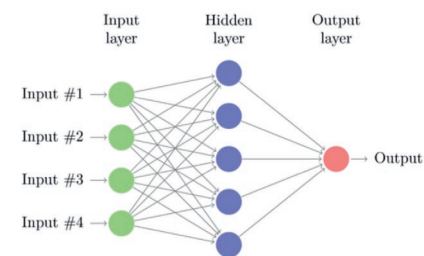
Där emot är de uppgifter som AI är riktigt bra på nästan otäckt "övermänsk-



Figur 2.
En vy av strålgången i systemet där man "plockat bort" de fysiska komponenterna.

liga", men som tur är har datorn inget eget känsloliv.... än så länge.!

Fathom Corp uttrycker sig dock ganska djävt: "Fathom's longer-term goal is to build a platform that can train artificial neural networks with the complexity and graph scale of the human brain." Dock är inte Fathom ensamma om tekniken. "tänkande lasrar" står lite var stans på labben runt om i världen nu. ■



Figur 3.
Exempel på ett neuralt nätverks struktur.

EWF - SPECIALKURS

LASERSVETSNING / LASERHYBRIDSVETSNING

Datum: 10-12/12, 14-16/1, 11-12/3

Mer information:
Jan Frostevarg, Luleå tekniska universitet
jan.frostevarg@ltu.se, 0920 - 49 1675

LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

Lasersvetsning är en högproduktiv sammanslagningsmetod för den moderna tillverkande industrin. Lasersvetsning är framtidens metod enligt många experter och ersätter allt mer konventionella svetsmetoder som MIG/MAG-, TIG-, motstånd- och elektronstråle-svetsning European Welding Federation, EWF, har utvecklat en fristående specialkurs inom lasersvetsning och laserhybridsvetsning som Luleå tekniska universitet ger på svenska. Ett internationellt diplom, EWF-diplomet, garanterar utbildning av hög kvalitet Kursen, nivå B, omfattar totalt 68 timmar och ger Dig goda teoretiska och praktiska kunskaper om lasersvetsning, men även en överblick över andra laserbearbetningsmetoder

Kursen vänder sig till svetsingenjörer, svetstekniker, konstruktörer, produktionstekniker, utvecklingsingenjörer och utbildare m.fl. som vill skaffa sig kunskap om metodens möjligheter för rationell och effektiv sammanslagning.

Intresseanmälan:
<https://www.ltu.se/ltu/Samverkan/Utbildningar-och-program/Produktion-och-logistik>

Otto Märten berättar om en intressant produkt för strålanalys vid additiv tillverkning och fjärrlasersvetsning

Johnny K. Larsson,
Autokropolis Engineering

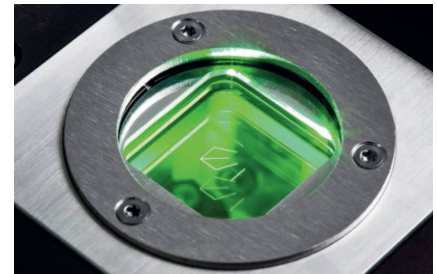
Företaget PRIMES GmbH i Pfungstadt har mer eller mindre varit liktydigt med Dr. Otto Märten, en verklig trotjänare i laserbranschen. Åtskilliga är de intressanta samtal jag har haft med den lågmälda Otto, inte minst under många timmars samvaro i bilen på tyska Autobahn. Då har vi dryftat olika laserproblem, inte minst frågor kring processövervakning och verktyg för stråldiagnostik. Det är ju inom det senare ämnesområdet som PRIMES positionerat sig, och idag använder sig de flesta biltillverkare med självaktning av PRIMES' klasiska PMM [Power Measurement Module] för effektmätning. Men företaget har många andra verktyg i sin produktportfölj, och ett av de senaste tillskotten är ScanFieldMonitor avsett att användas vid SLM [Selective Laser Melting] och RLW [Remote Laser Welding]. Så låt oss höra vad den gode Otto har att säga om dess utveckling och användningsområden.

Med sina unika möjligheter vid såväl konstruktiv utformning som tillverkning har additiv tillverkning [AM = Additive Manufacturing] snabbt vunnit relevans inom ett brett spektrum av vetenskapliga och industriella applikationer. Speciellt då det gäller industriellt utnyttjande av tekniken är gedigna kunskaper om och kontroll av de faktorer som har störst inverkan på processen avgörande för det kvalitativa utfallet. Förutom fokalpunkts egenskaper, vilka är direkt avgörande för hur pulvret

smälts, spelar ”scanner”-verktyget en viktig roll. Emellertid tar dagens befintliga instrument för strålanalys föga hänsyn till detta.

För andra laserprocesser, som svetsning och skärning, är stråldiagnostik väletablerad och utgör en väsentlig del av kvalitetsövervakningen, men detta gäller ännu inte beträffande additiv tillverkning som exempelvis SLM. Detta beror inte på att det skulle vara mindre nödvändigt, utan snarare på att det saknas lämpliga metoder som kan mäta alla relevanta parametrar då detta överstiger förmågan hos konventionella verktyg för stråldiagnostik. Även om det förekommer dylika instrument som utvecklats just med tanke på tredimensionella ”scanner”-applikationer lider de alla av vissa begränsningar. Några av de främsta hindren är rumsliga begränsningar inuti i en SLM-kammare och den näst intill obegränsade variationen av olika positioneringar av fokalpunkten och infallsvinklar hos laserstrålen, vilket i princip innebär att all strålanalys måste ske när fokalpunkten befinner sig i ”scanner”-verktygets nollreferens.

Därutöver är karakteriseringen av optiken för ett ”scanner”-system mer omfattande då den också inkluderar en spegelenhet för avlänkning av laserstrålen. Detta ökar markant listan över relevanta parametrar vilka kan sammankopplas med egenskaperna hos systemet för stråldistribution. Naturligtvis innefattar detta vanliga stråLPARAMETRAR som fokalpunktsstorlek, Rayleigh-längd och strålkvalitet, men dessa måste kunna mätas inte bara i en referenspunkt utan helst över hela arbetsfältet. Som i alla applikationer där en högeffektlaser används är termiskt orsa-



kad fokalpunktsförskjutning ett problem som måste beaktas. P.g.a. den avancerade optiken för positionering av fokalpunkten kan förskjutningen också vara beroende av brännfläckens läge i SLM-kammarens koordinatsystem.

Därutöver har vi de ”scanner”-specifika frågeställningarna kring ytjämnheten i arbetsfältet, noggrannhet och reproducerbarhet, och hur dessa krav uppfylls vid verkliga fokalpunktslägen och processhastigheter i jämförelse med programmerade målvärden. Detta inkluderar även den exakta synkroniseringen mellan ”scanner”-verktygets rörelser och laserstrålens intensitet. Om vi sedan beaktar additiv tillverkning av större komponenter, som kräver flera laserkällor för att uppnå erforderlig produktivitet, finns alltid den mindre triviala uppgiften att exakt kunna kalibrera två eller flera överlappande arbetsfält.

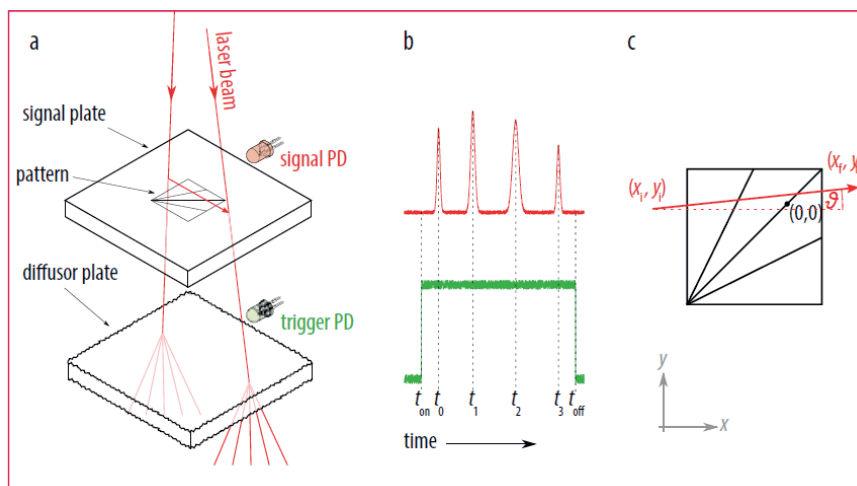
Speciellt i industrisektorer med stringenta säkerhetskrav, som medicinteknik och aerospace där man strävar efter att bibehålla en hög processtabilitet, finns det standarder som kräver regelbunden övervakning av merparten av de ovan nämnda parametrarna. Eftersom många av dessa inte kan fastläggas genom enbart mätning av hur effekttätheten i laserstrålen fördelas, används idag olika förenklade

mätmetoder som att t.ex. utföra vissa provmönster med efterföljande visuell kontroll av resultatet. Dessa förenklade prov utförs emellertid inom ett parameterfönster som avsevärt skiljer sig från de optimerade processparametrar som sedan kommer att användas.

Sammanfattningsvis finns det alltså ett behov av en mer långtgående karaktärisering av processparametrarna vid SLM-tillverkning, som tar hänsyn till de ovannämnda utmaningarna. För att möta sådana krav har PRIMES utvecklat ett kompakt mätverktyg som baseras på ett nytt koncept som klarar av att hantera de för "scanner"-bearbetning speciella mätbehoven. Vi kan presentera validerade mätresultat med en prototypvariant av vårt verktyg ScanFieldMonitor, där vi kunnat fastlägga parametervärden vilka hittills varit oåtkomliga med konventionell stråldiagnostik.

Hur fungerar ScanFieldMonitor ?

Som tidigare konstaterats är mekanismen för hur laserstrålen manipuleras en fundamental komponent då man skall bedöma processkvaliteten hos en SLM-maskin. Den skall därför stå i fokus för undersökningen då den optiska stråldistributionen fram till arbetsområdet analyseras. Det är därför, i motsats till konventionell stråldiagnostik, vårt patenterade mätkoncept baseras på en laserstråle som rör sig [Fig. 1a] i stället för en stationär sådan. Laserstrålen förflyttas längs ren rak linje, som i fortsättningen kommer att kallas vektor, över ett rastermönster i en glasplatta, som därmed definierar själva mätplanet. En fotodiod [PD = Photo Diode] registrerar det utspridda ljuset då strålen passerar över rastret. Den genomsläppta laserstrålen får expandera via en diffusionsplatta för att reducera energitätheten till en okritisk nivå för den underliggande byggplattformen, vilken fungerar som en absorbent av laserljuset. En andra fotodiod förser oss med information om laserns inkopplingstid. Det relativa tidsbestämde avståndet, liksom signalvidden vid högsta värde i sekvensdiagrammet [Fig. 1b], gör att vi inte bara kan bestämma stråldiametern utan också vektorns exakta position i förhållande till rastermönstret [Fig. 1c] och processhastigheten. Eftersom mätplanet utgör referenspunkt kan placeringen av verktyget på byggplattformen i sin tur referera till detta och därmed blir en absolut positionsbestämning av laserstrålen på byggplattan möjlig. Detta nya analysverktyg beskriver enbart en in-



Figur 1. Principen för hur ScanFieldMonitor fungerar: schematisk uppställning (a), signalsekvens (b), och vektorkoordinater i förhållande till signalmönstret (c).

tegrerad energidistribution i laserstrålen, och inte en tvådimensionell avbildning som vi är vana vid med tidigare stråldiagnostik, men mängden av övrig, tillgänglig information är i högsta grad fördelaktig, vilket jag tänker utveckla vidare med några typiska applikationsexempel.

Ett verktyg inte bara för analys av strålens kaustik

Vi tog fram en prototyp som baserades på den ovan beskrivna mättekniken. Prototypen klarar av att hantera effektnivåer och fokalpunktsdiametrar som är typiska [$P < 1 \text{ kW}$, $\phi > 25 \mu\text{m}$] för SLM-maskiner avsedda för 3D-printning med metaller och som är baserade på laserkällor i våglängdsområdet NIR [Near InfraRed]. Mätverktyget är mycket kompakt med ett litet "footprint", vilket gör att det kan positioneras i många olika lägen inom arbetsområdet. Här har vi kunnat åskådliggöra olika former av mätresultat som visar de basala funktioner, prestanda och möjligheter som denna utrustning har för att karaktärisera ett "scanner"-verktyg och kalibrera detsamma. Dessa nya möjligheter och fördelar omfattar:

- Möjlighet att utföra mätningar som inte är möjliga med konventionella verktyg för stråldiagnostik som exempelvis processhastighet och strålanalys inom flera olika områden av byggplattformen
- Sammankoppla flera olika kalibreringsuppgifter i ett verktyg och därmed reducera investeringskostnader, komplexitet och arbetstid
- Avsevärd förenkling och tidsbesparing för vissa mätuppgifter
- Möjlighet att mäta de faktiska processparametrarna precis vid arbetspunkten där alternativa metoder oftast måste utgå från att processfönstret är

snäva

- Ett kompakt och kraftfullt verktyg som är lämpligt för omfattande "scanner"-analys inom hela arbetsområdet

För att visa det nya konceptets funktion gjorde vi en mängd mätningar med verktyget placerat i en fix position. Det statistiska utfallet av uppmätta vektorer med varierande orientering och en ökande processhastighet visas i **figur 2a**. Verktyget var placerat i "scannerns" referenspunkt och där mätplanet sammanföll med optikens fokalplan. Färgkodningen indikerar den ordning [från rött till purpur] i vilken de olika "scanningarna" utfördes. Som synes registreras en avsevärd förkortning av vektorerna vid en tilltagande "scanning"-hastighet. Detta beror inte på något mätfel utan är en verklig effekt, vilken även kan observeras då ett arbetsstycke belyses med samma exponeringsschema. Anledningen är istället bristfälligt inställd fördröjning av laserns inkopplingstider i mjukvaran för "scanner"-verktygets styrning, vilket medför ett konstant tidsfel, som visar sig i form av ett hastighetsberoende längdfel. Förmågan att detektera dessa synkroniseringsproblem och de därtill kopplade möjligheterna till kalibrering av "scanner"-verktyget kommer jag att diskutera lite längre fram.

Den beräknade processhastigheten och laserstrålens infallsvinkel mot horisontalplanet för hela försökserien visas i **figur 2c**. Mätverktygets höga noggrannhet är uppenbar då man endast kan observera en minimal spridning av mätdata i jämförelse med den räta linje som representerar de programmerade värdena och som illustreras med streckade linjer. Å andra sidan visar bestämningen av stråldiametern inget större beroende av infallsvinkel eller processhastighet, vilket framgår av

figur 2b där färgkodningen överensstämmer med den i figur 2a. Medelvärdet för stråldiametern uppgår till 35,8 μm med en standardavvikelse [ljusblått band] på blott $\pm 0,7 \mu\text{m}$. Detta visar på ett imponerande sätt konceptets robusthet mot varierande mätförhållanden.

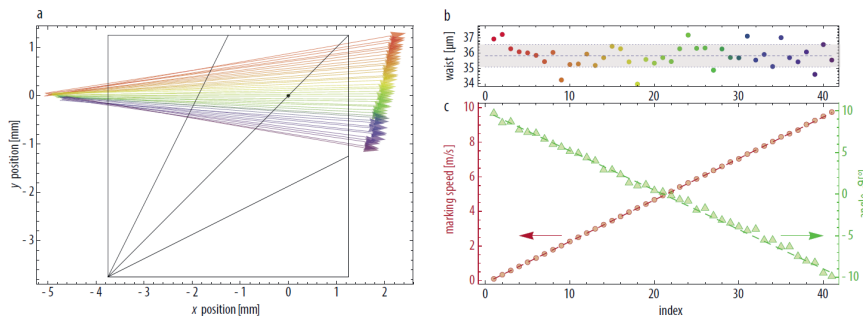
Eftersom signalerna från de båda dioderna är det enda som krävs för att mäta storheter över tid är datainsamlingen i sig snabb och begränsas endast av den tid det tar för "scanner"-verktyget att beskriva vektorerna. I fallet med belysningsmönstret i figur 2 tog detta mindre än 350 μs att utföra för den kompletta sekvensen. Därför kan mätmetoden användas för ytterligare analys av mätvärden över tid som t.ex. undersökning av fokalpunktsförskjutning.

Tidsinställning och synkronisering

För att kunna smälta pulvret i pulverbädden på exakt rätt ställe krävs inte bara att positioneringen av laserstrålens fokalpunkt är korrekt. Också den sekvens med vilken lasern belyser pulverbädden måste synkroniseras med galvo-speglarnas rörelser. Eftersom ScanFieldMonitor tillhandahåller en precis lägesinformation kan verktyget användas för att undersöka och åtgärda sådana problem.

Låt oss t.ex. anta att det föreligger en fördröjning då lasern slås på, något som man inte tagit tillräcklig hänsyn till då "scanner"-verktyget programmerades. Ett dylikt konstant tidsfel medför ett rörelselängdfel som ökar med ökande processhastighet och som resulterar i en linjär förskjutning av vektorns startpunkt. Resultaten från sådana mätningar illustreras i figur 3 där avvikelser hos vektorns startpunkt [Δx_{start}] är markerad som en funktion av den uppmätta processhastigheten. De röda datapunkterna illustrerar beteendet vid de ursprungliga "scanner"-inställningarna, vilket visar på en växande avvikelse från den programmerade startpunkten, som kan uppgå till över en halv millimeter vid den maximala processhastigheten. Lutningen representerar en tidsfördröjning på 59 μs .

När mätningen upprepas, efter det att man tagit hänsyn till denna tidsfördröjning, visas resultatet i form av de gröna trianglarna där man kan se en nästan perfekt kompensering med undantag av en mindre uppgång i avvikelse för processhastigheter överstigande 8 m/sek. Samma data kan naturligtvis användas för att kalibrera vektorns ändpunkt. Tidsåtgången för en sådan kalibreringskurva,



Figur 2. Mätning av 41 vektorer med olika orientering och processhastighet utförd i ett horisontalplan som sammanfaller med "scannerns" referenspunkt: grafisk representation (a), uppmätt stråldjuka (b), samt processhastighet och laserstrålens infallsvinkel (c).

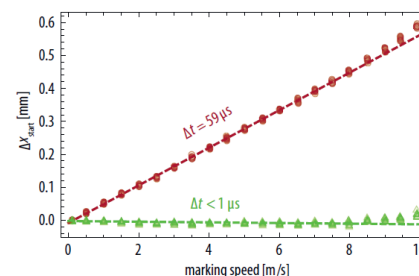
omfattande 21 olika hastigheter, var och en med 10 repetitioner, är mindre än 3 sekunder. Detta i kombination med det faktum att kompenseringarna är direkt tillgängliga i mjukvaran, och inte kräver någon ytterligare approximation av de optiska parametervärdena, innebär en avsevärd tidsbesparing då "scanner"-verktyg skall kontrolleras och kalibreras.

En ytterligare fördel är att kalibreringen kan ske direkt med de processparametrar som används i det enskilda fallet, vare sig det rör sig om effekter på 20 W eller 1 kW och hastigheter från 0,1 m/sek till 10 m/sek. Ej heller krävs speciellt utformade provkupper för operationen. Det är inte obekant att laserkällor uppvisar en effektberoende inkopplingstid, och därför kan det vara nödvändigt att utföra prov på olika effektnivåer för att garantera en tillfredsställande kompensering av "scanner"-parametrarna.

Parametrar för strålpropagering

Efter att hittills talat om möjligheterna att tillförsäkra en korrekt positionering av laserstrålen inuti SLM-kammaren kommer jag nu att rikta uppmärksamheten på fokalpunktens projicerade storlek på pulverbädden. För att uppnå en adekvat uppsmältning av metallpulvret måste man försäkra sig om en tillräcklig energitäthet. Detta innebär, förutom en korrekt effektnivå, avsedd fokalpunktsstorlek och en axiell positionering av densamma på pulvrets yta. Bestämning av parametrar relevanta för laserstrålens utbredning, såsom fokalpunktsposition, divergensvinkel, Rayleigh-längd och strålkvalitet, kräver uppmätning av dessa i flera olika punkter längs strålens propagering, eller utbredningsriktning. Detta kan ske med automatik i en SLM-kammare då byggplattformen succesivt sänks.

En sådan mätning skedde med ScanFieldMonitor, vilket resulterade i parametrar för strålutbredningen som



Figur 3. Mätning och kalibrering av tidsfördröjning mellan laserkällans och "scanner"-verktygets respektive aktivering; Lägesförändring av vektorns startpunkt som funktion av processhastigheten för ursprungliga (röda cirkel) och justerade (gröna trianglar) parameterinställningar. Lutningsvinkeln för den linjära regressionen (streckade linjer) blir en direkt illustration av tidsfördröjningsfelet.

överensstämde perfekt med de som uppmättes med vårt industriellt validerade kamerabaserade mätinstrument PRIMES' MicroSpotMonitor. Speciellt intressant är att se vad som övertrumfar spännvidden för konventionell stråldiagnostik. Exempelvis blir en utökad tolkning möjlig om vi inkluderar processhastigheten som en funktion av fokalpunktens axiella position i våra hänsynstaganden. P.g.a. sin delvisa telecentricitet leder användningen av en f-theta-lins till en linjär ökning av den registrerade processhastigheten i förhållande till linsens avstånd till arbetsområdet. Detta är något som bekräftas av datapunkterna i figur 4 där den uppmätta hastigheten [gröna trianglar] följer den predikterade. Den z-koordinat vid vilken den programmerade hastigheten på $v_{\text{set}} = 0,1 \text{ m/sek}$ uppnås [vertikal, streckad grön linje] kan bedömas vara arbetsområdets ytplan, eftersom "scanner"-verktyget här antas leverera den förväntade geometriska strålförmen. Men om vi jämför detta koordinatvärde med fokalpunktens programmerade läge kan vi se en avvikelse på $\Delta z = 2,6 \text{ mm}$ med vårt verktyg. Den nödvändiga upplinjeringen av ett "scanner"-verktyg, genom att få dessa två plan att överlappa varandra, kan analyseras och justeras på ett enkelt sätt med

hjälp av ScanFieldMonitor. Detta tack vare att fokuspunktsstorlek och processhastighet bestäms samtidigt i en enda mätning.

Tidsbestämd fokuspunktsförskjutning

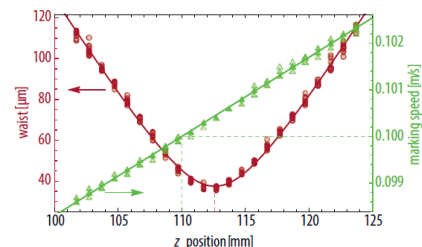
Ett allmänt förekommande problem vid laserbearbetning med höga effekter är den absorption av laserstrålen i fokuseringsoptiken som leder till fokuspunktsförskjutning genom termisk påverkan. Den transmitterade strålen värmer glassubstratet via lokal absorption i dess ytbeläggning och bulkmaterial. Förändringen i brytningsindex och strålförändring leder generellt till en kortare effektiv fokallängd vilket gör att laserstrålens "midja" förflyttas närmare optiken och bort från den tilltänkta arbetsytan. Detta kan reducera energitätheten till att ligga under tröskelvärdet för en adekvat uppsmältningprocess. För "scanner"-applikationer gäller dessutom att de snabba positionsförändringarna och exponeringstiderna medför att termiska jämviktsförhållanden inte uppnås. Därför blir en analys av ett förväntat jämviktsförhållande inte en relevant beskrivning av hur processen beter sig. Som jag påpekat tidigare är mätfrekvensen hos vårt verktyg primärt begränsat till den tid de tar att "scanna" en vektor. Härmed kan, med typiska vektorlängder kring maximalt 1 cm och processhastigheter upp till 10 m/sek, mätfrekvenser på upp till 500 Hz uppnås. Med en sådan tidsmässig upplösning blir det möjligt att inte bara undersöka jämviktsförhållanden utan också kortvariga förändringar framkallade av termisk påverkan. En mätning av laserstrålens "midja" utförd i ett horisontalplan tre Rayleigh-längder ovanför fokuspunkten illustreras i **figur 5**. I detta asymptotiska område av strålens kaustik är förändringar i laserstrålens diameter direkt proportionella med den axiella förskjutningen av fokuspunkten. Data har insamlats med en frekvens på cirka 100 Hz vid processhastigheter på 1 m/sek respektive 10 m/sek. De blå datapunkterna, uppmätta vid 20 W lasereffekt, uppvisar ingen betydande förändring i stråldiameter över tid [$w = 102,3 \pm 2,2 \mu\text{m}$]. I motsats till detta visar de röda datapunkterna uppmätta vid 400 W effekt ett snabbt avtagande midjemått, som motsvarande innebär en fokuspunktsförskjutning i närheten av arbetsområdet. Dessa data kan visualiseras via en tvåfas exponentiell upplösning med ett jämviktsvärde på $81,2 \mu\text{m}$ och tidskonstanter inom ett fåtal sekunder.

Slutsatser och framtidsutsikter

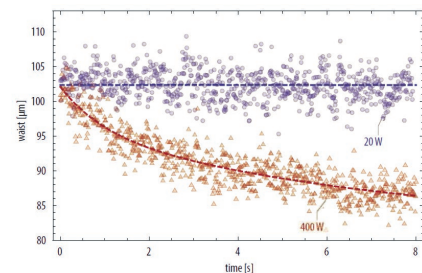
Vårt nya strålanalyskoncept för tredimensionell additiv tillverkning innebär att vi kan tillhandahålla ett analysverktyg för kalibrering av viktiga "scanner"-parametrar, vilket hittills inte varit möjligt med konventionell stråldiagnostik. Det omfattar en exakt bestämning av ett antal mätvärden som krävs enligt standarden DIN 35224 som används vid tillverkning av aerospace-applikationer, såsom processhastighet, axiell fokuspunktspositionering och fokuspunktsförskjutning. Förutom de mätningar som jag hittills beskrivit kan verktyget användas för att karaktärisera olika egenskaper hos "scanner"-verktyget vilka kan sammankopplas med olika fokuspunktspositioner. Det kan röra sig om formförändringar i pulverskiktet vid strålanalys i ett specifikt horisontalplan eller en komplett analys av ytkoordinaterna i jämförelse med arbetsområdet då en fullständig stråлкаustik registreras. Jag vill också nämna möjligheten att, då flera "scanner"-verktyg samverkar i en och samma kammare, verktyget kan placeras i det överlappande området för två olika arbetsfält. Som jag inledningsvis sade är teknologin direkt överförbar till andra processer där ett "scanner"-verktyg förekommer, som exempelvis vid fjärrlasersvetsning.

Den mångfasetterade användbarheten av ScanFieldMonitor lämpar sig för ett stort urval av applikationer hos många olika potentiella användare, såsom ett kalibreringsverktyg för tillverkare av AM-maskiner och "scanner"-verktyg, men också för utvecklingsingenjörer, servicetekniker och slutanvändare. Slutligen som ett kvalitetssäkringsinstrument med vars hjälp man kan dokumentera ställda noggrannhetskrav. Vi på PRIMES tror att denna nya form av strålanalys med enbart ett verktyg kan ersätta en kombination av diverse speciella mätprocedurer som hittills krävts för ändamålet. Det ger svar på många frågor på ett bekvämt sätt och har möjligheten att bli ett universalverktyg i framtida kvalitetskontroll vid tredimensionell additiv tillverkning.

ScanFieldMonitor har utvecklats av ett team här på PRIMES där jag särskilt vill framhålla min kollega Dr. Andreas **Koglbauer** för hans dedikerade engagemang. Samtidigt vill jag lyfta fram det finansiella stöd vi fått från BMBF [Bundesministerium für Bildung und Forschung] inom projektet "GenChain". ■



Figur 4. Mätning av laserstrålens kaustik med hjälp av ScanFieldMonitor ger inte bara information om energitätheten i strålens utbredningsriktning. I detta exempel ser vi också den uppenbara diskrepansen mellan fokuspunktsläge och arbetsrådets ytplan.



Figur 5. Analys av fokuspunktsförskjutning över tid. Tidsbestämd förändring av stråldiameteren i ett fixt mätplan, tre Rayleigh-längder ovanför fokuspunkten, för två olika lasereffekter.



För den som är intresserad av att få veta mer om ScanFieldMonitor förmedlar jag nedan kontaktuppgifterna för Dr. Otto **Märten**:

PRIMES GmbH
Max-Planck-Straße 2
64319 Pfungstadt, Germany
Telefon: +49 6157 9878 113
E-mail: o.maerten@primes.de
www.primes.de

Fråga laserdoktorn

Fråga

Vi har en relativt ny fiberlaser. Nu har vi fått en förfrågan på att skära koppar. Hur fungerar den typen av skärning med vår laser? Finns det några utmaningar eller problem, och i så fall...hur löser vi dem?

Svar

Koppar i fast tillstånd kan betraktas som ett högreflektivt material vid exponering för infrarött ljus.

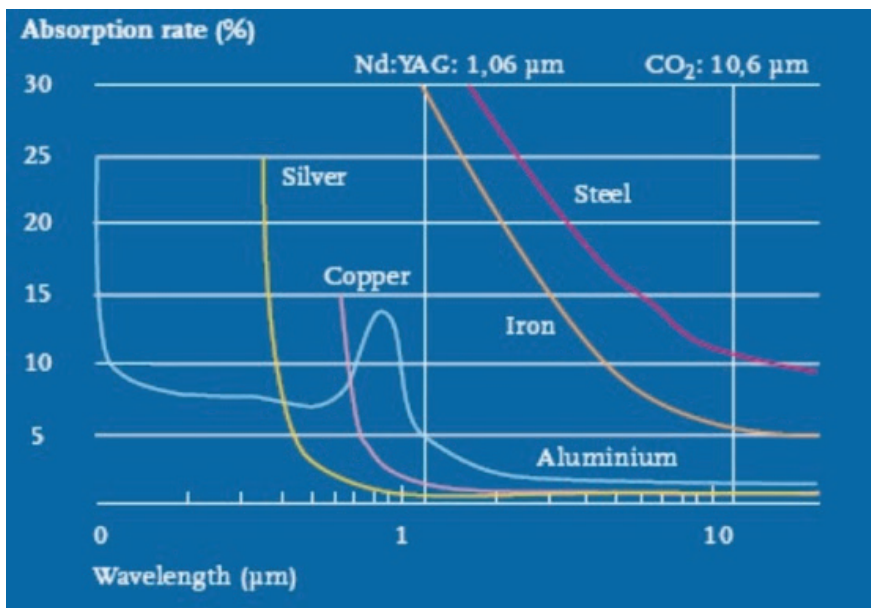
Ljuset från fiberlasern har en karaktäristisk våglängd runt 1,07 μm , att jämföra med 10,6 μm för CO_2 -lasern. Det kortare våglängden ger en ökad absorption av energin i materialet men också möjligheter till en mer effektiv fokusering av ljuset. Fokalpunktens diameter kan i vissa fall vara 1/10 av densamma hos CO_2 -lasern vilket ger en högre effekttäthet och därmed ökad penetrationsförmåga.

Utmärkande för koppar är att den låga absorption av infrarött ljus kan medföra problem vid laserskärning. Problemen yttrar sig ofta i form av dålig snittkvalitet och reflexer som kan skada optiken. Ren koppar reflekterar ca. 95% av IR-strålningen ($\sim 1 \mu\text{m}$) i fast tillstånd, **fig 1**. Reflektiviteten minskar gradvis i takt med att materialet värms upp. När materialet övergår i flytande form minskar reflektiviteten drastiskt, ner till $<70\%$.

Vid skärning av koppar är det viktigt att välja rätt skärparametrar. Vid felaktiga val riskerar man att laserstrålen interagerar alltför lång tid med materialet, något som ökar risken för reflektion av laserljuset. För hög reflektion av laserljus minskar effektiviteten hos skärprocessen och orsakar i värsta fall skador på optiken.

Det mest kritiska skedet under skärningen är själva starten, speciellt vid piercing. När skärningen väl har startat kommer laserstrålen till stor del att vara i ingrepp i smält material vilket minskar risken för reflexer.

Några praktiska tips: Minska skär-



Figur 1. Absorption av laserljus i fast material vid olika våglängder.

hastigheten något för att minska risken att "tappa" snittet. Om detta inträffar kommer laserstrålen i ökad kontakt med material i fast form (vilket ger maximal reflektion). Säkerställ också att strålen verkligen har penetrerat materialet innan själva skärningen startar.

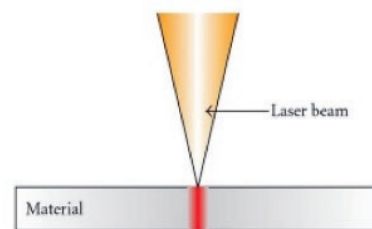
Lägg fokalpunkten så nära överkanten på plåten som möjligt (såväl vid piercing som vid skärning), här kan man behöva göra vissa justeringar för att få rätt snittkvalitet, **fig 2**. Detta minimerar mängden material som kan interagera med laserstrålen vid starten vilket maximerar den tillgängliga effekten och ger en snabbare smältning av det fasta materialet.

Använd hög effekt för att minimera tiden för laserstrålen att interagera med det fasta materialet (för att minska risken för reflexer), **tabell 1**. Tabellen nedan (källa IPG) ger en grov rekommendation för att underlätta inställning av den slutliga effekten.

Vid piercing och skärning av koppar används i regel oxygen med relativt högt tryck (6-20 bar beroende på laser, materi-

altjocklek och vilken kopparlegering som ska skäras). Oxygenet ökar stabiliteten hos skärprocessen, men minskar också risken för reflexer genom bildandet av kopparoxider på materialytan.

Det här var några korta tips för att komma igång med skärningen. För att få ett optimalt resultat måste man naturligtvis fintrimma skärningen och anpassa parametrarna efter den tillgängliga laserkällan och materialet. Helt klart är dock att en fiber/disklaser ger förbättrade möjligheter att skära koppar med ett gott resultat än då en klassisk CO_2 -laser används. ■



Figur 2. Fokalpunkten i överkant på plåten

Tabell 1. Effektrekommendationer från IPG.

Copper Thickness	0.04 inch 1 mm	0.06 inch 1.5 mm	0.08 inch 2 mm	0.12 inch 3 mm	0.16 inch 4 mm	0.25 inch 6 mm
Minimum Peak Power Needed	1000 W	1000 W	1500 W	2000 W	3000 W	4000 W



**Vi förser tillverkande industri med
nyckelfärdiga robotceller för lasersvetsning**

PERMAFLEX
samlad kunskap i en robotcell



Kvalitet. Produktivitet. Lönsamhet.
www.permanova.se



KALENDARIUM 1-2019

2019

APRIL

17 LaserNytt 1-2019

Per Westerhult

25 Laserdag och Årsmöte. Swerim (fd Swerea Kimab), Stockholm

Per Westerhult

SEPTEMBER

27 LaserNytt 2-2019

Per Westerhult

OKTOBER

17 Laserdag 2. Planering pågår

Per Westerhult

DECEMBER

13 LaserNytt 3-2019

Per Westerhult

LASER

LASERGRUPPEN