

Einfluss von Strahlformung auf Absorption, Fugenquerschnitt und Produktivität beim Laserschneiden

von Dr.-Ing. Jannik Lind
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. rer. nat. Dr. h. c. Sigfried 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., 2024

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2024

Print ISBN 978-3-8316-5062-0
Ebook ISBN 978-3-8316-7800-6

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Liste der verwendeten Symbole	5
Kurzfassung.....	9
Extended Abstract	12
1 Einleitung	15
1.1 Motivation	15
1.2 Einflussgrößen auf die Schneidgeschwindigkeit.....	19
1.2.1 Stand der Technik.....	19
1.2.1.1 Bestimmung der Absorption.....	21
1.2.1.2 Bestimmung der Schneidfront- und Schneidfugengeometrie ..	24
1.2.2 Forschungsbedarf und Zielsetzung zur Bestimmung der Querschnittsfläche der Schneidfuge und der Absorption.....	27
1.3 Strahlformung beim Laserschneiden.....	28
1.3.1 Stand der Technik.....	28
1.3.1.1 Einfluss des Strahldurchmessers auf die Schnittspaltgeometrie und die Schneidgeschwindigkeit	28
1.3.1.2 Einfluss des Strahldurchmessers auf den Absorptionsgrad und die Schneidgeschwindigkeit	32
1.3.2 Forschungsbedarf und Zielsetzung zur Untersuchung von Strahlformung zur Steigerung der Produktivität des Laserschneidens.....	35
1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	36

2	Bestimmung der Schneidfront- und Schneidfugengeometrie mittels online-Röntgenvideographie beim Laserschmelzschneiden	38
2.1	Publikation	38
2.2	Einordnung der Ergebnisse	71
3	Einkoppelgrad beim Laserschneiden	72
3.1	Publikation	72
3.2	Einordnung der Ergebnisse	85
4	Anpassung der Schneidfront- und Schneidfugengeometrie durch Strahlformung zur Maximierung der Schneidgeschwindigkeit	87
4.1	Publikation	87
4.2	Einordnung der Ergebnisse	117
5	Zusammenfassung	119
	Literaturverzeichnis	123
	Anhang	130
	Danksagung	133

Kurzfassung

Die Form des Laserstrahls wirkt sich signifikant auf die Geometrie der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück aus. Die Geometrie der Wechselwirkungszone definiert wiederum, welcher Anteil an Laserleistung absorbiert wird und – im Fall des Laserschneidens – die Querschnittsfläche der Schneidfuge. Beide Größen beeinflussen wesentlich die maximale Schneidgeschwindigkeit und damit die Produktivität des Laserschneidens. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen der Strahlform, der Absorption und der Querschnittsfläche der Schneidfuge experimentell bestimmt und durch analytische Gleichungen beschrieben. Aus den Ergebnissen wurden Optimierungsstrategien zur Steigerung der Produktivität abgeleitet.

Zur experimentellen Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Strahlform, der Geometrie der Wechselwirkungszone und der resultierenden Absorption wurden die Geometrie der Schneidfront und der Schneidfuge erstmals mittels online-Röntgenvideographie während des Schneidens analysiert. Dazu wurde eine Methodik entwickelt, um aus den erhaltenen Röntgenbildern die abgebildeten Geometrien dreidimensional zu rekonstruieren. Die Geometrien wurden verwendet, um mithilfe von Raytracing-Verfahren die lokalen Absorptionsgrade und den globalen Einkoppelgrad sowie den Einfluss von Mehrfachreflexionen zu bestimmen. Außerdem wurden aus den rekonstruierten Geometrien die Querschnittsfläche der Schneidfuge bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei stabilen Schneidbedingungen mit zunehmender Schneidgeschwindigkeit die Querschnittsfläche der Schneidfuge nahezu konstant bleibt, während der mittlere Einfallswinkel der Laserstrahlung auf der Schneidfront abnimmt. Die Abnahme des mittleren Einfallswinkels führt zu einem Anstieg des lokalen Absorptions- und des resultierenden Einkoppelgrades. Bei der maximalen Schneidgeschwindigkeit, mit der das Blech noch erfolgreich getrennt wird, stimmt die Länge der Schneidfront mit der Ausdehnung der Querschnittsfläche des Laserstrahls in Vorschubrichtung überein. Beim Überschreiten der maximalen Schneidgeschwindigkeit ragt die Schneidfront über den vom Laserstrahl direkt abgedeckten Bereich hinaus und

der Schnitt wird unvollständig. Aus den Berechnungen des Raytracing-Verfahrens folgt, dass Mehrfachreflexionen beim unvollständigen Schneiden zu einer signifikanten Steigerung der absorbierten Leistung beitragen. Diese Steigerung der absorbierten Leistung führt zu einer Steigerung des aufgeschmolzenen Materials, welche sich in einer deutlichen Verbreiterung der Schneidfuge erkennen lässt. Aufgrund der Tatsache, dass das Blech nicht erfolgreich getrennt wird, kann gefolgert werden, dass beim Überschreiten der maximalen Schneidgeschwindigkeit mehr Material aufgeschmolzen wird als ausgetrieben werden kann. Beim Laserschneiden von 10 mm dickem Edelstahl mit einer Geschwindigkeit gleich oder unterhalb der maximalen Schneidgeschwindigkeit tragen Mehrfachreflexionen nur zu einer geringfügigen Steigerung der absorbierten Leistung bei. Zur analytischen Berechnung der Absorption wurde daher der Einfluss von Mehrfachreflexionen vernachlässigt und die Geometrie der Schneidfront zudem vereinfacht durch eine schiefe Ebene angenähert. In diesem Fall entspricht der Einkoppelgrad dem Absorptionsgrad.

Zur Beschreibung des Einflusses der Strahlform auf den mittleren Einfallswinkel und auf die Querschnittsfläche der Schneidfuge wurden einfache analytische Gleichungen hergeleitet, die zeigen, dass eine Vergrößerung des Strahldurchmessers bewirkt, dass der mittlere Einfallswinkel des Laserstrahls auf der Schneidfront reduziert wird. Gleichzeitig nimmt die Querschnittsfläche der Schneidfuge zu. Die dreidimensionalen Rekonstruktionen der Schneidfront und der Schneidfuge aus den experimentellen Daten belegen, dass das entwickelte Modell für eine Vielzahl an Strahlformen den mittleren Einfallswinkel und die Querschnittsfläche der Schneidfuge bei maximaler Schneidgeschwindigkeit zuverlässig vorhersagt. Ist der mittlere Einfallswinkel auf der Schneidfront bekannt, lässt sich der entsprechende Absorptionsgrad mit den Fresnel-Gleichungen bestimmen.

Die Gleichungen zur Berechnung des Absorptionsgrades und der Querschnittsfläche der Schneidfuge wurden mit der Leistungsbilanz des Laserschneidens kombiniert. Die Fugenquerschnittsfläche bestimmt hierbei die absorbierte Leistung, welche notwendig ist, um bei vorgegebener Geschwindigkeit das Material der Schneidfuge aufzuschmelzen. Auf diese Weise konnte der Einfluss der Strahlform auf die maximal mögliche Geschwindigkeit beim Laserschmelzschnneiden aufgezeigt werden. Die berechneten maximalen Schneidgeschwindigkeiten zeigen für eine Vielzahl an Strahlformen, Schnitttiefen und Laserleistungen eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten. Darüber hinaus eignen sich die Gleichungen, um Strahlformen zu identifizieren, welche eine möglichst hohe Schneidgeschwindigkeit ermöglichen. Sowohl analytisch als auch experimentell wurde nachgewiesen, dass sich

eine Vergrößerung des Strahlquerschnitts in Vorschubrichtung eignet, um die maximale Schneidgeschwindigkeit und damit die Produktivität zu steigern. Die Vergrößerung des Strahlquerschnitts darf hierfür nur in Vorschubrichtung und nicht in der Querdimension erfolgen, wodurch sich ein elliptischer Strahlquerschnitt ergibt. Dieser führt bei konstanter Querschnittsfläche der Schneidfuge aufgrund des reduzierten Einfallswinkels zu einem erhöhten Absorptionsgrad. Mit dieser Optimierungsstrategie wurde die maximale Schneidgeschwindigkeit im Vergleich zu der maximalen Schneidgeschwindigkeit, die mit einem rotationssymmetrischen Strahl erreicht wurde, um bis zu 15% gesteigert.

Mit Kenntnis der in dieser Arbeit hergeleiteten Zusammenhänge konnten beim Laserschmelzschneiden durch eine Optimierung der Strahlform die absorbierte Leistung erhöht und die Querschnittsfläche der Schneidfuge reduziert werden. Dies steigert die Produktivität des Laserschneidens durch eine Erhöhung der maximalen Schneidgeschwindigkeit. Die Anwendbarkeit der Modelle wurde bei einer Vielzahl verschiedener Schnittiefen nachgewiesen.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Lasergeschnittene Werkstücke werden in der Regel aus Blechtafeln ausgeschnitten. Dafür wird typischerweise zuerst ein Loch in das Blech eingestochen, welches in Folge als Startpunkt für den anschließenden Schneidprozess dient. Die Produktivität einer Laserschneidanlage wird durch die benötigte Gesamtzeit definiert, welche für die Fertigung eines Werkstücks aufgewendet werden muss [1]. Die Zeit, in der das Werkstück geschnitten wird, ist neben den Zeiten für das Programmieren, Beladen, Einstechen, Entladen und Nachbearbeiten ein maßgeblicher Anteil an der Gesamtzeit, die benötigt wird, um ein Teil zu produzieren. Diese Beiträge sind in Bild 1.1 schematisch zusammengefasst.

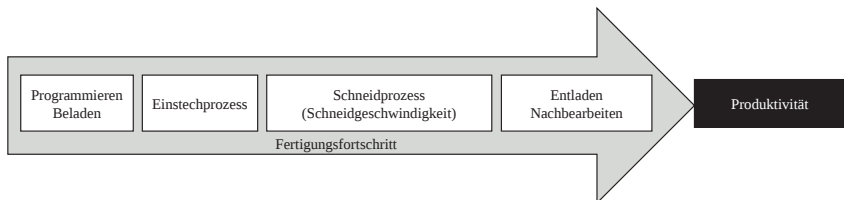


Bild 1.1: Fertigungsschritte einer Laserschneidanlage.

Das Ziel einer produktiven Laserschneidanlage besteht unter anderem darin, eine möglichst hohe maximale Schneidgeschwindigkeit zu erreichen. Als die maximale Schneidgeschwindigkeit wird in der vorliegenden Arbeit die maximale relative Geschwindigkeit zwischen Schneidoptik und Werkstück bezeichnet, bei der das Blech noch erfolgreich getrennt wird. Jede weitere Steigerung der Schneidgeschwindigkeit führt zu einem sogenannten Schnittabriss, bei dem keine vollständige Trennung des Werkstücks erfolgt. Bild 1.2 zeigt zwei metallographische Schliffe längs zur Vorschubrichtung von 10 mm dicken Blechen aus Edelstahl 1.4301 mit erfolgreicher a) und erfolgloser b) Trennung des Werkstücks. Die Probe des Längsschliffes b) wurde im Vergleich zur Probe a) mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit bearbeitet. Die metallographischen Schliffe der abgebildeten Proben von Bild 1.2 wurden nach einem

abrupten Abschalten des Laserstrahls und der Schneidgaszufuhr angefertigt, sodass die Geometrie der sogenannten „eingefrorenen“ Schneidfront analysiert werden kann. Diese Geometrie der Schneidfront verläuft bei erfolgreicher Trennung des Werkstücks von der Probenoberseite bis zur Probenunterseite, wie in Bild 1.2 a) gezeigt.

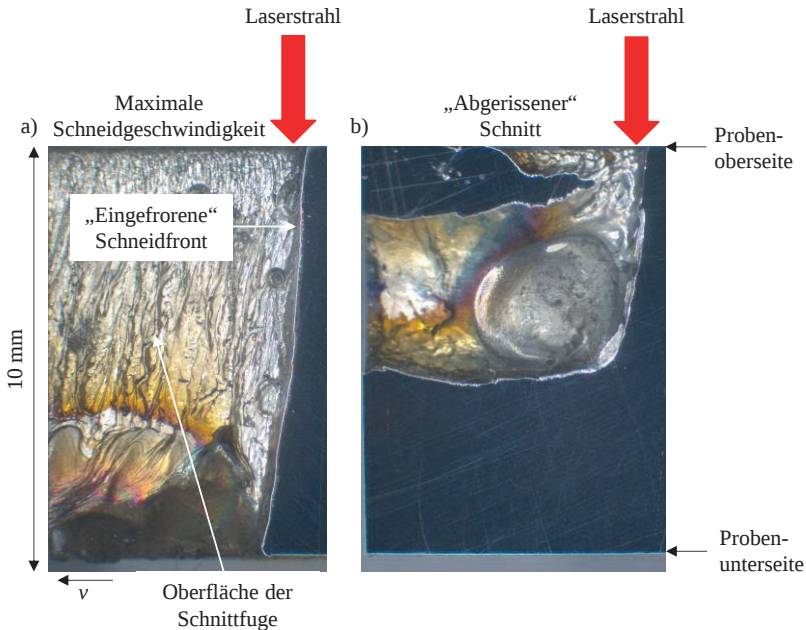


Bild 1.2: Längsschliffe von „eingefrorenen“ Prozessfronten in 10 mm dickem Edelstahl 1.4301 mit erfolgreicher a) und erfolgloser b) Trennung des Werkstücks. Die Proben wurden mit einer Laserleistung von 6 kW bearbeitet. Die Probe des Längsschliffes a) wurde mit einer Schneidgeschwindigkeit von 2.4 m/min und die Probe b) mit 2.5 m/min bearbeitet.

Ist die maximale Schneidgeschwindigkeit erreicht, führt eine Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung dazu, dass sich keine durchgängige Schneidfront von der Probenoberseite zur Probenunterseite ausbildet, siehe Bild 1.2 b). Dieses Prozessphänomen wird als Schnittabriss bezeichnet und muss während des Prozesses unbedingt vermieden werden, da sich ohne einen durchgängigen Schnitt das Blech nicht mehr erfolgreich trennen lässt.

Bei gegebenem Material und gegebener Blechdicke hängt die maximal erzielbare Schneidgeschwindigkeit wesentlich von der zur Verfügung stehenden Laserleistung ab.

In den letzten Jahren hat sich der industrielle Einsatz von Faser- und Scheibenlasern in Laserschneidanlagen etabliert [2]. Dies ist auf die kontinuierliche Steigerung der mit diesen Strahlquellen im Dauerstrichbetrieb erzielbaren Leistung zurückzuführen. Die violetten Datenpunkte in Bild 1.3 zeigen die Entwicklung der Dauerstrich-Laserleistung industriell eingesetzter Schneidanlagen über den Zeitraum der letzten 41 Jahre. Zwischen 1979 und 2020 wurde die verfügbare Laserleistung in Schneidanlagen von 0.5 kW auf 40 kW gesteigert. Eine Verlangsamung oder Sättigung dieses Trends ist aus den Daten nicht erkennbar. Die Entwicklung der steigenden Laserleistung von Laserschneidanlagen ermöglichte auch eine kontinuierliche Steigerung der maximalen Schnitttiefe, deren Verlauf im Zeitraum von 1979 bis 2020 in Bild 1.3 durch die blauen Datenpunkte dargestellt ist. Innerhalb dieses Zeitraums konnte die maximal geschnittene Blechdicke eines Schmelzschnittes in Edelstahl von 6 mm auf 200 mm gesteigert werden. Ausgehend von 10 kW im Jahr 2017 ist im Zeitraum bis 2020 die Leistung industrieller Laserschneidanlagen bis auf 40 kW gesteigert worden. Dadurch konnte im selben Zeitraum die maximale Schneidgeschwindigkeit beim Brennschneiden von Blechen aus Baustahl mit einer Schnitttiefe von 8 mm von 3.1 m/min auf 14.3 m/min mehr als vervierfacht werden, was die roten Datenpunkte in Bild 1.3 zeigen.

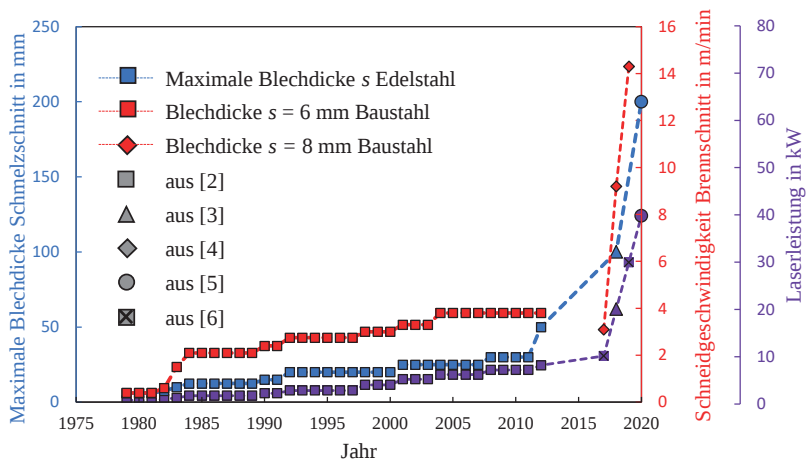


Bild 1.3: Entwicklung der verfügbaren Dauerstrich-Laserleistung (violett), der schneidbaren Blechdicke (blau) und der Schneidgeschwindigkeit (rot) in industriell eingesetzten Schneidanlagen. Die Werte für die Datenpunkte wurden aus den Veröffentlichungen [2-6] entnommen und sind in Tabelle 1 im Anhang aufgelistet.

Aus den Werten der Datenpunkte von Bild 1.3 wird deutlich, dass der Trend von steigender Blechdicke und Schneidgeschwindigkeit dem Trend der zur Verfügung

stehenden Laserleistung folgt. Es kann zudem davon ausgegangen werden, dass diese Steigerungen ihr Maximum noch nicht erreicht haben.

Soll mit möglichst hoher Schneidgeschwindigkeit geschnitten werden, wird beim Bearbeiten von Edelstahl auf industriellen Schneidanlagen typischerweise die maximale Laserleistung der zur Verfügung stehenden Strahlquelle genutzt [2-6]. Um jedoch das Blech erfolgreich zu trennen, müssen die übrigen Prozessparameter, wie zum Beispiel der Schneidgasdruck, der Düsenlochdurchmesser und der Abstand zwischen Düse und Blechoberfläche in geeigneter Kombination eingestellt werden [7]. Selbiges gilt auch für die Eigenschaften des Laserstrahls, wie zum Beispiel der Fokusbereich des Strahls, die Rayleigh-Länge, die Intensitätsverteilung und der Abstand zwischen der Strahltaile von der Oberseite des geschnittenen Blechs [7-9]. Die Kombination der genannten Prozessparameter und der Eigenschaften des Laserstrahls nehmen Einfluss darauf, ob und mit welcher maximalen Geschwindigkeit das Blech getrennt werden kann.

In der industriellen Praxis erfolgt die Parametersuche in der Regel über empirische Parameterstudien, bei denen durch die Variation einer oder mehrerer Parameter die maximale Schneidgeschwindigkeit experimentell bestimmt wird. Entsprechend erstellte Tabellen mit Prozessparametern und den Eigenschaften des Laserstrahls für das Schneiden gängiger Blechdicken sind frei zugänglich [7, 8]. Wie in Bild 1.3 gezeigt, sorgt die kontinuierliche Steigerung der zur Verfügung stehenden Laserleistung dafür, dass die maximal trennbare Blechdicke steigt. Gleichzeitig haben viele moderne Laserquellen und Schneidköpfe die Möglichkeit, verschiedene Eigenschaften des Strahls, wie zum Beispiel den Fokusbereich, flexibel zu variieren [10-13]. Dadurch müssen für einen erfolgreichen und produktiven Schneidprozess fortwährend neue Parametertabellen erstellt werden, was mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist und in Anbetracht der Menge an unterschiedlichen Parameterkombinationen kaum vollumfassend durchgeführt werden kann. Um diesen Zeitaufwand möglichst gering zu halten, wurden numerische Simulationen und komplexe analytische Modelle zur Beschreibung des Schneidprozesses entwickelt, um geeignete Prozessparameter vorherzusagen, mit welchen eine möglichst hohe Schneidgeschwindigkeit erzielbar ist [9, 14-19]. Im industriellen Umfeld finden solche Simulationen und komplexen Modelle jedoch kaum Anwendung, da deren komplizierte Nutzung oder die zu großen Abweichungen zu experimentellen Ergebnissen sie in der Praxis als untauglich erscheinen lassen. Dies hat zur Folge, dass möglichst einfache analytische Modelle benötigt werden, welche sowohl die Blechdicke als auch die Eigenschaften des Strahls berücksichtigen, um möglichst zielführend die Kombination aus Prozessparametern und

Eigenschaften des Laserstrahls zu identifizieren, bei der erfolgreich mit maximaler Schneidgeschwindigkeit gearbeitet werden kann.

1.2 Einflussgrößen auf die Schneidgeschwindigkeit

1.2.1 Stand der Technik

Ein einfacher analytischer Ansatz zur Abschätzung der maximalen Schneidgeschwindigkeit beim Laserschmelzschnitten mit gegebener Laserleistung folgt aus der Leistungsbilanz [20, 21], bei der die Summe aus der zum Erwärmen und Schmelzen des Materials erforderlichen Prozessleistung P_p und der durch Wärmeleitung verlorenen Leistung P_L die erforderliche absorbierte Gesamtleistung

$$P_{abs} = P \cdot \eta_A = P_p + P_L \quad (1.1)$$

ergibt. Hierbei entspricht P der einfallenden Laserleistung und η_A ist der Einkoppelgrad der Strahlung in der Schneidfuge. Bild 1.4 zeigt den Bereich der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl (rot) und Werkstück (grau), in der das aufgeschmolzene Material (gelb) aus der Schneidfuge ausgetrieben wird. Die Absorption findet auf der Schneidfront statt und hängt von der verwendeten Wellenlänge λ , dem Einfallswinkel θ , dem Material und dessen Temperatur und gegebenenfalls von auftretenden Mehrfachreflexionen ab.

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

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 Umwandlungshärrens 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

Laserschweißignung 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 Mo-lybdän
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

Fluidodynamische 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 magnetofluidynamische 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

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

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karoseriebau
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 Laserpräzisionsabtrags 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

Schinzal, 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-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität 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 keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

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

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- 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 Präzision 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 Aluminiumgusslegierungen 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 Laserstrahltafchweiffen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Mfller

Pulsenergiestabilitat bei regenerativen Kurzpuls-verstarkern im Scheibenlasersdesign
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

Laserstrahlschweiffen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflachenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-em Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen
2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas RuB

Schweiffen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit
2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflachen in der La-sermaterialbearbeitung
2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweiffen
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 gtegeschaltete Laserzundkerze
2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweiffen 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 Mfller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweiffen
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 Kfblér

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers
2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Gfnter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweiffen
2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflachenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung
2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breitling

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 Laserstrahlschweiffen
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 Hochgeschwindigkeitslaserschneiden
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

Speciality 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 Fügspalt
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 Fetzner

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen 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 Röhrer

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 La-
serleistung.
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

Leistungsskalierung 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

Christoph Röcker

Flexible Verstärkung und Frequenzkonversion
ultrakurzer Laserpulse mit Ausgangsleistungen
im kW-Bereich
2022, 182 Seiten, ISBN 978-3-8316-4987-7

Oliver Bocksrocker

Mechanismen der Entstehung von Schnittunre-
gelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 µm
Wellenlänge
2023, 128 Seiten, ISBN 978-3-8316-4999-0

Daniel Förster

Energieeinkopplung und Energieumwandlungs-
prozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit
ultrakurzen Laserpulsen
2023, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-5009-5

Daniel Holder

Laser micromachining with target depth
2023, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-5010-1

Florian Bienert

Periodenchirp optischer Gitter
2024, 222 Seiten, ISBN 978-3-8316-5061-3

Jannik Lind

Einfluss von Strahlformung auf Absorption, Fu-
genquerschnitt und Produktivität beim Laser-
schneiden
2024, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5062-0