

Photonische Technologien zur Anwendung bringen

Mit dem Bayerischen Laserzentrum zukunftsträchtige Produktionsverfahren erschließen

Lasergestützte Prozesse zur Bearbeitung verschiedenster Materialien haben sich längst in der Industrieproduktion etabliert. Die Lasertechnik macht Licht als leistungsstarkes, hochdynamisches und flexibles Werkzeug für die Fertigung nutzbar und besitzt darüber hinaus das Potential, auch den technologischen Herausforderungen der Zukunft gerecht zu werden. Das Bayerische Laserzentrum (blz) hilft Anwendern, die Vorteile photonischer Technologien für ihre vielfältigen Produktionsprozesse optimal nutzbar zu machen. Im Folgenden erfahren Sie mehr über die umfangreichen Kompetenzen des Forschungs- und Entwicklungsunternehmens.

Die gemeinnützige Forschungsgesellschaft mit Sitz in Erlangen ist eines der Zentren angewandter Laserforschung in Deutschland und versteht sich als unabhängige und lösungsorientierte Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und industrieller Applikation. Das blz unterstützt als Innovationspartner Unternehmen bei der Erschließung neuer Anwendungsfelder der Photonik. Die Schwerpunkte liegen dabei in den Bereichen Metall- und Kunststoffbearbeitung sowie auf dem Gebiet der Präzisionsbearbeitung mit ultrakurzgepulsten Lasersystemen. Die durch zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte erworbene Kompetenz auf dem Gebiet der Systemtechnik nutzt das blz, um kundenspezifisch optische Systeme und Komponenten auszulegen und zu fertigen. Dabei entstehen innovative Produkte für die Strahlführung und -formung, auch im Bereich Mikro- und Faseroptik.

Metallische Mischverbindungen für die Fertigung

Obwohl sich das Laserstrahlschweißen von Metallen in der industriellen Fertigung für viele Produkte etabliert hat, bleiben Potentiale hinsichtlich einer Kosten- und Gewichtsoptimierung von Bauteilen häufig ungenutzt. Den Schlüssel zu Kostenreduzierung und Gewichtseinsparung stellt die intelligente Kombination mehrerer Werkstoffe innerhalb eines Bauteils dar, um wirkortgerecht das am besten geeignete Material einsetzen zu können. Die folgenden Beispiele aus drei unterschiedlichen Industriezweigen (Produktion weißer Ware, Karosseriefertigung und Leistungselektronik) sollen zeigen, inwiefern die Kombination von metallischen Werkstoffen in Mischverbindungen zu einer Senkung der Materialkosten und/oder des Bauteilgewichts beitragen kann und weshalb der Laserstrahl als präzises Werkzeug die Fertigung angepasster Bauteile erst ermöglicht.

Die Mischung macht's – Laserstrahlschweißen für den Hausgebrauch

Im Haushalt werden für Spülen korrosionsbeständige Stähle eingesetzt. Diese sind im Beckenbereich einer hohen Korrosionsbelastung ausgesetzt, während im Abtropfbereich nur eine geringe Beständigkeit gegenüber chemischem Angriff gefordert wird. An dieser Stelle sind die für das Becken verwendeten hochlegierten Stähle daher überdimensioniert. Durch die Verbindung eines kostengünstigen Stahls niedriger Korrosionsbeständigkeit mit einem hochlegierten Stahl lassen sich somit wesentlich Materialkosten einsparen. Das Laserstrahlschweißen ermöglicht im Gegensatz zu konventionellen Schweißverfahren aufgrund turbulenter Schmelzbadströmungen eine homogene Durchmischung der beiden Werkstoffe in der Schweißnaht, was für eine konstant hohe Korrosionsbeständigkeit der Naht zwingend erforderlich ist (siehe Bild 1). Darüber hinaus erfahren die Werkstoffe eine geringe Wärmebelastung, wodurch negative Auswirkungen des Schweiß-

prozesses, wie Aufhärtung, Bildung von Chromkarbiden und Kornwachstum, auf ein Mindestmaß reduziert werden.

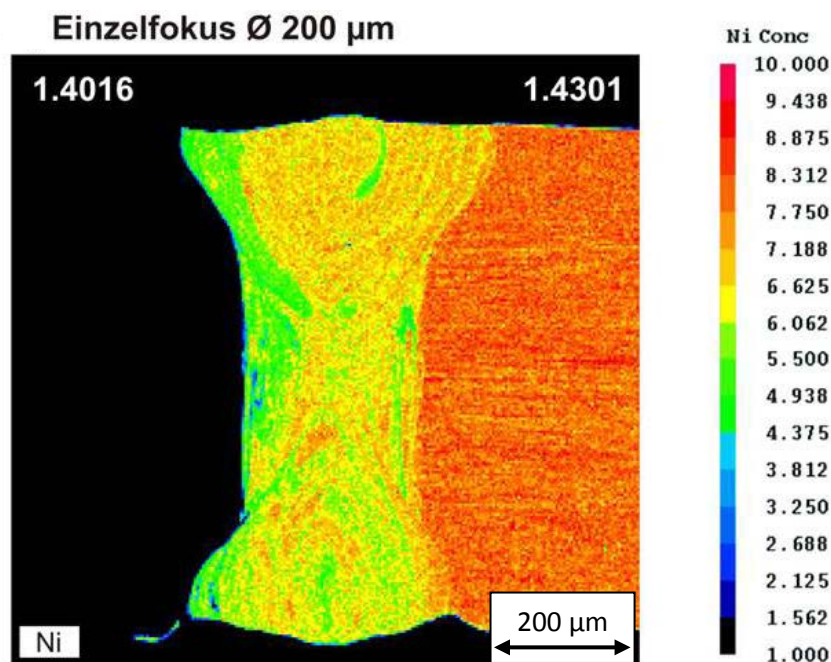


Bild 1: Verteilung des Elements Nickel beim Schweißen verschiedener Edelmstähle

Leichtbau leicht gemacht

Der Einsatz von Aluminium im Karosseriebau bietet, neben der Verwendung von hochfesten Stählen, ein hohes Potential zum Leichtbau. Die Gewichtseinsparung kann durch den Einsatz hochfester (7xxx-Serie) anstatt mittelfester Aluminiumlegierungen (4xxx- und 5xxx-Serie) weiter erhöht werden. Der Nachteil hochfester Aluminiumlegierungen ist jedoch das geringe Umformvermögen dieser Werkstoffe. Sie können deshalb nur in Bereichen mit niedrigen Umformgraden eingesetzt werden. Um dennoch eine Gewichtseinsparung zu realisieren, werden hochfeste mit mittelfesten Legierungen durch Laserstrahlschweißen verbunden. Hierbei kommt der Prozessführung eine wesentliche Rolle zu, da in diesen Verbindungen der Gehalt an Legierungselementen über die Neigung zu Heißrissen entscheidet. Es ist möglich – abhängig von den verwendeten Werkstoffen – mit Hilfe des Lasers die Legierungszusammensetzung, zum Beispiel einen hohen Silizium- und Magnesiumgehalt sowie einen niedrigen Zinkgehalt, in der Schweißnaht genau einzustellen. So kann eine rissfreie Verbindung auch ohne die Verwendung von Zusatzdraht erreicht werden.

Großes Potential für die Herstellung von Leistungselektronik

Die Leistungselektronik stellt aufgrund der steigenden Anforderungen der Elektromobilität innerhalb der Elektronikproduktion einen wachsenden Industriezweig dar. In Bereichen hoher Stromdichten ist man auf den Einsatz großer Querschnitte und auf reines Kupfer als Werkstoff angewiesen, um die Leitungsverluste und dadurch die Erwärmung der Komponenten gering zu halten. In Zonen mit geringeren Anforderungen, wie zum Beispiel im Kabelbaum eines Fahrzeugs, kann das Kupfer jedoch durch reines Aluminium oder Aluminiumlegierungen substituiert werden. Diese weisen zwar im Vergleich zu Kupfer eine geringere elektrische Leitfähigkeit, jedoch auch deutlich reduzierte Kosten und geringere Dichten auf. Die Verbindungstechnik stellt aufgrund der deutlich unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften der beiden Metalle besondere Anforderungen an die Systemtechnik und an die Prozessführung. Mit Strahlquellen von hoher Strahlqualität und Scannersystemen können kleine

Fokusbereich realisiert und der Laserstrahl in schnellen oszillierenden Bewegungen durch die Schmelze geführt werden. Eine präzise Führung des Laserstrahls ermöglicht es somit, das Mischungsverhältnis der beiden Metallschmelzen in einem engen Toleranzbereich einzustellen (siehe Bild 2). Der damit erreichbare hohe Anteil an Aluminium in der Schweißnaht trägt zu duktilen Eigenschaften der Verbindung bei, weshalb mit diesem Verfahren hergestellte Mischverbindungen auch für vibrationsbelastete Produkte geeignet sind.

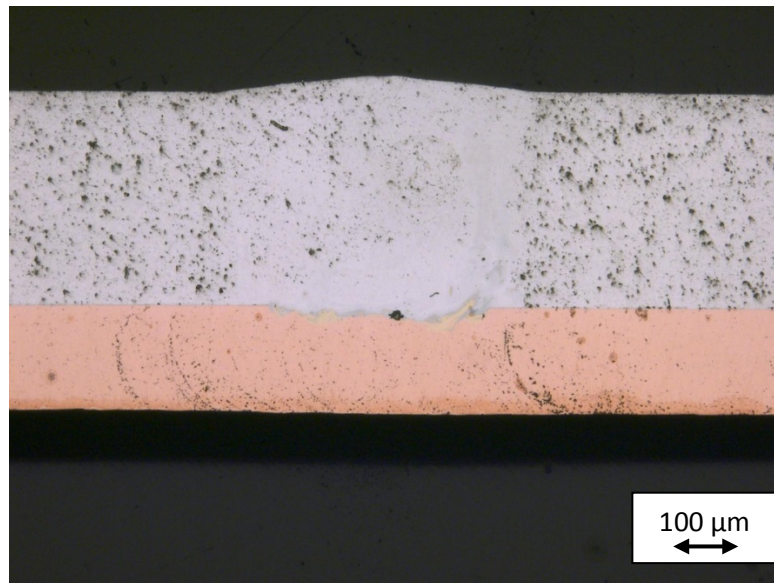


Bild 2: Aluminium-Kupfer-Mischverbindung

Die gezeigten Beispiele sind exemplarisch für eine Vielzahl realisierbarer Verbindungen zu sehen, die es erlauben, Produkte kostengünstiger, leichter und eigenschaftsoptimiert zu produzieren. Das Laserstrahlschweißen bietet aufgrund der Möglichkeit, metallische Schmelzen gezielt zu steuern und erstarren zu lassen, den Schlüssel, diese Bauteile reproduzierbar auch in hohen Stückzahlen herzustellen.

Laserbasierte Fügeverfahren für die Kunststoff-Fertigung

Der Einsatz von Kunststoffen im Automobilbau wird in den nächsten Jahren weiter stark zunehmen. Dazu tragen besonders ein steigender Kostendruck und der Wunsch nach Gewichtsreduktion sowie Ressourceneffizienz bei. Das Einsatzspektrum von Kunststoffen reicht dabei bereits von kleinsten Sensor- oder Elektronikgehäusen bis hin zu großen Struktur- und Außenhautbauteilen. Mit der zunehmenden Verwendung von Kunststoffbauteilen geht auch die Notwendigkeit einher, diese Teile sowohl untereinander als auch mit anderen Werkstoffen prozesssicher verbinden zu können. Dabei gewinnt das laserbasierte Fügen von Kunststoffen zunehmend an Bedeutung. Von großem Interesse sind dabei die Herstellung maßgeschneiderter Multi-Material-Kombinationen und die berührungslose Qualitätssicherung.

Kunststoffe und Metalle im Leichtbauverbund mittels laserbasiertem Schmelzkleben

Derzeit wird der Material-Mix aus Kunststoff und Metall vor allem durch Kleben oder mechanisches Fügen realisiert. Diese Verfahren besitzen jedoch Nachteile wie eine Vielzahl an Prozessschritten oder zusätzliches Gewicht durch Verbindungselemente. Ein vielversprechender Ansatz ist das laserbasierte Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen, wodurch eine schnelle, flexible und berührungslose Herstellung von Multi-Material-Bauteilen ermöglicht wird. Die Flexibilität und die verschleißfreie Wirkungsweise des Laserstrahls ermöglicht eine lokale, berührungslose Erwärmung des zu fügenden Metalls. Der darunter liegende Kunststoff wird durch Wärmeleitung lokal aufgeschmolzen und benetzt unter Druck die metallische Oberfläche, so dass nach einer Abkühlphase eine feste Verbindung (Zug-Scher-Festigkeit ca. bis 8 MPa) ohne den Einsatz eines zusätzlichen Klebstoffs entsteht. Die Zug-Scher-Festigkeit der Mischverbindung kann zudem durch eine Laserstrukturierung der Metalloberfläche und einer damit verbundenen zusätzlichen mikroskopischen Verhakung auf ca. 20 bis 25 MPa gesteigert werden. Der Thermoplast erfüllt somit sowohl Klebstoff- als auch Bauteilfunktionen. Zur Verdeutlichung des Einsatzpotentials beanspruchungsgerecht ausgelegter Multi-Material-Bauteile aus Metall und Kunststoff in Verbindung mit der neuen Füge-technologie wurde eine Trägerstruktur aus Metall und faserverstärktem Thermoplast (siehe Bild 3a) mittels Laserstrahlung ohne zusätzlichen Klebstoff gefügt. In Bild 3b ist ein Schliff der erzeugten Fügeverbindung gezeigt, in dem die Laserstrukturierung des Metalls und das Hinterfließen der erzeugten Kavitäten sowie die Benetzung der Oberfläche durch den Thermoplast deutlich zu erkennen sind. Anhand der bisher durchgeführten Versuche kann gefolgert werden, dass das laserbasierte Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen großes Potential hat, etablierte Fügeverfahren in Branchen wie dem Automobil- und Maschinenbau sowie der Elektronikproduktion zu ergänzen und den Einsatz von Kunststoffen für Leichtbauanwendungen weiter zu fördern.

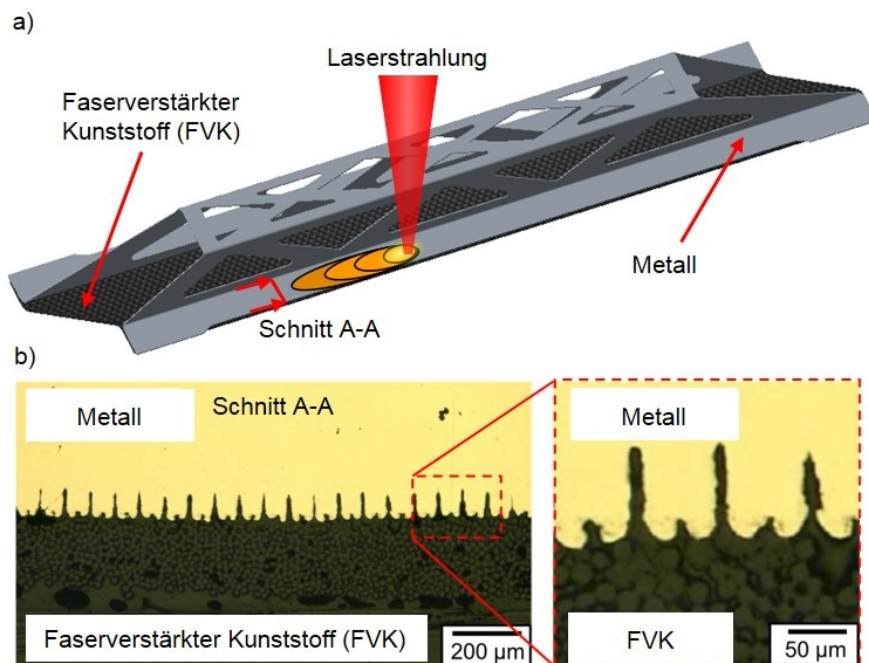


Bild 3: Mittels Laserstrahlung gefügte Trägerstruktur aus Stahl und faserverstärktem Thermoplast mit Schlichtbild der erzeugten Fügeverbindung

Zerstörungsfreie Qualitätssicherung für das Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen

Das industriell etablierte und gut erforschte Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen ist ein hochgradig technisierter und komplexer Fertigungsprozess. Typische Anwendungsbereiche für das Laserdurchstrahlschweißen sind unter anderem die Automobilindustrie (z. B. Rückleuchten), die Elektronikproduktion (z. B. mediendichte Gehäuse mit innenliegender Elektronik) und die Medizintechnik (z. B. Katheter). Bei diesem Schweißverfahren durchdringt ein Laserstrahl zunächst den für die Wellenlänge des Laserstrahls nahezu transparenten Fügepartner und trifft dann auf einen zweiten, laserabsorbierenden Fügepartner. Die absorbierte Laserstrahlung wird in Wärme umgewandelt und es entsteht eine optisch hochwertige und mediendichte Schweißnaht. Der Schweißprozess, vor allem die Strahl-Stoff-Wechselwirkung, wird jedoch stark durch vorgelagerte Verarbeitungsprozesse beeinflusst. Beispielhaft hierfür ist der Einfluss der Temperatur des Spritzgießwerkzeugs auf die sich ausbildenden amorphen und kristallinen Rand- bzw. Kernbereiche des Kunststoffbauteils zu nennen, deren Ausprägung wiederum signifikanten Einfluss auf die optischen Eigenschaften des zu durchstrahlenden Fügepartners haben.

Um stets qualitativ hochwertige Schweißergebnisse zu erzielen und lokal unterbrochene, undichte, weniger feste oder porenbehaftete Schweißnähte zu vermeiden, müssen schwankende Randbedingungen im Schweißprozess durch Regelkonzepte kompensiert werden. Aktuell werden hierfür u. a. die auf integral geometrischen Messungen basierende Fügeregung oder die entlang der Schweißnahtkontur – aber nicht über die Nahtbreite – ortsaufgelöst ausführbare pyrometerbasierte Leistungs- oder auch Vorschubgeschwindigkeitsregelung eingesetzt. Diese Technologien erlauben aber derzeit keine ausreichend sichere und zudem ortsaufgelöste Aussage über lokal vorliegende Fehlerbilder, da sie zum Teil selbst von den werkstofflichen Störgrößen beeinflusst werden. Probleme bereiten dabei vor allem stark absorbierende und streuende obere Fügepartner mit hoher Kristallinität bzw. Glasfasergehalten.

Eine vielversprechende Alternative zu den bereits angewandten Technologien stellt die Fourier Domain-Optische Kohärenztomographie (FD-OCT) dar, durch die eine zerstörungsfreie Analyse der Schweißnahtgeometrie sowie eine Detektion von Defekten in der Naht möglich ist (siehe Bild 4). Um zukünftig das FD-OCT als Qualitätssicherungswerkzeug für das Laserdurchstrahlschweißen industriell einsetzen zu können, werden am blz im Rahmen eines aktuell laufenden EU-Forschungsprojekts grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Ziel des Projekts ist es, einen adaptiven Laserdurchstrahlschweißprozess für Thermoplaste basierend auf einem Regelkreis mit einem modularen, hochpräzisen Messgerät zu entwickeln, das die Aufnahme tomographischer Bilder der Schweißnahtbildung und -konsolidierung während und nach der Fertigung ermöglicht. Mehr Informationen über das Projekt und die beteiligten Partner sind unter www.weldable.eu zu finden.

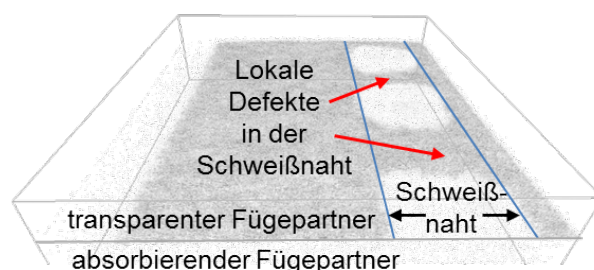


Bild 4: Tomografische Darstellung einer zerstörungsfreien Schweißnahtanalyse mittels Fourier Domain-Optischer Kohärenztomographie (FD-OCT) durch eine 3 mm dicke Polyamiddecklage sowie Detektion lokaler Schweißnahtdefekte

Präzisionsbearbeitung mit ultrakurzgepulsten Lasersystemen

Neben der Auswahl geeigneter Verfahren zur Lasermaterialbearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe, stellt auch die Auswahl geeigneter Strahlquellen den Anwender immer wieder vor Herausforderungen. In den letzten zehn Jahren haben sich in der industriellen Fertigung Prozesse mit kurzgepulsten Laserstrahlquellen etabliert. Vorausgegangen war dieser Entwicklung die kontinuierliche Weiterentwicklung von Strahlquellen sowie Strahlführungs- und Strahlformungssystemen in Branchen wie beispielsweise der Elektronikproduktion, Mikrosystemtechnik oder Feinwerktechnik. Ihre Fortsetzung hat diese Entwicklung in der Realisierung ultrakurzgepulster Systeme gefunden.

Flexible Materialbearbeitung ohne Wärmeeinflusszonen

Die Vorteile der Fertigung mit ultrakurzgepulsten Lasersystemen (UKP-Laser) liegen darin, dass selbst sehr harte Materialien, zum Beispiel Keramiken, Edelsteine, Hartmetalle oder Glas, flexibel und berührungslos bearbeitet werden können und somit kein direkter Werkzeugverschleiß auftritt. Die Verwendung von ultrakurzgepulsten Lasersystemen, welche Laserpulse mit einer Dauer von einigen Femto- bis Pikosekunden erzeugen, ermöglicht es – bei richtiger Parameterwahl – außerdem Wärmeeinflusszonen nahezu gänzlich zu vermeiden. Was ultrakurz im Zusammenhang mit der Dauer von Laserpulsen bedeutet, lässt sich anhand eines Rechenbeispiels verdeutlichen: In einer Sekunde legen Photonen einen Weg von 3×10^5 km zurück, was der 7,5-maligen Umrundung der Erde am Äquators entspricht. In zehn Pikosekunden dagegen schaffen sie nur eine Strecke von drei Millimetern.

Eine weitere Besonderheit von UKP-Lasern stellt die hohe Pulsspitzenleistung dar, die bis zu einigen Gigawatt pro Laserpuls betragen kann. Diese extremen Leistungsdichten in Verbindung mit den kurzen Pulsdauern ermöglichen Interaktionsmechanismen der Strahlung mit Materie, die sich gänzlich von Lasersystemen mit längeren Pulsen oder Dauerstrichlasern unterscheidet. Dadurch treten thermische Nebeneffekte bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern nicht oder lediglich in stark verringertem Maße auf. Neben der Möglichkeit zur Bearbeitung eines großen Materialspektrums aufgrund der Mechanismen lassen sich unterschiedliche Prozesse, wie beispielsweise Mikro- und Nanostrukturierung, selektiver Schichtabtrag, Mikrobohren oder Feinschneiden realisieren. Allerdings ist ein grundlegendes Verständnis der beteiligten Prozesse essentiell, um die für die Applikation geeigneten Laserparameter zu wählen.

Dies lässt sich anhand eines selektiven Laserabtrags an einem Streichholzkopf gut veranschaulichen: Je nach Wahl der Laserparameter entzündet sich das Streichholz und verbrennt (siehe Bild 5a) oder der Abtrag erfolgt ohne Zündung des abzutragenden Materials (siehe Bild 5b) und ohne Schädigung/signifikante Verfärbung des Holzes (siehe Bild 5c).



Bild 5: Selektiver Laserstrahlabtrag mit einem UKP-Lasersystem: a) thermischer Prozess und b) „kalter“ Prozess mit c) Bearbeitungsergebnis des „kalten“ Prozesses

Weitere Anwendungsbeispiele

Weitere Beispiele für Fertigungsprozesse, die mit ultrakurzgepulsten Lasersystemen in höchster Präzision möglich sind, sind die spannungsrisssfreie Oberflächenstrukturierung von Kalk-Natron-Glas ohne nachgeschalteten Temperprozess und die Strukturierung von Aluminiumoxid-Keramik (siehe Bild 6).

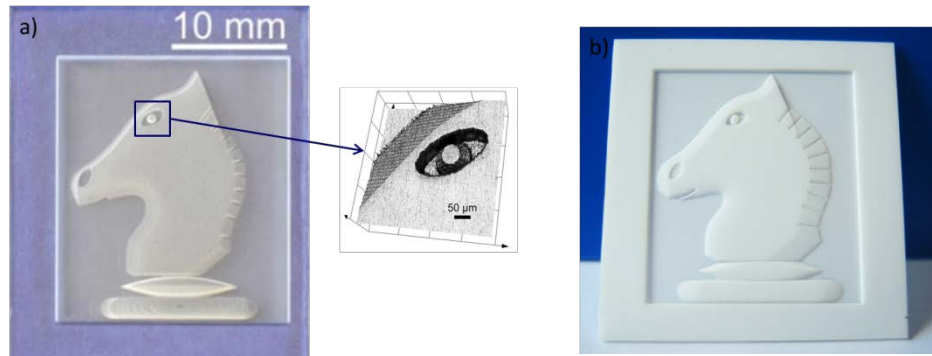


Bild 6: Präzise Oberflächenstrukturierung von a) Kalk-Natron-Glas und b) Aluminiumoxid-Keramik mittels ultrakurzer Laserpulse

Strahlführung und -formung entscheidend für das Bearbeitungsergebnis

Um ein optimales Bearbeitungsergebnis zu erhalten, spielen neben der Parameterwahl für viele Prozesse anwendungsangepasste Strahlführungs- und -formungssysteme eine entscheidende Rolle. So können beispielsweise mit einem Trepaniersystem unterschiedlichste Mikrobohrungsgeometrien mit scharfen, definierten Kanten realisiert werden (siehe Bild 7).

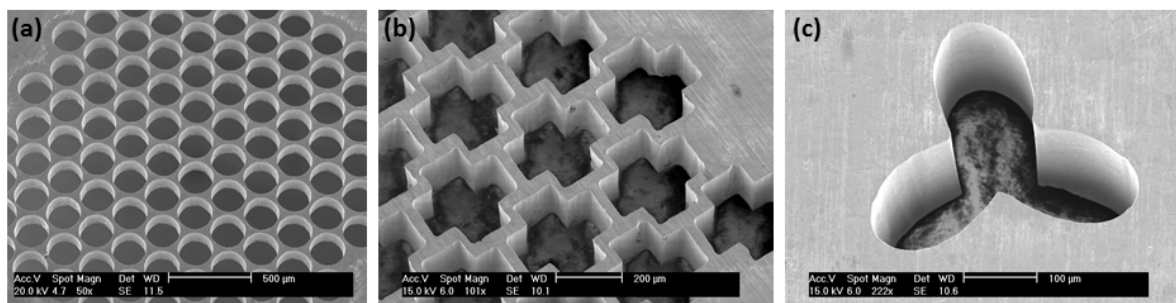


Bild 7: Beispiele von arbiträr geformten Mikrobohrungen in Edelstahl (1.4310) mit einem vom blz entwickelten Bohrmodul

Für eine zeit- und prozesseffiziente Mikrobearbeitung von Werkstücken mittels Laserstrahlung können flexible Strahlformungssysteme eingesetzt werden – etwa um den Prozess durch die Aufteilung des Laserstrahls zu parallelisieren. Beispiele für solche Systeme sind räumliche Lichtmodulatoren, die mit Hilfe von Flüssigkristallen die Phase und/oder Amplitude einer Lichtwelle variieren. So ist man in der Lage, den Laserstrahl in beliebige Multi-Spot Muster aufzuteilen oder eine prozessangepasste Intensitätsverteilung zu formen (siehe Bild 8). Die in den letzten Jahren entwickelten Lichtmodulatoren können zunehmend auch in Hochleistungs- und Ultrakurzpulsanwendungen eingesetzt werden und haben das Potential, zukünftig den Laserbearbeitungsprozess in der Produktionstechnik hinsichtlich Prozesseffizienz und -geschwindigkeit maßgeblich zu verändern.

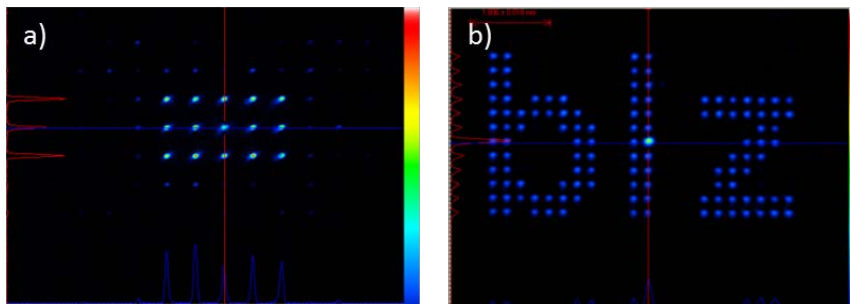


Bild 8: Beispiele für Intensitätsverteilungen, die mit Hilfe eines Flüssigkristall-Lichtmodulators realisiert wurden:
a) 2D-Multi-Spot Muster und b) arbiträres Multi-Spot Muster in Form des blz-Logos

Mikroschweißen von Glas

Mit UKP-Lasern sind nicht nur Abtrags-, sondern auch Fügeprozesse möglich. Als Beispiel ist das Mikroschweißen von Glas zu nennen. Durch die Absorptionsmechanismen wird im Glas ein Plasma erzeugt (siehe Bild 9a). Durch dieses Plasma entsteht eine Wärmeakkumulation zwischen den beiden Gläsern, wodurch diese miteinander verschweißt werden. Hierbei sind die eingebrachten thermischen Spannungen so gering, dass keine Mikrorisse im Glas entstehen. Nur durch Anätzen der Schweißnaht im Schliff wird diese für das menschliche Auge sichtbar (siehe Bild 9b).

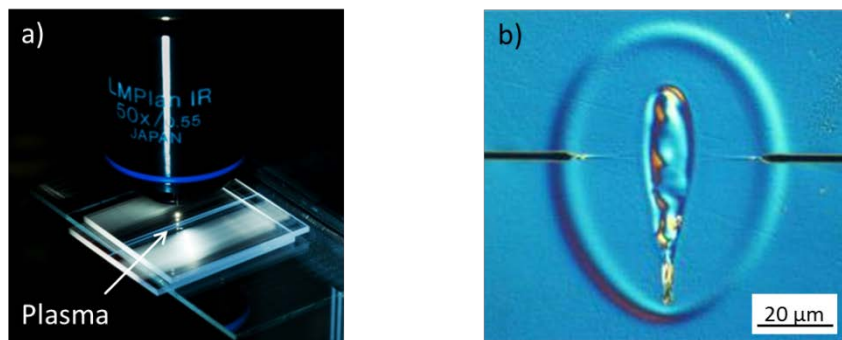


Bild 9: Glasschweißen mit UKP-Lasern: a) Erzeugung von Plasma in Glas durch Multiphotonenabsorption und b) geätzter Querschliff einer Glasschweißnaht

Die genannten Beispiele sind nur ein kleiner Ausschnitt der aktuellen Applikationsmöglichkeiten ultrakurzgepulster Lasersysteme. In den nächsten Jahren wird der Einsatz dieser Lasersysteme in Kombination mit applikationsspezifischen Strahlformungs- und Strahlführungssystemen noch zunehmen.

Neben der oben dargestellten Prozess- und Systemtechnik verfügt das blz über umfangreiche Kompetenzen im Bereich des Laserschutzes. So prüft und zertifiziert es als Prüflabor Produkte und führt kundenspezifische Laserschutzberatungen durch. Über ein vielfältiges Weiterbildungsangebot wird das technologieübergreifende Know-how im Bereich Lasertechnik, welches langjährige Forschung am blz heranwachsen hat lassen, nach außen kommuniziert.

Kontakt und weitere Informationen:

Bayerisches Laserzentrum GmbH
Konrad-Zuse-Straße 2-6
91052 Erlangen
Telefon: 09131 / 977 90-0
E-Mail: info@blz.org
URL: www.blz.org