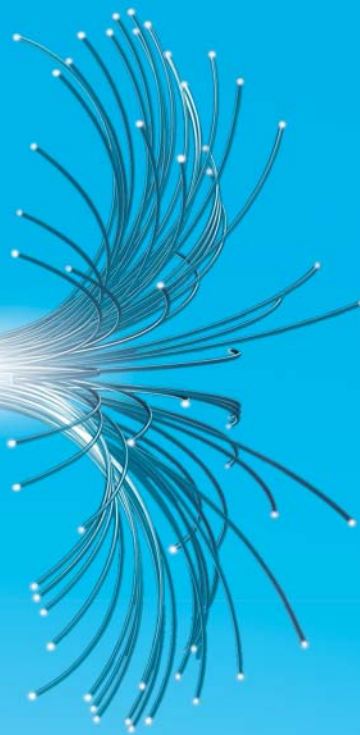


# LASER+ PRODUKTION

**SPEZIAL:**  
**Faserlaser**



**3. Internationaler  
Workshop  
›Faserlaser‹ 2007  
in Dresden**



**4 Präparation  
Photonischer  
Kristallfasern**

**15 Exzellente  
Schnitte in Fein-  
und Dickbleche**

**Eine Publikation von:**



**Fraunhofer** Institut  
Werkstoff- und  
Strahltechnik



**Fraunhofer** Institut  
Angewandte Optik  
und Feinmechanik

# Brillante Lasersysteme

Der 3. Internationale Workshop ›Faserlaser‹ der Fraunhofer-Institute IWS Dresden und IOF Jena ist Geschichte. Die überraschend hohe Beteiligung und die positive Bilanz der Besucher und Aussteller zeigten, dass es gelungen ist, eine ansprechende Veranstaltung rund um den Faserlaser und seine Anwendungen zu etablieren.



25 Fachbeiträge widmeten sich den Lasersystemen, -komponenten und -technologien sowie aktuellen Forschungsthemen. Die teilnehmenden Laserhersteller IPG, Rofin-Sinar, Trumpf, Newport und SPI Lasers informierten über die neuesten Entwicklungen ihrer Unternehmen auf dem Gebiet der kontinuierlichen und gepulsten Faserlaser. Während der Weltmarkt für Lasersysteme in der Materialbearbeitung

im Jahr 2005 noch 4,6 Milliarden Euro betrug, werden für das Jahr 2010 schon 10 Milliarden prognostiziert. Die neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Faserlaser tragen hierzu entscheidend bei; deutsche Unternehmen profitieren maßgeblich davon.

Die herausragende Strahlqualität ist das entscheidende Merkmal der Faserlaser. Sie beeinflusst die Leistungsfähigkeit eines Prozesses wie fast keine andere Eigenschaft. Um mit höherer Produktivität den bestehenden Qualitätsansprüchen gerecht zu werden, sind verstärkte Anstrengungen bei der Auswahl, Konzeption und Fertigung der Bearbeitungsoptionen für Faserlaser im Kilowattsegment zu unternehmen. Im Rahmen des Workshops haben sich mehrere Firmen als kompetente Ansprechpartner empfohlen. Die vom Fraunhofer IWS vorgestellten Lösungen, um Rückreflexionen zu beherrschen und die Lasersicherheit an CNC- und Roboteranlagen zu gewährleisten, werden im Folgenden ausführlich dargestellt; ebenso die Ausführungen des Fraunhofer IOF zur nächsten Fasergeneration für hohe Strahlleistungen.

Parallel zur Entwicklung der Lasersysteme und Komponenten schreitet die Weiterentwicklung von Technologien für die industrielle Anwendung voran. Unternehmen und Institute präsentierten und demonstrierten eindrucksvolle Entwick-

lungsergebnisse der letzten Monate. Auf dem Sektor der gepulsten Systeme werden Laser zunehmend für die großflächige Strukturierung von Metalloberflächen und Schichten eingesetzt. Interessant sind die verschiedenen Bereiche der Solarzellenfertigung. Hier fordern sich zwei stark wachsende Branchen gegenseitig zu neuen Höchstleistungen heraus.

Beim Schweißen von Stahl erschließt sich der Dickblechbereich zunehmend für Laser mit brillanter Strahlqualität. Höchste Produktivität und beste Qualität werden derzeit auch beim Schneiden von Dünoblech erzielt. Vor allem das Remote-Schneiden ermöglicht hier erhebliche Produktivitätssteigerungen und steht deshalb auch im Fokus künftiger Entwicklungsarbeiten. Mit dem zunehmenden Verständnis des Einflusses der Strahlqualität auf den Schneidprozess wird der Laser auch zu größeren Blechdicken vorstoßen.

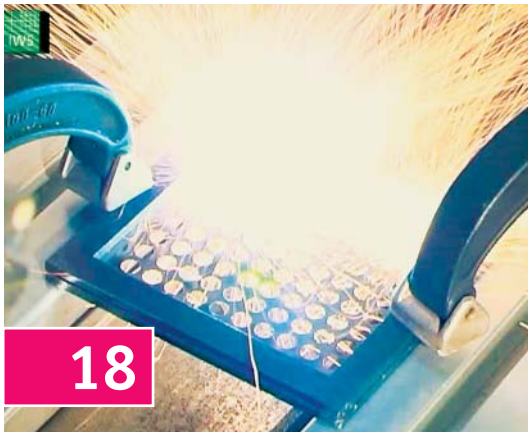
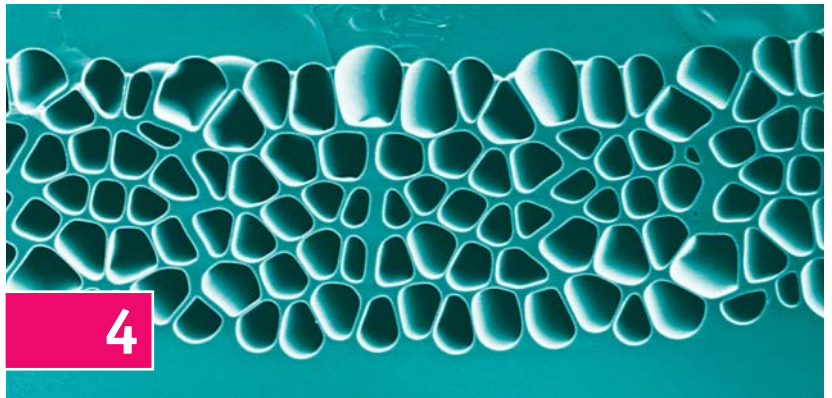
Um den deutschen Laser-Akteuren auch in Zukunft eine führende Position im internationalen Markt zu sichern, unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung Unternehmen und Forschungseinrichtungen im Rahmen verschiedener Förderinitiativen. Vier Verbundprojekte aus der Förderinitiative ›Briolas‹ haben sich mit ihren neuesten Forschungsergebnissen auf dem Faserlaser-Workshop in Dresden präsentiert. Man darf gespannt sein, welche Ideen den Weg in die Praxis finden und dort wieder neuen Fortschritt generieren werden.

In den nachfolgenden Beiträgen finden Sie ausgewählte Ergebnisse der beiden Fraunhofer-Institute IWS Dresden und IOF Jena im Bereich der Systemtechnik- und Technologieentwicklung für die industrielle Anwendung des Faserlasers. Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und freuen uns auf Ihren Besuch auf der Messe ›Lasys‹ in Stuttgart, in unserem Institut oder zum nächsten Faserlaser-Workshop am 5. und 6. November 2008 in Dresden.

Dr. Anja Techel,  
Fraunhofer IWS Dresden

**FASERN RICHTIG PRÄPARIEREN**

Die Faser trägt entscheidend zur exzellenten Strahlqualität der Faserlaser bei. Spezielle Präparations-techniken sind erforderlich, um ihre Vorteile praktisch nutzen zu können.

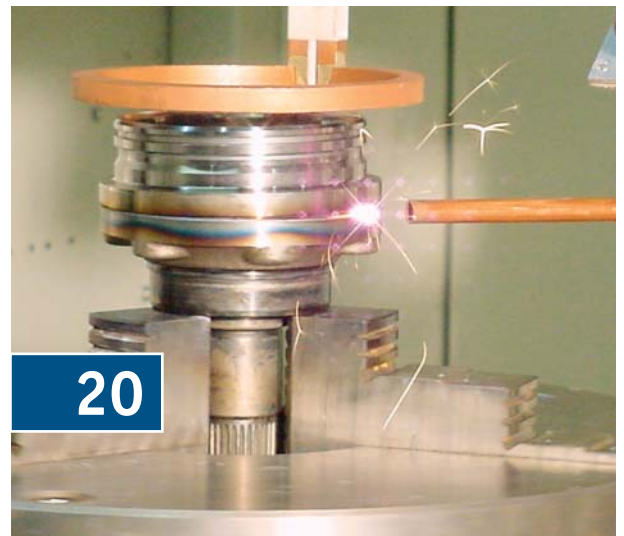


**EXZELLENTEN SCHNITTE**

Strahlqualität, Leistung, Absorptionsgrad – diese Eigenschaften beeinflussen die Bearbeitung von Werkstoffen mit Lasern maßgeblich. Faserlaser trennen Feinbleche mit hohen Konturgeschwindigkeiten und erreichen bei Dickblechen beste Schnittkantenqualität.

**ENGSPALTSCHWEISSEN MIT HOHEM ASPEKTVERHÄLTNIS**

Welche Möglichkeiten eröffnen die neuen Laserstrahlquellen? Die Frage lässt sich – für das Schweißen von Bauteilen mit größeren Wandstärken – einfach beantworten: Es kann schneller und tiefer geschweißt werden.



**PHOTONISCHE KRISTALLFASERN**

**Fasern richtig präparieren** 4  
Aufbau- und Verbindungstechniken für Photonische Kristallfasern

**FOKUSSIEROPTIK**

**Stabiler Fokus mit Spiegeloptiken?** 8  
Fokus- und Prozessstabilisierung bei Faserlasern

**STRAHLENSCHUTZ**

**Sicherheit im Fokus** 10  
Eine neuartige Laserschutzwand für Laser höchster Brillanz

**SYSTEMSICHERHEIT**

**Faserlaser sicher nutzen in kritischen Prozessen** 12  
Optische Dioden schützen Strahlführung und Laser gegen Rückreflexe

**MIKROMATERIALBEARBEITUNG**

**Ultrakurz und ultrafein** 15  
Hochpräzise Mikromaterialbearbeitung mit leistungsstarken Ultrakurzpuls-Faserlasern

**LASERTRENNEN**

**Exzellente Schnitte** 18  
Fein- und Dickbleche schneiden mit dem Faserlaser

**LASERFÜGEN**

**Engspaltschweißen mit hohem Aspektverhältnis** 20  
Schneller und tiefer schweißen mit dem Faserlaser

**Impressum** 23

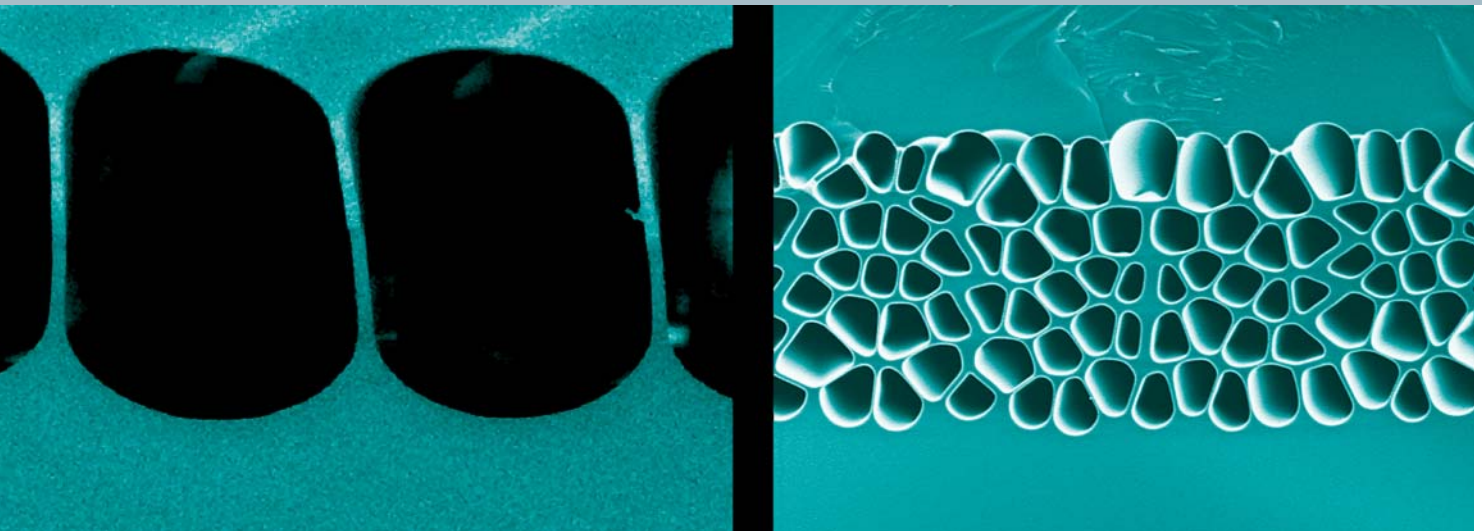
**Index** 23

**KONTAKT ZUM INSTITUT**

**Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS,**  
Winterbergstr. 28,  
01277 Dresden,  
Tel. +49 (0) 3 51 /25 83 -3 24,  
Fax +49 (0) 3 51 /25 83 -3 00,  
E-Mail: info@iws.fraunhofer.de,  
Internet: www.iws.fraunhofer.de

**Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF,**  
Albert-Einstein-Str. 7,  
07745 Jena,  
Tel. +49 (0) 36 41 /8 07 -0,  
Fax +49 (0) 36 41 /8 07 -6 00,  
E-Mail: info@iof.fraunhofer.de,  
Internet: www.iof.fraunhofer.de





## Fasern richtig präparieren

### HIGH-POWER-FASERLASER: AUFBAU- UND VERBINDUNGSTECHNIKEN FÜR PHOTONISCHE KRISTALLFASERN

Die Faser als verstärkendes Medium und ihre lichtführenden Eigenschaften tragen entscheidend zur exzellenten Strahlqualität der Faserlaser bei. Spezielle Präparationstechniken sind erforderlich, um die Vorteile dieser Fasern praktisch nutzen zu können.

**CHRISTIAN WIRTH  
THOMAS SCHREIBER  
RAMONA EBERHARDT  
TINA ESCHRICH  
STEFFEN BÖHME  
ANDREAS TÜNNERMANN**

Der Faserlaser als Quelle hochintensiver Strahlung erschließt immer weitere industrielle Anwendungen, die bisher konventionellen Lasersystemen wie dem CO<sub>2</sub>- oder dem Neodym-YAG-Laser vorbehalten waren. Gleichzeitig erweitert sich der Einsatzbereich auf neuartige Prozesse in der Mikrobearbeitung, die mit konventionellen Laserstrahlquellen nicht realisierbar sind. Der Grund dafür ist – neben dem hohen Wirkungsgrad und der kompakten Bauweise – die exzellente Strahlqualität. Diese beruht auf den speziellen lichtführenden Eigenschaften der Faser als verstärkendes Medium [1].

#### Aufbau und Funktion des Faserlasers

**Bild 1** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Faserlasers. Das aktive Medium ist der mit Ionen der Seltenen Erden dotierte Kern ei-

ner Single-Mode-Faser. Die darin befindlichen Ionen werden durch die Einkopplung der Pumpstrahlung optisch angeregt und konvertieren die Pumpstrahlung in Laserstrahlung. Zwei Spiegel an den Endflächen der Faser bilden den Resonator und ermöglichen den Laserbetrieb.

Die Verwendung von Doppelkernfasern, bei denen der Laserkern koaxial von einem größeren Pumpkern umgeben ist, erlaubt die Einkopplung von Pumplicht aus Quellen mit geringer Strahlqualität und hoher Leistung, wie Halbleiterlaserdioden. Das eingekoppelte Pumplicht propagiert hochgradig multimodig im Pumpkern und wird entlang der Faser kontinuierlich im Laserkern absorbiert (**Bild 2**).

#### Photonische Kristallfasern

Bei den derzeit industriell eingesetzten Faserlasern sind Stufenindexfasern üblich. Sie erlauben die Lichtführung in Doppelkernfasern durch Brechungsindexsprünge zwischen Laserkern, Pumpkern und Mantel der Faser. Jedoch hat dieser Fasertyp bezüglich der Leistungsskalierung von grundmodiger Strahlung gravierende Nachteile: Da nur die Grundmode geführt werden

soll, um das Anschwingen höherer Transversalmoden zu vermeiden und gleichzeitig die Biegeverluste der Grundmode so gering wie möglich zu halten, darf der Laserkern einen gewissen Kerndurchmesser nicht überschreiten. Damit ist das Modenfeld der Grundmode auf nur wenige Mikrometer beschränkt und die Leistungsdichte in der Faser so groß, dass unerwünschte nichtlineare Effekte wie Stimulierte Raman-Streuung oder Stimulierte Brillouin-Streuung in der Faser auftreten und den Laserprozess signifikant stören.

Photonische Kristallfasern (auch mikrostrukturierte Fasern genannt) können die Leistungsdichte in der Faser verringern. Sie sind gekennzeichnet durch eine regelmäßige Verteilung von Mikroluftkanälen über den Faserquerschnitt, womit die Wel-

#### KONTAKT

Prof. Dr. Andreas Tünnermann,  
Fraunhofer IOF Jena,  
Tel. 0 36 41 /8 07 -2 01,  
Fax 0 36 41 /8 07 -6 00,  
andreas.tuennermann@iof.  
fraunhofer.de

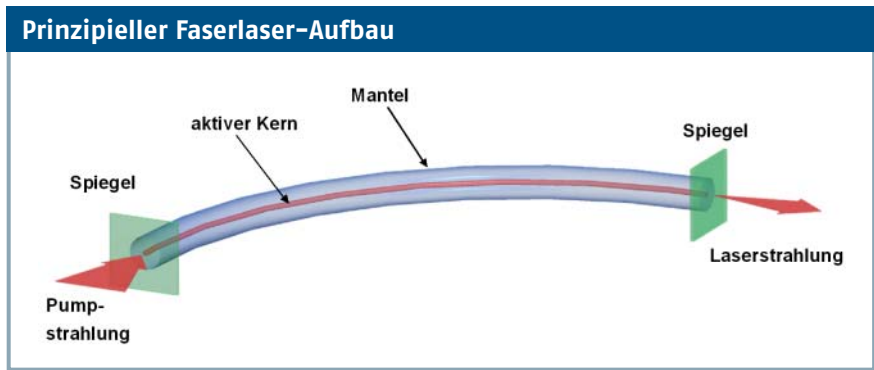
lenleitereigenschaften der Faser gezielt beeinflusst werden können.

**Bild 3** zeigt den Querschnitt einer solchen mikrostrukturierten Doppelkernfaser. Im Mittelpunkt der Faser befindet sich der aktive Laserkern, umgeben von einer regelmäßigen Anordnung feinsten Luftkanäle, deren Durchmesser nur wenige Mikrometer betragen. Über das Verhältnis von Lochdurchmesser zu Abstand lassen sich die Führungseigenschaften des Kerns präzise einstellen. Dies erlaubt die Vergrößerung des Laserkerns und damit des Modenfelds auf einige 10 µm unter Beibehaltung der Grundmode (Gauß-ähnliches Strahlprofil).

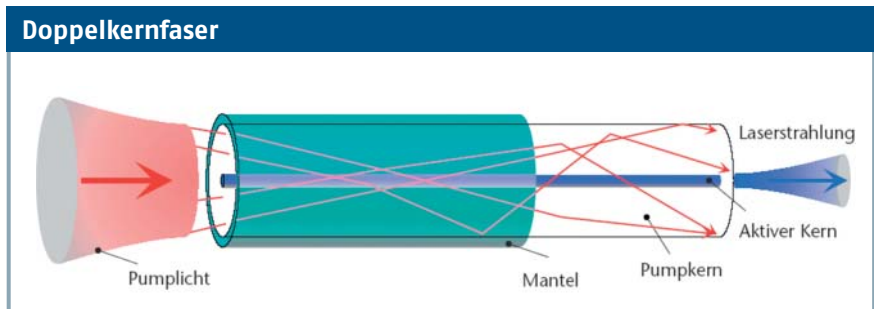
Der Pumpkern wird durch einen Ring aus Luftkanälen definiert (Luftmantel). Dank des großen Brechungsindexsprungs zwischen Glas und Luftmantel ist eine Numerische Apertur des Pumpkerns von bis zu 0,8 erreichbar. Somit wird das Licht praktisch ausschließlich im Pumpkern geführt, und der daran angrenzende Teil des Mantels kommt mit der Pumpstrahlung nicht in Berührung. Dies ist für die Skalierung der Leistung von Bedeutung, da bei herkömmlichen Stufenindexfasern auch im Mantel Pumplicht propagiert wird und es wegen der erhöhten Absorption zu einer starken Erwärmung des meist aus Acrylat bestehenden Mantels kommt.

### Monolithische Photonische Kristall-Faserlaser: AVT

Obgleich die Photonischen Kristallfasern (PCF) hervorragende Wellenleitereigenschaften für die Anwendung in Hochleistungsfaserlasern zeigen, haben sie bislang noch keine Verwendung in kommerziellen Faserlasersystemen gefunden. Dies ist auf die komplexe Struktur des Faserquer-



**1** Die Pumpstrahlung wird in den Laserkern eingekoppelt, absorbiert und in Laserstrahlung umgewandelt

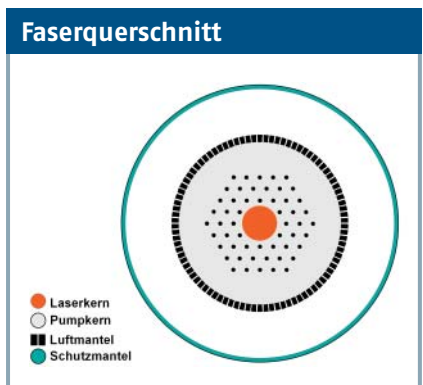


**2** Das hochgradig multimodig propagierende Pumplicht im Pumpkern wird entlang der Faser kontinuierlich im Laserkern absorbiert

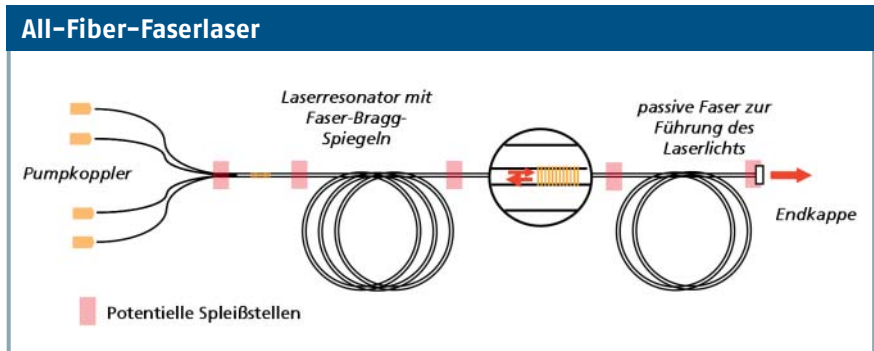
schnitts zurückzuführen. Sie bereitet bezüglich der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) besonders für den Einsatz in monolithischen Faserlasersystemen große Schwierigkeiten. Betrachtet man die Herstellung einer Spleißverbindung, die bei Stufenindexfasern die Anwendung eines einfachen Standardprozesses beinhaltet, so wird deutlich, dass das mit dem Spleiß verbundene Aufschmelzen der Faser und die damit einhergehende Veränderung der Mikrostruktur die Wellenleitereigenschaften der Photonischen Kristallfaser signifikant beeinflusst.

Mit dem Aufschmelzen ändern sich die Durchmesser der Mikrokanäle im Luftmantel und im Pumpkern. Die feinen Luftka-

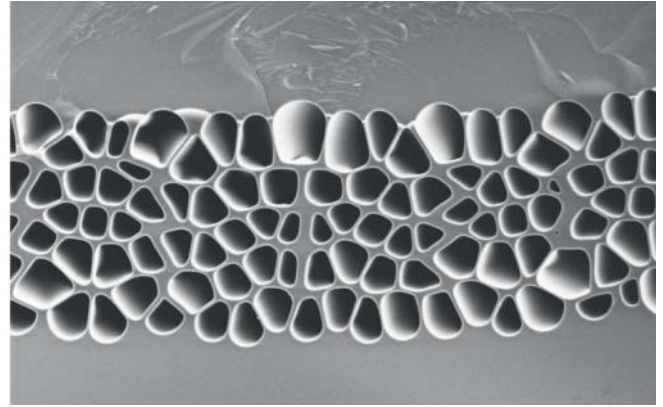
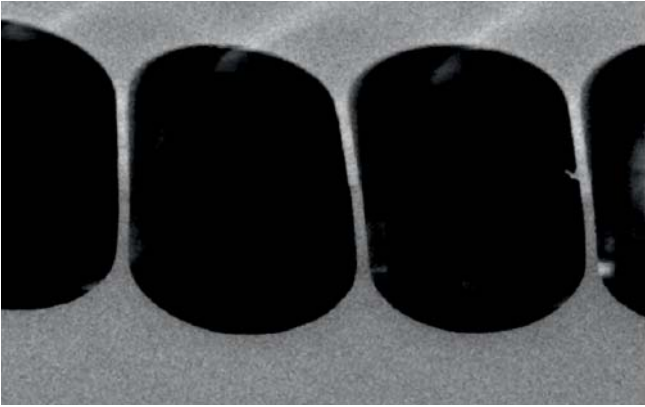
näle neigen bei Erweichen des Glases dazu, sich zusammenzuziehen und schließlich zu kollabieren. Die vorteilhaften Lichtführungseigenschaften für Pump- und Laserkern sind damit in diesem Bereich erheblich gestört, und das in der Faser propagierende Licht wird an dieser Stelle zu einem großen Teil ausgekoppelt. Das Ziel gegenwärtiger Untersuchungen ist es deshalb, geeignete Cleave- und Spleißtechnologien zu entwickeln, die eine breite Verwendung von PCF in Faserlasersystemen ermöglichen. Zu betrachten sind zunächst potenzielle Spleißverbindungen, die für den Aufbau von PCF-basierten Faserlaser- und Faserverstärkersystemen von Interesse sind.



**3** Querschnitt einer Photonischen Kristallfaser mit Doppelkern-Design und Luftmantel zur Führung der Pumpstrahlung mit hoher numerischer Apertur



**4** Aufbau eines All-Fiber-Faserlasersystems: Farblich hinterlegt sind Spleißverbindungen zwischen Pumpfasern und Faser-Bragg-Gitter, aktiver Laserfaser und Faser-Bragg-Gitter, aktiver Faser und passiver Transportfaser und Endkappe



**5** Verschiedene Luftmanteldesigns. Links: Single-Ring-Luftmantel; rechts: Web-Type-Luftmantel. Der Web-Type-Luftmantel zeigt ein deutlich besseres Cleave-Verhalten. Die damit erreichten Cleave-Flächen können ohne weitere Bearbeitung gespleißt werden

► **Bild 4** zeigt schematisch den Aufbau eines monolithischen Faserlasers. Der Laserresonator wird mit zwei Faser-Bragg-Gittern abgeschlossen. Diese Gitter können mittels UV-Laser in fotosensitive Fasern eingeschrieben werden. Spleißt man solche Faserstücke mit eingeschriebenen Gittern an die aktive Faser, so erhält man einen monolithischen und somit justagefreien Laserresonator. Die Zuführung des Pumplichts kann ebenfalls durch Spleißverbindungen erfolgen, indem die fasergekoppelten Pumpdioden seitlich oder über geeignete Faserbündel an die aktive Faser gespleißt werden. Schließlich wird am anderen Ende der aktiven Faser eine passive Faser gespleißt, mit der der Ausgangsstrahl bequem und ohne aufwendige Freistrahlführungssysteme an das zu bearbeitende Werkstück geführt werden kann.

Das Ende der passiven Transportfaser wird schließlich mit einer Faserendkappe abgeschlossen. Das reduziert die Leistungsdichte auf der empfindlichen Faserendfläche und beugt deren Zerstörung vor. Grundlegende Voraussetzung, um einen solchen Aufbau zu realisieren, ist das Beherrschen der Spleißtechnologie, um verlustarme Spleißverbindungen zwischen Photonischen Kristallfasern, konventionellen Stufenindexfasern und Faserendkappen herzustellen.

## Cleave- und Spleißuntersuchungen

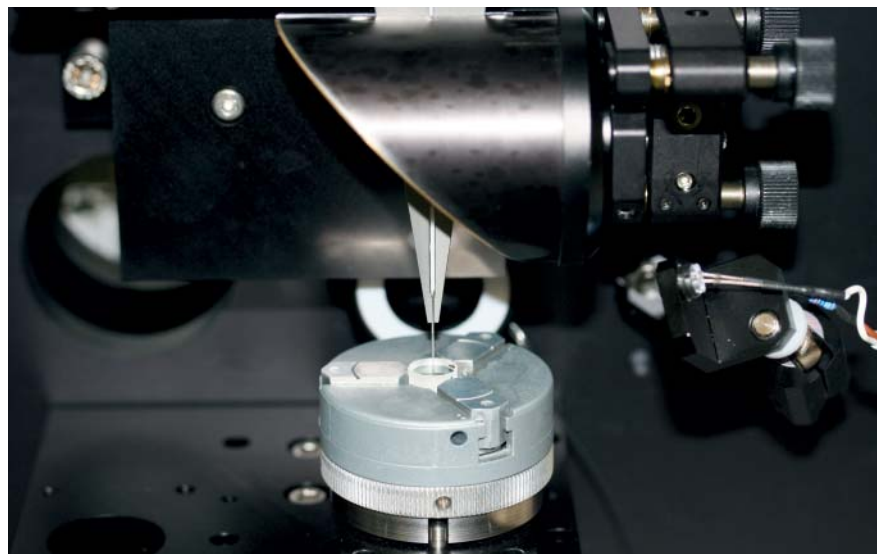
Die Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Spleißverbindung sind ebene und rechtwinklig zur Faserachse liegende Faserendflächen. Bereits bei ersten Cleave-Versuchen von PCF zeigte sich, dass sich das Bruchverhalten von PCF grundlegend von dem der Stufenindexfasern unter-

scheidet. Vor allem die sehr dünnen Strukturen des Luftmantels verhindern einen ungestörten Übergang der Rissfront vom Mantel in den Pumpkern. Das Resultat sind unebene, schiefwinklige Cleave-Flächen mit einem Höhenversatz zwischen Fasermantel und Pumpkern. Die Güte des Cleave wird maßgeblich von der Geometrie des Luftmantels beeinflusst. Luftmantelgeometrien mit langen schmalen Stegen (**Bild 5** links) zeigen ein deutlich schlechteres Cleave-Verhalten als Geometrien mit vielen kleinen Kanälen (**Bild 5** rechts), mit denen spleißfähige Endflächengüten erreichbar sind.

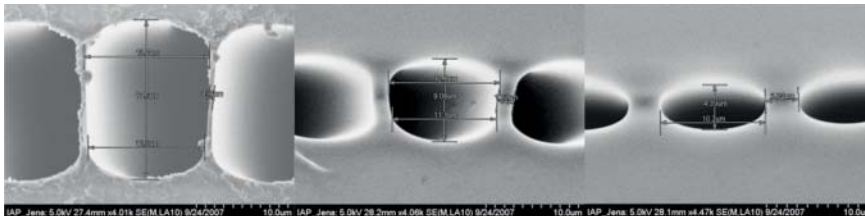
Als Spleißgerät für Faser-Faser-Verbindungen wird ein System der Firma Vytran verwendet, bei dem das Aufschmelzen der Faserendflächen über ein heizbares Wolfram-Filament erfolgt. Nach dem Aufheizen der Fasern werden die Endflächen definiert aufeinandergeschoben.

Ziel ist es, eine stabile und verlustarme Spleißverbindung herzustellen. Hierbei ist es erforderlich, den Wärmeeintrag so zu gestalten, dass die filigranen Strukturen des Luftmantels nicht aufschmelzen, und damit die Pumplichtführung möglichst vollständig zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde der Einfluss des Wärmeeintrags auf die Luftmantelgeometrie untersucht. Es zeigte sich, dass sich die Luftkanäle mit zunehmendem Wärmeeintrag zusammenziehen und die Stege dazwischen sich verbreitern (**Bild 7**).

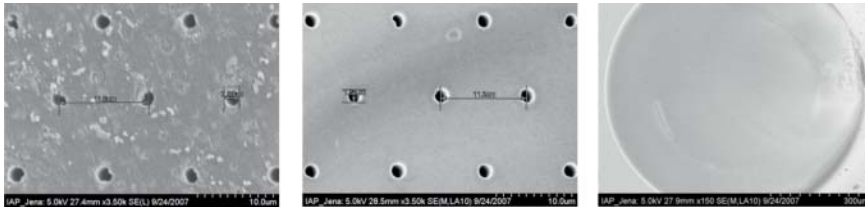
Gleiches gilt für die Mikrostrukturierung im Pumpkern (**Bild 8**). Auch hier erfolgt bei zu großem Wärmeeintrag in den Faserkern ein vollständiges Verschließen der Mikrokanäle. Um jedoch die Wellenleitereigenschaften der Faser zu gewährleisten, muss die Struktur im Bereich des Spleißes erhalten bleiben. In diesem Falle wird die Verbindung zwischen den Fasern nur durch eine sehr dünne Schmelzschicht



**6** Anordnung zum Spleißen von Fasern und Endkappen mittels CO<sub>2</sub>-Laser. Der CO<sub>2</sub>-Laser wird an der zu spleißenden Faser vorbeigeführt und schmilzt die Endkappe vor dem Zusammenfahren auf, sodass eine permanente Verbindung entsteht



**7 Einfluss des Wärmeeintrags auf die Kanäle im Luftmantel. Links: ursprüngliche Geometrie; Mitte: geringer Wärmeeintrag; rechts: starker Wärmeeintrag**



**8 Einfluss des Wärmeeintrags auf die Mikrostruktur im Pumpkern. Links: ursprüngliche Geometrie; Mitte: geringer Wärmeeintrag; rechts: starker Wärmeeintrag, Mikrostruktur und Luftmantel sind fast vollständig verschmolzen**

auf den Faserstirnflächen realisiert, die dann aufeinandergeschoben werden.

Die bisherigen Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, Spleißverbindungen herzustellen, bei denen die Pumplichtverluste aufgrund der Veränderungen des Luftmantels nur etwa 1,5 Prozent betragen. Dies entspricht einer Pumplichtdämpfung von zirka 0,06 dB. Durch diese Spleißverbindungen wurden Pumplichtleistungen von 3200 W mit  $NA \leq 0,5$  geführt.

### Das Spleißen von Faserendkappen

Um die empfindlichen Faserendflächen vor Zerstörung durch zu hohe Leistungsdichten an der Austrittsfläche der Faser zu schützen, hat es sich bei Stufenindex-Fasern bewährt, die leistungsführenden Faserendflächen mit Ronden oder Würfeln aus Kieselglas zu verspleißen. In dieser gespleißten »Endkappe« kann die aus der Faser austre-

tende Strahlung frei expandieren, womit sich die Leistungsdichte an der Glas-Luft-Grenzfläche des Strahlaustritts reduziert. Mittels einer im Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik realisierten CO<sub>2</sub>-Laser-Spleißvorrichtung (Bild 6) wurden Endkappen an Photonische Kristallfasern gespleißt und im Experiment getestet. Es konnte eine Leistung von 3,2 kW im Pumpkern (976 nm) und von 1,5 kW im Laserkern (1070 nm) durch die Endkappe transmittiert werden. Die Spleißstelle wurde dabei direkt wassergekühlt. Diese Werte sind nur durch die zur Verfügung stehenden Strahlungsquellen begrenzt. ■

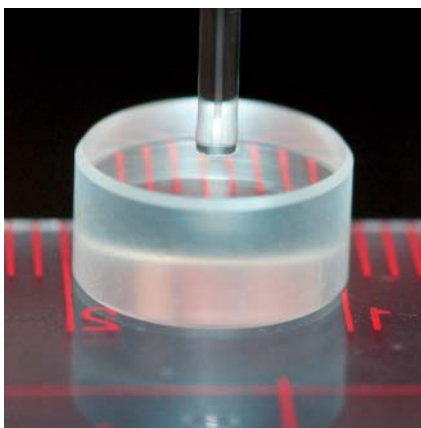
### Fazit: Faserpräparation für industrietaugliche Laser

Für die zukünftige Generation von industrietauglichen Faserlasern können Photonische Kristallfasern aufgrund ihrer Vorteile im Hinblick auf die Leistungsskalierung grundmodiger Strahlqualität eine entscheidende Rolle spielen. Wir haben gezeigt, dass für diese Fasern spezielle Präparationstechniken eingesetzt werden müssen, die Gegenstand aktueller Forschungen sind.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojekts »Fabrik« (13N9099).

#### LITERATUR

1 A. Tünnermann, T. Schreiber, F. Röser, A. Liem, S. Höfer, H. Zellmer, S. Nolte, J. Limpert: »The Renaissance and Bright Future of Fibre Lasers«; J. Phys. B 38 (2005) 681-693



**9 Mittels CO<sub>2</sub>-Laser an Photonische Kristallfaser angespleißte Endkappe**



# Stabiler Fokus mit Spiegeloptiken?

## FOKUS- UND PROZESSSTABILISIERUNG BEI FASERLASERN

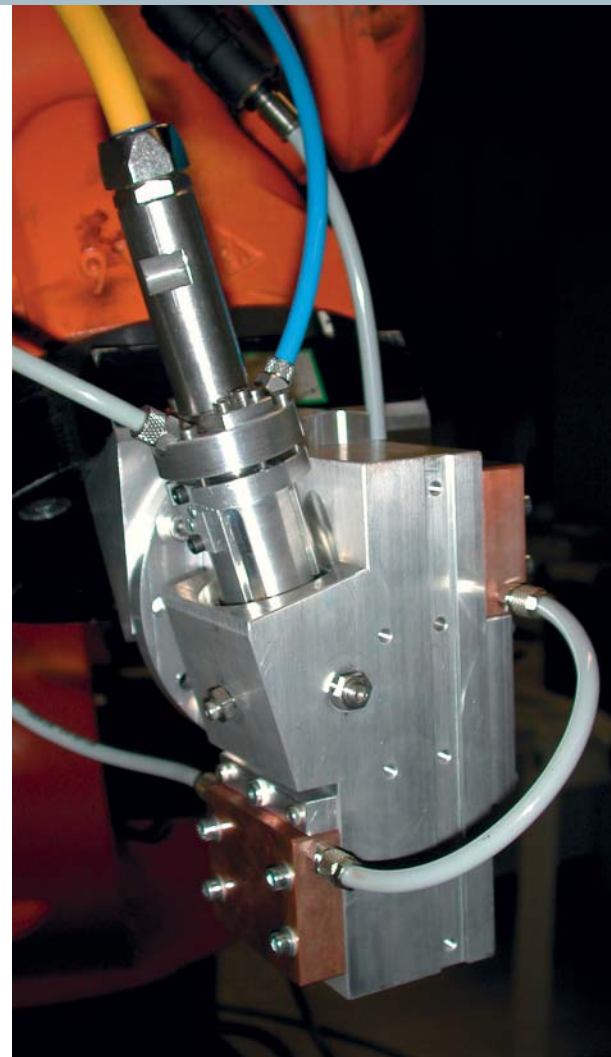
Die Stabilität der Fokusslage ist für die Lasermaterialbearbeitung ein wichtiger Qualitätsfaktor. Spiegelfokussieroptiken können dem sogenannten laserleistungsinduzierten Fokusversatz entgegenwirken und so die Prozessstabilität verbessern.

**LOTHAR MORGENTHAL  
RÜDIGER GNANN  
ANNETT KLOTZBACH**

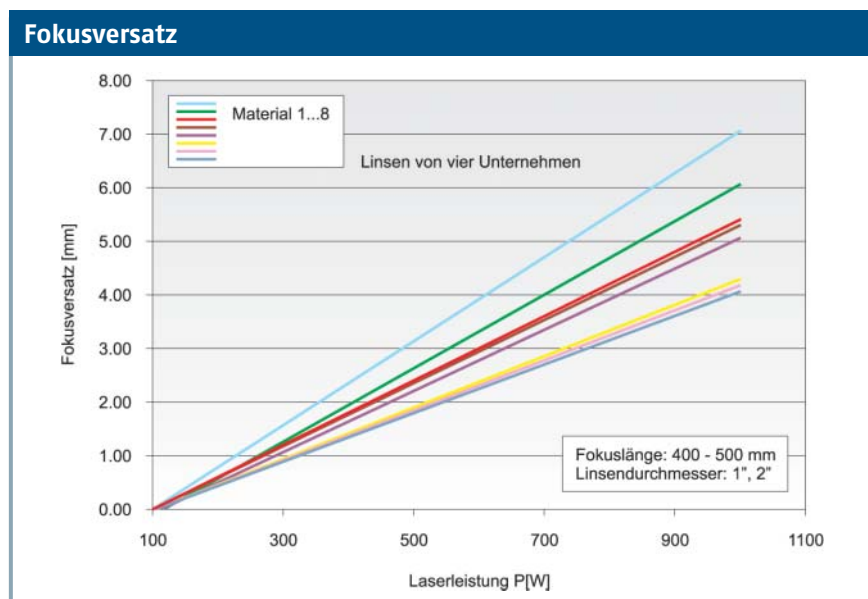
Faserlaser für die industrielle Anwendung erreichen heute eine Strahlqualität von nahezu  $M^2 = 1$  bei Laserleistungen von bis zu 3 kW. Diese Strahlqualität auch noch an der Bearbeitungsstelle zu realisieren, stellt hohe Anforderungen an die Fokussieroptik. Deren Abbildungsqualität hängt von vielen Einflussfaktoren ab: Zum einen muss bei Fokussieroptiken

mit transmissiven optischen Komponenten (Linsen) deren Material hochrein und wasserfrei sein und eine geringe Absorption für die jeweilige Wellenlänge aufweisen. Daneben spielen das optische Layout und die thermische Stabilität des optischen Systems eine große Rolle. Besonders in der industriellen Anwendung ist der sichere Schutz vor Verschmutzung ein wichtiger Aspekt.

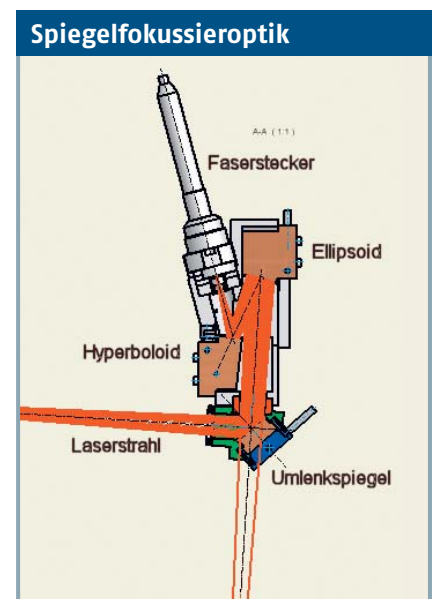
Für viele Laserbearbeitungsprozesse ist die Stabilität der Fokusslage ein wesent-



licher Qualitätsfaktor. Wechselwirkungen zwischen der Strahlung des Lasers und den für die optische Abbildung verwendeten Materialien können jedoch zur Verschiebung der Fokusslage in Abhängigkeit von



1 Fokusversatz unterschiedlicher Linsenmaterialien



2 Schematische Darstellung der Spiegelfokussieroptik



der Laserleistung führen. Dieser Effekt tritt vor allem im Kilowattbereich auf und wird auch als laserleistungsinduzierter Fokusversatz bezeichnet.

## Den Fokusversatz vermeiden

Qualitativ lässt sich dieser Effekt mit leistungsfähigen Messgeräten bei praktisch allen Fokussieroptiken mit transmissiven optischen Komponenten feststellen. Quantitativ unterscheidet er sich je nach Linsenmaterial, Materialqualität sowie Beschichtungsart und -qualität zum Teil deutlich, wie **Bild 1** beispielhaft zeigt.

Bei gleicher Kollimation und Brennweite verschiebt sich der Fokus von acht untersuchten Linsensystemen an einem Single-Mode-Faserlaser mit 14  $\mu\text{m}$  Faserdurchmesser bei 500 W Ausgangsleistung um 1,5 bis 3 mm und bei 1000 W um 3,5 bis etwa 6,5 mm im Vergleich zur Fokuslage bei 100 W.

Eine bisher wenig genutzte Möglichkeit, diese Eigenschaft der transmissiven optischen Komponenten in den Fokussieroptiken für die Materialbearbeitung mit Faserlaser zu vermeiden, könnte der Einsatz von Spiegelfokussieroptiken (FSO) sein, die bei der Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Lasern hoher Leistung vorrangig eingesetzt werden. Im Vergleich zu Linsensystemen sind bei Spiegeloptiken geringere Einflüsse auf die Prozessstabilität zu erwarten.

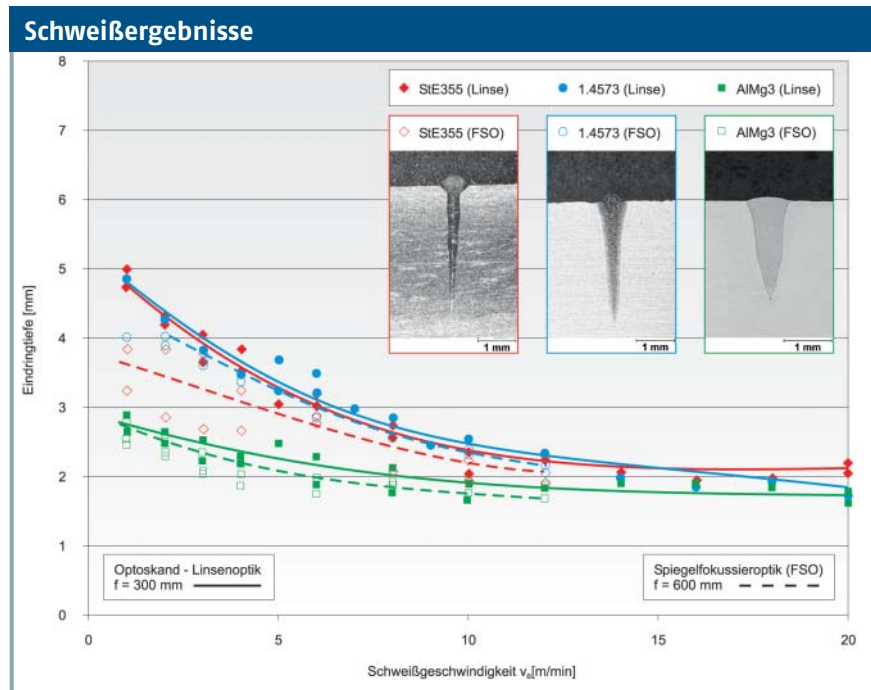
Ein Beispiel für den vorteilhaften Aufbau einer solchen Spiegelfokussieroptik zeigt **Bild 2**. Die Faseroptik wird in einen Faserstecker mit integrierter Faserbruchsicherung eingeführt und mit einem Bajonettverschluss fixiert. Die aus dem Auskoppelkristall der Faser austretende Strahlung ist divergent. Sie wird in der Spiegelfokussieroptik durch die Kombination eines hyperbolischen (Spiegel 1) mit einem elliptischen Spiegel (Spiegel 2) exakt fokussiert. Eine Kollimation ist nicht erforderlich.

## Den Laserspot dem Prozess anpassen

Das Ergebnis vieler Bearbeitungsprozesse kann verbessert werden, wenn der bearbeitende Laserstrahlspot nicht nur mittels einfacher Fokussierung erzeugt wird, sondern in Größe, Form und Intensitätsverteilung dem geforderten Prozess optimal angepasst wird. Zu diesem Zweck kann ein dritter Umlenkspiegel in der Spiegelfokus-

sieroptik den Strahl durch eine hyperbolische Oberfläche aufweiten. So werden der Fokusbereich und bei Schweißprozessen das Keyhole verändert. Beispielsweise können Schweißnähte breit und in

mit den derzeit am Markt existierenden Fokussieroptiken auf der Basis von Linsen. Geometrisch bedingte Einschränkungen bei der 2D- und 3D-Bearbeitung sind deshalb nicht zu erwarten.



**3 Vergleich der mit Linsen- und Spiegelfokussieroptik an verschiedenen Materialien erzielbaren Schweißergebnisse**

der Wurzel verrundet oder tiefwirkend mit weitgehend planer Oberfläche erzeugt werden. Auch astigmatische Abbildungsfehler können mittels Justierung dieses Spiegels eliminiert werden.

Zur Fokus- und damit Prozessstabilisierung bei der Laserbearbeitung trägt bei, dass sich Spiegel wesentlich besser kühlen lassen als transmissive Optiken, nämlich vollflächig an der Rückseite. Die Spiegel bestehen außerdem aus OFHC-Kupfer mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Die gewählte Form der Spiegel erlaubt eine hohe Genauigkeit bei ihrer Herstellung, weil sie nahe dem Rotationszentrum der Spiegelbearbeitungsmaschine aufgespannt werden können.

Die äußeren Abmessungen der Spiegelfokussieroptik sind nahezu vergleichbar

Schweißexperimente in unterschiedlichen Materialien haben gezeigt, dass mit dem Spiegelfokussiersystem etwa gleiche Werte der Einschweißtiefe wie mit Linsensystemen erzielbar sind (**Bild 3**). Die hier noch erkennbaren Unterschiede sind möglicherweise auf den größeren Fokusbereich der Spiegelfokussieroptik infolge ihrer längeren Brennweite als beim Vergleichssystem zurückzuführen. ■

## Fazit: Thermisch und optisch stabil

Wegen der geringen Anzahl optischer Elemente und der einfacheren Möglichkeit der Kühlung verspricht das System eine hohe thermische und optische Stabilität. Mit Spiegeloptiken des hier vorgestellten Prinzips lassen sich nicht nur Grundmodellaser, sondern alle Faser- und Scheibenlaser fokussieren. Hinsichtlich des derzeit an diesem Spiegelfokussiersystem gemessenen Leistungsverlusts sind mit der Verringerung der Rauheit der Spiegeloberflächen und der Aufbringung optimaler Beschichtungen noch Reserven erschließbar.

## KONTAKT

Dr. Lothar Morgenthal,  
Fraunhofer IWS Dresden,  
Tel. 03 51 /25 83 -3 22,  
Fax 03 51 /25 83 -3 00,  
lothar.morgenthal@iws.fraunhofer.de

# Sicherheit im Fokus

## EINE NEUARTIGE LASERSCHUTZWAND FÜR LASER HÖCHSTER BRILLANZ

Die Weiterentwicklung der Laserstrahlquellen hinsichtlich Strahlqualität und Laserleistung erfordert neue Schutzmaßnahmen für Personen und Anlagen. Die Temperaturmessung mit Heißeleitern dient als Grundlage für die Entwicklung sicherer, aber dennoch flexibler und preisgünstiger Umhausungen.

**JAN HANNWEBER  
STEFAN KÜHN**

Neuartige Hochleistungslaser, wie Faser- und Scheibenlaser, haben sich in den letzten Jahren enorm entwickelt. Es kamen Geräte auf den Markt, die beste Strahlqualität bei sehr hoher Laserleistung ermöglichen, und es ist anzunehmen, dass diese Entwicklung anhalten wird.

Diese erfolgreichen Neuerungen bringen jedoch nicht nur erweiterte Möglichkeiten für die Lasermaterialbearbeitung mit sich. Der Schutz von Personen und Anlagen vor Gefahren, welche durch Laserstrahlung entstehen, ist eine grundsätzliche, kostenintensive und aufgrund der Risiken häufig unbeliebte Notwendigkeit bei jeder Laseranwendung. Dieses Problem gewinnt im gleichen Maße an Bedeutung, wie die Entwicklung der Laserstrahlquellen anhält.

### Passive und aktive Schutzwände

Hauptbestandteil einer Lasersicherheitsanlage sind Laserschutzumhausungen. Konventionell werden dafür passive Laserschutzwände verwendet. Dabei wird über die Art des Materials, die Dicke und das Design versucht, den Laserstrahl für eine bestimmte Zeit vor dem Austreten aus der

Umhausung zu hindern. Mittels optischer Sichtprüfung durch den Anlagenbediener hat in regelmäßigen Abständen eine Funktionskontrolle der Laserschutzumhausung zu erfolgen. Versuche haben jedoch gezeigt, dass Hochleistungslaserstrahlen, wie sie bereits Stand der Technik sind, innerhalb von Sekunden auch massive Stahlblech- oder Ziegelkonstruktionen durchdringen und dass dabei gefährliche Laserstrahlung im Kilowattbereich durch kleinste Öffnungen austreten kann. Passive Laserschutzwände sind daher aus sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht in der Lage, den besonderen Anforderungen neuartiger Hochleistungslaser gerecht zu werden.

Geeignet sind aktive Laserschutzwände. Bekannte Systeme basieren meist auf dem Prinzip einer Hohlwand. Sensoren sind dabei in die Wand-



1 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Laserschutzwand auf Heißeleiterbasis

kammer integriert und reagieren beim Eindringen des Laserstrahls auf verschiedene Effekte, zum Beispiel eine Änderung des Kammerluftdrucks oder Streulicht im Hohlraum. Wesentlich ist, dass stets die Zerstörung eines Wanelements für das Detektieren einer Gefahr notwendig ist. Weiterhin schränkt die Notwendigkeit einer Doppelwand die Gestaltungsmöglichkeiten der Konstruktion stark ein.

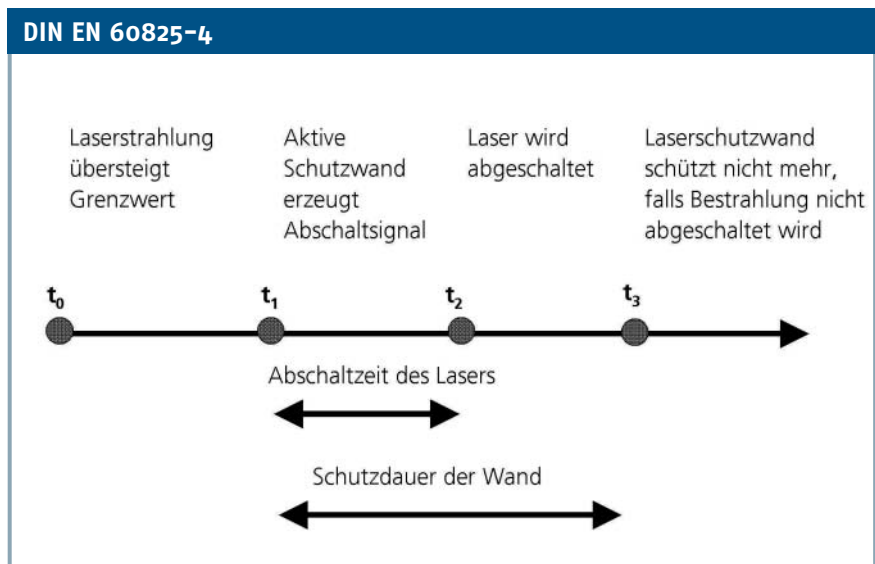
Eine neuartige aktive Laserschutzwand kann diese Nachteile vermeiden und bietet darüber hinaus mehr Sicherheit. Erreicht wird dies durch die Verwendung der sehr einfachen Temperaturmessung mittels Heißleiter. Die Besonderheit ist hier, dass die gesamte Laserschutzwand als großflächiges Heißleiterelement ausgeführt wird. Ein solches Element besteht prinzipiell aus einer Zwischenschicht, die Heißleitereigenschaften aufweist und flächig mit zwei elektrisch leitenden Schichten verbunden ist. Die leitenden Schichten können Metallbleche oder metallische Beschichtungen sein (Bild 1).

## Auf alle Lasertypen anwendbar

Da nicht die Ursache, die Laserbestrahlung, sondern die eigentliche Gefährdung, die Erwärmung der Umhausung, direkt gemessen wird, ist dieses Prinzip für alle Lasertypen unabhängig von der verwendeten Laserwellenlänge anwendbar.

Trifft der Laserstrahl auf dieses Platenelement, erwärmt es sich lokal begrenzt. Bei einem sehr kleinen Laserspot ist auch der erwärmte Bereich sehr klein. In jedem Fall hat das einen Widerstandsabfall der Zwischenschicht an dieser lokal begrenzten Stelle zur Folge. Damit diese Änderung des Ohmschen Widerstands bei großen Wanelementen auch sicher messbar ist, muss die Zwischenschicht zwei wesentliche Eigenschaften haben. Sie muss bei Raumtemperatur einen sehr hohen spezifischen Widerstand und bei Erwärmung einen extremen Widerstandsabfall aufzeigen. Gängige Heißleiter sind Metalloxide wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sie haben genau diese gewünschten Materialeigenschaften.

Der Gesamtwiderstand der Wanelemente lässt sich mit sehr einfachen Messmitteln überwachen. Wird der normale Widerstandswert unterschritten, so liegt eine unzulässige Erwärmung der Platte vor; wird er überschritten, ist eine mechanische Zerstörung zu vermuten. In je-



**2 Zeitabstände zur Gewährleistung der Lasersicherheit nach DIN EN 60825-4**

dem Fehlerfall kann der Laser sicher ausgeschaltet werden. Gemäß der Norm DIN EN 60825-4 ›Sicherheit von Lasereinrichtungen, Teil 4: Laserschutzwände‹ werden vier Zeitpunkte definiert (Bild 2).

Die Reaktionszeit der aktiven Laserschutzwand wird über die Wahl des Schwellwerts und die Geschwindigkeit, mit der die aktive Schutzwand das Abschaltsignal erzeugt, eingestellt. Die Überwachung des Widerstands erfolgt dabei über eine sehr schnelle analoge Schaltung. Der Zeitabstand vom Zeitpunkt  $t_0$  bis zum Zeitpunkt  $t_1$  liegt daher im  $\mu\text{s}$ -Bereich. Von Bedeutung ist, dass bei dieser aktiven Schutzwand ein Signal erzeugt werden kann, bevor eine Schädigung des bestrahlten Wanelements einsetzt. Ob eine Beschädigung auftritt, ist weiterhin abhängig von der Bestrahlungsstärke und dem Zeitabstand  $t_1$  bis  $t_2$ , also der Zeitdauer des Abschaltens der Lasergeräte. Die Begrenzung der vorhersehbaren Maximalbestrahlung kann in den meisten Fäl-

len durch weitere Schutzmaßnahmen erfolgen. Eine solche Maßnahme wäre die Beschränkung der Maschinenkinematik auf einen eingeschränkten Arbeitsbereich.

Sollte ein Element dennoch zerstört werden, so wird das in jedem Fall, auch zu einem späteren Zeitpunkt, detektiert, da sich eine dauerhafte Änderung des Widerstandswerts einstellt. Die passive Komponente jeder aktiven Laserschutzwand muss so ausgelegt werden, dass die Gesamtkonstruktion mindestens bis zum Zeitpunkt  $t_3$  ein Austreten von Laserstrahlung vollständig verhindert. In jedem Fall wird der passive Teil dieser aktiven Wand verglichen mit einer rein passiven Laserschutzwand deutlich einfacher, leichter und damit kostengünstiger.

Die Herstellung eines solchen Wanelements kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen. Neben dem Kleben zweier Metallbleche konnten mit der Spritz- und der Lackiertechnik geeignete Verfahren zur Herstellung erprobt werden. ■

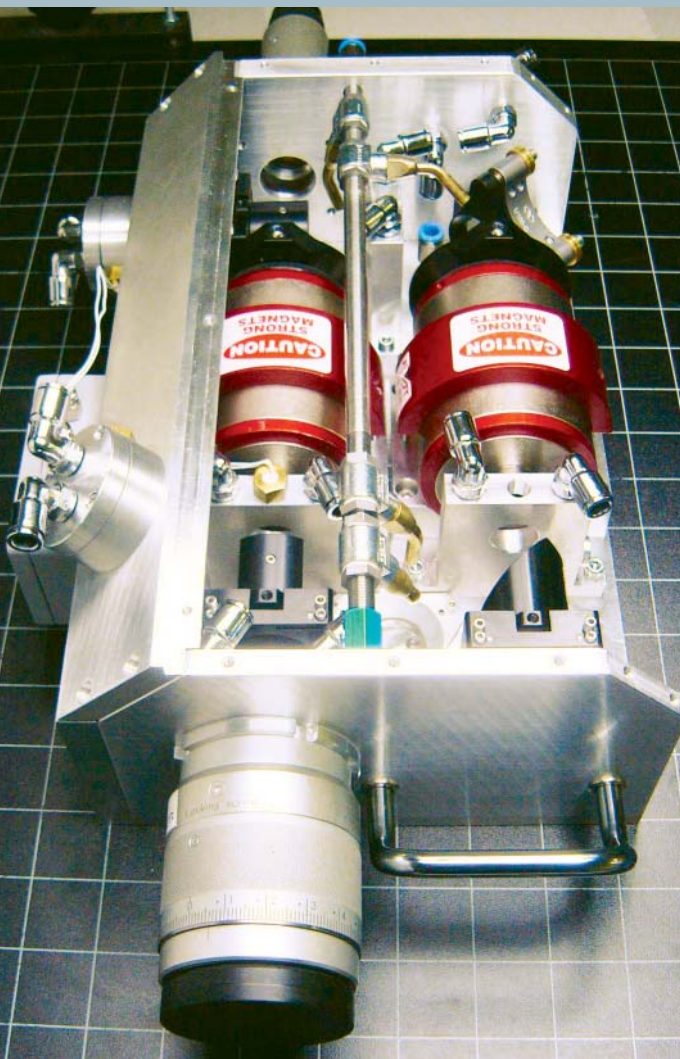
## KONTAKT

Dipl.-Ing. Jan Hannweber,  
Fraunhofer IWS Dresden,  
Tel. 03 51 /25 83 -3 60,  
Fax 03 51 /25 83 -3 00,  
jan.hannweber@iws.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Stefan Kühn,  
Fraunhofer IWS Dresden,  
Tel. 03 51 /25 83 -4 28,  
Fax 03 51 /25 83 -3 00,  
stefan.kuehn@iws.fraunhofer.de

## Fazit: Günstige Einhausung, auch als Baukasten

Dank geringer Schichtdicken sind leichte Wanelemente und komplizierte 3D-Geometrien mit Freiformflächen mit einer Gesamtfläche von bis zu  $4 \text{ m}^2$  herstellbar. Damit ist es möglich, preisgünstige Einhausungen für Laseranlagen oder Gehäuse mit einem ansprechenden Design oder auch als einfaches und flexibles Baukastensystem zu realisieren.



Aufbau einer optischen Rückwirkungssperre

## Faserlaser sicher nutzen in kritischen Prozessen

### OPTISCHE DIODEN SCHÜTZEN STRAHLFÜHRUNG UND LASER GEGEN RÜCKREFLEXE AUS DER PROZESSZONE

Die Systemtechnik begrenzt das nutzbare Leistungspotenzial von Faserlasern, denn rückreflektierte Laserstrahlung kann Schäden verursachen. Abhilfe schaffen optische Dioden für linear und statistisch polarisiertes Laserlicht.

#### PATRICK HERWIG

Faserlaser können für den Bearbeitungsprozess Leistungsdichten oberhalb  $10^8 \text{ W/cm}^2$  erzielen. Allerdings sind der vollen Nutzung dieses Potenzials seitens der Systemtechnik derzeit noch Grenzen gesetzt. Beim Bearbeiten von Metallen, vor allem von hochreflektierenden wie Aluminium und Kupfer, kann ein nennenswerter Teil der Strahlung in den Laser zurückreflektiert werden. So können an den Enden oder Verbindungen der Lichtleitfaser Schäden entstehen (**Bild 1**).

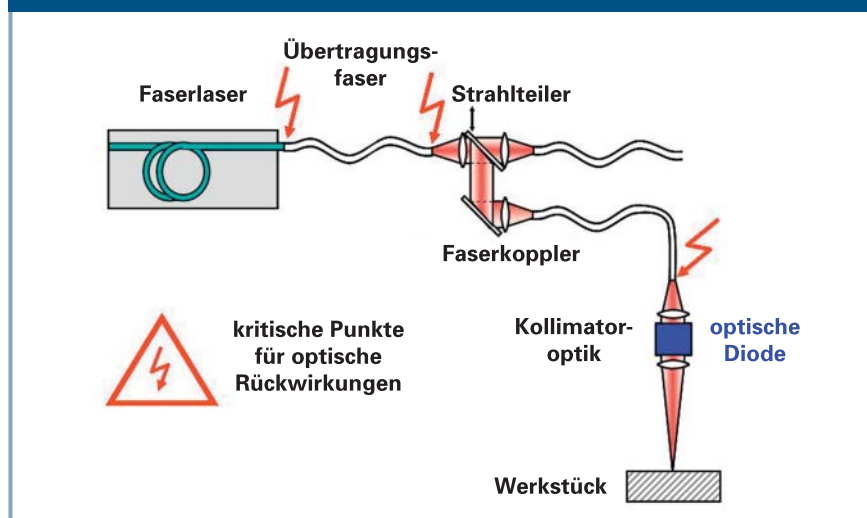
Die Übertragungsfasern oder die aktive Laserfasern werden durch die höhere Leistungsdichte in der Regel nicht beeinflusst. Die Faserenden sind umso mehr gefährdet, je dünner die Faser ist. Damit sind Laser höherer Strahlqualität stärker betroffen.

Als gängige Praxis hat sich seitens der Systemanbieter die Forderung nach einem Anstellwinkel zur Bearbeitung stark reflektierender Werkstoffe etabliert. Bei einem Einstrahlwinkel von zirka  $10^\circ$  kann

der Rückreflex aus dem Strahlengang heraus- und an der Fokussieroptik vorbeigeleitet werden. Allerdings gilt dies nur für die Reflexion an einem Festkörper. Sobald im Fokusbereich eine Schmelze entsteht,

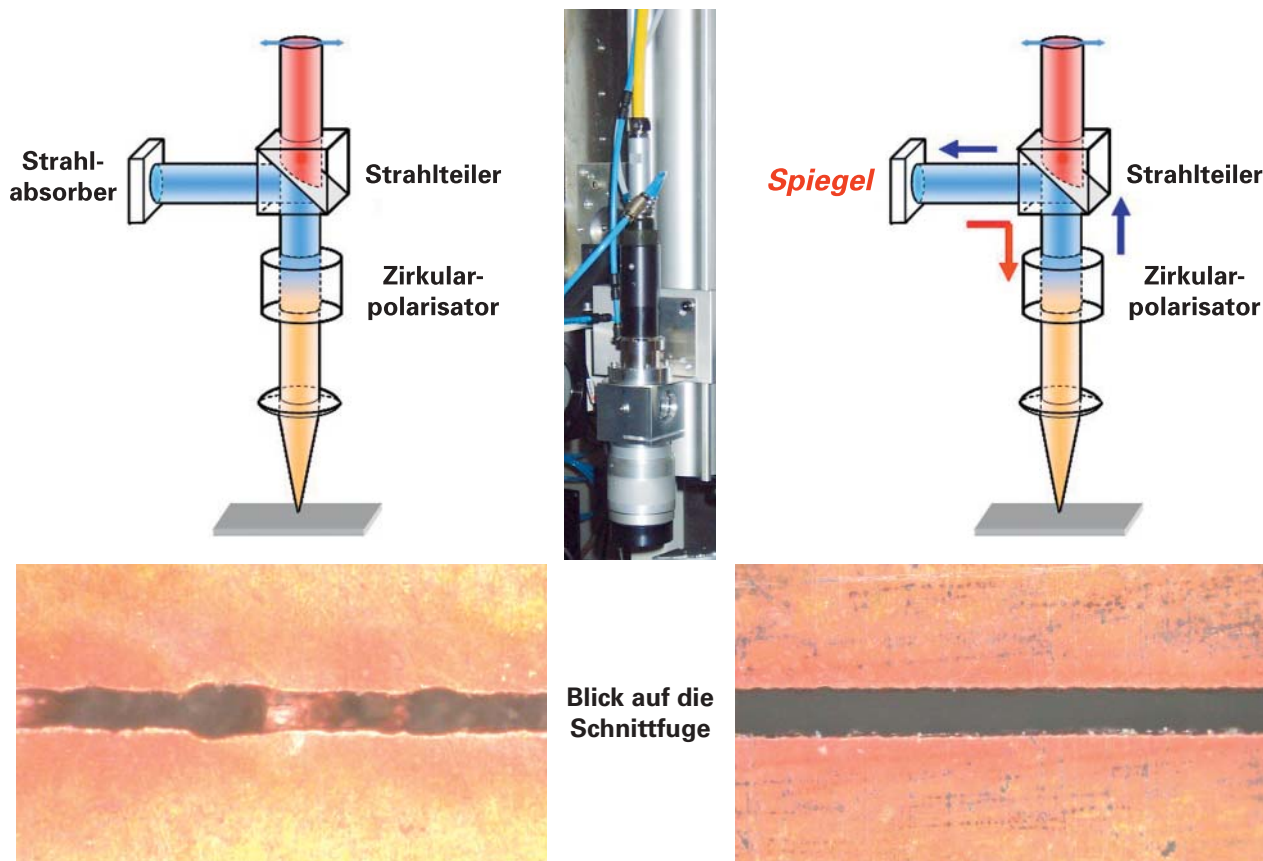
wird sich die Oberfläche der Schmelze deformieren, sodass trotz der Schrägstellung des Strahls optische Rückwirkungen auf das Strahlführungssystem entstehen können.

#### Rückreflexion



1 Kritische Punkte einer Rückreflexion bei der Bearbeitung hochreflektierender Werkstücke

Strahlengang I



2 Schema des Strahlengangs und Schnittbilder für Schnitte mit Absorber (links) und Spiegel (rechts) bei sonst identischen Parametern (Schneiden von Kupfer, zirkular polarisierter Strahl, 500 W Laserleistung,  $v_s = 5 \text{ m/min}$ , 4 bar  $O_2$ ,  $r_f = 30 \text{ mm}$ )

Eine Lösung des Problems ist eine in die Fokussieroptik integrierte Rückwirkungssperre. Derartige Sperren sind allerdings nur für polarisierte Laserstrahlung bekannt. Bei unpolarisiertem Laserstrahl muss dieser zunächst polarisiert werden. Anschließend ist auch dann der Aufbau einer optischen Diode als Rückwirkungssperre möglich.

### Optische Diode für linear polarisierte Laser

Als optische Dioden werden Systeme bezeichnet, die den Rückreflex vom Bauteil gänzlich am Wiedereintritt in die Arbeitsfaser hindern. Sie sind der elektrischen Diode in ihrem Übertragungsverhalten sehr ähnlich. Dabei dient ein polarisierender Strahlteilerwürfel als polarisationsabhängige Weiche für den einfallenden und den reflektierten Strahl.

Für den Einsatz wird das Faserende auf parallel polarisierte Laserstrahlung justiert, womit die Laserstrahlung den pola-

risierenden Strahlteilerwürfel gänzlich unbeeinflusst durchläuft. Auf dem Weg zur Prozesszone wird diese parallel polarisierte Laserstrahlung durch einen Zirkularpolarisator ( $\lambda/4$ -Platte) zu zirkular polarisierter Strahlung verändert. Durch die Rückreflexion am Bauteil und einen weiteren Durchgang durch den Zirkularpolarisator wird erneut senkrecht polarisierte Laserstrahlung erzeugt, die nun allerdings um  $90^\circ$  gedreht vorliegt. Somit kann der Strahlteilerwürfel seiner Funktion als Strahlweiche gerecht werden und den Rückreflex auf einen Absorber reflektieren.

Diesem Grundgedanken folgten weitere Ausbaustufen hinsichtlich der Mehrfach-

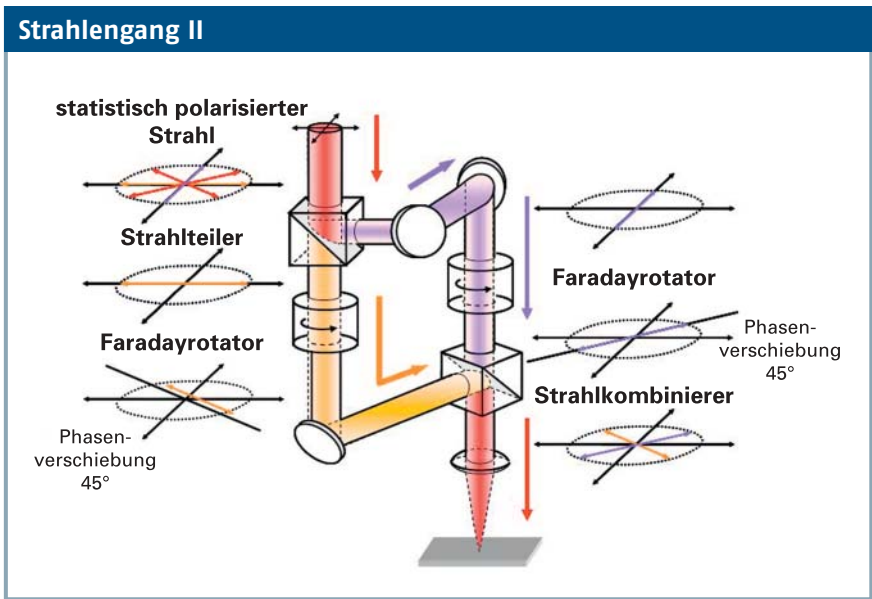
nutzung des reflektierten Strahls. Werden die Rückwirkungen mithilfe eines Spiegels wieder auf das Werkstück zurückreflektiert, kann die Strahlungsintensität kurzzeitig erheblich erhöht werden. Rückreflexe treten beispielsweise beim Schweißen oder Schneiden verstärkt dann auf, wenn der Bearbeitungsprozess instabil wird. Durch den Einsatz eines Spiegels kann der Prozess deutlich stabilisiert werden, wie Bild 2 zeigt. Allerdings ist diese einfache Lösung nur für linear polarisierte Laserstrahlung möglich.

### Optische Diode für statistisch polarisierte Laser

Da die meisten Festkörperlaser statistisch polarisiert sind, wurde am Fraunhofer IWS auch eine Rückwirkungssperre für diese Laser entwickelt (Bild 3 und Titelbild). Dabei wird der statistisch polarisierte Laserstrahl mithilfe eines polarisierenden Strahlteilerwürfels in zwei linear polarisierte Strahlen aufgeteilt und jeweils über ein phasen-

#### KONTAKT

Dipl.-Ing. Patrick Herwig,  
 Fraunhofer IWS Dresden,  
 Tel. 03 51 /25 83 -1 99,  
 Fax 03 51 /25 83 -3 00,  
 patrick.herwig@iws.fraunhofer.de



3 Schema für statistisch polarisierte Laser

► drehendes Element (Faradayrotator) um 45° verdreht und durch einen polarisierenden Strahlteilerwürfel wieder zu einem Strahl vereint. Tritt nun ein Rückreflex auf, so durchläuft der Laserstrahl in umgekehrter Reihenfolge wieder

die optischen Bauelemente mit dem Unterschied, dass die strahlteilenden Elemente zusammenführend wirken und umgekehrt. Die Faradayrotatoren führen durch ein definiertes Magnetfeld eine weitere Verdrehung um 45° in räumlich gleichem Drehsinn aus,

womit die Laserstrahlen senkrecht zur ursprünglichen Polarisation den ersten Strahlteilerwürfel erreichen. Somit ist eine Auskopplung aus dem Strahlengang auf einen Absorber gewährleistet. ■

**Fazit: Schutz beim Schneiden und Schweißen**

Mit allen optischen Dioden sind Prozess-erprobungen im spezifischen Leistungs- bereich sowohl beim Schneiden als auch beim Schweißen erfolgt. Des Weiteren sind die einzelnen optischen Elemente im Dauerversuch hinsichtlich der Zer- störschwellen getestet worden. Damit stehen optische Dioden zur Verfüg- ung, welche im IWS als Schutzvorrichtung zur Laserbearbeitung erprobt werden. Ziel der weitergehenden Arbeit ist es, die un- ter Laborbedingungen vielversprechen- den Lösungen in industrietaugliche dau- erlastfähige Systeme umzusetzen. Dabei ist es eine Kernaufgabe, die Leistungs- verluste von bis zu 10 Prozent zu senken und das System in thermischer Hinsicht zu stabilisieren.

HANSER

Fachmedien für Profis aus einer Hand



**Kontakt:**  
**Redaktion**  
 Dr. rer. nat. Matthias Laasch  
 (verantwortlich)  
 Tel.: +49/89/998 30-650  
 E-Mail: laasch@hanser.de  
**Anzeigen**  
 Rolf Hörr (Anzeigenleitung)  
 Tel.: +49/89/998 30-215  
 E-Mail: hoerr@hanser.de

**Die Photonik- Fachzeitschrift für Deutschland und Europa. Auf Deutsch und Englisch.**

**Die Exportausgabe für die deutschsprachige Photonik-Industrie: Mit nur einer Anzeige auf die wichtigsten Messen. Weltweit.**



**Die deutsche Fachpublikation für die Laser-Material- bearbeitung. Zur LASYS 2008.**



# Ultrakurz und ultrafein

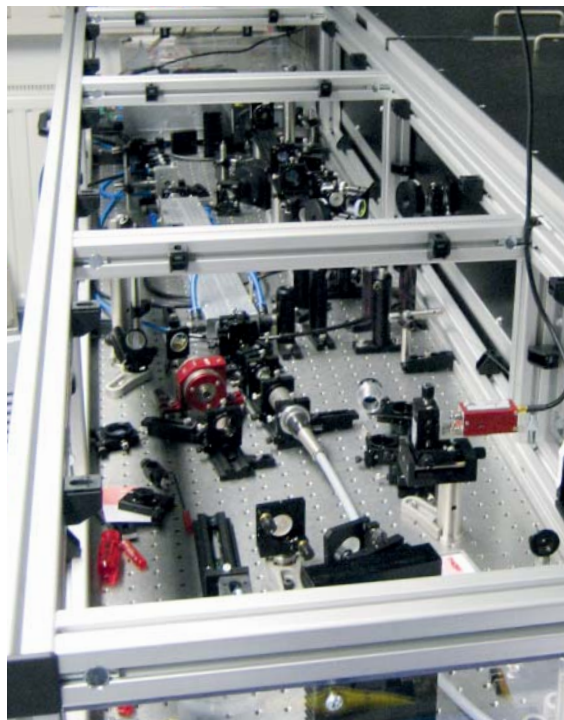
## HOCHPRÄZISE MIKROMATERIALBEARBEITUNG MIT LEISTUNGSSTARKEN ULTRAKURZPULS-FASERLASERN

Gepulste Laserstrahlung mit Pulslängen von einigen 100 Femtosekunden bis zu wenigen Pikosekunden ermöglicht nachbearbeitungsfreie Bohrgeometrien. Verbesserte mittlere Laserleistungen verkürzen die Prozesszeiten jetzt auf industriell relevante Werte.

**STEFAN NOLTE, ANTONIO ANCONA  
KATJA RADEMAKER  
FABIAN RÖSER, JENS LIMPERT  
ANDREAS TÜNNERMANN**

Lasertechniken zur Mikromaterialbearbeitung eröffnen der Industrie Möglichkeiten zur effizienten und flexiblen Fertigung. Dazu werden vornehmlich Laser mit Pulslängen von Nano- bis Mikrosekunden (CO<sub>2</sub>-, Nd:YAG- oder Excimer-Laser) verwendet. Beim Abtrag mit diesen Pulsdauern treten in metallischen Werkstoffen Gefügeveränderungen und Schmelzbildung im Bereich einiger Mikrometer auf. Den künftigen Anforderungen an noch höhere Präzision können diese etablierten Fertigungstechniken damit nicht mehr entsprechen. Hier eröffnet der Einsatz ultrakurzgepulster Laserstrahlung mit Pulsdauern von einigen 100 Femtosekunden bis zu wenigen Pikosekunden die Möglichkeit, anwendungsrelevante, nachbearbeitungsfreie Bohrgeometrien zu realisieren.

Thermische und mechanische Schädigungen (Aufschmelzen, Gefügeveränderun-



**1** Ultrakurzpulsfaserlaserverstärker-CPA-System mit mittleren Leistungen von 100 W bei Pulsenergien bis zu 1 mJ, Pulsdauern unterhalb von 1 ps und Puls wiederholraten bis zu 1 MHz

gen, Rissbildungen oder Versetzungen) können hier praktisch vermieden werden [1-3]. Die erforderlichen Lochgeometrien lassen sich mit Trepanierverfahren sowie durch eine Polarisationskontrolle des Lasers etc. erreichen [4,5]. Allerdings sind die Prozesszeiten von Mikropräzisionsbohrungen mit den bisherigen, kommerziell verfügbaren Lasersystemen für industriell relevante Fertigungsprozesse zu lang.

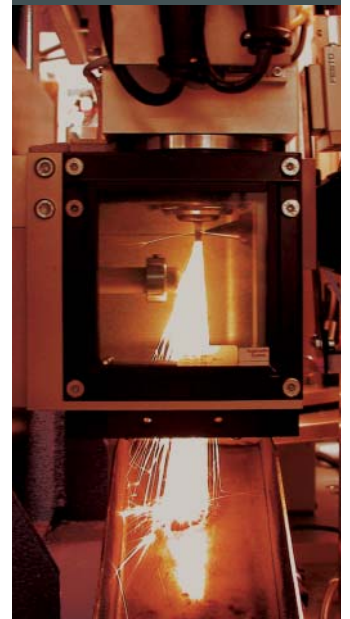
Dank neuer Entwicklungen bei den UltrakurzpulsLasern sind jetzt Systeme mit signifikant gesteigerten mittleren Leistungen verfügbar. So konnte jüngst ein ▶

### KONTAKT

Prof. Dr. Andreas Tünnermann,  
Fraunhofer IOF Jena,  
Tel. 0 36 41 /8 07 -2 01,  
Fax 0 36 41 /8 07 -6 00,  
andreas.tuennermann@iof.fraunhofer.de

Prof. Dr. Stefan Nolte,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena,  
Tel. 0 36 41 /94 78 20,  
Fax 0 36 41 /94 78 02,  
nolte@iap.uni-jena.de

**SITEC**  
INDUSTRIE TECHNOLOGIE



## Intelligenz und Technik

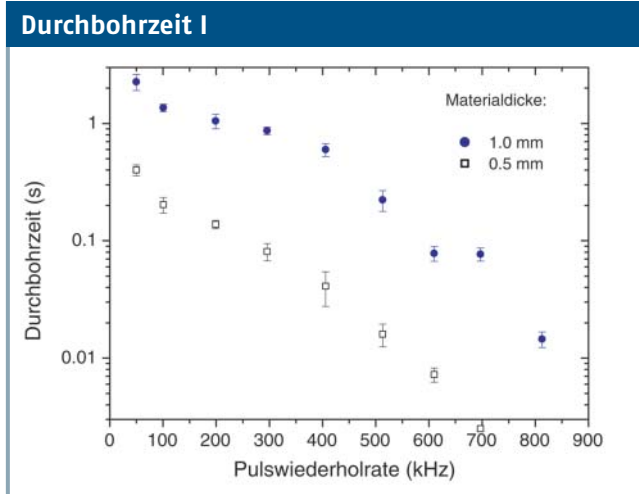
Technologie- und Systemkompetenz für

- Laser-Applikationsentwicklungen
- Laser-Standardanlagen
- Laser-Sonderanlagen

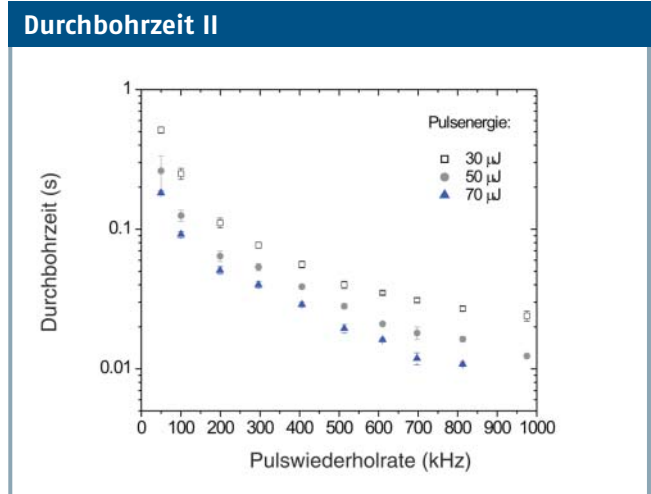
Fordern Sie uns!

SITEC  
Industrietechnologie GmbH  
Bornaer Straße 192  
09114 Chemnitz  
Tel.: +49(0)371 47 08 241  
Fax: +49(0)371 47 08 240  
E-Mail: sitec@sitec-chemnitz.de  
Internet: www.sitec-chemnitz.de

**LASYS** Halle 4, C 63



**2 Metallischer Werkstoff Stahl (Fe/Cr18Ni10) mit 0,5 und 1 mm Dicke: Die Zeit zum Durchbohren der Proben lässt einen deutlichen Abfall mit steigender Repetitionsrate bis in den ms-Bereich erkennen (Laserparameter: Pulsenergie 70  $\mu$ J, Pulsdauer ~ 800 fs, Wellenlänge 1030 nm)**



**3 Metallischer Werkstoff Kupfer mit 0,5 mm Dicke: Die Zeit zum Durchbohren der Probe in Abhängigkeit von der Pulswiederholrate, gemessen für drei verschiedene Pulsenergien, zeigt eine deutliche Verminderung der Prozesszeit bei hohen Pulswiederholraten (Laserparameter: Pulsenergie 30, 50 und 70  $\mu$ J, Pulsdauer ~ 800 fs, Wellenlänge 1030 nm)**

► Faserlaser-Chirped-Pulse-Amplification- (CPA-) Verstärkersystem mit einer mittleren Leistung von 90 W bei 1 MHz Pulswiederholrate und einer Pulslänge von ~ 500 fs demonstriert werden [6]. Weitergehende Verbesserungen wie die Implementierung von Fasern neuartigen Designs ermöglichen sogar die Erzeugung von Pulsenergien bis zu 1 mJ [7]. Dieser Artikel berichtet erstmals über Mikromaterialbearbeitungsuntersuchungen in dem für industrielle Anwendungen relevanten Parameterbereich bis zu Pulswiederholraten von 1 MHz.

## Experimentelle Umsetzung

Der verwendete Ultrakurzpuls-CPA-Laser (**Bild 1**) basiert auf einem Ytterbium-dotierten Faserlasersystem, welches Pulsenergien bis 1 mJ oberhalb von 100 kHz Pulswiederholrate bei einer Wellenlänge von 1030 nm zur Verfügung stellen kann [7]. Der Laser besteht aus einem passivmodengekoppelten Yb:KGW-Oszillator, einer dielektrischen Strecker-Kompressor-Gittereinheit, einem akustooptischen Modulator zur Pulsselektion sowie zwei Ytterbium-dotierten Photonischen Kristallfasern als Verstärkerelementen. Im Rahmen der Experimente wurde die Pulswiederholrate zwischen 25 kHz und 1 MHz bei Pulsenergien von 30 bis 70  $\mu$ J und ~ 800 fs komprimierter Pulslänge, also mittleren Leistungen bis zu 70 W, variiert. Mit diesem Lasersystem wurden Perkussions- und Trepanierbohrungen in den me-

tallischen Werkstoffen Stahl (Fe/Cr18Ni10, Härtegrad: gegläht) und Kupfer (Reinheitsgrad 99,9 Prozent) durchgeführt.

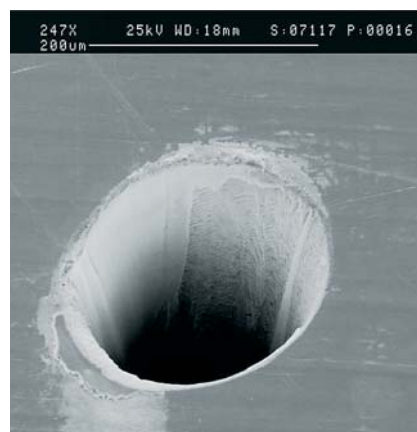
Für die Perkussionsbohrungen wurden zirkular polarisierte Laserpulse mit einer asphärischen Linse ( $f = 25$  mm) auf die Probenoberfläche fokussiert, während die Trepanierbohrungen mit einer galvanometrischen Scannereinheit (Scanlab) mit einer F-Theta-Linse ( $f = 80$  mm) erzeugt wurden. Alle Experimente sind in normaler Atmosphäre ohne einen Bearbeitungskopf und ohne Schutzgas vorgenommen worden. Exakte Messungen der Bohrzeiten

erfolgten mittels Detektion der durch das Bohrloch transmittierten Laserstrahlung mithilfe schneller Fotodioden. Die realisierten Bohrlöcher wurden mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops auf Form, Grad und Ablationsrückstände hin untersucht.

## Ergebnisse für Stahl und Kupfer

Aufgrund der technologischen Bedeutung wurden zunächst Perkussionsbohrungen in Stahl erzeugt. Die zum Durchbohren benötigte Zeit ist beispielhaft als Funktion der Pulswiederholrate für Stahlproben der Dicke 0,5 und 1 mm in **Bild 2** zusammengefasst. Dabei wurde eine Pulsenergie von 70  $\mu$ J auf die Probe fokussiert. Jeder Datenpunkt entspricht einem Mittelwert aus mindestens zehn Bohrungen. Die Fehlerbalken entsprechen den statistischen Schwankungen. Aus der Grafik lässt sich deutlich erkennen, dass die Zeit zum Durchbohren der Proben von einigen Sekunden bei Pulswiederholraten von einigen Kilohertz bis auf wenige Millisekunden bei Pulswiederholraten > 500 kHz sinkt. Diese Prozesszeiten ermöglichen industrierelevante Taktzeiten.

Neben Stahl wurde Kupfer als Werkstoff für weitere Untersuchungen ausgewählt, da eine hochpräzise Mikrostrukturierung ohne Wärmeeinflusszonen hier aufgrund der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit für konventionelle Laser mit langen Pulsdauern



**4 Ultraschnelle Mikromaterialbearbeitung mit dem Trepanierverfahren am metallischen Werkstoff Kupfer (Dicke 0,5 mm). Die Zeit zum Durchbohren liegt bei 75 ms aufgrund der hohen Pulswiederholrate von 1 MHz. Thermische und mechanische Einflüsse können dennoch vermieden werden (Laserparameter: Pulswiederholrate 1 MHz, Pulslänge ~ 800 fs, Pulsenergie 50  $\mu$ J, Trepanierradius 75  $\mu$ m)**



ern besonders problematisch ist. Exemplarisch sind in **Bild 3** die Zeiten zum Durchbohren für eine Kupferprobe der Dicke 0,5 mm in Abhängigkeit der Pulswiederholrate für drei verschiedene Pulsenergien (30, 50 und 70  $\mu\text{J}$ ) dargestellt. Eine deutliche Verminderung der Prozesszeiten bis hin zu wenigen Millisekunden bei hohen Pulswiederholraten ist auch hier eindeutig erkennbar.

Um qualitativ sehr hochwertige Bohrungen zu erzeugen, muss jedoch statt der Perkussion ein Trepanierverfahren eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Pulswiederholraten wurde dazu ein schnelles Scannersystem eingesetzt. Die Untersuchungen belegen, dass sich gratfreie Bohrungen praktisch rückstandsfrei bis zu den höchsten Pulswiederholraten erzeugen lassen. Beispielhaft zeigt **Bild 4** die Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines trepanierten Lochs in einer 0,5 mm dicken Kupferprobe, wobei aufgrund der Pulswiederholrate von 1 MHz eine Durchbohrzeit von 75 ms realisiert werden konnte. Eine Nachbearbeitung des Lochs kann hier entfallen. ■

## Fazit: Für die Industrie relevante Prozesszeiten

**Erstmals wurden Untersuchungen zur Mikromaterialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern in dem für industrielle Anwendungen relevanten Parameterbereich bis zu Pulswiederholraten von 1 MHz durchgeführt. Hochwertige Mikropräzisionsbohrungen in metallischen Werkstoffen wurden mit Bearbeitungszeiten bis weit unterhalb von 1 s für Materialstärken bis 1 mm realisiert. Dies macht eine Umsetzung der Ergebnisse in industrielle Fertigungsprozesse nicht nur vom Standpunkt der erreichbaren Präzision und Qualität, sondern auch hinsichtlich der Prozesszeiten interessant.**

Diese Untersuchung wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts 13 N 8579 und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Programms gefördert.

## LITERATUR

- 1 B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann: ›Femtosecond, picosecond and

nanosecond laser ablation of solids‹; Appl. Phys. A 63 (1996), S. 109–115

- 2 M. Willert: ›Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen‹; Dissertation, Physikalisch-Astronomische Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena (2003)
- 3 G. Kamlage, T. Bauer, A. Ostendorf, B.N. Chichkov: ›Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses‹; Appl. Phys. A 77 (2003), S. 307–310
- 4 F. Dausinger, F. Lichtner, H. Lubatschowski (Eds.): ›Femtosecond Technology for Technical and medical applications‹; Topics in Applied Physics 96, Springer Verlag, Berlin 2004
- 5 S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, A. Ostendorf, C. Fallnich, F. von Alvensleben, H. Welling: ›Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling‹; Appl. Phys. A 68 (1999), S. 563–567
- 6 F. Röser, D.N. Schimpf, O. Schmidt, B. Ortac, K. Rademaker, J. Limpert, A. Tünnermann: ›90 W average power 100  $\mu\text{J}$  energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system‹; Opt. Lett. 32 (2007), S. 2230–2232
- 7 F. Röser, T. Eidam, J. Rothhardt, O. Schmidt, D.N. Schimpf, J. Limpert, A. Tünnermann: ›Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber CPA-system‹; akzeptiert für die Publikation in Optics Letters



Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik ist eines von 58 Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft. Als eine führende Organisation für angewandte Forschung in Europa bietet sie Führungspersönlichkeiten ein hohes Maß an Verantwortung und Gestaltungsspielraum in dem herausfordernden Umfeld von Wirtschaft, Wissenschaft und Forschungspolitik.

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden sucht zum nächstmöglichen Zeitpunkt

### eine/n Abteilungsleiter/in.

für die Leitung der Abteilung  
**Laserabtragen und Trennen**  
(Kennziffer IWS-2007-5)

Arbeitsschwerpunkte der Abteilung sind u. a. die Lasersystem- und -anlagentechnik, insbesondere auch die Scannertechnik, das Laserstrahl-schneiden und Abtragen sowie das Laserreinigen und die Mikrobearbeitung.

Der/die zukünftige Abteilungsleiter/in ist verantwortlich für die inhaltliche Profilierung und Darstellung der Abteilung und die darauf ausgerichtete Qualifizierung seiner/ihrer Mitarbeiter. Er/sie koordiniert und leitet die F&E-Vorhaben seiner/ihrer Abteilung und kontrolliert die personellen und finanziellen Ressourcen. Gemeinsam mit der Institutsleitung wirkt er/sie an der inhaltlichen Ausgestaltung des Institutes, seiner Darstellung nach außen und der Akquisition von nationalen und internationalen Forschungsprojekten bei Unternehmen und öffentlichen Projektträgern mit.

Die Voraussetzungen für die Übernahme dieser Position sind ein abgeschlossenes wissenschaftliches Hochschulstudium in der Fachrichtung Physik, Elektrotechnik, Maschinenwesen oder Werkstofftechnik sowie fundierte Kenntnisse im Bereich der Lasertechnik /-materialbearbeitung bzw. im Bereich des Thermischen Beschichtens. Eine Promotion ist erwünscht. Idealerweise besitzen Sie Erfahrungen in der Akquisition von Aufträgen und Forschungsprojekten sowie in der Leitung interdisziplinär zusammengesetzter Forschungsgruppen.

Anstellung, Vergütung und Sozialleistungen richten sich nach dem Tarifvertrag für den öffentlichen Dienst (TVöD Bund).

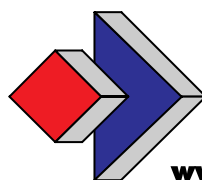
Bitte richten Sie Ihre schriftliche Bewerbung mit allen wichtigen Unterlagen unter Angabe der oben genannten Kennziffer an: Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden, Personalstelle, Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden. Fragen zu dieser Position beantwortet gern: Herr Prof. Dr. Eckhard Beyer, Telefon: +49 (0) 351 2583-420. [www.iws.fraunhofer.de](http://www.iws.fraunhofer.de)

### eine/n Abteilungsleiter/in.

für die Leitung der Abteilung  
**Thermisches Beschichten**  
(Kennziffer IWS-2008-1)

Arbeitsschwerpunkte der Abteilung sind das Thermische Spritzen sowie das Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen.

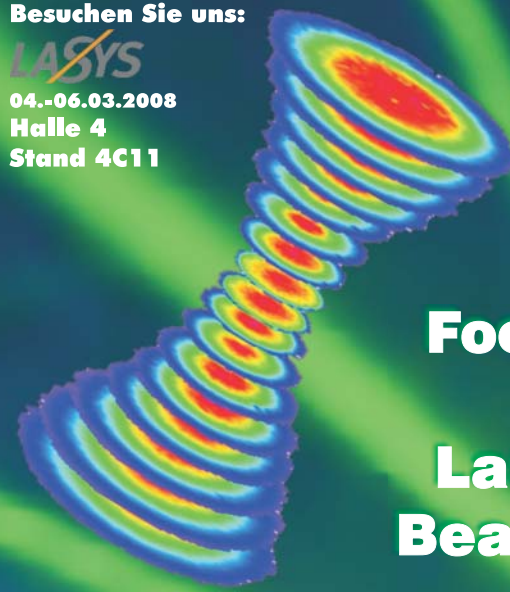
## LASERSTRAHLDIAGNOSE



[www.PRIMES.de](http://www.PRIMES.de)

Besuchen Sie uns:

**LASYS**  
04.-06.03.2008  
Halle 4  
Stand 4C11



**Focus  
on  
Laser  
Beams**



## Exzellente Schnitte

### FEIN- UND DICKBLECHE SCHNEIDEN MIT DEM FASERLASER

Strahlqualität, Leistung, Absorptionsgrad – diese Eigenschaften beeinflussen die Bearbeitung von Werkstoffen mit Lasern maßgeblich. Faserlaser trennen Feinbleche mit hohen Konturgeschwindigkeiten und erreichen bei Dickblechen beste Schnittkantenqualität.

**THOMAS HIMMER  
MATTHIAS LÜTKE**

Innerhalb der Lasermaterialbearbeitung bildet das Laserstrahlschneiden eines der größten Anwendungsfelder. Die hohe Strahlqualität, hohe Leistungsdichten und hoher Absorptionsgrad ermöglichen das Trennen von Werkstoffen mit großen Schneidgeschwindigkeiten unter Einhaltung der erforderlichen Qualitätsansprüche.

Bei der Bereitstellung der genannten Eigenschaften bietet der Faserlaser derzeit das größte Potenzial. Mit Leistungen im Multi-kW-Bereich bei Strahlqualitäten besser als 2,5 mm mrad ergeben sich für den Laser neue Möglichkeiten und Anwendungsfelder innerhalb der Materialbearbeitung.

Bei der Feinblechbearbeitung sind Trenngeschwindigkeiten erreichbar, die selbst hochdynamische Schneidanlagen mit Lineardirektantrieben im Konturschnitt nicht erreichen. Am Fraunhofer IWS konn-

te nachgewiesen werden, dass Elektroblech der Dicke 0,5 mm bei Einhaltung hoher Qualitätsansprüche mit 100 m/min trennbar ist. Gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Laser kann der Faserlaser bei gleicher Laserleistung mehr als die doppelte Trenngeschwindigkeit erreichen.

#### Remote-Laserstrahlschneiden von Feinblechen

Die Herausforderung für künftige industrielle Anwendungen ist die Umsetzung dieser hohen Trenngeschwindigkeiten beim Schneiden beliebiger Konturen. Im Idealfall entspricht die effektive Schneid-

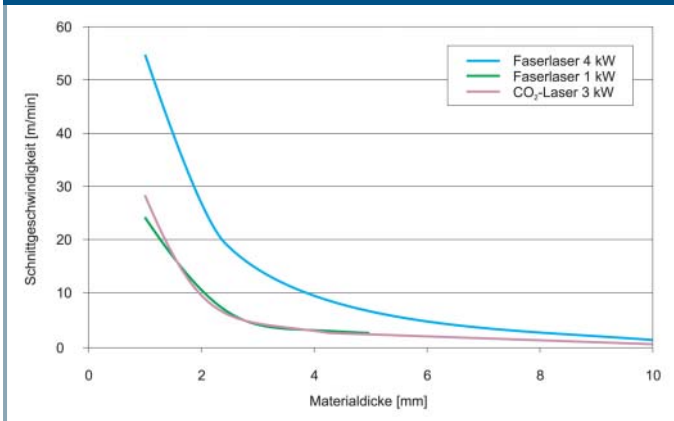
geschwindigkeit beim Erzeugen einer Kontur der Trenngeschwindigkeit im geraden Schnitt des jeweiligen Werkstoffs. Bei komplizierten Konturen liegt sie derzeit mit zirka 20 m/min jedoch deutlich unterhalb der möglichen Trenngeschwindigkeiten von bis zu 100 m/min (vorausgesetzt, Schneidanlagen mit Linearantrieben werden eingesetzt). Mit konventionellen Linearschneidanlagen sinkt die effektive Konturgeschwindigkeit aufgrund des limitierten Beschleunigungsvermögens weiter.

Um die effektive Konturgeschwindigkeit zu erhöhen, untersucht und entwickelt das Fraunhofer IWS ein neues Bearbeitungsverfahren, das sogenannte Remote-Laserstrahlschneiden. Dabei erfolgt die Bewegung des Laserstrahls über hochdynamische Scanner. Wegen des großen Abstands zwischen Scanner und Werkstück bewirken kleine Auslenkungen im Strahlableitensystem große Auslenkungen am Werkstück. Aufgrund dieses Übersetzungsverhältnisses und der relativ kleinen bewegten Massen sind hohe Konturgeschwindig-

#### KONTAKT

Dr. Thomas Himmer,  
Fraunhofer IWS Dresden,  
Tel. 03 51 /25 83 -2 38,  
Fax 03 51 /25 83 -3 00,  
thomas.himmer@iws.fraunhofer.de

## Schnittgeschwindigkeit



### 1 Zusammenhang zwischen Schnittgeschwindigkeit und Materialstärke für unterschiedliche Lasertypen und -leistungen

keiten am Werkstück möglich. Das Material wird in der Schnittfuge ohne Schneidgasunterstützung abgetragen. Die Grundlagen des Prozesses sind demzufolge eher in den klassischen Abtragprozessen zu suchen.

Um das Potenzial der Remote-Bearbeitung zu demonstrieren, wurde in unterschiedlichen Blechstärken aus Edelstahl eine Lochmatrix aus 100 Kreisen mit dem Durchmesser 6,5 mm geschnitten. Die Bearbeitungszeit für diese Lochmatrix liegt bei der derzeit trennbaren Blechdicke von 0,2 mm unter 3 s. Bezogen auf die Schnittlänge ergibt sich daraus eine effektive Konturgeschwindigkeit von über 60 m min<sup>-1</sup>. Blechdicken von 0,05 mm können bereits mit mehr als 100 m min<sup>-1</sup> getrennt werden. Dabei ist eine gratfreie Schnittqualität bei einer Kreisformgenauigkeit besser als 0,1 mm erreichbar.

## Faserlasereinsatz beim Dickblechschneiden

Auch für das Laserstrahlschneiden dickwandiger Bauteile ergeben sich mit dem Faserlaser neue Möglichkeiten. Die geringere Wellenlänge der Faserlaser ermöglicht eine bessere Fokussierbarkeit und höhere Absorption an Metallen; damit werden größere Eindringtiefen und letztlich größere Schnittgeschwindigkeiten realisiert. Vor allem Blechstärken unter 6 mm können mit dem Faserlaser um ein Vielfaches schneller geschnitten werden (Bild 1).

Für einen sicheren Schneidprozess zum Erzeugen hochwertiger Schnittkanten ist es notwendig, die richtige Kombination

### 2 Schnittkantenqualität von Edelstahlblech unterschiedlicher Dicke nach dem Schneiden mit Faserlaser (Blechdicke 4 bis 15 mm)

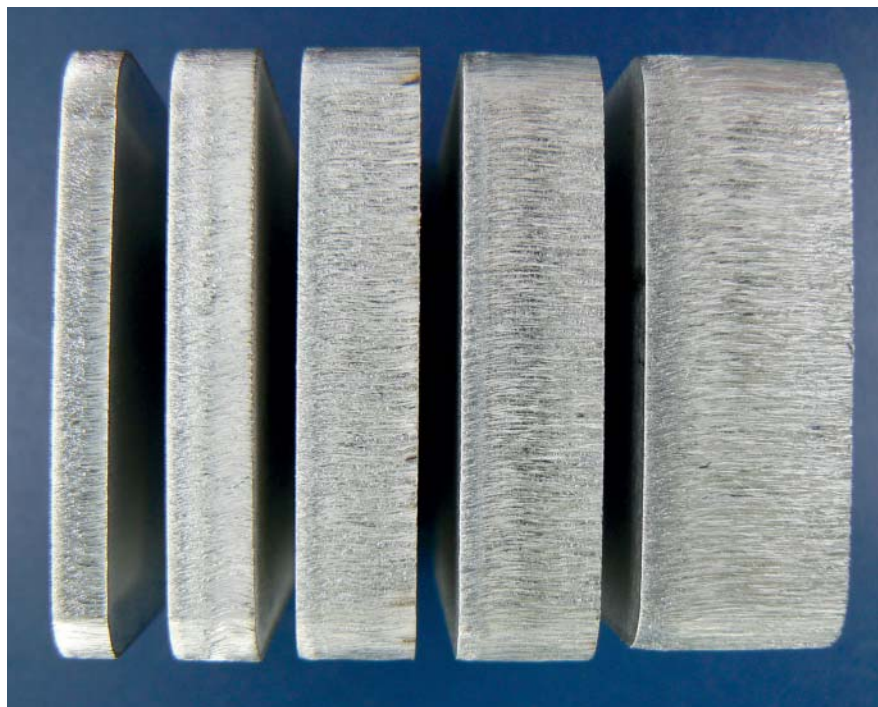
der Parameter Fokusslage, Druck, Schneidgeschwindigkeit, Düsenöffnung, Düsenabstand und Düsengeometrie zu ermitteln. Für das Schmelzschnitten von Edelstahl mit Faserlasern konnte am Fraunhofer IWS Dresden mithilfe von statistischer Versuchsplanung unter Variation mehrerer Parameter gleichzeitig mit wenigen Versuchen der Zusammenhang zwischen den freien Parametern gefunden werden. Es wurde festgestellt, dass es in Abhängigkeit von den Parametern Fokusslage und Schneidgasdruck ein Optimum für die erreichbare Schneidgeschwindigkeit gibt. Zu hoher Druck, zu tiefe Fokusslage oder eine zu hohe Schneidgeschwindigkeit führen zu Plasmabildung im Schnittspalt und damit zu einer Verschlechterung des Schneidergebnisses. Größere Düsenöffnungen ha-

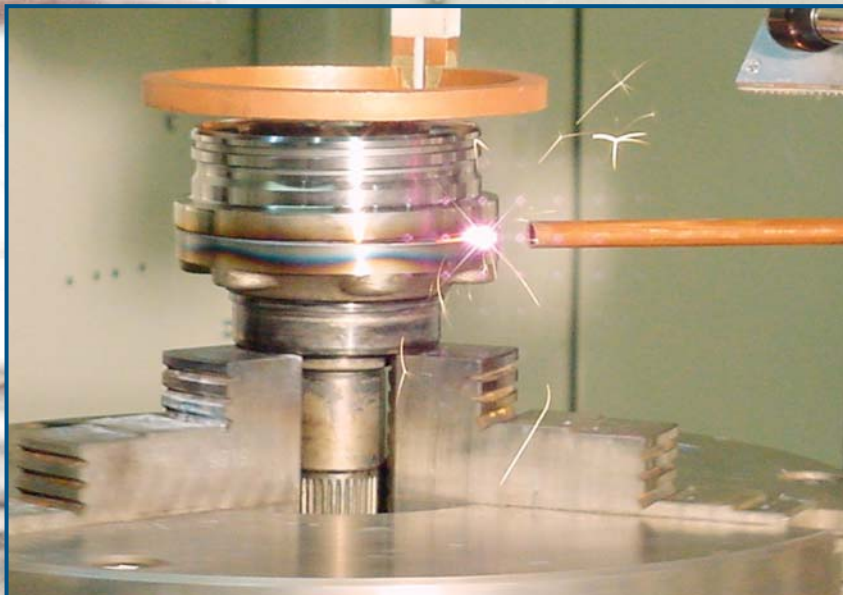
ben im Allgemeinen geringere Bartanhaftungen zur Folge. Die Separationslinie kann durch Veränderung der Fokusslage beeinflusst und mittels Optimierung der Düsenöffnung vollständig eliminiert werden.

Die Verbesserung der Systemtechnik, im speziellen Fall die Optimierung der Schneiddüsengeometrien, ermöglicht die Verringerung der Schnittkantenrauheit und die Herstellung qualitativ hochwertiger Konturschnitte. Mithilfe von optimierten Prozessparametern ist bei fast allen Materialien die gleiche Qualität der Schnittkanten wie mit dem CO<sub>2</sub>-Laser erreichbar. Beim Schneiden von Edelstahl können bis zu einer Blechstärke von 15 mm gratfreie Konturschnitte mit gleichmäßiger Riefenstruktur erzeugt werden (Bild 2). Die Rauigkeiten der Schnittkanten liegen bei  $R_z = 45 \mu\text{m}$ . ■

### Fazit: Künftig deutlich bessere Schnittkanten

Das Parameterfenster für einen guten Schnitt ist extrem klein. Die weitere Optimierung der Prozessparameter und der Systemtechnik wird in Zukunft eine deutlich bessere Schnittkantenqualität gestatten. Mit ihrer exzellenten Schneidleistung und -qualität sowie ihrer hohen Effizienz sind Faserlaser für das Laserstrahlschneiden metallischer Materialien mehr als eine Alternative zum bisher favorisierten CO<sub>2</sub>-Laser.





## Engspaltschweißen mit hohem Aspektverhältnis

### SCHNELLER UND TIEFER SCHWEISSEN MIT DEM FASERLASER

Welche neuen Möglichkeiten eröffnet die Strahlqualität der neuen Laserstrahlquellengeneration? Diese Frage lässt sich – zumindest für das Schweißen von Bauteilen mit größeren Wandstärken – auf den ersten Blick einfach beantworten: Es kann schneller und tiefer geschweißt werden.

**GUNTHER GÖBEL**  
**JENS STANDFUSS**  
**BERNDT BRENNER**

Nahttiefen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zeigt **Bild 1** – diese geben einen Richtwert, wie groß die zu verschweißende Wandstärke sein darf, wenn im I-Stoß geschweißt wird. Deutlich sichtbar ist, dass die hohe Strahlqualität des Faserlasers die erreichbare Nahttiefe signifikant steigert. So sind bis zu 10 mm Anbindung bei 4 kW problemlos möglich.

Ist jedoch aus metallurgischen oder geometrischen Gründen (Spalt) die Zugabe von Schweißzusatzwerkstoff (SZW) für die Applikation erforderlich, verringert sich auf den ersten Blick der Vorteil der hohen Strahlqualität, da sich die theoretisch erreichbare geringe Nahtbreite nun nicht mehr voll ausnutzen lässt. Stattdessen muss auch die Geometrie der Nahtvor-

bereitung (V- beziehungsweise Y-Naht oder Ähnliches) bei der angestrebten Nahtform beachtet werden. Aber auch in diesem Fall wird deutlich, dass eine hohe Strahlqualität neue Möglichkeiten bietet, konkret beim Verschweißen tieferer Querschnitte mittels Mehrlagenschweißen (siehe **INFO**-Kasten).

**Bild 2** zeigt den Querschnitt einer Mehrlagenschweißung bei einer Blechdicke von 20 mm. Wie man sieht, konnte das hohe Aspektverhältnis von Nahttiefe zu Nahtbreite, das vom Einzellagenschweißen bekannt ist, auch in diesem Fall beibehalten werden. Der Gesamtöffnungswinkel der Fuge (Y-Konfiguration) betrug 7°, der Stumpfstoßanteil im Wurzelbereich hatte eine Höhe von 5 mm.

Grundsätzlich kann damit gezeigt werden, dass sich durch Einsatz einer hohen Strahlqualität die postulierten Vorteile des Mehrlagen-Laserstrahlschweißens,

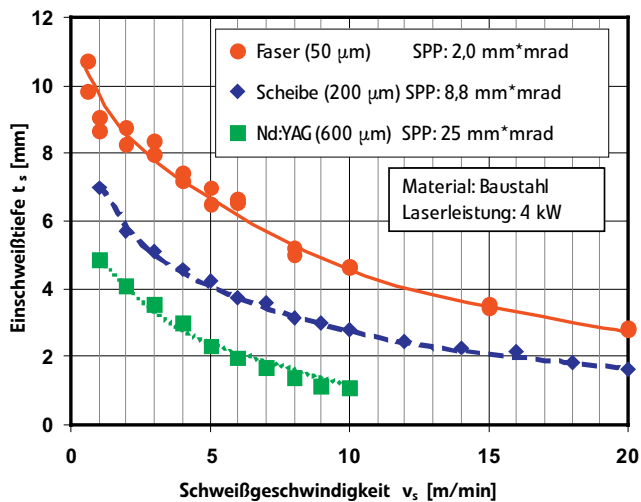
also geringer Wärmeeintrag, Verzug und Zusatzwerkstoffverbrauch, tatsächlich in einem derartigen Szenario mit 20 mm Blechdicke und nur 4 kW Laserleistung realisieren lassen.

Ziel der Untersuchungen war es auch, zu prüfen, ob auf eine Reinigung der Fugezone zwischen den Einzellagen verzichtet werden kann. Hier zeigte sich, dass bei ungereinigten Nähten Bindefehler auftreten können. Diese resultieren aus Oxid-/Zunderschichten, die sich während der Herstellung der ersten Lagen an den Sei-

#### KONTAKT

Dipl.-Ing. Gunther Göbel,  
Fraunhofer IWS Dresden,  
Tel. 03 51 /25 83 -2 11,  
Fax 03 51 /25 83 -3 00,  
gunther.goebel@iws.fraunhofer.de

## Einschweißtiefe

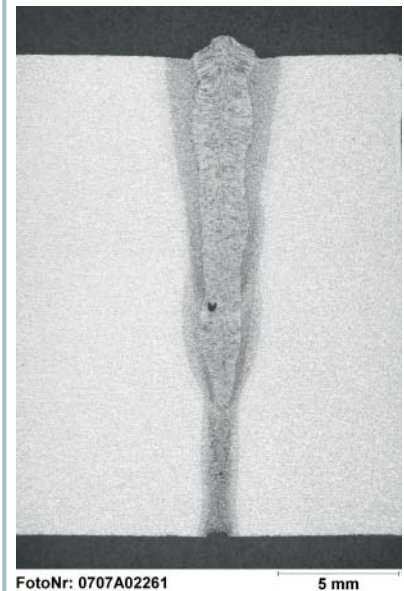


1 Vergleich der Einschweißtiefe verschiedener Laserstrahlquellen mit ihren bauartbedingten unterschiedlichen Strahlqualitäten

gelagen ein vollständiges Einschmelzen der Seitenwände erschweren. Je größer der Abstand des mittig in der Fuge stehenden Laserstrahls also zu den Seitenwänden ist, um so kritischer wird die Energiezufuhr dorthin, und die Bindefehlerrate erhöht sich.

Weiterhin wird mit zunehmender Nahttiefe die Zuführung des SZW ungenauer, da die außerhalb der Fuge stehende Düse nur

che Position des Drahtendes relativ zum Brennpunkt wird mehr und mehr durch (undefinierte) Krümmungen des freien Drahtendes verändert. Erleichternd wirken hier zwar die oben diskutierten sehr engen Fügespalte bei einem Faserlasereinsatz, welche die laterale Führung des Drahts im Spalt verbessern. Die vertikale Position ist weiterhin kritisch, bei zu hoch stehendem Draht kann somit das Drahtende am Laser



2 Beispielnaht einer faserlasergeschweißten Mehrlagen-Schweißnaht, Dicke: 20 mm, Laserleistung: 4 kW, Anzahl Lagen: 4, Schweißgeschwindigkeiten: Wurzellage 1,2 m/min, Fülllagen 0,6 m/min

vorbeilaufen, was Nahtfehler verursacht. Eine Methode zur sicheren Vermeidung dieser Probleme ist daher notwendig.

### Lösungsweg: Einsatz einer Strahlablenkoptik

Wird der Strahl gezielt quer zur Schweißrichtung abgelenkt, verbessert sich die Prozessfähigkeit signifikant, und die eben ▶

## INFO

## Grundlagen des Laserstrahl-Mehrlagenschweißens

Das Mehrlagen-Laserstrahlschweißen oder Engspaltschweißen hat den Vorteil, dass die vom Einzellagenverfahren her bekannte Nahttiefe gesteigert wird, ohne die Laserleistung und damit die Investitionskosten zu erhöhen. Dazu werden – ähnlich zu konventionellen Mehrlagenverfahren – mehrere Schweißlagen übereinandergelegt. Im Vergleich zu herkömmlichen Schweißverfahren ist die Investitionssumme für die Schweißenergiequelle zwar immer noch um mehr als eine Größenordnung höher; die deutlich verringerten Energieeinträge, die Automatisierbarkeit und die in der Regel höheren nominalen Schweißgeschwindigkeiten des Lasers eröffnen jedoch viele ökonomisch sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten.

Gegenüber den Laser-Hybrid-Verfahren ist neben der deutlich einfacheren Prozesseinrichtung (nur eine Energiequelle) der verringerte Winkelverzug der Nähte zu erwähnen, da die Hybrid-typischen sehr breiten Oberrauten vermieden werden. Im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen wirkt sich der deutlich vereinfachte Prozessaufbau (keine Vakuumkammer) und der Wegfall von Entmagnetisierungsschritten bei Stählen positiv

aus. Erfolgt die Drahtzuführung über eine Düse, die außerhalb der Schweißnahtfuge steht, kann auch die Breite der Fuge beziehungsweise ihr Öffnungswinkel stark eingegrenzt werden.

Beim Einsatz eines Lasers mit sehr hoher Strahlqualität kommt es dem Anwender zugute, dass sich mittels geeigneter Optik die Divergenz des fokussierten Strahls bei gleichwohl kleinem Fokusbereich drastisch reduzieren lässt. Der Querschnitt des Strahls oberhalb des Brennflecks wird damit verkleinert. Bei der Nahtvorbereitung kann folglich der Flankenwinkel der Schweißnahtfuge deutlich steiler gewählt werden. Wie eine Vergleichsrechnung in **Tabelle A** zeigt, sinkt bei faserlasertypischen Optiken der Strahldurchmesser an der Oberkante der Fuge so weit, dass er selbst für 40 mm tiefe Fugen noch im Bereich des Zusatzdrahtdurchmessers liegt. Die Nahtvorbereitung hinsichtlich der Fugenbreite ist damit nicht mehr vom Querschnitt des Laserstrahls abhängig, wie dies bisher, etwa bei Nd:YAG-Lasern, der Fall war. Bereits der zur Drahtzuführung benötigte Spalt reicht für die Einbringung des Faserlaserstrahls aus, siehe **Tabelle A**.



► genannten Probleme können bekämpft werden: Die Verweildauer des Laserstrahls quer zur Schweißrichtung kann nun eingestellt werden, sodass die Spaltkanten direkt aufgeschmolzen werden, was Bindefehler vermeidet. Auch das normalerweise durch die Konvektion bestimmte V-förmige Schmelzbadprofil kann nun durch gezielte Einstellung der Energieverteilung beeinflusst werden. Zusätzlich wird die Zuführung des SZW stabilisiert, da der schnell bewegte Strahl den Zusatzdraht auch dann trifft, wenn dieser nicht ideal in der Nahtmitte läuft.

Die Möglichkeiten einer Strahlablenkung werden ebenfalls durch den Einsatz eines Lasers mit hoher Strahlqualität erweitert: Mit steigender Strahlqualität

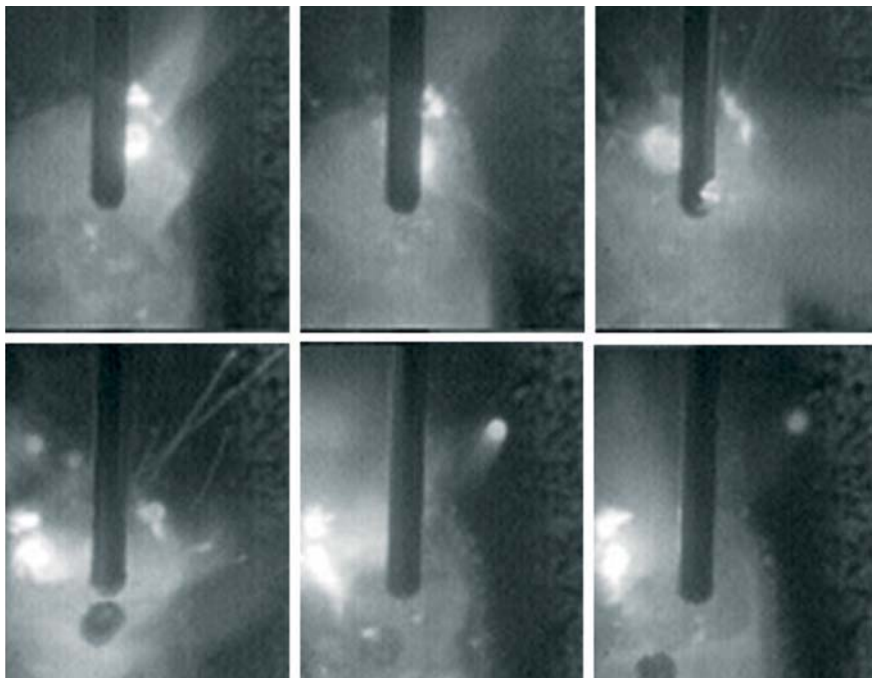
sinkt der Rohstrahldurchmesser, der zum Erreichen einer bestimmten Brennfleckgröße erforderlich ist (siehe **Tabelle A**). Kleinere Rohstrahldurchmesser wiederum ermöglichen kleinere und damit schneller bewegbare Strahl-Ablenkspiegel. Eine Adaption der Auslenkung des Strahls erlaubt hier zum einen eine Anpassung an die sich ändernde Fugenbreite mit zunehmender Lagenanzahl, aber auch einen Ausgleich von fertigungstoleranzbedingten Änderungen der Fügespaltbreite.

## Ergebnisse im Überblick

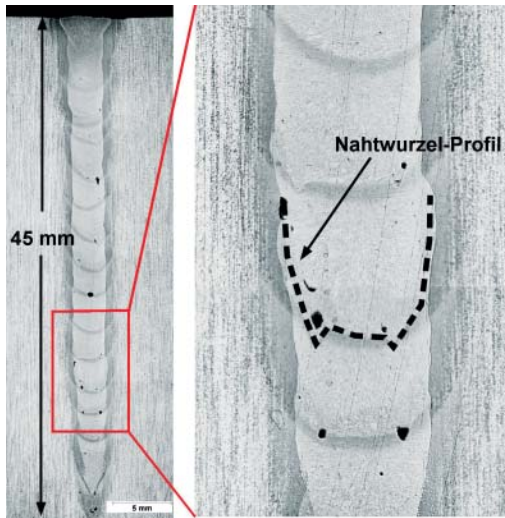
Versuche mit einem 4-kW-Faserlaser (Strahlparameterprodukt  $< 2 \text{ mm mrad}$ ) an Bau-

Typ	Nd:YAG-Laser	Faserlaser
Wellenlänge	1064 nm	1070 nm
Strahlqualität	25 mm mrad	$\leq 2 \text{ mm mrad}$
Typische Kollimationsbrennweite	200 mm	90 mm
Rohstrahldurchmesser	30 mm	10 mm
Typische Fokussierbrennweite	250 mm	500 mm
Brennfleckdurchmesser	0,75 mm	<b>0,31 mm</b>
Strahldurchmesser in 20 mm Höhe über Brennfleck	2,77 mm	<b>0,53 mm</b>
Strahldurchmesser in 40 mm Höhe über Brennfleck	5,38 mm	<b>0,93 mm</b>

**A** Vergleich der Strahlquerschnitte oberhalb des Fokuspunkts als Ausgangspunkt für eine laserstrahlgerechte Fugengeometrie beim Laserstrahl-Mehrlagenschweißen



**4** Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme der SZW-Zufuhr bei pendelndem Laserstrahl, das Drahtende wird durch den vorbeilaufenden Laser tropfenweise ›portioniert‹ abgeschmolzen (›Sprühprozess‹), was die Reproduzierbarkeit der Zuführung erhöht



**3** Beispielnah mit 45 mm Nahttiefe zur Demonstration der Möglichkeiten einer Kombination aus Mehrlagenschweißen und einer schnellen Strahlableitung. Material: Baustahl, Laserleistung: 4 kW, Anzahl Lagen: 15, Schweißgeschwindigkeiten: Wurzellage 1,2 m/min, Fülllagen 0,4 m/min

stahlproben mit Nahttiefen zwischen 20 und 45 mm zeigen, dass der Gesamtöffnungswinkel des Spalts auf unter 7° reduziert werden kann, siehe Bild 3. Auch die Anpassung der Energieverteilung an die Fugenbreite war realisierbar, siehe Detail in Bild 3. An der Fugenwand abgelagerte Oxid- oder Zunderschichten wurden dadurch direkt aufgeschmolzen.

Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen haben weiterhin gezeigt, dass mittels Strahloszillation eine vertikale Fehlposition des Drahts unkritisch wird: Bei zu hoch eingestelltem Draht kann dieser nicht am Prozess vorbeilaufen. Das Drahtende wird stattdessen automatisch vom querpendelnden Strahl ›portioniert‹; es entsteht quasi ein Sprühprozess, siehe Bild 4. Die Größe der Tropfen ist dabei über das Verhältnis von Ablenkfrequenz und Drahtvorschub direkt einstellbar. ■

### Fazit: Effizienter schweißen

Die Kombination aus Faserlaser, Strahloszillation und Engspalt verbessert die Effektivität und Prozessfähigkeit beim Schweißen von großen Anbindequerschnitten im Mehrlagenverfahren. Damit ist es möglich, Nähte mit hohen Aspektverhältnissen auch bei Nahttiefen > 20 mm zu erreichen.

Ein zusätzlicher Vorteil ist der hohe Wirkungsgrad eines Faserlasers, was eine mobile Anwendung dieser Technologie erlaubt, da eine mobile Kühlung im genannten Leistungsbereich (4 kW) problemlos möglich ist.

## PERSONEN | FIRMEN | INSERENTEN

### PERSONEN

Ancona, Antonio	15
Böhme, Steffen	4
Brenner, Berndt	20
Eberhardt, Ramona	4
Eschrich, Tina	4
Gnann, Rüdiger	8
Göbel, Gunther	20
Hannweber, Jan	10
Himmer, Thomas	18
Klotzbach, Annett	8
Kühn, Stefan	10
Limpert, Jens	15
Lütke, Matthias	18
Morgenthal, Lothar	8
Nolte, Stefan	15

### PERSONEN

Rademaker, Katja	15
Röser, Fabian	15
Schreiber, Thomas	4
Standfuss, Jens	20
Techel, Anja	2
Tünnermann, Andreas	4, 15
Wirth, Christian	4

### FIRMEN + INSERENTEN

Arnold GmbH & Co. KG Ravensburg	23
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden	3, 17
Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF	3

Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München	14
Newport Spectra-Physik GmbH, Darmstadt	24
Primes GmbH, Pfungstadt	17
Scanlab	16
SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz	15
Vytran	6

**SCHWARZ:** redaktionelle Erwähnungen  
**BLAU:** Inserenten

## IMPRESSUM

›Spezial Faserlaser‹ ist eine Publikation des Fraunhofer IWS, Dresden, und des Fraunhofer IOF, Jena.

Tel.: +49/89/9 98 30-0, Fax: -623, www.hanser.de

### ■ Herausgeber

Dr. Ralf Jäckel (verantwortlich), Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Tel. +49 (0) 3 51 /25 83 -3 24, Fax +49 (0) 3 51 /25 83 -3 00, www.iws.fraunhofer.de

### ■ Geschäftsführung

Wolfgang Beisler, Stephan D. Joß  
Michael Krüger

### ■ Verlagsleitung

Michael Himmelstoß

### ■ Anzeigenleitung

Anzeigenleiter: Rolf Hörr (verantw.), Tel.: +49/89/9 98 30-215  
Anzeigenverkauf: Elisabeth Bartsch, Tel.: +49/89/9 98 30-210  
Disposition: Regina Laszuk, Tel.: +49/89/9 98 30-209

### ■ Chefredaktion

Dr. Matthias Laasch

### ■ Verlag

Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Kolbergerstraße 22, D-81679 München oder Postfach 86 04 20, D-81631 München,

### ■ Herstellungsleitung

Hadrian Zett, Tel.: +49/89/9 98 30-420

### ■ Layout und Herstellung

Michael Georgi (Layout), Thomas Herbig (Herstellung), Tel.: +49/89/9 98 30-415

### ■ Druck

Druck und Bindearbeiten: Sellier Druck GmbH, Angerstraße 54, D-85354 Freising. Printed in Germany.

### ■ Urheber- und Verlagsrecht

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der durch das Urheberrechtsgesetz festgelegten Grenzen ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig.

**HANSER**

© Carl Hanser Verlag, München 2008



**arnold**  
RAVENSBURG

Gottlieb-Daimler-Straße 29  
88214 Ravensburg  
Tel. +49 (0) 751 36169-0  
www.arnold-rv.de

LASERSYSTEMTECHNIK  
SONDERMASCHINEN  
VORRICHTUNGEN



**Bearbeitungsoptik** für Faserlaser  
adaptierbar an patentierten **Teleskoproboter**

# Bright Solutions from Newport

## ProLite® Xt High Brightness Diode Lasers



Introducing the brightest advancements in fiber coupled diodes from Newport - the new Spectra-Physics ProLite® Xt High Brightness Family. These new diode lasers offer the next generation of high brightness and high power vital for your fiber laser needs.

The new ProLite Xt High Brightness Family includes: the Orion™ laser, delivering compact size and maximum power – 20 W out of 105 m fiber. The Cygnus™ fiber coupled stacked array, providing the highest brightness of any fiber coupled diode at 200 W out of a 200 m fiber. And, the Corvus™ fiber coupled bar, ensures a complete selection of brightness, delivering 35 W out of 100 m fiber.

[www.newport.com/ProLiteXt](http://www.newport.com/ProLiteXt)

### Belgium

Tel: 0800-11 257  
e-mail: [belgium@newport.com](mailto:belgium@newport.com)

### France

Tel: +33 (0)1.60.91.68.68  
e-mail: [france@newport.com](mailto:france@newport.com)

### Germany

Tel: +49 (0) 61 51 / 708 – 0  
e-mail: [germany@newport.com](mailto:germany@newport.com)

### Netherlands

Tel: +31 (0)30 659 21 11  
e-mail: [netherlands@newport.com](mailto:netherlands@newport.com)

### United Kingdom

Tel: +44 (0)1235 432710  
e-mail: [uk@newport.com](mailto:uk@newport.com)



## Newport Fiber Lasers



By combining our extensive experience in fiber laser technology with our new ProLite Xt High Brightness diode lasers, we have created the next advancement in laser technology – the Newport Fiber Laser.

Our new single mode CW infrared fiber lasers deliver up to 200 W of output power and provide a unique combination of power and beam quality, ruggedness and reliability. The lasers are designed to industry requirements with standard interfaces ensuring ease of integration.

With modulation frequencies up to 50 kHz, the Newport Fiber Lasers are ideal for high precision applications such as cutting of metals and non-metals, spot and seam welding, metal sintering for rapid prototyping as well as reprographics and flexography.

[www.newport.com/fiberlaser](http://www.newport.com/fiberlaser)

For more information about Newport's Fiber Lasers, ProLite Xt High Brightness diode lasers or any of our other bright new solutions and services for the industrial markets, please call us.

 **Newport**  
Experience | Solutions

 **Spectra-Physics**  
A Division of Newport Corporation

MAKE LIGHT | MANAGE LIGHT | MEASURE LIGHT

AD-010818-EN