

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

Inhalt

Symbole und Abkürzungen.....	8
Kurzfassung	16
Extended Abstract	19
1 Einleitung	23
2 Grundlagen	25
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
3 Deposition optischer Energie in CFK und Carbonfasergelege	40
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
4 Beeinflussung des Abtragprozesses durch Oxidation der kohlenstoffhaltigen Anteile von CFK	64
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
5	Energietransport durch die bei der Laserbearbeitung von CFK entstehenden Ablationsprodukte	81
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
6	Transport absorbierter Laserenergie durch Wärmeleitung	93
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>
7	Schneiden von CFK mit einem Ultrakurzpuls-Lasersystem mit 1,1 kW mittlerer Ausgangsleistung	119
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
8	Zusammenfassung	126
9	Literaturverzeichnis	129

Symbole und Abkürzungen

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

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
d_{α}	$^{\circ}$	Fitparameter
E	J	Energie
E_A	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspezifische Aktivierungsenergie
E_{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_{sub}	$J \cdot m^{-3}$	Volumenspezifische Energie benötigt zum Überwinden der latenten Wärme beim Phasenübergang fest - gasförmig
E_{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 _I
f_B	s^{-1}	Pulsfrequenz an Datenpunkt B _I
f_C	s^{-1}	Pulsfrequenz an Datenpunkt C _{II}
f_D	s^{-1}	Pulsfrequenz an Datenpunkt D _{II}
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

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
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_α	-	Fitparameter
N_e	-	Komplexer Brechungsindex des außerordentlichen Strahls
N_{eff}	-	Effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
$N_{\text{eff},20\text{m/s}}$	-	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_{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

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
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

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
U_3	V	Auf U_1 bezogenes Spannungssignal der Photodiode D3
U_{D2}	V	Maximal ausgegebene Spannung der Photodiode D2
U_{D3}	V	Maximal ausgegebene Spannung der Photodiode D3
V	m^3	Volumen
v	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit
v_I	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit an Übergang zu Regime I
v_{II}	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit an Übergang zu Regime II
v_A	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit an Datenpunkt A _I
v_B	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit an Datenpunkt B _I
v_b	$m \cdot s^{-1}$	Positioniergeschwindigkeit
v_C	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit an Datenpunkt C _{II}
v_{cut}	$m \cdot s^{-1}$	Schnittgeschwindigkeit
v_D	$m \cdot s^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit an Datenpunkt D _{II}
\mathbf{v}_e	m	Richtungsvektor des einfallenden Laserstrahls
v_M	$m \cdot s^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit
\mathbf{v}_r	m	Richtungsvektor des reflektierten Laserstrahls
x	m	Kartesische Koordinate
x_M	m	Abstand Oberfläche zu erstem Verdichtungsstoß
y	m	Kartesische Koordinate
z	m	Koordinate in Strahlrichtung
z_R	m	Rayleigh-Länge
Griechische Buchstaben		
α	°	Einfallswinkel
β	°	Schnittkantenneigung
Δf_{PI}	s^{-1}	Fehler der Pulsfrequenz beim Übergang zu Regime I
Δf_{PII}	s^{-1}	Fehler der Pulsfrequenz beim Übergang zu Regime II
ΔL	m	Linienabstand
ΔM	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	Maximale Abweichung der molaren Masse
Δr	m	Abstand Scanfeld-Mitte zum Laserauftreffpunkt

Symbol	SI-Einheit	Bedeutung
ΔT_{Gas}	K	Maximale Abweichung der Temperatur
Δt_{N}	m	Tiefenfortschritt pro Überfahrt
Δt_{P}	m	Abtragsrate
Δt_{Scans}	s	Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Überfahrten
Δv_{I}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Fehler der Vorschubgeschwindigkeit beim Übergang zu Regime I
Δv_{II}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Fehler der Vorschubgeschwindigkeit beim Übergang zu Regime II
Δz	m	Abstand in z-Richtung von Fokusebene
$\Delta \kappa$	-	Maximale Abweichung des Isentropenexponenten
η_{A}	-	Einkoppelgrad
η_{P}	-	Prozesswirkungsgrad
η_{th}	-	Thermischer Wirkungsgrad
θ	°	Einfalls- bzw. Ausfallswinkel eines Laserstrahls
κ	-	Isentropenexponent
λ	m	Wellenlänge
λ_{CP}	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit der Carbonfasern parallel zur Symmetrieachse
λ_{CS}	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit der Carbonfasern senkrecht zur Symmetrieachse
λ_{M}	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit des Matrixmaterials
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte
ρ_{C}	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte Carbonfasern
ρ_{M}	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte Matrixmaterial
τ	s	Pulsdauer
Ω	°	Winkel zwischen Polarisationsrichtung und Symmetrieachse der Carbonfasern

Abkürzung Bedeutung**Lateinische Buchstaben**

CFK	Carbonfaser verstärkter Kunststoff
CFRP	Carbonfiber reinforced plastics
cw	continuous wave
HMS	High Modulus Strength (hochsteif)
HTS	High Tensile Strength (hochfest)
IR	Infrarot
MEZ	Matrix evaporation zone
MVZ	Matrixverdampfungszone
MZZ	Matrixzersetzungszone
NIR	Nah-Infrarot
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
pF	Parallel zur Carbonfaserachse
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
sF	Senkrecht zur Carbonfaserachse
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
UV	Ultraviolett
VIS	Visible (Sichtbar)
WAP	Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen
WAS	Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans

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 CO₂-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 μm (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/cm², 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 μ 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 μm 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° 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.

1 Einleitung

Carbonfaser verstärkte Kunststoffe (CFK) werden aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften bei gleichzeitig schwarzem Erscheinungsbild häufig auch als „Schwarzes Gold“ bezeichnet. Dieser Begriff ist insofern irreführend, als er die einzigartige Struktur des Materials vernachlässigt. Im Gegensatz zu Gold, welches ein Edelmetall mit isotropen Eigenschaften ist, sind CFK Materialien ein Verbund aus Carbonfasern eingebettet in eine Kunststoffmatrix. Dieser Zusammenschluss zweier Komponenten mit grundverschiedenen Eigenschaften führt letztendlich zu der besonderen Attraktivität des Werkstoffs für den Leichtbau, stellt allerdings die Lasermaterialbearbeitung vor gänzlich neue Herausforderungen. Erwähnt sei hier die thermische Schädigung des Materials hervorgerufen durch Anteile der eingestrahlenen Laserenergie, welche nicht zur Ablation des Materials beitragen sondern als Wärme im Material verbleiben. Diese kann ein Verdampfen des die Prozesszone umgebenden Matrixmaterials bewirken und somit zu einem Bereich führen, in welchem lediglich die freigelegten Carbonfasern verbleiben und der Verbund geschädigt ist. Möchte man das Material möglichst schädigungsfrei bearbeiten, so ist eine detaillierte Kenntnis der Mechanismen, welche die eingestrahelte Laserenergie im Material deponieren sowie umverteilen, notwendig. Sind die Energietransportmechanismen verstanden, so können die Prozessparameter hinsichtlich Produktivität und Qualität optimiert werden, was Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung des Laserstrahls zur Bearbeitung von CFK ist.

Im Fokus dieser Ausarbeitung stehen theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung von CFK. Begonnen wird dabei mit einer Betrachtung der Deposition der durch den Laser eingestrahlenen Energie im Material. Wesentlich ist dabei die Einkopplung der Laserstrahlung, welche mit Hilfe eines theoretischen Modells abgeschätzt wird. Zur Beurteilung der Aussagekraft der theoretischen Betrachtungen wurde der Einkoppelgrad auch mit Hilfe eines reflektometrischen Messaufbaus experimentell bestimmt. Den Ort der Deposition optischer Energie beeinflussend ist die Reflexion von Laserstrahlung am runden Carbonfaserquerschnitt. Die Auswirkungen dieser räumlichen Umverteilung der eingestrahlenen optischen Energie auf den Bearbeitungsprozess werden im Rahmen dieser Ausarbeitung diskutiert.

Anschließend an die Betrachtungen zur Energiedeposition werden die bei der Energiedistribution wirksamen Mechanismen identifiziert und quantifiziert. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Wirkung exothermer Reaktionsenergie durch Oxidation der Carbonfasern bzw. des Matrixmaterials, den Auswirkungen heißer Ablationsprodukte auf das umliegende Material sowie dem Energietransport durch Wärmeleitung.

Nach Zufuhr der benötigten Aktivierungsenergie kommt es zur Oxidation der Carbonfasern bzw. des Matrixmaterials, wodurch chemische Bindungsenergie in einer

exothermen Reaktion in Wärme umgewandelt wird. Die Auswirkungen dieser zusätzlich dem Prozess zur Verfügung stehenden Wärme auf den Abtragprozess von flachen und tiefen Nuten und die dabei stattfindende Ausbildung einer thermischen Schädigung werden diskutiert.

Ein wesentlicher Anteil der eingestrahelten optischen Energie wird sowohl in kinetische als auch thermische Energie des verdampften Materials umgewandelt. Es entsteht ein Strom heißer Ablationsprodukte, welcher mit dem die Prozesszone umgebenden Material wechselwirken kann. In der vorliegenden Abhandlung wird über Messungen zur Geschwindigkeit des abströmenden Materialdampfs berichtet. Des Weiteren werden Ergebnisse eines Experiments zur Beobachtung der thermischen Beeinflussung des Grundmaterials durch einen Strom heißer Ablationsprodukte vorgestellt.

Die im Material als Wärme verbleibende Energie wird über Wärmeleitungsmechanismen umverteilt, wobei die Anisotropie des Materials sich in der Gestalt der Wärmeeinflusszone wiederfindet. Es wird gezeigt, dass der Wärmefluss hauptsächlich entlang der Carbonfasern stattfindet. Eine Besonderheit bei der gepulsten Wärmeeinbringung ist das Auftreten von Wärmeakkumulationseffekten, wobei die Wärmeakkumulation auf unterschiedlichen Zeitskalen stattfinden kann. Es kann zwischen einer Wärmeakkumulation verursacht durch mehrere aufeinanderfolgende Laserpulse und einer Wärmeakkumulation verursacht durch mehrere aufeinanderfolgende Überfahrten des Laserstrahls über das Material unterschieden werden. Der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf diese Akkumulationseffekte wird anhand deren Auswirkungen auf die thermische Schädigung des Materials detailliert untersucht.

An die Ausführungen zu den wirksamen Energietransportmechanismen anknüpfend wird ein Laserbearbeitungsprozess mit hoher mittlerer Laserleistung demonstriert, bei dem ein CFK Werkstück mit minimaler thermischer Schädigung geschnitten werden konnte. Ergänzende Bemerkungen zur weiteren Optimierung des Schneidprozesses schließen diese Abhandlung ab.

2 Grundlagen

2.1 Der Werkstoff CFK

Carbonfaser verstärkte Kunststoffe, kurz CFK, sind eine Kombination aus Carbonfasern eingebettet in ein Matrixmaterial [1]. Die Fasern mit hoher Steifigkeit und Festigkeit übertragen die Lasten, die Matrix fixiert die Fasern und schützt diese vor äußeren Einflüssen [1]. Es existiert eine Vielzahl an verfügbaren Carbonfasern und Matrixmaterialien. Carbonfasern können nach ihrem Ausgangsmaterial (Polyacrylnitril (PAN), Zellulose, Pech oder Polyvinylchlorid) als auch ihren Eigenschaften (hochsteif, hochfest) unterschieden werden [1], [2]. Der am häufigsten eingesetzte Typ von Carbonfasern sind PAN-basierte Carbonfasern [2], welche auch im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Experimente zur Anwendung kamen. Als Matrixmaterialien kommen hauptsächlich Duroplaste als auch in geringerem Umfang Thermoplaste zum Einsatz. Typische Duroplaste sind beispielsweise ungesättigte Polyesterharze (UP), Vinylesterharze und Epoxidharze, während als thermoplastische Matrixwerkstoffe meist Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polyethylenterephthalat (PET), Polyphenylsulfid (PPS) oder Polyetheretherketon (PEEK) zum Einsatz kommen [1].

CFK besitzt gegenüber metallischen Werkstoffen eine Reihe herausragender Vorteile wie beispielsweise eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte, eine gute Korrosionsbeständigkeit, einstellbare elektrische Eigenschaften und ein hohes spezifisches Energieaufnahmevermögen [3]. Insbesondere die im Vergleich zu Metallen hohe spezifische Festigkeit und das hohe spezifische Elastizitätsmodul zeichnen Carbonfaser verstärkte Kunststoffe als ideale Leichtbau-Werkstoffe aus [4], [5]. Dies spiegelt sich in der kontinuierlich wachsenden Bedeutung von CFK im Leichtbausegment wieder [6]. Von 2012 auf 2013 ist der globale Bedarf an Carbonfasern um 6,9% gestiegen, bezüglich 2008 um insgesamt 47,6% [7]. Nachteilig sind allerdings der im Vergleich zu Metallen höhere Materialpreis sowie die schwierige Bearbeitung des Werkstoffs, auf welche im Folgenden eingegangen wird [1], [3], [4].

2.2 Spanende Bearbeitung von CFK

Die mechanische Bearbeitung von CFK ist bezüglich der Anforderungen an das Werkzeug ein herausfordernder Prozess [4]. Anders als bei Metallen wird das Material bei der spanenden Bearbeitung von CFK hauptsächlich durch Druck-Scherbelastungen und ein sprödes Brechen der Fasern bzw. des Matrixmaterials abgetragen [4], [8], [9]. Die hohe Abrasivität der CFK-Komponenten führt zu einem raschen Werkzeugverschleiß [10]. Dieser äußert sich in einem Abstumpfen bzw. Abrunden der Schneidkanten des Werkzeugs [9]. Als Folge des Verschleiß können unerwünschte negative Effekte wie eine Absenkung der Festigkeit der Schneidkante, eine Erhöhung der

Schneidkräfte und somit des Energieverbrauchs, eine Erhöhung der auftretenden Temperaturen, eine Verschlechterung der Qualität der bearbeiteten Kontur, eine Verschlechterung der Maßhaltigkeit sowie letztlich eine Verringerung der Produktivität auftreten [4].

Bei der spanenden Bearbeitung können des Weiteren Defekte des Bauteils als Folge des Bearbeitungsprozesses beobachtet werden. Darunter zählen das Herausziehen von Fasern aus dem Verbund, das unvollständige Durchtrennen der Fasern, das Brechen von Fasern im Verbund, das Verbrennen des Matrixmaterials bei hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten des Werkzeugs, das Ausfransen des Austrittslochs, das Auftreten eines Grats und Delamination [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Die beschriebenen Defekte sind eine Folge der Drehbewegung des Fräswerkzeugs sowie der zum Bearbeiten benötigten Kraft. Der Laser als verschleißfreies und kraftfrei bearbeitendes Werkzeug bietet eine Alternative zur Vermeidung der bei der mechanischen Bearbeitung auftretenden Defekte [17].

2.3 Eigenschaften des Materials

2.3.1 Struktur von Carbonfasern

Die verwendete Nomenklatur für die auf Kohlenstoff basierenden Materialien folgt der in [18] gegebenen Empfehlung.

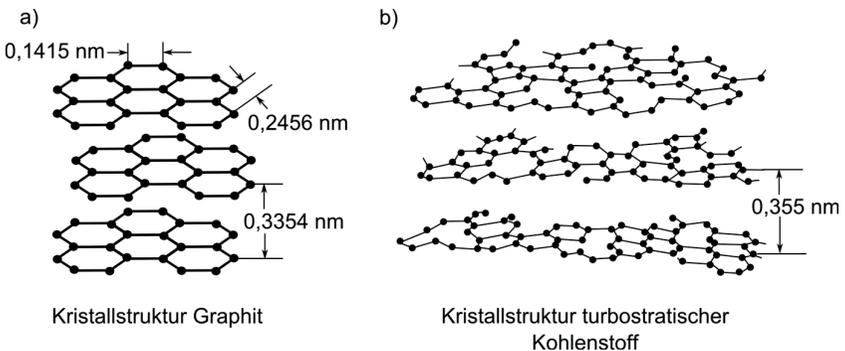


Bild 2.1: Kristallstruktur von a) Graphit und b) turbostratischem Kohlenstoff skizziert in Anlehnung an die in [19] gezeigten Darstellungen.

Abhängig von Ausgangsmaterial und Wärmebehandlung bestehen Carbonfasern aus Graphit, turbostratischem Kohlenstoff oder einer Mischform mit Anteilen von Graphit und turbostratischem Kohlenstoff [2]. Die in Bild 2.1b zu sehende Kristallstruktur von turbostratischem Kohlenstoff ist ähnlich der Kristallstruktur von Graphit, welche in Bild 2.1a zu sehen ist. Die Kohlenstoffatome bilden ein Netzwerk aus regelmäßigen Hexagonen, welche in annähernd parallelen Schichten angeordnet sind. Dabei treten

bei turbostratischem Kohlenstoff vermehrt Defekte und Unregelmäßigkeiten in der Kristallstruktur auf, wie in Bild 2.1b angedeutet [19], und es besteht keine räumliche Beziehung zwischen der Position der Kohlenstoffatome einer Graphenschicht mit der Position der Kohlenstoffatome in angrenzenden Graphenschichten [18]. Wie in Bild 2.2 gezeigt, kann die Ausrichtung der Graphenschichten in den Carbonfasern radial, umlaufend, zufällig oder auch eine Mischung dieser drei Varianten sein [20] [21] [22] [23].

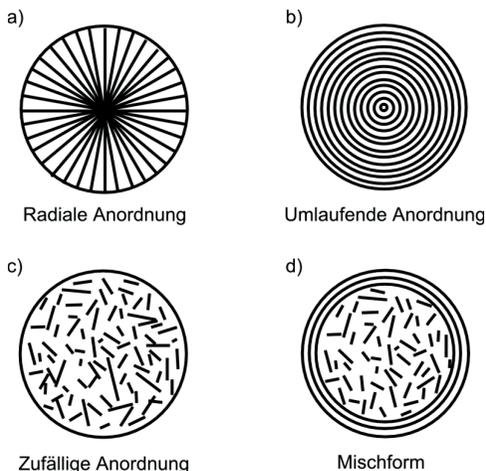


Bild 2.2: Skizzierte Struktur der Carbonfasern gezeigt im Querschnitt mit unterschiedlicher Ausrichtung der Graphenschichten: a) radial, b) umlaufend, c) zufällig, d) Mischform aus umlaufender und zufälliger Ausrichtung der Graphenschichten. Die schematischen Zeichnungen basieren auf Darstellungen in [20] [21] [22] [23].

Die gezeigten Strukturen basieren auf elektronenmikroskopischen Aufnahmen aus [20] sowie [22] und den in [21] sowie [23] dargestellten Skizzen. Im Fall der PAN basierten Carbonfasern sind die Graphenschichten vorwiegend umlaufend angeordnet, während auf Pech basierte Carbonfasern vorwiegend eine radiale Anordnung aufweisen [2].

2.3.2 Thermische Eigenschaften der Verbundkomponenten

Der Laser als thermisches Strahlwerkzeug stellt die zum Bearbeitungsprozess benötigte Energie in Form von Wärme bereit [17]. Die thermischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Materials sind somit von hoher Relevanz für den Bearbeitungsprozess. Als Carbonfasern werden im Folgenden PAN basierte Carbonfasern betrachtet und als Matrixmaterial Epoxidharz.

Epoxidharze als duroplastische Polymere weisen im thermischen Gleichgewicht bei Umgebungsdruck keine schmelzflüssige Phase auf. Ein reversibles Aufschmelzen des

Materials ist nicht möglich. Vielmehr wird das Material bei Wechselwirkung mit Laserstrahlung sublimiert und es können flüssige Zersetzungsprodukte entstehen, welche nach Erstarren nicht mehr die ursprünglichen Eigenschaften des Epoxidharzes aufweisen. Bei der Sublimation von Epoxidharzen bildet sich keine Gasphase aus einzelnen Atomen aus, sondern es entstehen flüchtige, kurze Molekülketten. Die Verdampfungstemperatur von Epoxidharzen wird mit ungefähr $T_{VM} = 500 \text{ °C}$ angegeben [24], [25], wobei eine thermische Schädigung des Materials durch Zersetzung bereits bei deutlich geringeren Temperaturen eintreten kann. In [25] wird für Epoxidharz eine Zersetzungstemperatur von 343 °C angegeben. Als maximale Einsatztemperatur wird von den Herstellern 180 °C für das Epoxidharz HexFlow RTM6 und 80 °C für das Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135 angegeben [26], [27].

Unter Umgebungsbedingungen bildet Kohlenstoff keine schmelzflüssige Phase. Dies geht aus dem Phasendiagramm hervor, welches beispielsweise in [28] zu finden ist. Bei der Laserbearbeitung von Carbonfasern müssen diese somit sublimiert werden. Die Verdampfungstemperatur von Carbonfasern wird in [29] mit 3649 °C angegeben. Da die Kristallstruktur von Carbonfasern der von Graphit ähnelt, kann auch die Verdampfungstemperatur von Graphit betrachtet werden, welche mit 3300 °C bis 4830 °C angegeben wird [24], [28], [30]. Nachfolgend wird eine Verdampfungstemperatur $T_{VC} = 3650 \text{ °C}$ für die Carbonfasern angenommen.

Die spezifische Verdampfungsenthalpie von Epoxidharz beträgt $H_{VM} = 996 \text{ kJ/kg}$ [25] und ist somit deutlich geringer als die Verdampfungsenthalpie der Carbonfasern, welche hier über die spezifische Verdampfungsenthalpie von Graphit mit $H_{VC} = 43225 \text{ kJ/kg}$ [31] angenähert wird.

Die spezifische Wärmekapazität eines Epoxidharzes beträgt $c_{pM} = 1960 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck [32]. Die spezifische Wärmekapazität von PAN basierten Carbonfasern stimmt gut mit der spezifischen Wärmekapazität von Graphit überein [33], welche bei Raumtemperatur ungefähr $c_{pC} = 710 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ist [34]. Dieser Wert wurde beispielsweise in [24] für die spezifische Wärmekapazität von Carbonfasern angenommen. Zu hohen Temperaturen hin steigt die spezifische Wärmekapazität stark an. Ab ca. 1000 °C bis ca. 3000 °C befindet sich ein Plateau bei einer spezifischen Wärmekapazität von ungefähr $c_{pC} = 2100 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Für Temperaturen größer als 3000 °C bis zur Verdampfungstemperatur nimmt die spezifische Wärmekapazität weiter zu [33], [34]. Dieser Anstieg resultiert aus der umkehrbaren Bildung von Leerstellen im Kristallgitter [34].

Die Dichte von Epoxidharz beträgt ca. $\rho_M = 1,19 \text{ g/cm}^3$ [1], [35]. Die Dichte von PAN basierten Carbonfasern beträgt ca. $\rho_C = 1,80 \text{ g/cm}^3$ [2], [33].

Die Wärmeleitfähigkeit eines polymerisierten Epoxidharzes wird in [35] für Temperaturen zwischen 0 °C und 70 °C mit ungefähr $0,18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ angegeben. Zu höheren Tem-

peraturen hin nimmt die Wärmeleitfähigkeit leicht zu und wird in [32] mit $0,21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bei 127°C angegeben. Ähnliche Werte werden auch in [36] berichtet mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,194 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ und $0,226 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bei Temperaturen zwischen -98°C und 0°C oder in [37] mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,23 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ und $0,233 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bei Temperaturen zwischen 30°C und 120°C . Für weitere Betrachtungen wird im Folgenden eine Wärmeleitfähigkeit $\lambda_M=0,23 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ für das Matrixmaterial angenommen.

In [33] werden Ergebnisse einer direkten Vermessung der Wärmeleitfähigkeit von PAN basierten Carbonfasern bei hohen Temperaturen vorgestellt. Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit von Carbonfasern mit unterschiedlicher Wärmebehandlung in Abhängigkeit verschiedener Temperaturen untersucht. Bei Temperaturen von ungefähr 750 K schwankt die Wärmeleitfähigkeit je nach Wärmebehandlung zwischen $30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ und $80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Für höhere Temperaturen von ungefähr 2000 K steigt die Wärmeleitfähigkeit je nach Wärmebehandlung auf $70 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ beziehungsweise $90 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ an. Die Wärmeleitfähigkeit von PAN basierten Carbonfasern bei Umgebungstemperatur wird in [36] behandelt. Dabei wurde die Wärmeleitfähigkeit im Verbund mit einem Epoxidharz gemessen. Es wurden PAN basierte Carbonfasern mit hohem Elastizitätsmodul (HMS) und Carbonfasern mit hoher Festigkeit (HTS) vermessen. Für PAN basierte HMS Carbonfasern ist die Wärmeleitfähigkeit entlang der Fasern $50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Für PAN basierte HTS Carbonfasern ist die Wärmeleitfähigkeit entlang der Fasern $9,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Die Wärmeleitfähigkeit PAN basierter Carbonfasern in Faserrichtung ist somit ungefähr um einen Faktor 40 bis 350 höher als die Wärmeleitfähigkeit des Matrixmaterials. Allerdings weisen auch die Carbonfasern an sich ein anisotropes Verhalten auf. Die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Carbonfaserachse ist geringer als in Richtung der Carbonfaserachse. Dies lässt sich experimentell nur indirekt über eine Messung der Wärmeleitfähigkeit eines Verbundes aus Carbonfasern und Matrixmaterial bestimmen. Typischerweise liegt die Wärmeleitfähigkeit des Verbundes in Richtung der Carbonfasern ungefähr 5 bis 50-mal so hoch wie senkrecht zur Carbonfaserachse, abhängig von weiteren Faktoren wie Faservolumengehalt, Struktur und Wärmebehandlung der Carbonfasern sowie dem Matrixmaterial [36], [37], [38], [39], [40]. Im Folgenden wird, wie auch in zahlreichen Veröffentlichungen zur Lasermaterialbearbeitung von Carbonfasern und CFK, siehe [24], [41] und [42], bei Umgebungstemperatur eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{CP} = 50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ in Richtung der PAN basierten Carbonfasern angenommen und $\lambda_{CS} = 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ senkrecht zur Carbonfaserachse. Abschließend sei noch erwähnt, dass die Wärmeleitfähigkeit der Carbonfasern auch vom Ausgangsmaterial abhängt. So ist die Wärmeleitfähigkeit Pech basierter Carbonfasern meist größer als für PAN basierte Carbonfasern, während auf Zellulose basierte Carbonfasern meist eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen [33].

2.4 Laserschneiden von CFK

Die Laserbearbeitung von CFK ist aufgrund der höchst unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der beiden Verbundkomponenten eine anspruchsvolle Aufgabe [41]. Falls effizient eingesetzt, wird der größte Teil der eingebrachten Energie für den Bearbeitungsprozess aufgewendet. Trotzdem bleibt immer ein Teil der eingebrachten Energie in Form von Wärme im nicht abgetragenen Material zurück. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Carbonfasern fließt diese Wärme hauptsächlich entlang der Fasern in das Volumen des Verbundes. Dort wird die Wärme an das die Carbonfasern umgebende Matrixmaterial abgegeben. Da dieses eine deutlich niedrigere Verdampfungs- bzw. Zersetzungstemperatur als auch eine geringere spezifische Verdampfungsenthalpie aufweist, bewirkt die in den Verbund geleitete Wärme ein Verdampfen bzw. Zersetzen des Matrixmaterials während die Carbonfasern weitgehend intakt bleiben [43], [44]. Aufgrund der anisotropen thermischen Materialeigenschaften der Verbundkomponenten dehnt sich die thermische Schädigung elliptisch um die Bearbeitungszone aus, wobei die Hauptachse der Ellipse entlang der Symmetrieachse der Carbonfasern orientiert ist [39], [45]. Es können insgesamt drei verschiedene wärmebeeinflusste Bereiche definiert werden [46]. Erwärmen sich die Carbonfasern auf Temperaturen oberhalb der Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials, so führt die zu einem von der Bearbeitungskante ausgehendem Bereich, in welchem das die Carbonfasern umgebende Matrixmaterial verdampft wurde. Dieser Bereich wird im Folgenden als Matrixverdampfungszone (MVZ) bezeichnet. Anschließend folgt ein Bereich, in dem die Temperatur der Carbonfasern die Zersetzungstemperatur des Matrixmaterials überschreitet. Das Matrixmaterial verbleibt im Verbund, wird allerdings geschädigt. Der Zusammenhalt des Verbunds ist nicht mehr gegeben. Dieser Bereich wird im Folgenden als Matrixzersetzungszone (MZZ) bezeichnet. Für thermoplastische Matrixmaterialien schließt sich ein dritter Bereich an, in welchem die Schmelztemperatur überschritten wird. In diesem Bereich ist hauptsächlich das Auftreten von Poren im Matrixmaterial zu beobachten.

2.4.1 Messung der Ausdehnung der Matrixverdampfungszone (MVZ)

Aufgrund des inhomogenen Aufbaus Carbonfaser verstärkter Kunststoffe ist bereits die Vermessung der Matrixverdampfungszone keine triviale Aufgabe. In der Literatur wird die Ausdehnung der MVZ meistens im Querschliff als Mittelwert über die gesamte Nut- bzw. Schnitttiefe gemessen oder an der Oberfläche des Materials ebenfalls als Mittelwert mehrerer Einzelmessungen [46], [47], [48], [49]. In Bild 2.3 sind einige gängige Messmethoden schematisch dargestellt. Dabei wird die Ausdehnung der MVZ immer ausgehend von der Nutwand senkrecht zu dieser gemessen.

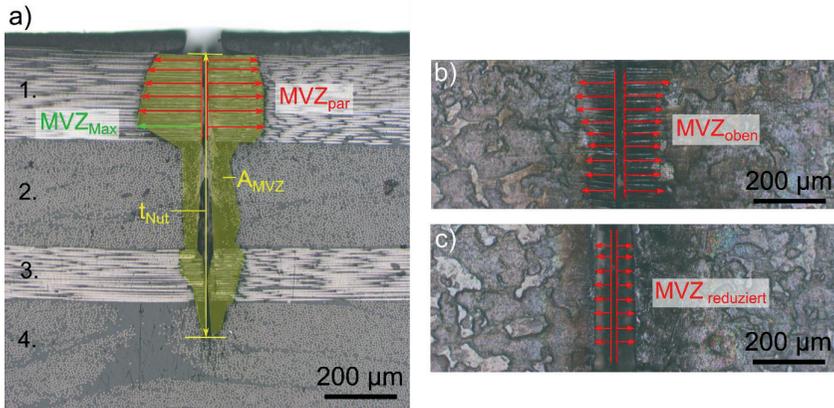


Bild 2.3: a) Eine Nut in CFK ist im Querschliff zu sehen. Drei unterschiedliche Methoden der Messung der Ausdehnung der MVZ sind im Bild schematisch dargestellt, siehe Text. b) Aufnahme einer CFK Oberfläche mit durch Laserabtrag erzeugter Nut. Die Methode der Messung der Ausdehnung der MVZ an der Oberfläche ist skizziert. c) Es ist dieselbe Nut wie in Bild b dargestellt, allerdings ist an dieser Stelle die Matrixschicht an der Oberfläche des Materials ca. 70 µm dick, wodurch sich die Ausdehnung der MVZ reduziert.

In Bild 2.3a ist ein Querschliff durch ein CFK Werkstück mit bidirektionaler Ausrichtung der Carbonfaserlagen dargestellt. Mit dem Laserstrahl wurde eine Nut erzeugt. Die dabei entstandene MVZ ist gelb eingefärbt, wobei ihre Ausdehnung abhängig von der Orientierung der Carbonfasern ist. Typischerweise ist sie maximal in Richtung der Carbonfasern. Im unteren Bereich der Nut (nahe des Nutgrunds) hat die MVZ noch nicht ihre maximale Ausdehnung erreicht. Aufgrund dessen ist die MVZ in diesem Bereich auch in Richtung der Carbonfasern kleiner als in weiter oben gelegenen Bereichen der Nut. An der Materialoberfläche kann eine Vergrößerung der Ausdehnung der MVZ beobachtet werden, falls die oberflächliche Matrixschicht nicht zu dick ist, wie es im Bild 2.3a dargestellten Beispiel der Fall ist. Im Querschliff kann die Ausdehnung der MVZ auf drei verschiedene Weisen bestimmt werden:

- **Mittelwertbildung:** Die Ausdehnung der MVZ wird über die gesamte Nuttiefe an mehreren Stellen unabhängig von der Ausrichtung der Carbonfasern gemessen. Anschließend wird ein Mittelwert gebildet. Alternativ kann die MVZ als Fläche A_{MVZ} vermessen und durch die Tiefe der Nut t_{Nut} dividiert werden:

$$MVZ_{av} = \frac{A_{MVZ}}{t_{Nut}} \quad (2.1)$$

Im in Bild 2.3a dargestellten Beispiel ist die Fläche der MVZ gelb hervorgehoben und die Nuttiefe t_{Nut} eingezeichnet. Es ergibt sich mit Gl. (2.1) eine Ausdehnung der MVZ von $MVZ_{av}=104 \mu\text{m}$. Vorteil dieser Methode ist ihre eindeu-

tige Definition. Nachteilig ist die starke Abhängigkeit der Messergebnisse vom Lagenaufbau und von Unregelmäßigkeiten im Material. Dies erschwert einen Vergleich der Messwerte innerhalb einer Versuchsreihe und insbesondere mit Literaturwerten.

- **Messung des Maximalwerts:** Bei dieser Methode wird der Maximalwert der Ausdehnung der MVZ angegeben. Die maximale Ausdehnung der MVZ beträgt im in Bild 2.3a dargestellten Beispiel $MVZ_{\text{Max}}=182 \mu\text{m}$. Vorteil dieser Methode ist ihre eindeutige Definition. Nachteilig ist die Abhängigkeit des Messergebnisses vom Lagenaufbau, Unregelmäßigkeiten wie dem Abbrennen des Matrixmaterials an der Oberfläche oder lokalen Matrixanhäufungen im Material. Ein oberflächennahes Abbrennen des Matrixmaterials führt dort zu einer großen Ausdehnung der MVZ. Lokale Matrixanhäufungen können zu einer örtlich begrenzten, überproportionalen Ausdehnung der MVZ führen. Die Reproduzierbarkeit der Messwerte ist somit nur bedingt gegeben.
- **Selektive Messung:** Diese Messmethode berücksichtigt den Lagenaufbau des Materials sowie prozessbedingte Unregelmäßigkeiten in der Ausdehnung der MVZ. Die Ausdehnung der MVZ wird in Richtung der Carbonfasern vermessen, da in dieser aufgrund der thermischen Eigenschaften der Verbundkomponenten die maximale Ausdehnung der MVZ zu erwarten ist. Im in Bild 2.3a dargestellten Beispiel kommen somit die zweite und vierte Carbonfaserlage nicht für eine Vermessung der Ausdehnung der MVZ in Frage. Ausgeschlossen von der Messung werden ebenfalls die MVZ im Bereich des Nutgrunds sowie die MVZ in den oberen 10% der Nut. Im Bereich des Nutgrunds, hier in der dritten und vierten Carbonfaserlage, hat die MVZ häufig noch nicht ihre volle Ausdehnung. Die oberen 10% der Nut werden für die Messung der Ausdehnung der MVZ ebenfalls nicht berücksichtigt, da in diesem Bereich entweder, wie in Bild 2.3a zu sehen, eine dicke Matrixschicht vorhanden ist oder die MVZ aufgrund oberflächennaher Effekte vergrößert ist. Zu diesen oberflächennahen Effekten zählt zum Beispiel ein zusätzlicher Wärmeeintrag aufgrund eines gaußförmigen Strahlprofils oder ein oberflächennahes Verbrennen der Matrix. Im in Bild 2.3a dargestellten Beispiel kommt somit nur die erste Carbonfaserlage für eine Vermessung der Ausdehnung der MVZ in Frage. Die Ausdehnung der MVZ wird zu beiden Seiten der Nut an mehreren Positionen vermessen und anschließend ein Mittelwert gebildet. Dieser ist für das in Bild 2.3a dargestellte Beispiel $MVZ_{\text{par}}=162 \mu\text{m}$. Vorteile dieser Messmethode sind die Unabhängigkeit des Messergebnisses von Unregelmäßigkeiten im Material und Prozess sowie eine einfache Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Modellrechnungen. Nachteilig ist die relativ komplexe Definition der Messmethode.

Zusätzlich zu der Vermessung der Ausdehnung der MVZ im Querschliff kann die Ausdehnung der MVZ auch mit Hilfe von Mikroskopaufnahmen der CFK Oberfläche bestimmt werden. In Bild 2.3b ist eine Aufnahme der Oberfläche der in Bild 2.3a im Querschliff gezeigten Nut zu sehen. Es steht somit noch eine weitere Methode zur Vermessung der Ausdehnung der MVZ zur Verfügung:

- **Messung an der Oberfläche:** Bei dieser Messmethode werden zur Vermessung der Ausdehnung der MVZ Aufnahmen der Oberfläche, wie in Bild 2.3b zu sehen, verwendet. Die Ausdehnung der MVZ wird an mehreren Positionen links und rechts der Nut ausgehend vom Nutrand vermessen und ein Mittelwert gebildet. Für die in Bild 2.3b dargestellte Nut ergibt sich eine Ausdehnung der MVZ von $MVZ_{\text{oben}}=112 \mu\text{m}$. Vorteile dieser Messmethode sind die einfache Handhabbarkeit, da kein Querschliff der Probe erzeugt werden muss, sowie die eindeutige Definition. Nachteilig ist die Abhängigkeit des Messergebnisses von oberflächennahen Effekten wie dem Verbrennen des Matrixmaterials und der Dicke der obersten Matrixschicht. Diese kann bis zu $100 \mu\text{m}$ dick sein. Bei einer dicken Matrixschicht an der Oberfläche unterrepräsentiert die an der Oberfläche sichtbare Ausdehnung der MVZ die Ausdehnung der MVZ im Material. Beispielhaft ist hierfür in Bild 2.3c eine Aufnahme der Oberfläche mit dicker Matrixschicht zu sehen. Wird die MVZ an dieser Stelle vermessen, ergibt sich für die Ausdehnung der MVZ ein um 60% geringerer Wert von $MVZ_{\text{reduziert}}=45 \mu\text{m}$. Allerdings sind beide Messwerte kleiner als die mit Hilfe der Methode „Selektive Messung“ bestimmte Ausdehnung der MVZ, obwohl in allen drei Fällen die Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern vermessen wurde. Vermutlich war die Matrixschicht auch an der in Bild 2.3b gezeigten Stelle zu dick.

Wird mit stationärem Laserstrahl bearbeitet, nimmt die MVZ eine elliptische Form mit der Bohrung im Zentrum der MVZ an. Eine Vermessung der Ausdehnung der MVZ an der Materialoberfläche bietet sich in diesem Fall an, da die Erstellung von Querschliffen der Bohrungen sehr schwierig und aufwändig ist. Die Ausdehnung der MVZ wird hierbei entlang der Hauptachse der Ellipse, also in Richtung ihrer größten Ausdehnung, vermessen. Gemessen wird dabei links und rechts der Bohrung ausgehend vom Bohrlochrand in Richtung der Carbonfasern. Pro Bohrung erhält man somit zwei Messwerte, durch Mittelwertbildung kann eine gemittelte Ausdehnung der MVZ angegeben werden.

Die große Schwankung der mit Hilfe der verschiedenen Messmethoden erhaltenen Ausdehnungen der MVZ, von $MVZ_{\text{reduziert}}=45 \mu\text{m}$ bis $MVZ_{\text{Max}}=182 \mu\text{m}$, verdeutlicht die Schwierigkeit der Vermessung der Ausdehnung der MVZ aufgrund der Inhomogenität des Materials. Eine genaue Definition der gewählten Messmethode beim Bericht

wissenschaftlicher Ergebnisse ist zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit somit unumgänglich.

2.4.2 Ausdehnung der thermischen Schädigung beim Laserschneiden von CFK

In [41] wird ein theoretisches Modell vorgestellt, mit welchem beim Laserabtrag von CFK die minimal mögliche Ausdehnung der MVZ und der MZZ als Funktion der absorbierten Intensität berechnet werden kann. Dabei wird abhängig von der absorbierten Intensität der Verlauf der Isothermen der Verdampfungs- und Zersetzungstemperatur des Matrixmaterials entlang der Carbonfasern berechnet. Der maximale Abstand dieser Isothermen zur Bearbeitungszone definiert den minimal erreichbaren Matrixschaden, welcher durch Wärmeleitung entlang der Carbonfasern verursacht wird. In Bild 2.4 ist für beide Schädigungstemperaturen deren minimale Reichweite als Funktion der absorbierten Intensität aufgetragen. Die durchgängige Linie markiert den Abstand der Isothermen der Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials zur Bearbeitungszone, die gestrichelte Linie den Abstand der Isothermen der Zersetzungstemperatur des Matrixmaterials zur Bearbeitungszone. In der Literatur zu findende, experimentell ermittelte Ausdehnungen der MVZ sind als Datenpunkte im Diagramm dargestellt. Die Farbe der Punkte kennzeichnet dabei die Betriebsart des verwendeten Lasersystems: Orange entspricht Dauerstrich- (cw) bis μ s-Pulsbetrieb, violett entspricht ns-Pulsbetrieb, grün entspricht ps- bis fs-Pulsbetrieb. Dabei wird die theoretisch berechnete minimale Ausdehnung der MVZ nur in Ausnahmen unterschritten. Hauptsächlich in [50] werden Werte berichtet, welche deutlich unterhalb des theoretischen Minimums liegen. Dabei wurden nur sehr flache Nuten erzeugt, bei denen der Energieeintrag zum Überwinden der Verdampfungsenthalpie des die Carbonfasern umgebenden Matrixmaterials vermutlich zu gering war. Die im Querschliff gemessenen Ausdehnungen der MVZ sind in diesem Fall mit großer Wahrscheinlichkeit kleiner als der tatsächliche Abstand der Isothermen der Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials zur Bearbeitungszone.

Bild 2.4 zeigt, dass zum Erreichen einer MVZ mit einer Ausdehnung, die kleiner ist als $10\ \mu\text{m}$, hohe absorbierte Intensitäten von größer $10^8\ \text{W}/\text{cm}^2$ notwendig sind. Im Bereich niedriger Intensitäten, typischerweise bei der Bearbeitung mit einem Dauerstrichlaser oder mit ms- bzw. μ s-Pulsen, werden im Experiment Ausdehnungen der MVZ erzielt, welche nahe des theoretischen Minimums liegen. Dabei werden minimal thermische Schädigungen von ungefähr $100\ \mu\text{m}$ erreicht, oftmals allerdings auch Ausdehnungen der MVZ von mehreren Millimetern. Für hohe Intensitäten bei der Ultrakurzpuls (UKP) Bearbeitung mit ns-, ps- und fs-Pulsen können Schädigungen kleiner als $10\ \mu\text{m}$ erreicht werden, was in etwa dem Faserdurchmesser entspricht. Das theoretische Minimum wird nicht erreicht, wobei Ausdehnungen der MVZ kleiner als ein Carbonfaserdurchmesser nur schwer zu vermessen sind. Allerdings können auch bei

der UKP-Bearbeitung geschädigte Bereiche von mehreren 100 μm beobachtet werden. Die Ursache hierfür ist in der Literatur noch nicht ausreichend geklärt. Insbesondere wenn man die UKP Bearbeitung zu höheren mittleren Leistungen skalieren will, ist ein hinreichendes Prozessverständnis notwendig, um die thermische Schädigung zu minimieren.

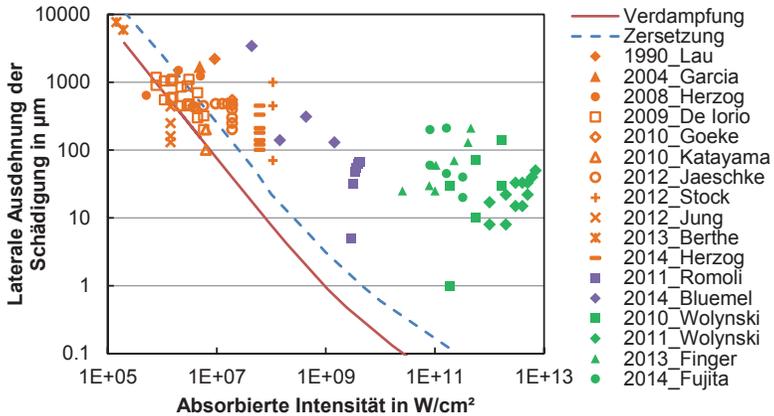


Bild 2.4: Die Linien markieren die minimal mögliche Schädigungstiefe als Funktion der absorbierten Intensität [41]. Die durchgängige Linie markiert den Abstand der Isothermen der Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials zur Bearbeitungszone, die gestrichelte den der Isothermen der Zersetzungstemperatur. Die Punkte repräsentieren experimentelle Daten aus der Literatur [47], [51], [52], [53], [54], [55], [46], [56], [50], [57], [58], [59], [60], [61], [49], [62], [63].

2.4.3 Erzielbare Schnittgeschwindigkeit beim Laserschneiden von CFK

Eine hohe mittlere Laserleistung ist hinsichtlich der beim Laserschneiden erzielbaren Schnittgeschwindigkeit eine weitere wichtige Prozessgröße. Eine Abschätzung der Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung kann über eine Energiebilanz unter Berücksichtigung der thermischen Stoffeigenschaften der Verbundkomponenten erfolgen [17]. Die Schnittgeschwindigkeit v_{cut} ist gegeben durch

$$v_{\text{cut}} = \frac{\eta_P \cdot P}{[r_C \cdot E_{VC} + r_M \cdot E_{VM}] \cdot d_{CFK} \cdot b_{\text{Spalt}}}, \quad (2.2)$$

wobei η_P der Prozesswirkungsgrad, also das Verhältnis von genutzter zu eingestrahelter Laserleistung, P die mittlere Laserleistung, r_C der prozentuelle Volumenanteil der Carbonfasern im CFK, r_M der prozentuelle Volumenanteil des Matrixmaterials im CFK, d_{CFK} die Dicke des Werkstücks und b_{Spalt} die Schnittspaltbreite ist. Der Prozesswirkungsgrad $\eta_P = \eta_{\text{th}} \cdot \eta_A$ setzt sich aus dem thermischen Wirkungsgrad η_{th} und dem Einkoppelgrad η_A zusammen [17]. Die volumenspezifischen Energien E_{VC} bzw. E_{VM} ge-

ben an, wieviel Energie benötigt wird um ein gewisses Volumen Carbonfasern bzw. Matrixmaterial zu verdampfen. Zur Abschätzung der Schnittgeschwindigkeit werden hier ein auf Erfahrungswerten basierender Prozesswirkungsgrad von 33%, eine Dicke des Werkstücks von 2 mm, eine Breite des Schnittspalts von 0,2 mm und ein Faservolumenanteil von 60% angenommen. Die volumenspezifische Energien E_{VC} bzw. E_{VM} sind abhängig von den jeweiligen Materialeigenschaften. Allgemein lässt sich die zum Verdampfen eines gewissen Volumens benötigte Energie E_V berechnen mit

$$E_V = E_{heiz} + E_{sub} = \rho \cdot c_p \cdot (T_V - T_0) + \rho \cdot H_V, \quad (2.3)$$

wobei E_{heiz} die Energie darstellt, welche benötigt wird, um ein gewisses Volumen eines Materials auf dessen Verdampfungstemperatur zu erhitzen. Die volumenspezifische Energie E_{sub} ist die Energie, welche benötigt wird, um das auf Verdampfungstemperatur befindliche Volumen in den gasförmigen Aggregatzustand zu überführen. Des Weiteren finden sich in Gl. (2.3) die Dichte ρ des Materials, die spezifische Wärmekapazität c_p , die Verdampfungstemperatur T_V , die Umgebungstemperatur T_0 und die spezifische Verdampfungsenthalpie H_V . Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass weder die Carbonfasern noch das Matrixmaterial, solange es sich dabei um einen Duroplasten handelt, eine schmelzflüssige Phase aufweisen. Dementsprechend sind in Gl. (2.3) auch keine Terme vorhanden, welche die zum Schmelzen des Materials benötigte Energie berücksichtigen.

In Bild 2.5 ist die zum Schneiden von 2 mm dickem CFK abgeschätzte Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung als durchgängige Linie dargestellt. Die im Diagramm zu sehenden Datenpunkte repräsentieren experimentell ermittelte Schnittgeschwindigkeiten aus der Literatur. Wie in Bild 2.4 korreliert die Farbe der Punkte mit der Betriebsart des Lasersystems. Hauptsächlich beim Laserschneiden mit Dauerstrichlasern werden Schnittgeschwindigkeiten erreicht, welche deutlich über der abgeschätzten Schnittgeschwindigkeit liegen. Die Ursachen hierfür sind noch nicht ausreichend untersucht. Es kann aber von einem erhöhten Prozesswirkungsgrad ausgegangen werden, möglicherweise aufgrund einem teilweisen Entfernen des Materials in fester Form, wodurch nicht das gesamte, abgetragene Material verdampft wird und somit weniger Energie aufgewendet werden muss. In [64] wird über Schnittgeschwindigkeiten bei der UKP Bearbeitung berichtet, welche ebenfalls deutlich über der Abschätzung liegt. In diesem Fall wurde eine angepasste Prozessstrategie zur Steigerung des Prozesswirkungsgrads verwendet, bei der die Schnittfugenbreite durch mehrere parallele Abtragsspuren verbreitert und das Material dazwischen möglicherweise in fester Form entfernt wurde. Allerdings begrenzt die verfügbare mittlere Leistung heutiger kommerziell erhältlicher UKP Lasersysteme, welche im Bereich einiger hundert Watt liegt, die erzielbaren Schnittgeschwindigkeiten. Um Schnittgeschwin-

digkeiten über 1 m/min für 2 mm dickes CFK zu erreichen, sind mittlere Laserleistungen von über 1 kW erforderlich.

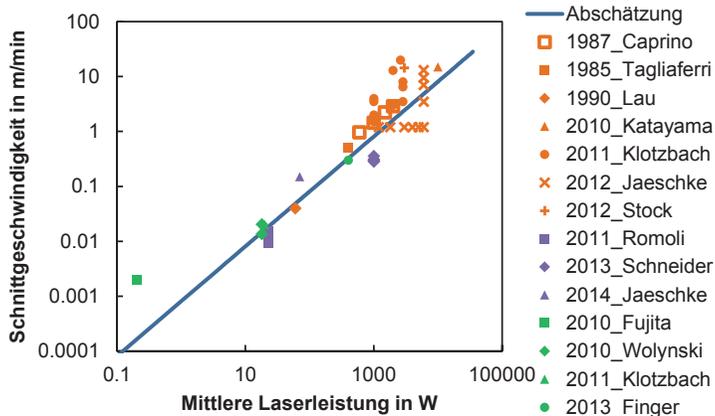


Bild 2.5: Schnittgeschwindigkeit von 2 mm dickem CFK aufgetragen über die mittlere Laserleistung. Die durchgezogene Linie stellt dabei eine Abschätzung dar. Angenommen wurden ein Prozesswirkungsgrad von 33%, eine Schnittspaltbreite von 200 μm und eine benötigte volumenspezifische Energie zur Verdampfung des Materials von 55,8 J/mm^3 . Die Punkte repräsentieren experimentelle Daten aus der Literatur zur Schnittgeschwindigkeit von 2 +/-0,2 mm dickem CFK [65], [66], [47], [55], [67], [46], [56], [59], [68], [69], [64], [61], [62].

2.5 Energietransportmechanismen bei der Laserbearbeitung von CFK

Eine Skalierung des gepulsten Bearbeitungsprozesses hin zu höheren mittleren Laserleistungen bei gleichzeitig minimaler thermischer Schädigung ist nur bei hinreichendem Prozessverständnis möglich. Dies erfordert vor allem eine detaillierte Betrachtung der bei der Laserbearbeitung von CFK wirksamen Energietransportmechanismen. Es können zwei Phasen des Energietransports identifiziert werden: Die Phase der Energiedeposition und die Phase der Energiedistribution.

In der Phase der Energiedeposition wird die eingestrahlte optische Energie in das Material eingekoppelt. Dabei kann es bereits zu einer räumlichen Umverteilung der optischen Energie kommen. Aufgrund des runden Querschnitts der Carbonfasern und der Transparenz des Matrixmaterials für Wellenlängen im nahen Infrarot (NIR) und sichtbaren (VIS) Wellenlängenspektrum kann es im Material zur Reflektion von Strahlung senkrecht zur Symmetrieachse der Carbonfasern kommen. Durch Mehrfachreflektionen von Strahlung zwischen den Carbonfasern wird zum einen der Einkoppelgrad erhöht, zum anderen wird eingestrahlte optische Energie auch abseits der eigentlichen Strahlkaustik deponiert.

Die im Material eingekoppelte optische Energie wird zu Beginn der Phase der Energiedistribution in Wärme umgewandelt. Überschreitet die Energiedichte der Laserstrahlung die Abtragschwelle des Materials, kommt es zu dessen Ablation. Ein wesentlicher Anteil der eingekoppelten optischen Energie wird so in kinetische und thermische Energie des verdampften Materials umgewandelt. Es entsteht ein Strom heißer Ablationsprodukte, welcher mit dem die Prozesszone umgebenden Material wechselwirken kann. Zum einen kann es aufgrund der hohen Abströmgeschwindigkeit der Ablationsprodukte zu einer mechanischen Wechselwirkung mit freiliegenden Carbonfasern kommen, zum anderen können die heißen Ablationsprodukte das die Prozesszone umgebende Material nachträglich zusätzlich erwärmen. Die Einkopplung nachfolgender Laserpulse kann durch die entstandenen Ablationsprodukte beeinflusst werden. Ein Teil der eingekoppelten Energie wird als Wärme im Werkstück verbleiben. Diese dient als Aktivierungsenergie für chemische Reaktionen des Kohlenstoffs der Carbonfasern mit Sauerstoff und für das Verbrennen des Matrixmaterials. Die Oxidation des Materials bzw. der Ablationsprodukte kann durch Zufuhr eines Schutzgases wie Stickstoff vermieden werden. Über Wärmeleitung hauptsächlich entlang der Symmetrieachse der Carbonfasern gelangt Wärme in das Volumen des Materials. Eine Besonderheit bei der gepulsten Wärmeeinbringung ist dabei das Auftreten von Wärmeakkumulationseffekten.

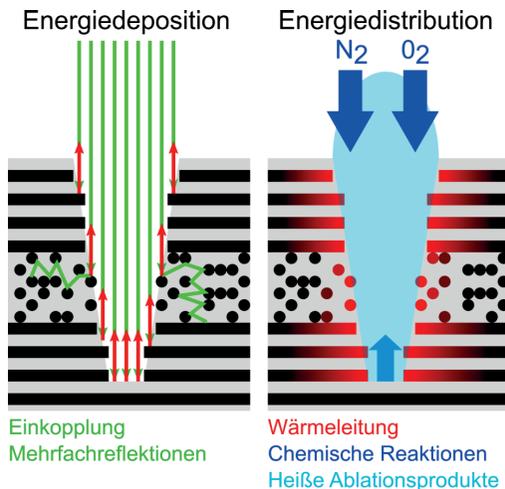


Bild 2.6: In dieser Abhandlung betrachtete Energietransportmechanismen bei der Laserbearbeitung von CFK aufgeteilt in die Phasen Energiedeposition und Energiedistribution.

Um den Laserbearbeitungsprozess von CFK einstellen zu können und nachteilige Auswirkungen der oben stichpunktartig beschriebenen Energietransportmechanismen zu minimieren, müssen diese bekannt sein und quantifiziert werden. Eine schematische

Darstellung der beiden Phasen des Energietransports mit den in dieser Abhandlung betrachteten Transportmechanismen ist in Bild 2.6 dargestellt. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass durchaus noch andere Energietransportmechanismen wirksam sein können wie beispielsweise laserinduzierte Plasmen, welche allerdings außerhalb der Zielsetzung dieser Abhandlung liegen.

3 Deposition optischer Energie in CFK und Carbonfasergelege¹

Die für den Bearbeitungsprozess benötigte Energie wird bei der Laserbearbeitung in Form von Wärme bereitgestellt, welche durch Absorption der auf das Werkstück treffenden elektromagnetischen Energie entsteht [17]. Die Absorption spielt somit bei der Energieeinkopplung eine entscheidende Rolle. Im Fall von CFK muss bei der Betrachtung der Energieeinkopplung die vergleichsweise komplexe Struktur des Materials berücksichtigt werden.

3.1 Einkopplung von Laserstrahlung in Carbonfasern und CFK

3.1.1 Berechnung des Einkoppelgrads von Carbonfasern und CFK

Bei Betrachtung der Einkopplung von Laserstrahlung in Carbonfasergelege oder CFK ist stets die Geometrie der Carbonfasern zu berücksichtigen. Als Folge des nahezu kreisrunden Querschnitts der Carbonfasern wird entlang ihres bestrahlten Umfangs Strahlung mit allen Einfallswinkeln zwischen -90° und $+90^\circ$ absorbiert. Der Durchmesser der Carbonfasern ist mit typischerweise $8\ \mu\text{m}$ kleiner als der Fokusedurchmesser des Laserstrahls welcher meist wenige $10\ \mu\text{m}$ bis zu mehreren $100\ \mu\text{m}$ groß ist. Des Weiteren ist die Kristallstruktur der Carbonfasern zu berücksichtigen. Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, sind Carbonfasern aus turbostratischem Kohlenstoff angeordnet in parallelen Graphenschichten aufgebaut. Typischerweise sind die Graphenschichten bei PAN basierten Carbonfasern umlaufend angeordnet, während sie bei Pech basierten Carbonfasern radial angeordnet sind. Im Folgenden werden diese beiden Extremfälle betrachtet, wie schon anhand von Bild 2.1 besprochen sind auch Mischformen zu finden.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Kristallstruktur von turbostratischem Kohlenstoff und Graphit werden im Folgenden die optischen Eigenschaften von turbostratischem Kohlenstoff durch die in der Literatur bekannten optischen Eigenschaften von Graphit angenähert. Graphit ist aufgrund seines geschichteten Aufbaus ein doppelbrechender, uniaxialer Kristall [70]. Die optische Achse c , entlang derer jede Polarisationskomponente des einfallenden Strahls den gleichen Brechungsindex erfährt, steht senkrecht auf der Basisebene der Graphenschichten [70]. Das elektrische Feld des ordentlichen Strahls schwingt senkrecht zur optischen Achse und erfährt den komplexen Brechungsindex N_o . Für den komplexen Brechungsindex $N_o = n_o - i \cdot k_o$ des ordentlichen Strahls wurden die in [70] aufgeführten, experimentell ermittelten Daten verwendet. Das elektrische Feld des außerordentlichen Strahls schwingt parallel zur optischen

¹ Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren in Teilen auf den vom Autor mitverfassten Veröffentlichungen [106], [107] und [108].

Achse und erfährt den komplexen Brechungsindex N_e [70]. Der komplexe Brechungsindex $N_e = n_e - i \cdot k_e$ des außerordentlichen Strahls wurde mit Hilfe des in [71] beschriebenen Modells bestimmt. Die Werte für n_o und k_o bzw. n_e und k_e sind in Bild 3.1a als Funktion der Wellenlänge dargestellt. In Bild 3.1b ist die Absorptionslänge des ordentlichen und außerordentlichen Strahls in Graphit als Funktion der Wellenlänge zu sehen. Für den ordentlichen Strahl ist die Absorptionslänge für Wellenlängen, welche für die Lasermaterialbearbeitung relevant sind, im Bereich von 10 nm. Die Transmission durch eine Carbonfaser kann für diesen Fall vernachlässigt werden. Für den außerordentlichen Strahl werden für lange Wellenlängen Absorptionslängen von mehreren Mikrometern erreicht. Die Transmission ist hier nicht mehr vernachlässigbar.

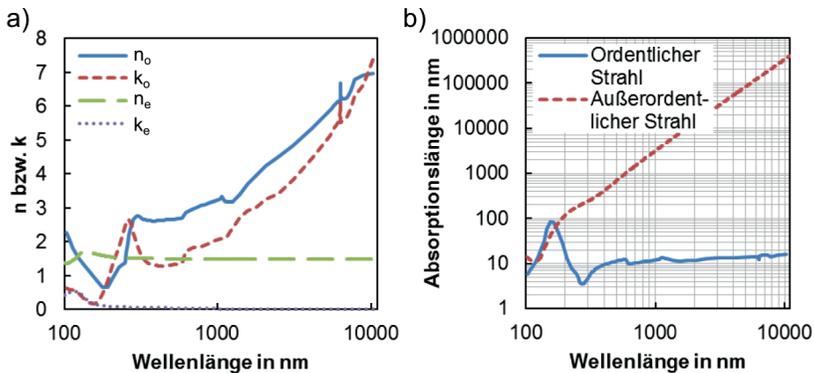


Bild 3.1: a) Werte für n und k des komplexen Brechungsindex für den ordentlichen und außerordentlichen Strahl [70], [71]. b) Absorptionslänge von Laserstrahlung in Graphit für den ordentlichen und außerordentlichen Strahl als Funktion der Wellenlänge.

Möchte man die Einkopplung von Laserstrahlung in Carbonfasern untersuchen, muss sowohl der nahezu kreisförmige Querschnitt der Carbonfasern als auch die Ausrichtung der Graphenschichten in den Fasern berücksichtigt werden. Die beiden betrachteten Fälle umlaufend und radial angeordneter Graphenschichten sind in Bild 3.2 dargestellt. Da der Durchmesser der Carbonfasern d_{CF} kleiner als der Fokusedurchmesser d_f angenommen wird, wird Strahlung entlang des dem Strahl zugewandten Umfangs der Carbonfaser für alle Einfallswinkel gleichzeitig absorbiert. Die einfallende Strahlung wird als Bündel paralleler Einzelstrahlen angenommen. Der Einfallsvektor eines Einzelstrahls ist \mathbf{v}_e , während der reflektierte Strahl den Richtungsvektor \mathbf{v}_r hat. Die Oberflächennormale ist \mathbf{n}_0 und die senkrecht auf den Graphenschichten stehende optische Achse ist \mathbf{c} . Die Einfallsebene wird von den Vektoren \mathbf{n}_0 und \mathbf{v}_e aufgespannt. Der Einfallswinkel, welcher gleich dem Ausfallswinkel ist, ist θ . Es sei explizit darauf hingewiesen, dass eine Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung senkrecht (parallel) zur Einfallsebene parallel (senkrecht) zur Symmetrieachse der Carbonfaserachse ist.

Im Fall der in Bild 3.2a skizzierten umlaufenden, in sich geschlossenen Graphenschichten sind diese parallel zur Oberfläche angeordnet. Bei senkrechtem Strahleinfall beträgt die Absorptionslänge in diesem Fall nur wenige Nanometer, da dieser Fall dem des ordentlichen Strahls entspricht. Der transmittierte Anteil der Strahlung kann vernachlässigt werden. Die für den außerordentlichen Strahl nicht zu vernachlässigende Transmission ist besonders bei zur Oberfläche senkrechter Ausrichtung der Graphenschichten von Relevanz. Im Fall der in Bild 3.2b skizzierten radial angeordneten Graphenschichten wird Strahlung mit einer Polarisation parallel zur optischen Achse c nicht an der Oberfläche der Fasern absorbiert. Die Absorptionslänge kann für lange Wellenlängen im Bereich mehrerer Mikrometer liegen, da dieser Fall dem des außerordentlichen Strahls entspricht. Im Gegensatz zu Graphit ändert sich entlang des Ausbreitungspaths des Lichtstrahls in den Carbonfasern allerdings die Ausrichtung der Graphenschichten relativ zum Lichtstrahl. Für $y=0$ sind die Graphenschichten wieder senkrecht zum einfallenden Laserstrahl ausgerichtet und die Absorptionslänge beträgt hier wieder wenige Nanometer. Die Strahlung wird also in der Tiefe der Carbonfaser absorbiert und nicht an der Oberfläche. Somit wird in beiden hier angesprochenen Fällen die in die Faser eingekoppelte Strahlung vollständig absorbiert und der Transmissionsgrad ist $T=0$. Aufgrund der Energieerhaltung $1=A+R+T$ kann somit der lokale Absorptionsgrad an der Faseroberfläche nach $A=1-R=1-r^2$ aus dem lokalen Reflektionsgrad R berechnet werden.

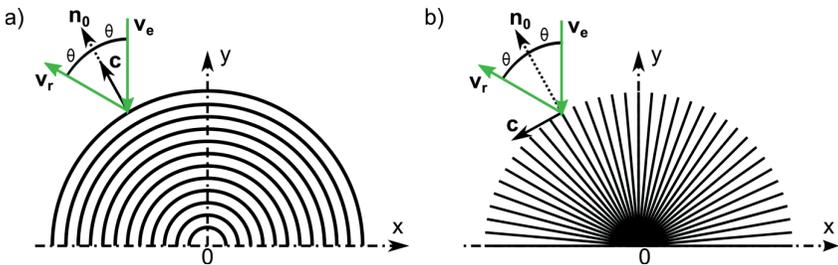


Bild 3.2: Skizzierte Querschnitte durch Carbonfasern mit a) umlaufend und b) radial angeordneten Graphenschichten. Dabei ist θ der Einfallswinkel, \mathbf{n}_0 der Vektor der Oberflächennormalen, \mathbf{c} der Vektor der optischen Achse, \mathbf{v}_e der Vektor eines einfallenden Laserstrahl und \mathbf{v}_r der Vektor eines reflektierten Laserstrahls.

Bei der Reflektionsamplitude r wird in der Literatur nach Konvention die Polarisation der elektromagnetischen Strahlung relativ zur Einfallsebene angegeben. Im Folgenden erfolgt die Nomenklatur jedoch relativ zur Symmetrieachse der Carbonfaser (s_F für senkrecht zur Carbonfaserachse, p_F für parallel zur Carbonfaserachse). Zur Berechnung der Reflektionsamplituden r_{sF} und r_{pF} werden die von J. Lekner in [72] zur Berechnung der Reflexion an uniaxialen Kristallen hergeleiteten Gleichungen verwendet.

Für den Fall umlaufend orientierter Graphenschichten gilt nach Vereinfachung für die Reflektionsamplitude r_{sF}

$$r_{sF} = \frac{n_1 \sqrt{N_e^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} - N_o N_e \cos \theta}{n_1 \sqrt{N_e^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} + N_o N_e \cos \theta} \quad (3.1)$$

und für die Reflektionsamplitude r_{pF}

$$r_{pF} = \frac{n_1 \cos \theta - \sqrt{N_o^2 - n_1^2 \sin^2 \theta}}{n_1 \cos \theta + \sqrt{N_o^2 - n_1^2 \sin^2 \theta}}, \quad (3.2)$$

wobei n_1 der Brechungsindex des Umgebungsmediums ist. Für den Fall radial orientierter Graphenschichten gilt nach Vereinfachung für die Reflektionsamplitude r_{sF}

$$r_{sF} = \frac{n_1 \sqrt{N_o^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} - N_o N_e \cos \theta}{n_1 \sqrt{N_o^2 - n_1^2 \sin^2 \theta} + N_o N_e \cos \theta}. \quad (3.3)$$

Die Reflektionsamplitude r_{pF} ist für beide betrachteten Fälle gleich und kann somit auch für radial angeordnete Graphenschichten mit Gl. (3.2) berechnet werden. Mit Hilfe dieser Gleichungen kann der lokale Absorptionsgrad an der Oberfläche einer einzelnen Carbonfaser berechnet werden. Dies führt für eine Wellenlänge von 515 nm zu den in Bild 3.3 dargestellten Verteilungen entlang der x-Koordinate. Für eine Polarisation parallel zur Carbonfaserachse wird die höchste Absorption in der Mitte ($x = 0 \mu\text{m}$) der dem einfallenden Strahl zugewandten Seite der Carbonfaser erreicht. Zu den Rändern hin fällt der Absorptionsgrad ab. Im Gegensatz dazu wird für eine Polarisation senkrecht zur Carbonfaserachse die höchste Absorption an den Rändern der bestrahlten Carbonfasern erreicht.

Für den Fall umlaufend orientierter Graphenschichten wird in der Mitte der dem einfallenden Strahl zugewandten Seite der Carbonfaser für beide Polarisationen der gleiche Absorptionsgrad erreicht. Bei einer radialen Anordnung der Graphenschichten unterscheidet sich der Absorptionsgrad in der Mitte der bestrahlten Oberfläche der Carbonfaser für die beiden Orientierungen der Polarisation. Für eine Polarisation senkrecht zur Carbonfaserachse wird bei $x = 0 \mu\text{m}$ ein deutlich größerer Absorptionsgrad erreicht als für eine parallele Orientierung der Polarisation. Zu den Rändern der Carbonfasern hin nimmt der Absorptionsgrad zu und erreicht nahe dem Rand ein Maximum. Für eine Polarisation mit paralleler Orientierung relativ zu den Carbonfasern wird dieselbe Verteilung des lokalen Absorptionsgrads erreicht wie im Fall der umlaufend orientierten Graphenschichten.

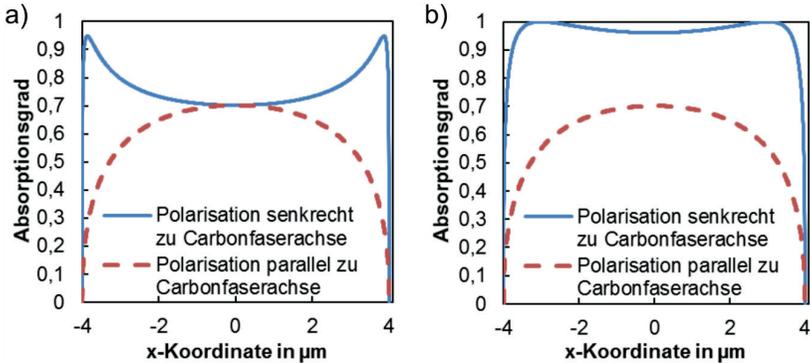


Bild 3.3: Lokaler Absorptionsgrad an der Oberfläche einer einzelnen Carbonfasern mit einem Radius von $4\ \mu\text{m}$ für senkrecht und parallel zur Carbonfaserachse polarisierte Strahlung der Wellenlänge $515\ \text{nm}$. a) Umlaufend orientierte Graphenschichten, b) radial orientierte Graphenschichten.

Der gemittelte Absorptionsgrad in eine einzelne Carbonfaser wird durch Mittelung des lokalen Absorptionsgrads über die gesamte bestrahlte Oberfläche der Carbonfaser ermittelt. Das Ergebnis dieser Mittelung ist als Funktion der Wellenlänge in Bild 3.4a für den Fall umlaufend angeordneter Graphenschichten und in Bild 3.4b für den Fall radial angeordneter Graphenschichten zu sehen.

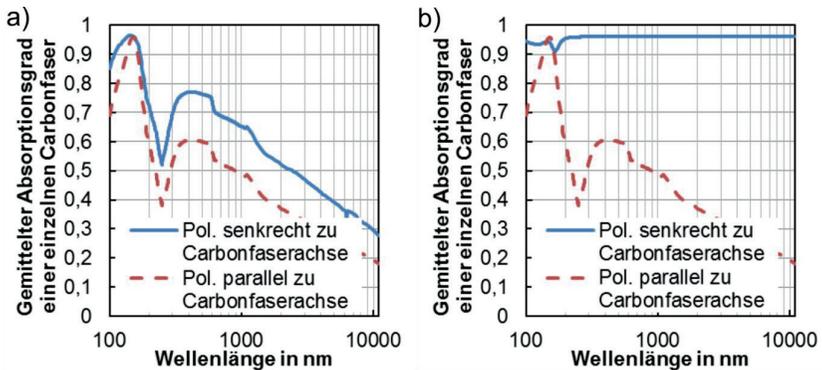


Bild 3.4: Gemittelter Absorptionsgrad in eine einzelne Carbonfaser als Funktion der Wellenlänge. Das umgebende Medium ist Luft. a) Umlaufend orientierte Graphenschichten, b) radial orientierte Graphenschichten.

Die für die Materialbearbeitung relevante Größe ist der Einkoppelgrad der Laserstrahlung in ein Carbonfasergelege unter Berücksichtigung von Mehrfachreflektionen zwischen den Carbonfasern. Zur Berechnung der Einkopplung in mehrere Carbonfasern mittels Raytracing wurde hier die in Bild 3.5 gezeigte Modellanordnung von drei Car-

bonfasern verwendet. Der Radius der Carbonfasern ist $r_F=4\ \mu\text{m}$. Der Abstand d_A zwischen den Carbonfasern beträgt $1,152\ \mu\text{m}$. Dies resultiert in einem Faservolumenanteil von 60%, was ein typischer Wert für CFK ist. Aufgrund der Symmetrie der Anordnung wurden ausschließlich einfallende Strahlen zwischen $x = 0$ und $x = r_F + d_A/2$ berücksichtigt. Die Einkopplung in das Carbonfasergelege wurde als Mittelung der Einkopplung einer großen Zahl an äquidistanten Strahlen berechnet. Für jede Reflektion eines Strahls an einer Carbonfaser wurde der absorbierte und reflektierte Anteil berechnet und der Strahl weiter verfolgt. Für Strahlen, welche nach Reflektion an den Carbonfasern weiter in das Material propagieren ($y < 0$), wurde angenommen, dass diese komplett absorbiert werden. Die anderen Strahlen wurden verfolgt bis sie von der angenommenen Werkstückoberfläche in den Halbraum $y > 0$ reflektiert werden. Der so über alle zwischen $x = 0$ und $x = r_F + d_A/2$ einfallende Strahlen gemittelte Einkoppelgrad für ein Carbonfasergelege ist in Bild 3.6 als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Dabei wird wieder zwischen den Fällen umlaufend und radial orientierter Graphenschichten unterschieden.

Für die Materialbearbeitung sind besonders die für Festkörperlaser typischen Wellenlängen zwischen $343\ \text{nm}$ und $1064\ \text{nm}$ und die für CO_2 -Laser typische Wellenlänge von $10,6\ \mu\text{m}$ von Relevanz. Allgemein lässt sich festhalten, dass für Wellenlängen größer als $200\ \text{nm}$ der Einkoppelgrad senkrecht zu den Carbonfaserachsen polarisierter Strahlung stets größer ist als für eine parallel zu den Carbonfaserachsen orientierte Polarisation. Für den Fall umlaufend orientierter Graphenschichten, Bild 3.6a, wird im

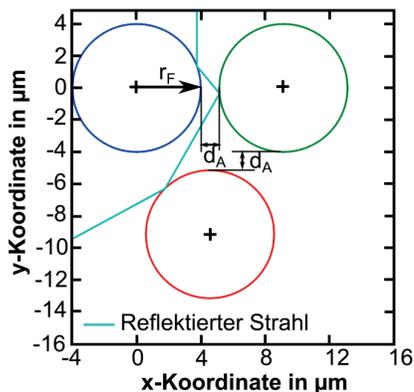


Bild 3.5: Anordnung der Carbonfasern zur Berechnung des Einkoppelgrades in ein Carbonfasergelege. Beispielhaft ist der Strahlweg eines bei $x = 3,764\ \mu\text{m}$ einfallenden Strahls eingezeichnet.

Wellenlängenbereich zwischen $343\ \text{nm}$ und $1064\ \text{nm}$ ein Einkoppelgrad zwischen 82% und 74% für eine Polarisation senkrecht zur Carbonfaserachse und zwischen 76% und 67% für eine Polarisation parallel zur Carbonfaserachse erreicht. Aufgrund des hohen Einkoppelgrades und der mäßigen Variation ist in diesem Wellenlängenbereich keine signifikante Auswirkung der Wellenlänge bzw. der Polarisationsrichtung auf den Prozess zu erwarten. Bei einer Wellenlänge von $10,6\ \mu\text{m}$ sinkt der Einkoppelgrad auf 44% für eine Polarisation senkrecht zur Carbonfaserachse bzw. auf 36% für eine Polarisation parallel zur Carbonfaserachse. Verglichen mit den Einkoppelgraden im Wellenlängenbereich zwischen

343 nm und 1064 nm sinkt der Einkoppelgrad für CO₂-Laserstrahlung um ca. 30%. Da der relative Unterschied zwischen beiden Polarisationszuständen für lange Wellenlängen am größten ist, ist ein Einfluss des Polarisationszustands auf den Bearbeitungsprozess bei langen Wellenlängen wie z.B. 10,6 μm bei CO₂-Lasern am Wahrscheinlichsten. Im Fall radial orientierter Graphenschichten wird für eine parallel zur Carbonfaserachse orientierte Polarisation derselbe Einkoppelgrad erreicht wie im Falle umlaufend orientierter Graphenschichten. Bei senkrecht zur Carbonfaserachse orientierter Polarisation betragen die Einkoppelgrade im gesamten Wellenlängenbereich nahezu 100%. Es sei daran erinnert, dass dies nur für eine idealisierte radiale Anordnung der Graphenschichten zutrifft.

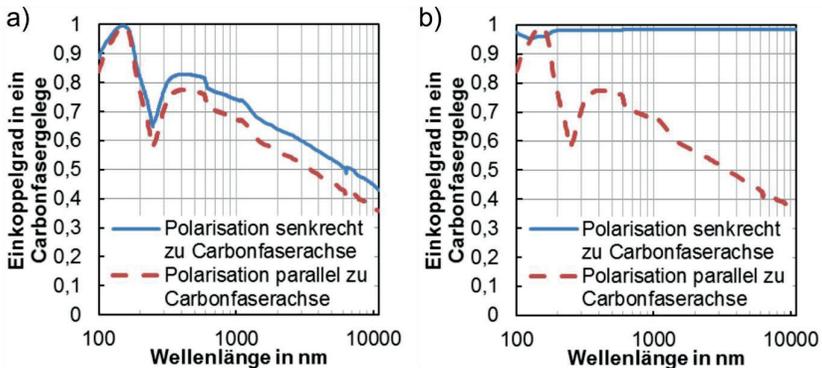


Bild 3.6: Einkoppelgrad von Strahlung in ein Carbonfasergelege als Funktion der Wellenlänge unter Berücksichtigung von Mehrfachreflektionen zwischen den Fasern. Das umgebende Medium ist Luft. a) Umlaufend orientierte Graphenschichten, b) radial orientierte Graphenschichten.

Für CFK ist das die Carbonfasern umgebende Medium nicht mehr Luft, sondern das verwendete Matrixmaterial. Für die folgenden Betrachtungen wird als Matrixmaterial das Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135 angenommen. Das zusätzliche Matrixmaterial hat zwei Auswirkungen auf die Einkopplung von Strahlung in das Material. Zum einen gibt es aufgrund des Brechungsindexunterschieds eine zusätzliche Reflektion der Strahlung an der Grenzfläche zwischen Luft und Matrixmaterial. Mit den bekannten optischen Eigenschaften von RIMR 135 ($n_M = 1,55$) berechnet sich der reflektierte Anteil der Strahlung an dieser Grenzfläche im betrachteten Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1400 nm zu 4,65 %. Zum anderen führt der höhere Brechungsindex des Matrixmaterials verglichen mit Luft zu einer leicht erhöhten Absorption der Strahlung bei jeder Reflektion an einer Carbonfaser. Dies führt insgesamt zu einer erhöhten Einkopplung. Der Einkoppelgrad von Strahlung in CFK, welcher mit der in Bild 3.5 gezeigten Anordnung von Carbonfasern berechnet wurde, ist in Bild 3.7 für die beiden Fälle der umlaufend und radial angeordneten Graphenschichten dargestellt.

Dabei ist der dargestellte Wellenlängenbereich auf 400 nm bis 1400 nm beschränkt, da nur für diesen Wellenlängenbereich die absorbierte optische Energie im Matrixmaterial vernachlässigt werden kann. Wie in Bild 3.7 gegenüber Bild 3.6 zu sehen ist, erhöht das zusätzliche Matrixmaterial den Einkoppelgrad von Strahlung in das Material um bis zu 10%. Die Differenz des Einkoppelgrades zwischen beiden Polarisationszuständen wird kleiner. Eine Ausnahme bildet der Einkoppelgrad bei einer radialen Anordnung der Graphenschichten und einer senkrechten Orientierung der Polarisation relativ zu den Carbonfasern. Die zusätzliche Reflektion an der Grenzschicht zwischen Matrixmaterial und Luft führt hier zu einem geringeren Einkoppelgrad als für die nicht eingebetteten Carbonfasern.

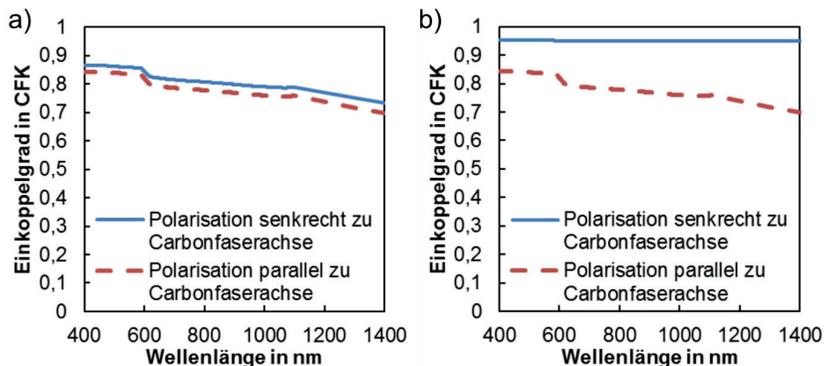


Bild 3.7: Einkoppelgrad von Strahlung in CFK als Funktion der Wellenlänge unter Berücksichtigung von Mehrfachreflektionen zwischen den Fasern. Das umgebende Medium ist das duroplastische Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135. a) Umlaufend orientierte Graphenschichten, b) radial orientierte Graphenschichten.

3.1.2 Messung des Einkoppelgrades von Laserstrahlung von Carbonfasern und CFK²

Die Ergebnisse der Raytracing-Berechnungen werden im Folgenden durch eine Messung des Einkoppelgrades von Laserstrahlung in Carbonfasern und CFK validiert. Eine Übersicht über gängige Verfahren zur Bestimmung der Einkopplung von Laserstrahlung ist in [73] gegeben. Zur Vermessung von CFK und Carbonfasern wurde das Verfahren der Reflektometrie gewählt.

² Die Messung des Einkoppelgrades von Laserstrahlung in Carbonfasern und CFK wurde im Rahmen einer Studienarbeit [74] durchgeführt, welche vom Autor dieser Dissertationsschrift angeleitet und betreut wurde.

Messaufbau

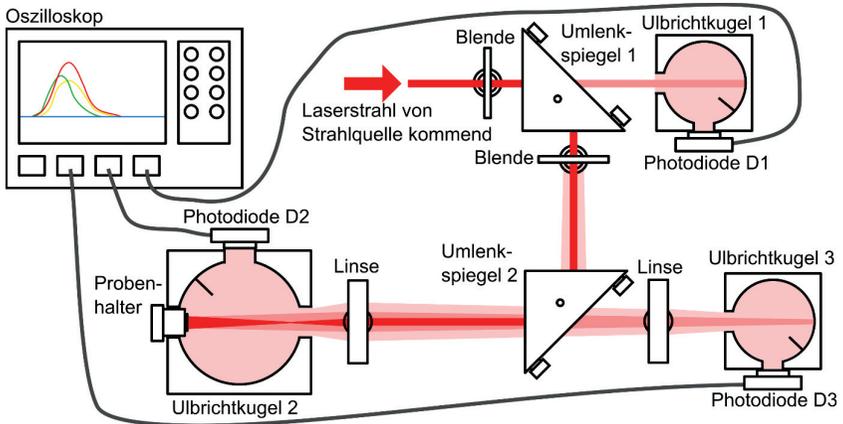


Bild 3.8: Skizze des Versuchsaufbaus zur reflektometrischen Messung des Einkoppelgrades von Laserstrahlung in Carbonfasergelege und CFK.

Bei der Reflektometrie wird der reflektierte Strahlungsanteil gemessen und daraus auf die Einkopplung geschlossen. Der runde Querschnitt der Carbonfasern führt dazu, dass Strahlung, welche auf die Oberfläche der Carbonfaser- bzw. CFK-Probe trifft, in alle Richtungen innerhalb der durch den Richtungsvektor der einfallenden Laserstrahlung und die Oberflächennormale der Carbonfasern aufgespannten Halbebene reflektiert wird. Dies wurde bei der Auslegung des in Bild 3.8 dargestellten Versuchsaufbaus berücksichtigt. Der von der Strahlquelle kommende Laserstrahl wird über Umlenkspiegel in Richtung Probe gelenkt. Die dielektrisch beschichteten Spiegel transmittieren einen geringen Teil der einfallenden Strahlung. Hinter Umlenkspiegel 1 befindet sich eine Ulbrichtkugel, in welche der Anteil des einfallenden Laserstrahls propagiert, welcher durch Umlenkspiegel 1 transmittiert. Zur Messung dieser Strahlungsleistung kommt Photodiode D1 zum Einsatz. Der für einen Puls mit 20 ns Dauer gemessene Spannungsverlauf an Photodiode D1 ist in Bild 3.9a dargestellt. Weil die Anstiegszeit der Photodiode 43 ns betrug, entspricht die zeitliche Ausdehnung des Signals dabei nicht der tatsächlichen Pulsdauer.

Eine Linse fokussiert den Laserstrahl auf einen Punkt vor der zu vermessenden Probe. Die Probe befindet sich innerhalb der Ulbrichtkugel 2. Durch die Positionierung der Probe außerhalb des Fokus werden auf der Probenoberfläche Energiedichten sicher unterhalb der Abtragschwelle des Probenmaterials erreicht. Die Strahlungsleistung der senkrecht zur Carbonfaserachse diffus reflektierten Strahlung wird mit Photodiode D2 detektiert. Die direkt reflektierte Strahlung und der Anteil der diffus reflektierten Strahlung, welcher durch die Öffnung der Ulbrichtkugel 2 austritt, werden von der

Fokussierlinse wieder gebündelt. Ein Teil dieser reflektierten Strahlungsanteile transmittiert durch den dielektrisch beschichteten Umlenkspiegel 2. Diese transmittierten Strahlungsanteile werden mit Hilfe einer weiteren Linse in die Ulbrichtkugel 3 fokussiert und die Strahlungsleistung von der Photodiode D3 detektiert. Der Strahlengang ist mit Hilfe geometrischer Strahloptik darauf ausgelegt, möglichst alle von der Probe reflektierten Strahlungsanteile erfassen zu können.

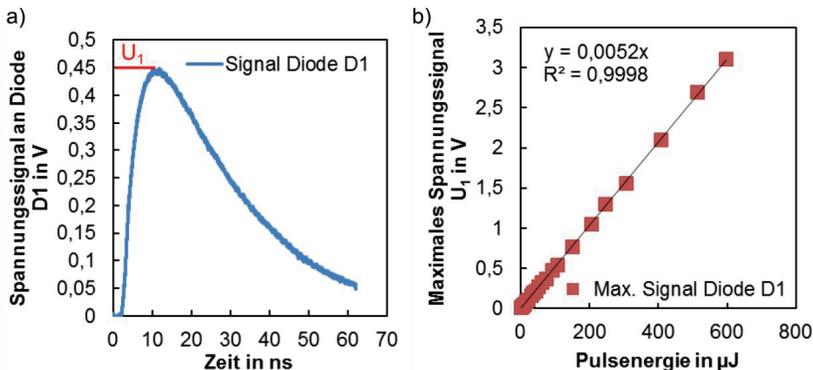


Bild 3.9: a) Spannungsverlauf an Photodiode D1 als Funktion der Zeit bei Messung eines einzelnen Laserpulses. Die Pulsdauer betrug 20 ns. b) Höhe des maximal gemessenen Spannungssignals in Abhängigkeit der Pulsenergie. Der Zusammenhang ist mit hoher Relevanz linear.

Bei den vermessenen Proben handelte es sich um eine Probe eines Carbonfasergeleges und eine CFK-Probe. Die Carbonfasern waren PAN basierte Tenax-E HTS40 Carbonfasern. Als Matrixmaterial kam das Epoxidharz HexFlow RTM6 zum Einsatz. Es wurden zwei verschiedene Laserstrahlquellen verwendet. Das erste Lasersystem emittierte Strahlung einer Wellenlänge von 532 nm und Pulsdauern von ungefähr 8 ps, das zweite Lasersystem emittierte Strahlung einer Wellenlänge von 1047 nm und einer Pulsdauer von ungefähr 20 ns.

Messprinzip

Als Messgröße wurde die während eines Pulses maximal gemessene Spannung verwendet. Beispielhaft ist in Bild 3.9a für das dargestellte Spannungssignal die maximale Spannung U_1 eingezeichnet. Befinden sich die Photodioden nicht in Sättigung, korreliert diese maximal gemessene Spannung linear mit der Energie eines Laserpulses. Beispielhaft ist in Bild 3.9b die maximale Spannung U_1 als Funktion der Pulsenergie zu sehen. Die Pulsenergie E_P wurde über eine Messung der mittleren Laserleistung P bei bekannter Pulsrepetitionsrate f_P nach $E_P = P/f_P$ bestimmt. Dabei wurde die Leistung mit Hilfe eines Leistungsmesskopfes am Ort der später zu vermessenden Probe gemessen. Das Spannungssignal für die eingestrahelten Laserpulse wurde von Photodiode D1

aufgezeichnet, deren Anordnung dem in Bild 3.8 dargestellten Versuchsaufbau entnommen werden kann. An die in Bild 3.9b zu sehenden Datenpunkte wurde eine lineare Funktion $U_1(E_p)=m_1 \cdot E_p$ gefittet, mit der Steigung m_1 als Fitparameter. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9998$ zeigt die gefittete Funktion eine sehr gute Übereinstimmung mit den Datenpunkten. Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen dem maximal gemessenen Spannungssignal U_1 der Photodiode D1 und der Energie des Pulses am Ort der später zu vermessenden Probe.

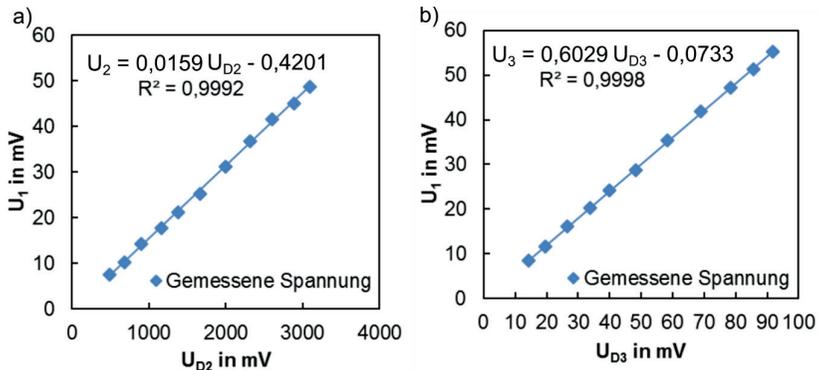


Bild 3.10: Kalibriergeraden a) Die an Photodiode D1 gemessene Spannung U_1 aufgetragen über der jeweilig an Photodiode D2 gemessenen Spannung U_{D2} . b) Die an Photodiode D1 gemessene Spannung U_1 aufgetragen über der jeweilig an Photodiode D3 gemessenen Spannung U_{D3} .

Um die reflektierten Anteile des auf die Probe treffenden Laserpulses bestimmen zu können, müssen die Photodioden D2 und D3 zunächst kalibriert werden. Zur Kalibrierung der Photodiode D3, welche der Vermessung der aus der Ulbrichtkugel 2 zurück reflektierten Strahlanteile dient, wurde anstelle einer Probe ein für die jeweilige Wellenlänge hochreflektierender Spiegel eingesetzt. Die einfallende Strahlung wird somit nahezu vollständig reflektiert. Auf diese Weise kann das an Photodiode D3 gemessene Signal in Relation zu dem an Photodiode D1 gemessenen Signal gesetzt werden. In Bild 3.10b ist ein Beispiel der an Photodiode D1 maximal gemessenen Spannung U_1 als Funktion der an Photodiode D3 maximal gemessenen Spannung U_{D3} zu sehen. An die Datenpunkte wurde eine lineare Funktion $U_3(U_{D3})=m_3 \cdot U_{D3}+c_3$ gefittet, mit m_3 und c_3 als Fitparameter. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9998$ zeigt die gefittete Funktion eine sehr gute Übereinstimmung mit den Datenpunkten. Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen den an den Photodioden D1 und D3 maximal gemessenen Spannungen.

Zur Kalibrierung der Photodiode D2, welche der Vermessung der diffus reflektierten Strahlanteile dient, wurde eine Probe mit einer Beschichtung aus Spectralon in die Ul-

brichtkugel eingesetzt. Spectralon streut einfallendes Licht nahezu perfekt bei einem Reflektionsgrad $>95\%$ für Wellenlängen zwischen 500 und 1100 nm. Auf diese Weise kann das an Photodiode D2 gemessene Signal U_{D2} in Relation zu dem an Photodiode D1 gemessenen Signal U_1 gesetzt und kalibriert werden. In Bild 3.10a ist ein Beispiel der an Photodiode D1 maximal gemessenen Spannung U_1 als Funktion der an Photodiode D2 maximal gemessenen Spannung U_{D2} zu sehen. An die Datenpunkte wurde eine lineare Funktion $U_2(U_{D2})=m_2 \cdot U_{D2}+c_2$ gefittet, mit m_2 und c_2 als Fitparameter. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9992$ zeigt die gefittete Funktion eine sehr gute Übereinstimmung mit den Datenpunkten. Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen den an den Photodioden D1 und D2 maximal gemessenen Spannungen. Bei der Messung zu berücksichtigen sind dabei der Reflektionsgrad des Spectralons bei der jeweiligen Wellenlänge und von der Probenoberfläche reflektierte Strahlanteile, welche die Ulbrichtkugel 2 verlassen und mit Photodiode D3 gemessen werden können. Diese müssen bei der Kalibrierung der Photodiode D2 berücksichtigt werden.

Bei dieser Messanordnung gilt für den Reflektionsgrad R einer Probe

$$R = \frac{E_R}{E_p} = \frac{E_{R2} + E_{R3}}{E_p} \quad (3.4)$$

wobei E_R die im reflektierten Laserpuls enthaltene Energie ist. Der reflektierte Anteil E_R setzt sich aus einem diffus reflektierten Anteil E_{R2} , welcher von Photodiode D2 detektiert wird, und einem aus der Ulbrichtkugel 2 zurück reflektierten Anteil E_{R3} , welcher von Photodiode D3 detektiert wird, zusammen. Da zwischen Pulsenergie und an den Photodioden maximal gemessenem Spannungssignal ein linearer Zusammenhang $E = k_U \cdot U$ besteht, wobei k_U eine Konstante ist, können die Energien in Gl. (3.4) durch äquivalente Spannungssignale ersetzt werden. Für den Reflektionsgrad ergibt sich

$$R = \frac{E_{R2} + E_{R3}}{E_p} = \frac{k_U \cdot U_1(U_{D2}) + k_U \cdot U_1(U_{D3})}{k_U \cdot U_1} = \frac{U_2 + U_3}{U_1} \quad (3.5)$$

wobei U_2 und U_3 über die in Bild 3.10 gezeigten Kalibrierkurven umgerechnete, äquivalente Spannungssignale der an den Photodioden D2 und D3 gemessenen Signale sind. Die Messung des Reflektionsgrades direkt über die von den Photodioden ausgegebenen Spannungen erhöht die Messgenauigkeit des Aufbaus, da keine mit zusätzlichen Ungenauigkeiten behaftete Leistungsmessung notwendig ist. Über $\eta_A=1-R$ kann schließlich der Einkoppelgrad bestimmt werden.

Messergebnisse

Die gemessenen Einkoppelgrade von Laserstrahlung in CFK und Carbonfasern bei einem Strahleinfall senkrecht zur Probenoberfläche ist in Bild 3.11 zu sehen. Der

Winkel Ω ist der Winkel zwischen der Symmetrieachse der Carbonfasern und der Polarisationsrichtung. Ein Winkel von $\Omega=0^\circ$ steht für eine Polarisationsrichtung parallel zu den Carbonfasern, ein Winkel von $\Omega=90^\circ$ für eine Polarisationsrichtung senkrecht zu den Carbonfasern. Der Verlauf der Datenpunkte zwischen diesen beiden Einstellungen ist sinusförmig moduliert. Die in Abschnitt 3.1.1 getroffenen, qualitativen Aussagen konnten mit den experimentellen Messungen bestätigt werden. Der Einkoppelgrad von Strahlung in CFK ist größer als der Einkoppelgrad in ein Carbonfasergelege. Für Strahlung mit einer Wellenlänge von 1047 nm ist der Einkoppelgrad meist niedriger als für Strahlung mit einer Wellenlänge von 532 nm. Bei paralleler Orientierung der Polarisation relativ zur Carbonfaserachse sind die Einkoppelgrade niedriger als bei senkrecht zur Carbonfaserachse orientierter Polarisation.

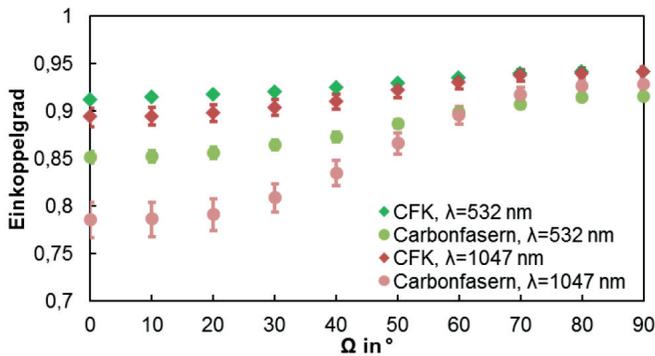


Bild 3.11: Gemessener Einkoppelgrad von Strahlung der Wellenlängen 1047 nm und 532 nm in ein Carbonfasergelege und CFK als Funktion des Winkels Ω zwischen Carbonfaserachse und Polarisationsrichtung der Strahlung [74].

Ein Vergleich der experimentell gemessenen und den mit Hilfe des in Abschnitt 3.1.1 vorgestellten Modells berechneten Einkoppelgrade ist in Tabelle 3.1 gegeben. Die experimentell ermittelten Einkoppelgrade sind bis zu 20% größer als die berechneten Werte. Dabei ist die Abweichung der experimentell gemessenen zu den berechneten Werten tendenziell größer bei einer Polarisationsrichtung senkrecht zur Carbonfaserachse. Grund dafür sind einerseits Vereinfachungen im theoretischen Modell und andererseits Ungenauigkeiten in der experimentellen Messung.

Tabelle 3.1: Übersicht über die experimentell ermittelten und theoretisch berechneten Werte für den Einkoppelgrad von Laserstrahlung der Wellenlängen 1047 nm und 532 nm in Carbonfasern und CFK.

	1047 nm				532 nm			
	Carbonfasern		CFK		Carbonfasern		CFK	
	Exp.	Theo.	Exp.	Theo.	Exp.	Theo.	Exp.	Theo.
Einkoppelgrad Pol. parallel CF	0,79	0,67	0,89	0,76	0,85	0,77	0,91	0,84
Einkoppelgrad Pol. senkrecht CF	0,93	0,74	0,94	0,79	0,92	0,82	0,94	0,86

Das Berechnungsmodell trifft folgende Idealisierungen, welche die Realität zwar annähern, aber nicht vollständig abbilden:

- Annäherung der optischen Eigenschaften von turbostratischem Kohlenstoff mit den optischen Eigenschaften von Graphit.
- Idealisierte Orientierung der Graphenschichten. Wie in Bild 3.6 zu sehen, ist die Einkopplung von Strahlung mit senkrecht zur Carbonfaserachse orientierter Polarisation bei radialer Orientierung der Graphenschichten deutlich höher als bei einer umlaufenden Orientierung. Weicht also die tatsächliche Anordnung der Graphenschichten von der idealisierten, umlaufenden Anordnung ab, so erhöht sich der Einkoppelgrad. Dies ist eine wahrscheinliche Erklärung für die vergleichsweise große Abweichung des experimentell ermittelten Einkoppelgrads vom theoretisch berechneten bei senkrecht zur Carbonfaserachse orientierter Polarisation der Strahlung.
- Annahme einer glatten Oberfläche der Carbonfasern und des CFK. Es ist bekannt, dass eine Rauigkeit der Oberfläche die Einkopplung von Strahlung erhöht [17].
- Idealisierte Anordnung und Ausrichtung der Carbonfasern. Unregelmäßigkeiten in der Anordnung der Carbonfasern können die Einkopplung von Strahlung beeinflussen.
- Vernachlässigung von Unregelmäßigkeiten im Material wie zusätzliche Polyesterfäden.

Ungenauigkeiten in der experimentellen Messung des Einkoppelgrades können entstehen durch:

- Strahlung, welche durch die Öffnung der Ulbrichtkugel austritt aber bei der Messung nicht erfasst wird.
- Ungenauigkeiten in der Kalibrierung (Beispielsweise durch eine Verschmutzung der Kalibrierkörper, Abweichungen der tatsächlichen Strahlpropagation vom idealen Strahlweg,...)

- Abhängigkeit des Messsignals der Photodioden D2 und D3 von der Ausrichtung der Carbonfasern und damit der Reflektionsrichtung einfallender Strahlung.

Es konnte insgesamt gezeigt werden, dass der Einkoppelgrad von Strahlung in Carbonfasern und CFK für die beiden gemessenen Wellenlängen stets 79% oder mehr beträgt. Da es insbesondere während des Bearbeitungsprozesses zu Mehrfachreflektionen der einfallenden Strahlung aufgrund der Geometrie der Bearbeitungszone kommen kann, welche den Einkoppelgrad weiter erhöhen, ist kein wesentlicher Einfluss der Wellenlänge bzw. des Polarisationszustands auf den Bearbeitungsprozess zu erwarten. Ob dies zutrifft soll im Folgenden anhand experimenteller Untersuchungen diskutiert werden.

3.1.3 Einfluss der Polarisation auf den Bearbeitungsprozess³

Zur experimentellen Untersuchung des Einflusses der Polarisation des Bearbeitungslasers auf den Prozess wurde ein Lasersystem verwendet, welches Strahlung mit einer Wellenlänge von 515 nm emittiert. Für eine Wellenlänge von 532 nm, welche ähnlich der Bearbeitungswellenlänge von 515 nm ist, wurde für CFK bei einer parallel zur Carbonfaserachse orientierten Polarisation ein Einkoppelgrad von 91% gemessen, bei einer senkrecht orientierten Polarisation 94%. Die berechneten Werte für den Einkoppelgrad liegen mit 84% (Polarisation parallel Carbonfasern) und 86% (Polarisation senkrecht Carbonfasern) ähnlich nah zusammen. Ein Einfluss der Polarisation auf das Bearbeitungsergebnis ist somit nicht zu erwarten.

Es wurden Nuten in CFK mit verschiedenen Polarisationszuständen des Bearbeitungslasers erzeugt. Untersucht wurde dabei die Abtragstiefe in Abhängigkeit der Anzahl an Überfahrten des Laserstrahls über das Material sowie in einer weiteren Versuchsreihe die Ausdehnung der thermischen Schädigung. Der verwendete Laserstrahl hatte eine Strahlqualität von $M^2=1,1$. Der Fokusedurchmesser betrug $d_f=28 \mu\text{m}$ bei Fokussierung mit einer Linse mit einer Brennweite von 206 mm. Die Pulsfrequenz war $f_p=8 \text{ kHz}$ und die Pulsenergie $E_p=37 \mu\text{J}$. Die Pulsdauer war ungefähr $\tau=8 \text{ ps}$. Der Laserstrahl wurde mit einer Geschwindigkeit von 60 mm/min über das Werkstück bewegt, bei welchem es sich um ein CFK mit unidirektionaler Ausrichtung der Carbonfasern handelte. Die PAN basierten Carbonfasern waren Tenax-E HTS40 Carbonfasern. Als Matrixmaterial kam das Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135 zum Einsatz.

Der Laserstrahl wurde senkrecht zu den Carbonfasern über das Werkstück bewegt. Es wurden mehrere Nuten mit einer unterschiedlichen Anzahl an Überfahrten und unter-

³ Die in diesem Abschnitt gezeigten Messergebnisse wurden im Rahmen einer vom Autor dieser Dissertationsschrift angeleiteten und betreuten Bachelorarbeit experimentell ermittelt [104].

schiedlichen Polarisationszuständen (lineare Polarisation sowohl senkrecht als auch parallel zu den Carbonfasern orientiert, zirkulare Polarisation) erzeugt. Die Tiefe der Nuten wurde im Querschliff gemessen. Die Nuttiefe t_{Nut} korreliert bei Annahme einer konstanten Nutbreite b_{Nut} direkt mit dem Einkoppelgrad η_A , siehe Gl. (2.2). Da im Rahmen dieser Versuchsreihe stets dasselbe Material verwendet wurde, ist die volumenspezifische Energie E_V , welche zum Verdampfen eines bestimmten Volumens CFK benötigt wird, konstant. Der Vorschub v war in den Messungen mit 60 mm/min ebenfalls konstant gehalten wie auch die mittlere Laserleistung $P=0,3$ W. Da die Prozessparameter bis auf den Polarisationszustand nicht geändert wurden, kann von einem gleichbleibenden thermischen Wirkungsgrad η_{th} ausgegangen werden. Eventuelle Unterschiede in der erreichten Nuttiefe für verschiedene Polarisationszustände können somit direkt auf Unterschiede im polarisationsabhängigen Einkoppelgrad η_A zurückgeführt werden.

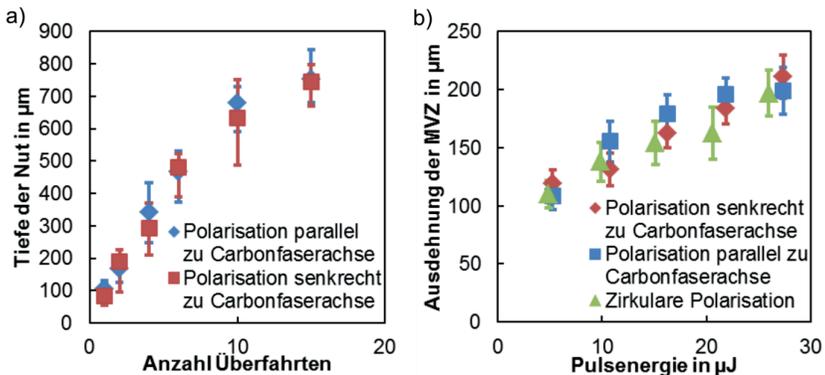


Bild 3.12: a) Nuttiefe für eine parallele und senkrechte Orientierung der Polarisation relativ zu den Carbonfasern als Funktion der Anzahl an Überfahrten des Laserstrahls über das Material. Die Prozessparameter waren: $P=0,3$ W, $f_p=8$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=28$ µm, $M^2=1,1$, $v=60$ mm/min. b) Ausdehnung der Matrixverdampfungszone nach einer Überfahrt für verschiedene Polarisationszustände und Pulsenergien bei konstanter Pulsfrequenz. Die Prozessparameter waren: $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=28$ µm, $M^2=1,1$, $v=1800$ mm/min.

Die Tiefe der erzeugten Nuten ist in Bild 3.12a als Funktion der Anzahl an Überfahrten dargestellt. Die Tiefe der Nuten nahm für beide Orientierungen der Polarisation relativ zu den Carbonfasern für eine zunehmende Anzahl an Überfahrten im gleichen Maße zu. Die eingekoppelte Energie des einfallenden Laserstrahls, welche zum Abtrag des Materials beiträgt, ist also unabhängig von der Orientierung der Polarisation relativ zur Carbonfaserachse.

In Bild 3.12b ist die Ausdehnung der Matrixverdampfungszone für verschiedene Polarisationszustände und Pulsenergien nach einer Überfahrt dargestellt. Im Vergleich zu

den vorherigen Versuchsreihen wurde die Repetitionsrate auf 800 kHz und der Vorschub auf 1800 mm/min erhöht, die restlichen Prozessparameter sind identisch. Diese Änderungen haben die Ausbildung einer Matrixverdampfungszone zur Folge. Die Ausdehnung der Matrixverdampfungszone wurde mit der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Messung an der Oberfläche“ bestimmt. Der Polarisationszustand der Laserstrahlung war in einem Fall zirkular und ansonsten linear mit senkrechter bzw. paralleler Orientierung der Polarisation relativ zu den Carbonfasern. Wie man Bild 3.12b entnehmen kann, wurden für alle drei Polarisationszustände ähnliche Ausdehnungen der Matrixverdampfungszone erreicht. Der Polarisationszustand hatte hier also keinen Einfluss auf die Einkopplung von Energie in das Material.

3.2 Räumliche Umverteilung von Energie durch Reflektion von Laserstrahlung am runden Carbonfaserquerschnitt

Um den Einfluss der in Abschnitt 2.5 angesprochenen Energieumverteilung durch die Reflektion von Strahlung an den Carbonfasern zu untersuchen, wurden in unidirektionalem CFK Nuten mit einer Bewegungsrichtung des Laserstrahls sowohl parallel als auch senkrecht zu den Carbonfasern erzeugt. Dabei war die mittlere Laserleistung $P=0,3$ W, die Pulsfrequenz $f_p=8$ kHz, die Wellenlänge $\lambda=515$ nm, die Pulsdauer $\tau=8$ ps, der Fokusbereich $d_f=28$ μm , die Strahlqualität $M^2=1,1$ und die Vorschubgeschwindigkeit $v=60$ mm/min. Die Versuche wurden jeweils mit senkrecht und parallel orientierter Polarisation des Laserstrahls relativ zur Symmetrieachse der Carbonfasern durchgeführt. Für jede Kombination an Prozessparametern wurden vier Nuten erzeugt. Von den generierten Nuten wurde jeweils ein Querschliff erstellt und die Breite der Nuten auf Höhe der halben Nuttiefe vermessen. In diesem Bereich weist die Nut bei ausreichender Nuttiefe eine konstante Breite auf. An der Oberfläche kommt es aufgrund des gaußförmigen Strahlprofils zu einer Aufweitung der Nut, im Bereich des Nutgrunds kommt es zu einer Verjüngung bzw. zu einem Auffächern der Nut.

Die gemessene Nutbreite als Funktion der Anzahl an Überfahrten des Laserstrahls über das Material ist in Bild 3.13a zu sehen. Für eine geringe Anzahl an Überfahrten wurden scheinbar breitere Nuten erzeugt als bei einer hohen Anzahl an Überfahrten. Wie man in den in Bild 3.13b gezeigten Aufnahmen sehen kann, sind die Nuten an der Oberfläche aufgeweitet und erreichen eine konstante, schmalere Nutbreite erst in zunehmender Tiefe. Für eine geringe Anzahl an Überfahrten wurden nur geringe Nuttiefen erreicht und man misst die Nutbreite somit nahe der Oberfläche im Bereich der oberflächennahen Aufweitung.

Wie man in Bild 3.13a sieht, wurden bei einer zur Carbonfaserachse parallelen Bewegung des Laserstrahls Nuten mit einer Breite zwischen 19 μm und 30 μm erzeugt. Wurde der Laserstrahl senkrecht zur Carbonfaserachse bewegt, wurden Nuten mit ei-

ner Breite zwischen $9\ \mu\text{m}$ und maximal $20\ \mu\text{m}$ generiert. Sind die Carbonfasern parallel zur Bearbeitungsrichtung orientiert, verbreitert sich die Nut also um ein bis zwei Carbonfaserdurchmesser (bei einem Durchmesser der Carbonfasern von $8\ \mu\text{m}$). Dies wird auch in den in Bild 3.13b gezeigten Aufnahmen deutlich. Während sich die Nut bei zu den Carbonfasern senkrechter Bearbeitungsrichtung von ca. $42\ \mu\text{m}$ an der Oberfläche auf ca. $18\ \mu\text{m}$ in einer Tiefe von $100\ \mu\text{m}$ verjüngt, verjüngt sich die Nut bei parallel orientierten Carbonfasern von ca. $40\ \mu\text{m}$ an der Oberfläche nur auf ca. $28\ \mu\text{m}$ in einer Tiefe von $100\ \mu\text{m}$. Es lässt sich also festhalten, dass bei einer zu den Carbonfasern parallelen Bearbeitung eine Verbreiterung der Nut um bis zu zwei Carbonfaserdurchmesser beobachtet werden kann.

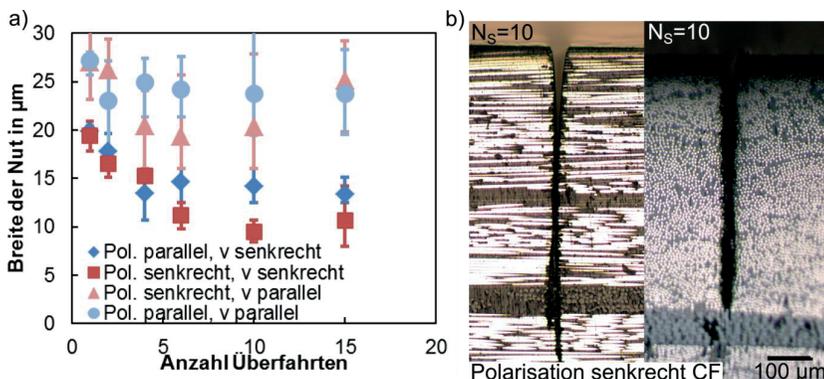


Bild 3.13: a) Gemessene Nutbreite für eine parallele und senkrechte Orientierung der Polarisation relativ zu den Carbonfaserachsen als Funktion der Anzahl an Überfahrten des Laserstrahls über das Material. Dabei wurde der Laserstrahl jeweils senkrecht oder parallel zu den Carbonfasern über das Werkstück bewegt. Die Prozessparameter waren: $P=0,3\ \text{W}$, $f_p=8\ \text{kHz}$, $\lambda=515\ \text{nm}$, $\tau=8\ \text{ps}$, $d_r=28\ \mu\text{m}$, $M^2=1,1$, $v=60\ \text{mm/min}$. b) Aufnahmen zweier Nuten erzeugt mit zehn Überfahrten im Querschliff. Der Laserstrahl wurde einmal senkrecht und einmal parallel zu den Carbonfasern über das Werkstück bewegt.

Um zu untersuchen, ob sich diese Verbreiterung der Nut auf den Tiefenfortschritt beim Nutabtrag auswirkt, wurde neben der Nutbreite auch die Nuttiefe vermessen. Die Nuttiefe als Funktion der Anzahl an Überfahrten des Laserstrahls über das Material ist in Bild 3.14 zu sehen. Weder die Polarisationsrichtung noch die Bearbeitungsrichtung hat einen signifikanten Einfluss auf die erreichte Nuttiefe. Eine Umverteilung der eingestrahlenen Laserenergie durch Reflektionen am runden Carbonfaserquerschnitt hat hier also weder einen positiven noch negativen Effekt auf den Tiefenfortschritt beim Laserabtrag von CFK. Dies resultiert unter Berücksichtigung der größeren Nutbreite beim Abtrag von Nuten parallel zu den Carbonfasern in einem höheren Prozesswirkungsgrad η_p für den Laserabtrag von CFK parallel zu den Carbonfasern.

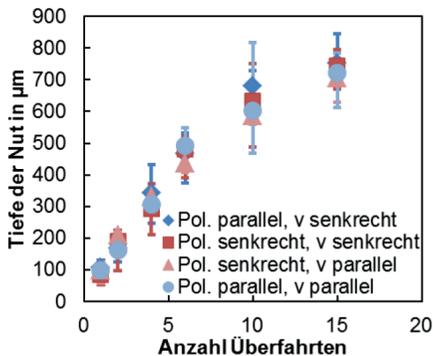


Bild 3.14: Nuttiefe als Funktion der Anzahl an Überfahrten bei paralleler und senkrechter Ausrichtung der Carbonfasern relativ zum Vorschub für zwei verschiedene Polarisationszustände. Die Prozessparameter waren: $P=0,3$ W, $f_p=8$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=28$ µm, $M^2=1,1$, $v=60$ mm/min.

denselben Prozessparametern, lediglich mit unterschiedlicher Ausrichtung der Carbonfasern relativ zum Vorschub, verdeutlicht diesen Mechanismus. Die rechts dargestellte Nut wurde mit senkrecht zu den Carbonfasern bewegtem Laserstrahl erzeugt. Trotz Ausbildung einer MVZ von ungefähr 150 µm sind die Carbonfasern noch ausreichend fixiert, es hat sich eine gleichmäßig geformte Nut ausgebildet. Bei der links dargestellten Nut fand der Abtrag parallel zu den Carbonfasern statt. Innerhalb der MVZ verlieren die Carbonfasern ihre Fixierung und ragen ungeordnet über die Oberfläche des CFK Materials heraus. Die Nut an sich ist sehr unregelmäßig. Eine Analyse dieser Nut im Querschliff war nicht möglich.

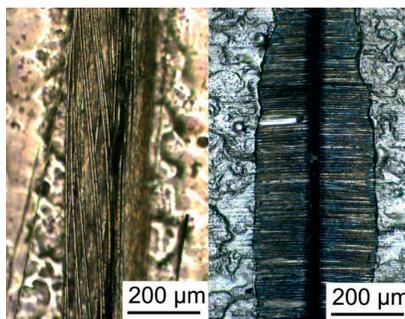


Bild 3.15: Aufnahmen zweier Nuten, welche mit denselben Prozessparametern erzeugt wurden, allerdings im linken Fall mit einem Vorschub parallel zu den Carbonfasern, im rechten Fall senkrecht zu diesen. Prozessparameter: $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=13$ µm, $M^2=1,1$, $v=50$ mm/s.

Hervorgehoben sei dabei allerdings die Tatsache, dass bisher lediglich der Fall des Abtrags von CFK mit Prozessparametern, welche keine thermische Schädigung des Materials bedingen, betrachtet wurde. Wird CFK mit Prozessparametern bearbeitet, welche die Ausbildung einer Matrixverdampfungszone zur Folge haben, so verlieren die Carbonfasern ihre örtliche Fixierung. Insbesondere beim Abtrag von Nuten parallel zu den Carbonfasern können diese daraufhin in die Nut ragen und so Laserstrahlung abschirmen bzw. reflektieren. Eine in Bild 3.15 gezeigte Gegenüberstellung zweier Nuten abgetragen mit

3.3 Einfluss der Carbonfaserausrichtung auf den Abtragprozess bei Ausbildung einer MVZ

Um den Einfluss der Bearbeitungsrichtung auf den Abtragprozess von CFK bei Ausbildung einer thermischen Schädigung von mehreren 100 μm zu untersuchen, wurden zusätzliche Abtragsversuche unternommen. Durch Verwendung eines bidirektionalen CFKs konnte das Material an der Oberfläche stets mit einem Vorschub senkrecht zu den Carbonfasern bearbeitet werden, was eine gewisse Fixierung der parallel zur Vorschubrichtung orientierten Carbonfasern in der darunter liegenden Lage gewährleistete. So wurde eine Analyse der erzeugten Nuten im polierten Querschliff möglich. Bei dem für diese Versuchsreihe verwendeten bidirektionalen CFK bestand die Matrix aus dem Epoxidharz HexFlow RTM6. Die einzelnen Carbonfaserlagen waren unter einem Winkel von 90° zueinander angeordnet und hatten jeweils eine mittlere Lagendicke von 300 μm . Als Vergleichsmaterial kam ein unidirektionales CFK mit dem Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135 zum Einsatz. Die Strahlquelle hatte eine Wellenlänge von 515 nm, eine Pulsdauer von ungefähr 8 ps und eine mittlere Leistung von 27 W. Die maximale Pulsfrequenz war 800 kHz und die Strahlqualität ungefähr $M^2=1,1$. Der Fokusbereich auf der CFK-Oberfläche war 14 μm . Der Laserstrahl wurde mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s über das Material bewegt. Die Bearbeitungsrichtung war stets senkrecht zu den Carbonfasern der obersten Lage. Es wurden Nuten mit einer unterschiedlichen Anzahl an Überfahrten erzeugt, um unterschiedliche Nuttiefen zu erhalten. Die Nuten wurden in polierten Querschliffen der Werkstücke mit Hilfe eines optischen Mikroskops untersucht.

Die erreichte Nuttiefe bei Bearbeitung des bi- als auch des unidirektionalen CFKs als Funktion der Anzahl an Überfahrten ist in Bild 3.16a dargestellt. Die Ausdehnung und Orientierung der Carbonfaserlagen des bidirektionalen CFKs relativ zur Bearbeitungsrichtung sind an der rechten Seite der Grafik markiert. Die angegebenen Energiedichten von $H_0=42 \text{ J/cm}^2$ und $H_0=7 \text{ J/cm}^2$ bezeichnen die maximale Energiedichte im Fokus bei Annahme eines zeitlichen Rechteckpulses. Für beide verwendeten Energiedichten wurde die maximale Nuttiefe nach weniger als $N_S=300$ Überfahrten erreicht. Wie in Bild 3.16a zu sehen, ist die Nuttiefe bei der geringeren Energiedichte von 7 J/cm^2 unabhängig vom verwendeten Material. Es wurden für beide CFK-Proben ähnliche Nuttiefen erreicht. Dabei wurde die oberste Carbonfaserlage komplett und das obere Drittel der zweiten Lage durchtrennt. Wird die Energiedichte auf 43 J/cm^2 erhöht, erhöht sich die maximale Nuttiefe auf 1500 μm . Nun ist auch eine Abhängigkeit der Nuttiefe vom bearbeiteten Material zu beobachten. Bei Bearbeitung des unidirektionalen Materials nimmt die Nuttiefe stetig mit zunehmender Anzahl an Überfahrten zu bis nach 70 Überfahrten eine Nuttiefe von ungefähr 1450 μm erreicht wird, welche nahe der maximalen Nuttiefe ist. Bei der Bearbeitung des bidirektionalen CFK Materi-

als kann eine zwischenzeitliche Verlangsamung des Tiefenfortschritts beobachtet werden. Diese Verlangsamung des Tiefenfortschritts ist in Bild 3.16a im Bereich zwischen sechs und 40 Überfahrten zu erkennen. Die Nuttiefe in diesem Bereich schwankt zwischen ungefähr 500 μm und 800 μm . Die zwischenzeitliche Verlangsamung des Abtragprozesses beginnt in der zweiten Carbonfaserlage. Die Carbonfasern sind hier parallel zur Bearbeitungsrichtung orientiert. Nach Erreichen der dritten Carbonfaserlage nimmt die Nuttiefe wieder zu, bis die Nut nach 120 Überfahrten ihre maximale Tiefe von ca. 1400 μm erreicht.

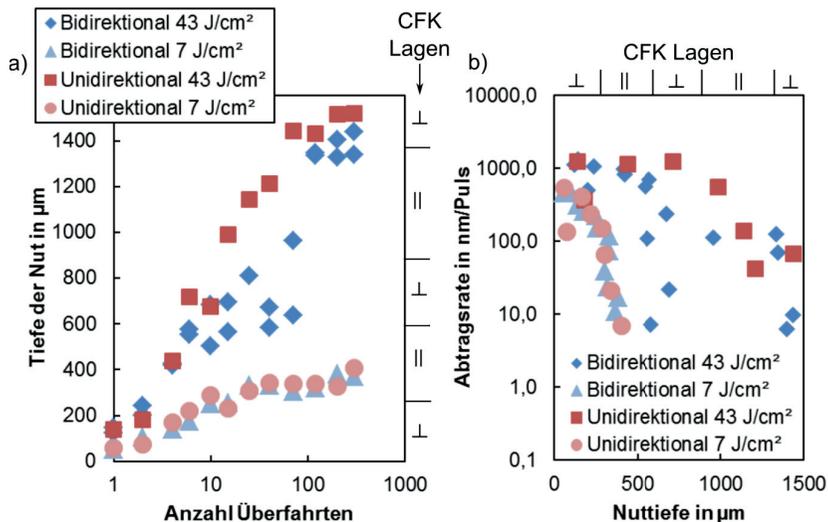


Bild 3.16: a) Tiefe der mit verschiedenen Energiedichten in uni- und bidirektionalem CFK erzeugten Nuten als Funktion der Anzahl an Überfahrten. b) Erzielte Abtragsrate über der Nuttiefe. Die Prozessparameter waren: $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=14$ μm , $M^2=1,1$, $v=100$ mm/s.

Der Abbruch des Tiefenfortschritts in einer gewissen Nuttiefe (hier bei ungefähr 1500 μm im unidirektionalen Material) kann über die Divergenz des Laserstrahls erklärt werden, welche zu einer Reduktion der Energiedichte am Nutgrund einer tiefen Nut (oder einer tiefen Bohrung) führt. Dies wirkt sich in einer fortschreitenden Reduzierung der Abtragsrate aus, bis kein weiterer Tiefenfortschritt mehr stattfindet. Die in Bild 3.16b dargestellte Abtragsrate Δt_p wurde mit

$$\Delta t_p = \frac{\Delta t_N}{N_{eff}} = \frac{\Delta t_N \cdot v}{d_f \cdot f_p} \quad (3.6)$$

berechnet, wobei Δt_N der Tiefenfortschritt pro Überfahrt, d_f der Fokusbereich, v die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls und f_P die Pulsfrequenz ist. Die an einem Punkt entlang der Spur effektiv auftreffende Anzahl an Laserpulsen pro Überfahrt N_{eff} ist definiert als

$$N_{eff} = \frac{d_f \cdot f_P}{v}. \quad (3.7)$$

Wie man in Bild 3.16b sieht, nimmt bei einer Energiedichte von 7 J/cm^2 die Abtragsrate für beide CFK Materialien im gleichen Maße mit zunehmender Nuttiefe monoton ab. Ein Einfluss der zur Bearbeitungsrichtung parallelen Orientierung der Carbonfasern in der zweiten Lage ist nicht zu beobachten. Im Querschliff der Nuten zeigt sich, dass bei dieser Energiedichte die Ausdehnung der MVZ in der zweiten Carbonfaserlage klein ist und die Carbonfasern noch ausreichend fixiert sind. Wird die Energiedichte auf 43 J/cm^2 erhöht, so erhöht sich auch die Abtragsrate und die Ausdehnung der MVZ nimmt zu. Bis in eine Tiefe von ungefähr $450 \mu\text{m}$ bleibt die Abtragsrate für beide Materialien auf konstant hohem Niveau. Bei Bearbeitung des unidirektionalen CFK Materials ist erst ab einer Tiefe von ungefähr $990 \mu\text{m}$ eine Reduktion der Abtragsrate festzustellen. Anschließend nimmt die Abtragsrate mit zunehmender Nuttiefe stetig ab. Die beobachtete Verlangsamung des Tiefenfortschritts beim Laserabtrag des bidirektionalen CFKs spiegelt sich auch in der Abtragsrate wieder. In einer Tiefe von ungefähr $600 \mu\text{m}$ kann hier eine ausgeprägte zwischenzeitliche Reduzierung der Abtragsrate beobachtet werden. Ab einer Tiefe von ungefähr $960 \mu\text{m}$ werden wieder Abtragsraten ähnlich denen bei der Bearbeitung des unidirektionalen Materials erreicht.

Wie in Abschnitt 3.2 gezeigt, führt eine Änderung der Carbonfaserausrichtung relativ zur Bearbeitungsrichtung alleine nicht zu einer Reduktion des Tiefenfortschritts. Erst bei Ausbildung einer MVZ scheint sich eine zur Bearbeitungsrichtung parallele Orientierung der Carbonfasern nachteilig auf die Abtragsrate auszuwirken. Zur Identifikation der dabei wirkenden Mechanismen ist eine Betrachtung der erzeugten Nuten im Querschliff hilfreich. In Bild 3.17a und Bild 3.17b sind Bilder von in bidirektionalem CFK erzeugten Nuten dargestellt, in Bild 3.17c ist ein Querschliff einer in unidirektionalem CFK erzeugten Nut zu sehen. Die Nuten sind in den Aufnahmen in Bild 3.17a bis c mit einer weißen gestrichelten Linie umrissen. Für alle drei Nuten hat sich eine MVZ mit einer Ausdehnung von ungefähr $200 \mu\text{m}$ ausgebildet. Wie in den Bildern 3.17a und b zu sehen ist, weitet sich die Nut auf, sobald die Carbonfasern parallel zur Nut orientiert sind. In der ersten Carbonfaserlage bei zur Nut senkrechter Orientierung der Carbonfasern ist die Nut schmal und gleichmäßig ausgebildet. In der zweiten Carbonfaserlage, in welcher die Carbonfasern parallel zur Nut orientiert sind, nimmt die Nut eine unregelmäßige Form an und verbreitert sich mit zunehmender Tiefe. Sobald die dritte Carbonfaserlage erreicht wird, in der die Carbonfasern wieder senkrecht zur

Vorschubrichtung orientiert sind, nimmt die Breite der Nut wieder ab. Die maximale Breite der Nut wird an der Grenzschicht zwischen zweiter und dritter Carbonfaserlage erreicht, siehe Bild 3.17b. Besonders bei Betrachtung von Bild 3.17b wird deutlich, dass sich in der zweiten Carbonfaserlage im Bereich der Nut viel wiedererstartetes Material abgelagert hat. Diese Ablagerungen können durch Resublimation gasförmiger Ablationsprodukte oder durch ein Austreiben flüssiger Zersetzungsprodukte des Matrixmaterials mit der beim Ablationsprozess entstehenden Gasströmung entstehen. Die Bildung dieser flüssigen Zersetzungsprodukte kann beispielsweise an der Materialoberfläche beim Perkussionsbohren von CFK beobachtet werden. Eine Aufnahme der Oberfläche des CFK Werkstücks während eines Perkussionsbohrprozesses ist in Bild 3.18 zu sehen. Gebohrt wurde mit einer mittleren Leistung von 22 W bei einer Repetitionsrate von 800 kHz. Deutlich erkennt man die Ausbildung der MVZ um die Prozesszone. Am Rand der MVZ bilden sich flüssige Zersetzungsprodukte.

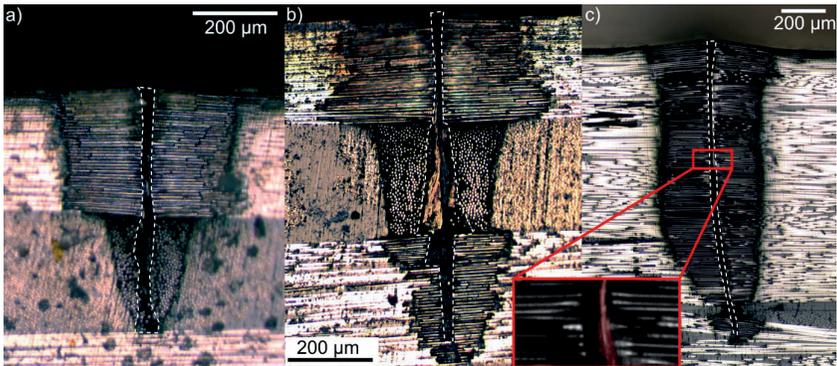


Bild 3.17: Aufnahmen von Querschliffen erzeugter Nuten. a) Nut in bidirektionalem CFK nach 6 Überfahrten, $H_0=43 \text{ J/cm}^2$, b) Nut in bidirektionalem CFK nach 15 Überfahrten, $H_0=43 \text{ J/cm}^2$, c) Nut in unidirektionalem CFK nach 25 Überfahrten, $H_0=43 \text{ J/cm}^2$.

Nach Betrachtung der in Bild 3.17 dargestellten Querschliffe lassen sich mehrere Mechanismen identifizieren, welche zur Reduktion der Abtragsrate bei Bearbeitung des Materials parallel zu den Carbonfasern unter Ausbildung einer MVZ führen können. Durch die Ausbildung einer MVZ verlieren die Carbonfasern, wie bereits in Abschnitt 3.2 gezeigt, ihre örtliche Fixierung. So kann es zu einer seitlichen Bewegung der Carbonfasern in den Strahlweg kommen, wodurch der Nutgrund abgeschirmt und der Effekt der Reflektion von Strahlung quer zur Carbonfaserachse verstärkt wird. Daraus folgt die in den Bildern 3.17a und b zu sehende Aufweitung der Nut in der Carbonfaserlage mit parallel zur Nut orientierten Carbonfasern. Die Aufweitung der Nut durch lateral gestreute Strahlung kann sich dabei bis in die dritte Carbonfaserlage fort-

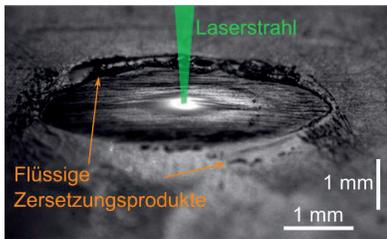


Bild 3.18: CFK Oberfläche während eines Perkussionsbohrprozesses mit den Prozessparametern: $P=22$ W, $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_r=33$ μ m, $M^2<1,1$, zirkuläre Polarisierung.

setzen, wie in Bild 3.17b zu sehen. Des Weiteren findet sich, wie ebenfalls in Bild 3.17b zu sehen, innerhalb der Nut in der zweiten Carbonfaserlage viel wiedererstarrtes Material, welches die Strahlausbreitung beeinträchtigen kann. Die unregelmäßig ausgebildete Nut erschwert vermutlich das Abströmen des sublimierten Materials bzw. der flüssigen Zersetzungsprodukte, wodurch diese in der Nut wiedererstarren. All dies wirkt sich nachteilig auf den Tiefenfortschritt beim Laserabtrag von CFK aus.

Wird ausschließlich senkrecht zu den Carbonfasern abgetragen, wie beispielsweise in Bild 3.17c für ein unidirektionales CFK Material zu sehen, so lassen sich diese Mechanismen nicht beobachten. Die Carbonfasern sind trotz Ausbildung einer MVZ ausreichend gut im verbleibenden Matrixmaterial fixiert und es bildet sich eine gleichmäßige und schmale Nut aus. Es finden sich lediglich dünnsschichtige Ablagerungen entlang der gesamten Nutwand wieder, welche die Strahlausbreitung scheinbar nicht wesentlich beeinträchtigen. Diese dünnsschichtigen Ablagerungen sind in Bild 3.17 in der Vergrößerung rot markiert.

4 Beeinflussung des Abtragprozesses durch Oxidation der kohlenstoffhaltigen Anteile von CFK⁴

Die beiden Verbundkomponenten von CFK, sowohl die Carbonfasern als auch das Matrixmaterial, reagieren bei ausreichend hohen Temperaturen mit Sauerstoff. Es ist somit ein Einfluss des Sauerstoffanteils des Umgebungsmediums auf den Laserabtragprozess zu erwarten. Einleitend wird nun zunächst ein Blick auf das allgemeine Oxidationsverhalten der Verbundpartner geworfen und anschließend auf den Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Laserbearbeitungsprozess von CFK eingegangen.

4.1 Das Oxidationsverhalten der Verbundpartner

4.1.1 Das Oxidationsverhalten von Carbonfasern

Ein zur Oberflächenbehandlung von Carbonfasern gängiges Verfahren ist die Oxidation der Carbonfasern [2]. Dabei werden die Carbonfasern über einen Zeitraum von mehreren Sekunden bis typischerweise mehreren Stunden in einer Atmosphäre von Luft, Sauerstoff verdünnt mit verschiedenen Inertgasen oder Kohlendioxid bei Temperaturen bis zu 1500°C wärmebehandelt [2]. Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Oxidationsraten und Oxidationsmechanismen lassen sich allerdings nicht direkt auf die Laserbearbeitung des Materials anwenden. Bei der Laserbearbeitung von CFK findet der Energieeintrag und somit die Erwärmung des Materials mit Zeitdauern von deutlich unter einer Sekunde bis hin zu wenigen Femtosekunden statt. Die erzielten Temperaturen in der Wechselwirkungszone werden durch die Verdampfungstemperatur $T_{VC} = 3650\text{ °C}$ der Carbonfasern, siehe Abschnitt 2.3.2, vorgegeben und liegen somit deutlich über den bei der Oberflächenbehandlung eingesetzten Temperaturen. Trotz der unterschiedlichen Zeit- und Temperaturregime lassen sich einige qualitative Zusammenhänge aus der Literatur übernehmen, welche voraussichtlich auch für die Laserbearbeitung des Materials zutreffen.

Die Reaktionsgleichungen [75] bei der Oxidation von Carbonfasern lauten



und



⁴ Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren in Teilen auf den vom Autor mitverfassten Veröffentlichungen [113] und [108].

Reaktionsprodukte sind also CO und CO₂. Die Aktivierungsenergie für das Abbrennen der Carbonfasern wird mit 140 kJ/mol angegeben [75]. Dies entspricht einer volumenspezifischen Aktivierungsenergie von ungefähr $E_A=21 \text{ J/mm}^3$ bei einer Dichte der Carbonfasern von $\rho_C=1,8 \text{ g/cm}^3$. Die volumenspezifische Energie zum Verdampfen der Carbonfasern ist ungefähr $E_{VC}=84 \text{ J/mm}^3$, berechnet mit Gl. (2.3) und den in Abschnitt 2.3 genannten Stoffwerten. Bei Vorhandensein von Sauerstoff ist zum Abbrennen der Carbonfasern somit nur ein Viertel der für eine vollständige Verdampfung benötigten Energie notwendig. Hinsichtlich der Oxidationsrate lässt sich feststellen, dass diese mit steigender Temperatur zunimmt [75]. In [75] wird berichtet, dass bei einer Temperatur von 550°C der Durchmesser der Carbonfasern nach 350 Minuten von 8 µm auf 7 µm reduziert wurde, während bei einer Temperatur von 860°C ein vollständiges Abbrennen der Carbonfasern nach ca. 11 Minuten beobachtet wurde. Oxidationsraten für Temperaturen nahe der Verdampfungstemperatur sind in der Literatur nicht verfügbar. Das Zunehmen der Oxidationsrate wurde nicht nur für Carbonfasern, sondern auch bei der Oxidation von Graphit beobachtet [76]. Für Graphit nimmt die Oxidationsrate besonders für hohe Temperaturen über 800°C aufgrund der vermehrten Bildung von CO stark zu [76], was aufgrund der großen Ähnlichkeit von Graphit mit turbostratischem Kohlenstoff auch für Carbonfasern erwartet werden kann. In [77] wird berichtet, dass exotherme Oxidationsprozesse hauptsächlich von Fehlstellen im Graphitgitter ausgehen. Die aus turbostratischem Kohlenstoff bestehenden Carbonfasern weisen eine Vielzahl von Gitterdefekten auf, welche als Ausgangspunkte für den Oxidationsprozess dienen können.

4.1.2 Das Oxidationsverhalten von Epoxidharzen

Eine erste thermische Beeinflussung der Epoxidharze findet bei der Glasübergangstemperatur statt. Beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur wird aus dem harten Epoxidharz eine zähflüssige Masse [78]. Für das Epoxidharz HexFlow RTM6 wird 180°C als Glasübergangstemperatur angegeben und 80°C für das Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135. Die thermische Zersetzung von Epoxidharzen beginnt bei 250°C-450°C [79]. Typischerweise beginnt die thermische Zersetzung von Epoxidharzen mit einer Dehydration der sekundären Alkohole, was zur Bildung von Vinylother führt [80]. Mit fortschreitender Zersetzung entstehen leichte, entzündbare Gase, Allylalkohol, Acetone und verschiedene Kohlenwasserstoffe [80]. Bei Anwesenheit von Sauerstoff kommt es zu einer Verbrennung der Epoxidharze und der Zersetzungsprodukte. Dabei entstehen als Hauptprodukte Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Kohlenstoff und Wasser [79]. Des Weiteren entstehen geringe Mengen von Phenol, Formaldehyd, Ameisensäure, Aceton und Kohlenwasserstoffen [79]. Über den Zersetzungsprozess von Epoxidharz in einer Atmosphäre mit verschiedenen Anteilen an Stickstoff und Sauerstoff wird in [81] berichtet. Es wurde gezeigt, dass die thermische Zersetzung bei Anwesenheit von 20% Sauerstoff bereits ab ungefähr 230°C beginnt,

während in einer Atmosphäre aus purem Stickstoff die thermische Zersetzung erst ab ca. 407°C stattfindet. Des Weiteren nimmt mit steigendem Sauerstoffanteil auch die Aktivierungsenergie für den Zersetzungsprozess des Epoxidharzes ab, von ungefähr 172 kJ/mol in purer Stickstoffatmosphäre zu ungefähr 130 kJ/mol bei einem Sauerstoffanteil von 20% [81]. Die Anwesenheit von Sauerstoff vermindert also die thermische Stabilität von Epoxidharzen signifikant [81].

4.1.3 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Laserabtragprozess von CFK - Stand der Technik

In der Literatur wird über den Einfluss von Luft [47], [82], Argon [47], [82], CO₂ [83], Stickstoff [83] und verschiedenen Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen [84] auf die Qualität und Geschwindigkeit des Laserbearbeitungsprozesses von CFK berichtet. In [47] wird die thermische Schädigung und die Tiefe der abgetragenen Nut bei Einsatz von Luft oder Argon als Prozessgas betrachtet. Dabei wurde festgestellt, dass bei Argon als Prozessgas die thermische Schädigung im Vergleich zu Luft als Prozessgas zwar reduziert werden konnte, allerdings auch die Tiefe der Nut abnahm. Eine Reduktion der thermischen Schädigung bei Einsatz von Argon als Prozessgas im Vergleich zu Luft wurde auch bei den in [82] vorgestellten Untersuchungen beobachtet. In [83] wird über den Einfluss der Schutzgase CO₂ und Stickstoff berichtet. Bei Einsatz von CO₂ als Schutzgas konnte mit höherem Durchfluss die an der Werkstückoberfläche gemessene thermische Schädigung stetig reduziert werden. Wird Stickstoff als Schutzgas verwendet, so kann mit erhöhtem Durchfluss teilweise ein Anstieg der thermischen Schädigung beobachtet werden. Des Weiteren wird das Material nicht mehr vollständig durchtrennt, obwohl dies bei Einsatz des Schutzgases CO₂ bei gleichen Prozessparametern der Fall gewesen ist. Die Ursachen für diese Effekte sind noch unklar, vermutet wird die Ausbildung eines Plasmas. In [84] wird der Einfluss von Stickstoff-Sauerstoff Gemischen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen auf den Laser-schneidprozess behandelt. Es wurde ein positiver Effekt des Sauerstoffs auf die Materialabtragsrate festgestellt. Diese war mit reinem Sauerstoff als Prozessgas um einen Faktor zwei größer als mit reinem Stickstoff bei gleichem Gasdruck. Dabei verhielt sich die Materialabtragsrate linear mit dem Sauerstoffanteil. Des Weiteren wurde ein Minimum der an der Oberfläche gemessenen thermischen Schädigung bei einem Sauerstoffanteil von 12,5% beobachtet. Ab einem Sauerstoffanteil von mehr als 37,5% wurde die gleiche thermische Schädigung gemessen wie im Falle reinen Stickstoffs.

4.2 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Abtragprozess flacher Nuten

Wie in [83] gezeigt, kann eine Reduktion der thermischen Schädigung mit zunehmendem Stickstoff- bzw. CO₂-Gasstrom beobachtet werden, was auf einen kühlenden Ef-

fekt der Strömung zurückgeführt wird. Um die Effekte unterschiedlicher Umgebungsmedien ohne den Einfluss einer möglicherweise kühlenden Gasströmung zu untersuchen, wurde in den in diesem Abschnitt vorgestellten Experimenten in einer abgeschlossenen Kammer gearbeitet. Diese konnte bis zu einem Druck von 1 mbar evakuiert werden und anschließend mit Luft, Stickstoff oder Helium geflutet werden. Diese Prozedur wurde dreimal wiederholt, um eine reine Atmosphäre des jeweiligen Gases sicher zu stellen. Es wurden Nuten mit einer einzelnen Überfahrt des Laserstrahls über das Material erzeugt. Aufgrund einer starken Rauchentwicklung während des Prozesses wurde die Kammer nach jedem Abtragprozess evakuiert und wieder neu mit dem entsprechenden Prozessmedium geflutet. Das Fenster der Kammer, durch welches der Laserstrahl auf die Werkstückoberfläche fokussiert wurde, hatte eine Antireflex-Beschichtung für die Laserwellenlänge. Es wurde nach jeder Versuchsreihe (1 Umgebungsmedium, 15 Nuten) gereinigt, um die Verschmutzung durch entstandene Ablationsprodukte zu minimieren. Messungen der Fokuslage vor und nach einer Versuchsreihe zeigten keinen störenden Einfluss von Verunreinigungen.

Das im Rahmen der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen verwendete Material war ein Verbund aus Tenax 12K HTS 800 Fasern und dem Epoxidharz HexFlow RTM6 als Matrixmaterial. Der Anteil der Carbonfasern im CFK betrug 60%. Beim verwendeten Lasersystem handelte es sich um ein gütegeschaltetes ns-Laser System. Die Laserstrahlung hatte eine Wellenlänge von 1047 nm und eine Strahlqualität von $M^2 < 1,3$. Die eingestellte Repetitionsrate betrug 4 kHz, die Pulsdauer 20 ns. Der Strahlradius des kollimierten Strahls war 2,33 mm. Der Strahl wurde auf einen Fokussdurchmesser von 37 μm fokussiert. Es wurden fünf verschiedene Pulsenergien verwendet: 0,33 mJ, 0,66 mJ, 1,32 mJ, 1,96 mJ und 2,64 mJ. Dies führte zu einer entsprechenden Änderung der mittleren Laserleistung. Das Werkstück wurde mit einer Geschwindigkeit von 960 mm/min bewegt. Dies entspricht einem örtlichen Pulsüberlapp von 90%. Pro Parametersatz wurden drei Nuten erzeugt und untersucht.

Die Breite der Nut an der Oberfläche sowie die Tiefe der Nut wurden in Querschliffen vermessen, wie beispielhaft in Bild 4.1a dargestellt. Die exemplarisch dargestellte Nut hat ein dreieckiges Profil, womit sich aus Nuttiefe t_{Nut} und Nutbreite b_{Nut} die Querschnittsfläche $A_{\text{Nut}} = t_{\text{Nut}} \cdot b_{\text{Nut}} / 2$ berechnen lässt. Die Matrixverdampfungszone wurde in Aufnahmen der Oberfläche nach der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Messung an der Oberfläche“ bestimmt. Die MVZ ist beispielhaft in Bild 4.1b in einer Aufnahme der Werkstückoberfläche zu sehen.

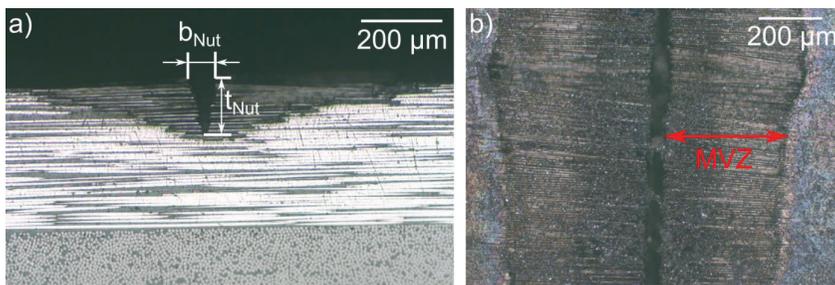


Bild 4.1: a) Bild eines Querschliffs einer innerhalb der Versuchskammer erzeugten Nut. Das Umgebungsmedium war Luft. b) Aufnahme der Werkstückoberfläche. Links und rechts der Nut ist die Matrixverdampfungszone zu sehen. Prozessparameter: $P=8,06\ \text{W}$, $f_p=4\ \text{kHz}$, $\lambda=1047\ \text{nm}$, $\tau=20\ \text{ns}$, $d_r=37\ \mu\text{m}$, $M^2=1,3$, $v=960\ \text{mm/min}$, zirkulare Polarisation, Umgebungsmedium Luft.

4.2.1 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf die Ausdehnung der MVZ

Die Ausdehnung der Matrixverdampfungszone als Funktion der Pulsenergie ist in Bild 4.2 für die beim Laserabtrag von CFK in den Umgebungsmedien Luft, Stickstoff, Argon und Helium jeweils bei einem Druck von ungefähr 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar erzeugten Nuten gezeigt. Die Ausdehnung der MVZ nimmt mit steigender Pulsenergie annähernd linear zu. Zu hohen Pulsenergien hin und damit

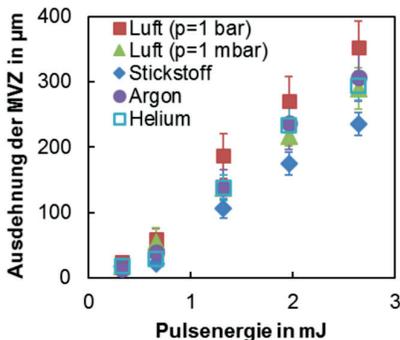


Bild 4.2: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsenergie für die Umgebungsmedien Luft, Stickstoff, Argon und Helium jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie für Luft bei einem Druck von 1 mbar. Prozessparameter: $f_p=4\ \text{kHz}$, $\lambda=1047\ \text{nm}$, $\tau=20\ \text{ns}$, $d_r=37\ \mu\text{m}$, $M^2=1,3$, $v=960\ \text{mm/min}$, zirkulare Polarisation.

auch für höhere Energieeinträge macht sich ein Einfluss des Umgebungsmediums bemerkbar. Beim Abtrag des Materials mit einer Pulsenergie von $2,64\ \text{mJ}$ in Atmosphären aus Argon sowie Helium als auch in Luft bei einem Druck von 1 mbar hat die MVZ eine Ausdehnung von ungefähr $300\ \mu\text{m}$. Im Vergleich dazu ist die Ausdehnung der MVZ der in einer Stickstoffatmosphäre erzeugten Nut mit $235\ \mu\text{m}$ kleiner. Bei Einsatz von Luft bei Atmosphärendruck wird eine um 17% größere Ausdehnung der MVZ von $352\ \mu\text{m}$ gemessen. Die Vergrößerung der MVZ in Luft bei Atmosphärendruck deutet auf einen Einfluss des in der Luft enthaltenen Sauerstoffs hin. Dabei kann es zu einem Brennen des Matrixmaterials kommen oder zu einer exothermen Oxi-

dation der Carbonfasern, welche zu einer zusätzlichen Erwärmung des Materials führt.

4.2.2 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf die Breite und Tiefe der erzeugten Nuten

Bei einer Oxidation der Carbonfasern ist zu erwarten, dass um die Prozesszone, aufgrund der dort herrschenden hohen Temperaturen welche eine Oxidation begünstigen, ein größeres Carbonfaservolumen entfernt wird. Eine Verbreiterung der erzeugten Nut wäre die Folge. Die Breite der erzeugten Nut als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag des Materials sowohl in verschiedenen Atmosphären jeweils bei einem Druck von ungefähr 1 bar als auch in Luft bei einem Druck von 1 mbar ist in Bild 4.3a gezeigt. Für geringe Pulsenergien (0,33 mJ und 0,66 mJ) wird die Breite der Nut durch den Fokusbereich ($d_f=37\ \mu\text{m}$) bestimmt. Für Pulsenergien von 1,32 mJ und größer nimmt die Nutbreite der bei einem Abtrag des Materials in Luft bei Atmosphärendruck erzeugten Nuten deutlich zu; bis auf 53 μm bei einer Pulsenergie von 2,64 mJ. Für die anderen Umgebungsmedien sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar hat die Pulsenergie keinen Einfluss auf die Breite der erzeugten Nuten. Die zusätzliche Verbreiterung der Nut bei Anwesenheit von Sauerstoff deutet auf eine Oxidation der Carbonfasern hin.

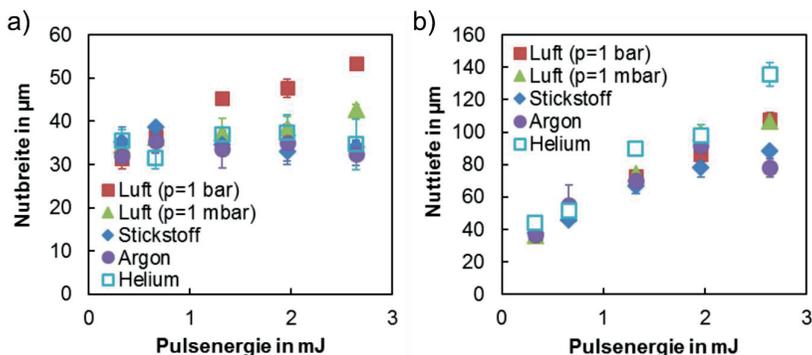


Bild 4.3: a) Breite der erzeugten Nuten als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag in den Umgebungsmedien Luft, Stickstoff, Argon und Helium jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar. b) Tiefe der erzeugten Nuten als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag in den Umgebungsmedien Luft, Stickstoff, Argon und Helium jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar. Prozessparameter: $f_p=4\ \text{kHz}$, $\lambda=1047\ \text{nm}$, $\tau=20\ \text{ns}$, $d_f=37\ \mu\text{m}$, $M^2=1,3$, $v=960\ \text{mm/min}$, zirkulare Polarisation.

Beim Abtrag des Materials in Luft bei Atmosphärendruck mit Pulsenergien von 1,32 mJ und größer kann nicht nur eine Verbreiterung der Nut festgestellt werden, sondern auch eine Vergrößerung der Ausdehnung MVZ wie in Bild 4.2 zu sehen. Ob sich die Oxidation der Carbonfasern auf die thermische Schädigung auswirkt oder ein

direktes Verbrennen des Matrixmaterials stattfindet, kann hier noch nicht abschließend geklärt werden.

In Bild 4.3b ist die Tiefe der erzeugten Nut als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag des Materials in den verschiedenen Umgebungsmedien jeweils bei einem Druck von ungefähr 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar dargestellt. Mit zunehmender Pulsenergie können tiefere Nuten erzeugt werden. Dabei kann eine starke Streuung der gemessenen Nuttiefen insbesondere für hohe Pulsenergien beobachtet werden. So wurde die Nut beim Abtrag in einer Atmosphäre aus Helium mit einer Pulsenergie von 2,64 mJ ungefähr 135 μm tief, während in Argon als Umgebungsmedium lediglich eine Nuttiefe von 78 μm erreicht wurde. Beim Abtrag mit einer Pulsenergie von 1,96 mJ wurden dagegen für beide Umgebungsmedien ähnliche Nuttiefen erzielt. Beim Laserabtrag von CFK zur Erzeugung flacher Nuten mit einer einzelnen Überfahrt kann also kein eindeutiger Einfluss des Umgebungsmediums auf die Nuttiefe festgestellt werden. Unregelmäßigkeiten im Materialaufbau scheinen hier einen deutlich größeren Einfluss zu haben.

4.2.3 Energetische Betrachtungen

Aus der Breite und Tiefe der erzeugten Nuten kann die Querschnittsfläche A_{Nut} berechnet werden. Diese ist in Bild 4.4a als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag des Materials sowohl in verschiedenen Umgebungsmedien jeweils bei einem Druck von ungefähr 1 bar als auch in Luft bei einem Druck von 1 mbar dargestellt. Die Querschnittsfläche korreliert dabei mit dem abgetragenen Volumen. Wie man in Bild 4.4a sieht, ist die Querschnittsfläche der erzeugten Nut beim Abtrag des Materials mit einer Pulsenergie von 2,64 mJ in einer Atmosphäre aus Luft bei Atmosphärendruck ungefähr 2880 μm^2 groß. Im Vergleich zur Querschnittsfläche der erzeugten Nut bei einem Abtrag in Helium oder in Luft bei einem Druck von 1 mbar mit derselben Pulsenergie ist diese in Luft bei Atmosphärendruck somit ca. 14% größer. Diese Zunahme ist hauptsächlich auf die in Bild 4.3a zu sehende Zunahme der Nutbreite zurückzuführen. Aus der Querschnittsfläche lässt sich die in Bild 4.4b als Funktion der Pulsenergie dargestellte volumenspezifische Verdampfungsenergie

$$E_{V,exp} = \frac{P}{A_{\text{Nut}} \cdot v} \quad (4.3)$$

berechnen. Sie gibt an, wieviel eingestrahle optische Energie im Experiment zur Verdampfung eines gewissen Volumens CFK benötigt wurde. Erst beim Abtrag des Materials mit Pulsenergien von 1,32 mJ oder größer ist ein signifikanter Einfluss des Umgebungsmediums auf die volumenspezifische Verdampfungsenergie beobachtbar. Wird in Luft bei Atmosphärendruck mit einer Pulsenergie von 2,64 mJ bearbeitet, so ist die volumenspezifische Verdampfungsenergie um 19% geringer als bei Bearbei-

tung des Materials in Helium oder in Luft bei einem Druck von 1 mbar. Durch Oxidation der Carbonfasern wird dem Prozess also zusätzliche Energie zur Verfügung gestellt, welche bezüglich des verdampften Volumens äquivalent zu maximal 20% der eingestrahlenen optischen Energie ist.

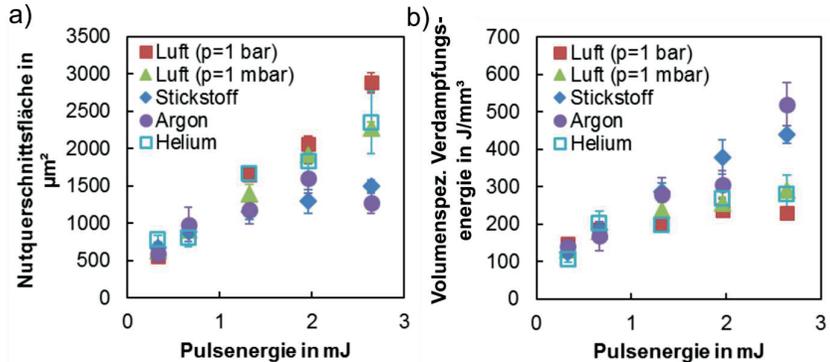


Bild 4.4: a) Querschnittsfläche der erzeugten Nuten als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag in Luft, Stickstoff, Argon und Helium jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar. b) Volumenspezifische Verdampfungsenergie der erzeugten Nuten als Funktion der Pulsenergie beim Abtrag in Luft, Stickstoff, Argon und Helium jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 1 mbar. Prozessparameter: $f_p=4$ kHz, $\lambda=1047$ nm, $\tau=20$ ns, $d_f=37$ μm , $M^2=1,3$, $v=960$ mm/min, zirkulare Polarisation.

Werden Argon oder Stickstoff als Umgebungsmedien eingesetzt, so wird beim Abtrag des Materials mit hohen Pulsenergien verglichen mit den anderen Prozessgasen eine deutlich kleinere Nutquerschnittsfläche erreicht. In einer Argon Atmosphäre ist die Querschnittsfläche der Nut erzeugt mit einer Pulsenergie von 2,64 mJ um 46% kleiner als bei einem Abtrag in einer Heliumatmosphäre bzw. in Luft bei einem Druck von 1 mbar. Dies spiegelt sich auch in der in Bild 4.4b gezeigten volumenspezifischen Verdampfungsenergie wieder, welche für Argon als Umgebungsmedium um 85% größer ist als für Helium als Umgebungsmedium bzw. für Luft bei einem Druck von 1 mbar. Ähnliches gilt für Stickstoff als Umgebungsmedium. Die Ursache für die erhöhte volumenspezifische Verdampfungsenergie bei Verwendung von Argon oder Stickstoff ist noch nicht geklärt. Da sowohl Argon als auch Helium Edelgase sind, ist kein Einfluss einer chemischen Reaktion dieser mit dem CFK Material zu erwarten. Wie in Bild 4.2 zu sehen, nimmt die thermische Schädigung des Materials nicht zu, somit ist eine Umverteilung der eingestrahlenen Energie in das umliegende Material unwahrscheinlich. Möglich wären durch ein laserinduziertes Plasma hervorgerufene Effekte wie eine Absorption der Laserstrahlung im Plasma oder eine Beeinflussung des einfallenden Laserstrahls durch Brechungsindexänderungen. Die Ionisierungsenergie, welche zur Abtrennung des am schwächsten gebundenen Elektrons aufge-

wendet werden muss, ist für Argon und Stickstoff mit 15,755 eV und 14,54 eV deutlich niedriger als die Ionisierungsenergie von Helium mit 24,58 eV [85]. Dies begünstigt die Entstehung eines Plasmas, allerdings wurden im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen keine Messungen zum Nachweis eines Plasmas unternommen.

4.3 Einfluss verschiedener Umgebungsmedien auf den Abtragprozess tiefer Nuten

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der Einfluss verschiedener Umgebungsmedien jeweils bei einem Druck von ungefähr 1 bar sowie von Luft bei einem Druck von 1 mbar auf den Abtragprozess flacher Nuten diskutiert. Dabei wurden Energiedichten weit oberhalb der Abtragschwelle eingesetzt. Beispielsweise wird bei der niedrigsten Pulsenergie von 0,33 mJ eine maximale Energiedichte im Fokus von $H_0=61,4 \text{ J/cm}^2$ erreicht, während die Abtragschwelle für den Abtrag von CFK $H_{th}=0,713 \text{ J/cm}^2$ ist [86]. Des Weiteren traten aufgrund der geringen Nuttiefe oberflächennahe Effekte besonders in den Vordergrund.

Im Folgenden werden Untersuchungsergebnisse zum Laserabtrag von CFK mit den Umgebungsmedien Luft, Stickstoff und Sauerstoff zur Erzeugung tiefer Nuten vorgestellt. Es wurden zwei verschiedene CFK Materialien verwendet. Zum einen handelte es sich um ein CFK Material mit bidirektionaler Anordnung der Carbonfasern ($0^\circ/90^\circ$) mit dem Epoxidharz HexFlow RTM6 als Matrixmaterial. Die einzelnen Carbonfaserlagen hatten eine Dicke von ungefähr 300 μm . Zum anderen wurde ein CFK Material mit unidirektionaler Anordnung der Carbonfasern verwendet. Das Matrixmaterial war in dem Fall das Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135. Die Carbonfasern waren in beiden Fällen Tenax 12K HTS 800 Fasern.

Das verwendete Lasersystem emittierte Strahlung mit einer Wellenlänge von 515 nm. Die Pulse hatten eine Dauer von 8 ps und der Strahl wies eine Strahlqualität von $M^2 < 1,1$ auf. Die mittlere Leistung gemessen am Werkstück betrug 27 W bei einer maximalen Pulsfrequenz von 800 kHz. Der Fokusbereich auf dem Werkstück war 14 μm ($1/e^2$ Intensitätsniveau). Der Laserstrahl war linear polarisiert, wobei die Polarisationsrichtung senkrecht zur Vorschubrichtung und parallel zur Ausrichtung der Carbonfasern in der obersten Carbonfaserlage orientiert war. Die Vorschubgeschwindigkeit, mit der das Werkstück bewegt wurde, war 100 mm/s. Dabei wurde mit Mehrfachüberfahrten gearbeitet, wobei die Anzahl an Überfahrten variiert wurde, um Nuten unterschiedlicher Tiefe zu erzeugen. Die Bewegungsrichtung war stets senkrecht zur Orientierung der Carbonfasern in der obersten Faserlage. Oberhalb der Werkstücke befand sich in einem Abstand von 0,5 mm eine Düse mit einem Durchmesser von 1 mm, mit welcher das Prozessgas parallel zum Bearbeitungsstrahl auf die Materialoberfläche geführt wurde. Dabei wurden reiner Sauerstoff oder reiner Stickstoff mit

einem definierten Durchfluss auf die Prozesszone geblasen. Zum Vergleich wurde das Material in Luft ohne den Einsatz der Düse bearbeitet. Alternativ wurde in einer Prozesskammer bearbeitet, welche bis zu einem Luftdruck von 2 mbar evakuiert werden konnte. Die Kammer konnte nach deren Evakuierung mit reinem Stickstoff, reinem Sauerstoff oder Luft geflutet werden. Aufgrund einer starken Rauchentwicklung in der Kammer wurde diese nach jedem Abtragprozess evakuiert und wieder neu mit dem entsprechenden Prozessmedium geflutet. Die Analyse der erzeugten Nuten fand im Querschliff statt. Die Ausdehnung der MVZ wurde nach der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“ ausgewertet.

4.3.1 Einfluss verschiedener Prozessgasströme auf den Tiefenfortschritt beim Laserabtrag von CFK

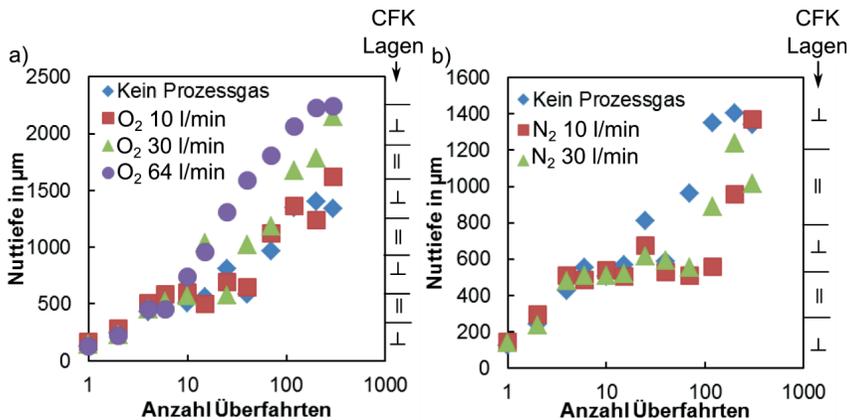


Bild 4.5: Zu sehen ist die Tiefe der erzeugten Nut als Funktion der Anzahl an Überfahrten. Dabei wurde das Material in normaler Umgebungsluft als auch mit Sauerstoff (a) bzw. Stickstoff (b) als Prozessgase mit unterschiedlichen Durchflussraten abgetragen. Prozessparameter: $P=27$ W, $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_r=14$ μ m, $M^2<1,1$, $v=100$ mm/s, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern in der obersten Lage.

Die Nuttiefe als Funktion der Anzahl an Überfahrten N_S für verschiedene Prozessgasströme ist in Bild 4.5 zu sehen. Dabei wurde zum einen Sauerstoff mit einem Durchfluss von 10 l/min, 30 l/min und 64 l/min (siehe Bild 4.5a) und zum anderen Stickstoff mit einem Durchfluss von 10 l/min und 30 l/min (siehe Bild 4.5b) als Prozessgas verwendet. Um den Einfluss des Umgebungsmediums beurteilen zu können, wurden als Referenz Nuten in Umgebungsluft ohne Gasstrom abgetragen. Die entsprechenden Datenpunkte sind in Bild 4.5 als blaue Rauten dargestellt. Die Orientierung der Carbonfaserlagen relativ zur Vorschubrichtung ist seitlich der Grafiken skizziert. In den frühen Phasen des Abtragprozesses ($N_S < 10$) ist kein Einfluss des Umgebungsmediums auf die resultierende Nuttiefe zu beobachten. Dies ändert sich mit steigender An-

zahl an Überfahrten. Bei den verwendeten Prozessparametern kommt es zu einer temporären Verlangsamung des Abtragprozess und einer Nutverbreiterung in einer Tiefe von ungefähr $600\ \mu\text{m}$, wie bereits in Abschnitt 3.3 gezeigt. Die Verlangsamung des Abtragprozess ist in den Bildern 4.5a und b für die in Umgebungsluft erzeugten Nuten zwischen 4 und 15 Überfahrten zu sehen. Wird Stickstoff als Prozessgas verwendet, ist diese Verlangsamung des Tiefenfortschritts, wie in Bild 4.5b zu beobachten, noch stärker ausgeprägt. Bei einem Stickstofffluss von $10\ \text{l/min}$ stagniert die Nuttiefe zwischen 4 bis 120 Überfahrten. Bei einem Stickstofffluss von $30\ \text{l/min}$ stagniert die Nuttiefe zwischen 4 und 70 Überfahrten und es kann ein zweite Verlangsamung des Tiefenfortschritts zwischen 120 und 300 Überfahrten beobachtet werden. Im Bereich der zweiten Verlangsamung des Tiefenfortschritts schwankt die Nuttiefe zwischen $900\ \mu\text{m}$ und $1200\ \mu\text{m}$ (man beachte die logarithmische Skalierung der Abszisse). Im Gegensatz dazu unterdrückt ein ausreichend großer Sauerstoffstrom die Verlangsamung des Abtragprozess. Bei einem Sauerstofffluss von $64\ \text{l/min}$ kann eine Verlangsamung des Tiefenfortschritts nahezu vollständig vermieden werden. Der positive Effekt des Prozessgases Sauerstoff nimmt für niedrigere Durchflüsse jedoch ab.

4.3.2 Einfluss verschiedener Prozessgase ohne Gasstrom auf den Tiefenfortschritt beim Laserabtrag von CFK

Um den Einfluss des Gasstroms an sich auf den Abtragprozess zu vermeiden, wurden zusätzliche Nuten innerhalb einer Prozesskammer erzeugt. Die Nuttiefe als Funktion der Anzahl an Überfahrten für die Umgebungsmedien Luft, Stickstoff und Sauerstoff jeweils bei einem Druck von ungefähr 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 2 mbar ist in Bild 4.6 zu sehen. Es zeigt sich beim Abtrag in der Prozesskammer ein ähnliches Verhalten wie bei Verwendung einer Prozessgas-Düse. Zu Beginn des Abtragprozess wird für die Umgebungsmedien Luft, Stickstoff und Sauerstoff jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 2 mbar eine ähnliche Nuttiefe erreicht. In einer Tiefe von ungefähr $600\ \mu\text{m}$ verlangsamt sich der Abtragprozess in Luft und Stickstoff jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie in Luft bei einem Druck von 2 mbar wie auch zuvor beobachtet. In einer Sauerstoffatmosphäre verlangsamt sich der Tiefenfortschritt nicht und es werden die größten Nuttiefen erreicht (ca. $1500\ \mu\text{m}$ nach 200 Überfahrten). Wird in Luft bei Atmosphärendruck abgetragen, hat die Nut nach 200 Überfahrten eine Tiefe von ungefähr $870\ \mu\text{m}$, während beim Abtrag mit Stickstoff als Umgebungsmedium lediglich ungefähr $620\ \mu\text{m}$ erreicht werden. Bei Luft mit einem Druck von 2 mbar wird eine Tiefe von ca. $730\ \mu\text{m}$ nach 200 Überfahrten erreicht. Mit steigendem Sauerstoffanteil werden also größere Nuttiefen erreicht, während in reinem Stickstoff eine Abnahme der Nuttiefe verglichen mit dem Materialabtrag in Luft bei einem Druck von 2 mbar beobachtet wird.

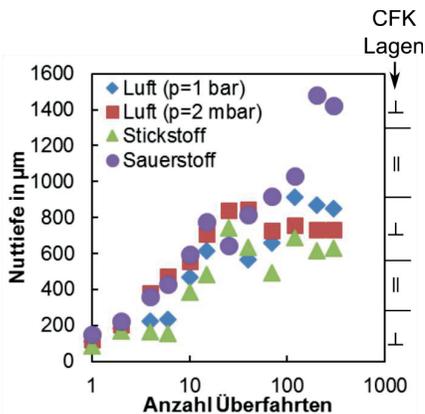


Bild 4.6: Nutttiefe als Funktion der Anzahl an Überfahrten. Es wurde innerhalb einer Prozesskammer in Atmosphären von Luft, Stickstoff und Sauerstoff jeweils bei einem Druck von 1 bar sowie Luft bei einem Druck von 2 mbar bearbeitet. Prozessparameter: $P=27$ W, $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=14$ µm, $M^2<1,1$, $v=100$ mm/s, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern in der obersten Lage.

Der Abtragprozess innerhalb der Prozesskammer ist generell ineffizienter als außerhalb. Dies zeigt ein Vergleich der in einer Luftatmosphäre erreichten Nutttiefen beim Laserabtrag innerhalb der Kammer (vgl. Bild 4.6) mit denen beim Laserabtrag außerhalb der Kammer (vgl. Bild 4.5). Ursache könnte die starke Rauchentwicklung während des Abtragprozesses sein. Dieser in der Prozesskammer eingeschlossene Rauch kann zu negativen Effekten wie der Absorption von Laserstrahlung im Rauch, einer Verschmutzung des Fensters, durch welches die Laserstrahlung in die Versuchskammer eintritt, und der Ablenkung bzw. Defokussierung des Laserstrahls aufgrund der Ausbildung einer thermischen Linse führen.

4.3.3 Beobachtung der Rauchentwicklung für verschiedene Umgebungsmedien

Um einen Eindruck von der beim Laserabtrag auftretenden Rauchentwicklung zu vermitteln, sind in Bild 4.7 drei Aufnahmen des Inneren der Prozesskammer nach Erzeugung einer einzelnen 11 mm langen Nut mit einer einzelnen Überfahrt des Laserstrahls zu sehen. Die Aufnahmen entstanden im Rahmen der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Experimente, die mittlere Laserleistung betrug $P=10,5$ W. In Bild 4.7a ist das Umgebungsmedium Luft bei Atmosphärendruck, in Bild 4.7b wurde ebenfalls in Luft bei einem Umgebungsdruck von 1 mbar abgetragen und in Bild 4.7c wurde Stickstoff bei einem Druck von 1 bar als Umgebungsmedium verwendet. Die stärkste Rauchentwicklung lässt sich bei Verwendung von Stickstoff als Umgebungsmedium beobachten. Deutlich weniger in der Prozesskammer schwebender Rauch kann in Luft bei einem Druck von 1 mbar beobachtet werden. Die bei geringem Luftdruck erzielte größere Nutttiefe bei einer hohen Anzahl an Überfahrten (vgl. Bild 4.6) könnte somit durch einen geringeren Einfluss des Prozessrauchs, bedingt durch eine geringere Anzahl an Partikeln pro Volumen, welche mit der Laserstrahlung wechselwirken können, erklärt werden. In einer Atmosphäre bestehend aus Luft bei Atmosphärendruck entwickelt

sich ebenfalls weniger Rauch als in einer Stickstoff-Atmosphäre. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff begünstigt vermutlich eine Oxidation der Ablationsprodukte. Zusätzlich begünstigt der Sauerstoff den Abtragprozess, was zu einer größeren Nuttiefe führt (vgl. Bild 4.6).

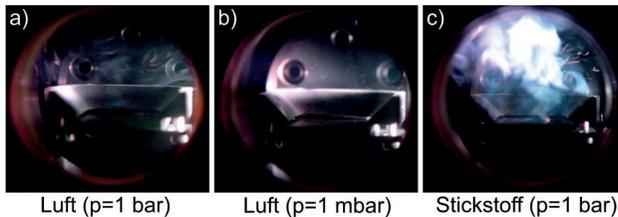


Bild 4.7: Das Innere der Vakuumkammer nach der Erzeugung einer Nut mit einer Überfahrt. a) Umgebungsmedium Luft, $p=1$ bar. b) Umgebungsmedium Luft, $p=1$ mbar. c) Umgebungsmedium Stickstoff, $p=1$ bar. Prozessparameter: $P=10,5$ W, $f_p=4$ kHz, $\lambda=1047$ nm, $\tau=20$ ns, $d_f=37$ μ m, $M^2=1,3$, $v=960$ mm/min, zirkulare Polarisation.

Die gezeigten Experimente bestätigen, dass Sauerstoff entweder als Teil einer ruhenden Atmosphäre oder in einem zusätzlichen Gasstrom den Tiefenfortschritt beim Abtrag von CFK beschleunigt. Allerdings wird dieser Effekt erst ab einer gewissen Tiefe deutlich. Der für den Tiefenfortschritt vernachlässigbare Einfluss des Sauerstoffs zu Beginn des Abtragprozesses kann über die hohe Energiedichte des Laserstrahls an der Werkstückoberfläche weit oberhalb der Abtragschwelle erklärt werden. Der laserinduzierte Materialabtrag ist in dem Fall getrieben durch die direkte Verdampfung des Materials, welcher zu Beginn des Abtragprozesses sehr effizient ist. Mit zunehmender Tiefe der Nut nimmt die Energiedichte am Nutgrund ab, bis nach Erreichen der Abtragschwelle kein weiterer Tiefenfortschritt mehr stattfindet. Die zusätzlich durch die exotherme Oxidation des Materials bereitgestellte Reaktionsenergie führt zu einer Zunahme der Energiedichte am Nutgrund, womit das Material weiterhin abgetragen werden kann.

4.3.4 Einfluss eines Sauerstoffstroms auf die Abtragsrate von bidirektionalem CFK

Sauerstoff als Prozessgas führt beim Abtrag von CFK nicht nur zu einem beschleunigten Tiefenfortschritt, sondern wechselwirkt auch mit den beim Abtrag des Materials entstehenden Ablationsprodukten. Dies wirkt sich insbesondere bei der Bearbeitung von bidirektional aufgebautem CFK positiv auf den Abtragprozess aus, was im Folgenden gezeigt wird. In Bild 4.8 ist die Abtragsrate als Funktion der Nuttiefe für den Laserabtrag von bidirektionalem CFK mit den Prozessgasen Sauerstoff (Durchfluss 64 l/min) und Stickstoff (Durchfluss 30 l/min) als auch für den Laserabtrag von unidirektionalem und bidirektionalem CFK in einer Luftatmosphäre dargestellt. Deutlich erkennt man beim Abtrag von bidirektionalem CFK in Luft oder mit Stickstoff als

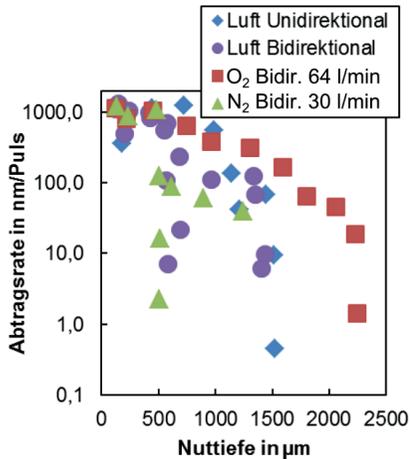


Bild 4.8: Abtragsrate als Funktion der Nuttiefe für Nuten erzeugt in bi- sowie unidirektionalem CFK in Luft, sowie für Nuten erzeugt in bidirektionalem CFK mit den Prozessgasen Sauerstoff und Stickstoff. Prozessparameter: $P=27\text{ W}$, $f_p=800\text{ kHz}$, $\lambda=515\text{ nm}$, $\tau=8\text{ ps}$, $d_f=14\text{ }\mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $v=100\text{ mm/s}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern in der obersten Lage.

nicht erklären kann. Nimmt man an, dass der Abtrag in großen Nuttiefen rein durch die Oxidation getrieben ist, so dürfte ein um den Faktor 5 erhöhter Sauerstoffanteil höchstens zu einer um denselben Faktor größeren Abtragsrate führen. Dieser zusätzliche positive Einfluss des Prozessgases Sauerstoff auf den Abtragprozess kann auf dessen Wechselwirkung mit den beim Abtrag von CFK entstehenden Ablationsprodukten zurückgeführt werden, was im Folgenden gezeigt wird.

4.3.5 Auswirkungen eines Sauerstoffstroms auf die Nutentstehung

In Bild 4.9 sind vier Nuten, erzeugt mit jeweils 25 Überfahrten, im Querschliff dargestellt. Die in Bild 4.9a und b gezeigten Nuten wurden beide in Luft erzeugt, lediglich der Aufbau der Carbonfaserlagen unterscheidet sich. Dieser ist in Bild 4.9a bidirektional und in Bild 4.9b unidirektional. Die in Bild 4.9c dargestellte Nut wurde mit Stickstoff als Prozessgas bei einem Durchfluss von 30 l/min erzeugt, während für die in Bild 4.9d gezeigte Nut Sauerstoff als Prozessgas mit einem Durchfluss von 64 l/min verwendet wurde. Deutlich sind in Bild 4.9a (Abtrag in Luft) und c (Prozessgas Stickstoff) Ablagerungen in der Nut, hauptsächlich in der zweiten Carbonfaserlage, zu er-

Prozessgas die temporäre Verlangsamung des Abtragprozess in einer Nuttiefe von ungefähr 500 μm bis 1000 μm . Wird Sauerstoff als Prozessgas mit einem Durchfluss von 64 l/min verwendet, wird diese Verlangsamung nicht beobachtet. Beim Abtrag von unidirektionalem CFK in Luft verlangsamt sich der Abtragprozess ebenfalls nicht. Ein weiterer Effekt ist in großen Nuttiefen zu beobachten. Wird bidirektionales Material in einer Luftatmosphäre abgetragen, sinkt die Abtragsrate in einer Tiefe von 1500 μm auf ungefähr 6,1 nm/Puls. Wird Sauerstoff als Prozessgas verwendet, so ist die Abtragsrate in 1500 μm Tiefe mit ungefähr 200 nm/Puls um einen Faktor 30 größer. Es sei darauf hingewiesen, dass allein der Anstieg der Sauerstoffkonzentration von 21% in Luft zu 100% bei Verwendung reinen Sauerstoffs (ungefähres Verhältnis von 1:5) den beobachteten Anstieg der Abtragsrate und der erreichten Nuttiefe

kennen. Diese sind in den Vergrößerungen rot markiert. Die Ablagerungen können die Strahlausbreitung beeinflussen und somit zu der in Bild 4.8 beobachteten Verlangsamung des Abtragprozesses und der geringen finalen Nuttiefe beitragen.

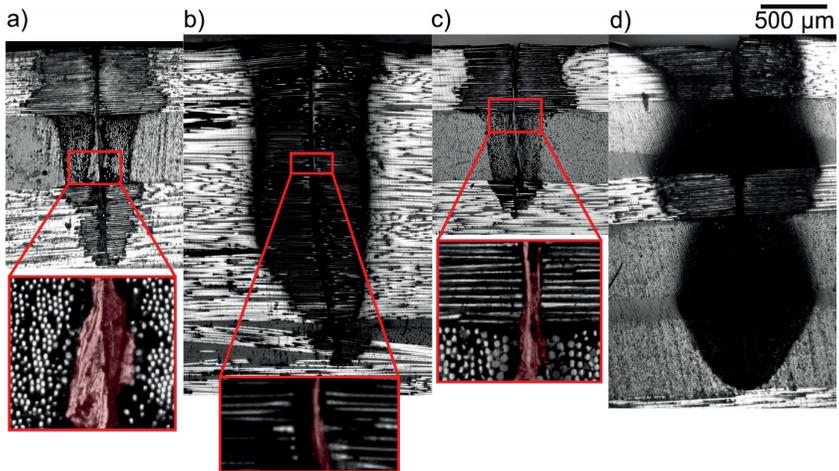


Bild 4.9: Aufnahmen von Querschliffen in CFK nach jeweils 25 Überfahrten erzeugten Nuten. Ablagerungen sind in den Vergrößerungen rot eingefärbt. a) Bidirektionales CFK abgetragen in Luft. b) Unidirektionales CFK abgetragen in Luft. c) Nut erzeugt mit Stickstoff als Prozessgas, Durchfluss 30 l/min. d) Nut erzeugt mit Sauerstoff als Prozessgas, Durchfluss 64 l/min. Prozessparameter: $P=27$ W, $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=14$ μm , $M^2<1,1$, $v=100$ mm/s, lineare Polarisierung orientiert parallel zu den Carbonfasern in der obersten Carbonfaserlage.

Betrachtet man die in unidirektionalem CFK erzeugte Nut in Bild 4.9b, so finden sich hier keine an einer Stelle konzentrierten Ansammlungen von wiedererstarteten Ablationsprodukten. Bearbeitet wurde dabei in Luft ohne Verwendung eines Prozessgases. Es sind lediglich dünnsschichtige Ablagerungen entlang der gesamten Nutwand zu sehen, welche in der Vergrößerung rot markiert sind. Das Abströmverhalten der Ablationsprodukte hängt also unter anderem von der Ausrichtung der Carbonfasern ab. Für eine genauere Betrachtung dieses Effekts siehe auch Abschnitt 3.3.

In Bild 4.9d ist eine in bidirektionalem CFK erzeugte Nut zu sehen. Das Prozessgas war dabei Sauerstoff mit einem Durchfluss von 64 l/min. Obwohl bidirektionales CFK bearbeitet wurde, wie im Fall der in den Bildern 4.9a und c dargestellten Nuten, wurde nach 25 Überfahrten eine deutlich größere Nuttiefe erreicht. Diese ist mit 1308 μm ähnlich wie die Nuttiefe der in unidirektionalem CFK erzeugten Nut mit 1143 μm (siehe Bild 4.9b). Beim Laserabtrag mit Sauerstoff als Prozessgas sind innerhalb der Nut keine resublimierten Ablationsprodukte zu erkennen. Der zusätzliche Sauerstoff

scheint zu einer Oxidation der Ablationsprodukte zu führen, wodurch es zu keinen Ablagerungen innerhalb der Nut kommt. Die Ausbreitung der Laserstrahlung wird nicht behindert und es kommt zu keiner Verlangsamung des Ablationsprozesses.

4.3.6 Einfluss des Sauerstoffstroms auf die Ausdehnung der MVZ

Wie in Abschnitt 4.2 gezeigt, beeinflusst Sauerstoff nicht nur den Abtragprozess an sich, sondern auch die Ausbreitung der thermischen Schädigung. Aufgrund des großen Düsendurchmessers verglichen mit der Nutbreite wurde viel überschüssiges Prozessgas auf die Werkstückoberfläche geblasen. Bei Verwendung von Sauerstoff als Prozessgas stand oberflächlich also viel überschüssiger Sauerstoff zur Verfügung. Dies äußerte sich in einer Vergrößerung der Ausdehnung der Matrixverdampfungszone verglichen mit Stickstoff als Prozessgas oder dem Laserabtrag in Umgebungsluft. Die Ausdehnung der MVZ gemessen in den oberflächennahen 5% der Nut als Funktion der Anzahl an Überfahrten ist in Bild 4.10a zu sehen. Bereits nach einer Überfahrt hat die MVZ ihre volle Ausdehnung. Die MVZ ist bei Verwendung von Sauerstoff als Prozessgas mit ungefähr 350 μm nahezu doppelt so groß wie im Falle von Stickstoff als Prozessgas beziehungsweise Luft als Umgebungsmedium. In diesen Fällen hat die MVZ jeweils eine Ausdehnung von ungefähr 180 μm . Die Gestalt der MVZ bei Verwendung von Sauerstoff als Prozessgas ist dabei sehr unregelmäßig. Ursache hierfür ist, dass es bei Verwendung von Sauerstoff zu einem Brennen des Matrixmaterials an der Oberfläche kam. Die Flamme wurde in Richtung der Absaugung gezogen und verursachte in diese Richtung eine zusätzliche Schädigung des Materials.

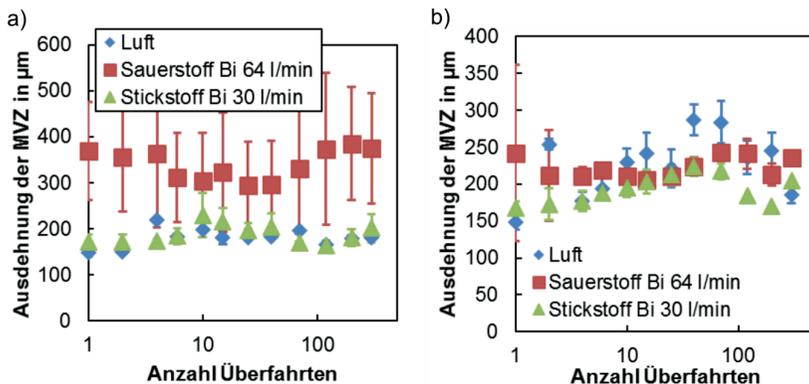


Bild 4.10: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten. Die MVZ wurde in a) in den oberen 5% der Nut vermessen, in b) wurde die MVZ mit der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“ ausgewertet. Prozessparameter: $P=27\text{ W}$, $f_{\text{r}}=800\text{ kHz}$, $\lambda=515\text{ nm}$, $\tau=8\text{ ps}$, $d_{\text{r}}=14\text{ }\mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $v=100\text{ mm/s}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern in der obersten Lage.

Vermisst man die MVZ mit der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“, also innerhalb des Materials, lässt sich, wie in Bild 4.10b zu sehen, nur ein geringfügiger Einfluss des Prozessgases auf die Ausbildung der MVZ erkennen. Bei Verwendung von Stickstoff als Prozessgas hat die MVZ eine Ausdehnung im Material, gemittelt über alle in Bild 4.10b dargestellten Werte, von ungefähr 190 μm . Wird dagegen Sauerstoff als Prozessgas verwendet bzw. in Luft abgetragen, so ist die Ausdehnung der MVZ ungefähr 220 μm . Im Material verursacht ein zusätzlicher in die Nut geblasener Sauerstoffstrom somit keine solch signifikante Vergrößerung der thermischen Schädigung wie ein Verbrennen des Matrixmaterials an der Oberfläche.

5 Energietransport durch die bei der Laserbearbeitung von CFK entstehenden Ablationsprodukte

Ein Teil der vom Laser eingestrahlt 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. Diese heiße Materialdampffackel kann auf verschiedene Weise mit dem zu bearbeitenden Werkstück wechselwirken.

Das Abströmen der Ablationsprodukte mit hohen Geschwindigkeiten kann zu einer mechanischen Wechselwirkung mit den Carbonfasern des Werkstücks führen. In [87] wurde beispielsweise von einer Verplusterung der Fasern beim Schneiden von Faserhalbzeugen mit einem Dauerstrichlaser berichtet. Dabei wurden Abströmgeschwindigkeiten des verdampften Materials von bis zu 300 m/s gemessen. Zu einer mechanischen Wechselwirkung zwischen den abströmenden Ablationsprodukten und dem Werkstück kann es nicht nur bei der Bearbeitung von Faserhalbzeugen kommen. Auch bei Ausbildung einer ausreichend großen Matrixverdampfungszone kann bei der Bearbeitung von CFK eine mechanische Wechselwirkung der Materialdampffackel mit den freigelegten Carbonfasern beobachtet werden. Wird CFK mit gepulster Laserstrahlung bearbeitet, wurden weitaus größere Geschwindigkeiten des verdampften Materials beobachtet. In [88] wird über die Geschwindigkeit von Partikeln, welche bei der Bearbeitung von CFK mit Pulsen von 20 ns Dauer erzeugt wurden, berichtet. Es wurden Geschwindigkeiten zwischen 1700 m/s und 6000 m/s gemessen. Ähnlich hohe Geschwindigkeiten des abdampfenden Materials werden in [89] angegeben. Dabei wurde CFK an der Materialoberfläche mit einzelnen Pulsen von 4 ps Dauer abgetragen. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Materialdampf Wolke wurden Werte von 4500 m/s bis 5000 m/s gemessen.

Der Materialdampf wechselwirkt nicht ausschließlich mechanisch mit dem Werkstück, sondern kann dieses auch thermisch beeinflussen. Wie in Abschnitt 2.3.2 gezeigt, sind die thermischen Eigenschaften beider Verbundkomponenten höchst unterschiedlich. Dies hat unter anderem zur Folge, dass die Temperatur des bei der Laserbearbeitung verdampfenden CFKs im Mittel deutlich höher ist als die Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials. Beim Schneiden von CFK mit einem Dauerstrichlaser wurde über einen Fit des Planckschen Strahlungsgesetz an das gemessene Emissionsspektrum eine Temperatur der Schneidfront von ungefähr $3300 \text{ K} \pm 300 \text{ K}$ ermittelt [90]. In [91] wird über die Temperatur der Materialdampffackel beim gepulsten Laserabtrag von CFK mit einem gepulsten UV-Laser berichtet. Der Laser emittierte bei einer Wellenlänge von 355 nm. Die Laserpulse hatten eine Dauer von 8 ns. Die Temperatur der Gasfackel wurde ebenfalls über einen Fit des Planckschen Strahlungsgesetz an das gemessene Emissionsspektrum bestimmt. Dabei wurden 25 μs nach Auftreffen des Laserpulses

Temperaturen von $3000 \text{ K} \pm 500 \text{ K}$ gemessen. Die Temperatur sank $40 \mu\text{s}$ nach Auftreffen des Laserpulses auf 2000 K bis $2700 \text{ K} \pm 500 \text{ K}$. Die heiße Materialdampffackel kann bei Wechselwirkung mit dem Werkstück dieses zusätzlich erwärmen und so zu einer thermischen Schädigung des Werkstücks beitragen.

Im Folgenden wird gezeigt, dass auch bei der Bearbeitung von CFK mit einem Dauerstrichlaser hohe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 3300 m/s erreicht werden. Des Weiteren werden experimentelle Beobachtungen der thermischen Beeinflussung des Werkstücks durch heiße Ablationsprodukte vorgestellt.

5.1 Geschwindigkeit der Ablationsprodukte beim Laserabtrag von CFK mit einem Dauerstrichlaser⁵

Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde die beim Bohren und Schneiden von CFK mit einem Dauerstrichlaser entstehende Materialdampffackel beobachtet. Die Kamera wurde seitlich des Werkstücks positioniert. Vor dem Objektiv der Kamera wurde ein Bandpassfilter für die Wellenlänge $810 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ positioniert. Die Materialdampffackel wurde nicht beleuchtet, sondern es wurde ausschließlich das thermische Eigenleuchten der Dampffackel aufgezeichnet. Der Prozess wurde mit einer Bildfrequenz von 7500 fps aufgenommen, die Belichtungszeit betrug $133 \mu\text{s}$.

Zum Laserabtrag des Materials wurde ein Dauerstrichlaser mit einer Wellenlänge von 1030 nm angewandt. Die Beugungsmaßzahl des Laserstrahls war ungefähr 15. Die maximal verwendete mittlere Laserleistung war 3500 W . Der Fokusedurchmesser betrug $300 \mu\text{m}$, wobei der Strahl auf die Werkstückoberfläche fokussiert wurde. Bewegte der Laserstrahl mit Hilfe eines Scannersystems, die Fokussierung erfolgte über ein f-Theta Objektiv mit einer Brennweite von 163 mm . Das bearbeitete CFK Material mit einer Dicke von $4,5 \text{ mm}$ bestand aus PAN basierten Carbonfasern in einer 16-lagigen, quasiisotropen Anordnung. Der Faservolumengehalt war ungefähr 55%. Das Matrixmaterial bestand aus einem Epoxidharz.

Zunächst wurde die Ausbildung der Materialdampffackel bei einem Bohrprozess beobachtet. In Bild 5.1 ist eine Aufnahme der Materialdampffackel 1 ms nach Bohrbeginn mit einer mittleren Laserleistung von 3500 W zu sehen. Die Werkstückoberfläche ist mit einer weißen Linie markiert. In einem Abstand x_M von der Werkstückoberfläche bildet sich ein senkrechter Verdichtungsstoß, eine Mach'sche Scheibe, aus. Die Ausbildung einer Mach'schen Scheibe deutet auf ein Abströmen des Materialdampfs mit Überschall hin [92]. Das Bohrloch fungiert dabei als rotationssymmetrische Düse.

⁵ Die Aufnahme des Prozesses mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und zum Teil die Auswertung der entstandenen Aufnahmen, auf denen die Ausführungen in diesem Abschnitt basieren, erfolgten im Rahmen einer vom Autor dieser Dissertationsschrift angeleiteten und betreuten Masterarbeit [114].

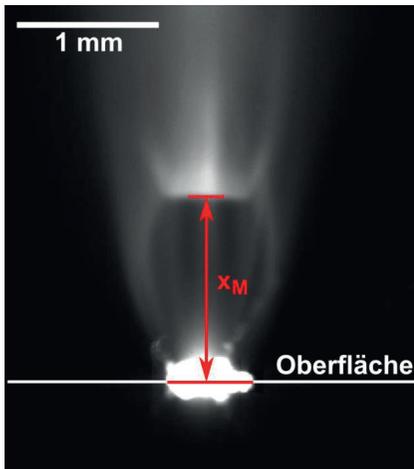


Bild 5.1: Seitliche Ansicht einer Materialdampffackel erzeugt während eines Laserbohrprozesses von CFK mit einem Dauerstrichlaser. Prozessparameter: $P=3500\text{W}$, $\lambda=1030\text{ nm}$, $d_{\approx}300\text{ }\mu\text{m}$, $t_{\text{Bohr}}=1\text{ ms}$, unpolarisiert.

Sind der Abstand x_M , der Düsendurchmesser D_D und der Umgebungsdruck p_U bekannt, kann die Strömungsgeschwindigkeit v_M berechnet werden. Hierfür muss das Druckverhältnis $p_{t,D}/p_U$ aus Totaldruck und Umgebungsdruck am Düsenaustritt mit

$$\frac{p_{t,D}}{p_U} \approx \left(\frac{x_M}{0,7 \cdot D_D} \right)^2 \quad (5.1)$$

bestimmt werden [92]. Der Totaldruck ist dabei der Gesamtdruck der Strömung bestehend aus statischem und dynamischem Anteil. Mit Hilfe dieses Druckverhältnisses kann die Machzahl

$$M_D = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_{t,D}}{p_U} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]} \quad (5.2)$$

berechnet werden, wobei κ der Isentropenexponent ist. Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit muss die lokale Schallgeschwindigkeit

$$c_{\text{lokal}} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R_u \cdot T_{\text{Gas}}}{M}} \quad (5.3)$$

bekannt sein, wobei R_u die universelle Gaskonstante, T_{Gas} die Temperatur des Gases und M die molare Masse des Gases ist. Die Strömungsgeschwindigkeit ist schließlich durch

$$v_M = M_D \cdot c_{\text{lokal}} \quad (5.4)$$

gegeben.

5.1.1 Strömungsgeschwindigkeit des verdampften Materials bei stationärem Laserstrahl

Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit wurde ein Umgebungsdruck von $p_U=1013\text{ mbar}$ angenommen. Der Isentropenexponent κ ist bei Raumtemperatur für die meisten zweiatomigen Gase wie beispielsweise Kohlenmonoxid CO , eines der Ablati-

onsprodukte bei der Verdampfung von CFK, $\kappa=1,4$ [92], [93]. In [91] wurde berichtet, dass bei der Verdampfung von CFK neben atomarem Kohlenstoff die Entstehung von C_2 und CN , ebenfalls zweiatomige Verbindungen, beobachtet werden konnte. Der tatsächliche Isentropenexponent des verdampften CFK Materials ist unbekannt, aufgrund der vielen zweiatomigen Bestandteile wurde er hier mit $\kappa=1,4$ approximiert. Die universelle Gaskonstante ist $R_u=8,314$ J/mol·K [92]. Als molare Masse M wurde ein Mittelwert der zweiatomigen Bestandteile CO , C_2 und CN angenommen, welcher $M=26,02$ g/mol beträgt. Die Temperatur der Materialdampffackel wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „PRECISE“ für mittlere Laserleistungen von 500 W, 800 W und 1000 W über einen Fit des Planckschen Strahlungsgesetz an das gemessene Emissionsspektrum bestimmt. Dabei wurde der Laserstrahl mit einer Geschwindigkeit von 0,1 m/s bei ansonsten identischen Prozessparametern über das Werkstück bewegt. Die Temperatur des abströmenden Materialdampfs betrug für alle drei mittlere Laserleistungen ungefähr $T_{Gas}=4000$ K [94]. Als Düsendurchmesser D_D wurde der mit Hilfe eines Lichtmikroskops gemessene Durchmesser der erzeugten Bohrung verwendet. Der Abstand x_M wurde durch Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelt. Zur Berechnung der Fehlergrenzen der Strömungsgeschwindigkeit wurde eine maximale Abweichung des Isentropenexponenten von $\Delta\kappa=0,1$, eine maximale Abweichung der molaren Masse von $\Delta M=5,2$ g/mol, eine maximale Abweichung der Temperatur der Materialdampffackel von $\Delta T_{Gas}=400$ K, eine maximale Abweichung des Düsendurchmessers von 5% des Messwerts und eine maximale Abweichung des Abstands x_M von 10% des Messwerts berücksichtigt.

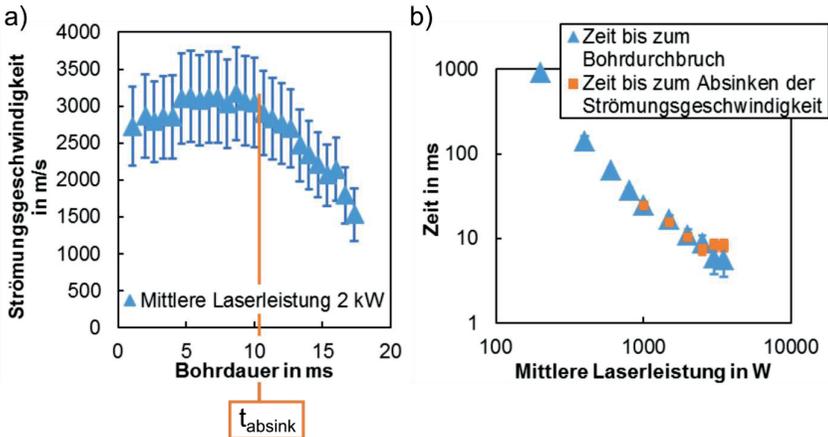


Bild 5.2: a) Strömungsgeschwindigkeit des Materialdampfs in Abhängigkeit von der Bohrdauer. Es wurde mit einer mittleren Laserleistung von 2000 W gebohrt. b) Prozesszeit bis zum Bohrdurchbruch bzw. bis zum Absinken der Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Laserleistung. Prozessparameter: $\lambda=1030$ nm, $d_i\approx 300$ μ m, unpolarisiert.

Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ergab für eine Bohrung erzeugt mit einer mittleren Laserleistung von 2000 W die in Bild 5.2a zu sehenden Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Bohrdauer. Zu Beginn des Bohrprozesses strömte das verdampfte Material mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 2700 m/s ab. Bereits nach 5 ms wurde die maximale Strömungsgeschwindigkeit von ungefähr 3100 m/s erreicht. Mit zunehmender Bohrdauer blieb die Strömungsgeschwindigkeit ungefähr konstant, bis ab einer Bohrdauer von ungefähr 10,3 ms die Strömungsgeschwindigkeit des Materialdampfs kontinuierlich absank. Dieser Zeitpunkt t_{absink} ist in Bild 5.2a orange markiert. Ab einer Bohrdauer von 17,3 ms konnten keine Verdichtungsstöße mehr beobachtet werden.

Um festzustellen, ob die beobachtete Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit mit dem Durchbohren des CFK Werkstücks in Zusammenhang gebracht werden kann, wurde der Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs für verschiedene mittlere Laserleistungen mit Hilfe von Photodioden bestimmt. Die vom Prozessbeginn bis zum Bohrdurchbruch benötigte Zeit in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung ist in Bild 5.2b dargestellt. Des Weiteren ist die durch Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelte Zeit bis zur Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit gezeigt. Für mittlere Laserleistungen bis 800 W konnte der Zeitpunkt der Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit im aufgenommenen Zeitraum nicht ermittelt werden. Es zeigt sich, dass eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs und dem Zeitpunkt des Absinkens der Strömungsgeschwindigkeit besteht. Eine Korrelation dieser beiden Ereignisse scheint plausibel. Zum einen nimmt ab dem Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs das verdampfte Volumen ab, da ein Teil der Laserstrahlung nun durch das Material hindurch propagiert und nicht mehr zum Materialabtrag beiträgt. Das reduzierte verdampfte Volumen führt zu einem geringeren Druck innerhalb der Bohrung und somit zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten. Zum anderen bildet sich eine zweite Öffnung, durch welche das verdampfte Material ausströmen kann. Der Strömungsquerschnitt wird dadurch vergrößert, was ebenfalls eine reduzierte Strömungsgeschwindigkeit zur Folge hat.

Für die in Bild 5.2a dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten wurde zu jedem Zeitpunkt eine Temperatur der Materialdampffackel von 4000 K angenommen. Es wurde im Rahmen der hier vorgestellten Experimente allerdings nicht untersucht, ob die Temperatur der Materialdampffackel ab dem Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs abnimmt oder weiterhin 4000 K beträgt. Bei einer Abnahme der Temperatur des abströmenden Materials sinkt die lokale Schallgeschwindigkeit (vgl. Gl. (5.3)) und somit auch die Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Gl. (5.4)) ab. Ab dem Zeitpunkt des Bohrdurchbruchs stellen die in Bild 5.2a gezeigten Strömungsgeschwindigkeiten somit eine Abschätzung einer oberen Grenze der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit dar.

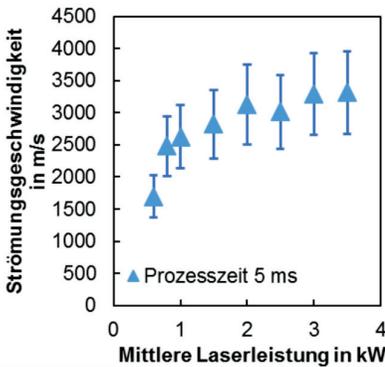


Bild 5.3: Strömungsgeschwindigkeit des Materialdampfs in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung. Prozessparameter: $\lambda=1030$ nm, $d_f \approx 300$ μ m, $t_{\text{Bohr}}=5$ ms, unpolarisiert.

speziellweise in [17] aufgestellten Energiebilanz $V/t \propto \eta_p \cdot P$, wobei η_p der Prozesswirkungsgrad ist, welcher hier als unabhängig von der mittleren Laserleistung angenommen wird, ist direkt ersichtlich, dass eine höhere mittlere Laserleistung P ein größeres verdampftes Volumen pro Zeit V/t bedingt. Für ähnliche Bohrungsdurchmesser muss somit mit höherer mittlerer Laserleistung die Strömungsgeschwindigkeit zunehmen.

5.1.2 Ausbildung von Verdichtungsstößen im abströmenden Materialdampf bei Bearbeitung mit bewegtem Laserstahl

Die Ausbildung von Verdichtungsstößen im abströmenden Materialdampf konnte auch beim Laserabtrag von CFK mit bewegtem Laserstrahl beobachtet werden. Für die hier angewandte Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls von 1 m/s traten Verdichtungsstöße im abströmenden Materialdampf für mittlere Laserleistungen von 800 W und höher auf. In Bild 5.4 ist eine Aufnahme der beim Laserabtrag mit einer mittleren Laserleistung von 3500 W entstehenden Materialdampffackel zu sehen. Im Gegensatz zum Laserbohren mit stationärem Laserstrahl bildet sich keine einzelne Materialdampffackel aus. Der Materialdampf strömt vielmehr in mehrere Richtungen in den Halbraum entgegengesetzt zur Vorschubrichtung ab. In Bild 5.4 kann man vier voneinander getrennte Dampffackeln erkennen. Für jede dieser Dampffackeln ist die Ausbildung eines Verdichtungsstoßes zu beobachten. Die Neigung der einzelnen Materialdampffackeln ist mit Hilfe der in Bild 5.4 eingezeichneten roten Markierungen veranschaulicht. Wie anhand der Länge der roten Markierungen zu erkennen ist, haben die Verdichtungsstöße der einzelnen Dampffackeln entlang ihrer Strömungsrichtung unterschiedliche Abstände zur Werkstückoberfläche.

Die Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit des verdampften Materials von der mittleren Laserleistung ist in Bild 5.3 dargestellt. Ausgewertet wurde jeweils ein Bild aufgenommen nach einer Prozesszeit von 5 ms, da sich zu diesem Zeitpunkt für alle hier verwendeten mittleren Laserleistungen bereits ein konstanter Strömungszustand eingestellt hatte. Es ist zu sehen, dass mit höherer mittlerer Laserleistung die Strömungsgeschwindigkeit des verdampften Materials zunimmt. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit von ungefähr 3300 m/s wird bei einer mittleren Laserleistung von 3500 W erreicht. Dies entspricht den Erwartungen. Aus der bei-

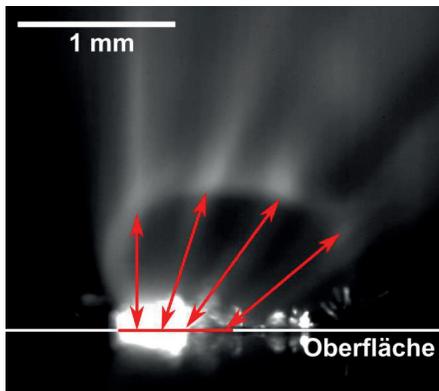


Bild 5.4: Bild einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Laserschneidprozesses von CFK mit einem Dauerstrichlaser bei einer mittleren Laserleistung von 3500 W und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/s mit Blick von der Seite. Deutlich ist auch bei bewegtem Laserstrahl die Ausbildung von Verdichtungsstößen im abströmenden Materialdampf zu erkennen. Prozessparameter: $P=3500$ W, $v=1$ m/s, $\lambda=1030$ nm, $d\approx 300$ μm , unpolarisiert.

abströmenden Materialdampf bei der Lasermaterialbearbeitung von CFK und geben eine erste Einschätzung zur Strömungsgeschwindigkeit des Materialdampfs beim Bohrprozess mit stationärem Laserstrahl. Dabei wurden maximale Strömungsgeschwindigkeiten von 3300 m/s gemessen. Dies sind ähnlich hohe Strömungsgeschwindigkeiten wie sie auch bei der gepulsten Laserbearbeitung von CFK vorkommen, vergleiche [88] und [89]. Diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einer mechanischen Wechselwirkung des Materialdampfs mit losen Carbonfasern, wie es beispielsweise in Bild 5.5 für einen Schneidprozess mit einem Dauerstrichlaser zu sehen ist.

5.2 Thermische Beeinflussung des Werkstücks durch heiße Ablationsprodukte

Die thermische Wirkung heißer Ablationsprodukte auf das die Prozesszone umgebende Material wird in diesem Abschnitt anhand experimenteller Beobachtungen diskutiert. Dazu wurde der Laserabtragprozess von CFK mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet. In Bild 5.5 ist ein einzelner Frame eines Laserschneidprozesses mit einem Dauerstrichlaser zu sehen. Es wurde mit einem CO_2 -Laserstrahl mit ei-

Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit den oben vorgestellten Gleichungen ist im Falle des Abtrags mit bewegtem Laserstrahl nicht mehr möglich. Die Form der Nut bzw. des Schnitts weicht von der einer rotationssymmetrischen Düsenöffnung ab. In diesem Fall zeigen sich dreidimensionale Effekte in der Strömung und die Überschall-Freistrahlen müssten als allgemein dreidimensionale Strömungen betrachtet werden [92]. Aufgrund der Ausbildung von Verdichtungsstößen kann allerdings davon ausgegangen werden, dass auch beim Laserabtrag von CFK mit bewegtem Laserstrahl Strömungsgeschwindigkeiten des verdampften Materials oberhalb der lokalen Schallgeschwindigkeit erreicht werden.

Die hier vorgestellten Untersuchungen demonstrieren erstmals die Ausbildung von Verdichtungsstößen im abströmenden Materialdampf bei der Lasermaterialbearbeitung von CFK und geben eine erste Einschätzung zur Strömungsgeschwindigkeit des Materialdampfs beim Bohrprozess mit stationärem Laserstrahl. Dabei wurden maximale Strömungsgeschwindigkeiten von 3300 m/s gemessen. Dies sind ähnlich hohe Strömungsgeschwindigkeiten wie sie auch bei der gepulsten Laserbearbeitung von CFK vorkommen, vergleiche [88] und [89]. Diese hohen Strömungsgeschwindigkeiten führen zu einer mechanischen Wechselwirkung des Materialdampfs mit losen Carbonfasern, wie es beispielsweise in Bild 5.5 für einen Schneidprozess mit einem Dauerstrichlaser zu sehen ist.

ner mittleren Laserleistung von 3,7 kW bearbeitet. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 10 m/min. Der Fokus befand sich 3,25 mm oberhalb des Werkstücks, wodurch sich ein Strahldurchmesser auf der Werkstückoberfläche von 700 μm ergab. Das bearbeitete CFK Material bestand aus einem Gewebe aus Carbonfasern mit einem Epoxidharz als Matrixmaterial. Im in Bild 5.5 dargestellten Einzelbild sind die Carbonfasern in der obersten Lage parallel zur Vorschubrichtung orientiert. Bei den hier angewandten Prozessparametern entstand eine ausgedehnte MVZ, wodurch viele Carbonfasern entlang der Nut freilagen. Der von der Bearbeitungsfront abströmende Materialdampf führte noch ca. 3 mm hinter der Prozesszone zu einem Aufbäumen und einem Erhitzen der freiliegenden Carbonfasern, wie in Bild 5.5 zu sehen.

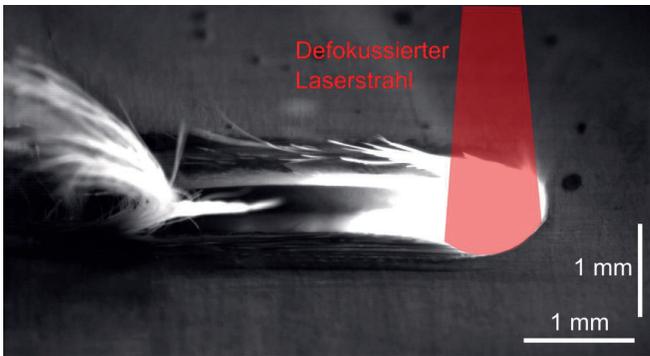


Bild 5.5: Bild einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Laserabtragprozesses von CFK mit einem Dauerstrichlaser. Es wurde mit einem defokussierten Laserstrahl gearbeitet, wobei sich der Fokus oberhalb der Werkstückoberfläche befand. Der Gasstrom des verdampften Materials führte noch ca. 3 mm hinter der Prozesszone zu einem Aufbäumen und Erhitzen der Carbonfasern. Prozessparameter: $P=3,7 \text{ kW}$, $\lambda=10,6 \mu\text{m}$, $\Delta z=+3,25 \text{ mm}$, $d_{+3,25\text{mm}}\approx 700 \mu\text{m}$, $v=10 \text{ m/min}$, radialer Polarisationszustand.

Deutlich ist das thermische Leuchten der durch heiße Ablationsprodukte erhitzten Carbonfasern hinter der Prozesszone zu erkennen. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass das thermische Leuchten der aufgebäumten Carbonfasern hinter der Prozesszone durch eine heizende Wirkung reflektierter Anteile der einfallenden Laserstrahlung verursacht wird. Ob die mit dem Materialdampf transportierte Wärme zu einer thermischen Beeinflussung des Materials führen kann oder andere Wärmetransportmechanismen hier für die Erwärmung der Carbonfasern verantwortlich sind, wurde mit im Folgenden beschriebener Versuchsanordnung untersucht.

5.2.1 Versuchsanordnung zur Untersuchung des Wärmetransports

Wie in Bild 5.6a zu sehen, wurden zwei Werkstücke aus unidirektionalem CFK in einem Abstand von 0,6 mm nebeneinander angeordnet. Das Bild entstammt einer Auf-

nahme einer Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Aufnahme­frequenz von 10.000 Bildern pro Sekunde. Zur Beleuchtung wurde ein Dauerstrichlaser der Wellenlänge 808 nm verwendet. Die Carbonfasern waren senkrecht zum Spalt zwischen den beiden Werk­stücken orientiert. In einem Abstand von ca. 650 μm zum Spalt wurde mit einer mittleren Laserleistung von 29 W perkussionsgebohrt. Das verwendete Lasersystem emittierte Strahlung einer Wellenlänge von 515 nm. Die Pulsfrequenz war 800 kHz, wobei die Pulse eine Dauer von ungefähr 8 ps hatten. Die Strahlqualität war $M^2 < 1,1$. Der Fokusdurchmesser betrug 35 μm . Mit den gewählten Prozessparametern entstand eine MVZ mit einer Ausdehnung größer 1 mm entlang der Carbonfasern, wie in Bild 5.6b zu sehen. Das Bild entstand ungefähr 400 ms nach Prozessbeginn. In Bild 5.6b ist zu beobachten, dass sich nicht nur auf dem rechten Werkstück, auf dem der Perkussionsbohrprozess stattfindet, eine MVZ bildet, sondern auch das linke, un­bearbeitete Werkstück thermisch beeinflusst wird. Es findet somit ein Transport von Wärme vom rechten auf das linke Werkstück statt. Dieser Energietransport kann durch reflektierte Laserstrahlung, thermische Strahlung der heißen Carbonfasern des rechten Werkstücks oder einen Strom heißer Ablationsprodukte stattfinden. Die thermische Strahlung der Carbonfasern ist in Bild 5.6b und d als helles Leuchten der Carbonfasern zu erkennen.

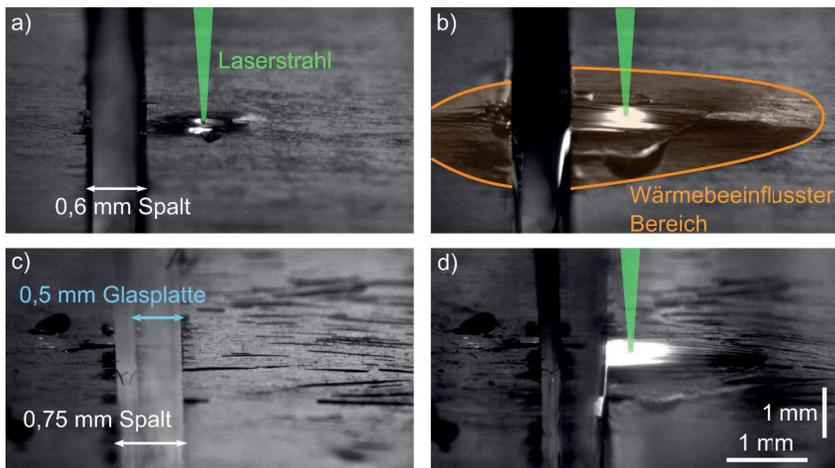


Bild 5.6: Bilder eines Perkussionsbohrprozesses mit einem Ultrakurz­puls­Laser aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Dabei wurden zwei CFK Werk­stücke mit gerin­gem Abstand nebeneinander positioniert. Zusätzlich wurde in den Bildern c) und d) eine 0,5 mm dicke Glasplatte zwischen den CFK Werk­stücken positioniert. Bilder a) und c) stellen den Ausgangszustand dar, Bilder b) und d) wurden nach einer Prozessdauer von 0,4 s auf­ge­nommen. Prozessparameter: $P=29\text{ W}$, $f_p=800\text{ kHz}$, $\lambda=515\text{ nm}$, $\tau=8\text{ ps}$, $d_f=35\text{ }\mu\text{m}$, $M^2 < 1,1$, lineare Polarisation parallel zu den Carbonfasern in der obersten Carbonfaserlage.

5.2.2 Energietransport durch reflektierte Laserstrahlung

Ein Energietransport durch reflektierte Laserstrahlung erscheint aufgrund der Ausrichtung der Carbonfasern unwahrscheinlich. Wie in Abschnitt 3.1.1 gezeigt, wird die Laserstrahlung senkrecht zur Symmetrieachse der Carbonfasern reflektiert. In Bild 5.6 ist zu sehen, dass die Carbonfasern so ausgerichtet sind, dass Laserstrahlung aufgrund des runden Querschnitts der Carbonfasern parallel zum Spalt reflektiert wird und somit nicht in Richtung des linken Werkstücks. Gewissheit bringt der in Bild 5.6c und d gezeigte Versuchsaufbau. Die Breite des gesamten Spalts wurde auf 0,75 mm vergrößert und eine an das rechte Werkstück anliegende Glasplatte der Dicke 0,5 mm im Spalt positioniert. Auf dem rechten Werkstück wurde mit denselben Laserparametern perkussionsgebohrt wie im Fall der nicht vorhandenen Glasplatte. Wie man in Bild 5.6d sehen kann, bildet sich auf dem rechten Werkstück wieder eine MVZ mit einer Ausdehnung größer 1 mm entlang der Carbonfasern aus. Auf dem linken Werkstück ist nun allerdings keine thermische Beeinflussung des Werkstücks zu erkennen. Die Aufnahme in Bild 5.6d entstand wie die Aufnahme in Bild 5.6b 400 ms nach Prozessbeginn. Da die Glasplatte für die Wellenlänge des Bearbeitungslasers von 515 nm transparent war, müsste auch auf dem linken Werkstück eine thermische Beeinflussung des Materials zu beobachten sein, sollte reflektierte Laserstrahlung für den Energietransport verantwortlich sein. Da dies nicht der Fall ist, kann hier die Reflektion von Laserstrahlung als Energietransportmechanismus ausgeschlossen werden.

5.2.3 Energietransport durch thermische Strahlung

In Bild 5.6b ist ein thermisches Leuchten der Carbonfasern am Rand des rechten Werkstücks zu sehen. Ein Anhaltspunkt zur Abschätzung der Temperatur der Carbonfasern an der Werkstückkante im Bereich des thermischen Leuchtens ist die Ausdehnung der MVZ. Am in Bild 5.6b und d zu beobachtenden Rand der MVZ wird die Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials (800 K) gerade überschritten. Da am Werkstückrand das Matrixmaterial bereits verdampft ist und ein thermisches Leuchten der Carbonfasern zu beobachten ist, welches am Rand der MVZ nicht zu sehen ist, muss im Bereich des thermischen Leuchtens die Verdampfungstemperatur des Matrixmaterials bereits deutlich überschritten sein.

Ob thermische Strahlung für die in Bild 5.6b zu sehende thermische Beeinflussung des linken CFK Werkstücks verantwortlich ist, kann ebenfalls mit der in Bild 5.6c und d zu sehenden Versuchsanordnung untersucht werden. Dabei wurde in den Spalt zwischen den beiden Werkstücken eine Glasplatte bestehend aus Borosilikatglas eingebracht. Diese ist für Wellenlängen von 350 nm bis ungefähr 2100 nm transparent. Ein Einfluss der thermischen Strahlung ist nur zu erwarten, wenn von den Carbonfasern des rechten Werkstücks ein ausreichend großer Anteil der thermischen Strahlung in diesem Wellenlängenbereich emittiert wird. In Bild 5.7a ist die spektrale Leistungs-

dichte von Carbonfasern bei einer Temperatur von 1900 K, welche hier zur Veranschaulichung angenommen wurde, als Funktion der Wellenlänge zu sehen. Die spektrale Leistungsdichte wurde dabei mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes [95], [96] unter Berücksichtigung der Emissivität des Materials nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz [97] bestimmt. Wie in Bild 5.7a zu sehen, befindet sich bei einer Temperatur von 1900 K bereits ein großer Anteil der spektralen Leistungsdichte im Wellenlängenbereich kleiner 2100 nm, für welchen die eingesetzte Glasplatte transparent ist. Dieser Anteil ist im Bild rot gefärbt. Der Anteil der spektralen Leistungsdichte im Wellenlängenbereich zwischen 350 nm und 2100 nm in ein Verhältnis zur gesamten spektralen Leistungsdichte (berechnet zwischen 100 nm und 30000 nm) gesetzt, ist als Funktion der Temperatur in Bild 5.7b zu sehen. Im gesamten Temperaturbereich zwischen 800 K (Verdampfungstemperatur Matrixmaterial) und 4000 K (Verdampfungstemperatur Carbonfasern) transmittiert stets ein ausreichend großer Anteil der thermischen Strahlung durch die eingesetzte Glasplatte.

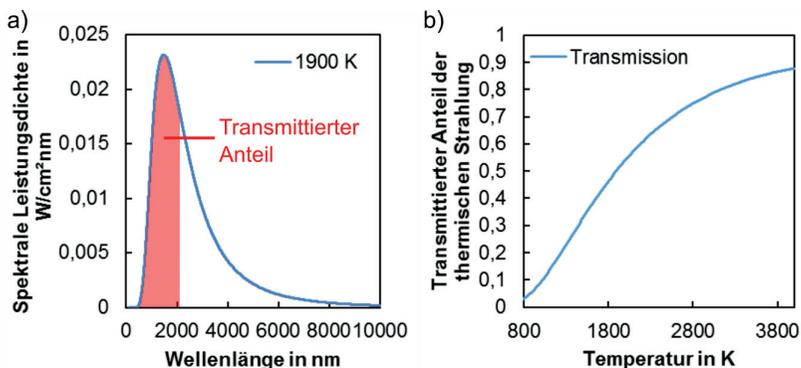


Bild 5.7: a) Spektrale Leistungsdichte als Funktion der Wellenlänge. Die Glasplatte ist für Wellenlängen kleiner 2100 nm transparent. Der transmittierte Anteil der spektralen Leistungsdichte ist durch die rote Fläche gekennzeichnet. b) Transmittierter Anteil der thermischen Strahlung als Funktion der Temperatur.

Wäre thermische Strahlung für die in Bild 5.6b zu sehende thermische Beeinflussung des linken CFK Werkstücks verantwortlich, so müsste auch nach Einsetzen der Glasplatte ein Einfluss am linken CFK Werkstück zu beobachten sein. In der in Bild 5.6d gezeigten Versuchsanordnung ist allerdings keine thermische Beeinflussung des linken CFK Werkstücks zu sehen. Thermische Strahlung kann somit mit hoher Wahrscheinlichkeit als Wärmetransportmechanismus ausgeschlossen werden. Einschränkend ist noch zu erwähnen, dass sich während des Bohrprozesses auf der Glasplatte Ablationsprodukte anlagern und diese die Transmission von Strahlung abschwächen können. Da diese Ablagerung allerdings nicht instantan sondern kontinuierlich geschieht, dürften

diese lediglich zu einer Abschwächung der Wirkung der thermischen Strahlung führen und diese nicht komplett negieren.

5.2.4 Energietransport durch heiße Ablationsprodukte

Sowohl thermische Strahlung als auch Laserstrahlung können für die in Bild 5.6 dargestellte Anordnung als Energietransportmechanismen, welche zu einer thermischen Beeinflussung des linken Werkstücks führen, ausgeschlossen werden. Der Energietransport erfolgt durch einen Strom heißer Ablationsprodukte vom rechten Werkstück in Richtung des linken. Diese Strömung kann in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen indirekt durch die Verfolgung von Partikeln, welche sich vom rechten in Richtung des linken Werkstücks bewegen, beobachtet werden. In Bild 5.8 ist eine Bildsequenz vergrößerter Ausschnitte der in Bild 5.6 zu sehenden Versuchsanordnung dargestellt. Es kann ein Partikel nachverfolgt werden, welches sich zum Zeitpunkt t_0 vom rechten Werkstück ablöst und sich mit der Strömung heißer Ablationsprodukte in Richtung des linken Werkstücks bewegt.

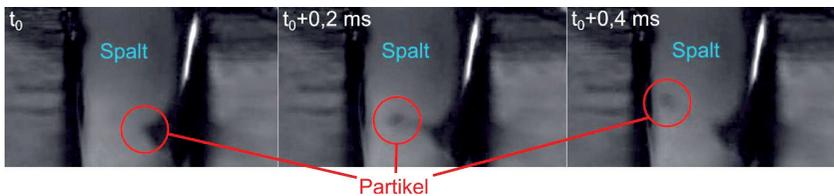


Bild 5.8: Bildsequenz vergrößerter Ausschnitte der in Bild 5.6 dargestellten Versuchsanordnung, mit welcher der Strom heißer Ablationsprodukte indirekt durch Verfolgung eines Partikels beobachtet werden kann.

Die übertragene Wärme führt auf dem linken Werkstück zur Bildung flüssiger Zersetzungsprodukte des Matrixmaterials an der Oberfläche. Dies ist unter anderem in Bild 5.6b zu sehen. Die Matrixschicht hat an dieser Stelle eine Dicke von $160\ \mu\text{m}$ und schmilzt bis zu einem Abstand von $140\ \mu\text{m}$ vom Werkstückrand auf. Eine weitere Wirkung der durch die heißen Ablationsprodukte übertragenen Wärme ist ein Aufheizen des Materials, was zu einer thermischen Ausdehnung führt, welche in Bild 5.6b als Aufwölbung des Werkstücks zu sehen ist. Diese Aufwölbung ist in Bild 5.6b als orange eingefärbter Bereich markiert. Mit Hilfe der in Bild 5.6 gezeigten Versuchsanordnung konnte somit eine thermische Beeinflussung des Materials durch einen Strom heißer Ablationsprodukte nachgewiesen werden. Inwiefern die durch heiße Ablationsprodukte übertragene Wärme beispielsweise bei Schneid- oder allgemein Abtragprozessen mit bewegtem Laserstrahl zur Ausbildung der MVZ beiträgt, ist in weiterführenden Untersuchungen zu klären.

6 Transport absorbierter Laserenergie durch Wärmeleitung⁶

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 diskutiert, weisen die Carbonfasern entlang ihrer Symmetrieachse eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit auf, welche um ein Vielfaches höher ist als die Wärmeleitfähigkeit des Matrixmaterials. Der Transport von Wärme ausgehend von der Prozesszone entlang der Fasern in das Material ist ein wesentlicher Mechanismus zur Umverteilung der nicht zur Sublimation beitragenden absorbierten Laserenergie. Die These, dass die Wärme hauptsächlich entlang der Carbonfasern ins Material geleitet wird und dort eine Matrixschädigung hervorruft, wird von mehreren Autoren vertreten [41], [43], [44]. Die thermische Schädigung des Materials manifestiert sich in einer Matrixverdampfungszone (MVZ) und einer Matrixzersetzungszone (MZZ), siehe hierzu Abschnitt 2.4. Aufgrund des klaren Schadenbilds wird häufig die MVZ zur Beurteilung der thermischen Schädigung des Materials herangezogen. Die Ausbreitung der MVZ kann mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet werden. Auf diese Weise kann der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Ausdehnung der MVZ untersucht werden, worüber im Folgenden berichtet wird. Es zeigt sich, dass Wärmeakkumulationseffekte wesentlich zur Entstehung einer MVZ beitragen.

6.1 Beobachtung der Ausdehnung der MVZ bei einem Perkussionsbohrprozess

Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurde die Ausbreitung der MVZ und der Einfluss verschiedener Laserparameter auf die Ausdehnung der MVZ untersucht. Um einen Einfluss zusätzlicher Prozessparameter wie dem örtlichen Pulsüberlapp auszuschließen, wurde zunächst ein Perkussionsbohrprozess betrachtet. Hierfür wurde ein gepulstes Lasersystem verwendet, welches Strahlung mit einer Wellenlänge von 515 nm emittiert. Die Pulse hatten eine Dauer von ungefähr 8 ps und die Strahlqualität war $M^2 < 1,3$. Die maximale Pulsfrequenz betrug 800 kHz, allerdings konnte die Pulsfrequenz mit Hilfe eines Teilers unabhängig von den restlichen Laserparametern verändert werden. Der Fokusbereich auf der Werkstückoberfläche war 33 μm , der Polarisationszustand zirkular. Die maximale Laserleistung gemessen nach der Fokussieroptik war 22,2 W, was bei einer Pulsfrequenz von 800 kHz einer Pulsenergie von 28 μJ entspricht. Das verwendete bidirektionale CFK Material bestand mit einem Volumenanteil von 60% aus PAN basierten Carbonfasern eingebettet in das Epoxidharz HexFlow RTM 6. Die Hochgeschwindigkeitskamera nahm den Prozess mit einer Bildwiederholfrequenz von 3000 fps auf. Die Auflösung betrug 1064x624 Pixel. Das

⁶ Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren in Teilen auf den vom Autor verfassten Veröffentlichungen [109], [110], [111] und [112].

Werkstück wurde mit einem Dauerstrichlaser der Wellenlänge 808 nm beleuchtet und ein entsprechender Bandpassfilter vor das Kameraobjektiv eingesetzt.

Eine Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Perkussionsbohrprozesses ist in Bild 6.1 zu sehen. Die mittlere Laserleistung war 22,2 W bei einer Pulsfrequenz von 800 kHz. Der Laserstrahl trifft in der Mitte des Bildausschnitts auf das Werkstück. Mit zunehmender Prozesszeit nimmt die Ausdehnung der MVZ zu, wobei die größte Ausdehnung entlang der Carbonfasern erreicht wird. Die Methode, mit der die im Folgenden berichteten Ausdehnungen der MVZ aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelt wurden, ist im Bild aufgenommen nach einer Prozesszeit von 20 ms angedeutet. Vermessen wird die Ausdehnung der MVZ entlang der Carbonfasern links und rechts der Prozesszone. Dabei wird die in Abschnitt 2.4.1 beschriebene Methode „Messung an der Oberfläche“ angewandt.

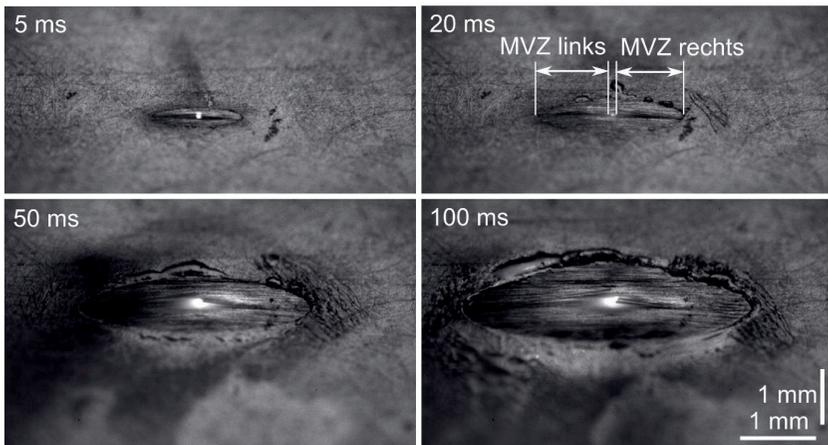


Bild 6.1: Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Perkussionsbohrprozesses mit einem Ultrakurzpuls-Laser. Prozessparameter: $P=22,2$ W, $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_p=33$ μm , $M^2<1,1$, zirkulare Polarisation.

Beim im Rahmen der hier vorgestellten Experimente verwendeten bidirektionalen CFK konnte für ausreichend lange Prozesszeiten beobachtet werden, dass die Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern nur noch minimal zunahm während die MVZ senkrecht zu den Carbonfasern weiterhin stetig größer wurde. Zur genaueren Betrachtung dieses Effekts wurde die Ausdehnung der MVZ sowohl in Richtung als auch senkrecht zu den Carbonfasern in einer Aufnahme eines Perkussionsbohrprozesses mit einer mittleren Laserleistung von 17,9 W bei einer Pulsfrequenz von 800 kHz vermessen. In Bild 6.2a ist eine Aufnahme des Perkussionsbohrprozesses gezeigt, welche 54 ms nach Beginn des Perkussionsbohrprozesses aufgenommen wurde. Dabei ist die gesamte Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern mit (a) gekennzeichnet-

net, die gesamte Ausdehnung der MVZ senkrecht zu den Carbonfasern mit (b). Das Verhältnis a/b dieser beiden Ausdehnungen ist in Bild 6.2b als Funktion der Zeit zu sehen. Zu Beginn des Perkussionsbohrprozesses ist das Verhältnis a/b ungefähr 3,3. Nach einer Prozesszeit von ungefähr 40 ms beginnt sich das Verhältnis a/b zu verkleinern. Das Absinken des Verhältnisses a/b ist wahrscheinlich auf einen Einfluss der Wärmeleitung in der zweiten Carbonfaserlage auf die Ausbildung der MVZ in der obersten Carbonfaserlage zurückzuführen.

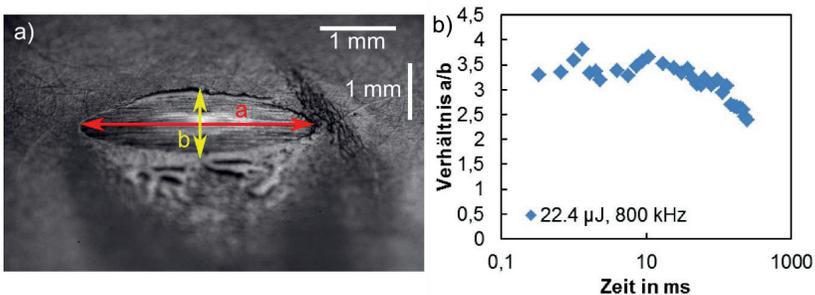


Bild 6.2: a) Bild eines Perkussionsbohrprozesses mit einer mittleren Laserleistung von 17,9 W aufgenommen 54 ms nach Prozessbeginn. b) Verhältnis der Ausdehnungen der MVZ parallel (a) und senkrecht (b) zu den Carbonfasern als Funktion der Prozesszeit. Prozessparameter: $P=17,9$ W, $f_p=800$ kHz, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=33$ μ m, $M^2<1,1$, zirkulare Polarisation.

Ob die Ausrichtung einer Carbonfaserlage einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung der MVZ in den benachbarten Carbonfaserlagen hat, wurde mit im Folgenden beschriebenen Versuchsaufbau untersucht. Dazu wurde in CFK Werkstücke sowohl mit unidirektionaler als auch bidirektionaler Ausrichtung der Carbonfasern perkussionsgebohrt. Verwendet wurde ein Lasersystem, welches Strahlung mit einer Wellenlänge von 1030 nm emittiert. Die Pulse hatten eine Dauer von ungefähr 8 ps, die Pulsfrequenz betrug 300 kHz. Die mittlere Laserleistung gemessen am Werkstück war 69,6 W, die Strahlqualität war $M^2<1,1$ und der Fokussdurchmesser auf der Werkstückoberfläche betrug 22 μ m. Der Laserstrahl war parallel zu den Carbonfasern der obersten Carbonfaserlage polarisiert. Die Ausdehnung der MVZ wurde an der Oberfläche nach der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Messung an der Oberfläche“ ausgewertet. Bild 6.3a zeigt die Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern der obersten Carbonfaserlage als Funktion der Prozesszeit bei Bearbeitung sowohl des unidirektionalen als auch des bidirektionalen CFK. Die Ausdehnung der MVZ ist in Richtung der Carbonfasern für die beiden hier betrachteten Materialien ähnlich groß. Abweichungen ab einer Prozesszeit von 1500 ms sind auf Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche des CFK Materials zurückzuführen. Bild 6.3b zeigt die Ausdehnung der MVZ senkrecht zur Orientierung der Carbonfasern der obersten Carbonfaserlage als

Funktion der Prozesszeit bei Bearbeitung sowohl des unidirektionalen als auch des bidirektionalen CFK. Zu Beginn des Perkussionsbohrprozesses ist die Ausdehnung der MVZ senkrecht zur Orientierung der Carbonfasern für beide Materialien ähnlich. Ab einer Bohrdauer von 200 ms ist ein deutlicher Einfluss der Orientierung der zweiten Carbonfaserlage erkennbar. Die Ausdehnung der MVZ des bidirektionalen Materials ist ab diesem Zeitpunkt durchschnittlich um 68% größer als die Ausdehnung der MVZ des unidirektionalen Materials.

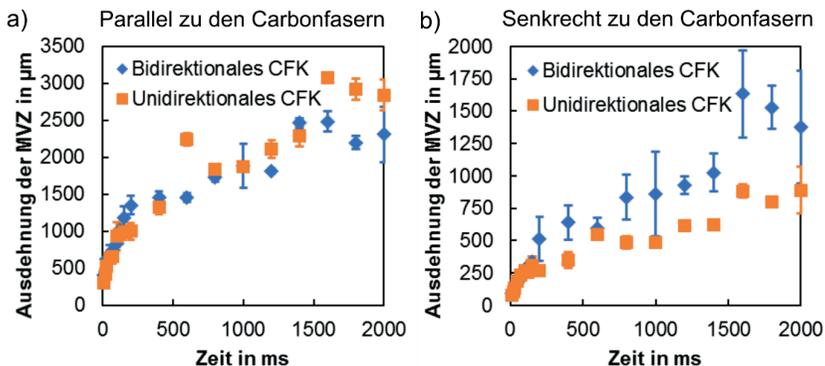


Bild 6.3: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Zeit für einen Perkussionsbohrprozess in unidirektionalem und bidirektionalem CFK. a) Ausdehnung der MVZ in Richtung der Carbonfasern, b) Ausdehnung der MVZ senkrecht zu den Carbonfasern. Prozessparameter: $P=69,6$ W, $f_p=300$ kHz, $\lambda=1030$ nm, $\tau=8$ ps, $d=22$ μm , $M^2<1,1$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern in der obersten Carbonfaserlage.

In den hier vorgestellten Experimenten konnte also für Prozesszeiten größer als 200 ms bei der Bearbeitung des bidirektionalen CFKs gezeigt werden, dass die Ausbreitung der MVZ innerhalb einer Carbonfaserlage auch von benachbarten Carbonfaserlagen beeinflusst wird. Ein ähnlicher Effekt wurde auch in [98] für einen Dauerstrich- CO_2 Laser berichtet. Dabei wurde die Temperatur des Materials während und nach einem Laserschneidprozess in Carbonfaserlagen mit paralleler und in Carbonfaserlagen mit senkrechter Ausrichtung der Carbonfasern relativ zur Schnitttrichtung gemessen. Kurz nach dem Schneidprozess wurden in Lagen mit zur Schnitttrichtung senkrechter Orientierung der Carbonfasern deutlich höhere Temperaturen gemessen als in Lagen mit zur Schnitttrichtung paralleler Orientierung der Carbonfasern. Mit zunehmender Abkühlzeit glichen sich die Temperaturen in den verschiedenen Lagen immer weiter an, bis diese nach ca. 3 s identisch waren. Die in Bild 6.3b zu sehende größere Ausdehnung der MVZ senkrecht zu den Carbonfasern bei Bearbeitung von bidirektionalem CFK Material kann also auf einen Temperaturengleich zwischen den einzelnen Carbonfaserlagen zurückgeführt werden. Aufgrund der guten Wärmeleitung

entlang der Carbonfasern wird Wärme zunächst entlang dieser in das Material transportiert und anschließend über einen längeren Zeitraum auch senkrecht zu den Carbonfasern verteilt.

6.2 Beobachtung der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Laserpulsen beim Perkussionsbohren

Der Einfluss sowohl der Pulsfrequenz als auch der Pulsenergie auf die Ausdehnung der MVZ bei der gepulsten Laserbearbeitung von CFK wurde mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet. Der experimentelle Aufbau war identisch zu dem in Abschnitt 6.1 beschriebenen Versuchsaufbau. Eine Bildsequenz von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Perkussionsbohrprozessen mit 11 W, 5,5 W und 2,2 W mittlerer Laserleistung ist in Bild 6.4 zu sehen.

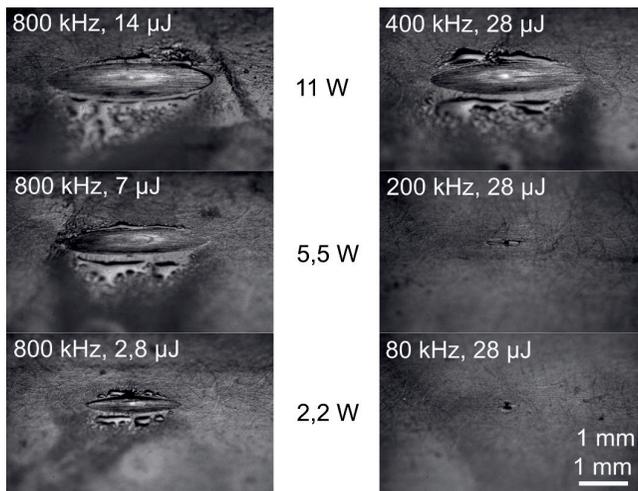


Bild 6.4: Bildsequenzen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Perkussionsbohrprozessen mit drei verschiedenen mittleren Leistungen nach jeweils 100 ms Prozesszeit. Auf der linken Seite wurde die mittlere Leistung durch Anpassung der Pulsenergie reduziert, auf der rechten Seite wurde die mittlere Leistung durch Reduktion der Pulsfrequenz angepasst. Prozessparameter: $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d=33$ μ m, $M^2<1,1$, zirkulare Polarisation.

Es sind Aufnahmen der Werkstückoberfläche zum Zeitpunkt 100 ms nach Start des Perkussionsbohrprozesses gezeigt. Bei den auf der linken Seite des Bildes dargestellten Prozessen war die Pulsfrequenz jeweils 800 kHz und zur Reduktion der mittleren Laserleistung wurde die Pulsenergie angepasst. Bei den auf der rechten Seite des Bildes dargestellten Prozessen war die Pulsenergie jeweils 28 μ J und zur Reduktion der mittleren Laserleistung wurde die Pulsfrequenz angepasst. Eine Aufnahme der CFK

Oberfläche nach einer Bohrzeit von 100 ms bei einer mittleren Laserleistung von 22,2 W ($f_p=800$ kHz, $E_p=28$ μ J) ist auch in Bild 6.1 zu sehen. Dabei kann die Ausbildung einer MVZ mit einer Ausdehnung von mehreren Millimetern beobachtet werden. Bei Verwendung geringerer mittlerer Laserleistungen (Bild 6.4) nimmt die Ausdehnung der MVZ ab. Allerdings spielt es eine wesentliche Rolle, ob die mittlere Laserleistung über eine Reduktion der Pulsfrequenz oder eine Reduktion der Pulsenergie verringert wurde. Bei gleicher mittlerer Laserleistung ist die Ausdehnung der MVZ bei reduzierter Pulsfrequenz signifikant kleiner als bei reduzierter Pulsenergie.

Basierend auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurde die Ausdehnung der MVZ für verschiedene Parameterkombinationen auf beiden Seiten der Prozesszone in Richtung der Carbonfasern wie in Abschnitt 6.1 beschrieben ausgewertet. Die Ausdehnung der MVZ in Abhängigkeit von der Prozesszeit ist in Bild 6.5 dargestellt. Eine gleiche Farbe der Datenpunkte in beiden Diagrammen symbolisiert die gleiche mittlere Laserleistung. Zu Beginn des Perkussionsbohrprozesses nimmt die Ausdehnung der MVZ rasch zu und sättigt mit zunehmender Bohrdauer. Für eine Pulsenergie von 1,4 μ J (Bild 6.5a) und für die Pulsfrequenzen von 40 kHz und 80 kHz (Bild 6.5b) wird diese Sättigung im betrachteten Zeitfenster von 150 ms erreicht.

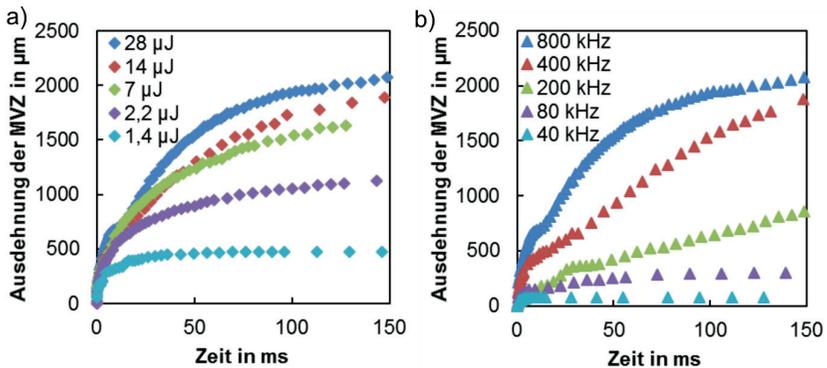


Bild 6.5: a) Ausdehnung der MVZ als Funktion der Zeit für verschiedene Pulsenergien bei konstanter Pulsfrequenz von 800 kHz. b) Ausdehnung der MVZ als Funktion der Zeit für verschiedene Pulsfrequenzen bei konstanter Pulsenergie von 28 μ J. Prozessparameter: $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=33$ μ m, $M^2<1,1$, zirkulare Polarisation.

Wie in Bild 6.5 zu sehen ist, führt eine Reduktion der mittleren Laserleistung stets zu einer Reduktion der Ausdehnung der MVZ. Ein Vergleich der Bilder 6.5a und b zeigt darüber hinaus, dass bei gleicher Bohrdauer die Ausdehnung der MVZ signifikant kleiner ist, wenn die mittlere Laserleistung durch eine Anpassung der Pulsfrequenz reduziert wird. Der ausschlaggebende Effekt, welcher bei erhöhter Pulsfrequenz zu

einer größeren Ausdehnung der MVZ führt, ist die Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Laserpulsen.

Bis hierher wurde die Ausdehnung der MVZ für verschiedene mittlere Laserleistungen als Funktion der Zeit angegeben. Zu einem festen Zeitpunkt wurde folglich für unterschiedliche mittlere Laserleistungen nicht dieselbe Menge optischer Energie eingestrahlt. Eine Betrachtung der Ausdehnung der MVZ bei einer festen Menge eingestrahelter optischer Energie ist allerdings im Hinblick auf den Bearbeitungsprozess sinnvoll. Möchte man ein gewisses Volumen bearbeiten, so folgt aus der Energiebilanz die dafür benötigte Menge absorbierter optischer Energie. In Bild 6.6 ist die Ausdehnung der MVZ für eingestrahelte Energiemengen von 0,11 J, 0,17 J, 0,22 J, 0,33 J und 0,44 J dargestellt. Dabei ist in Bild 6.6a die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsenergie für eine konstante Pulsfrequenz von 800 kHz und in Bild 6.6b die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsfrequenz für eine konstante Pulsenergie von 28 μJ zu sehen.

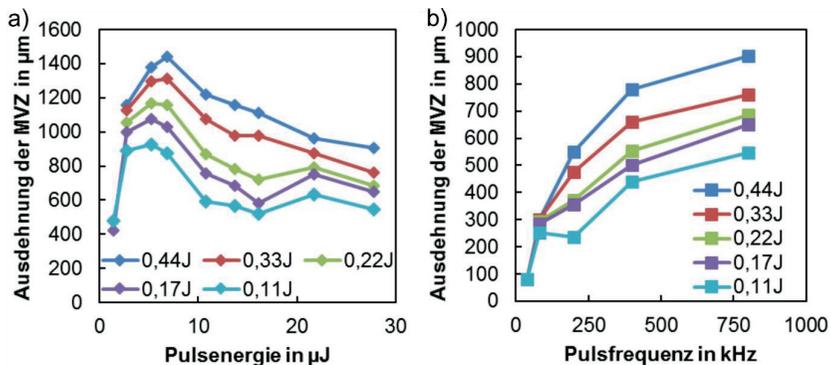


Bild 6.6: Ausdehnung der MVZ für unterschiedliche aufsummierte Mengen eingestrahelter Laserenergie. a) Ausdehnung der MVZ als Funktion verschiedener Pulsenergien bei konstanter Pulsfrequenz von 800 kHz. b) Ausdehnung der MVZ als Funktion verschiedener Pulsfrequenzen bei konstanter Pulsenergie von 28 μJ . Prozessparameter: $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d=33$ μm , $M^2<1,1$, zirkulare Polarisation.

Soll bei konstanter Pulsfrequenz aber unterschiedlichen Pulsenergien die eingestrahelte Energie konstant sein, so muss abhängig von der Pulsenergie die Anzahl an eingestrahelten Laserpulsen, und somit die Prozesszeit, variiert werden. Bei einer geringeren Pulsenergie werden entsprechend mehr Laserpulse benötigt. Die in Bild 6.6a zu sehende Ausdehnung der MVZ zeigt für alle eingestrahelten Energiemengen ein ähnliches Verhalten in Abhängigkeit der Pulsenergie. Bei Bearbeitung mit der niedrigsten Pulsenergie beträgt die Ausdehnung der MVZ ungefähr 450 μm . Eine geringfügige Erhöhung der Pulsenergie führt zu einem sprunghaften Anstieg der Ausdehnung der MVZ

auf ein lokales Maximum für Pulsenergien zwischen $5,6 \mu\text{J}$ und $7 \mu\text{J}$. Für höhere Pulsenergien werden wieder kleinere Ausdehnungen der MVZ erreicht. So ist die Ausdehnung der MVZ bei einer Pulsenergie von $28 \mu\text{J}$ verglichen mit der Ausdehnung der MVZ bei einer Pulsenergie von $7 \mu\text{J}$ um bis zu 37% kleiner. Es lässt sich festhalten, dass es bei konstanter Pulsfrequenz hinsichtlich der thermischen Schädigung des Materials vorteilhaft ist, weniger Laserpulse bei einer höheren Pulsenergie einzustrahlen als mehr Pulse mit geringerer Energie. Reduziert man die Pulsenergie allerdings weit genug, so dass die Energiedichte des Laserstrahls im Fokus nahe der Abtragschwelle ist, so kann ebenfalls mit geringer thermischer Schädigung bearbeitet werden. Für Bearbeitungsprozesse mit hohem Aspektverhältnis ist diese Parameterwahl allerdings ungeeignet.

Soll bei konstanter Pulsenergie aber unterschiedlichen Pulsfrequenzen die eingestrahlte Energie konstant sein, so muss die Prozesszeit abhängig von der Pulsfrequenz variieren. Die Anzahl an eingestrahlten Laserpulsen bleibt dabei konstant. Die in Bild 6.6b für verschiedene Pulsfrequenzen bei konstanter eingestrahlter Energie dargestellte Ausdehnung der MVZ ist kleiner für geringe Pulsfrequenzen. Vergleicht man die Ausdehnung der MVZ für die Pulsfrequenzen 800 kHz und 40 kHz, so ist bei der niedrigeren Pulsfrequenz die MVZ mit ungefähr $80 \mu\text{m}$ um bis zu 91% kleiner. Die von der Pulsfrequenz abhängige Akkumulation von Wärme zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Laserpulsen spielt bei der Ausbildung einer thermischen Schädigung bei der CFK Bearbeitung eine wesentliche Rolle und wird im Folgenden für den Fall des bewegten Laserstrahls betrachtet.

6.3 Wärmeakkumulationseffekte bei der gepulsten Bearbeitung mit bewegtem Laserstrahl

Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Experimenten bei stationärem Laserstrahl wurden erneut die beiden Parameterkombinationen für Pulsfrequenz und Pulsenergie, $f_p=800 \text{ kHz}$ und $E_p=2,8 \mu\text{J}$ sowie $f_p=80 \text{ kHz}$ und $E_p=28 \mu\text{J}$, angewandt. Es kam dasselbe Lasersystem sowie dasselbe bidirektionale CFK Material wie bei den in Abschnitt 6.2 gezeigten Untersuchungen zum Einsatz. Das Werkstück wurde für beide Parameterkombinationen mit einer Geschwindigkeit von $v=10 \text{ mm/s}$ relativ zum Laserstrahl bewegt, in Richtung senkrecht zu den Carbonfasern der obersten Lage. Der Fokusbereich auf dem Werkstück war $d_f=12 \mu\text{m}$. Die Polarisation der Laserstrahlung war linear, wobei das elektrische Feld senkrecht zu den Carbonfasern der obersten Lage schwang. Die MVZ wurde im Querschleif nach der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“ ausgewertet. Die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl Überfahrten ist in Bild 6.7 dargestellt. Wie bereits bei stationärem Laserstrahl beobachtet (vgl. Bild 6.5, violette Datenreihe), ist die Ausdehnung der MVZ bei der niedrigeren Pulsfrequenz von 80 kHz kleiner als bei einer Pulsfre-

quenz von 800 kHz. Nach 300 Überfahrten hat die MVZ bei einer Pulsfrequenz von 800 kHz eine Ausdehnung von ungefähr 300 μm , während diese bei einer Pulsfrequenz von 80 kHz lediglich ungefähr 110 μm groß ist.

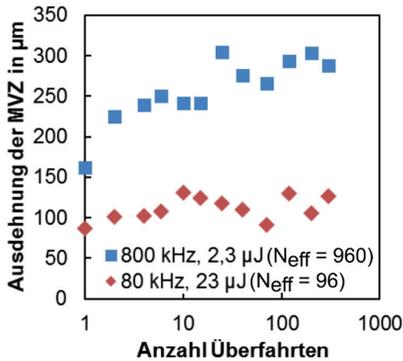


Bild 6.7: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten bei einer mittleren Laserleistung von 1,8 W, allerdings unterschiedlicher Pulsfrequenz und Pulsenergie. Prozessparameter: $P=1,8\text{ W}$, $\lambda=515\text{ nm}$, $\tau=8\text{ ps}$, $d=12\text{ }\mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $v=10\text{ mm/s}$, lineare Polarisation orientiert senkrecht zu den Carbonfasern der obersten Carbonfaserlage.

effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff},800\text{kHz}} = 960$. Reduziert man die Pulsfrequenz auf 80 kHz, so ergibt sich eine effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff},80\text{kHz}} = 96$. Vergleicht man die Ausdehnungen der MVZ für die Fälle des stationären (Bild 6.5) und bewegten (Bild 6.7) Laserstrahls, so ist die Ausdehnung der MVZ bei gleicher effektiver Anzahl an Pulsen in beiden Fällen trotz unterschiedlichem Fokusbereich ähnlich. Wird mit einer Pulsfrequenz von $f_p=80\text{ kHz}$ und einer Pulsenergie von $E_p=23\text{ }\mu\text{J}$ perkussionsgebohrt, so hat die MVZ nach 96 Pulsen eine Ausdehnung an der Oberfläche von ungefähr 100 μm (siehe Bild 6.5b). Wird der Laserstrahl mit $v=10\text{ mm/s}$ bewegt, hat die MVZ im Material eine ähnlich große Ausdehnung von ungefähr 90 μm .

Die Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Laserpulsen ist auch bei bewegtem Laserstrahl ein wesentlicher Schädigungsmechanismus bei der Laserbearbeitung von CFK. Eine Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Überfahrten konnte im Rahmen der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen allerdings nicht beobachtet werden. Für die hier verwendete niedrige Vor-

Vorhergehend wurde gezeigt, dass der Effekt der Wärmeakkumulation nicht nur von der Pulsfrequenz, sondern auch von der eingestrahnten Anzahl an Laserpulsen abhängt. Aufgrund des gaußförmigen Strahlprofils ist bei bewegtem Laserstrahl keine allgemein gültige Definition der Anzahl an eingestrahnten Laserpulsen möglich. Hier wird eine auf dem Fokusbereich (bei $1/e^2$ der Spitzenintensität) basierende Definition einer an einem bestimmten Punkt entlang der Spur effektiv auftreffenden Anzahl an Pulsen verwendet. Die effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt N_{eff} lässt sich mit Gl. (3.7) berechnen. Für die Pulsfrequenz von 800 kHz ergibt sich bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s und einem Fokusbereich von 12 μm eine

schubgeschwindigkeit und somit niedrige Scanfrequenz ($f_s \approx 0,9$ Hz) bei einer hohen effektiven Anzahl an Laserpulsen pro Ort und Überfahrt ist die maximale Ausdehnung der MVZ bereits nach wenigen Überfahrten erreicht und bleibt anschließend im Rahmen der für CFK üblichen Schwankungen konstant (siehe Bild 6.7). In [56] wurde allerdings gezeigt, dass beim Laserschneiden von CFK mit Mehrfachüberfahrten und hohen Vorschubgeschwindigkeiten die Ausdehnung der thermischen Schädigung von der Scanfrequenz abhängig ist. Für hohe Scanfrequenzen wurde eine Zunahme der Ausdehnung der thermischen Schädigung beobachtet. Scanfrequenzen, für welche ein Einfluss der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans (WAS) bemerkbar ist, werden meist bei der Laserbearbeitung mit Scannersystemen erreicht. Im Folgenden werden deshalb Untersuchungen zur Scanner-basierten Laserbearbeitung von CFK vorgestellt, bei welchen hohe Vorschubgeschwindigkeiten, hohe Scanfrequenzen und eine geringe effektive Anzahl von Pulsen pro Ort und Überfahrt (minimal $N_{\text{eff}}=7$) realisiert wurden.

6.4 Wärmeakkumulationseffekte beim Scanner-basierten Laserschneiden mit gepulsten Lasersystemen

Zur Untersuchung der Wärmeakkumulationseffekte beim gepulsten Laserschneiden von CFK mit mehrfachen Überfahrten des Laserstrahls über das Material wurde ein schnelles Scannersystem verwendet. Dabei wurde 2 mm dickes CFK mit einer unidirektionalen Ausrichtung der Carbonfasern bearbeitet. Die Toray T700S-12k Carbonfasern waren in dem duroplastischen Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135 eingebettet. Das Lasersystem emittierte bei einer Wellenlänge von 515 nm Pulse mit einer Dauer von ungefähr 8 ps und einer Pulsfrequenz von 800 kHz. Die maximale mittlere Laserleistung war 29 W. Der Scanner war mit einem f-Theta Objektiv der Brennweite 259 mm ausgerüstet. Der fokussierte Laserstrahl hatte auf der Werkstückoberfläche einen Durchmesser von 37,3 μm . Die Bearbeitungsrichtung war stets senkrecht zur Orientierung der Carbonfasern. Die Nuten mit einer Länge von $L_{\text{Nut}}=14$ mm wurden mit mehrfachen Überfahrten des Laserstrahls über das Material abgetragen. Das Material wurde während der Vorwärtsbewegung des Laserstrahls bearbeitet. Während der Rückwärtsbewegung mit einer Geschwindigkeit von typischerweise 10 m/s wurde keine Laserstrahlung emittiert. Es wurden 400 Überfahrten angewendet. Die Ausdehnung der MVZ wurde im Querschliff mit der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“ ausgewertet.

In den im Folgenden beschriebenen Experimenten wurde eine konstante Pulsenergie von $E_p=30,8$ μJ verwendet, womit ein konstanter Wärmeeintrag pro Puls angenommen werden kann. Die Abhängigkeit der Ausdehnung der MVZ von der Pulsfrequenz und der Vorschubgeschwindigkeit wurde durch den Vergleich einer Serie von Nuten untersucht, welche mit einer konstanten effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt

abgetragen wurden. Die effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt wurde durch eine simultane Variation der Pulsfrequenz und der Vorschubgeschwindigkeit konstant gehalten, vgl. Gl. (3.7). Eine konstante effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt N_{eff} stellt sicher, dass pro Überfahrt dieselbe Menge Laserenergie eingestrahlt wird und dem Ablationsprozess somit die gleiche Energiemenge zur Verfügung steht. Dadurch haben die erzeugten Nuten ungefähr die gleiche Tiefe. Der Anteil der insgesamt eingestrahlenen Energie, welcher als Wärme im Material verbleibt und zur thermischen Schädigung beiträgt, kann aufgrund der konstanten Pulsenergie (und somit Energiedichte) ebenfalls als konstant angenommen werden.

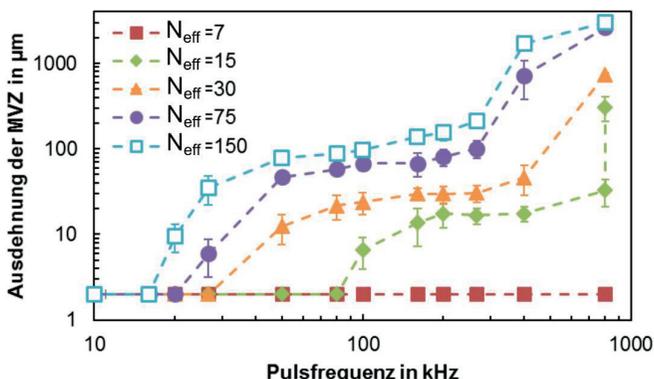


Bild 6.8: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsfrequenz für verschiedene Werte der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt. Prozessparameter: $E_p=30,8 \mu\text{J}$, $\lambda=515 \text{ nm}$, $\tau=8 \text{ ps}$, $d_f=37,3 \mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $N_S=400$, $L_{\text{Nut}}=14 \text{ mm}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsfrequenz ist in Bild 6.8 für verschiedene Werte der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt zu sehen. Für die geringste effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt ($N_{\text{eff}}=7$) konnte in Aufnahmen von Querschliffen der Nuten keine thermische Schädigung festgestellt werden. In diesem Fall wird eine Ausdehnung der MVZ von $2 \mu\text{m}$ angenommen (ungefähr ein Viertel des Carbonfaserdurchmessers). Für alle anderen Werte der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt bildet sich für niedrige Pulsfrequenzen ebenfalls keine MVZ aus. Erst ab einer gewissen, kritischen Pulsfrequenz kann ein Anstieg der Ausdehnung der MVZ beobachtet werden. Diese kritische Pulsfrequenz nimmt für eine zunehmende effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt ab. Oberhalb der kritischen Pulsfrequenz nimmt die Ausdehnung der MVZ zu, bis sie ein zunächst relativ stabiles Niveau erreicht. Die Ausdehnung der MVZ auf diesem Niveau hängt von der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt ab. Beispielsweise ist die Aus-

dehnung der MVZ bei einer effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff}}=15$ ungefähr $10 \mu\text{m}$ und ungefähr $100 \mu\text{m}$ bei einer effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff}}=150$. Ein zweiter, weiterer Anstieg der Ausdehnung der MVZ kann für Pulsfrequenzen zwischen 266 kHz und 800 kHz beobachtet werden. Für die größte effektive Anzahl von Pulsen pro Ort und Überfahrt ($N_{\text{eff}}=150$) werden hier Ausdehnungen der MVZ von mehreren Millimetern erreicht.

Man kann also zwei unterschiedliche Regime bei der Ausbildung der MVZ erkennen: Ausbildung einer messbaren MVZ für Pulsfrequenzen größer als eine kritische Pulsfrequenz (Regime I) und ein zweiter Anstieg der Ausdehnung der MVZ (Regime II) bei noch höheren Pulsfrequenzen. Da bei den hier vorgestellten Untersuchungen die Spitzenintensität im Fokus stets deutlich über 10^9 W/cm^2 (hier: $I_0 = 3,5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$) lag, dürfte nach dem in [41] vorgestellten Modell keine thermische Schädigung sichtbar sein. Die Ausbildung einer MVZ ist also allein Wärmeakkumulationseffekten (WAP und WAS) geschuldet. Welcher Wärmeakkumulationseffekt für die Ausbildung der MVZ in den beiden vorgestellten Regimen verantwortlich ist, wird im Folgenden geklärt.

Beim Laserabtrag mit mehrfachen Überfahrten des Laserstrahls über das Material ist die Zeit

$$\Delta t_{\text{Scans}} = t_{\text{prozess}} + t_{\text{pos}} + t_{\text{pause}} = \frac{L_{\text{Nut}}}{v} + t_{\text{pos}} + t_{\text{pause}} \quad (6.1)$$

zwischen zwei aufeinanderfolgenden Überfahrten durch die Prozesszeit t_{prozess} , die Positionierzeit t_{pos} und eine eventuelle Prozesspause t_{pause} definiert, wobei sich die Prozesszeit aus der Nutlänge L_{Nut} und der Vorschubgeschwindigkeit v ergibt. In den hier vorgestellten Experimenten wurden keine Pausen in den Prozess integriert, somit ist $t_{\text{pause}}=0$. Die Positionierzeit ergibt sich aufgrund der geraden Geometrie der erzeugten Nut zu $t_{\text{pos}}=L_{\text{Nut}}/v_b$, wobei v_b die Positioniergeschwindigkeit ist. Mit Gl. (6.1) lässt sich die Scanfrequenz

$$f_S = \frac{1}{\Delta t_{\text{scans}}} = \frac{v \cdot v_b}{L_{\text{Nut}} \cdot (v + v_b)} \quad (6.2)$$

angeben. In Bild 6.9 ist die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsfrequenz (a) und als Funktion der Scanfrequenz (b) dargestellt. Dabei handelt es sich in beiden Fällen um dieselben Messdaten lediglich in anderer Darstellung. Es sind sowohl in Bild 6.9a als auch in Bild 6.9b zwei Datenreihen dargestellt. In den dazugehörigen Experimenten wurden unterschiedliche Positioniergeschwindigkeiten von $v_b=10 \text{ m/s}$ und $v_b=0,2 \text{ m/s}$ angewandt. Die effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt war in beiden Fällen $N_{\text{eff}}=75$.

Wird die Ausdehnung MVZ als Funktion der Pulsfrequenz dargestellt (Bild 6.9a), so stimmen beide Kurven für Pulsfrequenzen kleiner 200 kHz nahezu überein. Der zweite Anstieg der Ausdehnung der MVZ (Übergang in Regime II) beginnt für beide Kurven dagegen bei unterschiedlichen Pulsfrequenzen. Die Pulsfrequenz ist in diesem Fall also nicht die prozessdefinierende Größe. Betrachtet man dagegen die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Scanfrequenz (Bild 6.9b), so stimmen auch beim zweiten Anstieg der Ausdehnung der MVZ die Verläufe der beiden Kurven überein. Die Scanfrequenz ist der wesentliche Einflussfaktor beim Übergang vom Regime I in das Regime II. Der in Bild 6.8 zu sehende, zweite Anstieg der Ausdehnung der MVZ kann also auf die Akkumulation von Wärme zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans zurückgeführt werden.

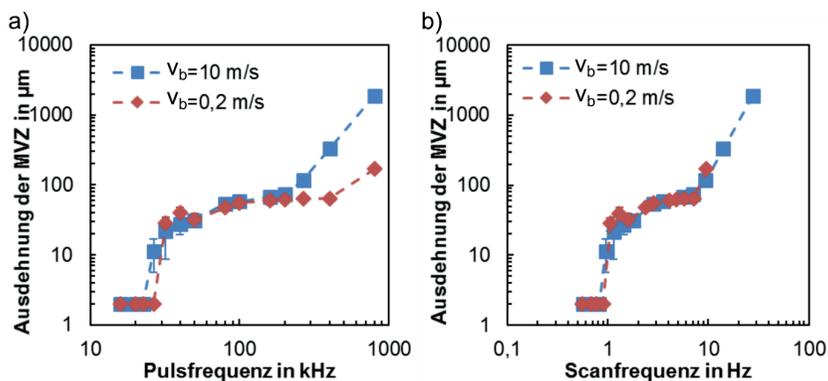


Bild 6.9: a) Abhängigkeit der Ausdehnung der MVZ von der Pulsfrequenz für verschiedene Positioniergeschwindigkeiten v_b bei einer effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff}}=75$. b) Dieselben Messwerte für die Ausdehnung der MVZ dargestellt als Funktion der Scanfrequenz. Prozessparameter: $E_P=30,8 \mu\text{J}$, $\lambda=515 \text{ nm}$, $\tau=8 \text{ ps}$, $d_f=37,3 \mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $N_S=400$, $L_{\text{Nut}}=14 \text{ mm}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Im Folgenden wird der Einfluss der Scanfrequenz, der Anzahl an Überfahrten sowie des Wärmeeintrags pro Überfahrt auf die Ausdehnung der MVZ anhand von im Experiment gewonnener Daten diskutiert. In Bild 6.10 ist der Einfluss der Scanfrequenz auf die Ausdehnung der MVZ bei einer Pulsfrequenz von $f_P=800 \text{ kHz}$ für unterschiedliche Werte der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt zu sehen. Die Scanfrequenz wurde durch eine Anpassung der Positioniergeschwindigkeit v_b geändert. Lediglich die effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt wurde durch eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit v variiert. Für niedrige Scanfrequenzen ist die Ausdehnung der MVZ auf einem stabilen Niveau. Die Ausdehnung der MVZ auf diesem Niveau hängt von der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt ab. Sie ist ungefähr $30 \mu\text{m}$ für 15 und 30 effektive Pulse pro Ort und Überfahrt und ungefähr

70 μm für 75 effektive Pulse pro Ort und Überfahrt. Erst ab einer gewissen Frequenz, einer kritischen Scanfrequenz, nimmt die Ausdehnung der MVZ stark zu bis hin zu einigen Millimetern. Der Effekt der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans bewirkt also ab einer kritischen Scanfrequenz eine Vergrößerung der Ausdehnung der MVZ. Diese kritische Scanfrequenz nimmt ab mit einer größeren effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt, also einem höheren Wärmebeitrag pro Überfahrt.

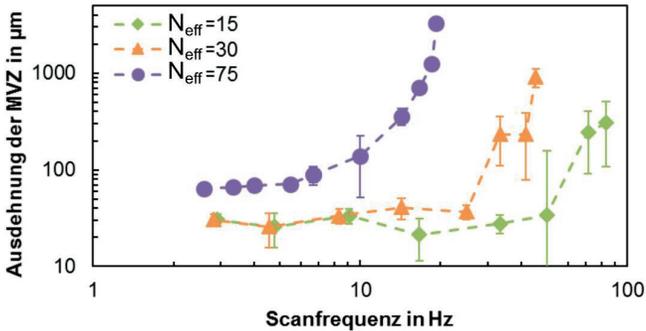


Bild 6.10: Abhängigkeit der Ausdehnung der MVZ von der Scanfrequenz bei einer hohen Pulsfrequenz von 800 kHz. Prozessparameter: $P=24,6$ W, $E_p=30,8$ μJ , $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=37,3$ μm , $M^2<1,1$, $N_S=400$, $L_{\text{Nut}}=14$ mm, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Bei den bisher diskutierten Experimenten wurde der Laserstrahl stets 400-mal über das Material bewegt. In Bild 6.11 ist die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten für zwei verschiedene Positioniergeschwindigkeiten ($v_b=0,2$ m/s und $v_b=10$ m/s) und somit zwei verschiedene Scanfrequenzen ($f_s=5,7$ Hz und $f_s=27,5$ Hz) dargestellt. Die Pulsfrequenz ($f_p=800$ kHz), die Vorschubgeschwindigkeit ($v=0,4$ m/s) und somit die effektive Anzahl an Pulsen ($N_{\text{eff}}=75$) pro Ort und Überfahrt waren konstant. Für die niedrigere Pulsfrequenz von 5,7 Hz ist die Ausdehnung der MVZ unabhängig von der Anzahl an Überfahrten. Es kann also angenommen werden, dass die Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans hier keinen Einfluss hat. Die Ausdehnung der MVZ ist allein durch den Effekt der WAP definiert. Bei einer Scanfrequenz von 27,5 Hz steigt die Ausdehnung der MVZ nach 50 Überfahrten von 75 μm auf 340 μm stark an. Es konnte somit gezeigt werden, dass der Effekt der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans auch von der Anzahl an Überfahrten abhängig ist. Erst nach einer ausreichend großen Anzahl an Überfahrten kann ein Anstieg der Ausdehnung der MVZ beobachtet werden.

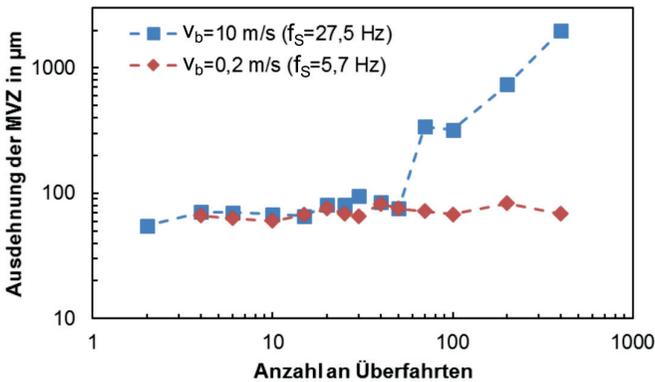


Bild 6.11: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten für zwei verschiedene Scanfrequenzen bei einer konstanten effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff}}=75$. Prozessparameter: $f_p=800$ kHz, $E_p=30,8$ µJ, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=37,3$ µm, $M^2<1,1$, $N_s=400$, $L_{\text{Nut}}=14$ mm, $v=0,4$ m/s, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine den kritischen Wert überschreitende Scanfrequenz nötig ist, damit der Prozess im vom WAS-Effekt definierten Regime II stattfindet. Die kritische Scanfrequenz, ab der aufgrund des Effekts der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans eine zusätzliche thermische Schädigung auftritt, hängt unter anderem von der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt, also dem Wärmeeintrag pro Überfahrt, ab. Eine Zunahme der Ausdehnung der MVZ aufgrund des WAS-Effekts findet allerdings erst nach einer Anzahl an Überfahrten statt, die einen kritischen Wert übersteigt. Im in Bild 6.11 dargestellten Beispiel wäre diese kritische Anzahl an Überfahrten $N_{S,\text{krit}} \approx 50$ (für $f_s = 27,5$ Hz). In Regime I ist die Ausdehnung der MVZ unabhängig von der Anzahl an Überfahrten und der Scanfrequenz. Die Ausdehnung der MVZ ist in Regime I dominiert durch den WAP-Effekt und somit ausschließlich von der Pulsenergie, der Pulsfrequenz und der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt abhängig.

In Bild 6.12 ist die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsfrequenz für 75 effektive Pulse pro Ort und Überfahrt dargestellt. Dieselbe Datenreihe wurde auch schon in Bild 6.8 verwendet. Der erste Anstieg der Ausdehnung der MVZ zwischen den Datenpunkten A_I und B_I stellt den Übergang vom Bereich keiner Wärmeakkumulation zum Regime I (Ausbildung einer MVZ aufgrund des Effekts der WAP) dar. Die Pulsfrequenz f_{pI} und die Vorschubgeschwindigkeit v_I an diesem Übergang wurden durch Mittelung der beiden Pulsfrequenzen f_A und f_B und der beiden Vorschubgeschwindigkeiten v_A und v_B der beiden Datenpunkte A_I und B_I bestimmt:

$f_{PI}=(f_A+f_B)/2$, $v_I=(v_A+v_B)/2$. Die Fehlerintervalle Δf_{PI} und Δv_I sind die Differenz zwischen dem so berechneten Mittelwert und den ursprünglichen Werten: $\Delta f_{PI}=(f_{PI}-f_A)$, $\Delta v_I=(v_I-v_A)$ bzw. $\Delta f_{PI}=(f_B-f_{PI})$, $\Delta v_I=(v_B-v_I)$. Die auf diese Weise berechneten Parameter (f_{PI}, v_I) markieren den Übergang von vernachlässigbarer Wärmeakkumulation in das Regime I. Analog stellt der zweite Anstieg der MVZ zwischen den Datenpunkten C_{II} und D_{II} den Übergang vom Regime I in das Regime II (Ausbildung bzw. Vergrößerung der MVZ aufgrund des Effekts der WAS) dar. Die Pulsfrequenz f_{PII} und die Vorschubgeschwindigkeit v_{II} an diesem Übergang wurden durch Mittelung der beiden Pulsfrequenzen f_C und f_D und der beiden Vorschubgeschwindigkeiten v_C und v_D der beiden Datenpunkte C_{II} und D_{II} bestimmt: $f_{PII}=(f_C+f_D)/2$, $v_{II}=(v_C+v_D)/2$. Die Fehlerintervalle Δf_{PII} und Δv_{II} sind die Differenz zwischen dem so berechneten Mittelwert und den ursprünglichen Werten: $\Delta f_{PII}=(f_{PII}-f_C)$, $\Delta v_{II}=(v_{II}-v_C)$ bzw. $\Delta f_{PII}=(f_D-f_{PII})$, $\Delta v_{II}=(v_D-v_{II})$. Die auf diese Weise berechneten Parameter (f_{PII}, v_{II}) markieren den Übergang von Regime I (WAP) in das Regime II (WAP+WAS).

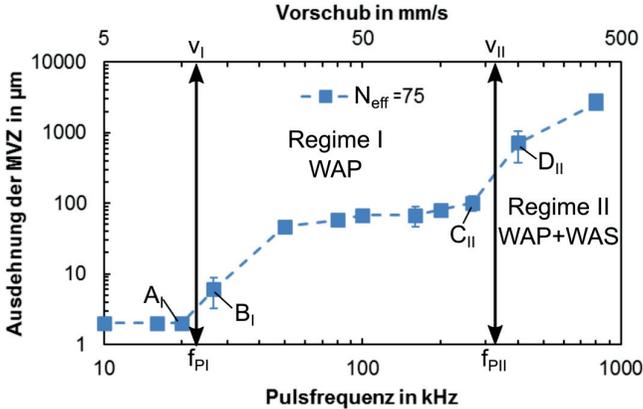


Bild 6.12: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Pulsfrequenz für eine effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{eff}=75$. Die Pulsfrequenz und der Vorschub der Übergänge in das Regime I (f_{PI}, v_I) und in das Regime II (f_{PII}, v_{II}) sind mit Pfeilen markiert. Die beiden Datenpunkte neben dem Übergang in das Regime I sind mit A_I und B_I gekennzeichnet, die beiden Datenpunkte neben dem Übergang in das Regime II sind mit C_{II} und D_{II} gekennzeichnet. Prozessparameter: $E_P=30,8 \mu\text{J}$, $\lambda=515 \text{ nm}$, $\tau=8 \text{ ps}$, $d_r=37,3 \mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $N_S=400$, $L_{Nut}=14 \text{ mm}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Bild 6.13 stellt im Parameterraum (f_P, v) die Parameterkombinationen für die Übergänge in die Regime I und II dar. Die Quadrate markieren den Übergang vom Bereich vernachlässigbarer Wärmeakkumulation in das Regime I, die Rhomben den Übergang von Regime I in Regime II. Die Parameter (f_{PI}, v_I) und (f_{PII}, v_{II}) und die entsprechenden Fehlerintervalle $(\Delta f_{PI}, \Delta v_I)$ und $(\Delta f_{PII}, \Delta v_{II})$ wurden über den im vorherigen Absatz

beschriebenen Formalismus berechnet. Die gestrichelten Linien durch die Datenpunkte dienen der vereinfachten Dateninterpretation und teilen den Parameterraum in drei Bereiche auf: (1) einen Bereich (links der quadratischen Datenpunkte) mit vernachlässigbarer Wärmeakkumulation und dementsprechend einer geringen Ausdehnung der MVZ von $<2\mu\text{m}$; (2) das Regime I (zwischen den quadratischen und rhombischen Datenpunkte) mit Ausdehnungen der MVZ bis zu einigen $100\mu\text{m}$ aufgrund des WAP-Effekts; (3) das Regime II (Bereich rechts der rhombischen Datenpunkten) mit Ausdehnungen der MVZ bis zu mehreren Millimetern aufgrund des WAS-Effekts, welcher eine zusätzliche Vergrößerung der MVZ bewirkt.

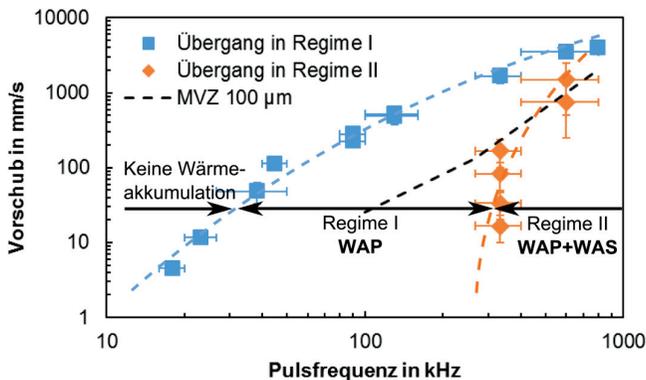


Bild 6.13: Illustration der Grenzen im (f_p, v) -Parameterraum zwischen keiner Wärmeakkumulation und Regime I und zwischen Regime I und Regime II. Die blauen Quadrate kennzeichnen den Übergang von keiner Wärmeakkumulation in das Regime I. Die orangenen Rhomben kennzeichnen den Übergang von Regime I in das Regime II. Die schwarze, gestrichelte Linie kennzeichnet Parameterkombinationen, welche zu einer Ausdehnung der MVZ von $100\mu\text{m}$ führen. Prozessparameter: $E_p=30,8\mu\text{J}$, $\lambda=515\text{nm}$, $\tau=8\text{ps}$, $d_f=37,3\mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $N_S=400$, $L_{\text{Nut}}=14\text{mm}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Die schwarze, gestrichelte Linie in Bild 6.13 kennzeichnet die (f_p, v) -Trajektorie, entlang welcher die MVZ eine Ausdehnung von ungefähr $100\mu\text{m}$ hat (mit kleineren Ausdehnungen der MVZ links dieser Linie). Der Übergang dieser Linie von Regime I in das Regime II bedeutet, dass trotz Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans eine Ausdehnung der MVZ kleiner $100\mu\text{m}$ gemessen werden kann, wenn die effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt ausreichend klein ist. In der rechten, oberen Ecke des Diagramms in Bild 6.13 ist eine Annäherung der beiden Kurven, welche die Regime-Übergänge markieren, zu beobachten. Für hohe Pulsfrequenzen, hohe Vorschubgeschwindigkeiten und somit eine kleine effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt ist die durch die Wärmeakkumulation zwischen

mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen verursachte Temperaturerhöhung zur Ausbildung einer MVZ nicht mehr ausreichend. Erst durch den wiederholten Wärmeeintrag mit hoher Scanfrequenz bildet sich eine MVZ aus.

An dieser Stelle sei nochmals daran erinnert, dass die in Bild 6.13 zu sehenden Datenpunkte für folgende Prozessparameter gültig sind: Fokaldurchmesser $d_f=37,3 \mu\text{m}$, Pulsenergie $E_p=30,8 \mu\text{J}$, Nuttlänge $L_{\text{Nut}}=14 \text{ mm}$, Positioniergeschwindigkeit $v_b=10 \text{ m/s}$, 400 Überfahrten und Wellenlänge $\lambda=515 \text{ nm}$. Diese Parameter haben einen Einfluss auf die Lage der Übergänge zwischen den einzelnen Bereichen. Zusätzlich hängt der Übergang zwischen Regime I und Regime II von der Scanfrequenz f_s ab und ist erst ab einer kritischen Anzahl an Überfahrten zu identifizieren. Trotz dieser Abhängigkeiten von spezifischen Prozessparametern präsentiert das in Bild 6.13 gezeigte Diagramm eine geeignete Darstellung experimenteller Daten, um die Effekte, welche zur Ausbildung einer MVZ führen, zu untersuchen.

6.4.1 Einfluss der Pulsenergie auf die Wärmeakkumulation

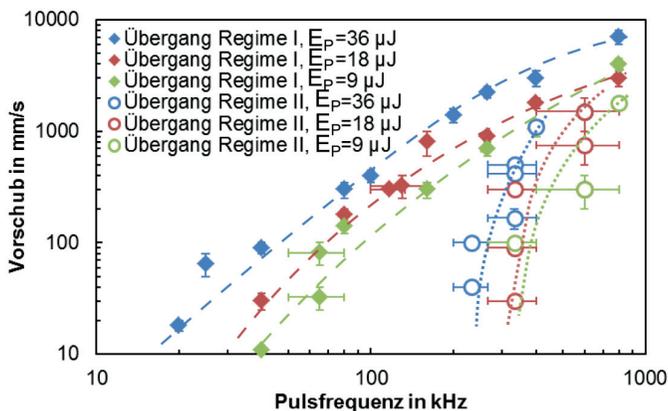


Bild 6.14: Illustration der Grenzen zwischen dem Regime mit vernachlässigbarer Wärmeakkumulation, Regime I und Regime II für verschiedene Pulsenergien bzw. Energiedichten. Prozessparameter: $\lambda=515 \text{ nm}$, $\tau=8 \text{ ps}$, $d_f=34,4 \mu\text{m}$, $M^2<1,1$, $N_s=400$, $L_{\text{Nut}}=14 \text{ mm}$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Die durch Wärmeakkumulation verursachte Temperaturerhöhung hängt bei der Laserbearbeitung mit gepulster Laserstrahlung für beide Wärmeakkumulationseffekte (WAP und WAS) unter anderem von der Pulsenergie ab. Der Einfluss der Pulsenergie auf den Übergang vom Bereich vernachlässigbarer Wärmeakkumulation in das Regime I und auf den Übergang von Regime I in Regime II ist in Bild 6.14 für die Pulsenergien $E_p=36 \mu\text{J}$, $E_p=18 \mu\text{J}$ und $E_p=9 \mu\text{J}$ ersichtlich. Die farblich zu den Datenpunkten zugehörigen Linien sind zur einfacheren Dateninterpretation eingefügt. Der Über-

gang vom Bereich vernachlässigbarer Wärmeakkumulation nach Regime I verschiebt sich für kleinere Pulsenergien in Richtung niedrigerer Vorschubgeschwindigkeiten und höherer Pulsfrequenzen. Der Bereich im (f_p, v) -Parameterraum, in welchem kein Einfluss der Wärmeakkumulation auf die thermische Schädigung beobachtet werden kann, nimmt zu. Auch der Übergang von Regime I (WAP) zu Regime II (WAP+WAS) wird für kleinere Pulsenergien in Richtung niedrigerer Vorschubgeschwindigkeiten und höherer Pulsfrequenzen verschoben. Eine Reduktion des Wärmeeintrags pro Puls, hier durch Reduktion der Pulsenergie, vergrößert also das Prozessfenster, in dem CFK schädigungsfrei bearbeitet werden kann. Der Effekt der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans führt erst bei höheren Pulsfrequenzen bzw. Vorschubgeschwindigkeiten zu einer zusätzlichen thermischen Schädigung des Materials.

6.4.2 Einfluss des Abstandes zweier Nuten auf die Ausbildung der MVZ

Die geometrischen Gegebenheiten nahe eines Schnitts bzw. einer erzeugten Nut haben ebenfalls einen Einfluss auf die sich durch Akkumulation von Wärme ergebende Temperaturerhöhung. Im Folgenden wird ein Experiment zur Untersuchung des Einflusses einer Nut auf die Ausdehnung der MVZ einer zweiten Nut beschrieben.

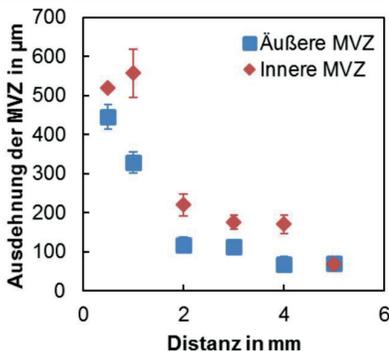


Bild 6.15: Ausdehnung der MVZ als Funktion des Abstandes zwischen zwei parallelen, nebeneinander erzeugten Nuten. Es wurde die MVZ der als zweites erzeugten Nut ausgewertet. Die „Innere MVZ“ ist die MVZ gemessen zwischen den Nuten, die „Äußere MVZ“ ist die MVZ gemessen auf der von der ersten Nut abgewandten Seite. Prozessparameter: $f_p=800$ kHz, $E_p=36,2$ μJ , $v=2,04$ m/s, $N_{\text{eff}}=15$, $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=35,7$ μm , $M^2<1,1$, $N_S=400$, $L_{\text{Nut}}=14$ mm, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern.

Im Folgenden wird ein Experiment zur Untersuchung des Einflusses einer Nut auf die Ausdehnung der MVZ einer zweiten Nut beschrieben. Hierfür wurden jeweils zwei parallele Nuten mit einem definierten Abstand zueinander erzeugt und die Ausdehnung der MVZ der als zweites erzeugten Nut im Querschliff mit der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“ ausgewertet. Es kam dabei dasselbe CFK Material und dasselbe Lasersystem wie bei den in Abschnitt 6.4 beschriebenen Experimenten zum Einsatz. Die Pulsfrequenz war $f_p=800$ kHz und die Pulse hatten eine Energie von $E_p=36,2$ μJ . Der Fokusbereich auf der Werkstückoberfläche betrug $d_f=35,7$ μm . Die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls während der Bearbeitung war $v=2,04$ m/s und es wurde eine Positioniergeschwindigkeit von $v_b=10$ m/s an-

gewandt. Daraus ergab sich eine effektive Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff}}=15$ und eine Scanfrequenz von $f_S=121$ Hz. Die Nuten mit einer Länge von $L_{\text{Nut}}=14$ mm wurden mit jeweils 400 Überfahrten erzeugt, wodurch sich eine Tiefe der Nuten von ungefähr 800 μm ergab.

Es wurden mit den genannten Prozessparametern sechs Paare paralleler Nuten mit definierten Abständen von 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm und 5 mm erzeugt. Die Ausdehnung der MVZ der jeweils als zweites erzeugten Nut als Funktion dieser Abstände ist in Bild 6.15 zu sehen. Die Ausdehnung der MVZ zwischen den beiden Nuten wird als „Innere MVZ“ bezeichnet, die Ausdehnung der MVZ in Richtung des vollen Materials als „Äußere MVZ“. Für einen Abstand zwischen den Nuten von 5 mm ist keine Beeinflussung der Ausdehnung der MVZ der als zweites erzeugten Nut durch die erste Nut zu erkennen. Die MVZ hat hier eine Ausdehnung von ungefähr 70 μm . Für geringere Abstände nimmt die Ausdehnung der MVZ zwischen den Nuten jedoch stark zu, bis auf maximal 550 μm . Hier wird der Einfluss der zuerst erzeugten Nut ersichtlich. Während des Abtrags der zweiten Nut führt die Unterbrechung des Wärmeflusses durch die zuerst erzeugte Nut zu einem Wärmestau zwischen den Nuten, was in einer Vergrößerung der Ausdehnung der MVZ resultiert. Allerdings nimmt mit geringer werdenden Abständen nicht nur die Ausdehnung der MVZ zwischen den Nuten zu, sondern auch die Ausdehnung der MVZ in Richtung des vollen Materials. Während bei einem Abstand der Nuten von 4 mm die Ausdehnung der MVZ in Richtung des vollen Materials ungefähr 70 μm beträgt, ist diese bei einem Abstand von 3 mm bereits 110 μm groß. Durch den Wärmestau zwischen den Nuten kommt es auch im umgebenden Material zu einer Temperaturerhöhung und somit zu einer Vergrößerung der MVZ. Zur Vermeidung einer thermischen Schädigung des Materials durch eine Akkumulation von Wärme bei der Bearbeitung müssen also sowohl prozessseitig passende Parameter ausgewählt als auch die geometrischen Gegebenheiten wie ein ausreichend großer Abstand zur Werkstückkante bzw. zu benachbarten Konturen berücksichtigt werden.

6.5 Wärmeakkumulationseffekte bei der Skalierung des UKP Abtragprozesses zu hohen mittleren Laserleistungen >1 kW

Mit der laufenden Entwicklung von Ultrakurzpuls-Laserstrahlquellen mit mittleren Laserleistungen im Bereich mehrerer 100 W [99], [100] bis über 1 kW [101], ist zur Gestaltung adäquater Prozessstrategien eine detaillierte Untersuchung der Wärmeakkumulationseffekte auch in diesem Leistungsbereich notwendig. Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen war es, eine geeignete Prozessstrategie zum Laserschneiden von 2 mm dickem CFK mit hoher Schneidgeschwindigkeit und minimaler thermischer Schädigung zu entwickeln. Hierfür wurden die in Abschnitt 6.4 behandelten Zusammenhänge bezüglich der beiden Wärmeakkumulationseffekte WAP und

WAS auf den Bearbeitungsprozess mit einer am IFSW entwickelten Hochleistungs-UKP-Strahlquelle [101] bezogen. Diese hatte eine maximale Laserleistung von 1,4 kW, wobei im Experiment maximal eine mittlere Laserleistung von 1,1 kW verwendet wurde. Die Pulsfrequenz war konstant 300 kHz, was einer maximalen Pulseenergie von 3,7 mJ entspricht. Die Pulsdauer war ungefähr 8 ps, die Wellenlänge 1030 nm und die Strahlqualität $M^2 < 1,4$. Der Polarisationszustand der Laserstrahlung war zirkular.

Zur Strahlbewegung und -fokussierung wurde ein Scannersystem in Kombination mit einer F-Theta Linse mit einer Brennweite von 340 mm verwendet. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls über das Werkstück war 30 m/s. Der Strahl hatte einen Durchmesser von ungefähr 5 mm vor der Fokussierung, was in einem Fokussdurchmesser von ungefähr 125 μm (bei einem Intensitätsniveau von $1/e^2$) resultierte. Die Rayleighlänge wurde zu $z_R = 8,5$ mm berechnet. Die maximale Intensität des gaußförmigen Strahls in der Strahlmitte war $I_0 = 7,5 \cdot 10^{12}$ W/cm² und die maximale Energiedichte $H_0 = 60$ J/cm². Das verwendete CFK Material bestand aus Toray T700S-12k Carbonfasern, welche in dem Epoxidharz HexFlow RTM 6 eingebettet waren. Die Anordnung der Carbonfaserlagen war [0,90,-45,+45,90,0,0,90,-45,+45,90,0]. Der Volumenanteil der Carbonfasern im CFK war 50%.

Es wurden mit dem Laserstrahl Kreise mit einem Durchmesser von 50 mm erzeugt, welche eine sich aus dem Durchmesser ergebende Konturlänge von $L_{\text{Kontur}} = 157$ mm hatten. Dabei wurde mit mehrfachen Überfahrten des Laserstrahls über das Material gearbeitet. Für diese Kontur ist die Scanfrequenz allein von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig, da die Konturlänge konstant war, keine Positionierzeit notwendig war und keine Pausen während des Abtragprozesses implementiert wurden. Zur Untersuchung der Auswirkungen der Wärmeakkumulationseffekte auf die Ausbildung der MVZ bei der Skalierung des Abtragprozesses zu hohen mittleren Laserleistungen wurde in den Experimenten die Anzahl an Überfahrten N_s , die Vorschubgeschwindigkeit v und die mittlere Laserleistung P variiert. Die mittlere Laserleistung wurde durch eine Anpassung der Pulseenergie geändert, da die Pulsfrequenz mit 300 kHz konstant war. Die bearbeiteten Werkstücke wurden im Querschliff hinsichtlich ihrer MVZ ausgewertet. Die Ausdehnung der MVZ wurde dabei mit der in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Methode „Selektive Messung“ bestimmt.

6.5.1 Einfluss der effektiven Anzahl an Laserpulsen pro Ort und Überfahrt

Zur Untersuchung des Effekts der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen wurde die Anzahl an effektiven Laserpulsen pro Ort und Überfahrt variiert. Dies geschah durch eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit. Es wurden 15 Überfahrten des Laserstrahls über das Material angewendet. Für diese Anzahl an Überfahrten kann bei Vorschubgeschwindigkeiten größer 3 m/s der Einfluss

der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans vernachlässigt werden, was in Abschnitt 6.5.2 gezeigt wird. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit war 30 m/s ($\triangleq N_{\text{eff}}=1,25$), während die minimal verwendete Vorschubgeschwindigkeit ohne beobachtbaren Einfluss des WAS-Effekts 4,3 m/s ($\triangleq N_{\text{eff}}=8,71$) war.

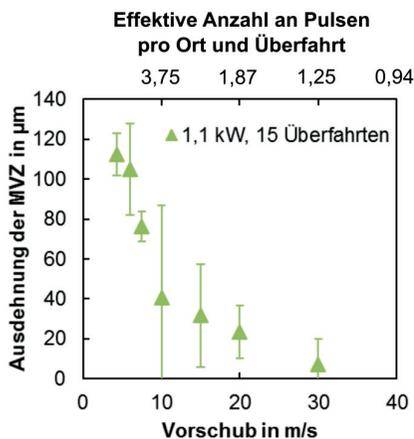


Bild 6.16: Ausdehnung der MVZ als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit bei einer mittleren Laserleistung von 1,1 kW und 15 Überfahrten. Prozessparameter: $P=1,1$ kW, $\lambda=1030$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=125$ μm , $M^2<1,4$, $L_{\text{Kontur}}=157$ mm, zirkulare Polarisation.

In Bild 6.16 ist die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit gezeigt. Die dabei verwendete mittlere Laserleistung war 1,1 kW. Bei der maximalen Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s war die Ausdehnung der MVZ <10 μm , während die MVZ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 4,3 m/s bereits eine Ausdehnung von ungefähr 110 μm erreicht. Wie aus Bild 6.16 ersichtlich, verursacht bereits eine Absenkung der Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s auf 20 m/s und damit eine Zunahme der effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von 1,25 auf 1,87 eine Zunahme der Ausdehnung der MVZ von unter 10 μm auf ungefähr 23 μm . Um die thermische Schädigung des Materials aufgrund der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden

Pulsen zu minimieren, sollte für die hier angewandten hohen Pulsenergien mit einer hohen Vorschubgeschwindigkeit eine geringe effektive Anzahl an Pulsen gewählt werden bis hin zu kompletter Pulsseparation ($N_{\text{eff}}\approx 1$).

6.5.2 Kritische Anzahl an Überfahrten

Die kritische Anzahl an Überfahrten ist ein prozessdefinierender Parameter insbesondere beim Laserschneiden CFK mit mehrfachen Überfahrten und hohen mittleren Laserleistungen. Sie definiert, nach wie vielen Überfahrten es aufgrund der durch die Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans verursachten Temperaturerhöhung zu einem Anstieg der Ausdehnung der MVZ kommt, siehe auch Abschnitt 6.4. Die Ausführungen in Abschnitt 6.4 legen eine Betrachtung der Abhängigkeit der kritischen Anzahl an Überfahrten von der Scanfrequenz sowie dem Wärmeeintrag pro Überfahrt nahe. Für die hier verwendete geschlossene Kontur mit kon-

stanter Konturlänge ist eine getrennte Betrachtung des Einflusses dieser beiden Parameter auf die kritische Anzahl an Überfahrten allerdings nicht möglich. So wird beispielsweise bei Änderung der im Experiment einstellbaren Vorschubgeschwindigkeit sowohl die Scanfrequenz als auch der Wärmeeintrag pro Überfahrt verändert. Im Folgenden wird deshalb anhand experimentell ermittelter Daten die Beziehung zwischen der kritischen Anzahl an Überfahrten und den im Experiment einstellbaren Parametern Vorschubgeschwindigkeit sowie mittlere Laserleistung beschrieben.

6.5.2.1 Zusammenhang zwischen der kritischen Anzahl an Überfahrten und der Vorschubgeschwindigkeit

Die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten für die beiden Vorschubgeschwindigkeiten $v=30\text{ m/s}$ und $v=20\text{ m/s}$ ist in Bild 6.17a zu sehen. Die gestrichelten Linien dienen der vereinfachten Interpretation der Daten. Eine Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s ergibt dabei eine Anzahl an Laserpulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff},30\text{m/s}}=1,25$ und eine Scanfrequenz von $f_{\text{S},30\text{m/s}}=191\text{ Hz}$. Entsprechend ergibt sich für eine Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/s eine Anzahl an Laserpulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff},20\text{m/s}}=1,87$ und eine Scanfrequenz von $f_{\text{S},20\text{m/s}}=127\text{ Hz}$. Für eine geringe Anzahl an Überfahrten ist die Ausdehnung der MVZ für beide Vorschubgeschwindigkeiten auf einem konstanten Niveau von ungefähr $40\text{ }\mu\text{m}$. Die Ausbildung der MVZ erfolgt hier aufgrund des WAP-Effekts bzw. ist die durch einen einzelnen Puls verursachte thermische Schädigung. Ab der jeweiligen kritischen Anzahl an Überfahrten wird für beide Vorschubgeschwindigkeiten ein Anstieg der Ausdehnung der MVZ beobachtet. Für eine Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/s ist diese kritische Anzahl an Überfahrten $N_{\text{S,krit},20\text{m/s}}\approx 35$. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s ergibt sich eine kritische Anzahl an Überfahrten von $N_{\text{S,krit},30\text{m/s}}\approx 62$.

Die kritische Anzahl an Überfahrten $N_{\text{S,krit}}$ ist in Bild 6.17b als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit für eine mittlere Laserleistung von $1,1\text{ kW}$ zu sehen. Die Werte für $N_{\text{S,krit}}$ wurden durch Mittelung der Anzahl an Überfahrten der beiden Datenpunkte am ersten Anstieg der Ausdehnung der MVZ ermittelt. Die Fehlerbalken kennzeichnen diese beiden Randwerte. In Bild 6.17a ist die für die beiden Vorschubgeschwindigkeiten 20 m/s und 30 m/s auf diese Weise bestimmte kritische Anzahl an Überfahrten, $N_{\text{S,krit},20\text{m/s}}$ und $N_{\text{S,krit},30\text{m/s}}$, markiert. An die in Bild 6.17 b dargestellten gemessenen Werte für die kritische Anzahl an Überfahrten wurde die Geradengleichung $N_{\text{S,krit}}(v)=a_v \cdot v$ gefittet mit a_v als Fitparameter. Die gefittete Gerade zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Datenpunkten. Der Datenfit weist auf eine lineare Beziehung zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der kritischen Anzahl an Überfahrten hin.

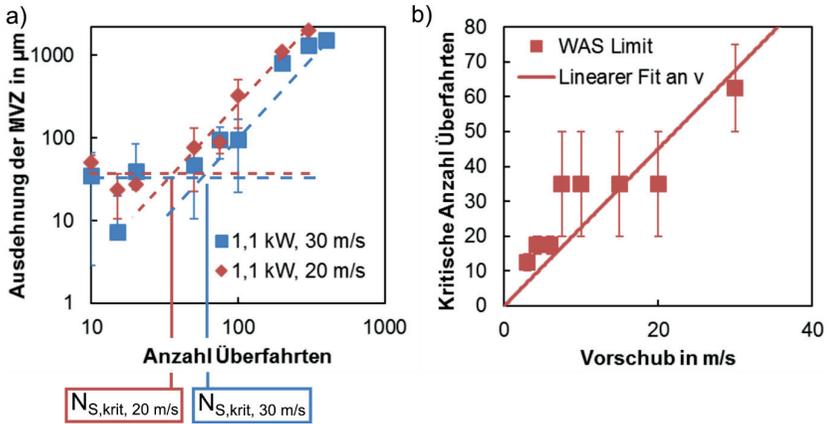


Bild 6.17: a) Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten bei einer mittleren Laserleistung von 1,1 kW und Vorschubgeschwindigkeiten von 20 m/s ($N_{\text{eff},20\text{m/s}}=1,87$, $f_{S,20\text{m/s}}=127$ Hz) und 30 m/s ($N_{\text{eff},30\text{m/s}}=1,25$, $f_{S,30\text{m/s}}=191$ Hz). Die gestrichelten Linien dienen der vereinfachten Dateninterpretation. b) Die kritische Anzahl an Überfahrten als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit für eine mittlere Laserleistung von 1,1 kW. Die Linie ist ein linearer Fit an die Datenpunkte durch den Ursprung. Prozessparameter: $P=1,1$ kW, $\lambda=1030$ nm, $\tau=8$ ps, $d=125$ μm , $M^2<1,4$, $L_{\text{kontur}}=157$ mm, zirkulare Polarisation.

6.5.2.2 Zusammenhang zwischen der kritischen Anzahl an Überfahrten und der mittleren Laserleistung

Der Einfluss verschiedener mittlerer Laserleistungen, hier variiert durch eine Anpassung der Pulsenergie, auf die Ausdehnung der MVZ wurde bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s für eine variierte Anzahl an Überfahrten untersucht. Die verwendete Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s resultierte in einer effektiven Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt von $N_{\text{eff},30\text{m/s}}=1,25$ und einer Scanfrequenz von $f_{S,30\text{m/s}}=191$ Hz. Die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten ist in Bild 6.18a für mittlere Laserleistungen von 0,2 kW, 0,6 kW und 1,1 kW dargestellt. Die Anzahl an Überfahrten wurde abhängig von der mittleren Laserleistung so angepasst, dass die insgesamt eingestrahelte Laserenergie $E_{\text{tot}}=P \cdot N_S \cdot \Delta t_{\text{Scans}}$ für entsprechende Punkte der Datenkurven konstant blieb. So wurden vergleichbare Tiefen der Nuten erreicht. Nimmt man an, dass ein konstanter Anteil der eingestrahelten Energie zur thermischen Schädigung des Materials beiträgt, so wird auf diese Weise auch sichergestellt, dass trotz unterschiedlicher mittlerer Laserleistung vergleichbar viel Wärme im Material verbleibt.

Wie man in Bild 6.18a sieht, ist die Ausdehnung der MVZ konstant auf einem niedrigen Niveau bis eine kritische Anzahl an Überfahrten erreicht wird, ab welcher die Ausdehnung der MVZ schnell zunimmt. Diese kritische Anzahl an Überfahrten in Ab-

hängigkeit von der mittleren Laserleistung ist in Bild 6.18b zu sehen. Die Werte für die kritische Anzahl an Überfahrten $N_{S,krit}$ wurden wie zuvor (siehe Abschnitt 6.5.2.1) durch Mittelung der Anzahl an Überfahrten der beiden Datenpunkte am ersten Anstieg der Ausdehnung der MVZ ermittelt. Die Fehlerbalken kennzeichnen diese beiden Randwerte. Für die mittleren Laserleistungen von 0,2 kW, 0,6 kW und 1,1 kW ist die auf diese Weise bestimmte kritische Anzahl an Überfahrten, $N_{S,krit,0,2kW}$, $N_{S,krit,0,6kW}$ und $N_{S,krit,1,1kW}$ in Bild 6.18a markiert. An die in Bild 6.18b dargestellten Datenpunkte wurde die invers quadratische Funktion $N_{S,krit}(P)=a_P/P^2$ gefittet, mit a_P als Fitparameter. Die Kurve zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Datenpunkten. Der Fit weist auf einen invers quadratischen Zusammenhang zwischen der mittleren Laserleistung und der kritischen Anzahl an Überfahrten hin.

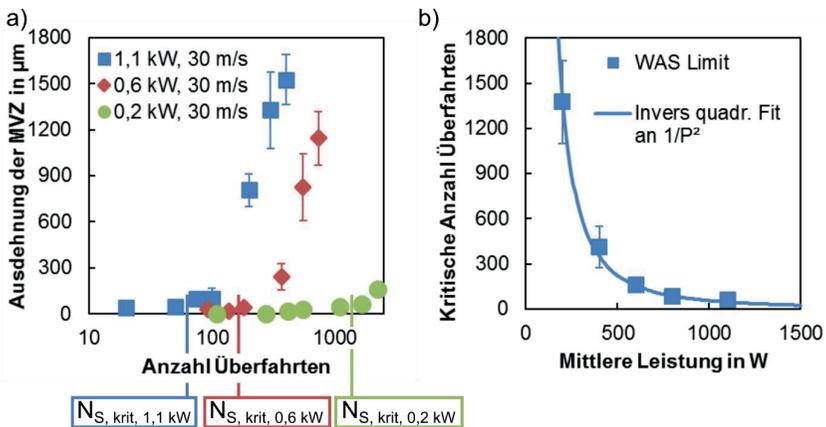


Bild 6.18: a) Die Ausdehnung der MVZ als Funktion der Anzahl an Überfahrten für drei verschiedene mittlere Laserleistungen und eine Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s ($N_{\text{eff},30\text{m/s}}=1,25$, $f_{S,30\text{m/s}}=191$ Hz). b) Die kritische Anzahl an Überfahrten als Funktion der mittleren Laserleistung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s ($N_{\text{eff},30\text{m/s}}=1,25$, $f_{S,30\text{m/s}}=191$ Hz). Eine invers quadratische Funktion wurde an die Datenpunkte gefittet. Prozessparameter: $P=1,1$ kW, $\lambda=1030$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=125$ μm , $M^2<1,4$, $L_{\text{Kontur}}=157$ mm, zirkuläre Polarisation.

Wie die in den Bildern 6.17b und 6.18b dargestellten experimentellen Daten zeigen, ist die kritische Anzahl an Überfahrten proportional zur Vorschubgeschwindigkeit geteilt durch das Quadrat der mittleren Laserleistung,

$$N_{S,krit} \propto \frac{v}{P^2}. \quad (6.3)$$

Im Rahmen der hier gezeigten Untersuchungen war die Konturlänge mit $L_{\text{Kontur}}=157$ mm konstant. Da diese, ebenso wie die Vorschubgeschwindigkeit, einen

Einfluss auf die Scanfrequenz hat, hat sie ebenfalls einen Einfluss auf die kritische Anzahl an Überfahrten, welcher hier allerdings nicht untersucht wurde.

Der in Gl. (6.3) gegebene Zusammenhang hat direkte Konsequenzen auf die Prozessstrategie. Möchte man beispielsweise ein CFK Werkstück trennen, muss ein bestimmtes Volumen des Materials verdampft werden, wofür dem Prozess eine bestimmte Energiemenge zur Verfügung gestellt werden muss. Für eine gegebene mittlere Laserleistung und eine gegebene Vorschubgeschwindigkeit kann aus der Energiebilanz die dafür notwendige Anzahl an Überfahrten

$$N_{S,Prozess} = \frac{[r_C \cdot E_{VC} + r_M \cdot E_{VM}] \cdot v \cdot b_{Spalt} \cdot t_{Nut}}{\eta_P \cdot P} \quad (6.4)$$

berechnet werden. Dabei ist r_C der prozentuelle Volumenanteil der Carbonfasern im CFK Material, r_M der prozentuelle Volumenanteil des Matrixmaterials im CFK Material, b_{Spalt} die Breite des Schnittspalts und t_{Nut} die Nuttiefe bzw. bei vollständiger Trennung des Materials die Werkstückdicke. Der Prozesswirkungsgrad ist η_P . Die volumenspezifischen Energien E_{VC} bzw. E_{VM} geben an, wieviel Energie benötigt wird um ein gewisses Volumen Carbonfasern bzw. Matrixmaterial zu verdampfen. Sie können mit Hilfe von Gl. (2.3) berechnet werden. Soll beispielsweise ein 2 mm dickes CFK Werkstück mit einer Schnittfugenbreite von 200 μm getrennt werden, werden bei Bearbeitung mit einer mittleren Laserleistung von 1,1 kW, einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s und einem Prozesswirkungsgrad von $\eta_P=28\%$ 2100 Überfahrten benötigt. Um die Ausbildung einer MVZ zu vermeiden, muss diese für den Prozess benötigte Anzahl an Überfahrten kleiner als die kritische Anzahl an Überfahrten sein:

$$N_{S,Prozess} < N_{S,krit.} \quad (6.5)$$

Um dieses Kriterium zu erfüllen, muss die kritische Anzahl an Überfahrten entsprechend hoch sein. Aus Gl. (6.3) ist ersichtlich, dass zur Steigerung der kritischen Anzahl an Überfahrten die Vorschubgeschwindigkeit erhöht oder die mittlere Laserleistung reduziert werden kann. Diese Anpassungen sind allerdings aus anlagentechnischen Gründen (die Vorschubgeschwindigkeit kann nicht beliebig gesteigert werden) oder aus Gründen der Produktivität oft nicht möglich bzw. gewünscht. Ein weiterer Ansatz ist das Einführen von Pausen in den Prozess, sobald die kritische Anzahl an Überfahrten erreicht wurde. Zur Steigerung der Produktivität kann diese Pause beispielsweise zur Bearbeitung eines zweiten Bauteils verwendet werden. Eine weitere Strategie ist das parallele Bearbeiten mehrerer Konturen, so dass pro Kontur mit geringerer mittlerer Laserleistung bearbeitet wird. So kann von Lasersystemen mit hohen mittleren Laserleistungen profitiert werden bei gleichzeitiger hoher Bearbeitungsqualität.

7 Schneiden von CFK mit einem Ultrakurzpuls-Lasersystem mit 1,1 kW mittlerer Ausgangsleistung⁷

Die im Rahmen der bisher diskutierten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse über die verschiedenen Energietransportmechanismen und Wärmeakkumulationseffekte wurden zur Demonstration eines Laserschneidprozesses von 2 mm dickem CFK angewandt. Die Ausbildung einer MVZ sollte dabei trotz Einsatz hoher mittlerer Laserleistungen über 1 kW vermieden werden. Wie für die in Abschnitt 6.5 beschriebenen Experimente wurde die am IFSW entwickelte Hochleistungs-UKP-Strahlquelle [101] und der in Abschnitt 6.5 beschriebene Versuchsaufbau verwendet. Die zum Schneiden des CFK Bauteils verwendete mittlere Laserleistung war 1,1 kW, was bei einer Pulsfrequenz von 300 kHz in Pulsenergien von 3,7 mJ resultierte. Die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls über das Werkstück war 30 m/s. Das CFK Material bestand zu einem Volumenanteil von 50% aus Toray T700S-12k Carbonfasern eingebettet in das Epoxidharz HexFlow RTM 6. Die Anordnung der Carbonfaserlagen war [0,90,-45,+45,90,0,0,90,-45,+45,90,0].

Aus einem Werkstück wurde ein Rechteck (225 mm x 95 mm) mit einer Konturlänge von $L_{\text{Kontur}}=640$ mm ausgeschnitten. Für die verwendete Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s resultierte dies in einer Scanfrequenz von $f_s=46,9$ Hz. Diese Scanfrequenz ist noch nicht ausreichend niedrig, um eine Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde nach jeweils 200 Überfahrten eine Pause von einer Minute in den Prozess implementiert. Die Dauer dieser Pause war nicht optimiert und mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich zu lang.

Eine Aufnahme von der Oberseite des bearbeiteten CFK Werkstücks ist in Bild 7.1a zu sehen. Es sei erwähnt, dass der im Bild zu sehende Spalt nicht die tatsächliche Schnittfuge darstellt. Die getrennten Teile wurden für das Bild nebeneinander gelegt. Insgesamt wurden 2100 Überfahrten zum vollständigen Durchtrennen des Materials benötigt. Dies entspricht einem Prozesswirkungsgrad des Schneidprozesses (vgl. Gl. (6.4)) von $\eta_p=28\%$. Mit der Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s ergibt sich eine effektive mittlere Schneidgeschwindigkeit von 0,9 m/min. Die Prozesspausen wurden dabei nicht berücksichtigt.

Ein Querschliff des geschnittenen Werkstücks ist in Bild 7.1b gezeigt. Die Innenseite des ausgeschnittenen Rechtecks ist links im Bild zu sehen, die Außenseite rechts im Bild. Der im Bild gezeigte Spalt entspricht ebenfalls nicht der tatsächlichen Schnittspaltbreite. Der Schnittspalt ist um ungefähr 11° geneigt. Diese Neigung ist eine Folge

⁷ Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren in Teilen auf den vom Autor verfassten Veröffentlichungen [111] und [112].

der verwendeten F-Theta Fokussieroptik, welche lediglich im Mittelpunkt des verfügbaren Scanfelds einen senkrechten Strahleinfall auf das Werkstück ermöglicht. Das Rechteck mit den Ausmaßen 22,5 cm x 9,5 cm wurde hauptsächlich in den äußeren Bereichen des verfügbaren Scanfelds ausgeschnitten. In diesen Bereichen fällt der Laserstrahl unter einem Winkel auf das Werkstück, wodurch es zu der beobachteten Neigung des Schnittspalts kommt. Des Weiteren sind Abweichungen von bis zu 80 μm in der Geradheit der Schnittkante zu beobachten.

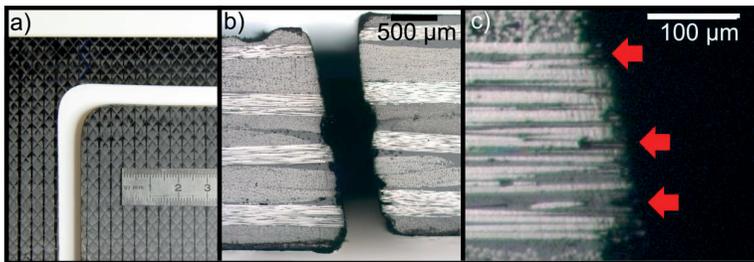


Bild 7.1: Aufnahmen eines CFK Werkstücks, welches mit einem UKP-Lasersystem mit einer mittleren Laserleistung von 1,1 kW, einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s und einer effektiven mittleren Schnittgeschwindigkeit von 0,9 m/min geschnitten wurde. a) Blick auf die Werkstückoberfläche. b) Lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffs des geschnittenen Materials. Der Abstand zwischen beiden nebeneinander abgebildeten Werkstücken entspricht nicht der Breite der Schnittfuge. c) Vergrößerte Aufnahme der Schnittkante des linken Werkstücks.

In der Vergrößerung der linken, inneren Schnittkante in Bild 7.1c sind die Bereiche des Schnitts mit thermischer Schädigung mit roten Pfeilen markiert. Das Material wurde nur vereinzelt geschädigt, stellenweise kann eine Ausdehnung der MVZ von maximal 20 μm gemessen werden.

Obwohl die geringe thermische Schädigung des Materials beim demonstrierten Schnitt höchsten Ansprüchen genügt, ist der Prozesswirkungsgrad des Schneidprozesses mit $\eta_p=28\%$ gering und die Neigung des Schnittspalts mit 11° zu steil für die meisten industriellen Anwendungen. Im Folgenden werden deshalb Ansätze zur weiteren Optimierung Schneidprozesses vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf Möglichkeiten zur Steigerung der Schnittgeschwindigkeit und zur gezielten Beeinflussung der Schnittkantenneigung eingegangen.

7.1 Möglichkeiten zur weiteren Optimierung des Schneidprozesses⁸

7.1.1 Erhöhung des Prozesswirkungsgrads

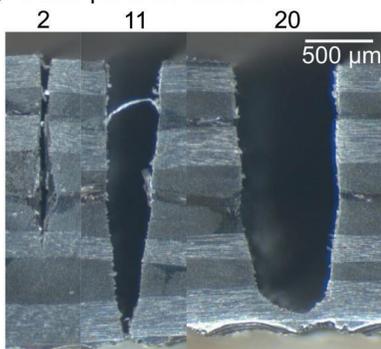
Beim im vorherigen Abschnitt vorgestellten Schneidprozess wurden zum Durchtrennen des kompletten Werkstücks 2100 Überfahrten benötigt. In einer während der Bearbeitung gemachten Videoaufnahme kann allerdings bereits nach ungefähr 1300 Überfahrten ein teilweises Durchtrennen des Werkstücks beobachtet werden. Insbesondere die im Material verwobenen Polyesterfäden benötigen ein häufiges Einwirken des Laserstrahls bis diese durchtrennt werden und verlangsamten den Schneidprozess somit signifikant. Polyester, wie auch viele andere Polymere, sind ohne Zusatzstoffe transparent für die hier verwendete Laserwellenlänge von 1030 nm [102]. Ein Ansatz zur schnelleren Verdampfung dieser Polyesterfäden ist die zusätzliche Verwendung eines Strahls mit einer Wellenlänge, welche in den Polyesterfäden gut absorbiert wird. Beispielsweise wird ultraviolette Strahlung ($\lambda=355$ nm) von den meisten Polymeren wie auch den Polyesterfäden sehr gut absorbiert [102]. Ein solcher Ansatz wurde in [103] mit dem Ziel des Trepannierbohrens von CFK mit einer Kombination eines IR-Lasers mit einem UV-Laser vorgestellt. Könnte mit einem solchen Ansatz die zur Durchtrennung des Materials benötigte Anzahl an Überfahrten von 2100 Überfahrten auf 1300 Überfahrten gesenkt werden, so würde sich ein Prozesswirkungsgrad von $\eta_p=45\%$ ergeben.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung des Prozesswirkungsgrads und damit der Schnittgeschwindigkeit stellt die Reduktion des Aspektverhältnisses der Schnittfuge durch das Abtragen mehrerer paralleler Linien dar. Das Aspektverhältnis einer Schnittfuge ist dabei das Verhältnis von Tiefe zur Breite des Schnittspalts. Aufnahmen von Querschliffen der mit einer unterschiedlichen Anzahl an parallelen Linien in bidirektionalem CFK (Materialdicke 2,1 mm) erzeugten Nuten sind in Bild 7.1a zu sehen. Das CFK Material bestand aus in dem Epoxidharz Momentive Epikote MGS RIMR 135 eingebetteten PAN basierten Carbonfasern. Die mittlere Laserleistung gemessen am Ort des Werkstücks war 29 W bei einer Pulsfrequenz von 800 kHz. Die Pulse hatten eine Dauer von ungefähr 8 ps. Die Wellenlänge des Laserstrahls war 515 nm und die Strahlqualität war $M^2 < 1,1$. Der Strahl wurde auf die Materialoberfläche fokussiert, wobei der Fokus einen Durchmesser von 27,2 μm hatte. Die Polarisation der Laserstrahlung war parallel zu den Carbonfasern der obersten Lage orientiert. Bearbeitet wurde das Material senkrecht zu den Carbonfasern der obersten Lage mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/s. Der Abstand der parallelen Linien zueinander war

⁸ Die Experimente, auf denen die Ausführungen in diesem Abschnitt basieren, als auch deren Auswertung erfolgten im Rahmen einer vom Autor dieser Dissertationsschrift angeleiteten und betreuten Bachelorarbeit [105].

$\Delta L=40\ \mu\text{m}$. Unabhängig von der Anzahl paralleler Linien war die Gesamtzahl an Überfahrten stets konstant.

a) Anzahl paralleler Linien:



Gesamtzahl an Überfahrten: 10.000

b)

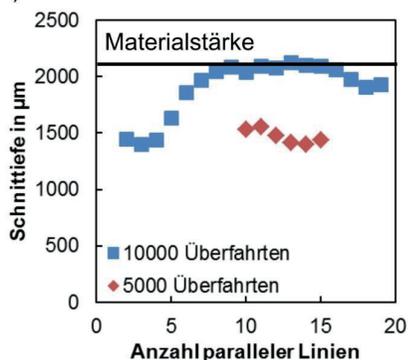


Bild 7.2: a) Lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschnitten der mit einer unterschiedlichen Anzahl an parallelen Linien erzeugten Nuten. Der Abstand zwischen den Linien betrug $\Delta L=40\ \mu\text{m}$. Die Gesamtzahl an Überfahrten des Laserstrahls über das Material war stets 10.000. b) Abtragtiefe als Funktion der Anzahl paralleler Linien für zwei unterschiedliche Gesamtzahlen an Überfahrten. Prozessparameter: $P=29\ \text{W}$, $f_p=800\ \text{kHz}$, $E_p=36,3\ \mu\text{J}$, $\lambda=515\ \text{nm}$, $\tau=8\ \text{ps}$, $d_f=27,2\ \mu\text{m}$, $M^2<1,1$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern der obersten Lage.

Für das in Bild 7.2a dargestellte Beispiel war die Gesamtzahl an Überfahrten 10.000. Beim Trennprozess mit beispielsweise zwei parallelen Linien wurde der Laserstrahl somit jeweils insgesamt 5.000-mal über eine Linie bewegt, wobei die beiden Linien abwechselnd bearbeitet wurden. Wie man in Bild 7.2a sieht, wird beim Abtrag von zwei parallelen Linien das Werkstück nur bis ungefähr zur Mitte des Materials durchtrennt. Das Aspektverhältnis der erzeugten Nut ist hier ungefähr 17,7 und der Prozesswirkungsgrad mit 5,8% niedrig. Erhöht man die Anzahl der parallelen Linien auf 11, kann das Werkstück komplett durchtrennt werden und das Aspektverhältnis der Schnittfuge reduziert sich auf 4,6. Der Laserstrahl wurde in dem Fall pro Linie 909-mal über das Werkstück bewegt. Dabei wurde ein deutlich höherer Prozesswirkungsgrad von ungefähr 55% erreicht. Erhöht man die Anzahl an parallelen Linien auf 20, so wird bei gleicher Gesamtzahl an Überfahrten insgesamt ein deutlich größeres Volumen abgetragen, allerdings wird das Material nicht mehr durchtrennt. Das Aspektverhältnis der erzeugten Nut ist hier ungefähr 2,3 und es wird ein außergewöhnlich hoher Prozesswirkungsgrad von 106% erreicht. Diese signifikante Erhöhung des Prozesswirkungsgrads kann teilweise mit dem verwendeten Linienabstand von $\Delta L=40\ \mu\text{m}$ erklärt werden, welcher größer als der Fokaldurchmesser des Laserstrahls ($d_f=27,2\ \mu\text{m}$) ist. Ein Teil des Materials wurde somit nicht direkt vom Laser bestrahlt

und verdampft, sondern in Form von Partikeln abgetragen. Der Linienabstand war im Rahmen der hier diskutierten Experimente allerdings konstant. Erst in Folge einer ausreichenden Reduzierung des Aspektverhältnisses durch das Abtragen mehrerer paralleler Linien konnte diese signifikante Erhöhung des Prozesswirkungsgrads erzielt werden. Dabei sei erwähnt, dass eine weitere Reduzierung des Aspektverhältnisses wahrscheinlich keine beliebige Erhöhung des Prozesswirkungsgrads erlaubt, sondern sich vermutlich ein hinsichtlich des Prozesswirkungsgrads optimales Aspektverhältnis finden lässt. Des Weiteren sei angemerkt, dass hier zwar eine Korrelation zwischen Aspektverhältnis und Prozesswirkungsgrad hergestellt werden konnte, die physikalischen Mechanismen, welche zu dieser Korrelation führen, allerdings noch nicht vollständig geklärt sind.

Die Schnitttiefe als Funktion der Anzahl paralleler Linien ist in Bild 7.2b für 10.000 und 5.000 Überfahrten dargestellt. Für eine Gesamtzahl von 10.000 Überfahrten wurde das Material bei Bearbeitung mit 10 bis 15 parallelen Linien durchtrennt. Für eine Gesamtzahl von 5.000 Überfahrten wurde das Material nicht mehr durchtrennt, die maximale Nuttiefe wurde bei der Bearbeitung mit 11 parallelen Linien erreicht. Es stellte sich also bei dem hier verwendeten Linienabstand von $\Delta L=40 \mu\text{m}$ der Abtrag mit 11 parallelen Linien resultierend in einem Aspektverhältnis der Schnittfuge von 4,6 als optimal hinsichtlich der Trenngeschwindigkeit heraus. Obwohl dabei ein wesentlicher Teil der eingestrahlten Laserenergie zur Verbreiterung der Nut aufgewendet wurde, wurde dennoch eine wesentliche Beschleunigung des Schneidprozesses erreicht. Das Abtragen mehrerer paralleler Linien beim Laserschneiden von CFK mit mehrfachen Überfahrten ist somit eine weitere Strategie, um den Schneidprozess hinsichtlich der Schnittgeschwindigkeit zu optimieren und den Prozesswirkungsgrad zu erhöhen.

7.1.2 Beeinflussung der Neigung der Schnittkante

Eine Möglichkeit zur Beeinflussung der Neigung der Schnittkante des ausgeschnittenen Werkstücks ist das Anstellen des einfallenden Laserstrahls. Der Einfluss des Einfallswinkels auf die dem Laserstrahl zugewandte Schnittkante wurde mit dem in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Versuchsaufbau untersucht. Das Material wurde mit 8800 Überfahrten verteilt auf 11 parallel mit einem Linienabstand von $\Delta L=45 \mu\text{m}$ versetzte Linien bearbeitet. Zur Strahlbewegung wurde ein Scannersystem mit einem F-Theta Objektiv verwendet. Der Strahleinfall ist lediglich in der Mitte des Scanfolds senkrecht zur Werkstückoberfläche. Für Strahlpositionen außerhalb der Scanfolds-Mitte kann der Einfallswinkel α des Laserstrahls über die Beziehung

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta r}{f}\right) \quad (7.1)$$

bestimmt werden, wobei Δr der Abstand des Auftreffpunkts des Laserstrahls von der Scanfeld-Mitte und f die Brennweite des F-Theta Objektivs ist. Der Einfallswinkel α des Laserstrahls hat einen Einfluss auf die Neigung β der dem Laserstrahl zugewandten Schnittkante. Eine Skizze zur Illustration ist in Bild 7.3a zusammen mit einer Aufnahme eines Querschliffs zu sehen. Der Einfallswinkel α ist der Winkel des einfallenden Laserstrahls relativ zur Oberflächennormalen \mathbf{n}_0 . Der Neigungswinkel β definiert die Richtung, in welche sich die Schnittkante neigt. Beim im Querschliff dargestellten Schnitt war der Einfallswinkel $\alpha=7,25^\circ$ und die Neigung der Schnittkante ungefähr $\beta=-2^\circ$.

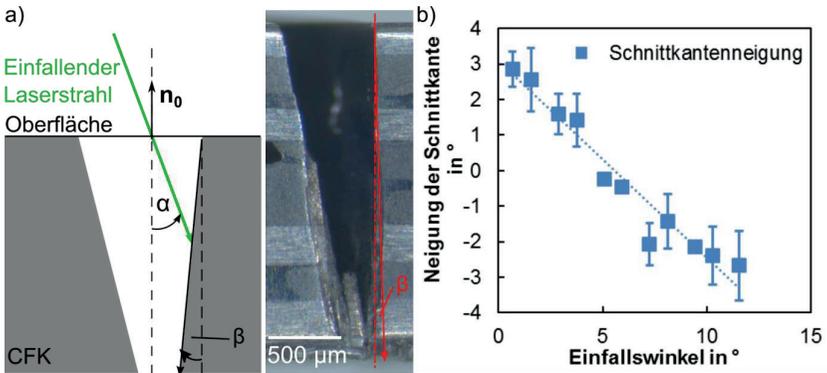


Bild 7.3: a) Schematische Darstellung einer Schnittfuge beim Abtrag mit angestelltem Laserstrahl. Zum Vergleich ist eine Aufnahme eines Querschliffs dargestellt. Der Einfallswinkel α des Laserstrahls war $7,25^\circ$. b) Neigung der Schnittkante β als Funktion des Einfallswinkels α . Prozessparameter: $P=29$ W, $f_p=800$ kHz, $E_p=36,3$ μJ , $\lambda=515$ nm, $\tau=8$ ps, $d_f=27,2$ μm , $M^2<1,1$, lineare Polarisation orientiert parallel zu den Carbonfasern der obersten Lage.

Die Neigung der Schnittkante als Funktion des Einfallswinkels ist in Bild 7.3b aufgetragen. Bei senkrechtem Strahleinfall ($\alpha=0^\circ$) hat die Schnittkante stets einen Neigungswinkel größer 0° , hier ist dieser $\beta\approx 3^\circ$. Erst durch Anstellen des einfallenden Laserstrahls kann eine senkrechte Schnittkante erzeugt werden. Ist der Einfallswinkel allerdings zu groß, so entsteht eine überhängende Schnittkante. Der Einfallswinkel, für welchen eine senkrechte Schnittkante erzeugt werden kann, kann über einen Funktionsfit an die gemessenen Datenpunkte ermittelt werden. Die gepunktete Linie stellt einen Fit der linearen Funktion

$$\beta(\alpha) = -m_\alpha \cdot \alpha + d_\alpha \quad (7.2)$$

an die Datenpunkte dar, wobei m_α und d_α die Fitparameter sind. Die in Bild 7.3 dargestellte, gefittete Gerade mit $m_\alpha=0,553$ und $d_\alpha=3,0642^\circ$ zeigt eine gute Übereinstim-

mung mit den gemessenen Datenpunkten. Eine gerade Schnittkante mit $\beta=0^\circ$ wird nach Gl. (7.2) bei einem Einfallswinkel des Laserstrahls von $\alpha=5,54^\circ$ erreicht. Auf diese Weise wird eine senkrechte Schnittkante allerdings nur auf der dem Laserstrahl zugewandten Seite des Schnitts erzeugt. Auf der dem Laserstrahl abgewandten Seite kann auf diese Weise nie eine senkrechte Schnittkante erzielt werden. Die starke Neigung der dem Laserstrahl abgewandten Schnittkante kann beispielsweise in Bild 7.3a auf der linken Seite der Schnittfuge beobachtet werden. Das Anstellen des Bearbeitungslaserstrahls ist somit bei geeigneter Anordnung eine geeignete Strategie, um eine senkrechte Schnittkante des Gutteils zu erzeugen, parallele Schnittkanten sind allerdings nicht möglich.

8 Zusammenfassung

Eine Skalierung des gepulsten Bearbeitungsprozesses hin zu höheren mittleren Laserleistungen bei gleichzeitig minimaler thermischer Schädigung ist nur bei hinreichendem Prozessverständnis möglich. Hierfür wurden im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen die bei der Laserbearbeitung von CFK wirksamen Energietransportmechanismen betrachtet, wobei zwischen der Phase der Energiedeposition und der Phase der Energiedistribution unterschieden wurde.

Hinsichtlich der Energiedeposition konnte mittels Raytracing der Einkoppelgrad von Laserstrahlung in ein Carbonfasergelege und CFK berechnet werden. Es zeigte sich, dass der Einkoppelgrad im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1400 nm, welcher die für die Lasermaterialbearbeitung relevanten Wellenlängen im nah-infraroten und grünen Spektralbereich abdeckt, stets über 70% ist. In diesem Wellenlängenbereich ist somit kein Einfluss der Wellenlänge des Bearbeitungslasers auf die Ausdehnung der MVZ zu erwarten. Der Unterschied im Einkoppelgrad zwischen einer Polarisation orientiert senkrecht zur Carbonfaserachse und einer Polarisation orientiert parallel zur Carbonfaserachse beträgt nur wenige Prozent. Dementsprechend kann beim Abtrag von CFK die Ausdehnung der MVZ beziehungsweise die Tiefe der erzeugten Nut durch Anwendung verschiedener Orientierungen der Polarisation relativ zur Carbonfaserachse nicht maßgeblich beeinflusst werden.

In der Phase der Energiedistribution wurde unter anderem der Einfluss einer Oxidation der kohlenstoffhaltigen Anteile von CFK auf den Abtragprozess betrachtet. Es zeigte sich, dass ein zusätzlich der Prozesszone zugeführter Sauerstoffstrom zu einem beschleunigten Tiefenfortschritt führt. Die Bereitstellung zusätzlichen Sauerstoffs führt also zu einer Steigerung des Prozesswirkungsgrads. Allerdings vergrößert dies auch die Ausdehnung der MVZ an der Materialoberfläche. In der Tiefe des Materials konnte dagegen kein relevanter Einfluss eines zusätzlich in die Nut geblasenen Sauerstoffstroms auf die Ausdehnung der MVZ festgestellt werden. Bei Verwendung von Stickstoff als Prozessgas konnte keine signifikante Reduzierung der Ausdehnung der MVZ verglichen mit der Bearbeitung in Luft erzielt werden. Soll die Ausbildung einer MVZ gänzlich vermieden werden, so ist die alleinige Abschirmung der Prozesszone vom Sauerstoff der Umgebungsluft nicht zielführend.

Eine weitere Form der Energiedistribution ist der Energietransport durch die bei der Laserbearbeitung von CFK entstehenden Ablationsprodukte. Für einen Perkussionsbohrprozess konnte mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen nachgewiesen werden, dass ein Strom heißer Ablationsprodukte das umgebende Material thermisch beeinflussen kann, in der betrachteten Versuchsanordnung allerdings nicht zur Ausbildung einer MVZ führte. Der Energietransport durch heiße Ablationsprodukte trägt also

zu einer nachträglichen, zusätzlichen Erwärmung des Materials während der Bearbeitung bei, was insbesondere hinsichtlich Wärmeakkumulationseffekten relevant ist.

Die Distribution von Energie während des Bearbeitungsprozesses findet auch durch Wärmeleitung, hauptsächlich entlang der Symmetrieachse der Carbonfasern, statt. In der Literatur wurde gezeigt, dass bei der Bearbeitung des Materials mit hohen Intensitäten ($> 10^9$ W/cm²) die Ausbildung einer MVZ > 10 μ m aufgrund von Wärmeleitung vermieden werden kann. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen konnten Wärmeakkumulationseffekte als die Hauptursache für die Ausbildung einer MVZ bei der gepulsten Laserbearbeitung von CFK identifiziert werden. Dabei kann zwischen der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen und der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans unterschieden werden. Soll die Ausbildung einer MVZ aufgrund einer Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen vermieden werden, so kann dies durch eine Reduzierung der Pulsfrequenz oder eine Begrenzung der Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt geschehen. Zur Vermeidung der Entstehung einer MVZ aufgrund der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans kann eine ausreichend geringe Scanfrequenz gewählt oder die Anzahl an Überfahrten begrenzt werden. Zur Auslegung von Bearbeitungsprozessen hat sich die Einführung der kritischen Anzahl an Überfahrten als hilfreich herausgestellt. Diese definiert, nach wie vielen Überfahrten es aufgrund der durch die Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans verursachten Temperaturerhöhung zu einem Anstieg der Ausdehnung der MVZ kommt. Es konnte gezeigt werden, dass diese proportional zur Vorschubgeschwindigkeit geteilt durch das Quadrat der mittleren Laserleistung ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die verschiedenen Energietransportmechanismen und Wärmeakkumulationseffekte wurden zur Demonstration eines Laserschneidprozesses von 2 mm dickem CFK angewandt. Hierfür wurde ein Ultrakurzpuls-Lasersystem mit einer Ausgangsleistung von 1,1 kW verwendet, welches am Institut für Strahlwerkzeuge entwickelt wurde. Folgende Konsequenzen für die Auslegung des Bearbeitungsprozesses wurden aus den vorgestellten Untersuchungen gezogen:

- Verwendung einer Wellenlänge des Bearbeitungslaserstrahls von 1030 nm, da der Einkoppelgrad für Strahlung dieser Wellenlänge ausreichend hoch ist und hier die maximale mittlere Laserleistung zur Verfügung stand.
- Es wurde kein relevanter Einfluss des Polarisationszustands des Laserstrahls auf den Bearbeitungsprozess erwartet. Aus systemtechnischen Gründen wurde eine zirkulare Polarisation des Laserstrahls gewählt.
- Verzicht auf die Verwendung eines Schutzgases, da der Sauerstoff der Umgebungsluft den Bearbeitungsprozess nicht wesentlich beeinflusst.

- Kein Einbau besonderer Vorkehrungen zur Beeinflussung des abströmenden Materialdampfs, da dessen Wechselwirkung mit dem umgebenden Material alleinig nicht zur Ausbildung einer MVZ führt.
- Wahl einer Vorschubgeschwindigkeit von 30 m/s zur Begrenzung der Anzahl an Pulsen pro Ort und Überfahrt auf 1,25. Dadurch konnte die Ausbildung einer MVZ aufgrund einer Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen vermieden werden.
- Bearbeitung einer Geometrie mit einer großen Konturlänge von 640 mm zur Minimierung der Scanfrequenz.
- Vermeidung der Ausbildung einer MVZ aufgrund der Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Scans durch Einführung von Pausen nach jeweils 200 Überfahrten, also vor Erreichen der kritischen Anzahl an Überfahrten.

Auf diese Weise konnte ein Schneidprozess mit einer effektiven mittleren Schneidgeschwindigkeit von 0,9 m/min ohne die Ausbildung einer MVZ demonstriert werden.

Diese Abhandlung abschließend wurden verschiedene Möglichkeiten zur weiteren Optimierung des Schneidprozesses hinsichtlich einer Erhöhung des Prozesswirkungsgrads und einer gezielten Beeinflussung der Neigung der Schnittkante aufgezeigt.

9 Literaturverzeichnis

- [1] M. NEITZEL; P. MITSCHANG: *Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [2] P. MORGAN: *Carbon Fibers and their Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [3] H. SCHÜRMMANN: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [4] J. Y. SHEIKH-AHMAD: *Machining of Polymer Composites*. New York: Springer Science+Business Media, 2009.
- [5] F. R. JONES: *Handbook of Polymer-Fibre Composites*. Essex: Longman Scientific & Technical, 1994.
- [6] H. EICKENBUSCH; O. KRAUSS: *Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien*. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2013.
- [7] T. KRAUS; M. KÜHNEL: *Composites-Marktbericht 2014*. Augsburg: Carbon Composites e.V., 2014.
- [8] A. KOPLEV; A. LYSTRUP; T. VORM: *The cutting process, chip, and cutting forces in machining CFRP*. *Composites* (1983) S. 371.
- [9] X. WANG; P. Y. KWON; C. STRURTEVANT; D. KIM; J. LANTRIP: *Tool wear of coated drills in drilling CFRP*. *J. Manuf. Process.* (2013) S. 127.
- [10] R. TETI: *Machining of Composite Materials*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **51** (2002) Nr. 2, S. 611.
- [11] N. BHATNAGAR; N. K. NAIK; N. RAMAKRISHNAN: *Experimental investigations of drilling on CFRP composites*. *Mater. Manuf. Process.* **8** (1993) Nr. 6, S. 683.
- [12] U. HEISEL; T. PFEIFROTH: *Influence of Point Angle on Drill Hole Quality and Machining Forces when Drilling CFRP*. *Procedia CIRP* **1** (2012) S. 471.

- [13] H. ZHANG; W. CHEN; D. CHEN; L. ZHANG: *Assessment of the Exit Defects in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Plates Caused by Drilling*. Key Eng. Mat. 196 (2001) S. 43.
- [14] J. P. DAVIM; P. REIS: *Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave - experimental and statistical study*. Mater. Design **24** (2003) S. 315.
- [15] J. P. DAVIM; P. REIS: *Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) usign design experiments*. Compos. Struct. **59** (2003) S. 481.
- [16] J. C. AURICH; B. KIRSCH; C. MÜLLER; L. HERBERGER: *Quality of drilled and milled rivet holes in carbon fiber reinforced plastics*. Procedia CIRP **24** (2014) S. 56.
- [17] H. HÜGEL; T. GRAF: *Laser in der Fertigung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.
- [18] A. BIANCO; H.-M. CHENG; T. ENOKI; Y. GOGOTSI; R. H. HURT; N. KORATKAR; T. KYOTANI; M. MONTHIOUX; C. R. PARK; J. M. D. TASCONE; J. ZHANG: *All in the graphene family - A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials*. Carbon **65** (2013) S. 1.
- [19] W. P. HOFFMAN; W. C. HURLEY; P. M. LIU; T. W. OWENS: *The surface topography of non-shear treated pitch and PAN carbon fibers as viewed by the STM*. J. Mater. Res. **6** (1991) Nr. 8, S. 1685.
- [20] T. HAMADA; T. NISHIDA; Y. SAJIKI; M. MATSUMOTO: *Structures and physical properties of carbon fibers from coal tar mesophase pitch*. J. Mater. Res. **2** (1987) Nr. 6, S. 850.
- [21] R. H. KNIBBS: *The use of polarized light microscopy in examining the structure of carbon fibres*. J. Microsc. **94** (1971) Nr. 3, S. 273.
- [22] M. INAGAKI; N. IWASHITA; Y. HISHIYAMA; Y. KABURAGI; A. YOSHIDA; A. OBERLIN; K. LAFDI; S. BONNAMY; Y. YAMADA: *Studies on "Mesophase"-Pitch-Based Carbon Fibers: Part I Structure and Textures*. Tanso **147** (1991) S. 57.

- [23] T. W. KNOTT; C. T. HERAKOVICH: *Effect of Fiber Orthotropy on Effective Composite Properties*. J. Compos. Mater. **25** (1991) S. 732.
- [24] P. SHENG; G. CHRYSSOLOURIS: *Theoretical Model of Laser Grooving for Composite Materials*. J. Compos. Mater. **29** (1995) S. 96.
- [25] C. A. GRIFFS; R. A. MASUMURA; C. I. CHANG: *Thermal Response of Graphite Epoxy Composite Subjected to Rapid Heating*. J. Compos. Mater. **15** (1981) S. 427.
- [26] HEXCEL CORPORATION: *180°C epoxy system for Resin Transfer Moulding monocomponent system* (2009).
- [27] MOMENTIVE: *EPIKOTE Resin MGS RIMR 135 and EPIKURE Curing Agent MGS RIMH 134-RIMH 137* (2006).
- [28] J. M. ZAZULA: *On Graphite Transformations at High Temperature and Pressure Induced by Absorption of the LHC Beam*. LHC Project Note 78 / 97 (1997).
- [29] T. A. TRIGG: *Carbon fibre composites in rocket motor systems*. Banwell: Bristol Aerojet Limited, 1969.
- [30] Y. ZHANG; J. R. G. EVANS; S. YANG: *Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks*. J. Chem. Eng. Data. **56** (2011) S. 328.
- [31] G. HERZBERG; K. F. HERZFELD; E. TELLER: *The Heat of Sublimation of Graphite*. J. Phys. Chem.-US **41** (1937) Nr. 2, S. 325.
- [32] B. SUNDQVIST; O. SANDBERG; G. BÄCKSTRÖM: *The thermal properties of an epoxy resin at high pressure and temperature*. J. Phys. D Appl. Phys. **10** (1977) S. 1397.
- [33] C. PRADERE; J. C. BATSALE; J. M. GOYHÉNÈCHE; R. PAILLER; S. DILHAIRE: *Thermal properties of carbon fibers at very high temperature*. Carbon **47** (2009) S. 737.
- [34] B. T. KELLY: *Physics of Graphite*. London and New Jersey: Applied Science Publishers, 1981.

- [35] D. E. KLINE: *Thermal conductivity studies of polymers*. J. Polym. Sci. **1** (1961) S. 441.
- [36] M. W. PILLING; B. YATES; M. A. BLACK; P. TATTERSALL: *The thermal conductivity of carbon fibre-reinforced composites*. J. Mater. Sci. **14** (1979) S. 1326.
- [37] R. ROLFES; U. HAMMERSCHMIDT: *Transverse thermal conductivity of CFRP laminates: a numerical and experimental validation of approximation formulae*. Compos. Sci. Technol. **54** (1995) S. 45.
- [38] S. D. MCIVOR; M. I. DARBY; G. H. WOSTENHOLM; B. YATES; L. BANFIELD; R. KING; A. WEBB: *Thermal conductivity measurements of some glass fibre- and carbon fibre-reinforced plastics*. J. Mater. Sci. **25** (1990) S. 3127.
- [39] C. T. PAN; H. HOCHENG: *Evaluation of anisotropic thermal conductivity for unidirectional FRP in laser machining*. Compos. Part A-Appl. S. **32** (2001) S. 1657.
- [40] A. YASMIN; I. M. DANIEL: *Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites*. Polymer **45** (2004) S. 8211.
- [41] R. WEBER; M. HAFNER; A. MICHALOWSKI; T. GRAF: *Minimum Damage in CFRP laser Processing*. Phys. Procedia **12B** (2011) S. 302.
- [42] R. WEBER; T. GRAF; P. BERGER; V. ONUSEIT; M. WIEDENMANN; C. FREITAG; A. FEUER: *Heat accumulation during pulsed laser materials processing*. Opt. Express **22** (2014) Nr. 9, S. 11312.
- [43] C. T. PAN; H. HOCHENG: *The anisotropic heat-affected zone in the laser grooving of fiber-reinforced composite material*. J. Mater. Process. Tech. **62** (1996) S. 54.
- [44] A. A. CENNA; P. MATHEW: *Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials*. Int. J. Mach. Tool. Manu. **42** (2002) S. 105.

- [45] E. UHLMANN; G. SPUR; H. HOCHENG; S. LIEBELT; C. T. PAN: *The extent of laser-induced thermal damage of UD and crossply composite laminates*. Int. J. Mach. Tool. Manu. **39** (1999) S. 639.
- [46] P. JAESCHKE; M. KERN; U. STUTE; D. KRACHT; H. HAFERKAMP: *Laser processing of continuous carbon fibre reinforced polyphenylene sulphide organic sheets - Correlation of process parameters and reduction in static tensile strength properties*. J. Thermoplast. Compos. (2012) S. 1.
- [47] W. S. LAU; W. B. LEE; S. Q. PANG: *Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Carbon Fibre Composite Materials*. Annals of the CIRP **39** (1990) S. 179.
- [48] D. HERZOG; M. SCHMIDT-LEHR; M. CANISIUS; M. OBERLANDER; J.-P. TASCHKE; C. EMMELMANN: *Laser cutting of carbon fiber reinforced plastic using a 30 kW fiber laser*. J. Laser Appl. **27** (2015) S. S28001.
- [49] A. WOLYNSKI; T. HERRMANN; P. MUCHA; H. HALOUI; J. L'HUILLIER: *Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR*. Phys. Procedia **12** (2011) S. 292.
- [50] K.-W. JUNG; Y. KAWAHITO; S. KATAYAMA: *Ultra-high speed disk laser cutting of carbon fiber reinforced plastics*. J. Laser Appl. **24** (2012) Nr. 1, S. 012007-1.
- [51] A. J. GARCIA; M. P. VILLAR; D. ARAÚJO; J. F. GARCIA-MOTOLINIA; E. RIBERA; C. DIEZ; C. LÓPEZ-GASCÓN; C. ESTEPA; J. I. PENA; R. GARCÍA: *Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Nd:YAG Laser Machining*. In: Proc. of the 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, San Francisco (CA), USA, 2004.
- [52] D. HERZOG; P. JAESCHKE; O. MEIER; H. HAFERKAMP: *Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP*. Int. J. Mach. Tool. Manu. **48** (2008) S. 1464.
- [53] I. DE IORIO; C. LEONE; V. LOPRESTO; N. PAGANO: *Short Pulse Nd:YAG Laser Cutting of CFRP Sheet*. In: Proc. of the ICCM-17 - 17th International Conferences on Composite Materials, Edinburgh, UK, 2009.
- [54] A. GOEKE; C. EMMELMANN: *Influence of Laser Cutting Parameters on CFRP Part Quality*. Phys. Procedia **5** (2010) S. 253.

- [55] S. KATAYAMA; K.-W. JUNG; Y. KAWAHITO: *High Power Laser Cutting of CFRP, and Laser Direct Joining of CFRP to Metal*. In: Proc. of the 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Anaheim (CA), USA, 2010.
- [56] J. STOCK; M. F. ZAEH; M. CONRAD: *Remote Laser Cutting of CFRP: Improvements in the Cut Surface*. Phys. Procedia **39** (2012) S. 161.
- [57] L. BERTHE; F. COSTE; F. VALES: *Study of Carbon-Fiber-Reinforced-Polymer under moderate laser intensity. Application to laser drilling*. In: Proc. of the 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Miami (FL), USA, 2013.
- [58] D. HERZOG; M. SCHMIDT-LEHR; M. CANISIUS; M. OBERLANDER; J.-P. TASCHE; C. EMMELMANN: *Laser Cutting of CFRP using a 30 kW Fiber Laser*. In: Proc. of the 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, San Diego (CA), USA, 2014.
- [59] L. ROMOLI; F. FISCHER; R. KLING: *A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers*. Opt. Lasers Eng. (2011) S. 1.
- [60] S. BLUEMEL; S. BREDE; P. JAESCHKE; O. SUTTMANN; L. OVERMEYER: *Applying a DOE Model for the Determination of Appropriate Process Windows for Nanosecond Laser Processing of CFRP*. In: Proc. of the 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, San Diego (CA), USA, 2014.
- [61] A. WOLYNSKI; H. HALOUI; P. MUCHA; A. GLEITER; P. FRENCH; R. WEBER; T. GRAF: *Effect of Process Strategies on Thermal Load during CFRP Manufacturing using Picosecond Laser Pulses*. In: Proc. of the 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Anaheim (CA), USA, 2010.
- [62] J. FINGER; M. WEINAND; D. WORTMANN: *Investigations on Processing of Carbon Fiber Reinforced Plastics using Ultrashort Pulsed Laser Radiation with High Average Power*. In: Proc. of the 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Miami (FL), USA, 2013.

- [63] M. FUJITA; H. OHKAWA; M. OTSUKA; T. SOMEKAWA; Y. MAEDA; T. MATSUTANI; Y. ORII; K. INABA; G. OKADA; N. MIYANAGA: *Micromachining of Thin CFRP with UV-PS Laser Pulses*. In: Proc. of the 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, San Diego (CA), USA, 2014.
- [64] M. FUJITA; T. SOMEKAWA; T. OZAKI; M. YOSHIDA; N. MIYANAGA; Y. MITOOKA; K. MIKAME; H. SHAMOTO: *Laser micromachining of CFRP by ultra-short pulse lasers*. In: Proc. of the 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Anaheim (CA), USA, 2010.
- [65] G. CAPRINA; V. TAGLIAFERRI: *Maximum Cutting Speed in Laser Cutting of Fiber Reinforced Plastics*. Int. J. Mach. Tool. Manu. **28** (1988) Nr. 4, S. 389.
- [66] V. TAGLIAFERRI, A. DI ILIO, I. C. VISCONTI: *Laser cutting of fibre-reinforced polyesters*. Composites **16** (1985) Nr. 4, S. 317.
- [67] A. KLOTZBACH; P. VESSIO; U. KLOTZBACH; J. HAUPTMANN: *Investigations in remote cutting of carbon fiber composite materials*. In: Proc. of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Orlando (FL), USA, 2011.
- [68] F. SCHNEIDER; N. WOLF; D. PETRING: *High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers*. Phys. Procedia **41** (2013) S. 408.
- [69] P. JAESCHKE; K. STOLBERG; S. BASTICK; W. ZIOLKOWSKI; M. ROEHNER; O. SUTTMANN; L. OVERMEYER: *Cutting and drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by 70W short pulse nanosecond laser*. Proc. of SPIE **8963** (2014) S. 89630S-1.
- [70] A. BORGHESI; G. GUIZZETTI: *Graphite (C)*. In: Handbook of Optical Constants of Solids II. San Diego: Academic Press, Inc., 1991.
- [71] A. B. DJURIŠIĆ; E. H. LI: *Optical properties of graphite*. J. Appl. Phys. **85** (1999) Nr. 10, S. 7404.
- [72] J. LEKNER: *Reflection and refraction by uniaxial crystals*. J. Phys.-Condens. Mat. **3** (1991) S. 6121.

- [73] G. SEIBOLD: *Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung*. München: Herbert Utz Verlag, 2006. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, Dissertation, 2006.
- [74] L. ALTER: *Experimentelle Bestimmung des Einkoppelgrades von Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlänge in Carbonfasern und CFK*. Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2014 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 14-09).
- [75] Y. YIN; J. G. P. BINNER; T. E. CROSS; S. J. MARSHALL: *The oxidation behaviour of carbon fibres*. J. Mater. Sci. **29** (1994) S. 2250.
- [76] L. XIAOWEI; R. JEAN-CHARLES; Y. SUYUAN: *Effect of temperature on graphite oxidation behavior*. Nucl. Eng. Des. **227** (2004) S. 273.
- [77] S. M. LEE; Y. H. LEE; Y. G. HWANG; J. R. HAHN; H. KANG: *Defect-Induced Oxidation of Graphite*. Phys. Rev. Lett. **82** (1999) Nr. 1, S. 217.
- [78] H.-G. ELIAS: *Makromoleküle: Band2: Physikalische Struktur & Eigenschaften*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [79] J. ORTNER; G. HENSLER: *Beurteilung von Kunststoffbränden*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 1995.
- [80] S. V. LEVCHIK; E. D. WEIL: *Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins - a review of the recent literature*. Polym. Int. **53** (2004) S. 1901.
- [81] K. S. CHEN; R. Z. YEH; C. H. WU: *Kinetics of thermal decomposition of epoxy resin in nitrogen-oxygen atmosphere*. J. Environ. Eng. **123** (1997) S. 1041.
- [82] Y. SATO; M. TSUKAMOTO; F. MATSUOKA; K. TAKAHASHI; S. MASUNO: *Nanosecond laser processing of CFRP in Ar gas ambience for HAZ reduction*. In: Proc. of the 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, San Diego (CA), USA, 2014.
- [83] P. W. FRENCH; M. NAEEM; J. CLOWES; M. C. SHARP: *Fibre Laser Material Processing of Aerospace Composites*. In: Proc. of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, München, Germany, 2009.

- [84] R. NEGARESTANI; L. LI; H. K. SEZER; D. WHITEHEAD; J. METHVEN: *Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gas*. Int. J. Adv. Manuf. Tech. **49** (2010) S. 553.
- [85] W. FINKELNBURG; W. HUMBACH: *Ionisierungsenergien von Atomen und Atomionen*. Die Naturwissenschaften **2** (1955) S. 35.
- [86] C. BIESINGER: *Bestimmung der Abtragschwelle von CFK, Matrixwerkstoffen und Carbonfasern bei gepulster Bearbeitung*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2013 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 13-19).
- [87] P. MUCHA; N. SPEKER; R. WEBER; T. GRAF: *Momentum and velocity of the ablated material in laser machining of carbon fiber preforms*. Appl. Phys. A **113** (2013) S. 361.
- [88] A. NARAZAKI; T. SATO; Y. KAWAGUCHI; R. KUROSAKI; H. NIINO: *Laser-ionization Time-of-Flight mass spectrometric studies on laser ablation of carbon fiber reinforced plastics*. In: Proc. of The second International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials, Yokohama, Japan, 2013.
- [89] M. WIEDENMANN; C. HAIST; C. FREITAG; V. ONUSEIT; R. WEBER; T. GRAF: *Ablation dynamics and shock wave expansion during laser processing of CFRP with ultrashort laser pulses*. In: Proc. of Photonics West, LASE, San Francisco (CA), USA, 2014.
- [90] M. JARWITZ: *Spektroskopie bei der Laserbearbeitung von CFK*. In: CFK-Workshop 2013, Freudenstadt, Germany, 2013.
- [91] Y. KAWAGUCHI; T. SATO; A. NARAZAKI; R. KURISAKI; H. NIINO: *Laser ablation plume from graphite and CFRP under irradiation of nanosecond UV laser pulses in air*. In: Proc. of The second International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials, Yokohama, Japan, 2013.
- [92] D. RIST: *Dynamik realer Gase*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [93] J. WALTER; M. HUSTEDT; R. STAHR; S. KAERLE; P. JAESCHKE; O. SUTTMANN; L. OVERMEYER: *Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics - investigation of hazardous process emissions*. Physics Procedia **56** (2014) S. 1153.

- [94] S. BOLEY: *Emissionsspektroskopie zur Temperaturbestimmung der Gasfackel*. In: Zwischenbericht zum Teilvorhaben: Effizientes lagengenaues Abtragen von kohlefaserverstärkten Kunststoffbauteilen im Verbundprojekt: Photonisch basierte Reparatur und Nacharbeit von Compositestrukturen (PRECISE), FKZ: 13N12922, 2015, S. 19.
- [95] M. PLANCK: *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*. Annalen der Physik **IV** (1901) S. 553.
- [96] E. HECHT: *Optics Second Edition*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1987.
- [97] G. KIRCHHOFF: *Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht*. Heidelberg, 1860.
- [98] P. MUCHA; P. BERGER; R. WEBER; N. SPEKER; B. SOMMER; T. GRAF: *Calibrated heat flow model for the determination of different heat-affected zones in single-pass laser-cut CFRP using a cw CO₂ laser*. Appl.Phys. A **118** (2015) S. 1509.
- [99] P. RUSSBUELDT; T. MANS; G. ROTARIUS; J. WEITENBERG; H. D. HOFFMANN; R. POPRAWA: *400 W Yb:YAG Innoslab fs-Amplifier*. Opt. Express **17** (2009) S. 12230.
- [100] T. ELHAM; S. HANF; E. SEISE; T. ANDERSEN; V. T. GABLER; C. WIRTH; T. SCHREIBER; J. LIMPET; A. TÜNNERMANN: *Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power*. Opt. Lett. **35** (2010) S. 94.
- [101] J.-P. NEGEL; A. VOSS; M. ABDU AHMED; D. BAUER; D. SUTTER; A. KILLI; T. GRAF: *1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses*. Opt. Lett. **38** (2013) S. 5442.
- [102] F. FISCHER; S. KRELING; P. JAESCHKE; M. FRAUENHOFER; D. KRACHT; K. DILHER: *Laser Surface Pre-Treatment of CFRP for Adhesive Bonding in Consideration of the Absorption Behaviour*. J. Adhesion **88** (2012) S. 350.
- [103] K. ANZAI; M. AOYAMA; A. FUJISAKI; T. MIYATO; T. KAYAHARA; Y. HARADA; H. NIINO: *Laser trepanning of CFRP with a scanner head for IR and UV lasers*. Proc. of SPIE **8967** (2014) S. 89670K-1.

- [104] J. STRAUB: *Einfluss der Polarisationsrichtung des Laserstrahls auf den Abtragprozess von CFK*. Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2012 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 12-21).
- [105] S. MADER: *Optimierung des Schneidprozesses von CFK mit einem Ultrakurzpuls Lasersystem*. Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 2014 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 14-05).
- [106] C. FREITAG; R. WEBER; T. GRAF: *Polarization dependence of laser interaction with carbon fibers and CFRP*. Optics Express **22**(2) (2014), S. 1474.
- [107] C. FREITAG; L. ALTER; R. WEBER; T. GRAF: *Theoretical and experimental determination of the polarization dependent absorptance of laser radiation in carbon fibers and CFRP*. In: Proc. of Lasers in Manufacturing Conference LiM 2015, München, Germany, 2015.
- [108] T. V. KONONENKO; C. FREITAG; M. S. KOMLENOK; V. ONUSEIT; R. WEBER; T. GRAF; V. I. KONOVOV: *Oxygen-assisted multipass cutting of carbon fiber reinforced plastics with ultra-short laser pulses*: J. Appl. Phys. **115** (2014) S. 103107.
- [109] C. FREITAG; V. ONUSEIT; R. WEBER; T. GRAF: *High-speed observation of the heat flow in CFRP during laser processing*. Phys. Procedia **39** (2012) S. 171.
- [110] T. V. KONONENKO; C. FREITAG; M. S. KOMLENOK; V. ONUSEIT; R. WEBER; T. GRAF; V. I. KONOVOV: *Heat accumulation effects in short-pulse multi-pass cutting of carbon fiber reinforced plastics*. J. Appl. Phys. **118** (2015) S. 103105.
- [111] C. FREITAG; M. WIEDENMANN; J.-P. NEGEL; A. LOESCHER; V. ONUSEIT; R. WEBER; M. ABDU AHMED; T. GRAF: *Ultra-short pulse laser processing of CFRP with kilowatt average power*. In: Proc. of the 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, San Diego (CA), USA, 2014.
- [112] C. FREITAG; M. WIEDENMANN; J.-P. NEGEL; A. LOESCHER; V. ONUSEIT; R. WEBER; M. ABDU AHMED; T. GRAF: *High-quality processing of CFRP with a 1.1-kW picosecond laser*. Appl. Phys. A **119** (2015) Nr. 4, S. 1237.

- [113] C. FREITAG; V. ONUSEIT; R. WEBER; T. GRAF: *Influence of different ambient media on the laser ablation process of CFRP*. In: Proc. of the 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Anaheim (CA), USA, 2012.
- [114] S. FAAS: *Kamerabasierte Diagnostik der Prozessemissionen beim Laserabtrag von CFK*. Universität Stuttgart, Masterarbeit, 2016 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 16-02).

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. phil. nat. Graf für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung während meiner Zeit am Institut für Strahlwerkzeuge. Er zeigte stets Interesse für die Anliegen seiner Doktoranden und ermunterte fortwährend zur weiteren wissenschaftlichen Vertiefung in aktuelle Fragestellungen.

Mein Dank geht an Frau Prof. Dr.-Ing. Rohr in Stellvertretung für die GSaME für das umfangreiche Weiterbildungsangebot, welches mir das interdisziplinäre Ausbildungsprogramm der GSaME geboten hat.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. phil. nat. Rudolf Weber für seine wertvolle Unterstützung und die zahlreichen anregenden Diskussionen. Dank seiner unerschütterlich positiven Grundeinstellung und lösungsorientierten Herangehensweise an Problemstellungen war die Zusammenarbeit mit ihm stets inspirierend und konstruktiv.

Herrn Peter Berger danke ich für zahlreiche wertvolle Fachdiskussionen.

Herrn Dr. Andreas Michalowski gilt ebenfalls mein besonderer Dank, da er mich noch während meines Studiums des Maschinenwesens für die Lasermaterialbearbeitung begeistern konnte. Seine Leidenschaft zur Wissenschaft und seine freundliche Art machten die Zusammenarbeit mit ihm zu einer wertvollen Erfahrung.

Mein Dank gilt auch den Kollegen Dr. Taras V. Kononenko und Dr. Maxim S. Komlenok vom General Physics Institute in Moskau. Die Zusammenarbeit mit ihnen im Labor und die vielen intensiven Diskussionen waren eine kostbare und lehrreiche Erfahrung.

Allen Kolleginnen und Kollegen am IFSW ein herzliches Dankeschön für zahlreiche interessante Diskussionen und eine Arbeitsatmosphäre, welche die Tätigkeit am Institut für Strahlwerkzeuge zur Freude werden lässt. Hervorheben möchte ich Volkher Onuseit, Margit Wiedenmann, Jan-Philipp Negel, André Loescher und Sebastian Faas. Mein Dank gilt auch allen Studentinnen und Studenten, mit welchen ich die Freude hatte zusammen zu arbeiten.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Anna und Manfred Freitag, welche mich während meines Studiums und der Promotion stets unterstützt und ermutigt haben. Ich danke meiner Schwester Silvia für die schönen Zeiten bei der gemeinsamen Erkundung der Welt und meinem Bruder Sebastian für seine fortwährende Unterstützung.

Stuttgart, im Februar 2017

Christian Freitag

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

Gorritz, 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 Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, 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 längsgeströmte 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 längsgeströmten 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

Laserschweißtauglichkeit von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-8

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels 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 Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
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 mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Pließ, Wilfried

Zerstörungsschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
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

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspansung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren 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

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

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 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 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 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 3-8316-0460-8

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 Nahteigen-schaften 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

