

Nutzung von Pulsergien im Millijoule-Bereich beim Trennen mit ultrakurzen Laserpulsen

von Dr.-Ing. Anne Feuer
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. Andreas Otto

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.

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte
an unsere Adresse: utzverlag GmbH · Herr Matthias
Hoffmann-Nymphenburger Straße 91 · 80636
München · Telefon: 0049-89-27779100 oder
www.utzverlag.de

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2025

D DE 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2025

ISBN (Print) 978-3-8316-5083-5
ISBN (E-Book) 978-3-8316-7825-9

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
2 Stand der Technik	19
2.1 Trennen mit Lasern	19
2.2 Trennen metallischer Werkstoffe mit ultrakurzen Laserpulsen	22
2.2.1 Laserstrahlabtrag mit ultrakurzen Pulsen	22
2.2.1.1 Energieeinbringung und Energieeffizienz beim Laserstrahlabtrag von metallischen Werkstoffen	22
2.2.1.2 Qualitätsmindernde Effekte beim Laserstrahlabtrag	25
2.2.1.3 Steigerung der Produktivität beim Laserstrahlabtrag	28
2.2.2 Bohren metallischer Werkstoffe mit ultrakurzen Laserpulsen	30
2.2.2.1 Prozessgrenzen beim Bohren mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung	30
2.2.2.2 Qualität von Bohraustritten	32
2.2.2.3 Bohrmodelle für das Perkussionsbohren	37
2.2.3 Forschungsbedarf und Zielsetzung	40
2.3 Trennen dielektrischer Werkstoffe mit ultrakurzen Laserpulsen	42
2.3.1 Energieeinbringung in dielektrischen Werkstoffen	42
2.3.2 Volumenmodifikationen	44
2.3.3 Verfahren zum Trennen von transparenten Dielektrika	45
2.3.4 Volumenmodifikationen mittels Gauß-Bessel-Strahlen	47
2.3.5 Forschungsbedarf und Zielsetzung	49
3 Untersuchungen zur Qualität von Bohraustritten beim Perkussionsbohren mit ultrakurzen Laserpulsen	50

3.1	Investigations into the occurrence of microstructures by means of in-situ depth measurements during percussion drilling with ultrashort laser pulses	50
	Abstract	51
3.1.1	Introduction	51
3.1.2	Analytical ablation model for multiple pulses at the same position	53
3.1.3	Experimental study of the drilling process	56
3.1.4	Method: Moving window estimation of the correction factor c_A .	59
3.1.5	Results and Discussion	61
3.1.6	Conclusion	65
3.2	High-quality percussion drilling with ultrashort laser pulses	69
	Abstract	69
3.2.1	Introduction	70
3.2.2	Method	71
3.2.3	Evolution of the edge quality during the drilling process .	73
3.2.4	Analytical model of the fluence at the exit of percussion-drilled microholes	76
3.2.5	Experimental verification	80
3.2.6	Conclusion	82
3.3	Einordnung der Ergebnisse	87
4	Untersuchungen zum Lasertrennen von Glas durch Volumenmodifikationen	89
4.1	Single-pass laser separation of 8 mm thick glass with a millijoule picosecond pulsed Gaussian-Bessel beam	89
	Abstract	89
4.1.1	Introduction	90
4.1.2	Calculation of the modification length	91
4.1.3	Experimental Setup	93
4.1.4	Results and Discussion	94
4.1.5	Conclusion	98
4.2	Einordnung der Ergebnisse	102
5	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Literaturverzeichnis	107
	Danksagung	117

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
α	Oberflächenwinkel	rad
α_N	Oberflächenwinkel nach dem N -ten Puls	rad
α_w'	Korrigierter Einfallswinkel	rad
β	Öffnungswinkel Axikon	rad
ε_V	Gesamtenergiedicht für Schmelzen und Verdampfen des Materials	$J \cdot m^{-3}$
η	Einkoppelgrad	-
λ	Wellenlänge des Laserstrahls	m
ξ	Riefenamplitude	m
σ	Umfangverhältnis	-
τ_{ep}	Elektron-Phonon-Relaxationszeit	s
φ	Winkelkoordinate	rad
Φ	Bestrahlung	$J \cdot m^{-2}$
Φ_0	Spitzenfluenz des Laserstrahls	$J \cdot m^{-2}$
$\Phi_{\eta,exit}$	absorbierte Bestrahlung an der Kante des Bohrlochaustritts	$J \cdot m^{-2}$
$\Phi_{\eta,q}$	absorbierte Bestrahlung an der Qualitätsschwelle	$J \cdot m^{-2}$
$\Phi_{\eta,tip}$	absorbierte Bestrahlung an der Bohrungsspitze	$J \cdot m^{-2}$
Φ_{abs}	absorbierte Bestrahlung	$J \cdot m^{-2}$
$\Phi_{abs,th}$	absorbierte Bestrahlung an der Abtragsschwelle	$J \cdot m^{-2}$
$\Phi_G(r)$	Fluenz des Laserstrahls mit gaußförmiger Verteilung entlang der Ortskoordinate r	$J \cdot m^{-2}$
Φ_L	Fluenz des Laserstrahls	$J \cdot m^{-2}$
Φ_{th}	Bestrahlung an der Abtragsschwelle	$J \cdot m^{-2}$
Ω_G	Raumwinkel, unter dem die Öffnung eines Bohrlochs vom Bohrungsgrund aus gesehen wird	rad
A	Absorptionsgrad	-
A_{Cone}	Oberfläche einer kegelförmigen Bohrung	m^3
c_A	Korrekturfaktor	-

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
$c_{A,j}$	Korrekturfaktor	-
d_0	Durchmesser des Laserstrahls in der Fokusebene	m
d_B	Durchmesser der zentralen Intensitätsspitze eines Gauß-Bessel-Strahls	m
d_S	Durchmesser des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche	m
e	Eulersche Zahl	-
E_G	Energie der Bandlücke	J
E_P	Pulsenergie	J
f_R	Repetitionsrate des Lasers (Pulswiederholungsrate)	s ⁻¹
i	Laufvariable	-
I	Intensität des Laserstahls	W · m ⁻²
I_0	Spitzenintensität des Laserstrahls	W · m ⁻²
I_M	Intensität an der Schwelle für Modifikationen in Dielektrika	W · m ⁻²
j	Laufvariable	-
$J_0(r)$	Besselfunktion erster Gattung 0-ter Ordnung als Funktion der Radialkoordinate r	-
k	Breite des Datenfensters	-
k_1	Absorptionskoeffizient Medium 1	-
k_2	Absorptionskoeffizient Medium 2	-
l_α	optische Eindringtiefe	m
l_e	Energieeindringtiefe	m
l_{ep}	effektive Eindringtiefe	m
l_M	Modifikationslänge	m
l_{th}	thermische Eindringtiefe	m
M^2	Beugungsmaßzahl	-
n_1	Realteil des Brechungsindex Medium 1	-
\tilde{n}_1	Komplexer Brechungsindex Medium 1	-
\tilde{n}_2	Komplexer Brechungsindex Medium 2	-
n_a	Brechungsindex Axikon	-
n_e	Elektronendichte	m ⁻³
n_e^{cr}	kritische Elektronendichte	m ⁻³
n_{glass}	Brechungsindex Glas	-
N	Pulsanzahl	-
ΔN_q	Pulsanzahlbereich nach Durchbruch der Laserstrahlung durch das Material für Bohraustritte hoher Qualität	-

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
N^*	Pulsanzahl bei Durchbruch der Laserstrahlung durch das Material	-
N^{**}	Pulsanzahl, bei der gilt $\Phi_{\eta,\text{exit}} \leq \Phi_{\eta,q}$	-
\bar{P}	mittlere Leistung des Lasers	W
$Q_V(r,z)$	Räumliche Verteilung der absorbierten Energiedichte	J· m ⁻³
r	Radialkoordinate	m
r_{entr}	Radius des Bohrlocheintritts	m
r_s	Reflexionskoeffizient des elektrischen Feldes für senkrecht polarisierte Strahlen	-
r_p	Reflexionskoeffizient des elektrischen Feldes für parallel polarisierte Strahlen	-
R	Reflexionsgrad	-
R_0	Reflexionsgrad bei senkrecht einfallenden Strahlen	-
R_c	Reflexionsgrad für zirkular polarisierte Strahlen	-
R_p	Reflexionsgrad für parallel polarisierte Strahlen	-
R_s	Reflexionsgrad für senkrecht polarisierte Strahlen	-
S_a	mittlere arithmetische Höhe (Mittenrauwert)	m
S_G	Verhältnis zwischen der Öffnung eines Lochs und der gesamten Oberfläche des Lochs einschließlich der Öffnung	-
t_B	Durchbruchzeit	s
t_D	Bohrzeit	s
t_P	Pulsdauer	s
w	Strahlradius	m
w_0	Strahlradius in der Fokusebene	m
w_R	Radius des Laserstrahls vor der Fokussierlinse (Rohstrahlradius)	m
z	Ortskoordinate in Propagationsrichtung des Laserstrahl	m
z_{abl}	Abtragstiefe	m
$z_{\text{abl},N}$	Berechnete Ablationstiefe nach dem N -ten Puls	m
$z_{\text{abl},N+1}$	Berechnete Ablationstiefe nach dem $(N + 1)$ -ten Puls	m
$z_{\text{abl},N}(z_{\text{oct},j})$	Berechnete Ablationstiefe bei der Pulsanzahl des j -ten Messpunktes	m
z_f	Position der Fokusebene des Laserstrahls entlang der Propagationsrichtung z	m
z_M	Materialdicke	m

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
z_{OCT}	gemessene Bohrtiefe	m
$z_{OCT,j}$	gemessene Bohrtiefe beim j-ten Messpunkt	m
z_P	Propagationslänge des Gauß-Bessel-Strahls	m
z_q	Tiefe im Bohrloch, bei der die Fluenz im Bohrloch $\Phi_{\eta,q}$ entspricht	m
z_R	Rayleighlänge	m
z_{tip}	Tiefe der Bohrungsspitze	m

Abkürzung	Bedeutung
3D	dreidimensional
AISI 304	Edelstahl 1.4301 (X5CrNi18-10)
BK7	Borosilikat-Kronglas
CW	engl. continuous wave (Dauerstrich)
CLP	engl. <i>cone-like protrusions</i>
DOE	diffraktives optisches Element
DLIP	engl. <i>direct laser interference patterning</i>
FWHM	engl. <i>full width at half maximum</i> (Halbwertsbreite)
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge
kW	Kilowatt
LIPSS	engl. <i>laser-induced periodic surface structures</i>
N-BK7	arsen- und bleifreies Borosilikat-Kronglas der Fa. Schott AG
OCT	engl. <i>optical coherence tomography</i> (optische Kohärenz-tomographie)
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SLE	engl. <i>selective laser-induced etching</i> (Selektives laser-induziertes Ätzen)
SLM	engl. <i>spatial light modulator</i> (räumlicher Lichtmodulator)
UKP	Ultrakurzpuls
WEZ	Wärmeeinflusszone
WWZ	Wechselwirkungszone
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
μ -CT	Mikro-Computertomographie

Kurzfassung

Ultrakurzpuls laser haben in den letzten Jahrzehnten hinsichtlich Pulsennergie und mittlerer Leistung eine rasante Entwicklung vollzogen. Die Verfügbarkeit von kommerziellen Ultrakurzpuls lasern mit Pulsenenergien bis in den Millijoule-Bereich bei einigen 100 kHz Repetitionsrate eröffnet nicht nur neue Größenordnungen und Anwendungsfelder in der Bearbeitung mit ultrakurzen Pulsen, sondern ermöglicht und fordert ganz neue Konzepte der Bearbeitung. Um einen übermäßigen Wärmeeintrag ins Bauteil zu vermeiden und Präzision und Qualität bei der Ultrakurzpulsbearbeitung auch mit hohen mittleren Leistungen zu gewährleisten, bedarf es dabei spezifisch angepasster und ausgefeilter Bearbeitungsstrategien für die effiziente Nutzung der Laserenergie, die je nach Anwendungsfall variieren. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war anhand des Lasertrenns zu zeigen, wie hohe Pulsennergien in der Materialbearbeitung mit ultrakurzen Pulsen zur Steigerung der Qualität und der Prozessgeschwindigkeit genutzt werden können. Da metallische und dielektrische Werkstoffe aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialeigenschaften wesentliche Unterschiede in der Energieeinbringung und im Materialabtrag aufweisen und es damit zu sehr unterschiedlichen qualitätsmindernden Effekten kommt, können die Erkenntnisse von einer Materialklasse nicht auf die andere übertragen werden und bedürfen getrennter Untersuchungen. Im Falle metallischer Werkstoffe erfolgte dies exemplarisch anhand des Perkussionsbohrens und bei dielektrischen Werkstoffen am Beispiel des Trenns von Glas durch laserinduzierte Volumenmodifikationen. Beim Perkussionsbohren in Metall war es das Ziel, Bedingungen für die am Bohraustritt absorbierte Bestrahlung abzuleiten, unter denen qualitativ hochwertige Bohraustritte erzeugt werden können. Beim Perkussionsbohren verteilt sich die Pulsennergie über die innere Wand der Bohrung, deren Fläche mit fortschreitendem Bohrverlauf stetig zunimmt. Die Bestrahlung, welche als Pulsennergie pro bestrahlte Fläche definiert ist, nimmt innerhalb der Bohrung folglich stetig ab. Dass die Bestrahlung einen wesentlichen Einfluss auf die Bohrqualität hat, war aus der Literatur bereits bekannt, jedoch fehlte bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit eine systematische Untersuchung, aus der generelle Bedingungen für eine gute Qualität am Austritt der Bohrung abgeleitet werden können. Arbeiten zum Perkussionsbohren hatten hinsichtlich Bohrqualität im Wesentlichen die Verminderung von Schmelzebildung und Formabweichungen des Bohreintritts durch Wärmeakkumulationseffekte und

laserinduzierte Plasmen zum Ziel. Aus den Ergebnissen dieser Arbeiten konnte ein nutzbares Prozessfenster für die einsetzbaren Pulsenergien und Repetitionsraten bestimmt werden, bei denen die genannten Effekte zu keiner Verschlechterung der Bohrqualität durch übermäßige Schmelzebildung und Formabweichung führen. Dennoch zeigen die Bohraustritte von Perkussionsbohrungen auch unter Einhaltung des nutzbaren Prozessfensters verschiedenste Formabweichungen. Bei niedrigen Aspektverhältnissen sind Formabweichungen auf selbstorganisierende Mikrostrukturen zurückzuführen, die sich am Bohrungsgrund bilden, solange die Bohrgeometrie eine paraboloiden Form aufweist. Bei höheren Aspektverhältnissen, wenn von einer kegelförmigen Bohrung ausgegangen werden kann, wird vermutet, dass die absorbierte Bestrahlung die bestimmende Größe für die Qualität der Bohraustritte ist. In der vorliegenden Arbeit wurden daher (1) das Auftreten von Mikrostrukturen bei Bohrungen mit einem niedrigen Aspektverhältnis und (2) der Einfluss der absorbierter Bestrahlung auf die Qualität des Bohraustritts bei Bohrungen mit kegelförmiger Bohrungsgeometrie untersucht.

Das Auftreten von Mikrostrukturen am Bohrungsgrund bei Perkussionsbohrungen in Edelstahl konnte durch die Entwicklung einer modellbasierten Datenanalyse von in-situ Tiefenmessungen bestimmt werden, wobei sich das Auftreten der Mikrostrukturen durch Abweichungen der Modellerwartung von den gemessenen Tiefenwerten zeigte. Für die modellbasierte Datenanalyse wurde ein analytisches Modell um einen adaptiven Korrekturfaktor c_A erweitert, mit dem die durch Mikrostrukturen verursachten Änderungen des Einkoppelgrads erfasst werden können. Die Analyse der zeitlichen Entwicklung von c_A über den gesamten Bohrverlauf zeigte, dass das Auftreten von Mikrostrukturen mit einem erhöhten Einkoppelgrad korreliert und dass der Einkoppelgrad abnimmt, wenn sich ein Bohrloch mit einer einzelnen Spitze bildet. Das maximale Aspektverhältnis der Bohrung, bei dem Mikrostrukturen auftreten, betrug 1,5. Daher kann das Aspektverhältnis von 1,5 als Obergrenze für das Auftreten von Mikrostrukturen beim Perkussionsbohren in Edelstahl verstanden werden. Mit der Ausbildung einer Bohrungsspitze kann die Bohrungsgeometrie durch eine Kegelform angenähert werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde der Einfluss der absorbierter Bestrahlung auf die Qualität des Bohraustritts systematisch untersucht. Zur quantitativen Bewertung der Kantenqualität des Bohraustritts wurden die zwei Größen Riefenamplitude ξ und Umfangverhältnis σ eingeführt. Die Form der Bohraustritte wurde mittels eines automatisierten Bildanalyseverfahrens erfasst, welches auf einem trainierten Lernalgorithmus basiert. Ein Vergleich der experimentellen Studie mit berechneten Bestrahlungswerten nach einem analytischen Modell für den Tiefenverlauf von kegelförmigen Perkussionsbohrungen zeigte, dass sich die Kantenqualität des

Bohraustritt verschlechtert, sobald die Bestrahlung am Bohraustritt das 2,8-fache der Abtragsschwelle unterschreitet. Mit diesem Ergebnis lässt sich nun erstmals abschätzen, bis zu welcher Tiefe Bohraustritte hoher Qualität gefertigt werden können und ab wie vielen Pulsen nach dem Bohrungsdurchbruch eine Verschlechterung der Kantenqualität eintritt. Wird beim Perkussionsbohren beides berücksichtigt, ist die erreichbare Qualität der Perkussionsbohrungen für viele Anwendungen ausreichend und kann gegenüber dem aufwendigeren Wendelbohrverfahren eine deutliche Zeit- und Kostenersparnis bringen.

Beim Lasertrennen von Glas wurde die starke Intensitätsabhängigkeit von nicht-linearen Absorptionsprozessen in Dielektrika genutzt, um die hohe Pulsennergie im Materialvolumen zu verteilen und mittels Strahlformung langgestreckte Volumenmodifikationen entlang der Materialdicke zu erzeugen. Durch den Einsatz von Pulsenenergien im Bereich von einigen Millijoule konnte eine signifikante Erhöhung der trennbaren Materialdicke hin zu mehreren Millimetern erreicht werden. Bis zum Zeitpunkt der Arbeit lag die Glasdicke, die maximal mit einer Überfahrt getrennt werden konnte, bei 1 mm. Zur Erzeugung der langgestreckten Volumenmodifikationen in Glas wurde ein Axikon eingesetzt, welches einen Laserstrahl mit einer besselstrahlähnlichen Intensitätsverteilung erzeugt, dessen Intensitätsmaximum über eine ausgedehnte Distanz entlang der Strahlachse erhalten bleibt. Mit dieser Anordnung konnte zusammen mit der hohen mittleren Leistung von insgesamt 780 W eines Laserprototyps des Instituts für Strahlwerkzeuge (IFSW) die Volumenmodifikationen in Borosilikatglas auf bis zu 12 mm gesteigert und erstmals das Lasertrennen von 8 mm dickem Kalk-Natron-Glas in einer Überfahrt demonstriert werden. Damit ermöglichen hohe Pulsennergien beim Glastrennen die Fertigung komplexer Konturen mit hoher Kantenqualität und hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit auch in dicken Gläsern ($> 1 \text{ mm}$).

Die Arbeiten zum Lasertrennen mit ultrakurzen Laserpulsen zeigen, dass hohe Pulsennergien genutzt werden können, um die beiden meist gegenläufigen Ziele der industriellen Fertigung, Präzision und Prozessgeschwindigkeit, zu verbessern. Voraussetzung dafür ist ein ausreichendes Prozessverständnis, um auf den jeweiligen Anwendungsfällen zugeschnittene Bearbeitungsstrategien entwickeln zu können.

Extended Abstract

In recent decades, ultrafast lasers have undergone rapid development in terms of pulse energy and average power. The availability of commercial ultrafast lasers with pulse energies up to the millijoule level at a repetition rate of several 100 kHz not only opens up new orders of magnitude and fields of application in machining with ultrashort pulses, but also enables and demands completely new machining concepts. In order to avoid excessive heat input into the workpiece and to ensure precision and quality in machining with ultrashort laser pulses even with high average power, specifically adapted and advanced machining strategies are required for the efficient use of laser energy, which vary depending on the application. The overall aim of this work was to use separating processes to show how high pulse energies can be used in materials processing with ultrashort pulses to increase quality and process speed. As metallic and dielectric materials exhibit significant differences in energy deposition and material removal due to their different material properties, resulting in very different quality-reducing effects, the findings from one material class cannot be transferred to the other and require separate investigations. In the case of metallic materials, this was done through the example of the percussion drilling process and in the case of dielectric materials, this was done through the example of glass separation by laser-induced in-volume modifications.

For percussion drilling in metal, the objective was to derive conditions for the absorbed radiant fluence reaching the rear exit of the hole under which high-quality hole exits can be produced. In percussion drilling, the pulse energy is distributed over the inner wall of the drilled hole, whose surface area increases steadily as the drilling process progresses. The radiant fluence, which is defined as pulse energy per irradiated area, thus decreases accordingly. The fact that the radiant fluence has a significant influence on drilling quality was already known from the literature, but to date there has been no systematic investigation from which general conditions for high drilling quality can be derived. With regard to drilling quality, studies on percussion drilling were essentially aimed to reduce melt formation and shape deviations of the hole entrance due to heat accumulation effects and laser-induced plasmas. From the results of this work, it was possible to determine a usable process window for the pulse energies and repetition rates that can be used, at which the effects mentioned do not lead to a deterioration in drilling quality due to excessive

melt formation and shape deviation. Nevertheless, the exits from percussion drilled holes show a wide range of shape deviations even when the usable process window is adhered to. At low aspect ratios, shape deviations are due to self-organising microstructures that form at the bottom of the hole as long as the hole geometry has a paraboloid shape. At higher aspect ratios, when a conical shaped hole can be assumed, it is postulated that the absorbed radiant fluence is the decisive quantity for the quality of the hole's exit. In the present work, therefore, (1) the occurrence of microstructures in boreholes with a low aspect ratio and (2) the influence of the absorbed radiant fluence on the quality of the hole's exit in boreholes with a conical geometry were investigated.

The occurrence of microstructures at the bottom of percussion drilling in stainless steel could be determined by the development of a model-based data analysis of in-situ depth measurements, whereby the occurrence of microstructures was shown by deviations of the model expectation from the measured depth values. For the model-based data analysis, an adaptive correction factor c_A was introduced into an analytical drilling model to account for the changes in absorptance caused by the microstructures. The analysis of the temporal evolution of c_A showed that the occurrence of microstructures correlates with an increased absorptance and that the absorptance decreases when a borehole with a single tip is formed. The maximum aspect ratio of the percussion-drilled holes at which microstructures occurred was 1.5. Therefore, the aspect ratio of 1.5 can be understood as an upper limit for the occurrence of microstructures of percussion drilled holes in stainless steel. With the formation of a single drilling tip, a conically shaped hole can be assumed.

Based on these results, the influence of the absorbed radiant fluence on the quality of the hole's exit was systematically investigated. The two quantities, striations amplitude ξ and perimeter ratio σ , were introduced to quantitatively evaluate the edge quality of the hole exit. The shape of the hole's exits was determined using an automated image analysis method based on a trained learning algorithm. By comparing the experimental study with calculated fluence values according to an analytical model for the depth progression of conically shaped percussion-drilled holes, it was found that the quality of the hole's exit quickly deteriorates with increasing number of pulses as soon as the radiant fluence that is absorbed near the edge of the exit falls below a limit value of 2.8 times the ablation threshold. With this result, it is now possible for the first time to estimate the depth to which high-quality exits can be produced and the number of pulses after breakthrough at which a deterioration in edge quality occurs. If both of these aspects are considered, the quality that can be achieved in percussion drilling is sufficient for many applications and can result in significant time and cost savings compared to the more complex

helical drilling process.

In laser separation of glass, the strong intensity dependence of non-linear absorption processes in dielectrics was used to distribute the high pulse energy in the material volume and to generate elongated in-volume modifications along the material thickness by means of beam shaping. By applying pulse energies in the range of a few millijoules, a significant increase in the separable material thickness up to several millimetres could be achieved. Up to the time of the work, the maximum glass thickness that could be separated with one pass was 1 mm. To generate the elongated volume modifications in the glass, an axicon was used, which generates a laser beam with a Bessel-like intensity distribution, whose intensity maximum is maintained over an extended distance along the beam axis. With this setup, combined with the high average power of 780 W of a prototype laser from the Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), the volume modifications in borosilicate glass could be increased to up to 12 mm and the laser separation of 8 mm thick soda-lime glass with one pass was demonstrated for the first time. Thus, high pulse energies in glass separation allow the manufacturing of complex contours with high edge quality and high processing speed, even in thick glass (> 1 mm).

The present studies on laser separation with ultrashort laser pulses show that high pulse energies can be used to enhance the two often opposing objectives of industrial production: precision and process speed. Achieving this requires a thorough understanding of the process specific to each application, enabling the development of processing strategies tailored to the respective application.

1 Einleitung

Ultrakurzpulsar haben in den vergangenen 25 Jahren hinsichtlich der Steigerung der Pulsennergie und der mittleren Leistung eine rasante Entwicklung vollzogen [1–3]. Während bis Ende der Nullerjahre die mittlere Ausgangsleistung von kommerziellen Ultrakurzpulslasern mit wenigen 10 W [2–4] noch so gering war, dass eine industrielle Fertigung mit ultrakurzen Pulsen (UKP) lediglich im Nischenbereich vorkam [4], stehen im Jahr 2024 bereits die ersten Hochleistungs-UKP-Laser mit einer mittleren Ausgangsleistung von einigen 100 W zur Verfügung [3]. Ein erstes, in der Kommerzialisierung befindliches System weist bereits Pulsennergien von bis zu 10 mJ bei einer Repetitionsrate von 100 kHz auf [5], und im Labormaßstab wurden bereits mittlere Leistungen von bis zu 10 kW gezeigt [6]. Damit verschieben sich die Grenzen hinsichtlich Prozesszeiten und bearbeitbarer Dimensionen um Größenordnungen und eröffnen neue Anwendungsfelder für die UKP-Bearbeitung. War die präzise Laserbearbeitung mit minimalem Wärmeeintrag vormals im Wesentlichen der Bearbeitung im zwei- bis dreistelligen Mikrometerbereich vorbehalten, was dem Technologiezweig hinsichtlich Präzision und räumlicher Dimension gleich im doppelten Sinne ihren Namen Mikromaterialbearbeitung verlieh, dringt die UKP-Bearbeitung heute bis in den zweistelligen Millimeterbereich vor [7, 8]. Mit der Verfügbarkeit hoher Pulsennergien bis in den Millijoule-Bereich ist das Prozessverständnis für die jeweiligen Fertigungsverfahren gefragter denn je, um weiterhin hohe Präzision und Qualität in der Bearbeitung mit ultrakurzen Pulsen garantieren zu können. Der sorgfältigen Auswahl der optimalen Prozessparameter kommt daher in der Verfahrensentwicklung eine zentrale Bedeutung zu und muss abhängig vom Material des Werkstücks sowie von den Anforderungen einer Anwendung individuell getroffen werden [9]. Insbesondere metallische und dielektrische Werkstoffe weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialeigenschaften wesentliche Unterschiede in der Energieeinbringung und im Materialabtrag auf und bedürfen besonders darauf zugeschnittener Lösungsansätze.

Bei metallischen Werkstoffen liegt die optische Eindringtiefe der Laserstrahlung für alle gängigen Wellenlängen im Nanometerbereich, sodass die Transmission von Strahlung in metallischen Werkstoffen in der Regel vernachlässigt werden kann. Aufgrund der geringen Absorptionslänge ist die Wärmefreisetzung in metallischen Werkstoffen auf eine dünne, oberflächennahen Schicht beschränkt und entspricht

damit dem Wirken einer Oberflächenwärmequelle [10]. Obwohl der Einsatz von ultrakurzen Pulsen nach dem Zwei-Temperatur-Modell vernachlässigbare Wärmeleitung und Schmelzefilmtdicken im Bereich der Absorptionslänge verspricht, wurde in Untersuchungen gezeigt, dass die Schmelzefilmtdicke nicht unabhängig von der absorbierten Bestrahlung, d. h. der absorbierten Pulsennergie pro Fläche, betrachtet werden kann und dass der Abtrag auch bei der Ultrakurzbearbeitung mit Schmelzebildung einhergeht [10–12]. Energetische Betrachtungen des Materialabtrags zeigen zudem, dass bei zu hohen Bestrahlungswerten die eingesetzte Pulsennergie zu einer stärkeren Überhitzung des abgetragenen Materials führt und nur bedingt zur Erhöhung des abgetragenen Volumens [13–15]. Bei der Laserbearbeitung von metallischen Werkstoffen erweisen sich Hochleistungs-Ultrakurzpulsgeräte mit hohen Pulsenenergien daher vor allem in den Bereichen als äußerst vielversprechend, in denen höhere Pulsenenergien durch eine Vergrößerung der bestrahlten Fläche [16], was auch durch eine Aufspaltung des Laserstrahls in mehrere Teilstrahlen zur parallelen Bearbeitung [10] realisierbar ist, zur Produktivitätssteigerung genutzt werden können. Dazu gehören Verfahren der Oberflächenstrukturierung mittels direkter Laserstrahlinterferenz [17] und die schreibenden Verfahren [10].

Beim Laserstrahlbohren sind solche Methoden, welche in erster Linie die Reduktion der eingestrahlten Energie pro Fläche zum Ziel haben, nur bedingt einsetzbar. Zum einen kann der Strahldurchmesser in der Regel nicht beliebig groß gewählt werden, sondern ist durch die Anforderungen der Anwendung festgelegt. Zum anderen nimmt die absorbierte Bestrahlung am Bohrungsgrund mit zunehmender Bohrtiefe und steiler werdenden Bohrungswänden ab. Die Herstellung von Bohrungen mit hohem Aspektverhältnis erfordert daher zwangsläufig hohe Pulsenenergien [10]. Für die Ableitung geeigneter Bearbeitungsstrategien beim Perkussionsbohren muss jedoch zunächst geklärt werden, welche Auswirkungen die eingesetzte Pulsennergie auf die Bohrqualität hat. Die Arbeiten der vergangenen Jahre, welche die Verbesserung der Qualität von Laserbohrungen als Forschungsgegenstand hatten, beschäftigten sich weitestgehend mit dem Wendelbohrprozess, bei dem eine Verbesserung der Qualität dadurch erreicht wird, dass der Laserstrahl auf einer Kreisbahn geführt wird und ein Anstellwinkel des Strahls gegenüber der Werkstückoberfläche ermöglicht wird [4, 18, 19]. Arbeiten zum Perkussionsbohren hatten hinsichtlich Bohrqualität im Wesentlichen die Verminderung von Schmelzebildung und Formabweichungen des Bohreintritts durch Wärmeakkumulationseffekte und laserinduzierte Plasmen zum Ziel [1, 7, 20]. In der Literatur fehlte bisher eine systematische Untersuchung des Einflusses der absorbierten Bestrahlung auf die Qualität des Bohraustritts. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit beim Perkussionsbohren von Metallen untersucht und es wurden Bedingungen abgeleitet, unter denen Bohraustritte von hoher Quali-

tät entstehen.

Bei transparenten Dielektrika ist die Bearbeitungsqualität nicht nur durch die Abtragsmechanismen, sondern zusätzlich durch die nichtlinearen Absorptions- und Ionisationsprozesse bestimmt [21, 22]. Aufgrund der hohen Intensitäten, die für das Einsetzen der nichtlinearen Absorptionsprozesse notwendig sind, sowie der niedrigen Wärmelieftfähigkeit von transparenten Dielektrika bleibt die Wirkung der Energieeinkopplung lokal begrenzt und erlaubt damit eine präzise Bearbeitung [8, 23]. Allerdings können die hohen Elektronendichten, die durch die Bearbeitung mit hohen Intensitäten im Dielektrikum auftreten, zu elektronischen Schäden wie unerwünschter Riss- und Filamentbildung sowie Brechungsindexänderungen führen [24–26]. Gleichzeitig setzt das Auftreten nichtlinearer Effekte wie die Filamentbildung durch Selbstfokussierung, welche ab einem kritischen Wert der Pulsspitzenleistung auftritt, der einsetzbaren Pulsennergie eine obere Grenze [24, 26]. Für den Einsatz hoher Pulsennergien bei der Bearbeitung von Dielektrika bedarf es dafür spezifischer Lösungsstrategien. Aufgrund der starken Intensitätsabhängigkeit der nichtlinearen Absorptionsprozesse ist es möglich, durch geeignete Fokussierung des Laserstrahls lokal Strahlungsenergie in das Volumen des Dielektrikums einzubringen und somit sehr gezielt strukturelle Veränderungen im Materialvolumen herbeizuführen [27, 28]. Insbesondere die Erzeugung von langgestreckten Volumenmodifikationen mittels Strahlformung ist besonders vielversprechend, um Schädigungen trotz hoher Pulsennergien zu minimieren und gleichzeitig hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und -qualitäten zu ermöglichen. Beim Lasertrennen von transparenten Dielektrika können solche langgestreckten Volumenmodifikationen genutzt werden, um Sollbruchstellen über die gesamte Materialdicke zu erzeugen, die entlang der Trennkante aneinander gereiht eine Werkstücktrennung in einem zweiten Prozessschritt ermöglichen [29, 30]. Die Länge der Volumenmodifikation skaliert dabei mit der eingestrahlten Pulsennergie. Daher können höhere Pulsennergien direkt zur Steigerung der trennbaren Materialdicke eingesetzt werden. Um die Fluenz des Laserstrahls über Strecken von einigen Millimetern ausreichend hoch zu halten, müssen allerdings speziell angepasste Strahlprofile, sogenannte „nicht-beugende“ Strahlen [31, 32], eingesetzt werden. Solch ein angepasstes Strahlprofil weisen Gauß-Bessel-Strahlen auf, die durch den Einsatz eines Axikons aus Laserstrahlen mit einer gaußförmigen Fluenzverteilung erzeugt werden können [29]. Ein Nachteil der Gauß-Bessel-Strahlen ist jedoch, dass nur ein Bruchteil der Pulsennergie für den Prozess zur Verfügung steht [32]. Daher war diese Form des Trennens lange Zeit auf Glasdicken bis 1 mm beschränkt [33, 34]. Erst die Verfügbarkeit von Pulsennergien bis in den Millijoule-Bereich erlaubte das Trennen größerer Materialdicken. Hierbei spielte die Entwicklung des UKP-Scheibenlasers am IFSW eine entscheidende Rolle. Im Jahr 2013 wurde am IFSW

der erste Prototyp-UKP-Laser mit einer mittleren Ausgangsleistung von 1 kW vorgestellt [35]. Bei einer Repetitionsrate von 800 kHz stellte dieser Prototyp bei einer Wellenlänge von 1030 nm erstmalig eine Pulsennergie von bis zu 1,4 mJ zur Verfügung. Zwei Jahre später folgte eine weitere Steigerung der Pulsennergie auf 4,7 mJ bei einer Repetitionsrate von 300 kHz [36]. Dies ebnete den Weg für das Trennen von Gläsern mit Materialdicken deutlich über dem Stand der Technik von bis dahin 1 mm. Nur ein Jahr später, 2016, konnte im Labor am IFSW die Pulsennergie nochmals bis 6,7 mJ gesteigert werden [37].

Die rasante Entwicklung der UKP-Laser hinsichtlich der Pulsennergie zeigt, dass für eine industrielle Fertigung die Leistungsfähigkeit des Lasers nicht mehr den limitierenden Faktor darstellt. Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu zeigen, wie die hohen Pulsennergien von UKP-Lasern bis in den Millijoule-Bereich für die Materialbearbeitung genutzt werden können, um Präzision und Wirtschaftlichkeit bei der Ultrakurzpulsbearbeitung zu verbessern. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf das Trennen von metallischen und dielektrischen Werkstoffen. Im Falle des Perkussionsbohrens in Metall wurde gezeigt, dass durch den Einsatz hoher Pulsennergien die Qualität des Bohraustritts deutlich gesteigert werden konnte. In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss der absorbierten Bestrahlung auf die Qualität des Bohraustritts abgeleitet. Hinsichtlich des Trennens von Glas wurde erstmals gezeigt, dass hohe Pulsennergien bis in den Millijoule-Bereich genutzt werden können, um eine signifikante Steigerung der trennbaren Materialdicke in transparenten Dielektrika zu erreichen.

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Technik hinsichtlich des Lasertrennens in metallischen und dielektrischen Werkstoffen behandelt und anhand dessen der Forschungsbedarf und die Zielsetzung der wissenschaftlichen Arbeit abgeleitet. Die Kapitel 3 und 4 umfassen die Darlegung der wissenschaftlichen Arbeiten aus bereits publizierten Veröffentlichungen mit jeweils einer kurzen Einordnung der wissenschaftlichen Ergebnisse in den Stand der Technik. Die Abschnitte 3.1 und 3.2 beinhalten die Untersuchung der Bohrqualität beim Perkussionsbohren in Metall. Danach folgt in Abschnitt 4.1 die Untersuchung zum Glastrennen mit Pulsennergien bis in den Millijoule-Bereich. Den Abschluss dieser Arbeit bildet Kapitel 5 mit einer Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse und einem Ausblick auf offene Forschungsthemen, die sich aus den in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen ergeben.

2 Stand der Technik

2.1 Trennen mit Lasern

Der Laser in der Materialbearbeitung ist ein thermisch wirkendes Strahlwerkzeug und wird in den meisten fertigungstechnischen Anwendungen zum Erhitzen, Schmelzen und Verdampfen von Werkstoffen eingesetzt [10, 38]. Fertigungsverfahren, bei denen der Zusammenhalt der Werkstoffteilchen örtlich aufgehoben wird, werden entsprechend der Klassifizierung nach DIN 8580 der Hauptgruppe „Trennen“ zugeordnet [39, 40]. Damit zählen in der Lasermaterialbearbeitung die Fertigungsverfahren Laserstrahlschneiden und Laserstrahlabtragen, welches auch Grundlage des Laserbohrrens ist, zu den trennenden Fertigungsverfahren [38, 41].

Der Vorteil des Trennens durch Laserstrahlung liegt vor allem in der hohen Flexibilität des Verfahrens, da sich in nahezu jedem Material jede beliebige Kontur fertigen lässt [10]. Beim Laserstrahlschneiden beruht das Verfahrensprinzip darauf, dass der fokussierte Laserstrahl an der geneigten Schnittfront absorbiert und der Werkstoff dort unter der thermischen Wirkung der absorbierten Strahlenergie aufgeschmolzen und teilweise verdampft wird [10]. Der Austrieb des abgetragenen Materials aus der Schnittfuge wird durch den Einsatz eines extern zugeführten Prozessgasstrahls realisiert, welcher im Allgemeinen koaxial zur optischen Achse des Laserstrahls gerichtet ist und mittels einer Schneiddüse geformt wird [10, 42]. Je nach Zustand des abgetragenen Werkstoffs, flüssiges Material, Oxidationsprodukt oder Dampf, welches aus der Schnittfuge entfernt wird, erfolgt üblicherweise die Unterscheidung verschiedener Verfahrensvarianten in Laser-Schmelzschniden, Laser-Brennschneiden und Laser-Sublimierschneiden [38, 41]. Im Vergleich zu anderen thermischen Verfahren können mit dem Laserstrahlschneiden sehr viel höhere Schneidgeschwindigkeiten, schmalere Wärmeeinflusszonen (WEZ) und allgemein eine höhere Formtreue erreicht werden. Bei biegeschlaffen Werkstoffen ist die kraftfreie Bearbeitung ein weiterer Vorteil des Strahlwerkzeugs Laser gegenüber anderen Schneidwerkzeugen [10]. Letzteres gilt ebenfalls für das Laserstrahlabtragen. Anders als beim Laserstrahlschneiden wird beim Laserstrahlabtragen das Material lokal mit einer definierten Abtragstiefe von der Werkstückoberfläche entfernt. Zu den abtragenden Verfahren zählen die schreibenden Verfahren, der flächige Strukturabtrag durch Musterprojektionsver-

fahren, das spanende Abtragen sowie das Bohren [10]. Erfolgt der Materialabtrag vorwiegend in der flüssigen Phase, kann das abgetragene Material ebenfalls durch einen extern zugeführten Prozessgasstrahl von der Werkstückoberfläche entfernt werden [38]. Aus Gründen der Prozessqualität wird aber in der Regel angestrebt, einen möglichst großen Anteil des abzutragenden Materials zu verdampfen, um damit die Schmelzefilmdicke möglichst gering zu halten [10]. Der Materialaustrrieb erfolgt in diesem Fall durch den Dampfdruck des verdampfenden Materials [10, 38]. Da die Schmelzefilmdicke u. a. von der Einwirkzeit der Laserstrahlung abhängt, werden beim Laserstrahlabtrag möglichst kurze Bestrahlungsdauern verwendet [10]. Zur Realisierung kurzer Bestrahlungsdauern kommen gepulste Lasersysteme zum Einsatz, bei denen die Bestrahlungsdauer durch die Pulsdauer t_p der erzeugten Pulse gegeben ist. Die kürzesten Pulsdauern werden mit sogenannten Ultrakurzpulslasern erzeugt. Bei diesen Lasern können Pulsdauern von einigen Hundert Pikosekunden bis herab in den Bereich von einigen Femtosekunden realisiert werden [10]. Mit der Anwendung von Pulsdauern im Pikosekundenbereich kann die durch den Puls erzeugte Schmelzefilmdicke so weit reduziert werden, dass sie in der Größenordnung der Absorptionslänge der Laserstrahlung im Material liegt. Für metallische Werkstoffe liegt diese bei allen gängigen Laserwellenlängen im Nanometerbereich, was somit eine hohe Präzision in der Fertigung ermöglicht. Das bedeutet aber auch, dass der Abtrag in diesem Fall weitestgehend in der dampfförmigen Phase erfolgt, was einen entsprechenden Energiebedarf zum Erreichen der Siedetemperatur und für die Verdampfungsenthalpie erfordert. Im Gegensatz dazu ist der Materialabtrag in vorwiegend flüssiger Form energieeffizienter und damit wirtschaftlicher, hinterlässt jedoch Schmelzereste, welche die Prozessqualität beeinträchtigen. Das Verhältnis von dampfförmigem zu flüssigem Abtrag bestimmt damit die erzielbare Qualität und Effizienz des Abtragsprozesses [10]. Dazu kommt, dass für die Produktivität eines Prozesses die genutzte mittlere Leistung des Lasers [10]

$$\bar{P} = E_p \cdot f_R \quad (2.1.1)$$

maßgebend ist und diese mit der Pulsenegie E_p und der Repetitionsrate f_R des Pulszuges skaliert. Eine zu hohe Pulsenegie und/oder eine zu hohe Repetitionsrate führt, wie später noch ausgeführt wird, allerdings ebenfalls zum Aufschmelzen des Materials und vermindert so die erreichbare Qualität. Der Zielkonflikt zwischen Qualität auf der einen Seite und Wirtschaftlichkeit auf der anderen Seite zeigt sich im Laserstrahlabtrag mit ultrakurzen Pulsen damit besonders deutlich und fordert ausfeilte, auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Bearbeitungsstrategien.

Bei dielektrischen Werkstoffen können durch ihre Sprödigkeit und durch die nicht-linearen Absorptionsprozesse, die in Dielektrika bei hohen Strahlungsintensitäten

wirken, neben den oben genannten Verfahren weitere Arten des Trennens mit dem Laser realisiert werden. Dazu gehören das Laser-Ritzen-und-Brechen (engl. *laser scribe and break*) [30, 43] und das Trennen durch Volumenmodifikationen [29, 30, 44]. Diese Trennverfahren erfolgen typischerweise mehrstufig, indem in einem ersten Prozessschritt mit dem Laser eine Kerbe abgetragen wird bzw. Volumenmodifikationen in das Material eingebracht werden und erst in einem zweiten Prozessschritt das Material durch mechanische oder thermische Belastung getrennt wird. Bei diesen Trennprozessen handelt es sich um eine Kombination mehrerer Verfahren, weswegen sie in den DIN-Normen nicht extra erfasst sind. Da sie aber ebenfalls die Aufhebung des Zusammenhalts von Körpern zum Ziel haben, werden sie in dieser Arbeit den Trennverfahren zugeordnet.

Während das Trennen durch Laser-Ritzen-und-Brechen in der Formkomplexität und trennbaren Materialdicke eingeschränkt und mit zeitaufwändigen Nachbearbeitungsschritten verbunden ist [30, 45], ermöglicht das Trennen durch Volumenmodifikationen komplexe Konturen mit einer hohen Kantenqualität bei gleichzeitig hohen Prozessgeschwindigkeiten. Dariüber hinaus kann beim Trennen durch Volumenmodifikationen eine Steigerung der Produktivität direkt durch die Steigerung der Länge der Modifikationen realisiert werden [46]. Bei diesem Verfahren liegt die Herausforderung vor allem darin, eine möglichst homogene Energieeinbringung ins Material auch bei hohen Pulsenenergien zu gewährleisten und starke Temperaturgradienten innerhalb der Wärmeeinflusszone zu vermeiden, da diese zu einer unkontrollierten Rissbildung und hohen Spannungsfeldern im Material und damit zu einer Verschlechterung der Kantenqualität führen [46].

Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften von Metallen und Dielektrika unterscheiden sich sowohl die Energieeinbringung als auch die auftretenden qualitätsmindernden Effekte zwischen diesen beiden Materialklassen, sodass die Erkenntnisse aus einer Materialklasse nicht auf die andere übertragen werden können. Um die verfügbaren Pulsenenergien im Millijoule-Bereich der Ultrakurzpuls lasern für die Verbesserung von Präzision und Wirtschaftlichkeit beim Trennen von metallischen und dielektrischen Werkstoffen zu nutzen, bedarf es daher getrennter Untersuchungen. Im Falle metallischer Werkstoffe erfolgt dies exemplarisch anhand des Perkussionsbohrens und im Falle der Dielektrika am Beispiel des Trennens von Glas durch laserinduzierte Volumenmodifikationen. Im Folgenden wird daher zunächst der Stand der Technik zum Trennen von metallischen Werkstoffen mit ultrakurzen Pulsen dargelegt. Anschließend folgt der Stand der Technik zum Trennen von transparenten Dielektrika mit ultrakurzen Pulsen.

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

Gorri, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungs system 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 Umwandlungshär tens 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 längsgeströmté 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

Grünwald, Karin M.

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

Shen, Jialin

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

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstof fe 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 zwei stufiger 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 Hoch leistungslaser
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

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

- Wittig, Klaus**
Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-laserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5
- Grünenwald, Bernd**
Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mit-tels 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 Entwick-lungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3
- Bloehs, Wolfgang**
Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlfor-mungssystemen
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 mikrokanal-gekuhlten 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 Edelmetall-schichten 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 opti-mierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9
- Volz, Robert**
Optimierte Beschichten von Gußeisen-, Alumi-nium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2
- Barteit-Berger, Lars**
Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grund-mode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0
- Müller-Hummel, Peter**
Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvor-richtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9
- Rohde, Hansjörg**
Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7
- Huonker, Martin**
Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbei-tung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5
- Callies, Gert**
Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbe-stimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3
- Schubert, Michael E.**
Leistungsskalierbares Lasersystem aus faserge-koppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1
- Kern, Markus**
Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laser-strahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X
- Raiber, Armin**
Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermik-robohren 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 Lasergesamtladungen
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

Bahnmüller, 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 Weichlötsens 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:YAC-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 Hochleistungsdioidenlasern
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 geratetechnische 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 Laserstrahltiefschweißen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign
2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung
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 Laserpulsen
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerierter metallischer Bauteile mit variablen Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen
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 Lasermaterialbearbeitung
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 güteschaltete Laserzündkerze
2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahtegenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen 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 Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente
2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers
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 Aluminiumlegierungen 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 Webergals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen
2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyert

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

Sven-Simon Beyert

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

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 Stöpler

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

Fluidodynamische 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 Heißrissen 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 Negele

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 Brilanz
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 Schmelzeffuss 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

Christian Hagenlocher

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

Martin Rumpel

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

Florian Fetzer

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

Michael Eckerle

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

Michael Jarwitz

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

Martin Stubenvoll

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

Christian Röhrrer

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-0316-4000-7

Martin Sommer

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

Birgit Weichert

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 Leistung.
2021, 96 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 Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 µm Wellenlänge
2023, 128 Seiten, ISBN 978-3-8316-4999-0

Daniel Förster

Energieeinkopplung und Energieumwandlungsprozesse 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 Biennert

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

Jannik Lind

Einfluss von Strahlformung auf Absorption, Fugenquerschnitt und Produktivität beim Laserschneiden
2024, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5062-0

Jan-Hinnerk Wolter

Scheibenlaser mit beidseitiger Kühlung des Laserkristalls
2025, 194 Seiten, ISBN 978-3-38316-5067-5

Benjamin Dannecker

Untersuchung von Scheibenlasern zur Erzeugung von Pulsen mit einer Dauer von weniger als 500 fs
2025, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5080-4

Cherry May Dannecker

Multi-Pass and Quantum-Well Pumped AlGaNP Disk Lasers
2025, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-5082-8

Eveline Reinheimer

Wärme- und Schmelzeströme beim Fügen mittels Laser
2025, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-5087-3

Anne Feuer

Nutzung von Pulsenergien im Millijoule-Bereich beim Trennen mit ultrakurzen Laserpulsen
2025, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-5083-5