

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des  IFSW

Christian Freitag

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

Herbert Utz Verlag



Christian Freitag

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

Herbert Utz Verlag · München 2017

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 84

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7295-0 Version: 1 vom 23.03.2017  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4638-8  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

C. Freitag  
Energietransportmechanismen bei der  
gepulsten Laserbearbeitung Carbon-  
faser verstärkter Kunststoffe

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

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

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

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

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

# **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 Polarisierung 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 absorbierter 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	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>

## Symbole und Abkürzungen

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
<b>Lateinische Buchstaben</b>		
A	-	Absorptionsgrad
A <sub>I</sub>	-	Datenpunkt vor Übergang in Regime I
A <sub>MVZ</sub>	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche der Matrixverdampfungszone (MVZ)
A <sub>Nut</sub>	m <sup>2</sup>	Nutquerschnittsfläche
a	m	Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern
a <sub>p</sub>	-	Fitparameter
a <sub>v</sub>	-	Fitparameter
B <sub>I</sub>	-	Datenpunkt nach Übergang in Regime I
b	m	Ausdehnung der MVZ quer zu den Carbonfasern
b <sub>Nut</sub>	m	Nutbreite
b <sub>Spalt</sub>	m	Schnittspaltbreite
C <sub>II</sub>	-	Datenpunkt vor Übergang in Regime II
<b>c</b>	m	Vektor der optischen Achse
c <sub>lokal</sub>	m·s <sup>-1</sup>	Lokale Schallgeschwindigkeit
c <sub>2</sub>	V	Fitparameter
c <sub>3</sub>	V	Fitparameter
c <sub>p</sub>	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Spezifische Wärmekapazität
c <sub>pC</sub>	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Spezifische Wärmekapazität der Carbonfasern
c <sub>pM</sub>	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Spezifische Wärmekapazität des Matrixmaterials
D <sub>II</sub>	-	Datenpunkt nach Übergang in Regime II
D <sub>D</sub>	m	Düsendurchmesser
d <sub>+3,25mm</sub>	m	Strahldurchmesser bei Defokussierung um 3,25 mm
d <sub>A</sub>	m	Abstand zweier Carbonfasern
d <sub>CF</sub>	m	Durchmesser einer Carbonfaser
d <sub>CFK</sub>	m	Dicke des Werkstücks
d <sub>f</sub>	m	Fokusbereich

<b>Symbol</b>	<b>SI-Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$d_{\alpha}$	$^{\circ}$	Fitparameter
$E$	J	Energie
$E_A$	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspezifische Aktivierungsenergie
$E_{\text{heiz}}$	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspezifische Energie benötigt zum Aufheizen eines Volumens auf Verdampfungstemperatur
$E_P$	J	Pulsenergie
$E_R$	J	Reflektierte Energiemenge
$E_{R2}$	J	Von Photodiode D2 detektierte reflektierte Energiemenge
$E_{R3}$	J	Von Photodiode D3 detektierte reflektierte Energiemenge
$E_{\text{sub}}$	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspezifische Energie benötigt zum Überwinden der latenten Wärme beim Phasenübergang fest - gasförmig
$E_{\text{tot}}$	J	Gesamt eingestrahlte Energie
$E_V$	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspezifische Verdampfungsenergie
$E_{VC}$	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspez. Verdampfungsenergie der Carbonfasern
$E_{V,\text{exp}}$	$J \cdot m^{-3}$	Exp. ermittelte volumenspez. Verdampfungsenergie
$E_{VM}$	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspez. Verdampfungsenergie des Matrixmaterials
$f$	m	Brennweite
$f_A$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz an Datenpunkt A <sub>I</sub>
$f_B$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz an Datenpunkt B <sub>I</sub>
$f_C$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz an Datenpunkt C <sub>II</sub>
$f_D$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz an Datenpunkt D <sub>II</sub>
$f_P$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz
$f_{PI}$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz an Übergang zu Regime I
$f_{PII}$	$s^{-1}$	Pulsfrequenz an Übergang zu Regime II
$f_S$	$s^{-1}$	Scanfrequenz
$f_{S,20\text{m/s}}$	$s^{-1}$	Scanfrequenz bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/s
$f_{S,30\text{m/s}}$	$s^{-1}$	Scanfrequenz bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s

<b>Symbol</b>	<b>SI-Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$H_0$	$J \cdot m^{-2}$	Maximale Energiedichte im Fokus
$H_{th}$	$J \cdot m^{-2}$	Abtragschwelle
$H_V$	$J \cdot kg^{-1}$	Spezifische Verdampfungsenthalpie
$H_{VC}$	$J \cdot kg^{-1}$	Spezifische Verdampfungsenthalpie der Carbonfasern
$H_{VM}$	$J \cdot kg^{-1}$	Spezifische Verdampfungsenthalpie des Matrixmaterials
$I_0$	$W \cdot m^{-2}$	Spitzenintensität
$k$	-	Imaginärteil des komplexen Brechungsindex
$k_e$	-	Imaginärteil des komplexen Brechungsindex des außerordentlichen Strahls
$k_O$	-	Imaginärteil des komplexen Brechungsindex des ordentlichen Strahls
$k_U$	$J \cdot V^{-1}$	Konstante
$L_{Kontur}$	m	Konturlänge
$L_{Nut}$	m	Nutlänge
$M$	$kg \cdot mol^{-1}$	Molare Masse
$M^2$	-	Beugungsmaßzahl
$M_D$	-	Machzahl
$MVZ_{av}$	m	Ausdehnung der Matrixverdampfungszone (MVZ) ermittelt durch Mittelung
$MVZ_{Max}$	m	Maximale Ausdehnung der MVZ
$MVZ_{oben}$	m	Ausdehnung der MVZ an der Materialoberfläche
$MVZ_{par}$	m	Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern
$MVZ_{reduziert}$	m	Ausdehnung der MVZ nahe Matrixansammlungen
$m_1$	-	Fitparameter
$m_2$	-	Fitparameter
$m_3$	-	Fitparameter
$m_\alpha$	-	Fitparameter
$N_e$	-	Komplexer Brechungsindex des außerordentlichen Strahls
$N_{eff}$	-	Effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt

<b>Symbol</b>	<b>SI-Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$N_{\text{eff},20\text{m/s}}$	-	Effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/s
$N_{\text{eff},30\text{m/s}}$	-	Effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s
$N_{\text{eff},800\text{kHz}}$	-	Effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt bei der Pulsfrequenz 800kHz
$N_{\text{eff},80\text{kHz}}$	-	Effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt bei der Pulsfrequenz 80kHz
$N_O$	-	Komplexer Brechungsindex des ordentlichen Strahls
$N_S$	-	Anzahl an Überfahrten
$N_{S,\text{krit}}$	-	Kritische Anzahl an Überfahrten
$N_{S,\text{krit},20\text{m/s}}$	-	Kritische Anzahl an Überfahrten für $v=20$ m/s
$N_{S,\text{krit},30\text{m/s}}$	-	Kritische Anzahl an Überfahrten für $v=30$ m/s
$N_{S,\text{krit},0,2\text{kW}}$	-	Kritische Anzahl an Überfahrten für $P=0,2$ kW
$N_{S,\text{krit},0,6\text{kW}}$	-	Kritische Anzahl an Überfahrten für $P=0,6$ kW
$N_{S,\text{krit},1,1\text{kW}}$	-	Kritische Anzahl an Überfahrten für $P=1,1$ kW
$N_{S,\text{Prozess}}$	-	Aus der Energiebilanz bestimmte, für einen Prozess benötigte Anzahl an Überfahrten
$n$	-	Realteil des komplexen Brechungsindex
$\mathbf{n}_0$	m	Oberflächennormale (Vektor)
$n_1$	-	Brechungsindex Umgebungsmedium
$n_e$	-	Realteil des komplexen Brechungsindex des außerordentlichen Strahls
$n_{\text{Glas}}$	-	Brechungsindex Glas
$n_M$	-	Brechungsindex Matrixmaterial
$n_O$	-	Realteil des komplexen Brechungsindex des ordentlichen Strahls
$P$	W	Mittlere Laserleistung
$p$	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	Druck
$p_{t,D}$	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	Totaldruck am Düsenaustritt

<b>Symbol</b>	<b>SI-Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$p_U$	$N \cdot m^{-2}$	Umgebungsdruck
$R$	-	Reflektionsgrad
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$R_u$	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Universelle Gaskonstante
$r$	-	Reflektionsamplitude
$r_C$	-	Volumenanteil Carbonfasern
$r_F$	-	Radius einer Carbonfaser
$r_M$	-	Volumenanteil Matrixmaterial
$r_{sF}$	-	Reflektionsamplitude für Strahlung mit einer Polarisation senkrecht zur Symmetrieachse der Carbonfaser
$r_{pF}$	-	Reflektionsamplitude für Strahlung mit einer Polarisation parallel zur Symmetrieachse der Carbonfaser
$T$	-	Transmissionsgrad
$T_0$	K	Umgebungstemperatur
$T_{Gas}$	K	Temperatur des abströmenden Gases
$T_V$	K	Verdampfungstemperatur
$T_{VC}$	$^{\circ}C$	Verdampfungstemperatur der Carbonfasern
$T_{VM}$	$^{\circ}C$	Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials
$t$	s	Zeit
$t_0$	s	Zeitpunkt der Ablösung eines Partikels
$t_{absink}$	s	Zeit bis zum Absinken der Strömungsgeschwindigkeit
$t_{Bohr}$	s	Bohrdauer
$t_{Nut}$	m	Nuttiefe
$t_{Pause}$	s	Pausenzeit
$t_{Pos}$	s	Positionierzeit
$t_{Prozess}$	s	Prozesszeit
$U$	V	Spannung
$U_1$	V	Maximal ausgegebene Spannung der Photodiode D1
$U_2$	V	Auf $U_1$ bezogenes Spannungssignal der Photodiode D2