

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

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

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
begündeten 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 Schädigungszenen	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 Schädigungszenen	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	Verbreiterter Schnittspalt	64
3.4.3.1	Verbreiterter Schnittspalt 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	

1 Einleitung

1.1 Einsatz und Herstellung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe bzw. carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK, englisch carbon-fiber-reinforced plastics, CFRP) werden umgangssprachlich häufig als „Carbon“ bezeichnet. Durch die Einbettung der Fasern in eine Kunststoffmatrix entsteht ein Verbundwerkstoff, der sich durch hohe Steifigkeit und hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte auszeichnet. Mit diesen Eigenschaften ist der Werkstoff prädestiniert für den Leichtbau. Neben Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [1] führt insbesondere die steigende Nachfrage nach Elektroautos mit hoher Reichweite zu verstärkten Bemühungen bei der Gewichtsreduzierung von Bauteilen in der Automobilindustrie [2-4]. Viele Automobilhersteller versuchen dies durch Einsatz von CFK zu erreichen. Im Maschinenbau bietet die reduzierte Masse von beschleunigten Teilen bei hoher Steifigkeit beispielsweise Potenzial für den Bau von hochdynamischen Werkzeugmaschinen [5].

Bei der Herstellung von CFK finden zwischen unterschiedlichen Prozessschritten Zuschnitte des Materials statt. Bild 1 zeigt verschiedene Ausführungsformen zu unterschiedlichen Reifegraden eines Bauteils am Beispiel eines RTM-Prozesses (resin transfer moulding). Ausführlich sind die unterschiedlichen Herstellprozesse von CFK beispielsweise in [6] beschrieben. Die Fasern werden durch einen Pyrolyseprozess aus Kunststofffäden, sog. Precursors, hergestellt. Anschließend wird die Oberfläche der Fasern durch eine wenige Nanometer dicke Schlichte überzogen, die in den meisten Fällen aus Kunststoffen besteht. Vor der Weiterverarbeitung zu flächigen Halbzeugen werden die Fasern zu Faserbündeln, sog. Rovings, zusammengefasst.

Aus den Rovings wird „Rollenware“ entweder in Form eines Gewebes oder in Form eines Geleges erstellt. In Bild 1a) ist dieses Material schematisch durch eine Fläche dargestellt. Im Gelege (Bild 1b)) werden die Fasern meist mit Kunststofffäden vernäht. Ein Gewebe (Bild 1c)) besteht aus verwobenen Kohlenstofffasern, wodurch für gewöhnlich keine zusätzlichen Nähfäden nötig sind. Vor der Weiterverarbeitung wird das Rollenmaterial grob zugeschnitten. Nachfolgend werden mehrere Lagen Gelege oder Gewebe aufeinandergeschichtet (Bild 1d)) und zu einem dreidimensionalen CF-

Preform verarbeitet (Bild 1e)). Die Faserrichtung in den einzelnen Lagen variiert meist. Um dies zu verdeutlichen ist in der Skizze die Richtung der Schraffur in den einzelnen Lagen unterschiedlich orientiert. Für den Zusammenhalt der Lagen wird zwischen den Schichten etwas Kunststoffbinder aufgesprüh oder pulverförmig eingesprengt. Alternativ werden die Lagen vernäht. Vor der Infiltration des Preforms mit dem Matrixmaterial (Bild 1f)) erfolgt häufig ein Zuschnitt des Preforms. Nach der Infiltration des Matrixmaterials wird in einem weiteren Bearbeitungsschritt das ausgehärtete CFK-Bauteil (Bild 1g)) besäumt.

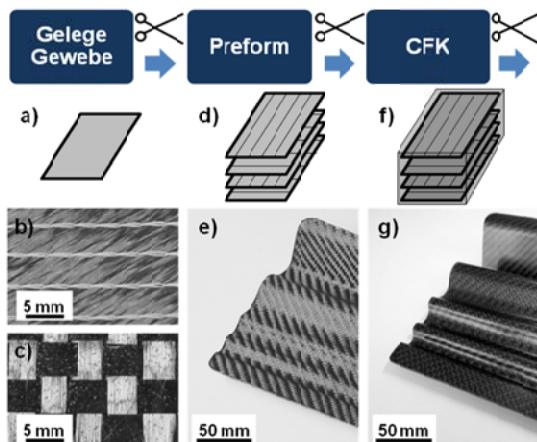


Bild 1: Ausführungsformen von CF(K) nach unterschiedlichen Herstellungsschritten bzw. zu unterschiedlichen Reifegraden. Die Scheren symbolisieren den Zuschnitt der Materialien zwischen bzw. nach den Verarbeitungsschritten. a) Skizze einer einzelnen CF-Lage, b) CF-Gelege mit Nähfäden, c) CF-Gewebe mit Sprühbinder auf der Oberfläche, d) Skizze mehrerer Lagen mit unterschiedlichen Faserrichtungen in einem CF-Preform. Die Schraffur zeigt schematisch die unterschiedlichen Orientierungen der Fasern in den einzelnen Lagen. e) CF-Preform, f) Skizze eines ausgehärteten CFK-Bauteils mit Fasern und Matrixmaterial, g) CFK-Bauteil.

Eine große Herausforderung bei der Bearbeitung der Kohlenstofffaserwerkstoffe mit „herkömmlichen“ Bearbeitungsverfahren, wie der Beschnitt von Faserhalbzeugen mittels Ultraschallmessern oder Fräß- und Sägeprozesse, sind schnell verschleißende Werkzeuge [7, 8]. Dies verursacht steigende Herstellkosten. Zusätzlich werden aufwändige Spannvorrichtungen benötigt, um ein Anschwingen der Bauteile während der Bearbeitung zu verhindern [9, 10]. Nach [10-12] können die eingebrachten Kräfte Schädigungen im Bauteil hervorrufen.

1.2 Potenziale des Lasers in der Fertigungstechnik

Der Laser ist aufgrund der Möglichkeit einer berührungslosen und nahezu kraftfreien Materialbearbeitung [13] ein Werkzeug, welches bereits in vielen Bereichen der industriellen Fertigung Verwendung findet [14-16]. Durch die gezielte, räumlich und zeitlich begrenzte Energieeinbringung lassen sich mit Lasern unterschiedlichste Fertigungsprozesse realisieren, wie z.B. das Laserschneiden, Laserschweißen, Laserlöten, Laserhärteten, Lasersintern, Laserbeschichten, Laserbeschriften u.v.m.. Laser mit ultrakurzen Pulsen (UKP) werden im Bereich von einigen Nanosekunden bis wenigen Femtosekunden unter anderem für das Bohren von präzisen Löchern oder das Abtragen von dünnen Schichten eingesetzt. Die in der industriellen Fertigung bislang am weitesten verbreitete Anwendung ist das Schneiden von Metallen. Wichtige Gründe dafür sind die hohe erzielbare Prozessgeschwindigkeit, gute Automatisierbarkeit und hohe Flexibilität des Lasers. Der Laser findet industriell trotz seiner hohen Investitionskosten insbesondere dann Verwendung, wenn es keine oder nur unwirtschaftlichere verfahrenstechnische Alternativen gibt.

1.3 Thermophysikalische Eigenschaften von CFK

Eine besondere Herausforderung für die Laserbearbeitung von CFK bezüglich der erzielbaren Qualität und Prozessgeschwindigkeit stellen die physikalischen Eigenschaften der einzelnen CFK-Bestandteile dar. Für die energetische Betrachtung des Prozesses und die Ausbreitung der Wärme im Bauteil sind insbesondere deren thermophysikalische Eigenschaften von Bedeutung. Ein wichtiger Fakt ist beispielsweise, dass weder Epoxidharze noch Kohlenstofffasern/Graphit eine schmelzflüssige Phase bei Umgebungsdruck aufweisen [17-19]. Alleine diese Tatsache führt zu einem Bearbeitungsprozess, welcher sich deutlich von der bereits weitentwickelten Bearbeitung von Metallen unterscheidet. Beim Schneiden von Metallen wird das Material im Schnittspalt aufgeschmolzen und durch das sog. Schneidgas ausgeblasen, wohingegen bei der Laserbearbeitung von CFK kein Schneidgas und somit auch keine Schneiddüse nötig sind. Dies bietet den Vorteil, dass das Material in einem sog. Remote-Prozess auch mit Scanneroptiken bearbeitet werden kann. Eine Beschreibung der Begriffe Remote-Prozess oder Scanneroptik sowie eine detailliertere Beschreibung des Schneidprozesses von Metallen erfolgt beispielsweise in [15].

Kohlenstofffasern bestehen zu ca. 90% aus Kohlenstoff und weisen eine graphithähnliche Struktur auf [6]. Graphit ist durch einen schichtweisen und somit richtungsabhän-

gigen Aufbau gekennzeichnet. Innerhalb dieser Schichten, der sog. Basalebenen, bewegen sich die freien Elektronen vorrangig und es existieren starke kovalente Bindungen zwischen den Atomen. Hingegen bilden sich zwischen den Schichten lediglich schwächere van der Waals'sche Bindungen aus (siehe Bild 2a), Darstellung nach[6]). Im ideal aufgebauten Graphit sind neben den mechanischen Eigenschaften auch die elektrischen und thermophysikalischen Eigenschaften richtungsabhängig. Nach [20-25] sind C-Fasern inhomogen aufgebaut. Die Fasern mit einem Durchmesser von üblicherweise 5 µm bis 10 µm bestehen aus einem Mantel, der einen hohen Orientierungsgrad der Basalebenen in Faserrichtung aufweist und einem fibrillären Kern mit geringerem Orientierungsgrad (siehe Bild 2b)). Aufgrund dieser Vorzugsorientierung der Basalebenen weisen die C-Fasern anisotrope Materialeigenschaften auf. Durch den in Bild 2b) dargestellten inhomogenen Aufbau der Fasern ist von unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten im Kern und Mantel der Fasern auszugehen. Zur Vereinfachung und aus Mangel an detaillierteren Werten in der Literatur werden die Eigenschaften der C-Fasern im Rahmen dieser Arbeit lediglich parallel und senkrecht zur Faserachse unterschieden. Tabelle 1 zeigt typische thermophysikalische Eigenschaften von Kohlenstofffasern und einer Epoxidharzmatrix [19, 26, 27].

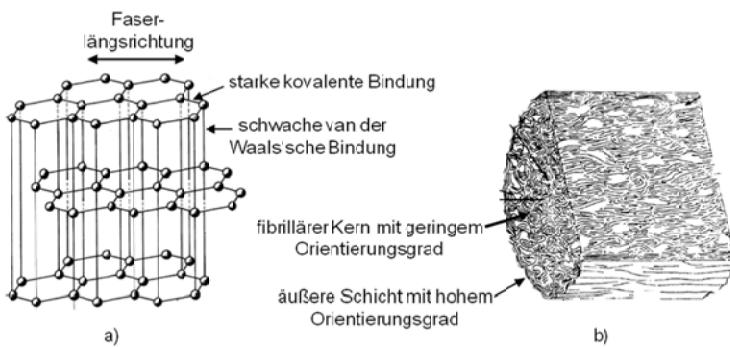


Bild 2: a) Elementarzelle eines Graphitkristalls [6]. b) Darstellung einer C-Faser nach einem Modell von Diefendorf [20, 22].

Die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile von CFK unterscheiden sich deutlich. Durch die um Faktor 43 höhere latente Wärme und die deutlich höhere Sublimations-temperatur werden für eine Sublimation und Erhitzung der Fasern auf Verdampfungs-temperatur ca. 85 J/mm³ benötigt. Für das Epoxidharz sind lediglich ca. 2 J/mm³ erforderlich. Folglich wird bei der Laserbearbeitung von CFK deutlich mehr Energie für die Bearbeitung der Fasern benötigt, als für die Bearbeitung der Kunststoffe. Die C-Fasern weisen in Faserrichtung eine um Faktor 10 höhere Wärmeleitfähigkeit auf als quer zur

Faserrichtung. Im Matrixmaterial ist die Wärmeleitfähigkeit um Faktor 250 geringer als in der Fasern parallel zur Faserachse.

Tabelle 1: Thermophysikalische Eigenschaften von Matrix und C-Fasern (parallel // und senkrecht \perp zur Faserachse).

	Matrix	C-Faser
Dichte ρ [kg/m ³]	1250	1850
Wärmeleitfähigkeit k [W/(m·K)]	0.2	50 //, 5 \perp
Wärmekapazität c_p [J/(kg·K)]	1200	710
Latente Wärme L [kJ/kg]	1000	43000
Sublimationstemperatur T_{sub} [K]	800	4098
Schädigungstemperatur T_D [K]	450	3000

1.4 Motivation und Herausforderung

Die Motivation für die vorliegende Arbeit wird nachfolgend anhand einer einfachen energetischen Abschätzung zur Produktivität bei der Laserbearbeitung von CFK und zweier wichtiger Schädigungsmechanismen abgeleitet.

1.4.1 Produktivität

In der Volkswirtschaftslehre wird unter Produktivität das (Mengen-)Verhältnis zwischen den produzierten Gütern und den dafür eingesetzten Mitteln verstanden [28]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff verwendet, um die erzielte Prozessgeschwindigkeit in Relation zur dafür eingesetzten mittleren Laserleistung zu bewerten. Mit einer gegebenen mittleren Laserleistung ergibt sich anhand einer einfachen energetischen Abschätzung eine theoretische Schneidgeschwindigkeit. Mit den thermophysikalischen Materialeigenschaften aus Tabelle 1 lässt sich die volumenspezifische Energie zur Erwärmung auf Sublimationstemperatur und vollständiger Sublimation der Materialkomponenten von CFK $E_{h,s}$ nach

$$E_{h,s} = V_f \cdot \rho_f \cdot (L_f + c_{p,f} \cdot (T_{\text{sub},f} - T_0)) + (1 - V_f) \cdot \rho_m \cdot (L_m + c_{p,m} \cdot (T_{\text{sub},m} - T_0)) \quad (1.1)$$

bestimmen, wobei V_f der relative Faservolumenanteil ist, L_f die latente Wärme der Fasern, L_m die latente Wärme der Matrix, ρ_f die Dichte der Fasern, ρ_m die Dichte der Matrix, $c_{p,f}$ die Wärmekapazität der Fasern, $c_{p,m}$ die Wärmekapazität der Matrix, $T_{sub,f}$ die Sublimationstemperatur der Fasern, $T_{sub,m}$ die Sublimationstemperatur der Matrix und T_0 die Ausgangstemperatur ist. Bei einem Faservolumengehalt von 60% ist $E_{h,s} = 52 \text{ J/mm}^3$. Mit der Annahme einer vollständigen Absorption der einfallenden Laserleistung, einer verlustfreien Bearbeitung und einer vollständigen Sublimation des Materials im Schnittspalt ergibt sich die theoretische Bearbeitungsgeschwindigkeit v_t nach

$$v_t = \frac{P}{d_{S,Mittel} \cdot h_s \cdot E_{h,s}}, \quad (1.2)$$

wobei P die Laserleistung ist, $d_{S,Mittel}$ die mittlere Schnittspaltbreite und h_s die Materialstärke. Bild 3 zeigt exemplarisch die theoretische Bearbeitungsgeschwindigkeit als Funktion der Laserleistung bei Annahme einer mittleren Schnittspaltbreite von 0,15 mm und einer Materialdicke von 2 mm. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der mittleren Laserleistung und v_t .

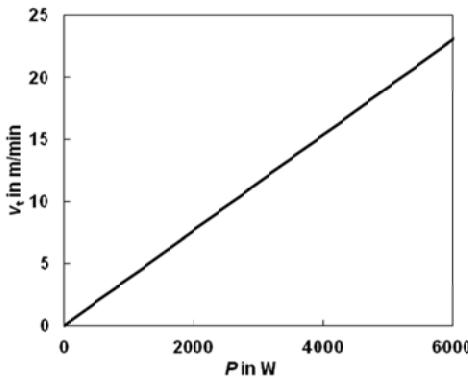


Bild 3: Einfache Abschätzung der Bearbeitungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen mittleren Laserleistungen.

Beim Schneiden von 2 mm dickem Baustahl sind Vorschübe von ca. 10 m/min üblich (8 m/min nach [29]). Um bei der CFK-Bearbeitung einen ähnlich schnellen und somit auch wirtschaftlichen Prozess zu ermöglichen sind Laserleistungen von mehreren Kilowatt nötig. Langfristig werden voraussichtlich auch kurz und ultrakurz gepulste Laser mittlere Leistungen in diesem Bereich aufweisen. In [30] wird beispielweise eine

Strahlquelle mit Pulsdauern im Pikosekundenbereich, und einer mittleren Ausgangsleistung von 1,1 kW beschrieben, welche aus thermischer Sicht Vorteile haben kann [31]. Derzeit spricht die nötige mittlere Leistung allerdings für den Einsatz leistungsstarker cw-Laser. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Versuchen mit cw-Lasern.

Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Laserleistung und der theoretischen Prozessgeschwindigkeit erscheint es sinnvoll, die erzielte Prozessgeschwindigkeit in Bezug zur verwendeten Laserleistung zu bewerten um Mechanismen, die Einfluss auf die Produktivität haben, identifizieren zu können. Hierfür wird der Produktivitätsfaktor

$$\eta = \frac{v}{v_t} \quad (1.3)$$

als Verhältnis zwischen der erreichten Schneidgeschwindigkeit v und der theoretischen Schneidgeschwindigkeit v_t definiert.

Aus den Annahmen für die Abschätzung der theoretischen Vorschubgeschwindigkeit und dem Produktivitätsfaktor ergeben sich erste Fragestellungen für diese Arbeit. Die Abschätzung von v_t ist beispielsweise nur mit der Annahme einer vollständigen Absorption der einfallenden Laserleistung gültig. Um den Fehler durch diese Annahme besser einordnen zu können wird die Absorption im Verbundmaterial und deren Einfluss auf die Produktivität betrachtet. Die zweite Annahme für die Abschätzung ist eine vollständige Sublimation des Materials im Schnittspalt. Falls es gelingt das Material abzutragen ohne es vollständig zu sublimieren, ist weniger Energie für den Prozess nötig und er wird produktiver. Demzufolge werden Mechanismen und Prozessstrategien gesucht, bei denen das Material nicht vollständig sublimiert, sondern teilweise als Feststoff ausgeschleudert wird. Eine weitere Annahme ist eine verlustfreie Bearbeitung. Folglich wird eine Energiebilanz für den Bearbeitungsprozess erstellt. Hierbei werden insbesondere die Wärmeleitungsverluste detailliert untersucht, da die in das Bauteil geleitete Energie zusätzlich eine Schädigung des Materials nahe der Schnittkante verursacht.

1.4.2 Schädigung

Bild 4a) zeigt eine Ecke einer CFK-Probe. Die rechte Kante der Probe wurde lasergeschnitten. An der Kante entsteht ein im Bild dunkel erscheinender Bereich, der durch die vom Laserstrahl eingebrachte Wärme entsteht. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob auch außerhalb der sichtbar geschädigten Zone eine Beeinflussung der

Materialeigenschaften durch die Wärme erfolgt. Die Bestimmung der Ausdehnung der sichtbar und nicht sichtbar geschädigten Zonen ist beispielsweise für eine kombinierte Fräsen- und Laserbearbeitung sinnvoll, die unter Anderem Gegenstand des Forschungsprojektes „FlexiCut“ ist [32]. In einem ersten Schritt wird ein Hochleistungs-cw-Laser für eine schnelle Bearbeitung eingesetzt. Anschließend kann die durch die Wärme des Laserstrahls beeinflusste Zone abgefräst werden um sicherzustellen, dass im Bauteil kein durch die Wärme des Laserstrahls geschädigtes Material verbleibt. Der vorgelagerte Laserprozess reduziert das im Fräsvorprozess zu zerspanende Volumen, was in Folge eine Reduktion des Werkzeugverschleißes bewirkt [8, 9]. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Berechnung der Ausdehnung dieser geschädigten Zonen und der Wärmeleitungsvolumen ein Wärmeleitungsmodell verwendet. Zusätzlich wurden Experimente zur Bestimmung der Materialeigenschaften und Anpassung der Randbedingungen im Modell durchgeführt.

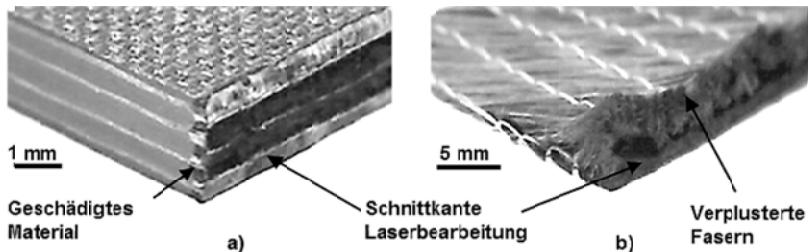


Bild 4: Qualitätsmindernde Effekte bei der produktiven Laserbearbeitung von CFK und CF. a) Lasergeschnittene CFK Probe. Das an die Schnittkante angrenzende Material ist durch die Wärme des Laserstrahls geschädigt. b) CF-Probe mit inhomogener / verplusterter Schnittkante.

Bild 4b) zeigt die Ecke einer verplusterten lasergetrennten CF-Probe. Das Probenmaterial besteht aus zwei Faserlagen welche mit Polymerfäden (weiß) vernäht sind. Es wurde untersucht, ob die Wechselwirkung des im Schnittspalt ablatierten heißen Materials mit den angrenzenden Faserenden zur Ausbildung der inhomogenen bzw. „verplusterten“ Schnittkante führt. Um diesen Mechanismus zu verstehen und um Möglichkeiten zu dessen Vermeidung bzw. Abschwächung aufzuzeigen, ist es von zentraler Bedeutung den Impuls und die Strömungsgeschwindigkeiten der Ablationsprodukte zu kennen. Aus diesem Grund wird eine Methode vorgestellt, mit welcher der Impuls und die Strömungsgeschwindigkeit der Ablationsprodukte mittels einer Präzisionswaage bestimmt werden.

Weitere Schädigungsmechanismen entstehen durch die lokal unterschiedliche Absorption im Verbundmaterial. Für die Untersuchung dieser Effekte werden die Absorptionseigenschaften der einzelnen Komponenten betrachtet und unterschiedliche Absorptionsfälle bei der Bearbeitung bewertet.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die einzelnen Bestandteile des CFK-Materials (C-Fasern, Schlüchte, Binder, Nähfädchen, Matrixmaterial, etc.) werden teilweise aus unterschiedlichen Materialien und Kunststoffen hergestellt. Durch die Vielzahl an Bestandteilen in fertigen Bauteilen ergeben sich viele Materialvarianten. Folglich ist die Arbeit nicht nach den verwendeten Materialien, sondern nach den auftretenden Mechanismen bei der Absorption, der Wärmewirkung im Bauteil und der Ablation gegliedert. Auf diese Weise wird ein Prozessverständnis erarbeitet, das möglichst unabhängig von der Variantenvielfalt der CF- und CFK-Materialien und deren Bestandteile ist. Der Stand der Technik und die jeweiligen Grundlagen werden themenbezogen in den einzelnen Kapiteln aufgeführt und diskutiert.

In Kapitel 2 werden Mechanismen beschrieben, die durch die Absorptionseigenschaften der Bestandteile verursacht werden, wobei der Schwerpunkt auf dem Einfluss der Wellenlänge des Lasers liegt. Den Kern der Arbeit bilden Kapitel 3, in welchem die Wirkung der in das Material eingebrachten Wärme betrachtet wird und Kapitel 4, in welchem der Ablationsvorgang und die Wechselwirkung der Ablationsprodukte mit dem Werkstück untersucht werden.

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 Strahlführungssystem 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 Umwandlungshärrens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Bork, 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 längsgestromte 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

Grünewald, Karin M.

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

Shen, Jialin

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

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe 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 zweistufiger 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 Hochleistungslaser
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**
Laserstrahlhärtén 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-gekühlten 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
- Bartelt-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 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

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

Qualitätsicherung 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 Weichlötns 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

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 Vertikalemittler-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 -föhrung 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 keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurz gepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

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

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- 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 Präzision 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

Marsangoni-effekt beim Laserstrahlieforschweißen 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 Nahtei-genschaften 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 Breitling

Gaspaseneinflüsse 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 Weerpals

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 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