

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen mittels reduzierter Modelle

von Dr.-Ing. Florian Fetzner
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

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., 2020

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2020

ISBN 978-3-8316-4874-0 (gebundenes Buch)
ISBN 978-3-8316-7606-4 (E-Book)

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Formelzeichen und Abkürzungen	8
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	17
1 Einleitung.....	20
1.1 Motivation	20
1.2 Aufbau der Arbeit.....	22
2 Grundlagen und Stand der Technik	24
2.1 Grundlagen des Laserstrahl-tiefschweißens	24
2.2 Entwicklung der Laserstrahlquellen	27
2.3 Modellierung des Laserstrahl-tiefschweißens	28
2.3.1 Herausforderungen und Modelle	28
2.3.2 Verwendete Berechnungsmethoden	34
2.3.2.1 Raytracing	34
2.3.2.2 Smoothed Particle Hydrodynamics.....	36
2.4 Diagnostik der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen	39
2.4.1 Online-Röntgenvideographie.....	39
2.4.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in transparenten Medien	42
2.4.3 Optische Kohärenztomographie	44
3 Stationäre Modellierung der Kapillartiefe	46
3.1 Ziele und Ansatz.....	46
3.2 Modellierungsschema.....	48
3.2.1 Berechnete Geometrien.....	48
3.2.2 Physikalisches Wärmeleitungsmodell	50
3.2.3 Iterationsschema	53

3.3	Implementierung.....	56
3.4	Validierung und Anwendung.....	56
3.5	Diskussion und Ausblick.....	60
4	Transiente Modellierung der Kapillartiefe mit einem analytischen Ansatz	62
4.1	Ziele und Vorgehen	62
4.2	Methodik.....	63
4.2.1	Mathematischer Ansatz.....	63
4.2.2	Experimentelle Kalibrierung.....	68
4.2.3	Quantifizierung der Kapillardynamik	69
4.3	Anwendung.....	72
4.4	Limitierungen und Diskussion.....	74
4.5	Zusammenfassung und Fazit	76
5	Intrinsische Fluktuationen der Kapillartiefe	78
5.1	Das Spikingphänomen.....	79
5.2	Experimenteller Aufbau	80
5.3	Einfluss der Prozessstabilität auf das Spiking	82
5.4	Modellbasierte Untersuchung des Spikings	94
5.4.1	Absorbierte Bestrahlungsstärke in der Kapillare	94
5.4.2	Der Spikingmechanismus.....	97
5.4.3	Verifikation mittels multiphysikalischer Simulation	98
5.5	Experimentelle Validierung.....	106
5.5.1	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Spikingfrequenz	106
5.5.2	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Kapillarstabilität.....	107
5.6	Zusammenfassung und Fazit	109
6	Kapillargeometrie und Nahtqualität bei hohen Vorschüben und Laserleistungen	110
6.1	Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen von Aluminium	111
6.2	Einfluss des Vorschubs auf die Geometrie und Stabilität der Kapillare	113
6.2.1	Experimenteller Aufbau.....	113
6.2.2	Rekonstruktion der Kapillargeometrie.....	114
6.2.3	Ergebnisse	118

6.2.3.1	Instabile Kapillargeometrie bei niedrigen Vorschüben	118
6.2.3.2	Stabile Kapillargeometrie bei hohen Vorschüben	124
6.2.4	Diskussion	130
6.3	Einfluss des Vorschubs auf den Prozesswirkungsgrad	132
6.3.1	Wärmeleitungsmodell zur Berechnung des thermischen Wirkungsgrades	133
6.3.2	Messung und Berechnung des Prozesswirkungsgrades	137
6.4	Implementierung	140
6.4.1	Experimenteller Aufbau	140
6.4.2	Porenreduktion und Stabilität der Einschweißtiefe	141
6.4.3	Reduzierung des kritischen Randabstands bei Nahtmittenrissen	143
6.4.4	Limitierung	147
6.5	Zusammenfassung und Fazit	148
7	Zusammenfassung	150
	Literatur- und Quellenverzeichnis	153
	Danksagung	169

Kurzfassung der Arbeit

Beim Laserstrahl-tiefschweißen haben Geometrie und Stabilität der Dampfkapillare einen entscheidenden Einfluss auf die Einschweißtiefe und die resultierende Nahtqualität. In der vorliegenden Arbeit werden Modelle und experimentelle Untersuchungsmethoden vorgestellt, mit denen die Kapillargeometrie stationär sowie zeitabhängig prognostiziert und die Stabilität der Kapillargeometrie analysiert werden kann. Die dargestellten Untersuchungen sind in vier Kapitel gegliedert, welche die Beschreibung und Untersuchung der Kapillargeometrie zunehmend detaillierter gestalten, motiviert durch Erkenntnisse im jeweils vorangegangenen Schritt. Diese behandeln die folgenden Aspekte:

- Die Schätzung der Kapillartiefe mit einem iterativen Wärmeleitungsmodell beim Laserstrahlschweißen mit konstanten Prozessparametern,
- die analytische, transiente Beschreibung der Kapillartiefe beim Schweißen mit zeitabhängiger Laserleistung,
- die experimentelle und theoretische Untersuchung von inhärenten Fluktuationen der Kapillargeometrie und
- die Untersuchung der Kapillargeometrie, Kapillarstabilität und Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen mit hohen Vorschüben und Laserleistungen.

Bei der Modellierung des Laserstrahlschweißens muss der Zielkonflikt zwischen Detaillierungsgrad und Präzision sowie benötigten Rechenressourcen gelöst werden. Die in dieser Arbeit dargestellten Methoden wurden vor diesem Gesichtspunkt entwickelt. Sie sind auf die Abbildung der physikalischen Effekte reduziert, welche zur Analyse der relevanten Wirkmechanismen notwendig sind und werden durch experimentelle Untersuchungen unterstützt.

Es wurde ein numerisches Modell zur Prognose der mittleren Kapillartiefe beim Laserstrahlschweißen mit konstanter Laserleistung entwickelt. Das Modell basiert auf einem physikalischen Wärmeleitungsmodell, welches in ein Iterationsschema zur Anpassung der Kapillartiefe eingebettet ist. Das Wärmeleitungsmodell bildet die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge der Wärmeleitung, Phasenübergänge und der geomet-

rieabhängigen Einkopplung der Laserleistung in die Kapillare ab und berechnet das stationäre Temperaturfeld. Die Kapillartiefe wird iterativ, abhängig von diesem berechneten Temperaturfeld, skaliert. Der Iterationsmechanismus kann anhand einer einzelnen Schweißung experimentell kalibriert werden. Die Auswirkungen unbekannter Materialdaten und nicht implementierter physikalischer Effekte werden durch diese Kalibrierung und die Iteration abgefangen. Messungen der Kapillartiefe mittels optischer Kohärenztomographie (OCT) wurden zur Kalibrierung und Verifikation verwendet. Die mittlere relative Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Kapillartiefen betrug 13,5%. Bei Schweißprozessen mit einem Vorschub von mindestens 5 m/min verringerte sich die Abweichung auf 7%. Die bessere Übereinstimmung von Modell und Experiment bei höheren Vorschüben legt nahe, dass der Schweißprozess bei hohen Vorschüben in geringerem Maße von transienten Effekten beeinflusst wird, die im Modell nicht berücksichtigt sind. Die weiteren Untersuchungen widmen sich daher der Beschreibung und Modellierung zeit- und vorschubabhängiger Prozesse. Hierzu wurde zunächst die Dynamik der Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen mit kontrolliert fluktuierender Laserleistung untersucht.

Eine analytische Methode zur Berechnung des Kapillartiefenverlaufs beim Laserstrahlschweißen mit zeitabhängiger Laserleistung wurde erarbeitet. Die komplexe Abhängigkeit zwischen Laserleistung und Kapillartiefe wird dabei durch eine Differentialgleichung zweiter Ordnung abstrahiert, welche die beiden Größen zeitabhängig koppelt und das dynamische Verhalten der Kapillare abbildet. Zur Kalibrierung dieser Gleichung wurde mittels OCT-Messungen der Verlauf der Kapillartiefe beim Laserstrahlschweißen mit oszillierender Laserleistung bestimmt. Mit diesen Messungen konnte die Abhängigkeit der Amplitude des Kapillartiefenverlaufs von der Oszillationsfrequenz bestimmt werden. Die Koeffizienten der Differentialgleichung wurden aus diesem Amplitudengang bestimmt. Die Differentialgleichung kann für beliebige zeitliche Verläufe der Laserleistung integriert werden und so der resultierende, zeitabhängige Verlauf der Kapillartiefe bestimmt werden. Die Methodik wurde am Extremfall einer Schweißung in Baustahl mit rechteckförmiger Leistungsmodulation validiert. Die Abweichung zwischen berechneten Kapillartiefen und experimentell gemessenen lag dabei fast ausschließlich im Bereich der Messunsicherheiten der experimentellen Messungen. Bei Oszillationsfrequenzen von mehr als 100 Hz trat ein Hystereseeffekt im Verlauf der Kapillartiefe auf, der die zeitabhängige Kopplung von Kapillargeometrie und Laserleistung belegt. Die Wechselwirkung von Kapillargeometrie, geometrieabhängiger Einstrahlung der Laserleistung und fluiddynamischen Prozessen kann zu Kapillarinstabilitäten führen. Dies wurde in den folgenden Untersuchungen mit bildgebender Diagnostik und detaillierterer Modellierung der physikalischen Phänomene an der Kapillare analysiert.

Fluktuationen der Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen mit gleichbleibenden Prozessparametern wurden zunächst am Beispiel des Spikingphänomens untersucht. Aufgrund der guten visuellen Zugänglichkeit wurden hierzu Laserstrahlschweißprozesse in Eis analysiert. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Schweißprozesse konnten zur Untersuchung des Einflusses von Schmelzebadinstabilitäten auf das Spiking, sowie zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Kapillargeometrien verwendet werden. Mittels einer multiphysikalischen, transienten Prozesssimulation wurde der Spikingmechanismus reproduziert und numerisch untersucht. In diesem Modell wird die Ausbreitung und Absorption der Laserstrahlung mittels Raytracing berechnet, thermo- und fluiddynamische Prozesse werden mit der Smoothed Particle Hydrodynamics Methode modelliert. Sowohl in der experimentellen, als auch in der numerischen Analyse konnte die zeitliche Änderung der lokalen Bestrahlungsstärke im unteren Bereich der Kapillarfront als Ursache des Spikings identifiziert werden. Eine Stabilisierung der Kapillargeometrie konnte einhergehend mit der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit festgestellt werden. Eine Übertragung dieser Maßnahme auf reale Laserschweißanwendungen, die von Prozessinstabilitäten beeinträchtigt werden, liegt aufgrund ähnlicher Prozesscharakteristika der Laserbearbeitung von Eis und Metallen nahe.

Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Kapillargeometrie, deren Stabilität, sowie die resultierende Prozesseffizienz wurde für das Laserstrahl-tiefschweißen von Aluminiumlegierungen der 6000er-Serie analysiert. Bei diesen Laserstrahlschweißprozessen treten häufig Kapillarinstabilitäten auf und die Nahtqualität wird durch Fluktuationen der Einschweißtiefe, Prozessporen und Nahtmittenrisse gemindert. Online-Röntgenaufnahmen wurden verwendet, um die bei diesen Prozessen auftretenden Kapillargeometrien zu bestimmen. Die Abschwächung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch das Werkstück wurde zur quantitativen, dreidimensionalen Rekonstruktion der Kapillargeometrie genutzt. Die Einkopplung in diese Kapillaren wurde mittels Raytracing berechnet. Dabei konnten drei unterschiedliche Prozessregime abgegrenzt werden, die sich in der Form und Stabilität der Kapillare unterscheiden. Bei den untersuchten Versuchen vergrößerte sich der Abstand zwischen Kapillarfront und -rückwand mit steigendem Vorschub. Dies führte zu einer Zunahme der Kapillarstabilität und dadurch zu einer Reduzierung von Prozessporen und Schwankungen der Einschweißtiefe. Die Änderung der Kapillargeometrie geht mit einem abnehmenden Einkoppelgrad der Laserleistung einher. Gleichzeitig erhöht die zunehmende thermische Effizienz des Schweißprozesses den Gesamtwirkungsgrad und verringert die thermische Belastung der Werkstücke. An einem anwendungsnahen Beispiel wurde demonstriert, wie hohe Laserleistungen zum Schweißen bei hohen Vorschüben eingesetzt werden können, um die resul-

tierende Nahtqualität zu steigern. Hierzu wurde das randnahe Schweißen von Aluminiumblechen der Aluminiumlegierung EN AW-6016 im Überlappstoß mit Vorschüben von bis zu 50 m/min und einer Laserleistung von 16 kW untersucht. Die erzeugten Schweißnähte waren frei von Tiefenfluktuationen und Prozessporen. Zudem konnte der kritische Randbereich für die Entstehung von Nahtmittenrissen von 3-7 mm auf 2-3 mm reduziert werden.

Extended Abstract

In deep penetration laser beam welding, the geometry of the capillary and its stability have a decisive influence on the welding depth and the seam quality. This thesis presents theoretical models and experimental methods for the analysis of the capillary's geometry, its depth and stability. With these methods, the geometry of the capillary can be predicted and mechanisms, that cause instabilities can be analysed at different levels of detail. The investigations are structured in four chapters, successively increasing the complexity of the analysed phenomena:

- The estimation of the depth of the capillary with an iterative model for laser beam welding with constant laser power,
- an analytical description of the time-dependent depth of the capillary when welding with non-constant laser power,
- experimental and theoretical analysis of inherent fluctuations of the capillary's depth and
- the investigation of the geometry and stability of the capillary during laser beam welding at high feed rates of up to 50 m/min with laser powers of 16 kW.

The modelling of deep penetration laser beam welding is challenged by the conflict between the implemented degree of detail and the computational effort. Therefore, the complexity of the developed models is reduced to incorporate only those physical effects, which are relevant for the analysis of the respective problem.

A numerical model to predict the depth of the capillary during laser beam welding with constant laser power was developed. The model is based on a heat conduction model which is embedded in an iteration scheme, that adjusts the capillary depth. The heat conduction model calculates the stationary temperature field using the basic physical relations of heat conduction, phase transitions and the geometry-dependent coupling of the laser power into the capillary. The iteration scheme adjusts the capillary depth depending on this calculated temperature field. The iteration mechanism is experimentally calibrated using a single welding experiment. The impact of missing material data and non-implemented physical effects are compensated by this calibration. The model was calibrated and verified using measurements of the capillary depth with optical coherence tomography (OCT). The mean relative deviation between calculated and measured capillary depths was 13.5%. For welding processes with a feed rate of at least 5 m/min, the deviation reduced to 7%. The increasing consistency between model and experiment

at higher feed rates suggests that the welding process at high feed rates is influenced to a smaller extent by transient effects which are not considered in the model. Further investigations are therefore devoted to the analysis and modelling of time- and feed rate-dependent phenomena.

An analytical method for the calculation of the capillary's depth as a function of a time-dependent laser power was introduced. Here, the depth of the capillary and the laser power are coupled by a linear differential equation. This differential equation was calibrated experimentally by OCT measurements of the frequency response of the capillary's depth when welding with oscillating laser power. The frequency response was applied to determine the coefficients of the differential equation. The calibrated differential equation can be integrated to calculate the resulting transient course of the capillary depth during welding with an arbitrarily varying laser power. This was applied to determine the temporal evolution of the capillary depth during welding with rectangularly modulated laser power. The deviations of the calculated and the measured capillary depths were predominantly within the range of the measurement uncertainty. At oscillation frequencies of more than 100 Hz, a hysteresis effect occurred in the course of the depth, demonstrating the time- and geometry-dependent coupling of the capillary's depth to the irradiation and fluid dynamic phenomena.

Based on these findings, the interaction of the geometry-dependent local absorption of the laser power and the fluid dynamic processes influencing the stability of the capillary were analysed.

Even under constant external conditions, laser beam welding processes are prone to intrinsic depth fluctuations, the so-called spiking. Due to the good visual accessibility, the spiking phenomenon was investigated at the example of laser beam welding in ice. High-speed videos of the welding processes were used to investigate the influence of melt pool instabilities on spiking and for three-dimensional reconstruction of the geometries of the capillary. The spiking mechanism was reproduced in a multi-physical, transient simulation of the welding process. In this model the propagation and absorption of the laser beam is calculated by a ray-tracing approach, thermo- and fluid dynamic processes are modelled using the Smoothed Particle Hydrodynamics method. Both methods were combined to simulate deep penetration laser beam welding. In the experimental as well as in the numerical analysis, the temporal change of the local intensity distribution at the capillary walls could be identified as cause of the spiking. A stabilization of the capillary's geometry could be observed when welding at higher feed rates. A transfer of this measure to real world laser welding applications, which are prone to process instabilities, is the natural next step.

The influence of the feed rate on the geometry of the capillary, its stability and the process efficiency was investigated for laser beam welding of aluminium alloys of the 6000-series. These welding processes are often instable and prone to the formation of processing pores, a fluctuating welding depth and centerline cracks. Online X-ray diagnostics was used for a three-dimensional reconstruction of the geometries of the capillary. The coupling of the laser power into these capillaries was calculated using a ray-tracing approach. Three different processing regimes could be defined, which differ in shape and stability of the capillary. A stabilization of the capillary was observed when welding at higher feed rates. This resulted in the avoidance of both depth fluctuations and processing pores. The stabilization of the geometry was accompanied by a decreasing in-coupling of the laser power into the capillaries. The thermal efficiencies of the welding processes increased at higher feed rates, which reduced the thermal loads onto the work-piece. Finally, the potentials of welding with high laser powers at high feed rates are demonstrated at the example of close edge welding of aluminium sheets of the aluminium alloy EN AW-6016 in overlap configuration. When welding with a laser power of 16 kW at a feed rate of 50 m/min, the formation of centerline cracks could be avoided up to edge distances of 3 mm and the generated weld seams were free of depth fluctuations and processing pores.

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

Gorritz, Michael

Adaptives 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 3-519-06229-1

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

Platz, Wilfried

Zerstörungsschwellen 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 Laserмикробohren 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 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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 Nahteigen-schaften 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 Getriebekonstruktion – 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

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Tilman Froschmeier-Hans

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

Moritz Vogel

Specialty Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluidynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrisen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4643-2

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

Michael Diez

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzfluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

Martin Rumpel

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

Michael Eckerle

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

Martin Stubenvoll

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

Christian Hagenlocher

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

Florian Fetzer

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahlieferschweißen mittels reduzierter Modelle.
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0