

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des  IFSW

Patrick Mucha

**Qualitäts- und produktivitäts-  
beeinflussende Mechanismen beim  
Laserschneiden von CF und CFK**

Herbert Utz Verlag



Patrick Mucha

**Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende  
Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 78

EBook-Ausgabe:

ISBN 978-3-8316-7165-6 Version: 1 vom 25.09.2015

Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover

ISBN 978-3-8316-4516-9

Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

P. Mucha  
Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK

# **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.

# **Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK**

von Dr.-Ing. Patrick Mucha  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf

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., 2015

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 2015

ISBN 978-3-8316-4516-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis der Symbole</b>	<b>5</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>20</b>
1.1 Einsatz und Herstellung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe.....	20
1.2 Potenziale des Lasers in der Fertigungstechnik .....	22
1.3 Thermophysikalische Eigenschaften von CFK .....	22
1.4 Motivation und Herausforderung .....	24
1.4.1 Produktivität.....	24
1.4.2 Schädigung.....	26
1.5 Aufbau der Arbeit.....	28
<b>2 Absorption im Verbundmaterial</b>	<b>29</b>
2.1 Optische Eigenschaften CFK .....	29
2.2 Absorptionseinfluss auf die Produktivität .....	31
2.3 Absorptionsbeeinflusste Schädigungsmechanismen .....	35
<b>3 Wärmewirkung im Verbundmaterial</b>	<b>38</b>
3.1 Definition unterschiedlicher Wärmeeinflusszonen .....	38
3.2 Kalibriertes Wärmeleitungsmodell zur Bestimmung der Schädigungszonen	40
3.2.1 Setup Temperaturmessung.....	41
3.2.2 Gemittelttes Wärmeleitungsmodell .....	42
3.2.3 Temperaturverteilungen.....	44
3.2.4 Kalibrierung des Modells.....	46
3.2.5 Wechselwirkungszone .....	47
3.2.6 Berechnung der Schädigungszonen.....	49



3.3	Energiebilanz bei der Bearbeitung von CFK.....	52
3.3.1	Beschreibung und Definition der Energieanteile .....	53
3.3.2	Bestimmung der Energieanteile .....	54
3.4	Mehrfachüberfahrten .....	57
3.4.1	Wärmeakkumulation bei Mehrfachüberfahrten .....	57
3.4.2	Produktivität bei Mehrfachüberfahrten .....	60
3.4.2.1	Bedeutung der Pausen für die produktive Bearbeitung von Bauteilen.....	60
3.4.2.2	Nuttiefenzunahme.....	61
3.4.3	Verbreiteterer Schnittspalt .....	64
3.4.3.1	Verbreiteterer Schnittspalt durch mehrere parallele Bearbeitungsbahnen .....	64
3.4.3.2	„Wobbeln“ einer Sinusbahn .....	67
3.4.3.3	Produktivitätssteigerung durch ausgeschleuderte Feststoffe.....	73
<b>4</b>	<b>Wirkung der Ablationsprodukte</b>	<b>76</b>
4.1	„Verplusterung“ beim Schneiden von CF .....	76
4.1.1	Messung der Verplusterung .....	77
4.1.2	Entstehung der Verplusterung.....	78
4.1.3	„Kalte“ Verplusterung ohne Laser .....	80
4.2	Messung der Abströmgeschwindigkeit .....	81
4.2.1	Methode.....	81
4.2.2	Impuls und Geschwindigkeit der Ablationsprodukte.....	85
4.3	Reduktion der „Verplusterung“ .....	86
4.4	Strömungsrichtung der Ablationsprodukte.....	88
4.4.1	Einfluss der Schneidfrontneigung auf die Strömungsrichtung .....	88
4.4.2	Einfluss der Kerbwände auf die Strömungsrichtung .....	91
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>96</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>107</b>

# Verzeichnis der Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
<b>Lateinische Buchstaben:</b>		
$A$	Winkelabhängiger Absorptionsgrad	
$A_{\text{Nut}}$	Nutquerschnittsfläche	$\text{m}^2$
$A_{\text{W}}$	Wärmeeintragsfläche	$\text{m}^2$
$b_{\text{scan}}$	Scanbreite: Doppelte Amplitude einer überlagerten Wobbelbewegung	$\text{m}$
$c_p$	Massenspezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$c_{p,f}$	Massenspezifische Wärmekapazität der Fasern	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$c_{p,m}$	Massenspezifische Wärmekapazität der Matrix	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$c_{p,\text{Mittel}}$	Mittlere Massenspezifische Wärmekapazität des Verbundmaterials	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$d_{\text{abl}}$	Abtragsdurchmesser	$\text{m}$
$d_{\text{f}}$	Strahldurchmesser im Fokus	$\text{m}$
$d_{\text{f},x}$	Strahldurchmesser im Fokus in $x$ -Richtung	$\text{m}$
$d_{\text{f},y}$	Strahldurchmesser im Fokus in $y$ -Richtung	$\text{m}$
$d_{\text{MSZ},\text{Mittel}}$	Mittlere Breite der MSZ	$\text{m}$
$d_{\text{Nut}}$	Breite der Nut am Strahleintritt	$\text{m}$
$d_{\text{S},\text{Mittel}}$	Mittlere Schnittspaltbreite	$\text{m}$
$d_{\text{W}}$	Wärmeeintragslänge	$\text{m}$
$E_{\text{A}}$	Absorbierte Energie	$\text{J}$
$E_{\text{h,s}}$	Zur Erwärmung und Sublimation des Verbundmaterials erforderliche spezifische Energie	$\text{J}/\text{m}^3$
$E_{\text{L}}$	Vom Laserstrahl während der Bearbeitung einer Probe eingestrahlte Energie	$\text{J}$
$E_{\text{MSZ}}$	Zur Sublimation des Matrixmaterials in der MSZ erforderliche Energie	$\text{J}$
$E_{\text{nA}}$	Nicht absorbierte Energie	$\text{J}$
$E_{\text{p}}$	Zur Sublimation des Verbundmaterials im Schnittspalt erforderliche Energie	$\text{J}$

$E_{\text{verbl}}$	Im Bauteil verbleibende Energie	J
$E_V$	Energie, die durch Wärmeleitung vom Schnittspalt in die Probe geleitet wird	J
$f_{\text{wobbel}}$	Wobbelfrequenz	1/s
$F_z$	z-Komponente einer Kraft	N
$H$	Fluenz	J/m <sup>2</sup>
$H_0$	Maximale Fluenz auf der Strahlachse	J/m <sup>2</sup>
$h_{\text{Nut}}$	Nuttiefe	m
$h_{\text{Nut,max}}$	Maximal mögliche Nuttiefe	m
$h_s$	Bauteildicke	m
$H_t$	Fluenz zum Zeitpunkt $t$	J/m <sup>2</sup>
$I$	Intensität	W/m <sup>2</sup>
$k$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
$\bar{k}$	Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Verbundmaterial	W/(m·K)
$l_{\text{opt}}$	Optische Eindringtiefe	m
$l_s$	Schnittlänge	m
$\bar{l}_{th}$	Mittlere thermische Eindringtiefe	m
$L$	Massenspezifische latente Wärme	kJ/kg
$L_f$	Massenspezifische latente Wärme der Fasern	kJ/kg
$L_m$	Massenspezifische latente Wärme der Matrix	kJ/kg
$m_i$	Einzelner Masseanteil	kg
$m_{\text{ges}}$	Gesamte Masse	kg
$n$	Anzahl Überfahrten	
$P$	Laserleistung	W
$\vec{p}$	Impuls	Ns
$\vec{p}_{\text{abl}}$	Impuls der Ablationsprodukte	Ns
$\vec{p}_{\text{ges}}$	Gesamter Impuls	Ns
$\vec{p}_i$	Impuls eines einzelnen Masseanteils	Ns
$p_x$	x-Komponente des Impulses	Ns
$p_{x,\text{ges}}$	x-Komponente des gesamten Impulses	Ns
$p_y$	y-Komponente des Impulses	Ns
$p_{y,\text{abl}}$	y-Komponente des Impulses der Ablationsprodukte	Ns
$p_{y,\text{ges}}$	y-Komponente des gesamten Impulses	Ns

$p_z$	$z$ -Komponente des Impulses	Ns
$p_{z,abl}$	$z$ -Komponente des Impulses der Ablationsprodukte	Ns
$p_{z,ges}$	$z$ -Komponente des gesamten Impulses	Ns
$t$	Zeit	s
$t_1 \dots t_7$	Zeitpunkte 1 bis 7	s
$T_0$	Raumtemperatur	K
$t_{Bearb}$	Bearbeitungsdauer	s
$T_D$	Schädigungstemperatur	K
$T_{Phase1}$	Temperatur während der Wärmeeintragsphase	K
$T_{Phase2}$	Temperatur während der Abkühlphase	K
$T_{sub}$	Sublimationstemperatur	K
$T_{sub,f}$	Sublimationstemperatur der Fasern	K
$T_{sub,m}$	Sublimationstemperatur der Matrix	K
$t_W$	Wärmeeintragsdauer	s
$v$	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
$v_{eff}$	Effektive Vorschubgeschwindigkeit	m/s
$v_{anp}$	Angepasste Vorschubgeschwindigkeit	m/s
$\vec{v}_i$	Geschwindigkeit eines einzelnen Masseanteils	m/s
$\bar{\vec{v}}_m$	Mit der Masse gewichtete mittlere Geschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_{m,x}$	$x$ -Komponente der mit der Masse gewichteten mittleren Geschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_{m,y}$	$y$ -Komponente der mit der Masse gewichteten mittleren Geschwindigkeit	m/s
$\bar{v}_{m,z}$	$z$ -Komponente der mit der Masse gewichteten mittleren Geschwindigkeit	m/s
$v_t$	Theoretische Vorschubgeschwindigkeit	m/s
$V_f$	Faservolumenanteil	
$x'$	$x$ -Koordinate zum Zeitpunkt $t=t_W$	m
$x$	$x$ -Koordinate	m
$x_0$	Position der Strahlachse in $x$ -Richtung	m
$x_1$	Abstand zur Strahlachse in $x$ -Richtung	m
$x_{max}$	Maximale Entfernung einer Isotherme zur Schnittkante	m
$y$	$y$ -Koordinate	m
$y_0$	Position der Strahlachse in $y$ -Richtung	m