

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

M. Boley
Bestimmung und Regelung der
Kapillar- und Nahttiefe beim
Laserstrahlschweißen

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Bestimmung und Regelung der Kapillar- und Nahttiefe beim Laserstrahlschweißen

von Dr.-Ing. Meiko Boley
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann

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., 2022

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2022

ISBN 978-3-8316-4986-0

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	5
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	15
1 Motivation und Zielsetzung	17
1.1 Zielsetzung der Arbeit	18
1.2 Aufbau der Arbeit.....	18
2 Verwendete Methoden zur Tiefenmessung	21
2.1 Stand der Technik.....	21
2.1.1 Indirekte Tiefenmessung.....	21
2.1.2 Direkte Tiefenmessung	23
2.2 Allgemeine Definitionen für diese Arbeit.....	24
2.3 Allgemeiner Versuchsaufbau	25
2.4 Messung der Kapillartiefe mittels Hochgeschwindigkeits-Röntgenanlage .	27
2.4.1 Schattenprojektion	28
2.4.2 Abschwächung von Röntgenstrahlung	30
2.4.3 Auswertung der Röntgenbilder – Zeitschnitt	32
2.5 Tiefenmessung mittels In-Process Depth Meter (IDM).....	34
2.5.1 Messprinzip des IDM	34
2.5.2 Eigenschaften eines OCT Messsystems	38
2.5.2.1 Axiale Auflösung	38
2.5.2.2 Laterale Auflösung.....	39
2.5.2.3 Eindeutigkeitsbereich des Weglängenunterschieds	39
2.5.2.4 Eigenschaften des IDM.....	40
3 Bestimmung der Kapillartiefe	41
3.1 Bestimmung der optischen Pfadlänge.....	41

3.1.1	Brechungsindex.....	42
3.1.1.1	Temperaturabhängigkeit des Brechungsindizes von optischen Elementen (Zone A).....	43
3.1.1.2	Heißes Gas (B, C, D).....	44
3.1.1.3	Fehlerbetrachtung der optisch gemessenen Pfadlänge aufgrund der Brechungsindexänderung.....	48
3.1.2	Geometrische Pfadlänge.....	50
3.1.2.1	Einfacher Raytracing-Algorithmus („Raytracer“).....	50
3.1.2.2	Test der Funktion anhand von Modellgeometrien.....	57
3.1.2.3	Reale Kapillargeometrien.....	60
3.2	Verifikation der gemessenen Kapillartiefe.....	65
3.3	Schlussfolgerung zur Kapillartiefenmessung.....	70
4	Methode zur Bestimmung der Nahttiefe aus der gemessenen Kapillartiefe.....	71
4.1	Analyse des IDM-Tiefensignals.....	74
4.1.1	Einteilung des Tiefensignals in charakteristische Bereiche.....	74
4.1.1.1	Einteilung mittels Punktdichte.....	75
4.1.1.2	Einteilung mittels Rauschwahrscheinlichkeit.....	77
4.1.2	Bestimmung der Nahttiefe.....	82
4.1.3	Geeignete Einstellungen der Perzentile und der Fensterlänge.....	84
4.2	Experimentelle Validierung.....	85
4.3	Schlussfolgerung zur Bestimmung der Nahttiefe.....	88
5	Regelung der Nahttiefe beim Laserstrahl-tiefschweißen.....	89
5.1	Aufbau des verwendeten Regelkreises.....	90
5.1	Tiefe der Kapillare bei Leistungsänderung.....	91
5.1.1	Modulation der Laserleistung.....	92
5.1.1.1	Sinusförmige Leistungsmodulation.....	93
5.1.1.2	Rampenförmige Leistungsmodulation.....	94
5.1.1.3	Sprungförmige Leistungsmodulation.....	95
5.1.1.4	Reaktion der Laserleistung auf die Vorgabewerte.....	96
5.1.2	Charakterisierung des Systems aus dem Frequenzgang.....	97
5.1.3	Rampenantwort.....	101
5.1.4	Sprungantwort.....	103

5.1.5	Trajektorie der Kapillartiefe und der Leistung	106
5.1.5.1	Hysterese bei sinusförmiger Leistungsmodulation.....	106
5.1.5.2	Hysterese bei Leistungsrampe und Leistungssprung.....	108
5.1.6	Zeitliche Tiefenänderung der Kapillare als Funktion der zeitlichen Leistungsänderung	111
5.1.7	Schlussfolgerung zur Reaktion der Tiefe auf eine Laserleistungsänderung	113
5.2	Reglerparameter	113
5.2.1	Test der Reglerparameter	115
5.2.2	Leistungs- und Tiefenänderung	119
5.3	Evaluation der Regelung	120
5.3.1	Kapillartiefe bei geregelter Laserleistung	120
5.3.2	Nahttiefe bei geregelter Laserleistung	125
5.4	Schlussfolgerung zur Regelung der Kapillar- und Nahttiefe	129
6	Zusammenfassung	131
7	Literatur- und Quellenverzeichnis	135
8	Danksagung	141

Kurzfassung der Arbeit

Die Fähigkeit, zahlreiche metallische Werkstoffe mit hoher Geschwindigkeit und guter Qualität zu fügen, macht den Laserstrahl zu einem unverzichtbaren Fertigungswerkzeug. Bei der steigenden Anzahl von Schweißverbindungen je Bauteil [1], muss jedoch sichergestellt werden, dass jede Schweißnaht die vorgegebenen Anforderungen in Bezug auf Einschweißtiefe und Nahtqualität erfüllt, da schon ein einzelner Verbindungsausfall die Funktion wesentlich beeinträchtigen kann.

Dies verlangt nach einer Messtechnik, mit der eine nahezu vollständige Überwachung der Schweißtiefe und Qualität einer jeden Schweißnaht möglich ist. Beim Laserstrahl-tiefschweißen kann mit der optischen Kohärenztomografie (OCT) eine optische Pfadlänge innerhalb der Kapillare gemessen und daraus die Einschweißtiefe ermittelt werden. Außerdem ist die OCT eine Messtechnik, welche durch Störstrahlung oder andere Umwelteinflüsse kaum beeinflusst wird und somit hervorragend für den Einsatz in der Lasermaterialbearbeitung geeignet ist.

Bei der OCT wird eine optische Pfadlänge gemessen, welche sich aus der geometrischen Wegstrecke und dem Brechungsindex des durchlaufenen Mediums ergibt. Daher wurde zunächst der Brechungsindex im Raum oberhalb der Kapillare evaluiert. Auf Grundlage von Messungen und theoretischen Überlegungen anderer Autoren zum temperaturabhängigen Brechungsindex im Raum über der Kapillare konnte abgeleitet werden, dass sich unter Prozessbedingungen die gemessene Tiefe durch die Änderung des Brechungsindex oberhalb und innerhalb der Kapillare um 0,6 % bis 2,8 % gegenüber der realen Kapillartiefe verkürzen könnte. Des Weiteren wurde, um die geometrische Pfadlänge innerhalb der Kapillare bestimmen zu können, ein Raytracing-Algorithmus entwickelt. Mittels In-Prozess-Röntgenvideografie der Kapillargeometrie während des Schweißprozesses konnten repräsentative Kapillargeometrien extrahiert und mit Hilfe des Raytracing-Algorithmus die geometrische Pfadlänge eines Strahlenbündels bestimmt werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die geometrische Pfadlänge in 90 % (Kapillare beim Schweißen von Eisen) beziehungsweise 69 % (Kapillare beim Schweißen von Aluminium) der Messungen der echten Kapillartiefe auf ± 5 % genau entspricht.

Die Übereinstimmung von gemessener und echter Tiefe konnte durch den Abgleich, der mittels OCT gemessenen Tiefen und der aus Röntgenaufnahmen ermittelten Kapillartiefen, bestätigt werden.

Darauf aufbauend wurde eine Methode zur Bestimmung der Nahttiefe aus den OCT-Tiefenmessungen entwickelt. Die Methode besteht aus zwei Schritten: zunächst wird das Messsignal in ein Nutzsignal und ein Rauschsignal zerlegt. Auf das verbleibende Nutzsignal wird dann ein gleitender Perzentil-Filter angewendet, um die Tiefenmesspunkte zu erhalten, welche, verglichen mit der aus Längsschliffen ermittelten Tiefe, am besten übereinstimmen und somit repräsentativ für die tatsächliche Einschweißtiefe sind. Die mit dieser Methodik ermittelten Filterparameter sind auf Tiefenmessungen bei verschiedenen Prozessparametern übertragbar, wobei die Tiefen um weniger als 5 % von den aus Längsschliffen ermittelten Einschweißtiefen abweichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden weiterhin Grundlagen zur Regelung der Nahttiefe erarbeitet. Dazu wurde der zeitliche Verlauf der Tiefe der Dampfkapillare als Folge der Änderungen der Laserleistung untersucht. Hierbei wurde die Laserleistung sinusförmig moduliert, die resultierende Änderung der Einschweißtiefe (Tiefenreaktion) gemessen und daraus der Frequenzgang bestimmt. Durch eine rampen- beziehungsweise sprungförmige Leistungsänderung konnten zusätzlich noch die Tiefenreaktion in Form der Rampen- und Sprungantwort bestimmt werden. Bei sehr schnellen Änderungen der Laserleistung von mehr als 2 kW/ms erfolgt die Tiefenzunahme der Dampfkapillare mit ca. 1 mm/ms und die Tiefenabnahme mit ca. 2 mm/ms. Daraus wurde gefolgert, dass für eine richtungsunabhängige Reaktion der Kapillartiefe auf eine Änderung der Laserleistung die Leistung nicht schneller als 1 kW/ms geändert werden sollte. Aus dem daraus ermittelten Systemverhalten wurde ein Regler für die Kapillartiefe abgeleitet und parametrisiert. Die statistische Analyse der von diesem Regler angeforderten Leistungsänderungen hat gezeigt, dass in den meisten Fällen Änderungen von weniger als ± 1 kW/ms zur Regelung der Kapillartiefe notwendig waren. Bei gleicher mittlerer Leistung konnte eine gewünschte Nahttiefe mit einer bis zu zehnmal höheren Genauigkeit als ohne Regelung erzielt werden.

Mit Hilfe der OCT-Technik konnten die Kapillar- und Nahttiefe, sowie das Auftreten von Fehlern, kontinuierlich überwacht werden. Dies erlaubt eine vollständige Überwachung einer jeden Laserschweißverbindung und durch die Regelung der Nahttiefe das Sicherstellen einer gleichbleibenden Qualität der Verbindung.

Extended Abstract

The ability to join metals with high speed and good quality makes the laser beam an indispensable production tool for years to come. With the increasing number of welded joints per part [1], it must be ensured that each weld seam meets the specified requirements with regard to welding depth and seam quality, since even a single joint failure can significantly impair the function.

This requires a measuring technology that allows almost complete monitoring of the welding depth and quality of each weld seam. With deep-penetration laser welding, optical coherence tomography (OCT) can be used to measure an optical path length within the capillary and thus determine the welding depth. In addition, OCT is a measuring technique, which is hardly influenced by interfering radiation or other environmental influences and is therefore ideally suited for the use in laser material processing.

The focus of this work is the understanding and interpretation of the optical path length measured by OCT during deep-penetration laser welding.

With OCT, an optical path length is measured, which is the path integral over the refractive index along the optical path. Therefore, the refractive index in the space above the capillary was evaluated first. Based on measurements and theoretical considerations of other authors on the temperature-dependent refractive index above the capillary, it could be deduced that under process conditions the measured capillary depth can be decreased by 0.6 % to 2.8 % by the changing refractive index above and within the capillary. Furthermore, a raytracing algorithm was developed to determine the geometric path length within the capillary. By means of in-process X-ray videography of the geometry of the capillary during the welding process, representative capillary geometries could be extracted, and the geometric path length of a ray bundle could be determined using a raytracing algorithm. It was found that the geometric path length in 90 % (capillary when welding iron) and 69 % (capillary when welding aluminum) of the measurements corresponds to the real capillary depth within ± 5 %. The good agreement between measured and real depth could be confirmed by the comparison of the depths measured by OCT and the capillary depths determined from X-ray videography.

Based on this, a method was developed to determine the seam depth from the OCT depth measurements. The method consists of two steps: first, the measurement signal is divided into a useful signal and a noise signal. A sliding percentile filter is then applied to the useful signal to obtain the depth which best match the depth determined from longitudinal sections and is thus representative of the actual welding depth. The filter parameters determined with this method can be transferred to depth measurements at various process parameters and the depths deviate by less than 5 % from the welding depths determined from longitudinal sections.

Within the scope of this work, the fundamentals for the control of the weld depth were also developed. In addition, the reaction of the depth of the capillary as a result of the changes of the laser power was investigated. The laser power was modulated in sine waveform, the resulting change of the welding depth (depth reaction) was measured, and the frequency response was determined. By means of a ramp- or step-shaped power change, the depth reaction in the form of the ramp and step response could also be determined. In the case of very rapid changes of the laser power by more than 2 kW/ms, the depth increase of the capillary is 1 mm/ms and the depth decrease 2 mm/ms. This led to the conclusion that the power should not be changed faster than 1 kW/ms for a direction-independent reaction of the capillary depth to a change in laser power. A controller for the capillary depth was derived and parameterized from the resulting system behavior. The statistical analysis of the power changes requested by this controller showed that mainly changes of less than ± 1 kW/ms were necessary to control the capillary depth. With the same average power, a desired seam depth could be achieved with an accuracy up to 10 times greater than without control.

With the help of the OCT technique, the capillary and weld seam depth, as well as the occurrence of defects, can be continuously monitored. This allows a complete monitoring of each welded joint and can ensure the constant quality of each joint by controlling the seam depth.

1 Motivation und Zielsetzung

Die Qualität von Schweißnähten hat einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des bearbeiteten Produkts. Ist der Anbindungsquerschnitt zwischen den Fügepartnern zu klein oder weist die Schweißnaht zu viele Defekte auf, können die geforderten Kräfte oder Ströme nicht übertragen werden. Zur Qualitätssicherung kommen unterschiedliche Strategien zum Einsatz: So ist es im Automobilbau beispielsweise üblich, beim Verschweißen von zwei übereinanderliegenden Blechen durch beide Bleche hindurch zu schweißen. Somit kann die Verbindung beider Bleche von der Rückseite im Nachhinein einfach kontrolliert werden. Diese Vorgehensweise hat jedoch mindestens zwei Nachteile: Zum einen wird mit mehr Laserleistung geschweißt, als für die Verbindung notwendig wäre und zum anderen müssen diese Nähte von zwei Seiten nachbehandelt werden, was den Arbeitsaufwand erhöht. Da die notwendige Sichtprüfung in der Regel durch einen Menschen durchgeführt wird, kommt eine weitere Fehlerquelle hinzu.

Eine zunehmend an Bedeutung gewinnende Alternative ist eine zerstörungsfreie, online-Überwachung des Fügeprozesses mittels aktiver oder passiver Sensoren. Ziel dieser Überwachung ist es, möglichst viele relevante Informationen über den Fügeprozess zu erhalten, hier zum Beispiel Nahttiefe und Nahtform, sowie zusätzlich in der Schweißnaht erzeugte Defekte, wie Poren oder Löcher zu detektieren.

Dabei spielt die beim Laserstrahltiefschweißen vorhandene Dampfkapillare eine besondere Rolle, da sie fast bis zur späteren Nahtwurzel reicht [2,3]. Dadurch erscheint es möglich, dass ein Messsignal aus der Prozesszone mit der Nahttiefe in Korrelation steht oder durch eine direkte Messung die Nahttiefe ermittelt werden könnte.

Eine vielversprechende Messtechnik, mit der eine direkte Messung der Nahttiefe möglich sein könnte, ist die optische Kohärenztomografie (OCT). Die OCT Technik eignet sich durch ihr robustes Messprinzip und ihre hohe Messfrequenzen von aktuell bis zu 250 kHz sehr gut als Diagnostikum für das Laserstrahltiefschweißen [3]. Obgleich die OCT Technik in der Medizin seit vielen Jahren eingesetzt wird, ist die Anwendung beim Laserstrahltschweißen wenig erforscht und über die gemessene optische Pfadlänge wenig bekannt. In dieser Arbeit wird daher beschrieben, wie die OCT Technik für den Einsatz beim Laserstrahltschweißen genutzt werden kann.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Die zuverlässige Messung der Tiefe der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweißen stellte bislang eine große Herausforderung dar, wobei verschiedene Herangehensweisen in Abschnitt 2.1 aufgezeigt werden. Dies liegt vor allem an der schnellen zeitlichen und örtlichen Änderung der Form der Dampfkapillare. Spritzer, Staub, Dampf und thermische Strahlung erschweren das Messen der Kapillartiefe und somit der Einschweißtiefe.

Um Aussagen über die Qualität einer Schweißnaht treffen zu können, ist es wichtig, quantitative Messgrößen zur Beschreibung der Qualität heranzuziehen. Die Einschweißtiefe stellt dabei eine der wichtigsten Kenngrößen einer Schweißnaht dar. Neben der zerstörenden Schliffbilderstellung kann die (zerstörungsfreie) In-Prozess-Messung der Kapillartiefe (beim Tiefschweißen) als zur Einschweißtiefe korrelierende Größe herangezogen werden. Zielsetzung der Arbeit ist demnach die Entwicklung einer online-Messmethode zur Ermittlung der Kapillartiefe mittels optischer Kohärenztomografie, sowie den Zusammenhang der Kapillartiefe mit der Nahttiefe zu überprüfen und eine darauf aufbauende Regelung der Kapillar- und Nahttiefe zu entwickeln. Daraus leitet sich die zentrale Arbeitshypothese

„Mittels optischer Pfadlängenmessung kann die Kapillartiefe und daraus die Nahttiefe bestimmt und geregelt werden.“

dieser Arbeit ab.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst einige grundlegende Methoden zur verwendeten Mess- und Versuchstechnik erläutert und insbesondere die Funktionsweise der OCT Technik und deren Eigenschaften beschrieben.

Der Zusammenhang von optischer Pfadlänge und Kapillartiefe wird in Kapitel 3 beschrieben. Hier wird dargelegt, welchen Einfluss der Brechungsindex des Materials im Bereich der Messstrecke, sowie die geometrische Pfadlänge innerhalb der Kapillare auf die gemessene Pfadlänge haben. Durch den Vergleich mit Röntgenaufnahmen wird die gemessene Tiefe verifiziert.

In Kapitel 4 wird vorgestellt, wie aus der Kapillartiefe mittels geeigneter Segmentierung und Filterung die Nahttiefe gewonnen werden kann. Die Segmentierung der Tiefenmessung erfolgt dabei auf Basis der zeitlichen und örtlichen Dichte der Messpunkte und die Filterung anhand eines Perzentil-Filters.

Für die Regelung der Kapillar- und Nahttiefe wurde zunächst die Reaktion der Kapillartiefe auf verschiedene zeitliche Änderungen der Laserleistung (Leistungsmodulation) analysiert. Der Frequenzgang, die Sprungantwort und die Rampenantwort geben Hinweise auf das Systemverhalten der Regelstrecke. Darauf aufbauend konnte ein PI-Regler parametrisiert und damit die Kapillar- und Nahttiefe über die Laserleistung geregelt werden. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 gezeigt.

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

Laserschweißleistung 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 3-519-06227-5

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

Plaß, 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

Schinzl, 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. 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

Kontakterierung 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 Breitting

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 Getriebebau – 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-Hanss

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

Fluiddynamische 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 faserointegrierte 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

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

Christian Röhler

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

Martin Sommer

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi mittels Strahloszillation
2021, 110 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6

Birgit Weichelt

Experimental Investigations on Power Scaling of High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk Lasers.
2021, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4914-3

Sebastian Faas

Oberflächenfunktionalisierung von Stahl mit UKP-Lasern mit mehreren Hundert Watt mittlerer Laserleistung.
2021, 95 Seiten, ISBN 978-3-8316-4935-8

Daniel Weller

Erhöhung der Prozesssicherheit beim Remote-Laserstrahlfügen von Aluminiumwerkstoffen.
2021, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4940-2

Sebastian Hecker

Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit UltrakurzpulsLasern
2022, 132 Seiten, ISBN 978-3-8316-4955-6

Frieder Beirow

Leistungskalierung ultrakurz gepulster radial polarisierter Laserstrahlung.
2022, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4970-9

Meiko Boley

Bestimmung und Regelung der Kapillar- und Nahttiefe beim Laserstrahlschweißen.
2022, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4986-0