

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 produktivitätsbe-
einflussende 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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis der Symbole	5
Kurzfassung der Arbeit	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	20
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
2 Absorption im Verbundmaterial	29
2.1 Optische Eigenschaften CFK	29
2.2 Absorptionseinfluss auf die Produktivität	31
2.3 Absorptionsbeeinflusste Schädigungsmechanismen	35
3 Wärmewirkung im Verbundmaterial	38
3.1 Definition unterschiedlicher Wärmeeinflusszonen	38
3.2 Kalibriertes Wärmeleitungsmodell zur Bestimmung der Schädigungszonen	40
3.2.1 Setup Temperaturmessung.....	41
3.2.2 Gemitteltes 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	Nutttiefenzunahme.....	61
3.4.3	Verbreiteter Schnittpalt	64
3.4.3.1	Verbreiteter Schnittpalt durch mehrere parallele Bearbeitungsbahnen	64
3.4.3.2	„Wobbeln“ einer Sinusbahn	67
3.4.3.3	Produktivitätssteigerung durch ausgeschleuderte Feststoffe.....	73
4	Wirkung der Ablationsprodukte	76
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
	Literatur- und Quellenverzeichnis	96
	Danksagung	107

Verzeichnis der Symbole

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

E_{verbl}	Im Bauteil verbleibende Energie	J
E_V	Energie, die durch Wärmeleitung vom Schnittspalt in die Probe geleitet wird	J
f_{wobbel}	Wobbelfrequenz	1/s
F_z	z-Komponente einer Kraft	N
H	Fluenz	J/m ²
H_0	Maximale Fluenz auf der Strahlachse	J/m ²
h_{Nut}	Nuttiefe	m
$h_{\text{Nut,max}}$	Maximal mögliche Nuttiefe	m
h_s	Bauteildicke	m
H_t	Fluenz zum Zeitpunkt t	J/m ²
I	Intensität	W/m ²
k	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
$\bar{k}$	Mittlere Wärmeleitfähigkeit im Verbundmaterial	W/(m·K)
l_{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_{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