

# **Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe**

von Dr.-Ing. Christian Freitag  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt

von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth und  
o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow

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., 2016

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2017

ISBN 978-3-8316-4638-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Inhalt

Symbole und Abkürzungen.....	8
Kurzfassung .....	16
Extended Abstract .....	19
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>23</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>25</b>
2.1 Der Werkstoff CFK .....	25
2.2 Spanende Bearbeitung von CFK.....	25
2.3 Eigenschaften des Materials .....	26
2.3.1 Struktur von Carbonfasern.....	26
2.3.2 Thermische Eigenschaften der Verbundkomponenten.....	27
2.4 Laserschneiden von CFK.....	30
2.4.1 Messung der Ausdehnung der Matrixverdampfungszone (MVZ) .....	30
2.4.2 Ausdehnung der thermischen Schädigung beim Laserschneiden von CFK .....	34
2.4.3 Erzielbare Schnittgeschwindigkeit beim Laserschneiden von CFK .....	35
2.5 Energietransportmechanismen bei der Laserbearbeitung von CFK .....	37
<b>3 Deposition optischer Energie in CFK und Carbonfasergelege .....</b>	<b>40</b>
3.1 Einkopplung von Laserstrahlung in Carbonfasern und CFK .....	40
3.1.1 Berechnung des Einkoppelgrads von Carbonfasern und CFK .....	40
3.1.2 Messung des Einkoppelgrades von Laserstrahlung von Carbonfasern und CFK.....	47
3.1.3 Einfluss der Polarisation auf den Bearbeitungsprozess .....	54
3.2 Räumliche Umverteilung von Energie durch Reflektion von Laserstrahlung am runden Carbonfaserquerschnitt .....	56
3.3 Einfluss der Carbonfaserausrichtung auf den Abtragprozess bei Ausbildung einer MVZ.....	59
<b>4 Beeinflussung des Abtragprozesses durch Oxidation der kohlenstoffhaltigen Anteile von CFK .....</b>	<b>64</b>
4.1 Das Oxidationsverhalten der Verbundpartner .....	64
4.1.1 Das Oxidationsverhalten von Carbonfasern .....	64
4.1.2 Das Oxidationsverhalten von Epoxidharzen .....	65
4.1.3 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Laserabtragprozess von CFK - Stand der Technik .....	66
4.2 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Abtragprozess flacher Nuten.....	66

4.2.1	Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf die Ausdehnung der MVZ.....	68
4.2.2	Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf die Breite und Tiefe der erzeugten Nuten .....	69
4.2.3	Energetische Betrachtungen .....	70
4.3	Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Abtragprozess tiefer Nuten .....	72
4.3.1	Einfluss verschiedener Prozessgasströme auf den Tiefenfortschritt beim Laserabtrag von CFK .....	73
4.3.2	Einfluss verschiedener Prozessgase ohne Gasstrom auf den Tiefenfortschritt beim Laserabtrag von CFK.....	74
4.3.3	Beobachtung der Rauchentwicklung für verschiedene Umgebungsmedien.....	75
4.3.4	Einfluss eines Sauerstoffstroms auf die Abtragsrate von bidirektionalem CFK.....	76
4.3.5	Auswirkungen eines Sauerstoffstroms auf die Nutentstehung.....	77
4.3.6	Einfluss des Sauerstoffstroms auf die Ausdehnung der MVZ .....	79
<b>5</b>	<b>Energietransport durch die bei der Laserbearbeitung von CFK entstehenden Ablationsprodukte .....</b>	<b>81</b>
5.1	Geschwindigkeit der Ablationsprodukte beim Laserabtrag von CFK mit einem Dauerstrichlaser.....	82
5.1.1	Strömungsgeschwindigkeit des verdampften Materials bei stationärem Laserstrahl.....	83
5.1.2	Ausbildung von Verdichtungsstößen im abströmenden Materialdampf bei Bearbeitung mit bewegtem Laserstrahl.....	86
5.2	Thermische Beeinflussung des Werkstücks durch heiße Ablationsprodukte....	87
5.2.1	Versuchsanordnung zur Untersuchung des Wärmetransports.....	88
5.2.2	Energietransport durch reflektierte Laserstrahlung .....	90
5.2.3	Energietransport durch thermische Strahlung .....	90
5.2.4	Energietransport durch heiße Ablationsprodukte .....	92
<b>6</b>	<b>Transport absorbiertes Laserenergie durch Wärmeleitung .....</b>	<b>93</b>
6.1	Beobachtung der Ausdehnung der MVZ bei einem Perkussionsbohrprozess... 93	
6.2	Beobachtung der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Laserpulsen beim Perkussionsbohren.....	97
6.3	Wärmeakkumulationseffekte bei der gepulsten Bearbeitung mit bewegtem Laserstrahl.....	100
6.4	Wärmeakkumulationseffekte beim Scanner-basierten Laserschneiden mit gepulsten Lasersystemen.....	102

6.4.1	Einfluss der Pulsenergie auf die Wärmeakkumulation.....	110
6.4.2	Einfluss des Abstandes zweier Nuten auf die Ausbildung der MVZ...	111
6.5	Wärmeakkumulationseffekte bei der Skalierung des UKP Abtragprozesses zu hohen mittleren Laserleistungen >1 kW .....	112
6.5.1	Einfluss der effektiven Anzahl an Laserpulsen pro Ort und Überfahrt	113
6.5.2	Kritische Anzahl an Überfahrten .....	114
6.5.2.1	<i>Zusammenhang zwischen der kritischen Anzahl an Überfahrten und der Vorschubgeschwindigkeit .....</i>	<i>115</i>
6.5.2.2	<i>Zusammenhang zwischen der kritischen Anzahl an Überfahrten und der mittleren Laserleistung .....</i>	<i>116</i>
<b>7</b>	<b>Schneiden von CFK mit einem Ultrakurzpuls-Lasersystem mit 1,1 kW mittlerer Ausgangsleistung .....</b>	<b>119</b>
7.1	Möglichkeiten zur weiteren Optimierung des Schneidprozesses .....	121
7.1.1	Erhöhung des Prozesswirkungsgrads .....	121
7.1.2	Beeinflussung der Neigung der Schnittkante .....	123
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>126</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>

## Kurzfassung

Carbonfaser verstärkte Kunststoffe (CFK) versprechen aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften ein enormes Potenzial bei Leichtbauanwendungen. Die Verarbeitung des Materials ist allerdings aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften herausfordernd. Der Laser als verschleißfreies, berührungsloses und gut automatisierbares Werkzeug bietet sich zur Bearbeitung dieses Materials an, die Prozessgrundlagen sind jedoch noch nicht ausreichend beleuchtet. Inhalte dieser Arbeit sind grundlegende Untersuchungen zu den Energietransportmechanismen, welche bei der Laserbearbeitung von CFK relevant sind. Es können dabei zwei Phasen identifiziert werden: Die Energiedeposition, in der die optisch eingestrahlte Energie im Material deponiert wird und die Energiedistribution, in der die deponierte Energie umverteilt wird.

In der Phase der Energiedeposition wird die Laserstrahlung in das Material eingekoppelt. Zur Bestimmung des Einkoppelgrads der Laserstrahlung in Carbonfasergelege und CFK wurden die optischen Eigenschaften der Carbonfasern über die optischen Eigenschaften von Graphit angenähert. Mit Hilfe eines Modells, welches den runden Carbonfaserquerschnitt und Mehrfachreflektionen zwischen den Fasern berücksichtigt, wurde der Einkoppelgrad in Abhängigkeit der Polarisation des einfallenden Laserstrahls theoretisch bestimmt. Es zeigte sich, dass der Einkoppelgrad in ein Carbonfasergelege für Wellenlängen im ultravioletten, sichtbaren und nah-infraroten Wellenlängenbereich durchgängig größer als 70% ist und auf ungefähr 40% für CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung abfällt. Für eine Polarisation der Laserstrahlung senkrecht zur Symmetrieachse der Carbonfasern ist der Einkoppelgrad größer als für Strahlung mit einer parallelen Orientierung der Polarisation zur Carbonfaserachse. Das in CFK zusätzlich vorhandene Matrixmaterial führt zu einer Erhöhung des Einkoppelgrades. Zur experimentellen Validierung des Modells wurde ein auf dem Prinzip der Reflektometrie basierender Messaufbau realisiert. Es ergaben sich Abweichungen von maximal 20% zwischen den theoretisch und experimentell bestimmten Werten für die Einkopplung. Die auf Basis des Modells getroffenen qualitativen Zusammenhänge konnten bestätigt werden.

Aufgrund des runden Querschnitts der Carbonfasern kommt es zur Reflektion der einfallenden Laserstrahlung senkrecht zur Symmetrieachse der Carbonfasern. Diese Energieumverteilung bei der Deposition der optischen Energie im Material führt zu einer Verbreiterung der erzeugten Nut in der Größenordnung eines Carbonfaserdurchmessers. Bildet sich beim Laserabtrag von CFK eine thermische Schädigung in Form einer Matrixverdampfungszone aus, so wird der Einfluss der Strahlreflektion am runden Carbonfaserquerschnitt besonders deutlich. Es zeigt sich bei der Laserbearbeitung bidirektionalen Materials, dass am Übergang von Lagen mit senkrechter Ausrichtung der Carbonfasern zur Abtragsrichtung zu Lagen mit paralleler Ausrichtung der

Carbonfasern zur Abtragsrichtung eine signifikante Verlangsamung des Abtragprozesses festgestellt werden kann. Die Mechanismen, welche zu dieser Verlangsamung führen, werden in dieser Ausarbeitung ausführlich diskutiert.

Zu Beginn der Phase der Energiedistribution wird die absorbierte optische Energie in Wärme umgewandelt, wodurch es zu einer Erhöhung der Temperatur des Materials kommt. Bei den während des Laserabtrags erreichten hohen Temperaturen reagieren sowohl die Carbonfasern als auch das Matrixmaterial mit Sauerstoff. Dies hat verschiedenste Auswirkungen. An der Materialoberfläche kann es zu einem Verbrennen des Matrixmaterials kommen, was eine große Ausdehnung der thermischen Schädigung zur Folge hat. Bei einem ausreichend großen Sauerstoffstrom machen sich positive Effekte bei der Erzeugung tiefer Nuten bemerkbar. Die Oxidation der Carbonfasern führt zu einem andauernden Abtrag in großen Tiefen, während ohne Sauerstofffluss ein Abbrechen des Tiefenfortschritts beobachtet wurde. Vergleichsexperimente mit Stickstoff offenbarten weitere positive Einflüsse des Sauerstoffs auf den Abtragprozess wie beispielsweise eine reduzierte Rauchentwicklung.

Ein Teil der vom Laser eingestrahlten Energie wird während des Bearbeitungsprozesses in kinetische und thermische Energie des verdampften Materials umgewandelt. Es entsteht eine heiße Materialdampffackel, welche mit hoher Geschwindigkeit von der Prozesszone aus abströmt. Bei der Laserbearbeitung von CFK mit einem Dauerstrichlaser wurde die Ausbildung von Verdichtungsstößen im abströmenden Materialdampf mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet. Anhand dieser Verdichtungsstöße konnte die Abströmgeschwindigkeit des Materialdampfs abgeschätzt werden. Es zeigte sich, dass das verdampfte Material mit bis zu 3,3 km/s von der Prozesszone abströmt. Aufgrund dieser hohen Geschwindigkeit des abdampfenden Materials kann es zu einer mechanischen Wechselwirkung mit dem Werkstück kommen, beispielsweise zu einer Verplusterung freiliegender Carbonfasern.

Die heiße Materialdampffackel kann mit dem zu bearbeitenden Werkstück auch thermisch wechselwirken. Die bei der Laserablation von CFK entstehenden heißen Ablationsprodukte haben eine Temperatur, welche größer als die Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials ist. Die nachträgliche Erwärmung des Materials durch einen Strom heißer Ablationsprodukte kann zu einer zusätzlichen thermischen Schädigung führen. Es wird im Rahmen dieser Abhandlung ein Experiment beschrieben, mit welchem eine thermische Beeinflussung des Materials durch heiße Ablationsprodukte demonstriert werden konnte.

Ein wesentlicher Energieumverteilungsmechanismus ist die Wärmeleitung insbesondere entlang der Carbonfasern. Dementsprechend hat die Matrixverdampfungszone (MVZ) ihre größte Ausdehnung in Richtung der Carbonfasern. Der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Ausdehnung der MVZ wurde mit Hilfe von Hochge-

schwindigkeitsaufnahmen untersucht. Ein von der Wärmeleitung abhängiger Effekt, welcher bei der gepulsten Laserbearbeitung von CFK mit hohen Spitzenintensitäten maßgeblich die Ausdehnung der MVZ beeinflusst, ist die Akkumulation von Wärme. Dabei kann unterschieden werden zwischen einer Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen (WAP) und einer Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans (WAS). Die aus der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen resultierende Temperaturerhöhung hängt dabei vom Wärmeeintrag pro Laserpuls, der Pulsfrequenz und der Anzahl an Pulsen ab. Analog hierzu hängt die aus der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans resultierende Temperaturerhöhung von der pro Überfahrt eingebrachten Wärme, der Scanfrequenz und der Anzahl an Scans ab. Der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die beiden Wärmeakkumulationseffekte wurde bestimmt und die Skalierung zu hohen mittleren Laserleistungen untersucht.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die verschiedenen Energietransportmechanismen ermöglichten die Demonstration eines CFK Schnitts mit einem am IFSW entwickelten Lasersystem. Dieses lieferte eine mittlere Laserleistung von 1,1 kW bei einer Pulsfrequenz von 300 kHz mit Pulsen der Pulsdauer 8 ps. Das 2 mm dicke CFK Material wurde mit einer effektiven Geschwindigkeit von 0,9 m/min bei einer thermischen Schädigung  $<20 \mu\text{m}$  geschnitten. Abschließend werden Möglichkeiten zur Optimierung des Schneidprozesses diskutiert. Insbesondere wird auf Strategien zur Steigerung der Prozesseffizienz und auf die Beeinflussung der Schnittkantenneigung durch Anstellung des Bearbeitungslaserstrahls eingegangen.



## Extended Abstract

Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) have a great potential in lightweight construction due to their unique mechanical properties. However, processing of this innovative material is not yet solved satisfyingly. Mechanical cutting, milling or drilling suffer from very strong tool wear with negative effects like delamination. The laser as a well automatable, noncontact tool without wear could overcome these restrictions. However, regarding the fundamental laser process mechanisms, several open questions remain. The main topics of this thesis are fundamental investigations on the relevant energy transport mechanisms during laser processing of CFRP. Two phases can be identified: During the phase of energy deposition incident optical laser energy is deposited in the material. This absorbed energy is distributed into the surrounding material during the phase of energy distribution.

A fundamental factor defining energy deposition is the absorptance of the material at the laser wavelength. A theoretical model is used to determine the polarization-dependent absorptance for carbon fibers and CFRP. The surface of each carbon fiber is considered as multiple layers of graphite. The optical properties of the carbon fibers are estimated from the well-known optical properties of graphite. The model takes into account the round cross-section of the carbon fibers as well as multiple reflections between the carbon fibers. It is found that the total absorptance is larger than 70% for wavelengths in the ultraviolet, visible and near infrared spectrum and drops to about 40% for a wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$  ( $\text{CO}_2$ -lasers). The absorptance for light polarized perpendicular to the carbon fibers was shown to be larger than for light polarized parallel to the fibers. The additional matrix material in the case of CFRP increases the absorptance of laser radiation compared to not embedded carbon fibers. An experimental measurement of the absorptance was made with the help of a reflectometric measurement setup. The absorptance of laser radiation with wavelengths of 532 nm and 1047 nm in carbon fibers and CFRP was measured and the results confirm the predictions of the model. However, the absolute values of the measured absorptance are up to 20% larger as compared to the calculations. The theoretical model gives a conservative value for the absorptance whilst the statements made regarding the influence of different polarization orientations and wavelengths on the absorptance were confirmed.

The incident laser radiation is reflected perpendicularly to the axis of symmetry of the carbon fibers due to their circular cross section. It is shown that this distribution of optical energy leads to a widening of the ablated grooves in the range of one diameter of the carbon fibers. For process parameters that cause the formation of a matrix evaporation zone (MEZ), the influence of reflections at the cylindrical carbon fibers becomes especially visible. When laser cutting CFRP with repetitive scans, a decrease of

the ablation rate can be observed at the interface between a layer where the carbon fibers are orientated perpendicular to the cutting direction and a layer where the carbon fibers are orientated parallel to the cutting direction. This temporary slowed ablation process starts to develop gradually when the kerf depth reaches the layer with the carbon fibers oriented parallel to the cutting direction. As soon as the kerf enters into the next layer with the fibers again oriented perpendicular to the cutting direction, the ablation process speeds up again. The mechanisms causing this behavior are discussed in detail in this thesis.

At the beginning of the phase of energy distribution the absorbed optical energy is converted into heat. This leads to a temperature increase of the material. At high temperatures which are usually achieved during laser processing, carbon fibers as well as the matrix material react with oxygen. This influences the process in multiple ways. Burning of the matrix material can be observed on the surface of the material, which leads to an increase of the extent of the matrix evaporation zone. For shallow grooves an increase of the groove width when ablating under standard surrounding atmosphere compared to other process gases like nitrogen was observed. This increase in width is supposed to be caused by the additional oxygen in the standard ambient atmosphere. When using a sufficiently large oxygen flow, positive effects can also be observed during multipass laser cutting of CFRP. The integral gain in processing productivity strongly depends on the final kerf depth and layer structure of the work piece. The beneficial contribution of an oxygen flow on the ablation rate is mostly noticeable in deep kerfs, where the otherwise much more efficient evaporative ablation process is strongly diminished due to the reduced laser fluence reaching the bottom of the kerf. Oxygen also enhances the maximum achievable kerf depth. The strong deformation and widening of the kerf associated with a corresponding reduction of the ablation rate is found to be typical for processing of CFRP layers with a feed parallel to the fiber orientation in standard air atmospheres. Oxygen assisted cutting allows the suppression of this problem. The extent of the MEZ inside the material was found to be insensitive to the variation of gas environments. The complete absence of oxygen, when using other process gases like nitrogen, was found to have a negative impact on the ablation process like strong smoke generation.

During the ablation process a part of the incident laser energy is converted into kinetic and thermal energy of the ablated material. A hot ablation plume is generated which leaves the process zone with high flow speeds. This flow of hot ablation products during laser processing of CFRP with a continuous wave laser system has been observed by means of high-speed imaging. The evaluation of the recordings revealed that compression shocks are formed in the hot stream of ablation products. The flow speed of the hot ablation products was estimated by analyzing the distance of the first compression shock to the material surface. The influence of different average laser powers on

the flow speed was investigated. It was found that the ablation products leave the interaction zone with flow speeds of up to about 3.3 km/s. These high flow speeds can lead to a mechanical interaction with the surrounding work piece for example with exposed carbon fibers. Additionally hot ablation products can also have a thermal influence on the work piece. Ablation products that are generated during the laser ablation process of CFRP have a temperature between 2000 K and 4000 K. This temperature is significantly higher than the evaporation temperature of the matrix material. The additional heating of the CFRP material by hot ablation products may cause additional thermal damaging of the material. In this thesis an experiment is described that shows that the heat transportation by hot ablation products can influence the surrounding material of the work piece.

Heat conduction is a very influential energy transport mechanism. It is very high along the symmetrical axis of the carbon fibers especially compared to the heat conductivity of the matrix material which is about two orders of magnitude lower. Consequently the matrix evaporation zone has its maximum extent in direction of the carbon fibers. Investigations on the influence of different laser parameters on the extent of the MEZ become possible with high-speed imaging. In order to avoid the influence of additional process parameters like the spatial pulse-to-pulse overlap, a percussion drilling process was used. After a given processing time, the MEZ is smaller for lower average laser powers regardless on whether the power was reduced by decreasing the pulse energy or the repetition rate. However, when using the same average power, the MEZ can be reduced significantly by using high pulse energies and low repetition rates instead of low pulse energies and high repetition rates. This observation reveals the significant influence of the effect of heat accumulation on the formation of the MEZ.

When CFRP is processed with ultra-short laser pulses providing high peak intensities  $>10^8$  W/cm<sup>2</sup>, heat accumulation effects are the main reason for the development of a matrix evaporation zone. Two heat accumulation effects can be distinguished: Heat accumulation between consecutive laser pulses (HAP) and heat accumulation between consecutive scans (HAS). In this thesis the influence of heat accumulation on the formation of a matrix evaporation zone (MEZ) in carbon fiber reinforced plastics during multi-pass laser cutting with picosecond laser pulses is studied for a wide range of pulse frequencies ( $f_p=10-800$  kHz) and feed rates ( $v=0.002-10$  m/s). Three regimes of the formation of the MEZ are found and related with different heat accumulation effects: (1) a small MEZ ( $<2$   $\mu$ m) with negligible heat accumulation, (2) a moderate-size MEZ (up to a few hundred microns) determined by heat accumulation between pulses, and (3) a large MEZ (up to a few millimeters) caused by heat accumulation between scans. The dependence of the size of the MEZ on the number of scans and the scan frequency was studied to distinguish the two heat accumulation effects (between pulses and between scans), which occur on different time-scales. A diagram to illustrate

the boundaries between the three regimes of the formation of the MEZ as a function of feed rate and pulse frequency is proposed as a useful tool to optimize the processing parameters in practice.

With the ongoing increase in average laser power of ultrashort pulse laser sources investigations on the scaling of the heat accumulation effects become even more important. A recently developed multi-pass thin-disk laser amplifier providing an average laser power of up to 1.1 kW at a pulse frequency of 300 kHz and a pulse duration of 8 ps has been used for these investigations. It is shown that higher feed rates and therefore smaller pulse overlaps decrease the influence of the heat accumulation between pulses on the MEZ. To completely avoid heat accumulation between pulses, the pulses have to be spatially separated. At high average laser powers the heat accumulation between scans is a very important influencing factor on the MEZ formation when using a multi-pass process. This effect can lead to a burning of the matrix material and therefore to vast thermal damage. A characteristic value for the scan accumulation effect is the critical number of scans above which the extent of the MEZ starts to increase very rapidly. The critical number of scans is proportional to the feed rate divided by the average laser power squared.

The findings about the energy transport mechanisms were applied to demonstrate high-quality processing of CFRP with high average laser powers. A rectangular shaped CFRP part was cut with 1.1 kW of average laser power (with 8 ps of pulse duration and 300 kHz of repetition rate). In cross sections of the cut a matrix evaporation zone with a maximum extent of 20  $\mu\text{m}$  can be observed. In most parts no thermal damage is visible. In total about 2100 scans at a feed rate of 30 m/s were necessary to completely cut the material which gives a process efficiency of 28%. The effective average cutting speed was 0.9 m/min. The cutting kerf is inclined by about  $11^\circ$  which results from the F-Theta focusing optics. The thesis is concluded with propositions for a further increase of the process efficiency and a possibility to influence the inclination angle of the cutting kerf.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

### Schittenhelm, Henrik

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

### Stewen, Christian

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

### Schmitz, Christian

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

### Karszewski, Martin

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

### Chang, Chin-Lung

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

### Haag, Matthias

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

### Bahn Müller, Jochen

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

### Schellhorn, Martin Carl Johannes

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

### Angstenberger, Birgit

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

### Bachhofer, Andreas

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

### Breitschwerdt, Sven

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

### Mochmann, Gunter

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

### Herrmann, Andreas

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

### Mästle, Rüdiger

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

### Voß, Andreas

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

### Müller, Matthias G.

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

### Abeln, Tobias

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

### Erhard, Steffen

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

### Contag, Karsten

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

### Krastel, Klaus

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

### Staud, Jürgen

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

### Schinzl, Cornelius M.

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

### Sebastian, Michael

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

**Lücke, Bernd**

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

**Hohenberger, Bernd**

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

**Jasper, Knut**

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

**Heimerdinger, Christoph**

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

**Christoph Fleig**

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

**Joachim Radtke**

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

**Michael Brandner**

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

**Reinhard Winkler**

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

**Helmut Kindler**

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

**Andreas Ruf**

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

**Guido Hergenhan**

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

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-  
umguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-Laser  
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

**Armin Strauch**

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

**Thomas Wawra**

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

**Michael Honer**

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

**Thomas Herzinger**

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

**Reiner Heigl**

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-  
gusslegierungen mittels Laserstrahlung  
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

### Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

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

### Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

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

### Jiancun Gao

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

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

### Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

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

### Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

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

### Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

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

### Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

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

### Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

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

### Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

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

### Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

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

### Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

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

### Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschäften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

### Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

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

### Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

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

### Andreas Letsch

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

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

### Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

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

### Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

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

### Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

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

### Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

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

### Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

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

### Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

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

### Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

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

**Christian Stolzenburg**

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

**Svent-Simon Beyertt**

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

**Sonja Kittel**

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

**Andrey Andreev**

Schweißen mit dem Scheibenlaser im 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

**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**

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

**Andreas Leitz**

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

**Peter Stritt**

Prozessstrategien zur Vermeidung von 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 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