

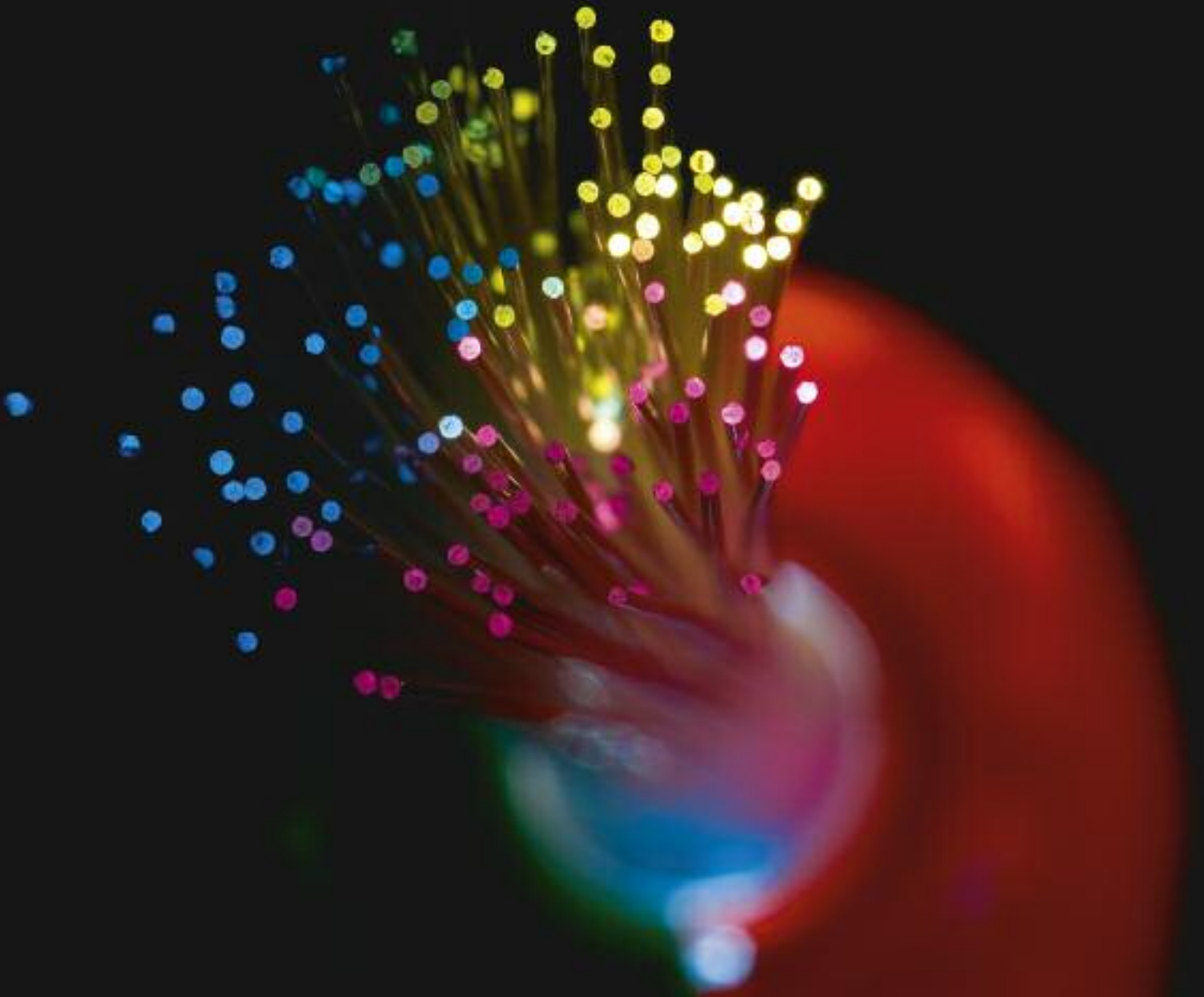


Fraunhofer

LIGHT & SURFACES

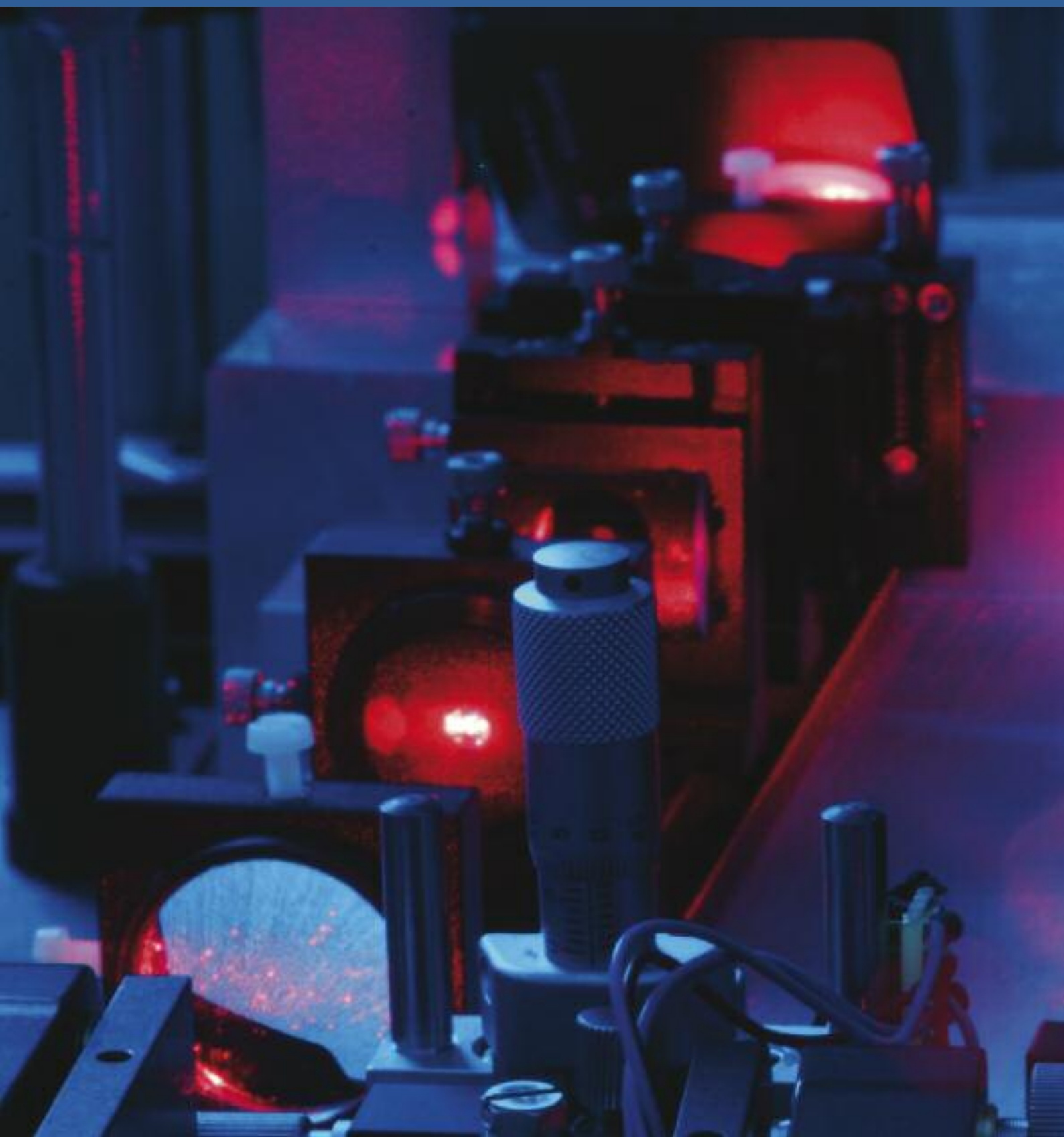
FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

TAILORED LIGHT – LICHT ALS WERKZEUG



INHALTSVERZEICHNIS

Lasertechnik – Forschung im Verbund	5
Materialbearbeitung mit dem Laserstrahl	7
Laserstrahlschneiden und -abtragen	8
Fügen mit dem Laser	16
Auftragschweißen, Generieren, Randschichtveredeln und Polieren mit dem Laserstrahl	22
Innovative Systemkomponenten für die Materialbearbeitung	29
Flexibilität beginnt im Kopf	30
Qualität konsequent sichern	34
Laserstrahlquellen und -komponenten	37
Innovative Laserstrahlquellen	38
Forschungsschwerpunkt Faserlaser	42
Laser und Lasersysteme für Forschung und Industrie	44
Entwicklung von Anlagentechnik und Laserintegration	47
Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces	54



LASERTECHNIK – FORSCHUNG IM VERBUND

Optische Technologien zählen zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Sie revolutionieren den Informationsfluss in optischen Netzwerken und ermöglichen immer kleinere Strukturen in der Mikroelektronik. Die optische Sensorik vereint Schnelligkeit und Selektivität und die berührungslose Materialbearbeitung erlangt durch effiziente Strahlquellen immer neue Einsatzbereiche. Maßgeschneidertes Licht »Tailored Light« ist der Treiber dieser Entwicklung.

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat »Tailored Light« als eines ihrer zwölf Schwerpunktthemen gewählt. Der gezielte Einsatz von Licht verlangt die enge Zusammenarbeit von Experten unterschiedlicher Fachgebiete, z. B. der Optik, Elektronik, Messtechnik, Werkstofftechnik und Produktionstechnik. Um ihre Kompetenzen abgestimmt einzusetzen und strategische Entwicklungen gemeinsam voranzutreiben, haben sich sechs Fraunhofer-Institute zum **Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces** zusammengeschlossen.

Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten der beteiligten Institute sind die Entwicklung von innovativen Laserstrahlquellen und -komponenten und die Entwicklung von Technologien und Anlagenkonzepten zur Lasermaterialbearbeitung sowie zur Laserintegration in die moderne Fertigung. Zunehmende Bedeutung gewinnt dabei die Entwicklung und Erprobung der dazugehörigen Systemtechnik zur Prozessüberwachung, -steuerung und -regelung sowie Qualitätskontrolle.

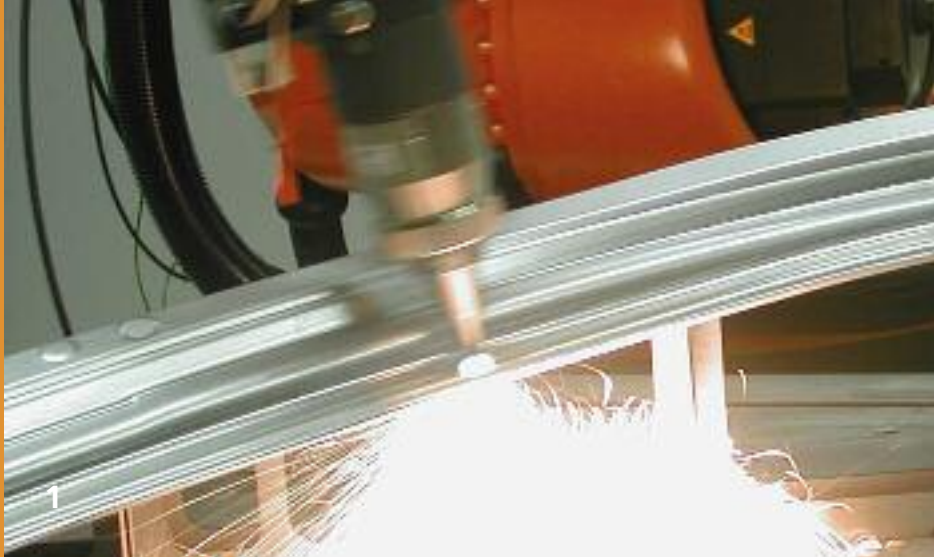
Die vorliegende Broschüre zeigt auf, wie es den Forschern des Fraunhofer-Verbundes Light & Surfaces in der Vergangenheit eindrucksvoll gelungen ist, Forschungs- und Entwicklungsergebnisse dieser Schlüsseltechnologie zügig in praktische Anwendungen zu überführen und wie Tendenzen der nächsten Jahre mit dem »Licht als Werkzeug« aussehen.



MATERIALBEARBEITUNG MIT DEM LASERSTRAHL

Das Werkzeug »Laser« steht für Schnelligkeit und Präzision. Neue Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung verkürzen die Prozessketten, reduzieren Herstellungskosten, erhöhen die Durchsatzraten in der Produktion, verbessern die Effizienz und Güte von Fertigungsprozessen und Produkten. Der Einsatz des Lasers als universelles Werkzeug ist weltweit auf dem Vormarsch. Mit neuen Lasersystemen, wie dem Faserlaser und Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern, erschließen sich völlig neue Anwendungsgebiete und Materialien. Die Weiterentwicklung von Technologien für die industrielle Anwendung, so z. B. die Remote-Bearbeitung, läuft mit der Entwicklung von Lasersystemen und Komponenten parallel einher und ermöglicht völlig neue Qualitäten und Quantitäten in der Materialbearbeitung sowohl in der Mikro- als auch in der Makrotechnik. Die Forderung nach leichteren, kompakteren und hochbeanspruchten Bauteilen und Aggregaten führt zu neuen Fertigungskonzepten und Werkstoffpaarungen, die sich mit dem Laser wirtschaftlich realisieren lassen. Ergänzt durch innovative Systemtechnik, können trennende und fügende Verfahren kombiniert und damit flexible Anlagenkonzepte entwickelt werden.

Die Lasermaterialbearbeitung umfasst im Fraunhofer-Verbund eine breite Spanne von Laserverfahren. Trennende Verfahren (z. B. Schneiden, Abtragen, Bohren), fügende Verfahren (Laserstrahlschweißen, Laserlöten) sowie Verfahren zur Laseroberflächenbehandlung (Härten, Polieren, Laserstrahlauftragschweißen) inklusive der generativen Fertigung. Verbunden mit einem fundierten Werkstoff-Know-how und der Möglichkeit einer umfassenden Werkstoffcharakterisierung sowie durch Nutzung ausgewählter Technologienetzwerke bestehen auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung hervorragende Kompetenzen in den Fraunhofer-Instituten und deren FuE-Partnern.



LASERSTRAHLSCHNEIDEN UND -ABTRAGEN

Laserstrahlschneiden

Das Laserstrahlschneiden gehört zu den bekanntesten Lasertechnologien und ist in der Massenproduktion seit langem eine Alternative zum konventionellen Schneiden mit Stanzwerkzeugen. Der Laserstrahl als verschleißfreies, berührungsloses sowie flexibel und kontrolliert einstellbares Werkzeug bietet eine exzellente Qualität des Schneidprozesses und führt zu einer hohen Automatisierbarkeit. Neue brillante Strahlquellen, wie Faser- oder Scheibenlaser, zeigen völlig neue Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich Materialart, Materialdicken und Prozesseffizienz auf. Neue hochdynamische Systeme und Strahlablenkoptiken machen das Laserstrahlschneiden als Fertigungstechnologie immer attraktiver.

Leistung, Strahlqualität und Wellenlänge beeinflussen den Laserschneidprozess

Die Fraunhofer-Institute können auf dem Gebiet des Laserschneidens auf eine mehr als 20-jährige Erfahrung zurückgreifen. Die in diversen industriellen Entwicklungsprojekten vielfach erprobte Simulationssoftware (z. B. CALCut vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT) und das Know-how bezüglich der Optimierung von Laserstrahl- und Gasparametern sowie zugehöriger Systemkomponenten bilden eine solide Basis zur Analyse der Effekte, die den Laserschneidprozess beim Einsatz neuer Strahlquellen beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass einige pauschale Aussagen bezüglich der Wechselwirkung von Laserstrahlung der Wellenlänge 1 μm mit Stahlwerkstoffen zu relativieren sind. So kann zum Beispiel widerlegt werden, dass Laserstrahlung der Wellenlänge 1 μm (Faser- und Scheibenlaser) grundsätzlich besser von Stahlwerkstoffen absorbiert wird als Laserstrahlung

von 10 μm Wellenlänge (CO_2 -Laser). Die zweite weitläufige Annahme, dass bei Laserstrahlung der Wellenlänge 1 μm im Gegensatz zur Laserstrahlung der Wellenlänge 10 μm keine Wellenleitung in tieferen Fugenbereichen stattfindet, konnte ebenfalls widerlegt werden. Zu den neueren Herausforderungen zählt u. a. die konsequente Umsetzung der hohen Fokussierbarkeit von Faserlasern im Multi-Kilowattbereich in höhere Schneidgeschwindigkeiten für die Blechbearbeitung.

Hochgeschwindigkeitsschneiden von Automobilblechen

In der Automobilindustrie werden sowohl unbeschichtete als auch verzinkte und aluminierete Stahlwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeiten sowie ultrafeste Werkstoffe im Dickenbereich zwischen 0,7 mm und 2,5 mm eingesetzt. Um die Schneidgeschwindigkeit und die Schnittqualität bei der Bearbeitung dieser Bleche zu optimieren, haben Forscher des Fraunhofer ILT Machbarkeitsstudien durchgeführt. Anhand von Simulationsrechnungen wurden wesentliche Parameterabhängigkeiten und die physikalischen Prozessgrenzen für die Schneidgeschwindigkeit mit einem 4 kW Faserlaser YLR4000 ermittelt. So können Schneidgeschwindigkeiten realisiert werden, die bisher nicht möglich waren. Bei gleicher oder sogar besserer Schnittqualität betragen sie ein Vielfaches der Werte, die bei gleicher Ausgangsleistung mit CO_2 -Lasern erreicht werden können. Neben der Automobilindustrie ist diese flexible und produktive Blechbearbeitung auch für andere Branchen von großem Interesse. Selbst bei Anwendungen, für die keine hohen Schneidgeschwindigkeiten erforderlich oder maschinentechnisch möglich sind, profitiert der industrielle Nutzer dennoch von der neuen Entwicklung aufgrund des deutlich geringeren Laserleistungsbedarfs, der flexibleren Faserkopplung und der geringeren Betriebskosten.



Remote-Laserstrahlschneiden metallischer Werkstoffe

Bei Remote-Bearbeitungsverfahren wird der Laserstrahl mit Hilfe von schnell beweglichen Spiegeln aus einer gewissen Entfernung entlang der zu schneidenden Kontur auf der Bauteiloberfläche geführt. Der Laserspot bewegt sich so mit Geschwindigkeiten von einigen Metern in der Sekunde sehr präzise auf der gewünschten Kontur. Ist die mit konventionellen Handlingsystemen wie Roboter oder Portalmaschinen erreichbare Bahngeschwindigkeit des Laserstrahlspots deutlich geringer als die mit dem Laser im Material realisierbare Bearbeitungsgeschwindigkeit, bietet sich das Remote-Schneiden an. Für das Remote-Laserstrahlschneiden stellen komplizierte Konturen kein Problem dar. Selbst beim Schneiden komplexer Strukturen, beispielsweise Elektrolechen oder Motordichtungen aus Edelstahl, werden bereits effektive Geschwindigkeiten von über 100 m min^{-1} erreicht. Bei geringen Materialdicken, z. B. Metallfolien, sind mit dem im Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden neu entwickelten Verfahren, genannt »Kiss-Cutting«, sogar Geschwindigkeiten bis über 200 m min^{-1} erzielbar. Das bearbeitbare Materialspektrum ist weit gefächert. Infolge der höheren Schneidgeschwindigkeit ist die Wärmeeinflusszone im Allgemeinen geringer als beim klassischen Laserschneiden. Im Vergleich zum Stanzen sind die Vorteile des Laserschneidens in der Einsparung der Kosten für den Werkzeugbau und das Nachschleifen der Stanzwerkzeuge sowie in dem geringeren Geräuschpegel im Fertigungsbereich zu sehen.

Laserstrahlschneiden »on the fly«

Kombiniert man die Remote-Technik der schnellen Strahlbewegung mit einem kontinuierlichen Vorschub in der Schneidanlage (»on the fly«) kommt man zu einer äußerst leistungsfähigen und hinsichtlich des Platzbedarfs sehr vorteilhaften systemtechnischen Lösung. Forscher des Fraunhofer IWS haben diese Technologie beispielsweise für das Formschneiden von Gewebepapieren aus Polyamid qualifiziert. Das Remote-Laser-

schneiden »on the fly« ermöglicht die Umsetzung des Schneidprozesses auf beliebige Schneidkonturgrößen und Materialbreiten. Durch die Kopplung von Achssystemen mit unterschiedlichen dynamischen und maschinentechnischen Kenngrößen können Produktivitätssteigerungen erzielt werden, die die Lasertechnik in vielen Bereichen konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Trennverfahren werden lässt. Das Remote-Schneiden von Airbag-Material (*remocut® NM*) hat sich bereits mit großem Erfolg in der Serienfertigung bewährt. Mit den in die Industrie überführten Systemen konnten Produktivitätssteigerungen von 50 – 90 % gegenüber dem bisherigen Mehrlagenschnitt nachgewiesen werden. Das Anlagenkonzept ist auf all jene Anwendungen übertragbar, bei denen eine räumlich begrenzte hochdynamische Strahlableitung auf große ebene Arbeitsfelder zu übertragen ist.

Präzisions- und Feinschneiden mit Laserstrahlung

Das Laserstrahlfeinschneiden, insbesondere mit Faserlasern höchster Strahlqualität, ermöglicht die flexible Herstellung von Mikrobauteilen mit filigranen Strukturen bei Schnittbreiten im Bereich $< 20 \mu\text{m}$. Am Fraunhofer ILT werden hierzu neue Verfahrens- und Systemtechniken zur Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit und Schneidqualität unter Verwendung zeitlich und örtlich modulierter Laserstrahlung entwickelt. Mit ihnen können konventionelle Stanzprozesse bei kleinen und mittleren Stückzahlen abgelöst und eine deutliche Erhöhung der Fertigungsflexibilität erzielt werden. Neue Verfahrensansätze zum Präzisionsschneiden mit Ultrakurzpulslasern ermöglichen darüber hinaus das weitgehend athermische Trennen empfindlicher Werkstoffe wie Halbleiter, Keramiken und Verbundstoffe.

- 1 3D-Laserstrahlschneiden einer PKW-A-Säule mit Faserlaser in der Roboteranlage
- 2 Kreismuster
- 3 Hochgeschwindigkeitsschneiden von Automobilstählen mit Faserlaser
- 4 Strahlablenkoptik lasertronic® SAO1.06 (3D)



Mikro- und Feinbearbeitung mit Laserstrahlung

Die Mikro- und Feinbearbeitung mit Laserstrahlung findet in der Miniaturisierung von Funktionselementen im Maschinen-, Anlagen-, Fahrzeug- und Gerätebau sowie in der Bio- und Medizintechnik aufgrund seines schonenden Umgangs mit dem Werkstoff breite und zukunftsweisende Einsatzmöglichkeiten. Beispiele sind 3D-Strukturen im Sub-mm-Bereich und Flächenstrukturen an Polymeren, Metallen, Keramiken oder Gläsern. Neben den aus der Mikroelektronik stammenden Verfahren wie z. B. Photolithographie gewinnen zunehmend alternative Verfahren wie die Laserablation an Bedeutung. Die Vorteile des Werkzeuges Laser: die berührungslose Arbeitsweise, seine Flexibilität bei der Materialbearbeitung und der präzise Energieeintrag sowie der dadurch erzeugte definierte Abtrag prädestinieren den Laser zur Strukturierung von Teilen für Mikrosysteme.

Mikrowerkzeuge und funktionale Oberflächen

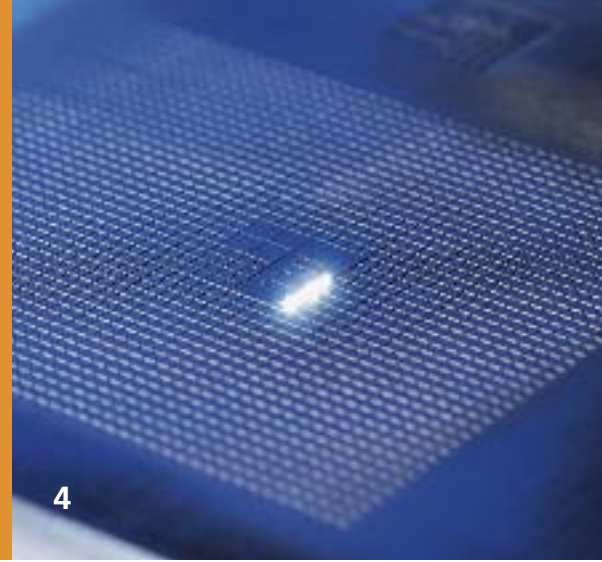
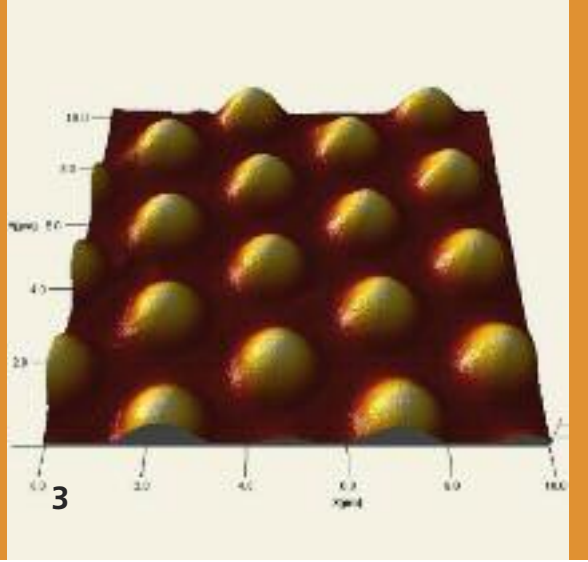
Zur Herstellung von Präzisionswerkzeugen im Mikrospritzguss und der Mikroumformtechnik hat das Fraunhofer ILT industriell einsetzbare Abtragsverfahren mittels Ultrakurzpulslasern im Piko- und Femtosekundenbereich entwickelt. Unabhängig vom Werkstoff lassen sich mit diesem Verfahren Strukturen und Werkzeuggeometrien $< 100 \mu\text{m}$ mit Genauigkeiten $< 1 \mu\text{m}$ erzeugen. Durch den Wegfall von Erodierwerkzeugen und der direkten Strukturübertragung aus dem CAM-System können Prozessketten verkürzt und Fertigungskosten reduziert werden. Die Verwendung von Ultrakurzpuls-Laserstrahlung ermöglicht die Bearbeitung von ultraharten Werkstoffen, Metallen, Keramiken, Halbleitern und Gläsern und reduziert die Werkstoffbeeinflussung auf unter $1 \mu\text{m}$. Damit lassen sich sowohl präzise 3D-Strukturen als auch Abformwerkzeuge für funktionale tribologische und optische Bauteile erzeugen.

Mikrostrukturen auf Freiformoberflächen

Beim Laserstrahlstrukturieren steht der sogenannte Sublimationsabtrag im Vordergrund. Zum Erreichen der für den Sublimationsprozess erforderlichen Leistungsdichten werden dabei ausschließlich gepulste Laserstrahlquellen eingesetzt. Für die Bearbeitung gewölbter Oberflächen ist es notwendig, dass der Fokus zusätzlich noch in der Höhe justiert werden kann. Zu diesem Zweck wird eine motorische, hochdynamische Strahlaufweitung verwendet. Der Laserscanner, der Strahlaufweiter und das Fokussiersystem bilden zusammen ein 3D-Laserstrukturiersystem. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen wurde bereits eine vollständige Prozesskette zum Laserstrahlstrukturieren entwickelt.

Mit einer modular aufgebauten Fertigungszelle lassen sich Designstrukturen wie die bekannte Ledernarbung auch auf dreidimensionalen Oberflächen verzerrungsfrei abbilden. Der innovative Fertigungsprozess zur Oberflächenstrukturierung ist nicht nur schneller, flexibler und kostengünstiger als die herkömmliche Ätztechnik. Das Ergebnis wird gleichzeitig auch den hohen optischen und technologischen Anforderungen von Designern und Werkzeugbauern gerecht.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Strukturierungstechnologien bietet die Durchgängigkeit der Prozesskette dem Designer die Chance, die Ausformung der Struktur bereits im CAD-System individuell für das Bauteil zu definieren. Um die Technologie im Produktionsalltag effektiv zu nutzen, gilt es, die Erstellung der CAM-Daten für die Lasersteuerung in bestehende Arbeitsabläufe zu integrieren.



Rutschhemmende Ausrüstung polierter Natursteine

Polierte Natursteinoberflächen werden in Eingangsbereichen von Hotels, Banken und öffentlichen Gebäuden sowie in Barfußbereichen von Schwimmhallen häufig als repräsentative Fußbodenbeläge eingesetzt. Insbesondere bei Anwesenheit von gleitfördernden Medien wie Wasser und Schmutz begünstigen die glatten Oberflächen das Ausrutschen und stellen damit eine Gefahrenquelle dar. Die Forscher des Fraunhofer IWS haben eine Technologie zur Verbesserung der Rutschhemmung durch Laserstrukturieren entwickelt. Dabei bleibt das Durchmesser-Tiefe-Verhältnis des mit dem Laser erzeugten muldenförmigen Kraters stets deutlich kleiner 2 : 1, wodurch dauerhafte, nicht reversible Verschmutzungen nicht möglich sind. Durch die Erzeugung eines dichten und regelmäßigen Netzes an Mikrokratern auf der Oberfläche mit Kraterdichten von 400 bis 1275 Krater cm^2 und Kraterabständen von 0,25 bis 0,5 μm lassen sich die rutschhemmenden Eigenschaften der polierten Oberflächen deutlich verbessern.

Die ästhetische Qualität, also der Glanz und die Farbintensität der polierten Oberflächen bleiben dabei erhalten. Das Verfahren wird sowohl im Fliesenproduktionsprozess auf stationären Anlagen als auch bei schon verlegten Natursteinböden mit Hilfe eines mobilen vom IWS entwickelten Systems genutzt.

Nanostrukturierung für funktionale Oberflächen

Für die Herstellung funktionaler Oberflächen entwickelt das Fraunhofer ILT neue laserbasierte Fertigungsverfahren für mikro- und nanoskalige Strukturen bei hohen Flächenraten. Beispiele hierfür sind tribologisch optimierte Oberflächen mit geringer Reibung, optisch-funktionale Oberflächen mit selektiver Lichtlenkung sowie Oberflächen mit integrierten Sicherheitsfunktionen. Über Mehrstrahl-Interferenzverfahren und polarisationsgesteuerte Feldverteilung können beliebig geformte periodische Strukturen $< 300 \text{ nm}$ auf Bauteilen und

Werkzeugen erzeugt werden. Die Verwendung von Ultrakurz-pulslasern erlaubt die Herstellung von funktionalen Nanostrukturen auch in ultraharten Werkstoffen wie Wolframcarbid, Diamant und Saphir. Mit einer anschließenden laserbasierten Abformtechnik lassen sich mit diesen Werkzeugen und Verfahren Nanostrukturen mit hohen Flächenraten auf beliebige Bauteilgeometrien übertragen. Dabei sind sowohl selektive Abformtechniken als auch Rolle-zu-Rolle Anwendungen möglich.

Texturierung mit Laserstrahlung

Viele Bauteile aus der Lichttechnik, der Photovoltaik aber auch aus der Kunststofftechnik und Oberflächentechnik erfordern statistisch strukturierte und texturierte Oberflächen. Die Wissenschaftler des Fraunhofer ILT Aachen und IWS Dresden entwickeln hierzu Hochgeschwindigkeits-Verfahren, mit denen flächige Texturierungen mit Strukturen im Mikrometer- und Nanometerbereich erzeugt werden können, je nach Werkstoffsystem in Kombination mit konventionellen Ätz- und Abformprozessen. Dabei werden sowohl Abtrags- als auch strukturelle Modifikationsverfahren bis hin zu Mikroumschmelzverfahren für den großtechnischen Einsatz bei hohen Flächenraten qualifiziert.

- 1 *Natursteinstrukturierung*
- 2 *Einsatz eines Mikrowerkzeuges zur funktionalen Oberflächenbearbeitung*
- 3 *Noppen auf Polyimid: Nanostrukturierung für funktionale Oberflächen*
- 4 *Laserstrukturieren*



Lab-on-Chip-Systeme

Maßgeschneiderte Lab-on-Chip-Systeme – das miniaturisierte Labor – sind aus den Anwendungsbereichen Diagnostik, Analytik, Wirkstoffforschung, Biotechnologie, Medizintechnik und Chemie nicht mehr wegzudenken. Für die effektive Entwicklung von anwendungsspezifischen Mikrofluidiksystemen wurde am Fraunhofer IWS Dresden eine geschlossene Prozesskette vom Design über die Simulation und das Rapid Prototyping bis hin zur Herstellung von Werkzeugen für die Serienfertigung entwickelt. Der Entwurf sowie die Simulation dieser Mikrofluidiksysteme erfolgt mit speziellen Softwaresystemen. Nach erfolgreicher Simulation werden durch verschiedene Rapid Prototyping Technologien Master für die Abformung oder, z. B. durch Kombination von Fräsen und Laserbearbeitung, die mikrofluidischen Systeme direkt hergestellt. Im weiteren Verlauf können bei der Abformung der Flusszellen zusätzliche Komponenten wie Membranen, Elektroden oder Fluidikanschlüsse integriert werden.

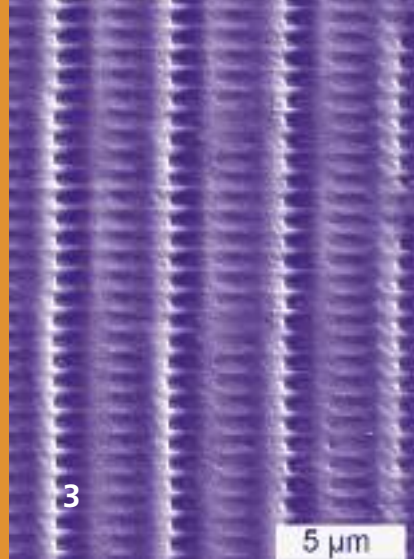
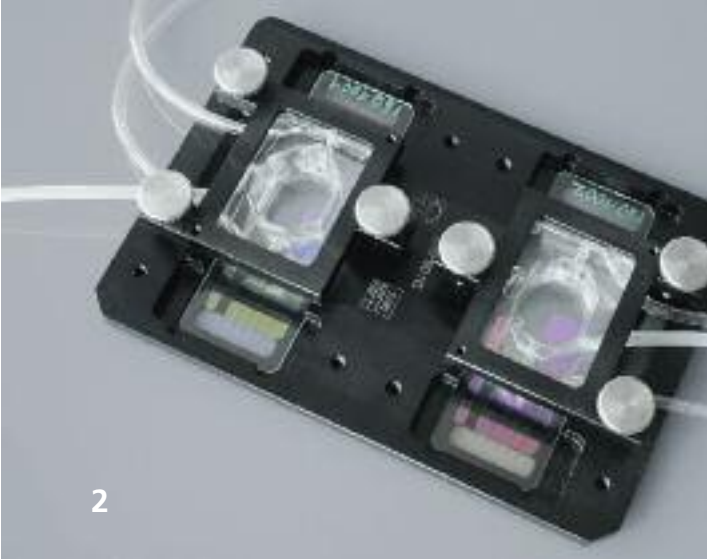
Biofunktionalisierung

Die Herstellung neuer Organe aus dem Reagenzglas und die Optimierung des Einwachsverhaltens von Implantaten erfordern biofunktionale Oberflächen auf Stützstrukturen und Implantaten, die zu einer optimalen Besiedelung mit Zellen bei maximaler Versorgung führen. Für die Proliferation von Zellen nach natürlichem Vorbild zu einem Gewebeverbund sind mechanische, topologische und auch molekulare Reize nötig, die auf den Oberflächen der Strukturkomponenten in geeigneter Weise erzeugt werden müssen. Zellproliferation und Differenzierung können durch Mikrostrukturieren und eine chemische Oberflächenfunktionalisierung gesteuert werden, die den Kontaktwinkel verändern und damit die Adhäsion verbessern. Eine Möglichkeit ist die selektive Ankopplung von Wachstumsfaktoren. Hierbei entsteht durch photochemische Aktivierung eine kovalente Bindung. Um die gezielte und kontaktfreie

Übertragung von biologischen Substanzen zu ermöglichen, wurde am Fraunhofer ILT die laserinduzierte Übertragung von Biomaterialien (Laser Induced Forward Transfer LIFT), zum Beispiel von Proteinen, entwickelt. Ein breites Anwendungsspektrum für diese Technologie gibt es in der Herstellung von diagnostischen Chips bis zur Beschichtung medizinischer Geräte.

Selektiver Dünnschichtabtrag mit Laserstrahlung

Elektrotechnische und elektronische Bauteile bestehen in der Regel aus funktionalen Schichten, die mit geeigneten Verfahren und hohen Geschwindigkeiten strukturiert werden. Solarzellen weisen beispielsweise dünne Kontaktschichten aus Metall und transparent-leitfähigen Oxiden auf. Darüber hinaus werden sowohl für Dünnschicht- als auch für klassische Silizium-Solarzellen dünne Anti-Reflex- und Passivierungsschichten verwendet. Sie führen zu einer Verbesserung der optischen und elektrischen Eigenschaften der Solarzellen und damit zu höheren Effizienzen. In beiden Fällen müssen diese dünnen Schichten zur Herstellung der Zellfunktionalität mit einem Minimum an Beeinflussung des aktiven Halbleiters selektiv an vorgegebenen Stellen abgetragen werden. Am Fraunhofer ILT werden hierzu Präzisionsabtragsverfahren auf Basis von Ultrakurzpuls-Lasern mit einer angepassten zeitlichen und örtlichen Formung der Laserstrahlung entwickelt. Diese erlauben einen vollständigen Abtrag der Schichten mit einer Linienbreite von wenigen zehn Mikrometern ohne Schädigung des Substrats bei Geschwindigkeiten $> 10 \text{ m s}^{-1}$. Bei gleichzeitiger Anpassung der Wellenlänge bzw. unter Nutzung nichtlinearer Wechselwirkungsprozesse ist auch der schädigungsfreie Abtrag von organischen Halbleitern für die Herstellung kostengünstiger Elektronikprodukte im Rolle-zu-Rolle-Verfahren möglich.

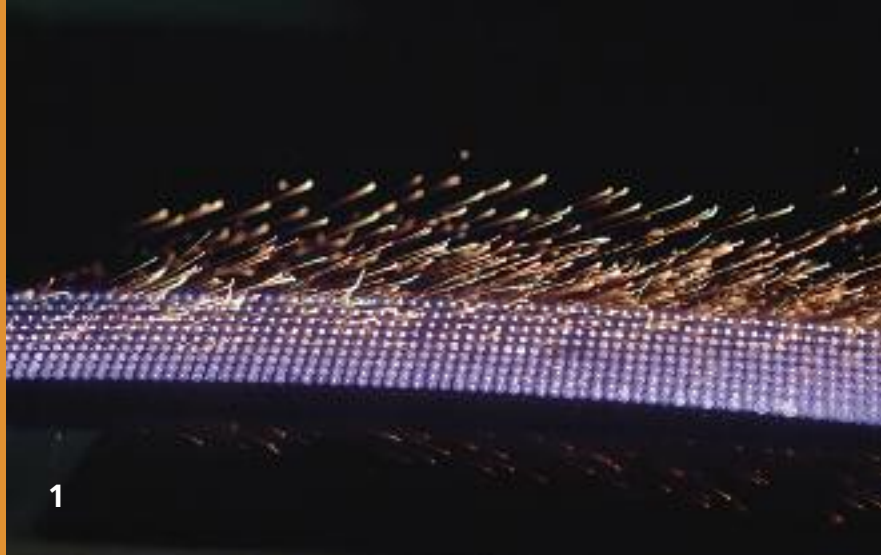


Topografisches Design

Die Herstellung von 2- und 3-dimensionalen Mikro- und Nanostrukturen auf Polymeren, Metallen, Keramiken und Beschichtungen gelingt mittels Laserinterferenzverfahren. Die Methode des direkten Laserinterferenzstrukturierens ermöglicht die Herstellung exakt definierter periodischer Strukturen im Mikro- und Submikrometerbereich. Diese Technologie stellt einen Ansatz dar, mit dem nicht nur komplexe Topographien hergestellt werden können, sondern darüber hinaus auch metallurgische Prozesse wie Schmelzen, Ausheilen, Defekt- und Phasenbildung gesteuert werden können. Zusätzlich können auch die elektrischen, chemischen und / oder mechanischen Eigenschaften periodisch variiert werden. Derartig strukturierte Oberflächen können unter anderem in der Biotechnologie, in der Photonik und in der Tribologie eingesetzt werden. Die so strukturierten Oberflächen weisen über makroskopische Bereiche hinweg Mikro- bzw. Nanomerkmale auf. Da die Bearbeitung aller Arten von Oberflächen und Bauteilgeometrien möglich ist, eignet sich diese Methode hervorragend für industrielle Anwendungen.

Das Verfahren der Oberflächenfunktionalisierung mittels Laserinterferenz ist dabei sehr schnell, es schafft mehrere Quadratmeter pro Sekunde, wofür andere Technologien Stunden oder sogar Tage brauchen. Eine am Fraunhofer IWS Dresden eingerichtete Forschergruppe entwickelt dieses Verfahren für konkrete industrielle Anwendungen weiter.

- 1 *Selektiver Dünnschichtabtrag mit Laserstrahlung*
- 2 *Maßgeschneidertes Lab-on-Chip-System*
- 3 *Strukturierte Titanoberfläche mit hierarchischer Struktur mittels Direktlaserinterferenzstrukturierung*
- 4 *Herstellung von periodischen Ordnungen auf Polymersubstraten für biotechnologische Anwendungen*



Bohren mit dem Laser

Das Bohren mit dem Laser stellt eine Alternative zu Verfahren wie Funkenerodieren, Elektronenstrahlbohren, elektrochemischem oder Ultraschall-Bohren dar. In Abhängigkeit von den Anforderungen an Qualität und Produktivität können Bohrungen in unterschiedliche Werkstoffe wie Metalle, Keramiken, Halbleiter, Diamant, Kunststoffe sowie Mehrschichtsysteme dieser Werkstoffe eingebracht werden. Das Werkzeug Laser wird bevorzugt eingesetzt, wenn Bohrungen mit Durchmessern $< 100 \mu\text{m}$ bei hohen Aspektverhältnissen sowie unter einem definierten Neigungswinkel hergestellt oder harte Materialien, z. B. hochfeste Stähle, bearbeitet werden sollen und dabei eine hohe Produktivität erforderlich ist. Anwendungen sind u. a. die Herstellung von Kühlbohrungen in Turbinenkomponenten (Brennkammer und Schaufeln), Bohrungen für Kunststofffilter sowie Düsen- und Entlüftungsbohrungen in Spritzgussformen. Neuerdings ist das Verfahren auch bei der Herstellung von Solarzellen zu finden.

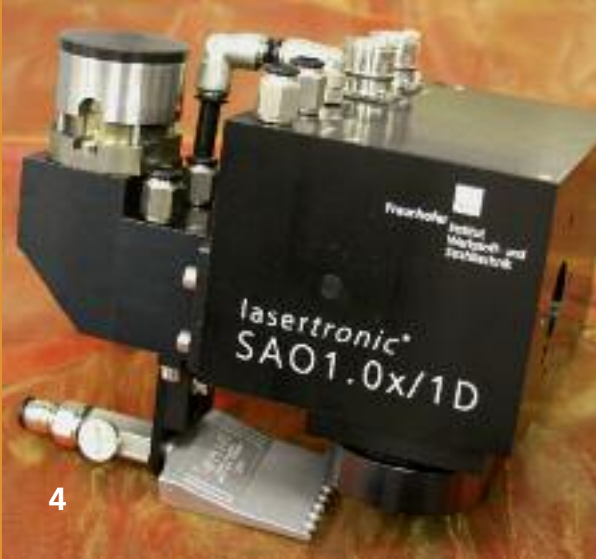
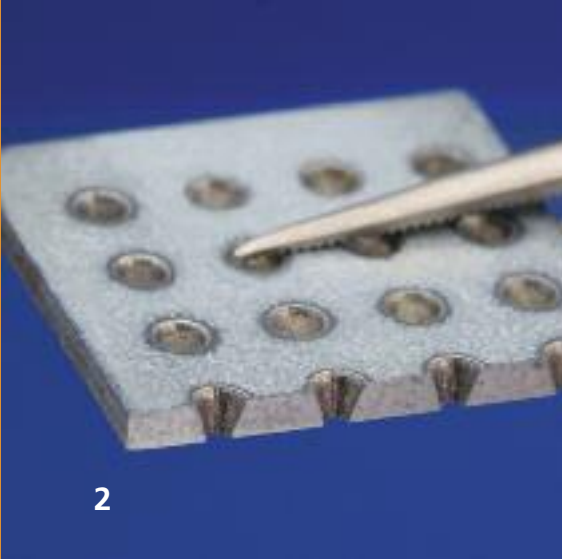
Laserbohren in der Photovoltaik

Die Herstellung hocheffizienter Solarzellen erfordert neben einer werkstofftechnischen Optimierung die Eliminierung der frontseitigen Kontakte. In diesem Zusammenhang werden aktuell zwei Konzepte verfolgt, um eine Kontaktierung auf der Zellrückseite zu realisieren: »Metal Wrap-Through« (MWT) und »Emitter Wrap-Through« (EWT). Das Fraunhofer ILT entwickelt hierzu laserbasierte Verfahren, Bohrungen im Durchmesserbereich von $50 \mu\text{m}$ in Silizium-Wafer einzubringen, ohne die Struktur des Wafers zu schädigen. Um die hohe Taktzahl an Löchern in den üblichen Taktzeiten von einer Sekunde pro Zelle zu erzeugen, muss der Laserstrahl mit etwa 20 m s^{-1} über den Wafer bewegt werden. Um die für den hohen Zelldurchsatz notwendige Rate von 10 000 Löchern pro Sekunde für

einen 6"-Wafer zu erzielen, haben die Forscher des Fraunhofer ILT neue Strahlführungskonzepte und Bestrahlungsstrategien auf der Basis von Paralleloptiken und zeitlich schnell modulierter Laserstrahlung entwickelt.

Mikrobohren mit Laserstrahlung

Das Bohren mit Laserstrahlung kommt als Fertigungstechnik für Geometrien und Werkstoffe, die sich konventionellen Verfahren entziehen, zum Einsatz. Am Fraunhofer ILT werden hierzu spezielle Bohrstrategien wie Wendelbohren und die dazugehörigen Laser- und Bearbeitungssysteme entwickelt. Mit Ultrakurzpulslasern können Bohrungsdurchmesser im Bereich einiger $10 \mu\text{m}$ bei Bohrtiefen von bis zu 2 mm mit minimaler Schmelzbildung erzeugt werden. Für Anwendungen in der Filtertechnik stehen neuartige Laserbohrverfahren mit Bohrraten bis 3000 Bohrungen pro Sekunde zur Verfügung. Mit neuartigen Ultrakurzpulslasern und innovativen Verfahrensansätzen lassen sich über Multi-Photonen-Wechselwirkungsprozesse selbst Bohrungsdurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ erzeugen. Für die Strukturierung dielektrischer Materialien wie Glas, Saphir und anderer schwer bearbeitbarer Werkstoffe wie Halbleiter sind darüber hinaus Kombinationsverfahren verfügbar, bei denen über eine Multiphotonenmodifikation und nachfolgende Ätzschritte Strukturen mit Nanometergenauigkeit herstellbar sind.



Reinigen und Markieren

Das Reinigen und Markieren mit Laserstrahlung basieren auf einem lokal begrenzten Einwirkprozess. Abhängig von der Wellenlänge, der Intensität und der Wechselwirkungszeit der Laserstrahlung mit der Werkstückoberfläche sowie den Materialeigenschaften kommt es zur thermischen Zersetzung oder zu einer chemischen Reaktion.

Laserstrahlreinigen in der Denkmalpflege

Durch kurze Laserpulse wird eine dünne Oberflächenschicht schlagartig verdampft. Dadurch ist auch der selektive Abtrag von Farbschichten möglich. Das im Bereich der Denkmalpflege von den Forschern des Fraunhofer IWS seit Langem erfolgreich eingeführte Verfahren des Laserreinigens setzt sich auch im industriellen Umfeld der Lasermaterialbearbeitung mehr und mehr durch.

Laserstrahlreinigen im industriellen Umfeld

Das Fraunhofer ILT hat unterschiedliche Anwendungen des Laserstrahlreinigens wie das Abtragen von schwarzen, rußgefüllten Elastomerschichten von einem farbigen Elastomeruntergrund, das Reinigen von Drucksieben und das Entfernen von Epoxidpulverlackschichten von Stromschienen in die Praxis umgesetzt. Für mobile Anwendungen sind das Reinigen von Werkzeugformen im eingebauten Zustand und das Entschichten von Stahlgitterkonstruktionen vor der Neubeschichtung im Korrosionsschutz zu nennen. Im Mikrobereich wird das Verfahren für das Abtragen von Lackschichten zur selektiven galvanischen Beschichtung und für das Abtragen von Oxidschichten auf Kupfer als Vorbereitung für die Verzinnung eingesetzt.

Für die Herstellung haltbarer Bauteilverbindungen ist eine ausreichende Vorbereitung der miteinander zu verbindenden Bauteile Voraussetzung. Je nach angewandtem Fügeverfahren und dessen spezifischen Anforderungen müssen bestimmte Oberflächenschichten, Korrosionsschichten oder Schmiermittelauflagen entfernt werden. Angesichts eines anhaltenden Trends zur flexiblen, dezentralen und in den Fertigungsprozess integrierten Reinigungstechnik steigt zunehmend die Nachfrage nach lokalen, umweltfreundlichen Reinigungsverfahren, die eine am Verarbeitungspunkt der Bauteile erforderliche Oberflächenqualität just in time zur Verfügung stellen.

Das Fraunhofer IWS Dresden hat zusammen mit Anlagen- und Systemanbietern Lösungen zur Sicherstellung der Leckfreiheit von Rohrverbindungen über Dichtungen (Laserreinigungstation in der Bearbeitungsanlage) sowie der Integration des Reinigungsprozesses in eine Laserschweißanlage realisiert. Der Vorteil für den Anwender besteht dabei in der Nutzung nur einer Strahlquelle für zwei Bearbeitungsaufgaben: Reinigen und Schweißen.

Markieren

Beim Markieren werden beispielsweise dekorative Farbveränderungen an eloxiertem Aluminium erzeugt. Durch geeignete Wahl der Prozessparameter kann ein ganzes Farbspektrum von Braun-, Bronze und Grautönen eingestellt werden. Die Eigenschaften der Oberfläche wie Glanz und Korrosionsbeständigkeit werden dabei nicht beeinflusst.

- 1 *Mikrobohren von EWT-Solarzellen*
- 2 *Bohren mit Laserstrahlung*
- 3 *Prozess des Laserreinigens*
- 4 *Reinigungskopf lasertronic® SAO 1.0x/1D für Festkörperlaser*



FÜGEN MIT DEM LASER

Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen hat sich in den vergangenen Jahren als leistungsfähiges Fügeverfahren in der Fertigungstechnik etabliert. Es bietet breite Anwendungsmöglichkeiten sowohl im Hinblick auf die zu schweißenden Werkstoffe als auch auf die Vielfalt der Bauteile und Beanspruchungsfälle. Getrieben von den Anforderungen, kostengünstiger, effektiver, schneller und zuverlässiger zu produzieren, steigt der industrielle Bedarf nach schweißtechnisch sehr anspruchsvollen Lösungen. Das Ziel dabei ist, die werkstoff- und fertigungstechnischen Grenzen heutiger Schweißverfahren zu erweitern. Dies kann nur durch ganzheitliche Lösungsansätze und innovative Schweißverfahren geschehen.

Schweißen schwer schweißbarer Werkstoffe

Die sehr hohe Leistungsdichte des Laserstrahls als Bearbeitungswerkzeug ermöglicht es, auch Bauteile aus thermisch empfindlichen Werkstoffen verzugsfrei und mit hohen Schweißgeschwindigkeiten zu fügen.

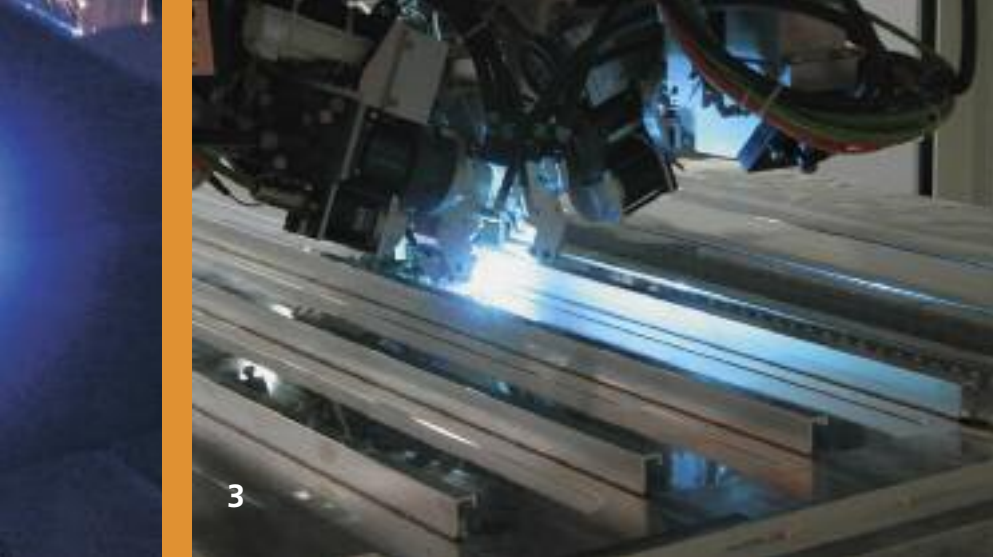
Mit der Entwicklung von neuen Lasern mit höheren Strahlqualitäten und Leistungsdichten konnten die Grenzen beim Schweißen schwer schweißbarer Stähle deutlich erweitert werden. Verstärkt wurde dies durch die vom Fraunhofer IWS vorangetriebenen Entwicklungen - zum Laserinduktionsschweißen mit einem in den Schweißprozess integrierten, lokalen induktiven Wärmeeintrag und zum Laserstrahlschweißen mit werkstoffangepasstem Schweißzusatzwerkstoff. Während erstes geeignet ist, niedrig- und unlegierte Vergütungsstähle bis zum eutektoiden Kohlenstoffgehalt effektiv rissfrei zu schweißen, ermöglicht die zweite Entwicklung in Kombination mit

einer spezifischen Schweißnahtvorbereitung, angepassten Steifigkeitsverhältnissen und optimierten Laserstrahlparametern fehlerfreie Schweißverbindungen mit Gusseisen. Das Laserstrahlschweißen von Differenzialgetrieben ist nur eines von vielen Beispielen, wie durch Einsparung aufwändiger und gewichtsintensiver Schraubverbindungen Prozessketten erheblich verkürzt und gleichzeitig Chancen für echte Leichtbaukonstruktionen geboten werden.

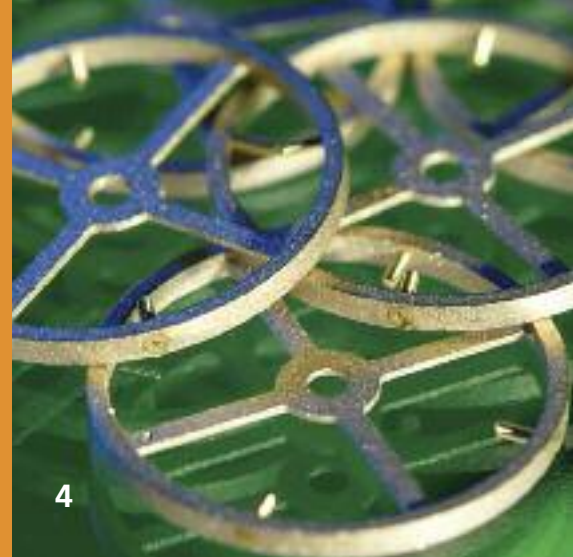
Technologien zum Laserstrahlschweißen von Flugzeug-Rumpfstrukturen

Konsequent betriebener Leichtbau erfordert hochmoderne Fügeverfahren, wie Laserstrahlschweißen oder Kleben. Sie erobern sich immer weitere Gebiete im Flugzeug-, Raketen-, Triebwerks- und Satellitenbau. Das Fraunhofer IWS Dresden konzentriert sich dabei insbesondere auf Verfahrensentwicklungen zum Laserstrahlschweißen von schwer schweißbaren Al-, Ti- und Ni-Legierungen sowie intermetallischen Verbindungen. Eine primäre Entwicklungszielstellung für die Fertigung von Passagierflugzeugen besteht in der Verringerung des Strukturgewichtes bei gleichzeitiger Senkung der Fertigungskosten. Dazu kann das Laserstrahlschweißen von Versteifungselementen in Rumpfstrukturen wesentliche Beiträge leisten. Aus Gründen der Nahtausbildung, der Belastbarkeit und des Verzuges erfolgt das Schweißen mittels zweier Laserstrahlen beidseitig-gleichzeitig.

Mit einem im Fraunhofer IWS realisierten neuartigen Anlagenkonzept können bis zu $10 \times 3 \times 1 \text{ m}^3$ große Strukturelemente dreidimensional mit Schweißzusatzwerkstoff und mitlaufender Spanntechnik mit Laser geschweißt werden.



3



4

Qualifizierung des Hybridschweißens hochfester Stähle bis 25 mm Wandstärke

Das Laser-MAG Hybridschweißen wird bereits in vielen Bereichen der Fertigung erfolgreich eingesetzt. Im Rahmen des EU-Projekts »Economical and Safe Laser Hybrid Welding of Structural Steel - HYBLAS« entwickelte das Fraunhofer-Institut ILT gemeinsam mit Partnern aus der Industrie die Verfahrensprozeduren im Bereich Laserhybridschweißen für Stähle weiter. Mithilfe des optimierten Hybridschweißverfahrens lassen sich inzwischen exzellente Schwingungsfestigkeitswerte bei Blechen mit einer Wandstärke bis einschließlich 25 mm erzielen. Den Forschern gelangen signifikante Fortschritte hinsichtlich Nahtqualität, einlagiger Spaltüberbrückbarkeit und Schweißgeschwindigkeit bei äußerst geringem Verzug. Diese Eigenschaften steigern die Produktivität des Verfahrens. Das Laser-MAG Hybrid-schweißverfahren ist nun auch bei dickeren Materialstärken für stark beanspruchte Schweißverbindungen interessant. Einsatzgebiete sind der Schwermaschinenfahrzeugbau, der Schiffsbau, der Rohrleitungsbau, die Off-Shore-Technik und der Sondermaschinenbau.

Laserstrahl-Mikroschweißen in Elektronik und Mikrotechnik

Mit kontinuierlichen Faserlasern und gepulsten Nd:YAG-Lasern mit hoher Strahlqualität sowie neuen Verfahrenstechniken lassen sich Metalle mit hoher Prozesssicherheit bei Nahtbreiten < 200 µm fügen. Am Fraunhofer ILT werden innovative Bestrahlungsstrategien bei zeitlicher und örtlicher Modulation der Laserstrahlung entwickelt, mit denen Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 1 m s⁻¹, Schweißnahtbreiten bis unter 50 µm und hohe Schweißnahtqualitäten erzielt werden. Mit einem darauf aufbauenden thermischen Management des Schweißprozesses kann die thermische Belastung der Bauteile minimiert und die Dynamik der gemeinsamen Schmelze

kontrolliert werden. Damit lassen sich auch Werkstoffkombinationen wie Stahl-Kupfer, Stahl-Messing oder Stahl-Aluminium fügen, die mit konventionellen Schweißverfahren nur schwer realisierbar sind. Hochgeschwindigkeits-Modulationsverfahren erlauben definierte Einschweißgeometrien und kontrollierte Einschweißtiefen. Dadurch wird das Laserstrahl-Mikroschweißen insbesondere für Anwendungen in Hochleistungs-Elektronik mit Kupfer-Kupfer- sowie Kupfer-Aluminium-Verbindungen zum idealen Fügeverfahren mit hoher Prozessstabilität und einem weiten Einsatzbereich.

SHADOW® – verzugs- und verschmutzungsfreies Mikroschweißen mit Laserstrahlung

Durch den vom Fraunhofer ILT entwickelten SHADOW®-Prozess können kleinste Bauteile aus unterschiedlichen Materialien zusammengeschweißt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens: Im Gegensatz zu konventionellen Punktnaht-Schweißverfahren wird hier nur 1/6 der Energie benötigt. Dieser geringere Energiebedarf, gepaart mit der sehr kurzen Prozesszeit, reduziert den Verzug der Materialien nahezu vollständig. Zudem ist der SHADOW®-Prozess weitaus wirtschaftlicher. Das SHADOW®-Verfahren lässt sich prinzipiell auf den gesamten Bereich der Fertigung elektronischer und mikrotechnischer Baugruppen übertragen. Es ist für viele Stoßgeometrien und auch für das Fügen ungleicher Metalle geeignet, deshalb findet es immer mehr Anwendung bei der Fertigung mikro- und feinwerktechnischer Produkte. Das mit dem FERCHAU-Innovationspreis ausgezeichnete Verfahren findet u. a. in der Uhrenindustrie Anwendung.

- 1 Laserschweißprozess
- 2 Remote-Laserschweißen von Abgaswärmetauschern
- 3 Beidseitig-gleichzeitiges Laserstrahlschweißen von Stringer-Haut-Verbindungen
- 4 Mikrofügen von Uhrenkomponenten mit Laserstrahlung



1

Laserstrahlschweißen von Kunststoffen und Glas

Das Laserstrahlschweißen von Kunststoffen ist eine Technologie, die verdeckte Nähte mit einem Minimum an Bauteilbeeinflussung erzeugt. Dabei liegt die Herausforderung darin, über eine geeignete Pigmentierung zu gewährleisten, dass die Strahlung durch einen der beiden Fügepartner transmittiert und im zweiten Fügepartner absorbiert wird. Auch für die Verbindung von Kunststoff und Metall bietet der Laser effiziente Lösungen.

Verbindungsstellen höchster Transparenz zur Übertragung optischer Leistungen leistet ein Fügeverfahren, welches man »Spleißen« nennt. Damit wird ein unmittelbarer Übergang zwischen zwei Komponenten in Glas erzeugt.

Schweißen transparenter Kunststoffe

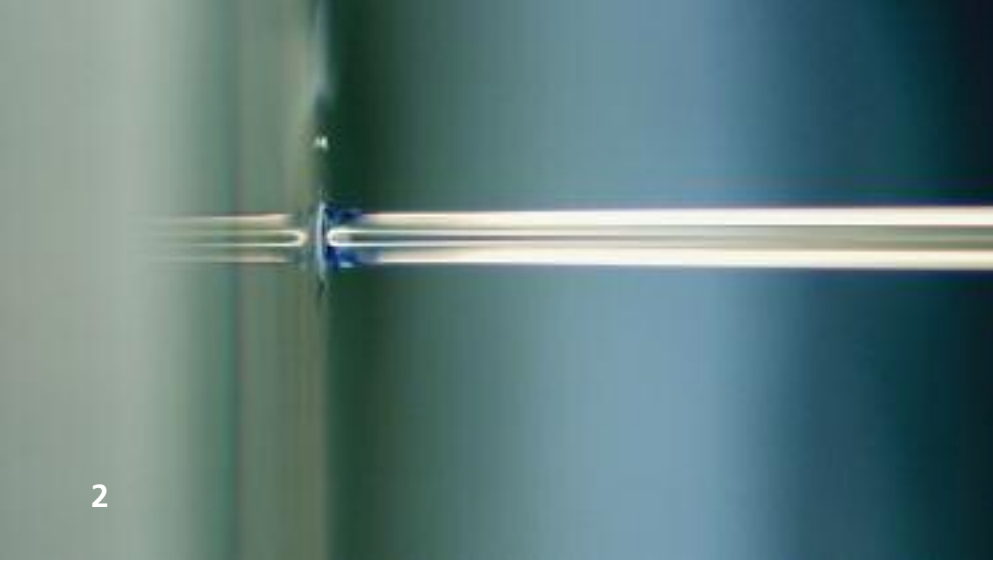
Bisher mussten für das Laserschweißen von transparenten Kunststoffen spezielle Absorber verwendet werden, die einem der beiden Fügepartner zugemischt wurden. Mit neuartigen Hochleistungslaserstrahlquellen im Wellenlängenbereich von $1,5\ \mu\text{m}$ bis $2\ \mu\text{m}$ und speziellen Bestrahlungsstrategien kann erstmalig auf zusätzliche Absorber verzichtet werden, indem die Strahlungseigenschaften an die intrinsischen Absorptionseigenschaften der Kunststoffe angepasst werden. Mit einer von Fraunhofer-Forschern entwickelten Verfahrensführung können die Vorteile des Transmissionsfügens auch bei transparenten Kunststoffen beibehalten werden, ohne die dem Laserstrahl zugewandte Oberfläche der Kunststoffteile zu beeinflussen. Auf diese Weise lassen sich Bauteile beispielsweise aus den Bereichen Medizintechnik, Optik und Bioanalytik mit hoher Geschwindigkeit und mit hohen Anforderungen an Verschmutzungsfreiheit fügen.

Fügen von Mikrosystemen

Durch neue Entwicklungen bei medizinischen und biotechnologischen Mikrosystemen steigen die Anforderungen an die jeweiligen Füge- und Montageverfahren, vor allem hinsichtlich einer Miniaturisierung. Wissenschaftler des Fraunhofer ILT Aachen haben mit der Kombination eines Faserlasers und einer innovativen, hochdynamischen Bestrahlungsstrategie ein neues Verfahren zum Schweißen von Kunststoffen entwickelt: die »Transmission Welding by Incremental Scanning Technique« (TWIST®). Durch eine schnelle zeitliche und örtliche Modulation des Laserstrahls wird die Energie homogen auf die Kontaktfläche der beiden Kunststoff-Fügepartner verteilt. Die Vorzüge des Verfahrens bestehen in der reduzierten Wärmeeinflusszone mit flexibler Einstellung der Schweißnaht zwischen 100 und $500\ \mu\text{m}$ bei Vorschubgeschwindigkeiten bis zu $60\ \text{m}\ \text{min}^{-1}$ sowie in der grundsätzlichen Eigenschaft, dass die Bauteile ohne Abzeichnung und mit geringem Verzug verschweißt werden können. Damit lassen sich sowohl Mikrofluid-Chips mit sehr engen Kanälen und Kanalabständen als auch Bauteile fügen, bei denen eine geringe Beeinflussung der Bauteile im Vordergrund steht.

Lasergestütztes Fügen von Kunststoff und Metall LIFTEC®

Bei dem vom Fraunhofer ILT neu entwickelten Fügeverfahren LIFTEC® zum Fügen von Kunststoffen mit Metall und anderen Werkstoffen wird ein Bauteil oder eine Teilkomponente durch den zu fügenden Kunststoffpartner hindurch mit Laserstrahlung erwärmt. Das Bauteil wird unter mechanischem Druck auf das Kunststoffteil gedrückt, erwärmt und durch weiteren mechanischen Druck in den Kunststoff gepresst. Durch eine vorherige Laserstrukturierung des Fügepartners wird nach der Abkühlung eine feste, formschlüssige Verbindung erzielt.



Bei nur geringen Laserleistungen von einigen 10 W lassen sich mit diesem Verfahren Fügezeiten im Bereich von 1 – 5 Sekunden erzielen. Das Verfahren eignet sich sowohl für selektive Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen als auch für flächige Verbindungen zur Herstellung von Verbund-Hybridwerkstoffen.

Spleißen von Hochleistungsoptiken

Das Verfahren des Laserstrahlschweißens kann auch zum Fügen und Verbinden optischer Komponenten eingesetzt werden, wobei hier der Begriff des »Spleißens« verwendet wird. Mit Lasern spezieller Wellenlängen, z. B. CO₂-Lasern mit 10,6 µm, die in Glas sehr gut absorbiert werden, erfolgt das Aufschmelzen des Grundwerkstoffes Glas und so die monolithische, d. h. zwischenschichtfreie Verbindung von Komponenten. Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF Jena nutzt diese Technologie zum Aufbau von Hochleistungsoptiken, wie sie beispielsweise in Faserlasern eingesetzt werden. Dort müssen über transparente Verbindungsstellen optische Leistungen im Kilowatt-Bereich übertragen werden, geringste Absorptionsverluste führen dabei sofort zu einer thermischen Überlastung bzw. zur Zerstörung der Fügestelle. Mit dem Laserstrahlspleißen ist hingegen ein Verfahren verfügbar, das Verbindungsstellen höchster Transparenz gewährleistet, da ein unmittelbarer Übergang zwischen zwei Komponenten in Glas erzeugt wird. Der Laser als Fügewerkzeug ist hierbei so flexibel einsetzbar, dass eine große Geometrievielfalt gespleißt werden kann.

- 1 *Laserstrahlfügen hybrider Metall-Kunststoffbauteile*
- 2 *Gespleißte Laserendkappe*
- 3 *Spleißen*



Laserstrahllöten

Beim Laserstrahllöten werden die Fügepartner durch einen mit dem Laser aufgeschmolzenen Zusatzwerkstoff verbunden. Das Verfahren eignet sich besonders für sehr kleine Geometrien. Beim Weich- und Hartlöten mittels Laserstrahlung können u. a. für die Elektronik, Photovoltaik und Medizintechnik berührungs- und temperatursensitive Bauteile mit einem geringen Energieaufwand innerhalb einiger hundert Millisekunden gefügt werden. Deshalb wird es als Mikrofügeverfahren gern in der Aufbau- und Verbindungstechnik eingesetzt.

Laserstrahllöten für Elektronikkomponenten

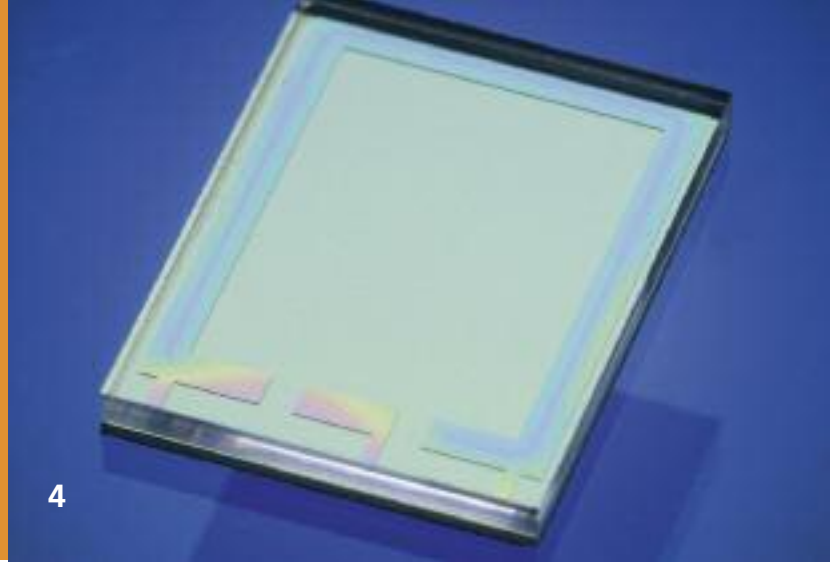
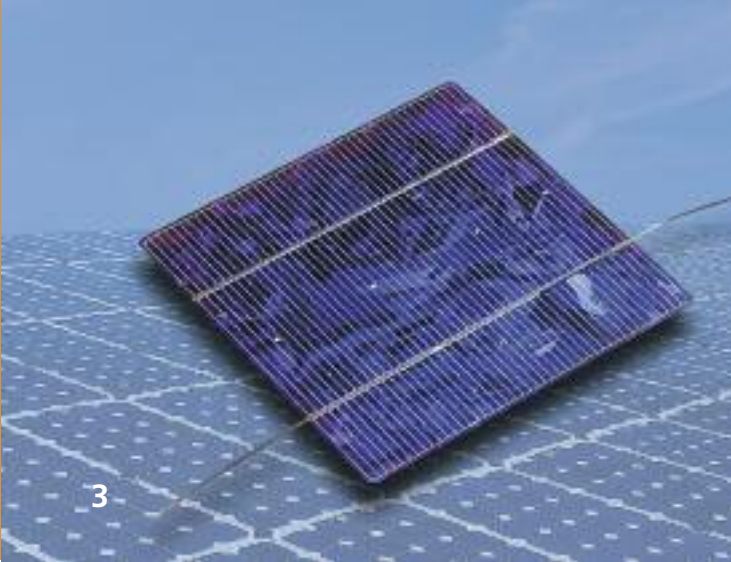
Eine herausragende Eigenschaft des Laserstrahllöten besteht in der Bearbeitung von Pitchgrößen zwischen 100 und 2000 μm durch die geeignete Wahl der Fokussierung und der Bestrahlungsstrategie. Die Schmelztemperatur kann durch Verwendung von Niedertemperaturloten unter 150 $^{\circ}\text{C}$ reduziert werden, für Anwendungen bei hohen Temperaturen sind auch Hartlote mit Schmelztemperaturen > 1000 $^{\circ}\text{C}$ anwendbar. Die Fraunhofer-Forscher haben hierzu geeignete Verfahrenstechniken und Lötssysteme entwickelt, die sich gut in Fertigungslinien integrieren lassen. Durch eine Online-Detektion der Wärmestrahlung mittels pyrometrischer Sensoren koaxial zur Laserstrahlung und einer darauf basierenden Laserleistungsregelung lässt sich die Temperatur des Fügeprozesses auch bei wechselnden Prozessbedingungen konstant halten. Ebenso ist eine Positionskontrolle über integrierte, miniaturisierte CCD-Kameras möglich.

Laserstrahl-Glaslöten

Mit dem Laserstrahlglaslöten stellt das Fraunhofer ILT ein Verfahren für das hermetisch dichte Packaging elektronischer Bauteile und mikrosystemtechnischer Komponenten aus Glas, Silizium und Keramik zur Verfügung. In diesem Verfahren wird die zum Verbinden notwendige Energie konzentriert und räumlich begrenzt in die Fügezone eingebracht. Dadurch kann für thermisch empfindliche Bauteile wie beispielsweise OLEDs und organische Elektronik die Temperaturbelastung des Gesamtbauteils unter 100 $^{\circ}\text{C}$ gehalten werden. Die zum Aufschmelzen, Benetzen und Verbinden der Fügepartner notwendige Energie wird dabei direkt in den Verbindungsbereich der beiden Glassubstrate eingebracht.

Laserstrahlbonds von Halbleitern und Dielektrika

Für Anwendungen in Sensorik, Mikrosystemtechnik und Halbleitertechnik steht mit dem Laserstrahlbonds ein neues schmelzefreies Fügeverfahren zur Verfügung, das auf der thermisch induzierten Bildung von Sauerstoffbrücken zwischen den Fügepartnern basiert. Durch eine selektive Laserbestrahlung lediglich der Kontaktzone der Bauteile durch die Bauteile hindurch wird die Temperaturbelastung des Gesamtbauteils auf ein Minimum reduziert. Mit diesem Verfahren lassen sich Silizium-Glas- und Silizium-Saphir-Verbünde mit Bondnahtbreiten < 200 μm erzielen. Daher eignet sich das Verfahren besonders für das Bonden und Verkapseln von Mikrosystemen mit beweglichen Strukturen und thermisch empfindlichen Komponenten. Durch den Einsatz von Laserstrahlquellen im Wellenlängenbereich von 1500 – 1900 nm sowie geeigneten Bestrahlungsstrategien können auch andere Werkstoffverbünde wie Silizium/Silizium und Glas/Glas gefügt werden.



Laserstrahllöten von Solarmodulen

Zur Herstellung von Solarmodulen aus einzelnen Solarzellen müssen mehrere Zellen langzeitstabil zu einem String kontaktiert werden. Da beim Laserlöten die Energieeinbringung sehr selektiv und ohne wesentliche Aufheizung der Silizium-Zelle erfolgt, wird die Energiebelastung und dadurch die Bruchgefahr minimiert. Das Laserlöten erlaubt eine exakte Kontrolle der Löttemperatur und dadurch gezielte Verfahrensoptimierungen. Der Prozess wird mit einem Pyrometer überwacht, so dass die Laserleistung bei Abweichungen vom Sollwert nachgeregelt werden kann. Somit werden Lötstellen von hoher Qualität bei gleichzeitig geringer thermischer Belastung der Zelle ermöglicht.

Durch eine simultane Bestrahlung von Vorder- und Rückseite kann die Prozesszeit minimiert werden, so dass das Verfahren in die bisherigen Montagelinien integrierbar ist. Gemeinsam mit Herstellern von Laser- und Strahlführungssystemen und Maschinen sowie mit Produzenten von Solarzellen und -modulen arbeiten die Forscher der Fraunhofer-Institute ILT in Aachen und IWS in Dresden an der Verbesserung aktueller Verfahren und der qualitätsgerechten Integration neuer Prozesse zur Solarzellenherstellung in die industrielle Produktion.

Solder Bumping für optischer Systeme

Das Löten miniaturisierter optischer Systeme ist eine interessante Alternative zum Kleben, wenn besondere Anforderungen an Langzeit- und Temperaturstabilität, Strahlungsresistenz oder Vakuumkompatibilität gestellt werden. Außerdem können mit Fügestellen aus Lot optoelektronische Komponenten kontaktiert bzw. über die Fügestellen Verlustleistung abgeführt werden. Das Fraunhofer IOF nutzt zum Fügen optischer Systeme das besonders flexible Verfahren des Solder Bumping, bei dem kleine Lotkugeln mit dem Laser aufgeschmolzen und aus einer Kapillare mittels Überdruck am Fügeort im flüssigen

Zustand appliziert werden. Der Laserbearbeitungskopf wird mit einem Roboter manipuliert und ist in der Lage, selbst komplizierte Geometrien in komplexen Montageumgebungen zu erreichen. Besonders wichtig bei der Montage optischer Systeme – mit dem Verfahren können Genauigkeiten im Mikrometer- und Submikrometerbereich erzielt werden.

Erweiterung der Prozessgrenzen beim Laserstrahlhartlöten von Aluminium

Neue Leichtbaukonzepte können nur durch flexible, leistungsfähige und dennoch kostengünstige Füge Technologien umgesetzt werden. Wenn neben dem geringen Gewicht auch die Korrosionsbeständigkeit eine Rolle spielt, bietet sich das Laserlöten von Aluminium an. Vorteil: geringer Nachbereitungsaufwand, geringe thermische Werkstoffschädigung aufgrund niedriger Prozess Temperatur und kurze Prozesszeit. Damit die Benetzung des Grundwerkstoffs durch das Lot auch ohne Flussmittel gelingt, hat das Fraunhofer IPT ein neues Zwei-strahl-Verfahren entwickelt. Ein dauerstrichbetriebener Laser schmilzt den Lotwerkstoff auf und erwärmt das Grundmaterial. Zeitgleich werden mit Hilfe zusätzlicher kurzer Laserstrahlpulse Teile der Aluminiumoxidhaut in der Prozesszone verdampft. Das flüssige Lot kann nun die verbleibende Oxidhaut unterwandern und den Grundwerkstoff durchgehend benetzen.

- 1 *Löten miniaturisierter optischer Systeme*
- 2 *Laserstrahlglaslöten*
- 3 *Laserstrahlgelötete Zellverbinder auf Solarzelle*
- 4 *Laserstrahlbonden von Halbleitern*



AUFTRAGSCHWEISSEN, GENERIEREN, POLIEREN UND RANDSCHICHTVEREDELN MIT DEM LASERSTRAHL

Laserstrahl-Auftragschweißen

Beim Laserauftragschweißen wird ein pulver- oder drahtförmiger Zusatzwerkstoff mit dem Laserstrahl aufgeschmolzen und schmelzmetallurgisch mit dem Grundwerkstoff verbunden. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich vom Oberflächenschutz über Reparaturaufgaben bis hin zum direkten Generieren komplex geformter dreidimensionaler Strukturen. Die besondere Genauigkeit des Materialauftrags, die ausgezeichnete Steuerbarkeit des Prozesses und die geringe thermische und mechanische Belastung der Bauteile lassen die Lasertechnologie in wachsendem Maße zu einem Standardverfahren im Werkzeug- und Formenbau sowie in der Luft- und Raumfahrt werden.

Beschichten und Reparieren von Bauteilen und Werkzeugen

Neben dem reinen Verschleißschutz von Bauteilen und Werkzeugen wird das Laserauftragschweißen für Aufgaben der Oberflächenveredelung, zur Steigerung des Korrosionswiderstandes, der Temperatur- und Thermoschockbeständigkeit sowie der Schlag- und Ermüdungsfestigkeit eingesetzt. Im Spritz- und Druckgießwerkzeugbau werden Formkerne z. B. durch Laserauftragschweißen mit einer gradierten Schicht aus einer verschleiß- und korrosionsbeständigen Stahllegierung versehen. Durch den Einsatz von Gradientenwerkstoffen können u. a. Verschleißbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit maßgeschneidert kombiniert werden.

Instandsetzen von Triebwerkskomponenten durch direkten Laser-Metallauftrag

Bereits kleine Beschädigungen oder die normale Abnutzung an Triebwerksschaufeln oder -scheiben verursachen immense Kosten, weil die betroffenen Bauteile oftmals komplett ausgetauscht werden müssen. Deshalb lohnt sich die Reparatur. Aus Sicherheitsgründen und mit Blick auf die hohen Werkstoff- und Genauigkeitsanforderungen sind hierfür nur wenige Verfahren zugelassen. Der Laser gehört dazu. Er hat als Präzisionswerkzeug zum Auftragschweißen die Turbineninstandsetzung preiswerter, schneller und sicherer gemacht. Die Technologie zur Instandsetzung von Triebwerkskomponenten mittels Laserauftragschweißen wurde von Fraunhofer IWS und ILT bis zur Industriereife entwickelt.

Basierend auf dem dreidimensionalen Datenmodell des unbeschädigten Bauteils deponiert der energiereiche Strahl an den Schadstellen das Originalmaterial mit höchster Präzision. Punkt für Punkt, Schicht um Schicht entsteht die Schaufel in ihrer ursprünglichen Form wieder. Durch den äußerst geringen Eintrag von Wärme in die Schweißzone können Form und Gebrauchseigenschaften wiederhergestellt werden: die mikroskopisch feine Struktur des lasergenerierten Materials entspricht dem Originalzustand, die dynamischen Festigkeitseigenschaften entsprechen den strengen Normen der Triebwerkshersteller.



Oberflächenschutz von Leichtmetallen

Leichter, leistungsfähiger, kostengünstiger und zuverlässiger – das sind die Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften im Fahrzeug- und Schiffbau, in der Energietechnik, im Chemieanlagenbau sowie in der Luft- und Raumfahrt. Es werden nicht nur verbesserte Werkstoffe verlangt, sondern auch Anpassung der Werkstoffeigenschaften eines Bauteiles an lokale Beanspruchungen.

Vor dem Verschleiß durch chemischen Angriff z. B. bei Triebwerkskomponenten, Pumpengehäusen und Fahrwerkteilen kann der Oberflächenschutz mit Oxidkeramik wirksam werden. Die höchste Haftfestigkeit wird beim Beschichten von Aluminium- und Titanlegierungen mit einem Pulvergemisch aus Al_2O_3 und TiO_2 erzielt.

Für dynamische Beanspruchungen empfehlen die Forscher des Fraunhofer IWS Dresden zur Verschleißgegenwirkung die Behandlung mit einem Hartstoff-Dispersionsgefüge. Durch Variation der Art, Größe, Verteilung und Konzentration der Hartstoffe können die Verschleißigenschaften der Bauteile hinsichtlich der speziellen Beanspruchungsbedingungen optimiert werden. Ein Anteil von mindestens 50 Vol.-% an metallischem Binder in der Schicht garantiert eine homogene Hartstoffverteilung und hohe Festigkeit bei statischer und dynamischer Beanspruchung.

TurPro – Integrative Produktionstechnik für energieeffiziente Turbomaschinen

2008 startete die Fraunhofer-Gesellschaft ihren ersten nordrhein-westfälischen Innovationscluster, der neue Technologien, Prozesse und Prozessketten für die Fertigung, Instandsetzung und -haltung energieeffizienter Turbomaschinen auf den Weg bringen soll. Gemeinsam mit 10 namhaften Industriepartnern widmen sich Fraunhofer IPT und ILT dieser Aufgabe. Die Part-

ner im Fraunhofer-Innovationscluster entwickeln Technologien, Prozesse und Prozessketten, um komplexe Zerspan- und Laserverfahren an spezifische Bauteile und Werkstoffe anzupassen. Durch die neuen Bearbeitungsverfahren lassen sich Turbinenkomponenten und Triebwerksteile leichter und robuster gestalten und reparieren, so dass im späteren Einsatz Energie und Kosten gespart werden können. Ziel der Untersuchungen ist es auch, Bearbeitungszeiten eines jeden Prozessschrittes sowie der gesamten Prozesskette zu verkürzen und gleichzeitig die Präzision bei der Fertigung und Reparatur der oft sicherheitskritischen Bauteile zu steigern.

Dazu entwerfen die Mitglieder des Innovationsclusters in interdisziplinärer Zusammenarbeit neue, integrative Prozessketten – von mechanischen Fertigungsverfahren und generativer Laserfertigungstechnik über CAx-Technologien, Werkstofftechnik, optische Sensorik und Mechatronik bis hin zur Werkzeug-, Maschinen- und Anlagentechnik.

- 1 *Laserauftragschweißen mit Dreistrahl-Pulverzufuhrdüse*
- 2 *Triebwerksinstandsetzung: Reparierte Kantengeometrie an beschädigter Blisk vor der Endbearbeitung*
- 3 *Laser als Präzisionswerkzeug zum Auftragschweißen*



Generative Fertigung

Die generative Fertigung mit dem Laser umfasst Verfahren zur Herstellung von Bauteilen und ist auch unter den Begriffen Rapid Prototyping bzw. Rapid Manufacturing bekannt. Mit diesen Verfahren werden vorhandene CAD-Daten ohne Umwege oder Formen direkt und schnell, sozusagen »über Nacht«, in Werkstücke umgesetzt. Die Werkstücke entstehen schichtweise aus formlosem oder formneutralem Material wie Pulver oder Flüssigkeiten unter Nutzung physikalischer und/oder chemischer Effekte.

Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing

Das vom Fraunhofer ILT entwickelte Selective Laser Melting (SLM) ist ein generatives Fertigungsverfahren, das sich zur direkten Herstellung von metallischen Funktionsbauteilen und Werkzeugen bereits in einigen Branchen der Industrie bewährt hat. Auf der Grundlage von 3D-CAD-Daten werden mit einem Laserstrahl dünne Metallpulverschichten selektiv aufgeschmolzen. Nahezu beliebig komplexe Geometrien können realisiert werden, da der Aufbauprozess schichtweise erfolgt. Bei serienidentischen Funktionsprototypen, Einzelteilen und Kleinserien erlaubt das Selective Laser Melting (SLM) Verfahren eine wesentlich schnellere Reaktionszeit auf den Kundenbedarf als konventionelle Verfahren.

Für den Werkzeugbau können mit SLM beispielsweise Einsätze für Spritzgießwerkzeuge mit komplexen konturangepassten Kühlkanälen hergestellt werden. Die verbesserte Kühlung verringert die Zykluszeiten beim Spritzguss und erhöht die Teilequalität. Damit kann durch Einsatz des SLM-Verfahrens im Werkzeugbau die Produktivität und Qualität beim Spritzguss gesteigert werden. Das SLM-Verfahren ist auch zur wirtschaftlichen Herstellung von medizinischen Individualimplantaten z. B. aus Ti oder TiAl6V4 hervorragend geeignet. Neben der

Biokompatibilität des Werkstoffs werden auch die nach DIN geforderten mechanischen Eigenschaften erreicht. Aufgrund seiner Eigenschaften birgt das Verfahren auch erhebliches Potenzial für den Ultraleichtbau.

Hochpräzises Fertigungsverfahren

Die Forscher des Fraunhofer IWS nutzen für die Vorbereitung des Fertigungsprozesses (Digitalisierung, CAD-Modellierung, Berechnung der Baustrategie und Schweißfolge, CNC-Programmierung) schnell und effizient das eigens dafür entwickelte Softwarepaket DCAM. Es ermöglicht die Umsetzung der geschlossenen Prozesskette von der Programmierung über das Auftragschweißen bis hin zur Endbearbeitung, so dass der gesamte Prozess im automatisierten, CNC-gesteuerten Betrieb ablaufen kann. Ein Beispiel sind Spritzguss-Formeneinsätze, die direkt auf der Basis eines 3D-CAD-Modells durch Auftragschweißen ohne weitere Formen und Werkzeuge hergestellt werden können. Das durch die Lasertechnologie erreichte geringe Bearbeitungsaufmaß von nur 0,6 mm reduziert den Nacharbeitsaufwand in erheblichem Maße.

Laser-Stereolithographie - der schnelle Weg zum Bauteil

Die Laser-Stereolithographie ist eine Technologie, die auf der Basis von 3D-CAD-Daten Bauteile aus einem flüssigen Photopolymer durch schichtweisen Aufbau herstellt. Diese Bauteile kommen je nach Anforderung als Urmodelle, Designmuster, Funktionsprototypen, Vorrichtungselemente oder auch als finale Bauteile zum Einsatz. Ihre Materialeigenschaften sind vergleichbar mit denen der Kunststoffe Polyethylen, Polycarbonat oder Plexiglas. Die fertigen Bauteile lassen sich ohne weiteres konventionell bearbeiten. So können bei Bedarf Gewindebohrungen eingebracht, Passflächen gefräst oder auch Lackierungen durchgeführt werden.



Laserpolieren

Das Laserpolieren beruht auf dem Umschmelzen einer extrem dünnen Randschicht mit dem Laser und der Glättung der Oberfläche infolge der Grenzflächenspannung. Vergleichbar mit dem konventionellen Schleifen und Polieren stellt das Laserpolieren einen mehrstufigen Prozess dar. Das Makropolieren führt zunächst zu einer Glättung der Oberflächenstruktur, beispielsweise der Fräsriefen oder Erozierstrukturen. Mit dem anschließenden Mikropolieren wird insbesondere der Glanzgrad nochmals erhöht.

Aufgrund der Grenzflächenspannung des flüssigen Metalls glättet sich die Oberfläche ohne mechanisches Zutun. Durch das Wirkprinzip des Umschmelzens setzt sich das Laserpolieren von den konventionellen abtragenden Schleif- und Polierverfahren ab.

So entstehen Oberflächen, die frei von Schleifriefen und Kratzern sind und somit z. B. Verschmutzungen oder Bakterien nur geringe Anhaftungsmöglichkeiten bieten. Dieses innovative Verfahren ermöglicht es, die Rauheit der Oberflächen um einen Faktor von bis zu 100 zu reduzieren.

Laserpolierverfahren erhält Wissenschaftspreis 2006

In der industriellen Fertigung des Werkzeug- und Formenbaus, des Maschinenbaus, der Automobilindustrie, der Medizintechnik und auch der Pharmaindustrie ist das Polieren von metallischen Werkstücken häufig der letzte Fertigungsschritt: Glatte Oberflächen reduzieren Reibung, verhindern Verschmutzungen und vermindern die Haftung oder das Aufwachsen von Mikroorganismen. Bis dato konnte dieser abschließende Arbeitsgang nur bei sehr einfach aufgebauten Werkstücken maschinell durchgeführt werden. Bei komplexen 3D-Geometrien musste häufig manuell mit hohem Kosten- und Zeitaufwand (bis zu 30 min cm⁻²) poliert werden. Mit der Folge, dass vielfach dieser Arbeitsschritt, manchmal auch der gesamte Formen- und Werkzeugbau in Länder mit einem niedrigeren Lohnniveau verlagert wurde.

Einen neuen Ansatz, um polierte metallische Oberflächen automatisiert herzustellen, bietet das vom Fraunhofer ILT in Aachen entwickelte Laserstrahlpolieren. Es wurde vom Industrie-Club Düsseldorf und dem Wissenschaftszentrum NRW mit dem Wissenschaftspreis 2006 ausgezeichnet. Dabei wird mit Laserstrahlung eine dünne Randschicht (< 0,1 mm) der zu polierenden Oberfläche erhitzt und geschmolzen.

- 1 *Selektives Umschmelzen einer Pulverschicht mit Selective Laser Melting*
- 2 *Mit Selective Laser Melting (SLM) gefertigter Formeinsatz mit konturangepassten Kühlkanälen*
- 3 *Laserpolierte Glasformen*
- 4 *Polieren von Glas- und Kunststoffoptiken mit Laserstrahlung: laserpolierte und unpolierte BK7-Linse*



Laserstrahlhärten

Beim Laserstrahlhärten wird ein Randbereich eines Bauteiles lokal kurzzeitig über Austenitisierungstemperatur erwärmt. Durch die Eigenabschreckung des Bauteiles wird in der Regel ohne zusätzliche Kühlmedien eine martensitische Umwandlung realisiert. Die erreichbaren Härten liegen etwa 50 – 150 HV höher als beim herkömmlichen Härten. In Abhängigkeit von der Stahlsorte lassen sich Einhärtetiefen bis etwa 1,5 mm, in Sonderfällen bis etwa 5 mm realisieren. Aus Sicht der Verschleißbeständigkeit ergeben sich besonders erfolgversprechende Einsatzfälle für Ermüdungs-, Erosions- sowie für einige Arten von Abrasivverschleiß. Bauteilseitig ist das Verfahren besonders gut geeignet für kleine Funktionsflächen an kompliziert geformten größeren Bauteilen, verzugsgefährdeten und dünnwandigen Bauteilen sowie Bauteilinnenflächen und Hinterschneidungen.

Laserstrahlhärten mit Hochleistungsdiodenlasern

Mit dem Hochleistungs-Diodenlaser steht eine äußerst effiziente Strahlquelle für das Laserstrahlhärten zur Verfügung. Er ist klein, kompakt, leicht in Verfahrensabläufe und Produktionseinrichtungen integrierbar, weist einen hohen elektrischen Wirkungsgrad auf und verursacht geringe Investitions- und Betriebskosten. Prozesstechnisch von Vorteil ist der rechteckige Querschnitt des fokussierten Laserstrahles mit nahezu konstanter Intensitätsverteilung. Damit sind Härtespurbreiten bis etwa 11,5 mm, Härtespurtiefen bis 1,5 mm bei Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 370 und 24 500 mm min⁻¹ möglich. Aufgrund seiner Kompaktheit kann der Laser leicht in Dreh- und Fräszentren integriert werden, so dass eine Komplettbearbeitung in einer Einspannung möglich wird. Anwendungen des Laserstrahlhärtens sind in der Automobil- und Textilindustrie, zunehmend aber auch im Formen- und Werkzeugbau zu finden.

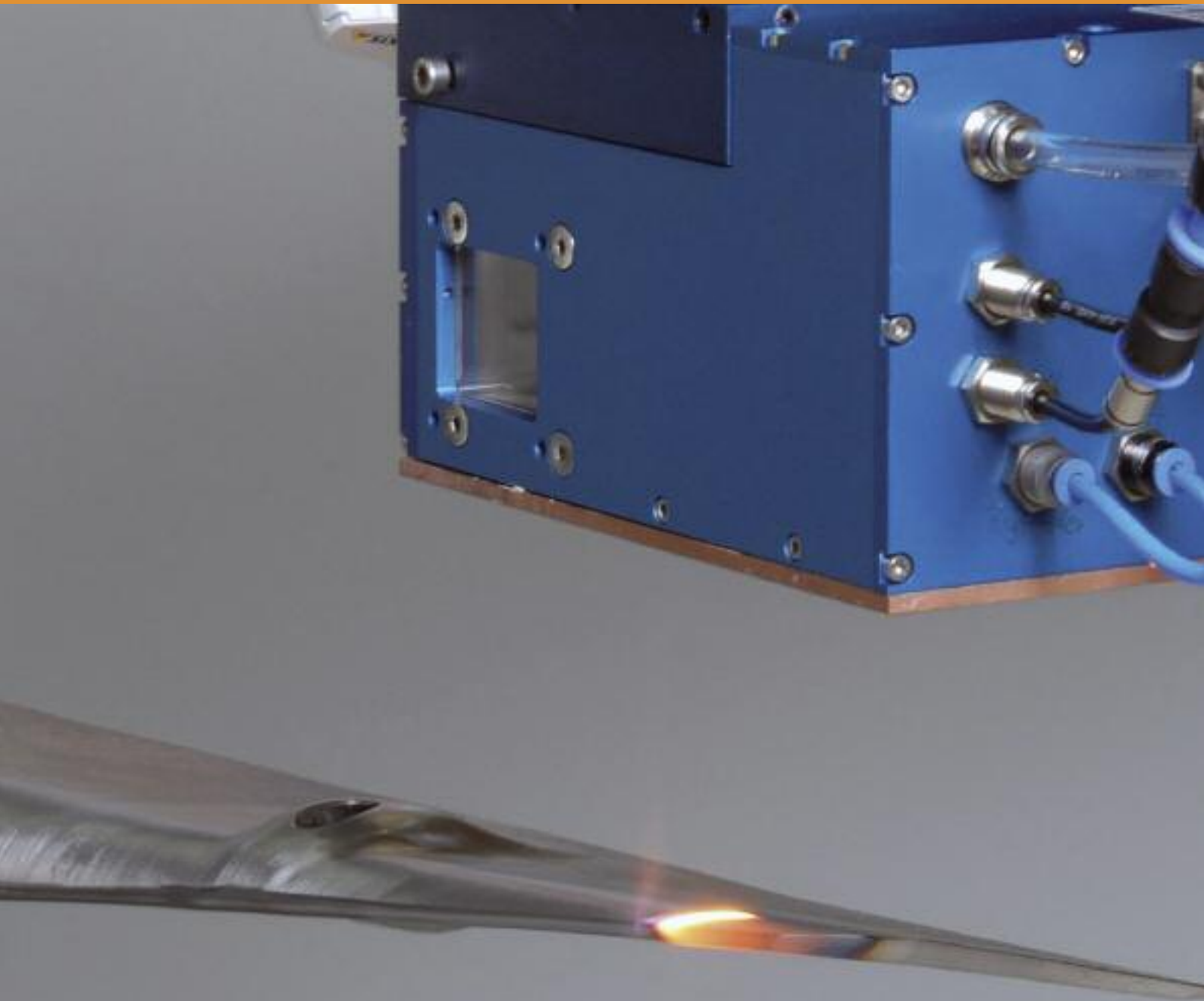
Lebensdauersteigerung von Dampfturbinenschaufeln

Endstufen-Laufschaufeln von großen Dampfturbinen unterliegen während ihres Betriebes einer sehr hohen Verschleißbelastung durch Tropfenschlag, gepaart mit einer hohen zyklischen und Fliehkraft-Beanspruchung. Um diesen Belastungen zu entsprechen, werden bei großen Dampfturbinen zunehmend ausscheidungshärtbare Cr-Ni-Stähle eingesetzt. Diese können höheren mechanischen Belastungen ausgesetzt werden, weisen aber eine geringere Beständigkeit gegenüber Tropfenschlag, zyklischer Belastung und Spannungsrisskorrosion auf.

Für die ausscheidungshärtbaren Cr-Ni-Stähle wurde vom Fraunhofer IWS Dresden deshalb gemeinsam mit dem Schaufelhersteller eine neue Wärmebehandlungstechnologie entwickelt. Dabei wird die zu schützende Zone zuerst mit einem oszillierenden Laserstrahl randschichtlösungsgeglüht und anschließend die gesamte Turbinenschaufel ausgelagert. Es entsteht eine geometrisch optimal an die lokale Verschleißbelastung der Turbinenschaufel angepasste verschleiß- und ermüdungsresistente Randschicht, die eine um bis zu 150 HV höhere Härte als die durchgehärtete Turbinenschaufel aufweist.

Für ihre Entwicklungen zum »Randschichtaushärten durch lokales Erzeugen von nanoskaligen Ausscheidungen« erhielten die Mitarbeiter des Fraunhofer IWS im Jahr 2006 den Joseph-von-Fraunhofer-Preis. Inzwischen hat das Verfahren seine industrielle Feuertaufe bestanden und bewährt sich in mehr als 50 großen Dampfturbinen in Kraftwerken in Deutschland, Europa und dem Nahen und Fernen Osten.

- 1 Härten einer Greiferkurve mit dem Hochleistungs-Diodenlaser
- 2 Laserstrahlhärten von Turbinenschaufeln





INNOVATIVE SYSTEM-KOMPONENTEN FÜR DIE MATERIALBEARBEITUNG

Ständig steigende Anforderungen in der Industrie an die Effizienz von Prozessen, Eigenschaften und Abläufen sind nicht neu und fungieren trotzdem immer wieder als Antriebskraft für neuartige Lösungen. Komplexität ist die Herausforderung der Gegenwart und Zukunft. Kleine Einzelösungen treten in der Bedeutung hinter Gesamtkonzepte zurück. Wie im alltäglichen Leben drängen auch Bereiche wie Wissenschaft, Forschung und Entwicklung intensiver darauf, Dinge im Kontext zu betrachten, zu isolieren und optimiert wieder in Gesamtsysteme einzureihen.

Neue Technologien der Lasermaterialbearbeitung sowie die optimale technische und wirtschaftliche Nutzung des Leistungsvermögens und der Qualität neuartiger Laserstrahlquellen erfordern für die Umsetzung am konkreten Bauteil oft den Einsatz neuartiger Systemtechnik bzw. systemtechnischer Komponenten. Ist diese Systemtechnik noch nicht kommerziell verfügbar, bieten Fraunhofer-Institute die Entwicklung, Erprobung und den Demonstrations- oder Prototypaufbau solcher Lösungen an. Diverse Systeme mit erweiterter Funktionalität, wie z. B. Hochgeschwindigkeits- und / oder Präzisions-Strahlableitungs-systeme für die Remote-Bearbeitung, Steuerungstechnik und CAD / CAM-Tools, Systemtechnik und Software für die online-Prozesskontrolle, -überwachung und -regelung haben bereits den Weg in die Industrie gefunden.

Die Fraunhofer-Forscher arbeiten erfolgreich mit führenden Laserherstellern, Anwendern sowie Geräte- und Anlagenbauern zusammen. Sie betreuen ihre Kunden bei der Umsetzung der Systeme von der Planung, Konzepterstellung, Verfahrensentwicklung und -erprobung, bis hin zur Installation, Fertigung von Vorserien und Schulung. Der Prozess ist fließend und beginnt oft mit der Prüfung der Machbarkeit. Ihren Auftrag sehen sie darin, den Kunden zufrieden zu stellen, was in der Regel der Fall ist, wenn er mit der Lösung Geld verdient.



FLEXIBILITÄT BEGINNT IM KOPF

Laserschweißen und -schneiden mit dem Kombikopf

Fast alle Baugruppen, die aus Blech gefertigt werden, entstehen durch die Kombination trennender und fügender Verfahren. Entsprechend ist der anlagentechnische Aufwand. Selbst die als besonders flexibel eingestufteten Laserfertigungsanlagen sind in der Regel jeweils auf nur ein Verfahren spezialisiert oder erfordern z. B. beim Wechsel zwischen Schneid- und Schweißanwendungen zeitaufwändige Rüstarbeiten. Eine neue, hochflexible Lösung stellt die lasertechnische Fertigung mit einem Kombikopf dar, der ohne Werkzeugwechsel in einer multifunktionalen Laserfertigungszelle Schneid- und Schweißaufgaben in beliebiger Folge ausführen kann. Dabei entfallen Handhabungs-, Positionier- und Spannoperationen. Entsprechend werden nicht nur kürzere und flexiblere Prozessketten und damit geringere Produktionszeiten und -kosten, sondern auch verbesserte Fertigungsgenauigkeiten erreicht. Zudem eröffnen sich wirtschaftliche Lösungen für innovative Blechprodukte mit hoher Variantenvielfalt.

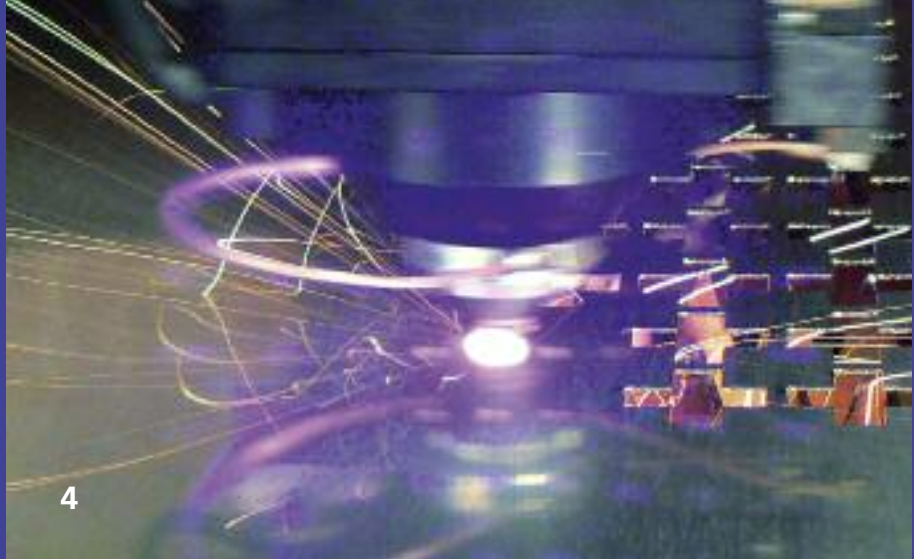
Der Zielkonflikt der unterschiedlichen Anforderungen an Schweiß- und Schneidköpfe konnte durch das Fraunhofer ILT mit der Entwicklung einer »Autonomen Düse« gelöst werden, die sich bereits in industriellen Anwendungen mit Hochleistungs-Spiegelschneidköpfen bis 12 kW bewährt hat. Es reicht ein Crossjet mit Druckluftanschluss, ein Wechselventil für Schneid- und Schweißgas und die geeignete Programmierung der NC-Steuerung zum Umstellen der Verfahrensparameter, um aus dem Schneidkopf auch einen Schweißkopf werden zu lassen. Die »Autonome Düse« bildet mit ihrer rotationssymmetrischen, schlanken Bauform und einer integrierten kapazitiven Abstandssensorik die Schlüsselkomponente des universellen Bearbeitungskopfes für das 3-dimensionale Schneiden und Schweißen. Der Kombikopf kann wahlweise mit Linsen- oder Spiegeloptiken ausgestattet werden und ist für Festkörperlaser

genauso wie für CO₂-Laser geeignet. Die durch die Verfahrenskombination gewonnene Flexibilität kommt besonders beim Einsatz von Robotersystemen mit fasergeführten Festkörperlaser zur Wirkung.

Minimierte Fertigungszeit durch Remote-Technologie

Bei der Remotebearbeitung wird der Laserstrahl über bewegte Spiegelemente mit höchster Dynamik über das zu bearbeitende Bauteil geführt. Positionierzeiten zwischen einzelnen Bearbeitungsprozessen werden minimiert und die Prozessgeschwindigkeit auf komplizierten Geometrien nahezu konstant gehalten werden.

Für den industriellen Einsatz der Remotetechnologie zum Schweißen, Schneiden, Reinigen und Gravieren entwickelt das Fraunhofer IWS Dresden Bearbeitungsoptiken und Softwarelösungen für die Prozesssteuerung und Fertigungsvorbereitung. Die an Kundenanforderungen angepasste Technologieentwicklung sowie die Auslegung von Prozessüberwachungssystemen gehören dabei ebenso zu den Kompetenzen des Fraunhofer IWS.



Mehr Dynamik beim Laserschneiden durch Zusatzachsen

Um die Bearbeitungszeiten beim Schneiden komplizierter Bauteile zu verringern können Zusatzachsen im Bearbeitungskopf einen großen Beitrag leisten.

Die Hauptachsen fahren speziell in harten Konturübergängen der zu schneidenden Geometrie eine stark überschleifende Bahn, während das in der Bearbeitungsoptik integrierte Zusatzachssystem die Sollbahnabweichung korrigiert. Untersuchungen mit einer solchen Achskombination haben gezeigt, dass mehr als 50 % Schneidzeitersparnis bei der Bearbeitung komplexer Bauteile möglich ist.

Unter der Bezeichnung *remocut[®]MG* wurde am Fraunhofer IWS die Technologie des gasgestützten Remote-Schneidens entwickelt. Dabei wird der Strahl wie bei der konventionellen Remotebearbeitung über Kippspiegel bewegt, wobei zusätzlich nahe am Prozess eine Schneidgasdüse konzentrisch um den Strahl synchron mit diesem bewegt wird. Die Schneidgaszuführung ermöglicht einen sicheren Schmelzaustrieb auch bei der Bearbeitung dickerer Materialstärken. Zudem lässt sich damit eine gute Schnittkantenqualität erzeugen.

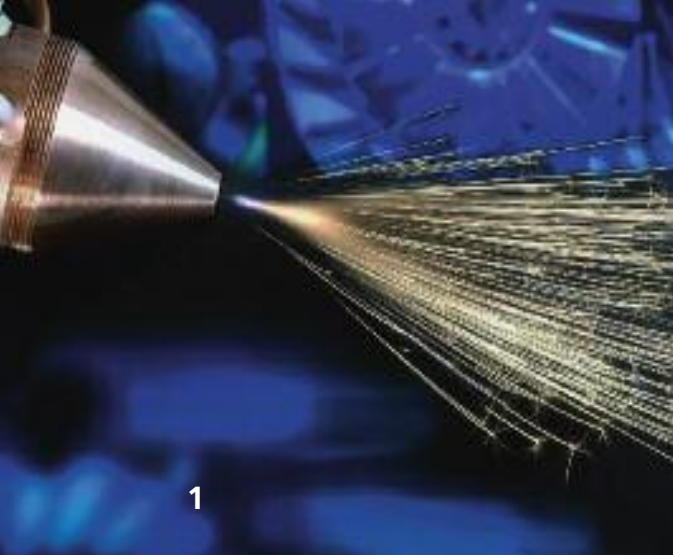
Ein solches Bearbeitungssystem kann allein stehend als »Form-Cutter« oder integriert in einer konventionellen Führungsmaschine als Zusatzachssystem betrieben werden. Am Fraunhofer IWS wurden Softwarelösungen entwickelt, um die aufwendige Koordination von Multiachssystemen zu ermöglichen. Erst damit können die großen Führungsachsen einer Laserschneidanlage zusammen mit den hochdynamischen Zusatzachsen im Bearbeitungskopf auf unterschiedlichen Bahnen synchron geführt werden, welche in Summe der gewünschten Bearbeitungskontur entspricht.

Strahlablenkoptik-Baukasten lasertronic[®] SAO

Mit den im Fraunhofer IWS entwickelten Strahlablenkoptiken können Reinigungsprozesse mit hohen Abtragsraten bei gleichzeitig extrem kurzen Wechselwirkungszeiten realisiert werden. Das Baukastensystem erlaubt den flexiblen Aufbau von kundenspezifischen Lösungen, speziell die Anpassung an verschiedene Wellenlängen bzw. Laser. Für die automatische Bauteilreinigung vor Schweißprozessen und den Abtrag dünner Schichten von Metallen (Schmierstoffe, Korrosionsmittel, Schmutzpartikel) werden Reinigungsköpfe mit schnell steuerbaren CO₂- und Festkörper-cw-Lasern eingesetzt.

Eine speziell für die fasergeführte Strahlung von Festkörperlasern entwickelte Strahlablenkoptik ist modular, aus Strahlablenkeinheit und Strahlfokussierung aufgebaut. Das Kernstück der Strahlablenkeinheit bilden die leichten Umlenkspiegel, die von Galvanometerscannern bewegt werden. Die Optik wird für die Übertragung von bis zu 6 kW Laserleistung ausgelegt und den Erfordernissen der Anwendung angepasst. Spezielle Kühl-, Überwachungs- und Sicherheitsstrategien sichern einen fehlerfreien Betrieb auch unter harten Produktionsbedingungen. Zur Überwachung des Schweißprozesses kann die Strahlablenkoptik mit Komponenten zur Prozessabbildung und -diagnose ausgestattet werden.

- 1 *Kombikopf an einem Laserportalroboter mit integrierter Strahlführung*
- 2 *High-Power-Strahlablenkoptik für CO₂-Laserstrahlung*
- 3 *Strahlführungs- und Formungseinheit des remocut[®]MG Bearbeitungssystems*
- 4 *Prozessaufnahme des gasunterstützten Remoteschneidens*



Prozess- und Systemtechnik für das Laserstrahl-Auftragschweißen

Für die präzise Herstellung von Funktions- und Schutzschichten sowie zum Instandsetzen komplex geformter und teurer Bauteile steht heute moderne Lasertechnik auf höchstem technologischem Niveau zur Verfügung. Mit den im Fraunhofer ILT und IWS entwickelten Komponenten für das Auftragschweißen mit Pulver oder Draht werden den Anwendern ausgereifte Werkzeuge in die Hand gegeben, die sich unkompliziert entsprechend den Erfordernissen der jeweiligen Applikation zusammensetzen lassen. Sie sind als modulare Ausrüstungssätze konzipiert, die leicht in Werkzeugmaschinen, Roboter oder einfache CNC-Handhabungssysteme integriert werden können. Hierbei wird der bereits vorhandene Ausrüstungsgrad des Nutzers weitestgehend berücksichtigt, so dass sich die Investition auf das geringst mögliche Maß beschränkt. Industriell am weitesten durchgesetzt haben sich Koaxialpulverdüsen unterschiedlichster Bauart. Je nach Anwendung werden die Düsen entweder auf die höchste Präzision des Werkstoffauftrags oder die höchste Produktivität hin konfiguriert.

Bearbeitungsköpfe für die Innenbearbeitung

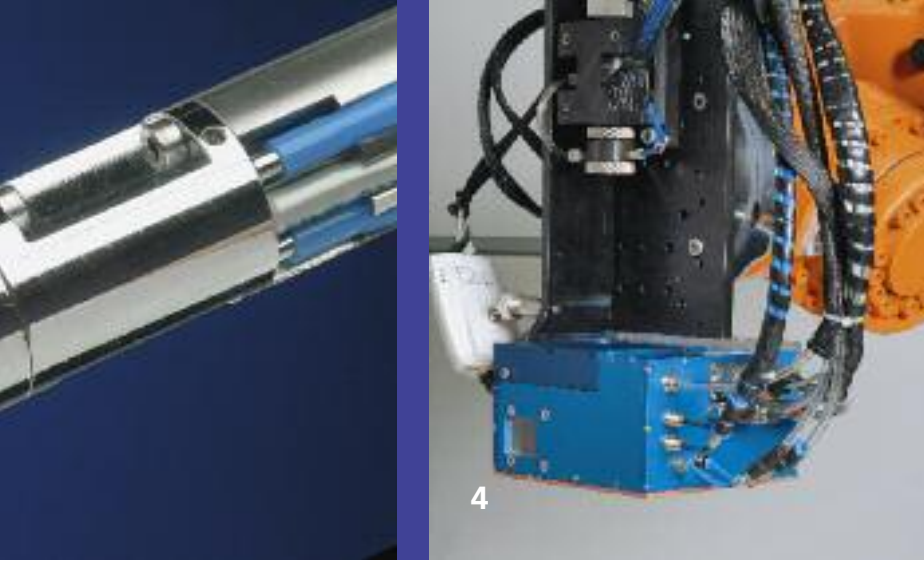
Innenkonturen mit einem Innendurchmesser unter 100 mm können mit konventionellen Optiken wegen der beschränkten Zugänglichkeit nicht eingesetzt werden. Hierfür ist eine Miniarisierung der Optik wie auch der Pulverzufuhr erforderlich. Am Fraunhofer ILT wurden Innenbearbeitungsköpfe entwickelt und erprobt, die ab einem Innendurchmesser von 25 mm und bis zu einer Eintauchtiefe von 500 mm eingesetzt werden können. In einem zylindrischen Körper sind die optischen Komponenten, die Pulverzufuhr, die Wasserkühlung und die Schutzgasleitungen kompakt integriert.

Die Bearbeitungsköpfe können direkt an eine Lichtleitfaser oder an eine Kollimationsoptik adaptiert werden. Der Leistungsbereich erstreckt sich von 500 W (für 25 mm Innendurchmesser) bis zu 3 kW (ab 50 mm Innendurchmesser).

Laser-Präzisionstechnologie zum Auftragschweißen und Löten mit zentrischer Drahtzufuhr

Neue Laserbearbeitungswerkzeuge der Fraunhofer Forscher kehren das Prinzip der Koaxialität von Laserstrahl und Schweißgut um. Im Unterschied zu den Pulverdüsen wird ein Draht zentrisch im Inneren des Laserstrahls, und zwar exakt in der Strahlachse, zugeführt. Hierdurch entsteht eine kompakte und hochintegrierte Strahl-Werkstoff-Bearbeitungseinheit, in der die Drahtzuführung stabil und völlig unabhängig von der Schweißrichtung erfolgt. Da die Drahtzufuhr naturgemäß unabhängig von der Schwerkraft ist, können mit diesem Prinzip nicht nur Konturen in der Ebene, sondern auch 3D-Auftragschweißungen und -Lötungen ausgeführt werden.

Laserseitige Voraussetzung ist die Erzeugung eines symmetrischen, hohlkegelförmigen Laserstrahls mit hinreichend großer innerer Öffnung zur Zufuhr des Schweißgutes. Der praktikable Lösungsweg hierfür sind Mehrstrahloptiken, die entweder auf der Aufteilung eines Einzelstrahls oder auf der Integration mehrerer separater Laserstrahlen beruhen können. Zusammen mit der ebenfalls koaxial zum Laserstrahl in die Bearbeitungsköpfe integrierbaren Prozessüberwachung sind die neuen Schweiß- und Lötköpfe richtungsunabhängig einsetzbar.



4

Systemkomponenten zum Laserstrahlhärten

Für das Härten in der Großserienfertigung werden in der Regel Maschinensysteme und Optiken eingesetzt, die genau auf den Prozess und das betreffende Bauteil abgestimmt sind. Bei Kleinserien und in der Einzelteillfertigung müssen das Maschinensystem und die Optik häufig sehr variabel sein, um die auftretende Vielzahl von Härtezonengeometrien optimal bearbeiten zu können. Eine Möglichkeit, sowohl variabel einstellbare Strahlfleckbreiten bei optimiert vorgegebenen Strahlflecklängen zu erzeugen und gleichzeitig die Intensitätsverteilung bauteilangepasst zu optimieren, bieten Strahlformungssysteme mit Scannerspiegeln. Das Fraunhofer IWS hat das dynamische Strahlformungssystem »LASSY« für den industriellen Einsatz von Hochleistungsdiodenlasern entwickelt. Ein eindimensionaler Scanner mit variabler Ansteuerung ermöglicht eine große Vielfalt von Intensitätsprofilen bei variabler Härtespurbreite.

Ergänzt wird das System mit der kamerabasierten Temperaturmesseinrichtung »E-MAqS«. Damit können z. B. laserbasierte Härteprozesse mit konstanten Oberflächentemperaturen sicher ausgeführt werden. Die Kombination mit dem Temperaturregelsystem lasertronic® »LompocPro« (Laser online monitoring power control Program) ermöglicht darüber hinaus die Prozessüberwachung und Sicherung der Prozessdaten zur Qualitätsdokumentation.

- 1 Beschichtungskopf zum Laserstrahl-Auftragschweißen
- 2 Dreistrahl-Bearbeitungskopf mit integrierter Drahtzufuhr
- 3 Endoskopisch geführte Bearbeitungsoptik für das Laserstrahl-Auftragschweißen
- 4 Scanneroptik »Lassy« an einem Roboter mit einem 6 kW Hochleistungsdiodenlaser



QUALITÄT KONSEQUENT SICHERN

Komplizierte Prozesse einfach überwachen

Damit Laserstrahlhärteprozesse mit konstanten Oberflächentemperaturen sicher ausgeführt werden können, wurde im Fraunhofer IWS die kamerabasierte Temperaturmesseinrichtung »E-MAqS« entwickelt. »E-MAqS« kommt für alle anspruchsvollen Temperaturmessaufgaben in Frage, die mit normalen Pyrometern nicht ausreichend gut gelöst werden können. Der Einsatz des Systems ist zum Beispiel dann sinnvoll, wenn sehr große Laserstrahlflecken verwendet werden. Der Ort der höchsten Temperatur wird immer im Sichtfeld der Kamera liegen, die höchste Temperatur kann so zuverlässig erfasst und Anschmelzungen können sicher verhindert werden.

Das System »E-MAqS« wurde als vergleichsweise preiswerte Alternative zu herkömmlichen Thermographiesystemen entwickelt und kann auch ohne die dynamische Strahlformung mit einem kompakteren luftgespülten Gehäuse in industriellen Umgebungen separat für Wärmebehandlungsprozesse eingesetzt werden. Der Messbereich beginnt bei etwa 600 °C. Mit einem eigens dafür entwickelten Kalibrierstrahler können sehr schnell Anpassungen der Kennlinien an verschiedene Laseroptiken vorgenommen werden. Das System wird in der Regel in Kombination mit dem Temperaturregelsystem lasertronic® »LompocPro« eingesetzt. »LompocPro« realisiert neben der Prozessregelung auch die Prozessüberwachung und Sicherung der Prozessdaten zur Qualitätsdokumentation.

Solarzellen qualitätsgerecht löten

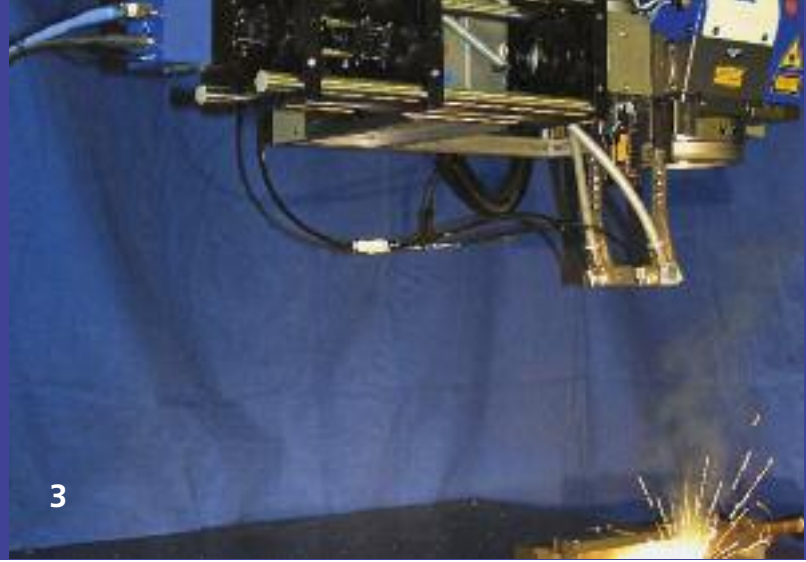
Seit 2008 wird die Regelung »LompocPro« in Verbindung mit der schnellen analogen Temperaturerfassung »E-FAqS« in kommerzielle Laserlötanlagen integriert und in der industriellen Massenproduktion eingesetzt. Mit den Anlagen können sowohl Standard- als auch Rückseitenkontakt-Solarzellen mit hoher Qualität bei Taktzeiten von 3 bis 4 Sekunden je Zelle gelötet werden. Erhebliches Einsatzpotenzial für das neue Mess- und Regelsystem wird auch beim Kunststoffschweißen und Laserglühen gesehen.

Prozessüberwachung beim Mikrobohren

Beim Laserstrahlbohren wird das zu entfernende Material in Form von Plasma und Schmelze aus dem Bohrloch herausgetrieben. Solange kein vollständiger Durchbruch erfolgt ist, findet Austritt entgegengesetzt zur Bohrrichtung statt und kann, wenn bereits an der Bohrungswand erkaltet, zu Recast und Verschlüssen führen. Für eine Vielzahl von Anwendungen ist es wichtig, den richtigen Durchbruchzeitpunkt zu erkennen um die Bauteilsicherheit zu gewährleisten oder Zykluszeiten zu verringern. Sowohl Prozessemission und Reflexion während eines Bohrpulses als auch reflektierte Strahlung bereits erstarrter Oberflächenstrukturen durch koaxial eingebrachte Lichtstrahlung können entsprechenden Aufschluss über den Durchbruchzeitpunkt geben. Das vom Fraunhofer ILT entwickelte und patentierte Prozessüberwachungssystem CPC (Coaxial Process Control) beobachtet den Bearbeitungsprozess koaxial zur Laserstrahlachse. Die aus der Bearbeitungszone emittierte und reflektierte Strahlung wird über geeignete optische Komponenten ausgekoppelt und von einer Kamera mit Frequenzen im Bereich mehrerer Kilohertz mit vorgeschalteter Optik orts aufgelöst erfasst.



2



3

Die Bilddaten werden mittels Framegrabber und einer Auswerteeinheit online eingelesen und interpretiert. Die Detektion und Protokollierung der Merkmale schon während der Bearbeitung ersetzt nachgelagerte Qualitätskontrollen und ermöglicht so eine normgerechte Qualitätssicherung.

Robuste Prozessüberwachung mittels Fremdbeleuchtung

Während in der Vergangenheit Prozessüberwachung vorwiegend auf Basis der Prozessstrahlung realisiert wurde, setzen die Forscher aus Aachen heute zunehmend auf ein Verfahren, bei dem die Bearbeitungszone koaxial oder lateral zum Bearbeitungslaserstrahl mit einer zusätzlichen Strahlquelle beleuchtet wird. Das vom Fraunhofer ILT entwickelte System zur koaxialen Prozesskontrolle (CPC) lässt sich somit nicht nur einsetzen, wo der Arbeitsvorgang für einen vom Detektor sichtbaren Bereich selbst »leuchtet«. Das Verfahren kann sowohl für die Kunststoff- als auch für die Metallbearbeitung eingesetzt werden. Es ermöglicht unter anderem die Erkennung von Phasengrenzen (fest / flüssig). Deren Verlauf gibt beispielsweise Auskunft über Schweißnahtbreite, unregelmäßige Schnittfugen, Anbindungsfehler oder Tropfenbildung. Weiterhin können durch die Beleuchtung der Bearbeitungszone Oberflächenstrukturen erkannt werden. Neben der Vermessung geometrischer Größen zur Qualitätsbewertung dient der Vergleich von Strukturen aufeinanderfolgender Bilder der Ermittlung der realen Position und Vorschubgeschwindigkeit während eines Bearbeitungsprozesses.

Das Beobachtungssystem – in der Regel inklusive Beleuchtungseinheit – sitzt direkt am Laserbearbeitungskopf. Das hat den Vorteil, dass es mit dem Strahl »sieht«. Die reflektierte Strahlung aus der Bearbeitungszone wird über spezielle optische Komponenten aus dem Strahlengang ausgekoppelt, mit einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet und aufgezeichnet. Mit einem Rechner werden die eingelesenen Prozess-

bilder nach Möglichkeit in Echtzeit interpretiert. Mit oder ohne zusätzliche Beleuchtung kann das CPC-System grundsätzlich in fast jede bestehende Laseranlage auch nachträglich integriert werden. Verschiedene industrielle Laseranwendungen wurden so bereits realisiert.

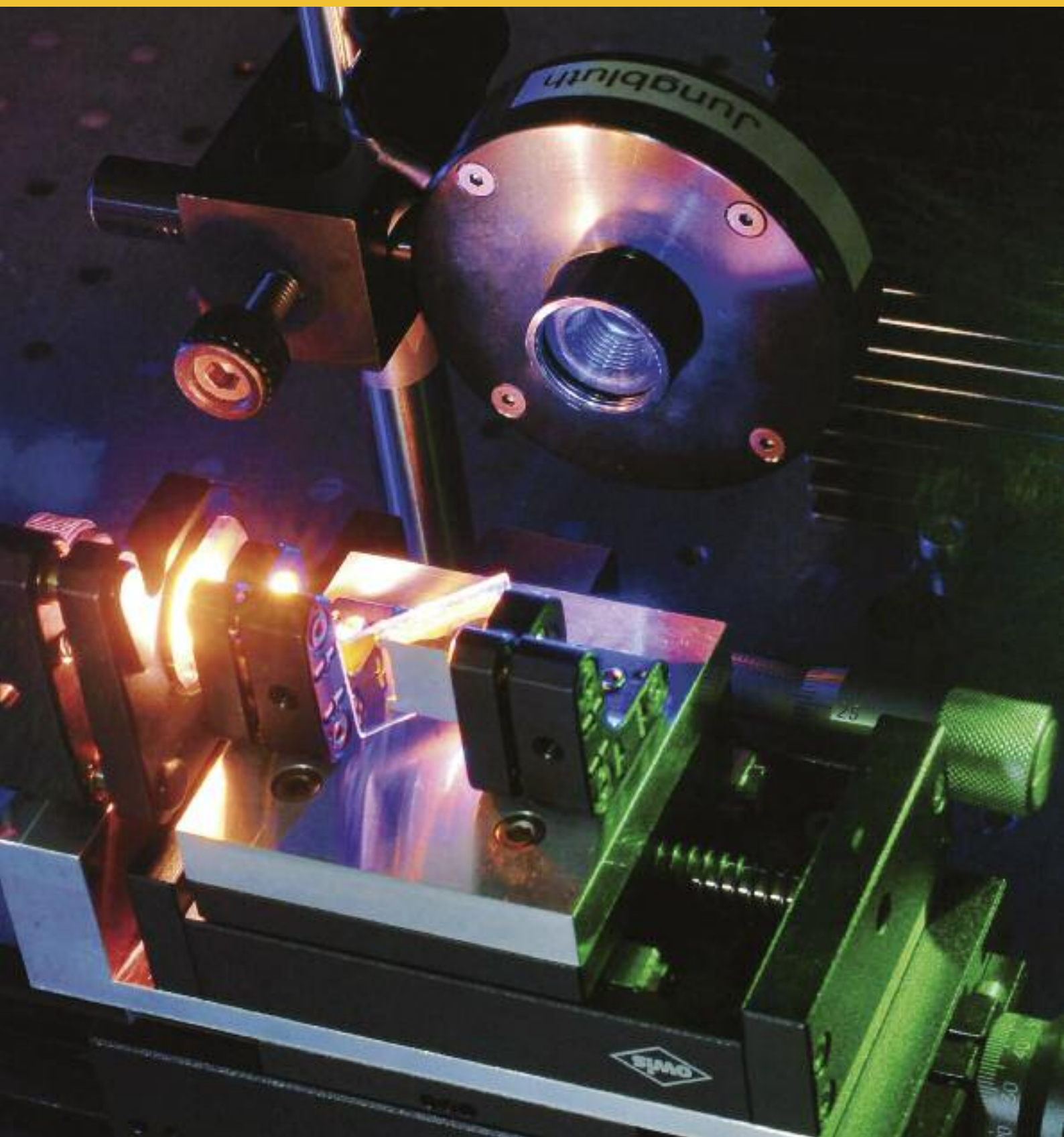
Optimale Regelung der Laserleistung in Schweißprozessen

Mit einer neuen Kamera- und Softwarearchitektur ist es dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM und Industriepartnern gelungen, Daten aus bildgebenden Verfahren im Laserschweißprozess zur Prozesssteuerung zu nutzen.

Dazu haben die Wissenschaftler aus Freiburg eine besonders effiziente Arbeitsteilung eingeführt: Während in konventionellen Bildverarbeitungssystemen die Daten an einigen wenigen Prozessoren Schlange stehen und der Reihe nach verarbeitet werden, bedient ein neuartiger Kamerachip alle Daten gleichzeitig. So genannte Zellulare Neuronale Netzwerke (Cellular Neural Networks, kurz CNN) ermöglichen es, Rechen- und Speicherelemente in jedes einzelne Kamerapixel zu integrieren – die Grundlage für eine Bildverarbeitung in Echtzeit.

Mit einer Bildrate von 14 Kilohertz wurden Signale erzeugt, die die Laserleistung im Schweißprozess optimal regeln. Das Ergebnis sind durchgängig stabile Schweißnähte mit deutlich verbesserter Oberflächenqualität.

- 1 *Kamerabasiertes System E-MaqS an der Laseroptik eines direktstrahlenden Hochleistungsdiodenlasers*
- 2 *CPC Modul zur Qualitätssicherung in der Lasermaterialbearbeitung*
- 3 *Teleskop-Optik an den Laserschweißkopf angeflanscht zur koaxialen Beobachtung*

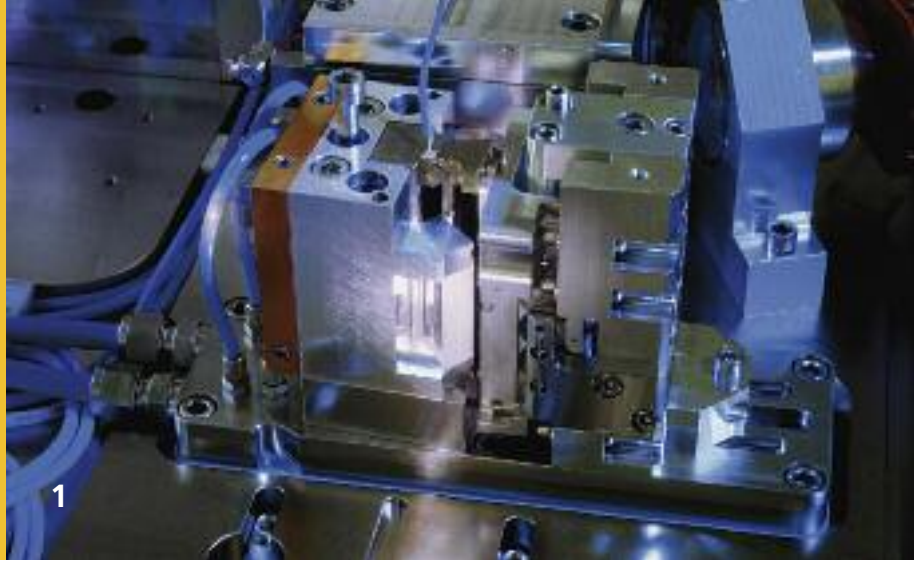


LASERSTRAHLQUELLEN UND -KOMPONENTEN

Laserstrahlquellen werden heute dank ihrer besonderen Eigenschaften in unterschiedlichen Anwendungsbereichen von der Messtechnik über die Materialbearbeitung bis zur Medizin eingesetzt. Dementsprechend werden Laser unterschiedlichster Wellenlänge, Leistung, Größe, Strahlungsmodus u. v. m. benötigt. Die eingesetzten Laser werden meistens nach dem eingesetzten optisch aktiven Material kategorisiert und benannt. So reicht das Spektrum von lampengepumpten und diodengepumpten Festkörperlaser in Stab- oder Scheiben-Bauform über Faserlaser bis hin zu CO₂-Lasern und Direkt-Diodenlasern. Experten schätzen, dass erst etwa 50 % der möglichen Laseranwendungen realisiert sind.

Eine vollkommen neue Generation von Laserstrahlquellen, Faserlaser und Scheibenlaser, wurden erst vor wenigen Jahren in die industrielle Praxis eingeführt. Diese neu eingeführten Strahlquellen eröffnen vollkommen neue Möglichkeiten. In den Instituten des Fraunhofer-Verbundes Light & Surfaces werden mit führenden Partnern aus der Halbleiter- und Produktionstechnik Diodenlaser, Stab-, Slab- und faserbasierte Festkörperlaser, Laserkomponenten, optische Messtechnik und optische Präzisionssysteme sowie Montage- und Testanlagen für diese Systeme entwickelt.

Die wesentlichen Zielmärkte dieses Geschäftsfeldes sind die Lasermaterialbearbeitung, die Medizintechnik, die Messtechnik, die Beleuchtungstechnik sowie der Komponentenmarkt für die Informations- und Kommunikationstechnik.



INNOVATIVE LASERSTRAHLQUELLEN

Die Produktion mit Lasertechnik erscheint dem Betrachter überaus beeindruckend: das Licht trifft stets punktgenau auf das Werkstück und scheint stets genau die Aufgaben zu erfüllen, für die es vorgesehen ist. Es bahnt sich scheinbar mühelos seinen Weg durchs Metall, Schnitte, Schweißnähte und Markierungen entstehen. Diese Perfektion ist das Ergebnis jahrelanger Forschungsarbeit von Unternehmen und Instituten. Die Entwicklung maßgeschneiderter Laser gehört zu den Forschungsfeldern der Fraunhofer-Institute.

Neue Dioden- und Festkörperlaser

Am Fraunhofer ILT in Aachen werden Dioden- und Festkörperlaser für industrielle Anwendungen und Forschung entwickelt. Die Konzepte zielen auf Modularität und Leistungskalierbarkeit bei hoher Strahlqualität und Effizienz. Die Leistungen reichen von einigen Watt bis 5 kW, die Pulsdauern der Laser decken das gesamte Spektrum von kontinuierlichem Betrieb bis zu Femtosekunden ab.

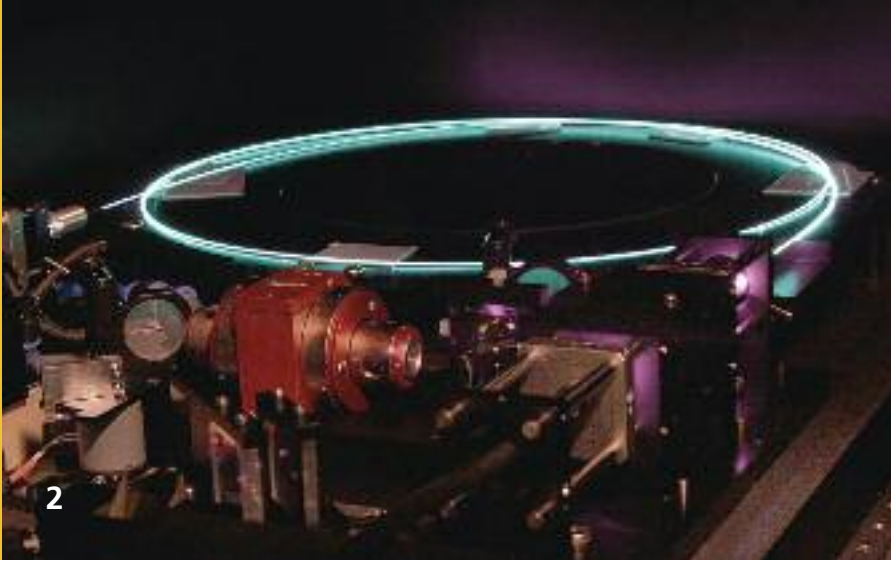
Bei den Lasersystemen handelt es sich um maßgeschneiderte, kundenspezifische Lösungen auf Basis diodengepumpter Stab-, Slab- oder Faserlaser. Von besonderem Interesse sind Systeme, bei denen Pulsdauer und zeitliche Pulsform frei einstellbar sind oder deren Wellenlänge kontinuierlich vom Ultravioletten bis ins nahe Infrarot eingestellt werden kann.

Burn-In System für Puls- und cw-Betrieb von Laserbarren

Hochleistungsdiodenlaser werden in den nächsten Jahren voraussichtlich in großen Stückzahlen für die verschiedensten Anwendungen, z. B. Konsumermärkte, benötigt. Für Langzeittests passen deshalb die Forscher aus Aachen Burn-In Systeme den neuesten Anforderungen an. Beispielsweise wurde ein System bestehend aus 20 Prüfplätzen entwickelt, die in einem Schrank auf mehreren Ebenen angeordnet und über einen CAN-Bus miteinander verbunden sind. Aufgrund der modularen Bauweise kann das System erweitert und auf die Bedürfnisse des Kunden hinsichtlich der Anzahl der Prüfplätze, der Maximalströme, Zusatzfunktionen oder Modifizierungen (Bedienoberfläche, Datenbankanbindung) abgestimmt werden.

Fertigungstechnologie für Dioden- und Festkörperlaser

Der Einsatz von Strahlquellen in Industrie, Medizintechnik und Messtechnik sowie im Konsumgüterbereich stellt unterschiedliche Anforderungen an Herstellkosten, Zuverlässigkeit, Betriebsdauer und Robustheit. Angepasste Fertigungstechnologien und Produktionsverfahren für Strahlquellen sind daher erforderlich. Das Fraunhofer ILT befasst sich seit mehr als 15 Jahren mit der Auslegung und Optimierung von Wärmesenken und Lötverfahren für Halbleiterlaser. Zusammen mit dem Fraunhofer IOF Jena werden derzeit Verfahren entwickelt, um die etablierten Klebverfahren zur Befestigung optischer Komponenten durch robuste und hochpräzise Löt- und Bond-Technologien zu ersetzen. Neben Faserkomponenten und mikrooptischen Komponenten können auf dieser Grundlage auch komplexe Festkörperlaser hergestellt werden.



Ultrakurzpulsquelle für Terahertz-Bildgebung

Viele Anwendungen für THz-Strahlung setzen eine breitbandige und leistungsstarke Quelle voraus. Mit entsprechenden Halbleitermaterialien, auf die ein Ultrakurzpulslaser fokussiert wird, gelingt die Erzeugung kurzer und damit breitbandiger elektromagnetischer Pulse mit Frequenzen im THz-Bereich. Die Anforderungen an die Wellenlänge des Lasers ergeben sich aus der Bandlücke des Halbleitermaterials. Mit Hilfe von Geräten, die als Herzstück kompakte Faserlasersysteme enthalten, die Pulse mit einer Dauer von weniger als 100 fs bei einer entsprechenden Leistung emittieren, wird THz-Strahlung für verschiedene Anwendungen bereitgestellt. Eine davon ist die Realisierung der Vision der Forscher des Fraunhofer IWS Dresden, verborgene Wandmalereien mit THz-Strahlung sichtbar zu machen. Vom Fraunhofer IPM Freiburg wurde für diese Applikation ein mobiles faserbasiertes THz-Zeitdomänenspektrometer aufgebaut. Die Wissenschaftler aus Dresden haben in Zusammenarbeit mit den Freiburgern die zerstörungsfreie Messmethode der THz-Zeitdomänenspektroskopie erfolgreich im Bereich Kunst- und Kulturgut getestet.

Hochleistungs-Femtosekunden-Faserlaser für die ultrapräzise Materialbearbeitung

Eine der treibenden Laser-Applikationen ist die Laser-Mikromaterialbearbeitung, d. h. Bohren, Schneiden oder Strukturieren verschiedenster Materialien mit höchster Präzision. Ein prominentes Beispiel ist das Bohren von Löchern mit hohem Aspektverhältnis in Metalle, wie sie in Einspritzdüsen von Dieselmotoren der neusten Generation eingesetzt werden. Es ist nachgewiesen, dass mit ultrakurzen Laserpulsen (Femtosekunden und wenige Pikosekunden) die Bearbeitungsergebnisse qualitativ hochwertiger sind als mit Nanosekunden-Laserpulsen, so dass auf eine Nachbearbeitung (z. B. chemisch) in den meisten Fällen verzichtet werden kann. Mit ns-Pulsen bearbeitete Metalle weisen typischerweise eine

unakzeptable Wärmeeinflusszone und Auswürfe geschmolzenen Materials auf. Die fehlende Nachbearbeitung führt bei den potentiellen Kunden zu Kosten- und Zeitersparnissen, die diese beim Kauf eines Lasersystems als sehr positiv bewerten werden. Zudem gilt: Eine Steigerung der Pulsfolgefrequenz übersetzt sich linear in eine Verkürzung der Bearbeitungsdauer und damit in eine wirtschaftlichere Anwendung der Technologie.

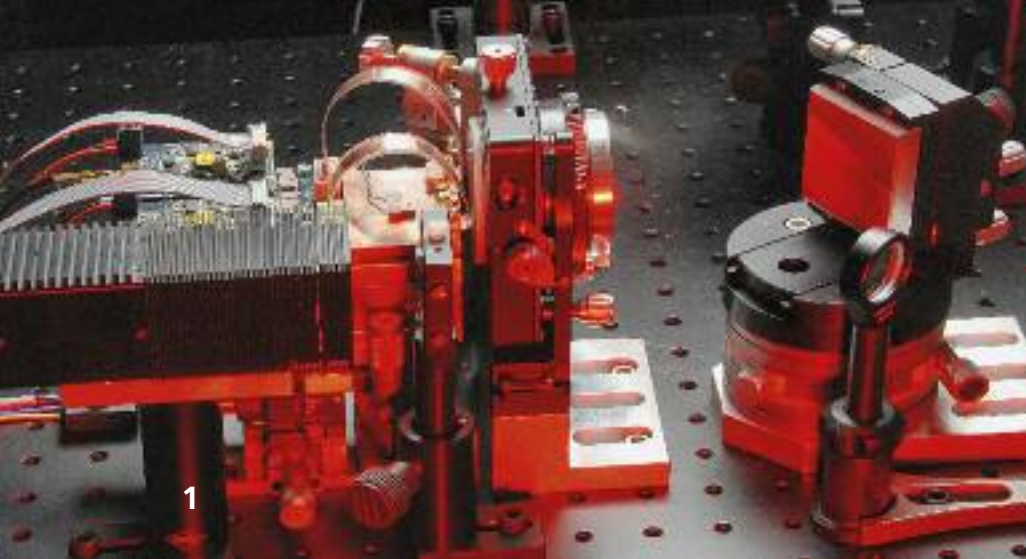
Dies ist unter Beibehalt der optimalen Bearbeitungsparameter (Pulsenergie, Spitzenintensität) nur durch eine Steigerung der mittleren Leistung erreichbar, welche den Einsatz innovativer Lasergeometrien zur Vermeidung thermo-optischer Probleme erfordert. Am Fraunhofer IOF Jena konnten in Kooperation mit dem IAP der Friedrich-Schiller-Universität Jena mit einem Faserlasersystem mit einer mittleren Leistung von > 50 W Löcher mit den für Einspritzdüsen notwendigen Dimensionen in weniger als einer Sekunde gebohrt werden. Konventionelle Lasersysteme benötigen für ein vergleichbares Bearbeitungsergebnis einige Minuten. Das hierzu entwickelte und in einen Prototypen überführte Femtosekunden Faser CPA System erreicht Pulsenergien von größer 100 μ J, mittlere Leistungen von mehr als 50 W, Pulsdauern kleiner 500 fs und frei wählbare Pulsfolgefrequenzen von 10 kHz bis 10 MHz.

Die Fraunhofer-Forscher aus Aachen leiten mit der Entwicklung eines 400 W Femtosekunden-Lasers auf Basis der InnoSlab-Technologie einen Paradigmenwechsel in der Herstellung kommerzieller Femtosekunden-Laser ein. Dies wurde möglich durch die Neuinterpretation der sogenannten InnoSlab-Technologie, die seit über 10 Jahren am Fraunhofer ILT entwickelt wird.

1 *Yb-InnoSlab-Ultrakurzpuls-Verstärker in Betrieb*

2 *Faserlasersystem*

3 *THz-TDS-Scan einer Gemäldeprobe*



Homogene Leistungsdichte durch optische Strahlformung

Damit ein Laser zu einem effizienten Werkzeug wird, ist eine ganze Reihe an komplizierten Schritten notwendig. Die im Strahl enthaltene Energie muss optimal geführt, gebündelt und geformt werden. Diese Aufgabe übernimmt die Optik. Linsen, Prismen, Spiegel und andere Elemente geben dem Laserstrahl seine Richtung, Form und Leistungsdichte. Im Fokus des Laserstrahls wird oftmals eine sehr homogene Leistungsdichte gefordert mit einem rechteckigen Strahlprofil, einer so genannten »Top-hat« Verteilung. Das Fraunhofer IOF hat eine neuartige Strahlformungsoptik entwickelt, mit der eine herausragend homogene Verteilung des Laserstrahls erzielt wird. Diese sogenannten cMLA Strahlhomogenisierer basieren auf irregulären Linsenarrays. Anders als bei den bisher genutzten regulären Arrays entstehen hier keine Interferenzen, die zu unerwünschten Intensitätsspitzen führen können. Wieder ein kleiner Schritt hin zum perfekten Laserlicht.

Wellenlänge nach Wunsch: kompakte Halbleiterlaser von 2 – 12 μm

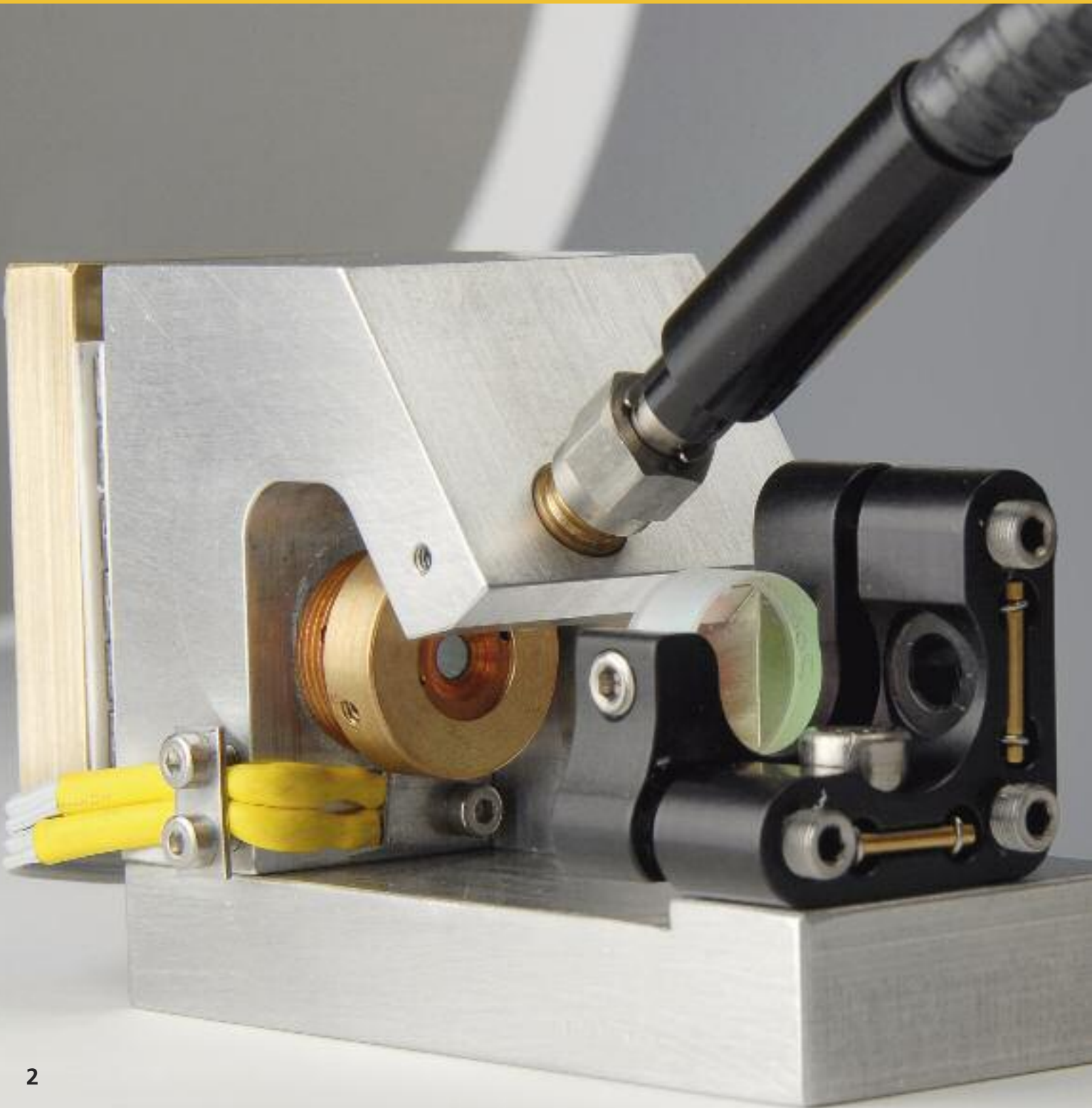
Halbleiterlaser für den nahen und mittleren infraroten Wellenlängenbereich (2 – 12 μm), wie sie am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg entwickelt werden, stellen eine neue Klasse kompakter Infrarot-Laserquellen dar. Dabei deckt das IAF die gesamte Entwicklungs- und Wertschöpfungskette von dem Entwurf der Laserstruktur über die Halbleiter-Epitaxie und -Chiptechnologie bis hin zur Aufbau- und Modultechnik ab. Anwendung finden diese Laserquellen in der medizinischen Therapie und Diagnostik, wie z. B. Endoskopie in mit Blut gefüllten Gefäßen, sowie in der Umwelt- und Produktionsmesstechnik. Ein neues, sich gerade entwickelndes Anwendungsgebiet stellt die Sicherheitstechnik dar, z. B. die Detektion von Gefahrstoffen.

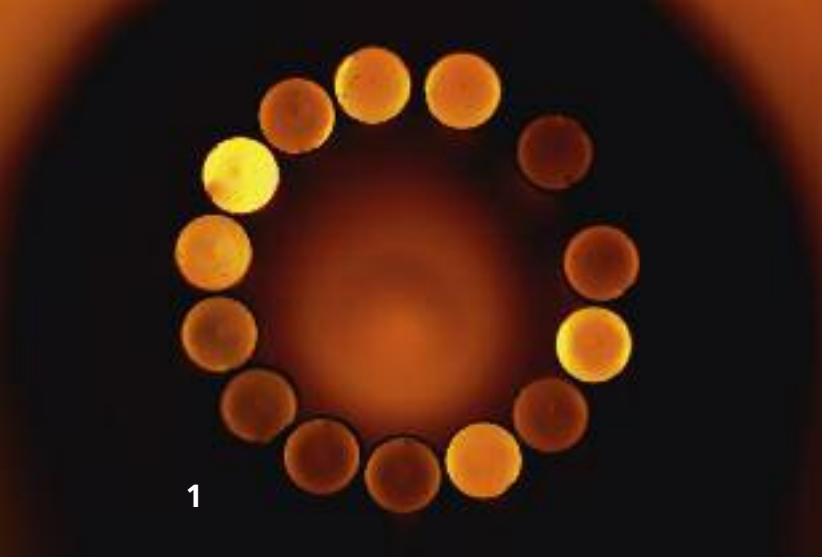
Verschiedene Halbleiterlaser – verschiedenste Anwendungen

Abhängig von den spezifischen Anforderungen bzgl. Laserwellenlänge, Ausgangsleistung und Strahlqualität kommt hierbei die Bauform des klassischen Diodenlasers, des optisch gepumpten Halbleiterscheibenlasers oder aber des Quantenkaskadenlasers zur Anwendung. Diodenlaser und Halbleiterscheibenlaser auf der Basis der Gruppe III-Antimonid Verbindungshalbleiter decken den Wellenlängenbereich von 2 μm bis ca. 3 μm ab. Dabei zeichnen sich die Diodenlaser in der Form von Leistungslaser-Barren durch eine für diesen Wellenlängenbereich hohe Ausgangsleistung von 20 W, bei allerdings reduzierter Strahlqualität, aus. Der Halbleiterscheibenlaser vereint in sich die Wellenlängenflexibilität eines Halbleiterlasers mit der sehr guten Strahlqualität eines Festkörperscheibenlasers. Die derzeit erreichbaren Ausgangsleistungen liegen bei mehreren Watt im Wellenlängenbereich um 2 μm .

Laserwellenlängen im Bereich von 3,5 bis ca. 12 μm können mit dem Quantenkaskadenlaser abgedeckt werden. Dessen Ausgangsleistung liegt derzeit im Bereich von einigen 100 mW bis > 1 W. Durch geeignete Strahlvereinigungsverfahren können noch höhere Ausgangsleistungen bei gleichzeitiger Erhaltung einer guten Strahlqualität realisiert werden, wie jüngst am Fraunhofer IAF demonstriert. Eine weitere Entwicklungslinie am Fraunhofer IAF stellen spektral breit abstimmbare Quantenkaskadenlaser-Module für die spektroskopische Sensorik dar. Insgesamt eröffnen die jüngst auf dem Gebiet der Infrarot-Halbleiterlaser und Lasermodule erzielten Fortschritte eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten und Problemlösungen in den oben genannten Anwendungsgebieten.

- 1 *Quantenkaskadenlaser (QCL) mit externem Resonator zur Strahlvereinigung*
- 2 *Kompaktes Halbleiter-Scheibenlaser-Modul bei 2.3 μm Wellenlänge*





FORSCHUNGSSCHWERPUNKT FASERLASER

Momentan bahnt sich bei den Laserquellen ein Technologiesprung an. Faserlaser bieten im Vergleich zu konventionellen Technologien gewaltige Einsparpotenziale und generieren immer neue Anwendungen. Neben dem hohen Wirkungsgrad sind es vor allem die thermische und mechanische Stabilität, die geringe Baugröße und die Skalierbarkeit, die Faserlaser so attraktiv für die Fertigung machen. Sei es Markieren, Beschriften, Materialabtragen, Strukturieren oder auch das Schweißen, in sämtlichen Bereichen bieten Faserlaser die gewünschten Leistungen und Strahlqualitäten. Eine Besonderheit in der Geschichte der Lasertechnik.

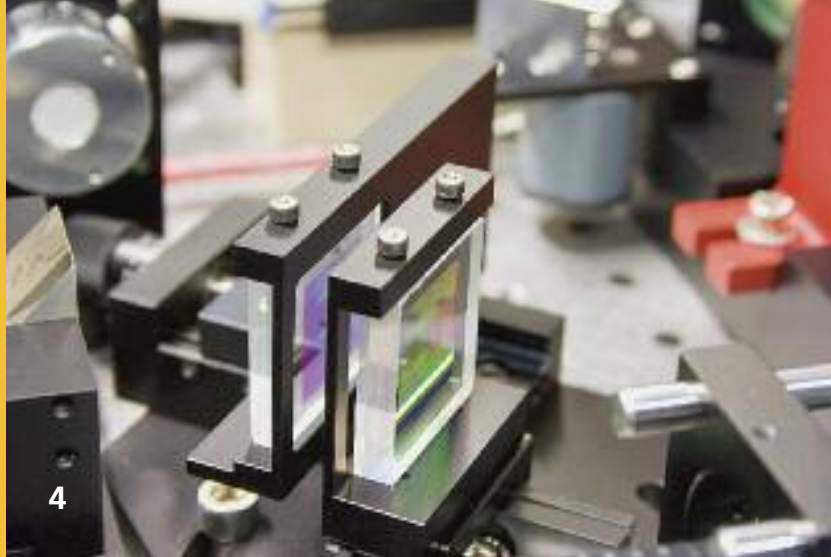
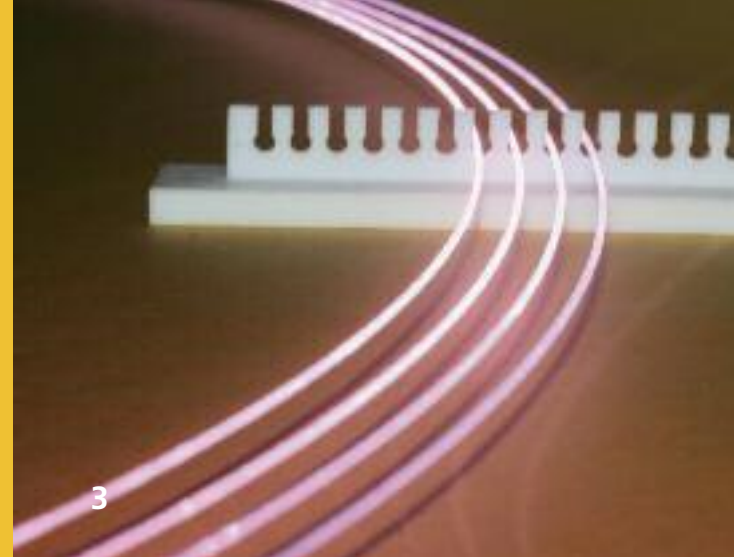
Interdisziplinäre Fraunhofer-Forschung

In dem Fraunhofer-internen Projekt »Faserlasersysteme hoher Leistung für die moderne Fertigungs- und Messtechnik« wurden durch die Fraunhofer-Institute IPM, ILT, IWS und IOF die physikalisch-technischen Grundlagen für den Aufbau von diodengepumpten Faserlasern mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bei Ausgangsleistungen im Multi-Kilowatt-Bereich geschaffen. Ziel dieses Forschungsprojektes war es, das Leistungsangebot der Fraunhofer-Institute auf dem Gebiet der Entwicklung kompletter langzeitstabiler Faserlasersysteme zu bündeln und eine neue Lasergeneration inklusive der frühzeitigen Evaluierung von neuen technologische Anwendungen anzubieten.

Die Komplexität der Technologie erfordert eine starke interdisziplinäre Zusammenarbeit von Forschergruppen mit Kernkompetenzen in den Bereichen Laserphysik, Optik, Mechanik, Materialwissenschaft und Fertigungstechnik.

Im Ergebnis wurden Konzepte für neuartige Faserlaser mit bisher nicht zur Verfügung stehenden höchsten Leistungsdichten erarbeitet. Die Verknüpfung des Faserlasers mit innovativen Bearbeitungsoptiken ermöglicht den Instituten mit breiter Kompetenz das industrielle Potenzial der Applikationen von Materialbearbeitung und Messtechnik auszuschöpfen. Die im Rahmen des Projektes angearbeiteten Technologien werden derzeit im Rahmen von verschiedenen öffentlich geförderten und Industrieprojekten weitergeführt.

Schwerpunkt aktueller Arbeiten sind die Entwicklung von faserintegrierten Komponenten, z. B. Modulatoren, Isolatoren, Strahlteilern und Strahlschaltern sowie die Erweiterung der Parameterbereiche hinsichtlich der Erzeugung hoher Pulsleistungen oder polarisierter Strahlung. Weitere Arbeiten betreffen die Entwicklung faserbasierter Strahlquellen mit weitgehend frei einstellbarer zeitlicher Pulsform.



Neuartige Faserdesigns

Mit Hilfe neuartiger Laserfasern ist eine Skalierung der Leistung in gepulsten und kontinuierlich emittierenden Faserlasersystemen möglich. Hierzu muss die Faser selbst hinsichtlich ihrer optischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften auf das Lasersystem optimiert werden. Spezielle photonische Kristallfasern für Laseranwendungen sind Gegenstand der Forschung des Fraunhofer IOF. Mit Hilfe dieser Fasern wurde mehrere Lasersystemprototypen entwickelt und zu Anwendungsuntersuchungen u. a. dem Fraunhofer IWS Dresden bereitgestellt. Neben dem Design und der experimentellen Evaluierung wurde hierzu auch die Präparation und Komponentenentwicklung (z. B. Cleaven, Laserspleißen, Hochleistungsfaserstecker) für solche Spezialfasern vorangetrieben.

Komponenten für Hochleistungsfaserlaser

Die Entwicklung von Hochleistungsfaserlasersystemen setzt entsprechende Spezialkomponenten optimiert hinsichtlich optischer Leistungstauglichkeit, Effizienz sowie dem thermischen Management voraus. Am Fraunhofer IOF Jena wurden für verschiedene gepulste und kontinuierliche Faserlasersysteme hierfür verschiedene Vorrichtungen, Prozesse und Komponenten entwickelt. Um die Zerstörschwelle beim Austritt des Lichtes aus der Faser zu minimieren, wurde ein Laserspleißverfahren für das Verbinden der Faserendfläche mit Quarzglasblöcken etabliert. Die so präparierten Fasern werden weiterhin in wassergekühlten Hochleistungssteckern benutzt. Andere Systemkomponenten, wie hocheffiziente dielektrische Gitter zur Strahlkombination oder Kompression ultrakurzer Pulse, werden ebenfalls für die nächste Generation von Lasersystemen am Fraunhofer IOF hergestellt und weiterentwickelt.

Spektrale Kombination mehrerer Faserlaser

Hochleistungsfaserlaser mit mehreren Kilowatt Ausgangsleistung und beugungsbegrenzter Strahlqualität sind heutzutage kommerziell verfügbar und adressieren immer mehr Anwendungen speziell in der Materialbearbeitung. Die Kombination von mehreren Strahlen (Kanäle) zu einem nahezu beugungsbegrenzten Strahl ist Forschungsgegenstand der Wissenschaftler des Fraunhofer IOF Jena. Hierzu wurden vier Faserverstärker mit einer Ausgangsleistung von 500 W und schmalbandiger Emission spektral-geometrisch kombiniert. Die vier Ausgangsstrahlen wurden mit Hilfe eines hocheffizienten dielektrischen polarisationsunabhängigen Gitters, welches zusammen mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität hergestellt wurde, mit einer Effizienz von 99 % zu einem nahezu beugungsbegrenzten Strahl mit 2 kW Leistung kombiniert. Der gewählte Ansatz weist ein signifikantes Skalierungspotenzial für mehrere 10 kW auf.

- 1 *Pumpkoppler für Faserlaser*
- 2 *Wassergekühlte Laser-Faser*
- 3 *Faserlaser*
- 4 *Pulskompressionsgitter*



LASER UND LASERSYSTEME FÜR FORSCHUNG UND INDUSTRIE

Laser ermöglichen die Erzeugung von Strahlung in einem äußerst großen Zeit-, Spektral-, und Leistungsbereich und damit Applikationen in unterschiedlichsten Feldern. Die Mitglieder des Verbundes Light & Surfaces konnten ihre Kompetenzen im Bereich der Entwicklung applikationsspezifischer Strahlquellen und Systeme in verschiedenen Projekten demonstrieren. Im Folgenden werden einige Beispiele genannt.

Laserbelichter für Langzeitarchivierung

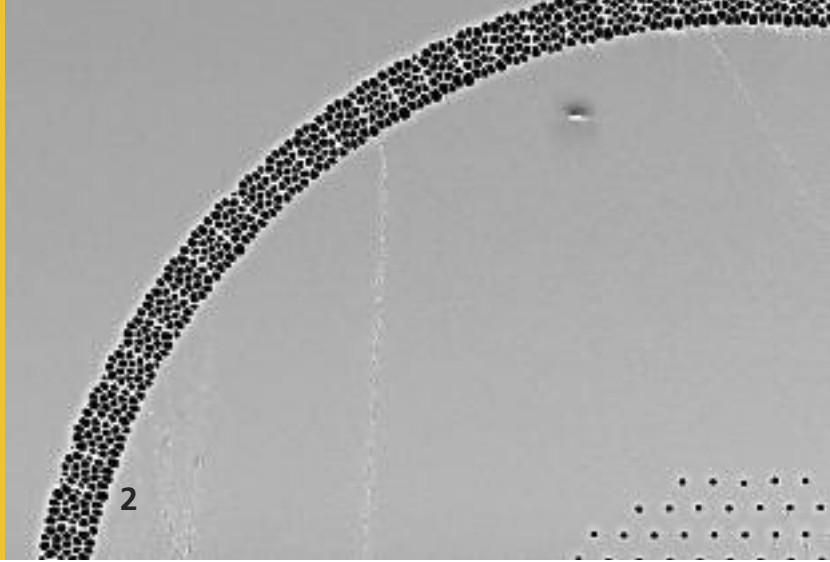
Der tragische Einsturz des Kölner Stadtarchivs verdeutlicht: Die Langzeitarchivierung von Kulturgütern ist eine unterschätzte Notwendigkeit. Da die digitale Datenspeicherung mit hohen Risiken verbunden ist, greifen Archive auch heute noch auf schwarz-weißen Mikrofilm zurück, wenn es darum geht, Archivgut dauerhaft zu sichern. Bei Totalverlust des Originals ist mit dem s/w Medium eine originalgetreue, farbechte Rekonstruktion allerdings nicht möglich.

Ein vom Fraunhofer IPM Freiburg entwickelter Laserbelichter ermöglicht erstmals eine sichere Langzeitarchivierung originalgetreuer Kopien auf Farbmikrofilm. Der Farbmikrofilmbelichter besteht aus drei Festkörperlaser (rot, grün, blau), Modulatoren, luftgelagertem Drehscanner und hochwertigem Abbildungsobjektiv. Ein schneller Drehscanner bewegt die Laserstrahlen senkrecht zum Film und belichtet dabei jeweils eine Zeile. Durch einen langsamen Vorschub des Films wird somit Zeile für Zeile belichtet, so dass in 45 Sekunden ein Bild bestehend aus 15 000 Zeilen ausbelichtet ist. Neben der Langzeitarchivierung werden Laserbelichtungsverfahren in der

Leiterplattentechnologie, Medizintechnik, Foto- und Filmindustrie und Sicherheitstechnologie eingesetzt.

Hochleistungslaser für die Erzeugung von XUV Strahlung

Strahlung ultrakurzer Wellenlängen im Bereich von einigen nm (also im XUV Spektralbereich) wird für die Analyse von Strukturen in der Halbleiterlithografie und für die Untersuchung biologischer Proben mit optischen Verfahren eingesetzt. Laserbasierte Quellen können die derzeit üblichen Beschleuniger ersetzen und ermöglichen damit den Transfer der Nanophotonik in Labor und Industrie. Die Erzeugung von XUV Strahlung mittels Laser angeregter Plasmen erfordert intensive Laserpulse mit Pulsdauern um 1 ns und Pulsleistungen im 100 MW Bereich. Das Fraunhofer ILT hat für Kunden aus Industrie und Grundlagenforschung bereits Laser geliefert und aufgebaut, die Pulse mit einstellbarer Pulsdauer und mittleren Leistungen im Bereich mehrerer 100 W erzeugen.



Laser für die Atmosphärenforschung

Die globale Messung klimarelevanter Spurengase bekommt durch die aktuelle Entwicklung des Weltklimas eine zunehmende Bedeutung. Derzeit gibt es keine ausreichenden Daten zur Verteilung klimarelevanter Spurengase wie CO₂, Methan und Wasserdampf in der Atmosphäre.

Mit der LIDAR Technologie steht ein Messverfahren zur Verfügung, das diese Daten grundsätzlich bereitstellen kann. Das Fraunhofer ILT hat in Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung eine neuartige Hochleistungslaser-Plattform entwickelt, die eine erhebliche Steigerung von Effizienz, Kompaktheit und Zuverlässigkeit ermöglicht. Weiterhin erlaubt diese flexible Plattform die direkte Erzeugung der geforderten Wellenlängen ohne aufwändige Frequenzkonverter mittels sogenannter Mixed Garnet Kristalle.

Hochintensitätslaser für die Strahlentherapie

Das Fraunhofer IOF arbeitet gemeinsam mit Wissenschaftlern des Instituts für Angewandte Physik und des Instituts für Optik und Quantenelektronik der Friedrich-Schiller-Universität Jena sowie Forschern der TU Dresden und des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf im Rahmen des vom BMBF im Programm »Unternehmen Region« geförderten Projekts »onCOOPTics« an einem europaweit einmaligen Projekt zur Weiterentwicklung von Hochleistungslasern, um eine neue Qualität bei der Krebstherapie zu erreichen. Die neuen Hochleistungslaser werden eingesetzt, um z. B. Protonen- und Ionenstrahlen zu erzeugen, die eine schonendere und effektivere Krebstherapie erlauben. Das Projekt zeichnet sich durch ein besonders hohes Zukunftspotenzial sowohl technisch als auch medizinisch aus.

Gemeinsam bearbeiten die Forscher Fragestellungen im Bereich der physikalisch-technischen Grundlagen auf dem Gebiet der Lasertechnik sowie zur Wechselwirkung von Teilchenstrahlen mit Gewebe.

1 *Farbmikrofilmbelichter*

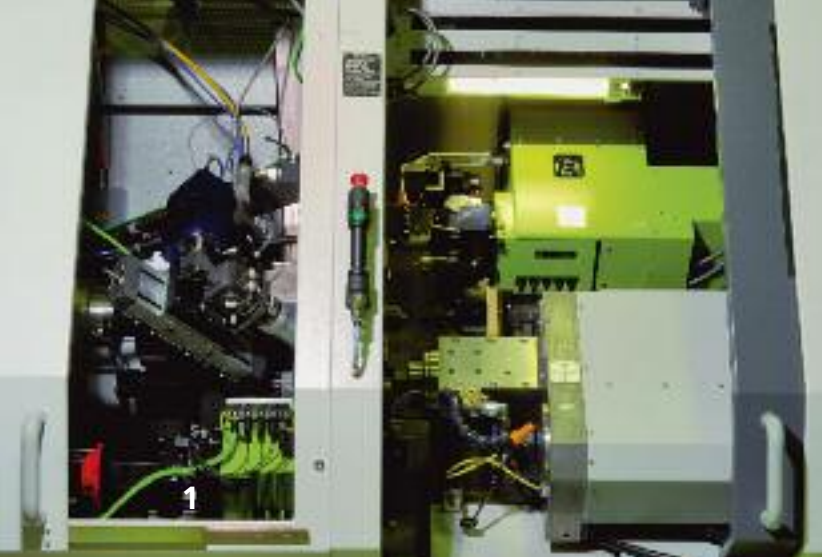
2 *Photonische Kristallfaser*



ENTWICKLUNG VON ANLAGENTECHNIK UND LASERINTEGRATION

Mit den modernen Lasern und optimierten Optiken oder Strahlablensystemen lassen sich neue Anwendungsfelder erschließen und bestehende Automatisierungslösungen noch effizienter gestalten. Der Laser eignet sich in fast allen Verfahrensgruppen zur Integration in herkömmliche Fertigungsabläufe und damit zur Prozesskettenoptimierung. Durch die Integration eines Lasers in eine Maschine oder in eine Fertigungsprozesskette lassen sich Taktzeiten oftmals deutlich verkürzen. Neueste Entwicklungen machen vor keinem Verfahren und vor keinem Material Halt. Die Art und Weise der Integration der Lasertechnologie hängt dabei von den Prozesserfordernissen und den produktionstechnischen Rahmenbedingungen ab und kann sehr unterschiedlich erfolgen.

Der Übergang von Forschung und Entwicklung zu konkretem Design und Bau von Komponenten, Systemen und Aggregaten ist fließend. Von der ersten Machbarkeitsstudie bis hin zur Fertigung von Vorserien auf eigenen Maschinen reicht das Spektrum der Fraunhofer-Institute. Langjährige Industriekooperationen und erfolgreich durchgeführte Projekte beweisen die erfolgreiche Zusammenarbeit bei Anwendungen in den unterschiedlichsten Branchen. Interdisziplinäre Teams von Maschinenbauingenieuren, Elektroingenieuren, Physikern und Informatikern, Techniker und Facharbeiter nutzen die umfangreichen Ressourcen der Institute zur Erschließung innovativer Bearbeitungskonzepte für Einzelteilfertigung bis hin zur Serie.



Prozesskettenverkürzung durch integriertes Laserstrahlhärten in Drehmaschinen

Das Laserstrahlhärten hat sich ergänzend zu klassischen Härteverfahren als Verfahren zum Härten lokal beanspruchter Bauteile etabliert. Wie viele andere Wärmebehandlungsverfahren wurde es bisher vorwiegend als außen stehender Prozessschritt in einer Fertigung behandelt. Um Zeit und Kosten zu reduzieren, wollen viele Produzenten einen möglichst kontinuierlichen Teilefluss ohne zusätzliche Logistik und Lagerhaltung.

Anfang 2008 wurden deshalb in direkter Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer IWS Dresden und einem Drehmaschinenhersteller mehrere Werkzeugmaschinen mit integriertem Hochleistungslaser in Betrieb genommen. Die Anlagen kommen bei der Herstellung von Hydraulikkomponenten zum Einsatz. Im Vergleich zur Taktzeit der mechanischen Fertigung von etwa 50 Sekunden beträgt die reine Härtezeit in diesem Fall nur etwa 3 – 4 Sekunden. Ein fasergekoppelter Hochleistungsdiodenlaser bedient drei Anlagen sequenziell. Eine intelligente Weichensteuerung vergibt prioritätsbezogen den Strahl auf die Anlagen. In den Drehmaschinen erfolgen die Weichbearbeitung, das Härten und die Hartbearbeitung als abschließender Prozessschritt. Die Laseroptik ist dabei in einem geschützten Bereich im Antriebsraum der Maschine untergebracht. Da die Maschine eine Zweispindelanlage ist, wird fast während des gesamten Laserprozesses auf der Hauptspindel weiter gearbeitet. Durch druckluftgespülte Strahlengänge und Prozesskammern ist gesichert, dass der Laserprozess sicher während der laufenden Nasszerspannung ablaufen kann.

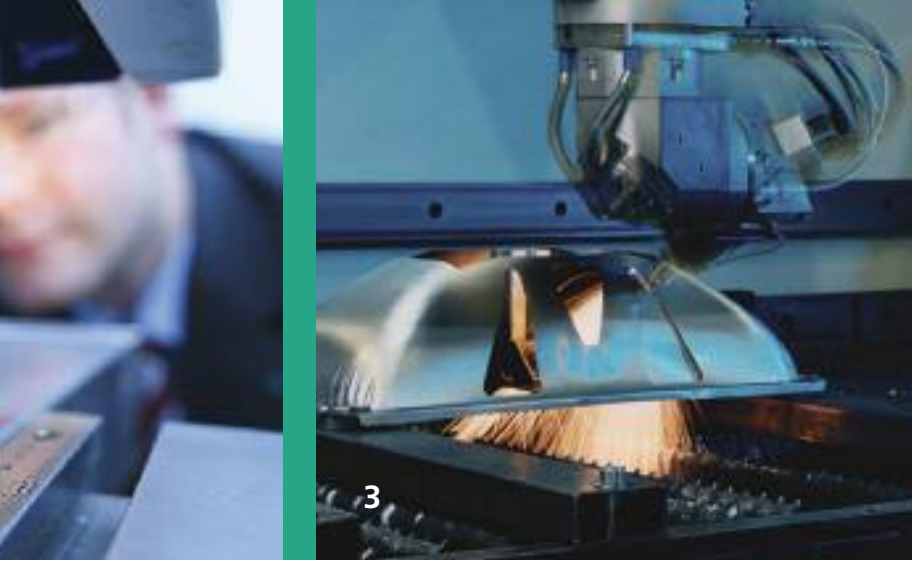
Betrag der Materialdurchlauf von der Stange Rohmaterial bis zum fertigen Ventil vorher 20 Stunden, konnte er jetzt auf 20 Minuten reduziert werden.

Roboterbasierte Laseranlagen zum Härten und Auftragschweißen

In Zusammenarbeit mit Industriepartnern hat das Fraunhofer IWS bereits zahlreiche roboterbasierte Laserhärteanlagen in die Fertigung überführt. Die hohe Flexibilität der Roboter bietet auch die Möglichkeit zur Integration des Laserauftragschweißens mit unterschiedlichen Pulverdüsenskonfigurationen. Mit den überführten Anlagen werden z. B. Werkzeuge für den Karosseriebau gehärtet oder Schiffs-, Kraftwerks- oder Turbinenkomponenten repariert. Das Fraunhofer IWS unterstützt bei der Technologieentwicklung und liefert spezielle Sonderkomponenten. Ergänzt werden die Systeme wahlweise durch Zusatz-Module wie z. B. lasertronic® LompocPro zur Laserleistungsregelung, »E-MAqS«-Pyrometer zur Temperaturerfassung und DCAM zur off-line-Programmierung.

Multifunktionale Laserfertigungszelle für das kombinierte 3D-Schneiden und -Schweißen

Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT hat im Rahmen des InnoNet Projekts »Flexible Fertigungszelle zur kombinierten Laserbearbeitung mit adaptiver Greiftechnik (koLas)« gemeinsam mit Partnern aus der Industrie einen Kombikopf für Laseranlagen mit integrierter Strahlführung entwickelt. Die im Roboterarm verlaufende Spiegel-Strahlführung ermöglicht eine Bewegung in zwei rotatorischen Achsen, ohne die weiter oberhalb installierte Lichtleitfaser mechanisch zu belasten. Der Kopf ist mit der optischen Maschinenachse über einen coaxialen Anschlussflansch verbunden und verfügt über eine kompakte Zusatzachse. Die Aachener Forscher haben den Kopf auch durch die Verkürzung seiner Baulänge hinsichtlich seiner Fähigkeit zur dynamischen Umlagerung bei 3-D-Bahnen optimiert. Zudem wurde das Düsendesign für eine gute Bauteilzugänglichkeit durch die Verringerung des Kegelwinkels der autonomen Düse von 60° auf 40° weiter verbessert. Im Kopf sind ein kapazitiver Abstandssensor und eine dynamische Zusatzachse zur Abstandsregelung integriert. Die Steuerung zeigt



bereits während der Bearbeitung an, ob die vorher definierte Abstandstoleranz tatsächlich von der Regelung eingehalten wird. Der Kombikopf ist so konstruiert, dass sowohl die Fokussieroptik als auch das Schutzglas schnell ausgewechselt und so eine komfortable Wartung durchgeführt werden kann. Beim Schneiden und Schweißen von 3-D-Automobilkomponenten konnte die Praxistauglichkeit des Kombikopfes bereits unter Beweis gestellt werden.

Laserunterstütztes Scherschneiden von hochfesten Blechwerkstoffen

Die Umsetzung des laserunterstützten Scherschneidverfahrens erforderte die Laserintegration in eine Stanzmaschine. Am Fraunhofer IPT Aachen wurde ein entsprechender Stanzmaschinenprüfstand, basierend auf einer Stanz-/Nibbelmaschine mit 280 kN Kraftvermögen entwickelt und aufgebaut. Die Laserintegration bezieht sich ausschließlich auf den Auswurfkanal unterhalb der Schneidplatte (Matrize). Dadurch wird zum Einen der automatisierte Werkzeugwechsel von Schneidstempeln und zugehörigen Matrizen für eine flexible Blechbearbeitung in einer Aufspannung nicht negativ von der Laserintegration beeinflusst. Zum Anderen müssen Stanzwerkzeug und Matrize dadurch nicht nach jedem reproduzierbaren Werkzeugwechsel erneut relativ zum Laserstrahl ausgerichtet werden. Darüber hinaus ermöglicht die Modularität der Laserintegration das Aufrüsten von vorhandenen Stanz-/Nibbelmaschinen mit der neuen Verfahrenstechnologie, ohne dass eine komplette Neukonstruktion erforderlich ist.

Lediglich die Baugruppen unterhalb der Matrizenaufnahme müssen für die Laserintegration angepasst werden, um die Laserbearbeitungsoptiken sowie eine Schutzaktorik, welche die Laseroptiken vor der Kontamination mit Schmutzpartikeln und vor den herabfallenden Stanzbutzen schützt, integrieren zu können. Ausgehend von einer externen 2 kW Hochleistungsdiodenlaserquelle wird die Laserstrahlung durch eine flexible Lichtleitfaser zur Laserbearbeitungsoptik geleitet und von dieser als Laserbrennfleck auf der Blechunterseite abgebildet.

Im Rahmen des InnoNet-Projekts »Hybrid-Punch« erfolgt derzeit die Entwicklung eines modularen Laserbearbeitungskopfs, der geometrieflexible Laserbrennfleck-Konturen auf der Blechunterseite realisieren kann und über eine temperaturbasierte Laserleistungsregelung verfügt. Dadurch kann die Laserstrahlung zukünftig flexibel an die Schneidkontur angepasst werden.

- 1 *Drehmaschine mit integrierter Laseroptik im Antriebsraum*
- 2 *Laserunterstütztes Stanzen*
- 3 *3D-Präzisionsschneiden mit Laserstrahl*



Durchgängige Prozessketten im Werkzeugbau Fräsen – Schleifen und Polieren – Strukturieren

Zur Herstellung großflächiger Mikrostrukturen auf frei geformten Werkzeugoberflächen hat das Fraunhofer IPT eine modulare Fertigungszelle für das nachbearbeitungsfreie Laserstrukturieren aufgebaut. Den Grundträger für den Prototypen bildet eine konventionelle 5-Achs-HSC-Maschine, die mit einem Lasermodul und einer durchgängigen CAD/CAM-Kopplung ausgestattet wurde. Die Daten werden so verarbeitet und aufbereitet, dass sie konturnah und verzerrungsfrei auf die gewünschten Oberflächen übertragen werden können. Zur Programmierung dient ein handelsübliches CAM-System, die Daten werden im ISO-NC-Code verarbeitet. Die eigens für das System entwickelte Steuerungserweiterung gewährleistet eine automatisierte, nachbearbeitungsfreie Strukturherstellung auf der Basis des 3D-Laserstrukturierens.

TWIST®-Desktop-Kunststoffschweißmaschine

Die faserlaserbasierte TWIST®-Laserschweißtechnik für Kunststoffe benötigt im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffschweißverfahren lediglich Laserleistungen von 10 – 20 W. Darüber hinaus erlaubt die hohe Strahlqualität der eingesetzten Faserlaser kleine Scanner und ultrakompakte Bearbeitungsoptiken. Beides zusammen erlaubt die Integration aller notwendigen Maschinenkomponenten zum Laserstrahl-Kunststoffschweißen in ein kompaktes Tischgerät, das an jede Steckdose angeschlossen werden kann. Das Fraunhofer ILT hat hierzu ein kostengünstiges und flexibles Maschinenkonzept realisiert, das durch kundenspezifische Vorrichtungen an die jeweilige Applikation angepasst werden kann.

Maschinenteknik zum formschlüssigen Fügen artungleicher Werkstoffe

Mit dem am Fraunhofer ILT entwickelten LIFTEC®-Verfahren steht eine neue Verfahrenstechnik für die Verbindung von Kunststoffen mit anderen artungleichen Werkstoffen zur Verfügung. Bei diesem Verfahren wird durch einen Kunststoffkörper hindurch der Fügepartner (z. B. Metall) erwärmt und durch Druck in den Kunststoffkörper gepresst. Der über Wärmeleitung erhitzte Kunststoff umfließt den Fügepartner, so dass nach Abkühlung eine formschlüssige Verbindung entsteht. Für die industrielle Umsetzung des Verfahrens wurde eine Maschine entwickelt, mit der der Laserstrahl durch ein Quasi-Simultan-Bestrahlungsverfahren an unterschiedliche Geometrien angepasst werden kann. Über eine schnelle Greiftechnik sowie integrierte Bauteilerfassung- und Prozesskontrollsysteme kann das System in automatisierte Montagelinien integriert werden.

Laseranlage zum Schneiden von Airbagteilen

Das Remote-Laserschneiden »on the fly« ermöglicht die Umsetzung des Sublimations-Schneidprozesses auf beliebige Schneidkonturgrößen und Materialbreiten. Durch die Kopplung von Achssystemen mit unterschiedlichen dynamischen und maschinentechnischen Kenngrößen können Produktivitätssteigerungen erzielt werden, die die Lasertechnik in vielen Bereichen konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Trennverfahren wie Stanzen oder mechanisches Scheren werden lässt. So entstand eine neue Generation von kompakten, flexiblen und hochproduktiven Airbag-Laserschneidanlagen. Auf der vom Fraunhofer IWS in Kooperation mit einem Industriepartner entwickelten Laseranlage können bis zu 2,5 m breite Gewebe bei Materialdurchlaufgeschwindigkeiten von bis zu 20 m min⁻¹ mit Genauigkeiten von 0,5 mm geschnitten werden.

3



Flexible Montagezelle mit automatisierten Laserfügeverfahren

Um auch bei Kleinserien reproduzierbare Produktionsergebnisse liefern und kostengünstig produzieren zu können, ist eine weitgehende Automatisierung von Montage- und Fertigungsprozessen nötig. Die innovative INTAKT-Bearbeitungszelle des Fraunhofer ILT ermöglicht durch ihren modularen Aufbau die flexible Integration unterschiedlicher Prozesse wie Laserstrahlschweißen und Laserstrahlbohren in einer teilautomatisierten Anlage. Dabei stehen die schnelle Umkonfigurierbarkeit der Prozessmodule und die Einbindung innovativer Bildverarbeitungsverfahren zur Reduzierung des Vorrichtungsbau im Vordergrund. Das Laserstrahlschweißen von Metallen und Kunststoffen wird in der Anlage mit einem 200 W-Faserlaser und einer Kombination aus Galvanometerscanner und einem kartesischen Achssystem realisiert. Dieses System vereint die Vorteile der schnellen Strahlbewegung mit einem großen Bearbeitungsfeld auf einem Werkstückträger mit den Abmessungen 240 x 240 mm². Mit dem Faserlaser können Punkt- und Linienschweißungen, sowie SHADOW®-Mikro-ring-Verbindungen bei Prozesszeiten von wenigen Millisekunden umgesetzt werden, um sowohl Kleinserien wirtschaftlich zu fertigen als auch Großserienprozesse unter seriennahen Bedingungen zu qualifizieren.

Laserunterstütztes Tapelegen

Die Erschließung des enormen weiteren Wachstumspotenzials für den Einsatz von Bauteilen aus Faserverbundkunststoff (FVK) wird seitens der Industrie gefordert, jedoch aufgrund der hohen Produktionskosten und der langen Prozesszykluszeiten derzeit deutlich gehemmt. Die laserunterstützte Verarbeitung von thermoplastischen Faserverbund-Halbzeugen bietet hinsichtlich der Recyclingfähigkeit, der guten Automatisierbarkeit und der energieeffizienten Produktion ein herausragendes technologisches und wirtschaftliches Potenzial für die Großserienproduktion von FVK-Bauteilen. Aus diesen Gründen wurde am Fraunhofer IPT die laserunterstützte Verarbeitung von thermoplastischen kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) entwickelt. Hierbei zeichnen sich die CFK-Faserverbund-Halbzeuge – sogenannte »thermoplastische CFK-Prepregs« – dadurch aus, dass die Endlos-Verstärkungsfasern bereits mit einer erstarrten thermoplastischen aufschmelzbaren Kunststoffmatrix umgeben sind. Diese Prepregs können somit in Form von Prepreg-Bändern (Tapes) zu Bauteilen aufgebaut werden, indem sie übereinander abgelegt oder abgewickelt werden. Nachträgliche zeitintensive Vernetzungsschritte, z. B. im Autoklaven, sind hierbei nicht erforderlich, da kurz vor dem Kontakt zwischen den Bändern die thermoplastische Matrix lokal durch Absorption von Diodenlaserstrahlung angeschmolzen und anschließend mit den zuvor abgelegten Lagen stoffschlüssig gefügt wird.

- 1 *Laseranlage zum Schneiden von Airbagteilen*
- 2 *Seitenairbag eines VW Passat*
- 3 *Laserstrahlschweißen von Kunststoffen mit der TWIST®-Desktop-Kunststoffschweißmaschine*



Laserstrahlschweißen im Bereich Powertrain

Der durch stetige Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Laserstrahltechnologie in den letzten Jahren erreichte Stand der Technik hat dazu beigetragen, das Laserstrahlschweißen zu einem der wirtschaftlichsten und energieeffizientesten Fügeverfahren zu etablieren. Die sehr hohe Leistungsdichte des Laserstrahls als Bearbeitungswerkzeug ermöglicht es, auch Bauteile aus bereits gehärteten Stählen verzugsfrei und mit hohen Schweißgeschwindigkeiten zu fügen. Aufgrund der einfachen Automatisierbarkeit ist dies in höchstem Maß für die durch Massenproduktion gekennzeichnete Automobilindustrie interessant.

Mit der Entwicklung von neuen Lasern mit höheren Strahlqualitäten und Leistungsdichten konnten die Grenzen beim Schweißen schwer schweißbarer Stähle deutlich erweitert werden. Einen neuen Schub brachten die vom Fraunhofer IWS vorangetriebenen Entwicklungen zur gezielten Bauteilbeeinflussung durch angepasste Wärmeführung und schweißmetallurgische Einflussnahme während des Laserstrahlschweißprozesses. Für diese Entwicklungen stehen zwei Technologien – zum einen das Laserinduktionsschweißen mit einem in den Schweißprozess integrierten, lokalen induktiven Wärmeeintrag und zum anderen das Laserstrahlschweißen mit werkstoffangepasstem Schweißzusatzwerkstoff. Während erstes geeignet ist, niedrig- und unlegierte Vergütungsstähle bis zum eutektoiden Kohlenstoffgehalt effektiv rissfrei zu schweißen, ermöglicht die zweite Entwicklung in Kombination mit einer spezifischen Schweißnahtvorbereitung, angepassten Steifigkeitsverhältnissen und optimierten Laserstrahlparametern fehlerfreie Schweißverbindungen mit Gusseisen.

Die Flexibilität des Lasers erlaubt es, zum Reinigen und nachfolgenden Schweißen, den gleichen Laser zu verwenden. Da der Laserstrahl mit Hilfe der Scanner-Technik leicht und mit hoher Frequenz fast beliebig abgelenkt werden kann, ist es möglich, sehr komplexe Bauteiloberflächen selektiv und automatisiert zu reinigen. Die im Fertigungsprozess auf Bauteilen durchaus erwünschten Konservierungsschichten werden dadurch nur in der unmittelbaren Fügezone entfernt. Energie- und medienintensive Waschprozesse können dadurch teilweise oder ganz entfallen.

Insgesamt 14 Anlagen mit IWS-Technologie zum Laserstrahlschweißen bzw. Laserinduktionsschweißen wurden bis Ende 2008 erfolgreich in die industrielle Praxis überführt.



Exzellenzcluster »Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer«

Die Fraunhofer-Institute ILT und IPT beteiligen sich an einem Exzellenzcluster, welches das Ziel verfolgt, aus der Produktionstechnik heraus Beiträge zur Erhaltung arbeitsmarktrelevanter Produktion in Hochlohnländern zu liefern. Volkswirtschaftlich relevant sind dabei Produkte, die nicht nur Nischenmärkte sondern Volumenmärkte adressieren. Langfristige Zielstellung ist die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Produktionstechnik.

Zu den Projekten gehören die Entwicklung einer selbstoptimierenden Laserschneidmaschine, die Steigerung der Aufbau- und Verbesserrate und Verbesserung der Oberflächenqualität beim Selektiven Laser Melting sowie die Entwicklung eines hybriden Bearbeitungszentrums. Hybridisierung eines Fräsbearbeitungszentrums heißt, dass der Hauptprozess der Fräsbearbeitung mit mehreren Laserprozessen ergänzt wird. Ein Bearbeitungskopf erlaubt drahtbasiertes Auftragschweißen, Härten und Abtragen. Die zweite Einheit besteht aus einem Kurzpulslaser und einem Scanner zum Laserstrukturieren. Hybride Produktionssysteme entwickelt das ILT auch mit Partnern mit dem laserstrahlgestützten Prägen von Mikro- und Nanostrukturen in Kunststoffen.

Die Montage von Lasersystemen ist zurzeit noch durch ein hohes Maß an manuellen Vorgängen gekennzeichnet, die eine wettbewerbsfähige Produktion in Deutschland und Europa erschweren. Die Fraunhofer-Institute aus Aachen wirken aus diesem Grund an der Realisierung eines hochflexiblen roboter-basierten Montagesystems für miniaturisierte Festkörperlaser mit.

Laserintegration in die Fertigungstechnik – »Initiative LiFt«

Sachsens Potenziale des Maschinen- und Anlagenbaus durch die Lasertechnik nachhaltig und flächendeckend erweitern und Wettbewerbsfähigkeit sichern – diesem Anspruch stellt sich die Initiative LiFt, die 2007 als Sieger aus dem Innovationswettbewerb »Wirtschaft trifft Wissenschaft« des Bundesverkehrsministeriums (BMVBS) hervorging.

Die Anforderungen der Fertiger an die Optimierung ihrer Prozesskette sind verschieden. In der Kleinserienfertigung geht es häufig um maximale Flexibilität, in der Massenfertigung steht oft die Kostenoptimierung im Vordergrund. So unterschiedlich die Ansprüche sind, so verschieden sind die möglichen Integrationskonzepte. Dabei eignet sich der Laser in fast allen Verfahrensguppen zur Integration in herkömmliche Fertigungsabläufe und damit Prozesskettenverkürzung.

Als Technologieentwickler und Wissensvermittler steht das Fraunhofer IWS mit seinen Projektpartnern den kleineren und mittelständischen Unternehmen aus Sachsen aber auch aus anderen Regionen anwendungsfallbezogen zur Verfügung.

- 1 *Laserstrahlgeschweißte Bauteile aus hochfesten Werkstoffen für die Automobilindustrie*
- 2 *Anlage zum Laserinduktionsschweißen von Hohlwellen*
- 3 *Füge- und Montagezelle für laserbasierte Bearbeitungsprozesse*

Fraunhofer-Gesellschaft

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Innovation ist einer der wichtigsten Faktoren für unternehmerischen Erfolg. Wer alle Vorteile nutzen will, engagiert dazu auch externe Kompetenz: 60 Fraunhofer-Institute mit Ihrer Kapazität und Erfahrung stellen eine wirtschaftliche Alternative dar. Sie helfen dabei, den Innovationsprozess im Unternehmen voranzutreiben.

Die Fraunhofer-Institute bündeln Ihre Kompetenzen in Kooperationen, um ihren Kunden ein breites Dienstleistungsspektrum anzubieten. Fachlich verwandte Institute arbeiten in Verbänden zusammen und treten gemeinsam am FuE-Markt auf. Sie wirken in der Unternehmenspolitik sowie bei der Umsetzung des Funktions- und Finanzierungsmodells der Fraunhofer-Gesellschaft mit.

Kontakt:
Fraunhofer-Gesellschaft
Hansastraße 27 c
80686 München
Telefon: +49 89 1205-0
Fax +49 89 1205-7531
www.fraunhofer.de

Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces

Die sechs Fraunhofer-Institute des Verbundes Light & Surfaces kooperieren auf dem Gebiet der Oberflächentechnik und Photonik, um durch ihre aufeinander abgestimmten Kompetenzen eine permanente, schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an den raschen technologischen Fortschritt in allen industriellen Anwendungsbereichen zur gewährleisten. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten. Es wird ein breites Leistungsangebot zum Nutzen des Kunden erzielt.

Schwerpunkt dieser Broschüre:

Perspektiven für Zukunftsmärkte:
Tailored Light – Licht als Werkzeug

Kontakt und Informationen:
www.vop.fraunhofer.de

Institute des Fraunhofer-Verbundes Light & Surfaces mit Laseranwendungen

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
www.iof.fraunhofer.de
info@iof.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Lasertechnik ILT
Steinbachstraße 15
52074 Aachen
www.ilt.fraunhofer.de
info@ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstr. 8
79110 Freiburg
www.ipm.fraunhofer.de
info@ipm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
www.iws.fraunhofer.de
info@iws.fraunhofer.de

Weitere Institute des Fraunhofer-Verbundes Light & Surfaces

Fraunhofer-Institut für
Schicht- und Oberflächentechnik IST
Bienroder Weg 54 E
38108 Braunschweig
www.ist.fraunhofer.de
info@ist.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
www.fep.fraunhofer.de
info@fep.fraunhofer.de

Weitere Institute mit Laseraktivitäten:

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF
Tullastraße 72
79108 Freiburg
www.iaf.fraunhofer.de
info@iaf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
www.ipt.fraunhofer.de
info@ipt.fraunhofer.de

Impressum

Redaktion / Gestaltung: Dipl.-Ing. Claudia Zellbeck
Dr. Anja Techel

Bildnachweis:

Titelbild: Bündel Glasfasern beleuchtet durch mehrfarbige Leuchten, www.dreamstime.com

Fraunhofer IAF:
Seite 40/41 (1, 2)

Fraunhofer ILT:
Seiten 4, 6, 8/9 (3), 10/11 (2, 3), 12/13 (1), 14/15 (1, 2), 16/17 (4), 18/19 (1),
20/21 (2, 3, 4), 22/23 (1), 24/25 (1, 2, 3, 4), 30/31 (1), 32/33 (1, 3), 34/35 (2), 36,
38/39 (1), 42/43 (2), 48/49 (3), 50/51 (3), 52/53 (3)

Fraunhofer IOF:
Seiten 18/19 (2, 3), 20/21 (1), 38/39 (2), 42/43 (1, 3, 4), 44/45 (2)

Fraunhofer IPM:
Seiten 34/35 (3), 44/45 (1)

Fraunhofer IPT:
Seiten 10/11 (4), 48/49 (2)

alle anderen Bilder Fraunhofer IWS Dresden

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2009
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

