

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit

von Dr.-Ing. Axel Heß
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. nat. Wolfgang Osten
Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2012

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2012

ISBN 978-3-8316-4198-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Verzeichnis der Symbole	7
Kurzfassung der Arbeit	11
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	17
1.2 Aufbau der Arbeit.....	19
2 Grundlagen und Stand der Technik	20
2.1 Das Laserstrahlschweißen	20
2.1.1 Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Werkstoff.....	20
2.1.2 Vorteile stark fokussierbarer Laserstrahlung.....	29
2.1.3 Materialtransport und Strömungsfelder im Schmelzebad	32
2.2 Wirkungsgrade beim Tiefschweißen.....	35
2.3 Eigenspannungen und Verzug bei Stahlwerkstoffen	37
2.3.1 Simultane Wärmeeinbringung zur Verzugsminimierung	41
2.3.2 Minimale Wärmeeinbringung zur Verzugsminimierung.....	42
3 Verwendete Systemtechnik	43
3.1 Bearbeitungsstation	43
3.2 Spannmittelkonzeption	44
3.3 Verwendete Strahlquellen	47
3.4 Strahldiagnostik zur Werkzeugcharakterisierung	50
3.4.1 Ermittlung absoluter Messwerte im stationären Zustand	50
3.4.2 Ermittlung des Fokus-Shifts in Abhängigkeit von der Zeit.....	59
3.4.3 Auswirkungen auf das Laserstrahlschweißen.....	66
3.4.4 Referenzprozess zur Optik- und Prozessqualifizierung.....	69

4	Verzugsarmes Laserstrahlschweißen	80
4.1	Verzugsbestimmung bei Schweißproben	80
4.2	Verzugsminimierung durch höhere Vorschubgeschwindigkeit	84
4.3	Verzugsminimierung durch kleinere Fokusbereich	85
4.4	Verzugsminimierung durch kleinere Divergenzwinkel.....	87
4.5	Zusammenfassung Verzugsminimierung	90
5	Schmelzebadströmungen beim Hochgeschwindigkeitsschweißen	91
5.1	Externe Beobachtung mit Hochgeschwindigkeitskameras	91
5.2	Interne Beobachtung mittels Indikatormaterial	98
5.2.1	Auswahl des Indikatormaterials	98
5.2.2	Durchführung der Schweißversuche mit Indikatormaterial	99
6	Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen	109
6.1	Eigenschaften von Kupferwerkstoffen	109
6.2	Beschränkungen beim Schweißen von Kupferwerkstoffen	112
6.3	Schweißnahtgeometrien bei Kupferwerkstoffen	121
6.4	Absorptionserhöhung durch „grüne“ Laserstrahlquelle	126
7	Zusammenfassung	137
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	141
	Danksagung	153

Kurzfassung der Arbeit

Die Vorteile einer sehr guten Fokussierbarkeit von Scheiben- und Faserlaser lassen sich auf verschiedene Art und Weise nutzen. Kleinere Fokusedurchmesser und die daraus resultierenden hohen Intensitäten ermöglichen einen Tiefschweißprozess bei sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Für den industriellen Einsatz ist vor allem eine reproduzierbare hohe Qualität des bearbeiteten Bauteils entscheidend. Schädigungen, wie insbesondere der Verzug, sollen so weit wie möglich reduziert werden. Untersuchungen zeigen, dass bei einer konstanten Einschweißtiefe mit einem kleineren Fokusedurchmesser, einer höheren Vorschubgeschwindigkeit und einem kleineren Divergenzwinkel der Verzug stark reduziert werden kann.

Der Vorteil einer sehr guten Strahlqualität kann auf der anderen Seite sehr hohe Intensitäten in den Schweißoptiken mit sich bringen. Durch Absorptionen im Bulkmaterial und den Beschichtungen kommt es zu thermischen Effekten und somit zu einer Verschlechterung der Strahlqualität und zu einem Fokus-Shift. Diese können so gravierend sein, dass Auswirkungen auf den Schweißprozess einhergehen. In der vorliegenden Arbeit wurden mit hochwertiger und komplexer Messausrüstung transiente und stationäre Strahlqualitätsmessungen an Schweißoptiken durchgeführt. Ein neuentwickeltes und neuartiges Verfahren ermöglicht eine einfache Qualifizierung von Optiken. Der sogenannte „Referenzprozess“ macht dazu Veränderungen der Intensität bzw. der Intensitätsverteilung auf dem Werkstück sichtbar, die zu unterschiedlichen Schweißergebnissen führen und sich mittels Messschieber einfach auswerten lassen.

Ein weiterer Vorteil der hohen Intensitäten von im infraroten emittierenden Laserstrahlquellen ist die Bearbeitung von Kupferwerkstoffen im Dauerstrichbetrieb. Dabei lassen sich mehrere Millimeter Einschweißtiefe erreichen. Eine Herausforderung stellt die geringe Absorption von gerade einmal 5 % zu Prozessbeginn dar. Starke Rückreflexe können dabei zu Schädigungen in den optischen Komponenten führen. Durch die Verwendung von frequenzverdoppelten Lasersystemen kann die Absorption etwa siebenfach werden, so dass Rückreflexe reduziert werden. Diese neuartigen im „grünen“ emittierenden cw-Laser sind in ihrer Leistung noch stark begrenzt, weshalb in dieser Arbeit ein Kombinationsprozess realisiert wurde, mit dem höhere Einschweiß-tiefen möglich werden und der Vorteil der kürzeren Wellenlänge deutlich wird.

Extended Abstract

New developments in diode-pumped fibre lasers and disc lasers open up opportunities for completely new process strategies as a result of their incomparable focusability at high laser power. This yields unprecedented beam parameter quotients (power divided by focus diameter) which are needed for high welding velocities. In addition this allows deep penetration welding in highly reflective materials such as copper. The laser sources used for this work were fibre coupled allowing high accessibility and flexibility as well as lower costs for the handling devices. Another important property of shorter wavelengths is the generally increased absorptivity in metals. With the use of 1 μm lasers instead of CO_2 lasers, an increase of absorptivity has already been attained. A further improvement of the absorptivity, especially in copper material, can be achieved by using laser sources in the visible range. This kind of novel laser sources, which have not been available so far, goes along with new possibilities in material processing.

For industrial application the above mentioned advantages can be exploited in high efficiency processes. The small interaction zones enable deep penetration welding with less distortion of the workpiece. The joint geometries of thin samples of less than one millimeter have never been achievable before and were therefore never examined in the past. The minimization of distortion through minimizing the heat input is clearly shown in this work. For this purpose samples of stainless steel with a thickness of 500 μm were used. The distortion angle (averaged angle of the distorted workpiece adjacent the weld seam) was measured with a surface topography system. Therewith a comparison of different welding parameters could be performed. Three laser sources with different beam qualities were used for the investigations. Different focal diameters in the range from 14 μm to 200 μm were achieved with different focusing arrangements. A reduction of the distortion angle was demonstrated for:

- Smaller focus diameter;
- Higher processing speeds (up to 50 m/min);
- Smaller divergence angle of the laser beam.

In doing so the penetration depth of welds was kept constant. The above mentioned three parameters directly reduced the cross-sectional area of the weld seam and therefore resulted in a smaller distortion angle.

Due to the decreasing focal diameters new clamping devices with a high position accuracy had to be developed. A magnetic clamping device fulfilling this demand was constructed and manufactured.

However, high average power very often causes thermal beam distortion inside transmitting optical elements. This effect is especially pronounced in contaminated optics. It results in a significant decrease of the beam quality and a shortening of the effective focal length, also referred to as focus shift. Both effects directly modify the laser spot size and thus the intensity on the workpiece. This is very critical for most laser material processing applications. Especially welding of highly reflective materials such as copper is very sensitive to changes in the laser intensity. To prevent process failures, the focus shift and also the beam quality have to be measured behind the optical components.

Static as well as transient measurements showed that the focus shift and the degraded beam quality directly reduce the intensity on the workpiece. In addition the power which is absorbed, reflected, and scattered in the optical components also reduces the intensity on the workpiece. Reductions of the intensity on the workpiece of up to 88 % were measured. The remaining 12 % obviously are not sufficient to allow a stable welding process. These results imply that the use of appropriate and very clean processing optics is mandatory for a reproducible and stable welding process.

The above mentioned measurements require very expensive and complex measurement equipment. In this work, a novel and simple method is presented, which uses the welding process itself to quantitatively determine the focus shift. The so-called "reference process" was developed, which takes benefit of the dependence of the deep penetration welding threshold on the beam diameter. After a defined preheating time in order to control the thermal load of the optics, a weld trace of a few centimeters is generated in a sample by applying a laser power ramp. The position of the transition from heat conduction welding to deep penetration welding is easily noticeable by visual inspection of the seam width on the workpiece surface. This allows measuring it with a simple caliper, yielding the threshold transition power. By the outcome of four different welds with suitably varying laser parameters, the focus shift can be calculated with appropriate accuracy. With this method, a new and easily applicable tool is available. This is an important requirement for a reproducible and stable welding process and even holds for changing conditions, as e. g. slowly contaminated safety glasses.

Presuming correct conditions of the laser beam on the workpiece, also highly reflective materials can be welded by the means of highly brilliant 1 μm laser beams. With

the use of 1 μm lasers the absorptivity can be increased from about 1 % to about 5 % in copper material at room temperature as compared to CO₂-lasers. Using high-power 1 μm lasers this absorptivity increase guarantees that enough energy absorbed for starting a deep penetration welding process. In addition the absorptivity of copper increases with temperature and even shows a large step in absorptivity at the phase transition from solid to liquid from about 8 % to about 13 %. When the processing optics are not aligned and shielded correctly, the large amount of back reflected laser light causes severe damage somewhere in the optics chain. This happens especially at the process start. To control the process start condition, the absorptivity was increased by coupling more laser power in the copper material. This was done by using a beam source with a once more shorter wavelength. A frequency-doubled thin-disk laser with a wavelength of 515 nm and a maximum average output power of 100 W was available for the experiments presented here. At this wavelength, the absorptivity for the “cold” copper material is more than seven times higher as compared to the infrared (IR) laser beam. However, due to the limited power the penetration depth of pure copper welds was only about 100 μm , which is not sufficient for most industrial applications. Therefore, a commercial thin-disk laser ($\lambda = 1030 \text{ nm}$) and the frequency doubled thin-disk laser were combined allowing a so-called hybrid process. The preceding green laser beam with a focal diameter of 25 μm was used to heat up, melting and forming a small keyhole on the surface of the copper material. The IR laser beam was focused onto the workpiece to a diameter of 100 μm and the distance between the two laser beams was adjusted to 100 μm . The large distance was chosen so that there was no interaction between the keyhole created by the green laser beam and the interaction region of the IR beam. Numerical simulation of these conditions showed an increase of absorptivity in the interaction zone of the IR beam from 5 % to about 11 %. Under these conditions the IR beam interacted with the preheated material which leads to an enhanced absorptivity and a lower threshold for deep penetration welding. Welding experiments confirmed the predictions.

For the described hybrid process two laser sources as well as two very accurately aligned processing heads were necessary. The high complexity of the optical arrangement and the resulting high cost make the hybrid process only reasonable for specific industrial applications. Nevertheless, the encouraging results using the hybrid process suggest further research on laser sources providing - at least at the process start - enough “green” laser power to force well-controlled deep penetration welding in copper materials.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Neuentwicklungen im Bereich der Scheiben- und Faserlaser ermöglichen aufgrund bisher unerreichter Fokussierbarkeiten und hohen Laserleistungen immer schnellere Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Inzwischen werden Singlemode Faserlaser mit einer Ausgangsleistung von bis zu 10 kW angeboten und ein Ende der Leistungssteigerung ist aus heutiger Sicht nicht abzusehen.

Es stehen demnach nahezu beugungsbegrenzte Laserstrahlquellen im Multikilowattbereich zur Verfügung, deren Strahlen sich auf wenige Mikrometer Fokusedurchmesser fokussieren lassen. Weitere Vorteile der guten Strahlqualität zeigen sich vor allem in der Möglichkeit, kompaktere Optiken zu verwenden oder größere Arbeitsabstände zwischen Optik und Werkstück umzusetzen. Je nach Anwendung können somit sehr hohe Intensitäten auf dem Werkstück und den optischen Elementen auftreten. Kleinste Absorptionen in der jeweiligen Beschichtung und im Substratmaterial führen zur Erwärmung der Optikkomponenten, die dadurch auftretenden thermischen Effekte führen zu einer zeitlichen sowie räumlichen Veränderung der Intensitätsverteilung am Werkstück. Eine Qualifizierung der verwendeten Optiken ist deshalb die Voraussetzung für einen stabilen, ergebniseffizienten Schweißprozess. Neben kommerziell erhältlichen Messinstrumenten wird in dieser Arbeit ein neues Verfahren vorgestellt, mit welchem sich die Auswirkungen einer Intensitätsänderung ohne komplexe und kostenintensive Messgeräte ermitteln lassen. Als Hilfsmittel werden lediglich eine präparierte Schweißprobe aus Aluminium und ein Messschieber benötigt. Das Verfahren nutzt dabei den Übergang vom Wärmeleitungs- in das Tiefschweißen so aus, dass anhand von mindestens vier Schweißungen der Fokus-Shift bestimmt, beziehungsweise der Zustand der Optiken beschrieben werden kann.

Neben der Werkzeugcharakterisierung soll in dieser Arbeit untersucht werden, inwiefern sich eine bessere Fokussierbarkeit und somit ein kleinerer und symmetrisierter Wärmeeintrag, durch Unterdrückung oder Behinderung von metallurgischen Vorgängen auf den Bauteilverzug auswirkt. Dieser Aspekt ist für den industriellen Einsatz entscheidend, da er Wegbereiter für viele neue Anwendungen sein wird. Vor allem durch die großen Aspektverhältnisse wird das Laserstrahlschweißen dem Elektronen-

strahlschweißen in vielen Anwendungen zukünftig Konkurrenz bereiten bzw. es substituieren.

Des Weiteren erlauben die hohen Intensitäten auf dem Werkstück einen Tiefschweißprozess in Materialien mit einem relativ kleinem Absorptionsgrad wie zum Beispiel in Kupfer. Dies eröffnet den jeweiligen Laserstrahlquellen einen weiteren Markt in einem Bereich, der bisher von gepulsten Systemen bedient wurde. In dieser Arbeit sollen die Verfahrensgrenzen für das Laserstrahliefschweißen in verschiedene Kupferwerkstoffe diskutiert werden. Neben der Weiterentwicklung von nahezu beugungsbegrenzten Scheiben- und Faserlasern mit Wellenlängen im 1 Mikrometerbereich werden frequenzverdoppelte Laserstrahlquellen entwickelt, welche ebenfalls beugungsbegrenzte Strahlung im Dauerstrichbetrieb von mehreren 100 W im grünen Spektralbereich emittieren. Die mit der kürzeren Wellenlänge einhergehende Absorptionserhöhung in Metallen zeigt sich dabei vor allem an Kupferwerkstoffen, an denen für den kalten Werkstoff eine verbesserte Absorption um etwa Faktor sieben zu erwarten ist. Wegen der geringen zur Verfügung stehenden Leistungen können mit diesen Systemen nur wenige hundert Mikrometer Einschweißtiefe erreicht werden, so dass eine Kombination aus einer im grünen und einer im infraroten emittierenden Strahlquelle notwendig wird. Damit können die Vorteile beider Strahlquellen für einen optimierten Tiefschweißprozess in Kupferwerkstoffen genutzt werden.

Neben der Bearbeitung des Werkstoffes Kupfer erlauben die sehr gut fokussierbaren Laserstrahlquellen eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit auch beim Fügen von Edelstählen von bisher etwa 5 m/min auf bis zu 100 m/min. Zu erwarten ist dabei, dass sich die Dynamik des Schmelzbadetes ändert. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im visuellen Bereich zeigen auf, ob aktuelle Prozessmodelle für Hochgeschwindigkeits-schweißungen gültig sind oder modifiziert werden müssen. Neben der Betrachtung der Schmelzbadoberflächen mit Hochgeschwindigkeitskameras soll mit Hilfe von Indikatormaterialien ein Einblick in das Probeninnere ermöglicht werden. Der Transport dieser Tracerpartikel bis zur Erstarrung der Schmelze lässt einen Rückschluss auf die Schmelzeströmungen während des Schweißprozesses zu. Zudem wird ein Modell der Schmelzeströmungen bei hohen Geschwindigkeiten ($v = 60$ m/min) und einem kleinen Fokusbereich von $d_f = 50$ μm ermöglicht.

1.2 **Aufbau der Arbeit**

In der vorliegenden Arbeit werden die Vorteile und Herausforderungen für das Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit aufgezeigt. Diese lassen sich nicht auf ein Themengebiet begrenzen so dass in Kapitel 2 die für die Zielsetzung der Arbeit notwendigen Grundlagen aufgeführt werden.

In Kapitel 3 wird auf die verwendete Systemtechnik eingegangen. Dazu gehören neben der Ausführung der verwendeten Laserstrahlquellen, die Entwicklung eines für Dünneblech geeigneten Magnetspannmittels, eine Bearbeitungsstation welche hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten ermöglicht und eine ausführliche Werkzeugcharakterisierung. Bei der Charakterisierung des Laserstrahls werden stationäre und transiente Messungen aufgeführt und die Auswirkungen auf den Laserstrahlschweißprozess bei Verwendung ungeeigneter Optiken beschrieben. Das Kapitel endet mit der Beschreibung des neu entwickelten Referenzprozesses, mit welchem ohne kostenintensive Messausrüstung Optiken qualifiziert werden können.

Ein großer Vorteil der guten Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen zeigt sich in der Reduzierung des Verzugs. In Kapitel 4 wird anhand von Edelstahlproben der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit, des Fokusdurchmessers und des Divergenzwinkels auf den Verzug diskutiert und am Ende des Kapitels zusammengefasst.

In Kapitel 5 wird ein Schmelzeströmungsmodell für kleine Fokusdurchmesser bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten erarbeitet, dabei wird zum einen die Schmelzbadoberfläche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera erfasst und ausgewertet. Zum anderen kann mit Hilfe von Indikatormaterial und dessen Verteilung nach dem Schweißprozess der Schmelzefluss rekonstruiert werden.

Die Bearbeitung von Kupferwerkstoffen und die sich ergebenden Einschränkungen werden in Kapitel 6 diskutiert. Neben den Eigenschaften der verwendeten Kupferwerkstoffe wird mit Hilfe von Röntgenaufnahmen die Entstehung einer tropfenförmigen Nahtgeometrie bei hohen Vorschüben erklärt. Anschließend werden die Vorteile einer grünen Strahlquelle aufgeführt. Am Kapitelende wird die Zusammenschaltung eines grünen und eines IR-Lasers zu einem „Hybridprozess“ beschrieben und die sich ergebenden Vorteile aufgezeigt.

Abschließend werden in Kapitel 7 die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißtauglichkeit von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-8

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-4

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspansung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötlens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fert-igungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im
infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung
von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-
symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebe-
bau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum
Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den
resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung
von Schmelzablagerungen beim
Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim
Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen
höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7