

Der Einsatz von Bauteilen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erfährt besonders in der Automobil- und Flugzeugindustrie eine stetig wachsende Bedeutung. Durch die angestrebten Gewichtseinsparungen wird ein reduzierter Kraftstoffverbrauch bei gleicher mechanischer Belastbarkeit der Bauteile erwartet. Die Integration von Krafteinleitungselemente zur lösbaren Verbindung von CFK-Bauteilen an eine Grundstruktur stellt dabei besondere Anforderungen an die Fertigungstechnik dar. Defekte wie z. B. thermische Schädigungen und Delaminationen müssen aufgrund der bisher noch kostenintensiven Carbonfasern und der aufwendigen Prozesskette zur Herstellung von CFK-Bauteilen unbedingt vermieden werden.

Für die Einbringung von Bohrungen zur Integration von Krafteinleitungselementen stoßen sowohl konventionelle als auch nicht-konventionelle Fertigungsverfahren an industrierelevante Grenzen bezüglich der erzielbaren materialographischen und geometrischen Qualität. Die Hauptursache liegt dabei in den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Carbonfasern und der Matrix. Erfolg versprechend erscheint daher, das noch ungetränkte Carbonfasertextil zu bohren und nach Integration der Krafteinleitungselemente mit dem Matrixwerkstoff zu infundieren. Das Bohren mittels Laserstrahlung ermöglicht dabei die mechanisch kontaktlose Materialbearbeitung für einen ungestörten Textilaufbau. Um die erzielbare geometrische und materialographische Bohrungsqualität bewerten zu können, müssen die Auswirkungen der Laserstrahlung auf das Carbonfasertextil untersucht werden. Durch den Einsatz von langgepulster Laserstrahlung wird dabei ein produktiver Bearbeitungsprozess ermöglicht. Durch die energiereichen Laserpulse können aber große thermische Schädigungen an den Fasern auftreten. Alternativ kann mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung eine thermisch defektfreie Bohrung erzeugt werden, jedoch häufig zu Lasten der Produktivität und des Aspektverhältnisses.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Schadensphänomene und deren Wirkmechanismen von Laserstrahl gebohrten, carbonfaserbasierten textilen Vorformlingen, sogenannte Preforms, untersucht. Sowohl für die Bearbeitung von langgepulster als auch ultrakurz gepulster Laserstrahlung werden Prozessstrategien entwickelt, um thermisch induzierte Schäden zu verringern oder gar zu vermeiden. Für die langgepulste Laserbearbeitung wird eine Scanstrategie entwickelt, mit der bei hoher Produktivität thermische Schädigungen minimiert werden können. Weiterhin werden insbesondere für ultrakurz gepulste Laserstrahlung Handlungsempfehlungen entwickelt, um die Produktivität zu erhöhen und die Bohrungskonizität zu verkleinern.

ISBN 978-3-86359-674-3



Stefan Janssen

Laserstrahl-Bohren von CFK-Preforms

Laserstrahl-Bohren von CFK-Preforms

Laser Drilling of CFRP-Preforms

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Stefan Janssen

Berichter:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 10. August 2018

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar

ERGEBNISSE AUS DER LASERTECHNIK

Stefan Janssen

Laserstrahl-Bohren von CFK-Preforms

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Stefan Janssen:

Laserstrahl-Bohren von CFK-Preforms

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2018

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Titelbild © Fraunhofer ILT, Aachen

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-674-3

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen University und am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Promotion begleitet und beim Gelingen dieser Arbeit unterstützt haben.

Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe danke ich für die Betreuung der Arbeit sowie den inhaltlichen und strategischen Diskussionen. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke danke ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Uni.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kollegen danke ich für die stets angenehme und motivierende Arbeitsatmosphäre. Besonders die Offenheit, die kreativen und konstruktiven Gedanken und Ideen in Diskussionen sowie der immer freundliche Umgang untereinander möchte ich hervorheben. Insbesondere danke ich Johannes Finger, Dennis Haasler, Martin Reininghaus, Christian Kalupka, Torsten Hermanns und Moritz Alkhayat sowie meinen ehemaligen Kollegen Hermann Uchtmann, Johannes Witzel und Chen Hong. Ein großer Dank gilt auch Sebastian Oppitz vom Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University.

Ich danke meinen studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitern Simon Reinelt, Pascal Mösbauer, Markus Eckstein, Stefan Belitz, Dorian Kürschner, Christian Beckers, Niklas Fögen und Vincent Köntges für die tatkräftige Unterstützung bei den Versuchsdurchführungen und Auswertungen. Lorenz „Lolo“ Birkner danke ich für sein Engagement als aufmerksamer Korrekturleser.

Herrn Dr.-Ing. Arnold Gillner und Adj. Prof. (RMIT) Dr.-Ing. Ingomar Kelbassa danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen und die Betreuung während des Promotionsprozesses.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Yumi für ihre liebevolle Unterstützung und Geduld in jeder Phase der Promotion. Meinem Bruder Frank Janssen danke ich für die musikalische Untermalung, besonders während der vielen Stunden am Schreibtisch. Dem höchsten Dank bin ich meinen Eltern Anne und Peter Janssen verpflichtet, die mich mein Leben lang unterstützt und mir das Studium des Maschinenbaus ermöglicht haben.

Aachen, September 2018

Stefan Janssen

Kurzfassung

Der Einsatz von Bauteilen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erfährt besonders in der Automobil- und Flugzeugindustrie eine stetig wachsende Bedeutung. Durch die angestrebten Gewichtseinsparungen wird ein reduzierter Kraftstoffverbrauch bei gleicher mechanischer Belastbarkeit der Bauteile erwartet. Die Integration von Krafteinleitungselemente zur lösbaren Verbindung von CFK-Bauteilen an eine Grundstruktur stellt dabei besondere Anforderungen an die Fertigungstechnik dar. Defekte wie z. B. thermische Schädigungen und Delaminationen müssen aufgrund der bisher noch kostenintensiven Carbonfasern und der aufwendigen Prozesskette zur Herstellung von CFK-Bauteilen unbedingt vermieden werden.

Für die Einbringung von Bohrungen zur Integration von Krafteinleitungselementen stoßen sowohl konventionelle als auch nicht-konventionelle Fertigungsverfahren an industrierelevante Grenzen bezüglich der erzielbaren materialographischen und geometrischen Qualität. Die Hauptursache liegt dabei in den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Carbonfasern und der Matrix. Erfolg versprechend erscheint daher, das noch ungetränkte Carbonfasertextil zu bohren und nach Integration der Krafteinleitungselemente mit dem Matrixwerkstoff zu infundieren. Das Bohren mittels Laserstrahlung ermöglicht dabei die mechanisch kontaktlose Materialbearbeitung für einen ungestörten Textilaufbau. Um die erzielbare geometrische und materialographische Bohrungsqualität bewerten zu können, müssen die Auswirkungen der Laserstrahlung auf das Carbonfasertextil untersucht werden. Durch den Einsatz von langgepulster Laserstrahlung wird dabei ein produktiver Bearbeitungsprozess ermöglicht. Durch die energiereichen Laserpulse können aber große thermische Schädigungen an den Fasern auftreten. Alternativ kann mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung eine thermisch defektfreie Bohrung erzeugt werden, jedoch häufig zu Lasten der Produktivität und des Aspektverhältnisses.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Schadensphänomene und deren Wirkmechanismen von Laserstrahl gebohrten, carbonfaserbasierten textilen Vorformlingen, sogenannte Preforms, untersucht. Sowohl für die Bearbeitung von langgepulster als auch ultrakurz gepulster Laserstrahlung werden Prozessstrategien entwickelt, um thermisch induzierte Schäden zu verringern oder gar zu vermeiden. Für die langgepulste Laserbearbeitung wird eine Scanstrategie entwickelt, mit der bei hoher Produktivität thermische Schädigungen minimiert werden können. Weiterhin werden insbesondere für ultrakurz gepulste Laserstrahlung Handlungsempfehlungen entwickelt, um die Produktivität zu erhöhen und die Bohrungskonizität zu verkleinern.

Abstract

The use of components made of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) is becoming increasingly important, especially in the automotive and aviation industries. The targeted weight savings are expected to reduce fuel consumption while maintaining the same mechanical load-bearing capacity of the components. The integration of force transmission elements for the detachable connection of CFRP components to a basic structure places special demands on production technology. Defects such as thermal damage and delamination must be avoided due to the still cost-intensive carbon fibers and the complex process chain for the production of CFRP components.

For the drilling of holes for the integration of force transmission elements, both conventional and non-conventional manufacturing processes reach the limits of industrially relevant materialographic and geometric quality. The main reason for this are the different physical properties of the carbon fibers and the matrix. It therefore seems promising to drill the still unimpregnated carbon fiber textile and to infuse it with the matrix material after integration of the force transmission elements. Laser drilling enables mechanical contactless material processing to ensure an undisturbed textile setup. In order to evaluate the achievable geometric and materialographic drilling quality, the effects of laser radiation on the carbon fiber textile must be investigated. The use of long-pulsed laser radiation enables productive material processing. However, the high-energy laser pulses can cause significant thermal damage to the fibers. Alternatively, ultra-short pulsed laser radiation can be used to manufacture a thermally defect free bore, but often at the expense of productivity and aspect ratio.

In the context of this work the damage phenomena and their mechanisms of action of laser-drilled, carbon fiber-based textile preforms are investigated. Process strategies are developed both for the processing of long-pulsed and ultra-short pulsed laser radiation in order to reduce or even avoid thermally induced damage. For long-pulsed laser processing, a scanning strategy is developed with which thermal damage can be minimized at high productivity. Furthermore, recommendations for action are being developed, especially for ultra-short pulsed laser radiation, in order to increase productivity and reduce conicity of the bore.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
3 Stand der Technik und Forschung	9
3.1 Herstellungsprozess carbonfaserverstärkter Kunststoffbauteile	9
3.1.1 Carbonfaserherstellung	10
3.1.2 Herstellung von Halbzeugen aus Carbonfasern	14
3.1.3 Integration von Krafteinleitungselementen	16
3.1.4 Trennverfahren für textile Preforms	19
3.2 Schädigungsformen bei der Bearbeitung konsolidierter CFK-Bauteile	20
3.3 Einbringung von Bohrungen mittels langgepulster Faserlaserstrahlung	24
3.3.1 Grundlagen	24
3.3.2 Materialbearbeitung mittels langgepulster Laserstrahlung	25
3.4 Einbringung von Bohrungen mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung	28
3.4.1 Grundlagen	28
3.4.2 Materialbearbeitung mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung	30
4 Verwendete Anlagen- und Systemtechnik, Materialien sowie Analyseverfahren	33
4.1 Laserstrahlquellen, Strahlführung und -formung	33
4.1.1 Faserlaserstrahlung	33
4.1.2 Ultrakurz gepulste Laserstrahlung	36
4.2 Preformmaterial	39
4.3 Charakterisierung und materialographische Analyse von Bohrungen	40
5 Verfahrensentwicklung	43
5.1 Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Bohren mit langgepulster Faserlaserstrahlung	43

5.1.1	Linienzüge in einlagigen Preforms	43
5.1.2	Herstellung von Bohrungen in mehrlagige Preforms	44
5.1.3	Ergebnisauswertung	45
5.1.4	Einfluss der Verfahrensparameter auf einlagige Preforms	46
5.1.5	Einfluss der Prozessstrategie (Sprungtrennverfahren)	51
5.1.6	Ergebnisse und Vergleich am Beispiel eines fünflagigen Preforms	58
5.1.7	Bohrungsqualität bei der Bearbeitung mit langgepulster Laserstrahlung	68
5.1.8	Zwischenfazit	75
5.1.9	Trepanieren von mehrlagigen Preforms	78
5.1.10	Wichtige Erkenntnisse und Fazit	83
5.2	Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Abtragen mit ultrakurz gepulster Festkörperlaserstrahlung	86
5.2.1	Versuchseinrichtung und Voruntersuchungen	86
5.2.2	Untersuchungen mit konstanter Fokusslage auf der Probenoberfläche	87
5.2.3	Bestimmung der Zustellung und Verschieben der Fokusslage in z-Richtung	89
5.2.4	Herstellung von Formbohrungen	89
5.2.5	Einfluss der Verfahrensparameter	90
5.2.6	Relevante Mechanismen für die Ausbildung der Bohrlochform	104
5.2.7	Einfluss der Abtragstrategie	118
5.2.8	Herstellung von Formbohrungen	121
5.2.9	Fazit	124
5.3	Quasistatische Auszugtests	126
6	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang A	145

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2,5D	„2,5-dimensional“: 3D – ohne Hinterschnitt
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon fiber-reinforced polymer (CFK)
CPA	Chirped Pulse Amplification (Verstärkung gechirpter Pulse)
cw	continuous wave (kontinuierliche, un gepulste Strahlung)
DOE	Diffraktives Optisches Element
EDX	Energy-dispersive X-ray (Energiedispersive Röntgenspektroskopie)
EOM	Elektrooptischer Modulator
FCU	Fiber Coupling Unit (Faserkoppler)
FVV	Faserverstärkte Werkstoffe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HT	High Tenacity (Hohe Zähigkeit)
IR	Infrarot
KEE	Krafteinleitungselement
LSM	Laser-Scanning-Microscope (Laserrastermikroskop)
MAG	Multiaxialgelege
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier
NCF	Non-crimp fabrics (Gelege)
Nd:YVO4	Neodymium:Yttrium-Orthovanadat
PAN	Polyacrylnitril
PES	Polyethersulfon
QCW	Quasi-continuous wave (quasikontinuierliche, gepulste Strahlung)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTM	Resin Transfer Moulding (Harzinjektionsverfahren)
SLE	Selective Laserinduced Etching (Selektives laserinduziertes Ätzen)
Ti:Saphir	Titan:Saphir
(U)HM	(Ultra) Hochmodul
UKP	Ultrakurzpuls
WEZ	Wärmeeinflusszone
Yb:YAG	Ytterbium:Yttrium-Aluminium-Granat

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	-	Absorptionsgrad
$A_{Ellipse}$	mm ²	Ellipsenfläche
c_B	-	Pulsdauer-Bandbreiten-Produkt
c_p	J/kg·K	Wärmekapazität
dc	-	Duty cycle
$d_{Austritt}$	mm	Austrittsdurchmesser der Bohrung
$d_{Eintritt}$	mm	Eintrittsdurchmesser der Bohrung
d_{Faser}	µm	Durchmesser der Strahlführungsfaser (Faserlaser)
d_{foc}	µm	Fokusbereich
d_L	µm	Bohrlochdurchmesser
$d\varphi$	°	Winkelversatz zweier aufeinander folgender Kreisumläufe
$d\varphi_{real}$	°	Wahrer Winkelversatz zweier aufeinanderfolgender Kreisumläufe
ds	mm	Versatz zweier aufeinanderfolgender Linien
δ_{th}	µm	Thermische Eindringtiefe
$\delta_{th,\parallel}$	µm	Thermische Eindringtiefe parallel zur Faserachse
$\delta_{th,\perp}$	µm	Thermische Eindringtiefe quer zur Faserachse
δ_I	nm	Optische Eindringtiefe ultrakurzer Pulse (Bereich <i>I</i>)
δ_{II}	nm	Thermische Eindringtiefe ultrakurzer Pulse (Bereich <i>II</i>)
Δa_z	mm	Zustellung in z-Richtung für dynamische Fokusführung
Δs	mm	Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse innerhalb einer Linie
Δt	µm	Abtragtiefe pro Puls
Δt_{sim}	s	Abkühlzeit zwischen zwei simulierten, direkt benachbarten Pulsen
Δv	1/s	Bandbreite des Emissionsspektrums
$\Delta\varphi$	°	Verteilwinkel zwischen zwei Pulsen innerhalb eines Kreisumlaufes
$\Delta\varphi_{real}$	°	Wahrer Verteilwinkel zweier Pulse innerhalb eines Kreisumlaufes
E_{aes}	J	Gesamt emittierte Pulsenergie
E_{heiz}	J	Heizenergie
E_p	J	Pulsenergie
$E_{p,min}$	J	Minimal erforderliche Pulsenergie zum Einzelpulsbohren
E_s	J/mm	Streckenenergie
E_{sub}	J	Verdampfungs-/Sublimationsenergie
F	J/cm ²	Fluenz
$\tilde{F}$	J/cm ²	Fluenz des Rechteckpulses
F_0	J/cm ²	Spitzenfluenz
F_S	J/cm ²	Abtragschwellfluenz
$\bar{F}_{max}$	N	Durchschnittliche maximale Auszugskraft der Stichprobe
$\hat{F}_{max}$	N	Größte maximale Auszugskraft der Stichprobe
$\hat{F}_{min}$	N	Kleinste maximale Auszugskraft der Stichprobe
F_{Zug}	N	Auszugkraft

Symbol	Einheit	Bedeutung
f	Hz	Repetitionsrate
f_{brenn}	mm	Brennweite
f_{coll}	mm	Kollimationsweite
f_{Laser}	Hz	Repetitionsrate des Lasers (Sprungtrennverfahren)
$f_{Laser,max}$	Hz	Maximal mögliche Laserrepetitionsrate
$f_{real,max}$	Hz	Maximal mögliche, wahre Repetitionsrate
f_{sim}	Hz	Simulierte Repetitionsrate im Sprungtrennverfahren
$f_{sim,real}$	Hz	Wahre simulierte Repetitionsrate im Sprungtrennverfahren
f'_{sim}	Hz	Simulierte Repetitionsrate bei hohen Sprungverzügen
H_V	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie
I	W/cm ²	Intensität
I_o	W/cm ²	Spitzenintensität
k	%	Konizität
κ	cm ² /s	Temperaturleitfähigkeit
L_{aes}	mm	Konturgesamtlänge
L_{Linie}	mm	Linienlänge
λ	W/m·K	Temperaturleitfähigkeit
λ_{Laser}	nm	Wellenlänge der Laserstrahlung
$\lambda_{ }$	W/m·K	Wärmeleitfähigkeit parallel zur Faserachse
$\lambda_{\perp}$	W/m·K	Wärmeleitfähigkeit quer zur Faserachse
M^2	-	Beugungsmaßzahl
N_L	-	Anzahl Linien
$N_{P,real}$	-	Wahre Gesamtanzahl Pulse
$N_{P,min}$	-	Minimal erforderliche Pulsanzahl
$N_{P/L}$	-	Anzahl Pulse pro Linie
$N_{P/R}$	-	Anzahl Pulse pro Kreisumlauf
$N_{P/S}$	-	Anzahl Pulse pro Stelle
N_R	-	Anzahl Kreisumläufe
n	-	Anzahl Wiederholungen
$\bar{P}$	W	Mittlere Leistung
$\hat{P}$	W	Pulsspitzenleistung
$P\ddot{U}$	-	Pulsüberlapp
$P\ddot{U}_{DIN}$	-	Pulsüberlapp nach DIN 32540
$P\ddot{U}_{p\&s,real}$	-	Realer Pulsüberlapp im Point-and-Shoot Modus
$P\ddot{U}_{UKP}$	-	Vereinfachter Pulsüberlapp
p	-	Energieanteil
r	mm	Radius
r'	mm	Strahlradius des Rechteckpulses
ρ	g/cm ³	Dichte
s	mm	Langlochlänge
σ_s	N	Standardabweichung der maximalen Auszugkräfte des Stichprobenumfangs
T_0	K	Anfangs- / Umgebungstemperatur
$T_{Oxidation}$	°C	Oxidationstemperatur von PAN-basierten Carbonfasern

Symbol	Einheit	Bedeutung
T_{PES}	°C	Zersetzungstemperatur der aus PES bestehenden Wirkfäden
$T_{Schlichte}$	°C	Zersetzungstemperatur der Schlichte (Sizing)
T_V	K	Verdampfungstemperatur
t	s	Einwirkdauer, Zeit
t_{delav}	s	Dauer des Sprungverzugs (Jump delay)
t_p	s	Pulsdauer
t_{proz}	s	Prozessdauer
$t_{proz.min}$	s	Minimale Prozessdauer
$t_{proz.p\&s}$	s	Reale Prozessdauer im Sprungtrennverfahren
$t_{proz.real}$	s	Reale Prozessdauer
t_{probe}	mm	Probendicke
t_{spruna}	s	Rücksprungzeit des Scanners
t_{warte}	s	Wartezeit durch Sprungverzüge im Sprungtrennverfahren
t_{Wdh}	s	Dauer einer Spiralscanbewegung
θ_B	°	Bohrwandwinkel
τ_{ev}	fs	Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit
τ_p	s	Pulsperiodendauer
V	mm ³	Volumen
v_{spruna}	mm/s	Sprunggeschwindigkeit
v_s	mm/s	Scangeschwindigkeit
w	µm	Strahlradius
w_0	µm	Strahlradius in der Fokusebene
χ^2_{red}	-	Reduziertes Chi-Quadrat
z_R	mm	Rayleighlänge

1 Einleitung

Der Leichtbau ist ein zentrales Thema in der industriellen Produktion. Die Materialsubstitution und Neugestaltung von Bauteilen durch leichtere und höherfeste Werkstoffe, wie zum Beispiel faserverstärkte Werkstoffe (FVW), nehmen dabei eine wesentliche Rolle ein. Während bisher noch aus Kostengründen glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) eingesetzt werden, steigt der Trend besonders in der Automobil- und Luftfahrtindustrie zum Einsatz von kohlefaserverstärkten bzw. carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Durch eine deutlich kleinere Dichte von durchschnittlich $1,5 \text{ g/cm}^3$ (HT-Carbonfasermaterial, Epoxidmatrix, Faservolumenanteil 60 %) und einer Zugfestigkeit von bis zu 3,6 GPa ist der Einsatz von CFK im Vergleich zu Stahl ($7,86 \text{ g/cm}^3$ bzw. 1,2 GPa) ein aussichtsreicher Treiber für die Reduktion des Gesamtgewichtes von Fahrzeugen. Durch die Materialsubstitution wird eine Verkleinerung der Emissionswerte sowie eine Vergrößerung der Ressourceneffizienz ermöglicht [Fri13].

In einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) beauftragten Studie wird für den Automobilsektor der Leichtbau in Karosserie und Komponenten neben der Getriebetechnologie für eine Reduktion des Beschleunigungswiderstandes identifiziert [IKA14]. Als weitere Sekundäreffekte können das Downsizing von Antrieben oder eine kleinere Auslegung von z.B. Bremsen weitere Einsparpotenziale für den Ressourceneinsatz bieten, ohne Einbußen hinsichtlich Komfort und Sicherheit hinnehmen zu müssen [EK14]. Ähnliches gilt für die Luft- und Raumfahrt, wobei in diesem Bereich die Durchdringung von faserverstärkten Bauteilen bereits relativ hoch ist. Bei Flugzeugen, wie z.B. der Boeing 787 und dem Airbus A350, liegt der Gewichtsanteil von Faserverbundwerkstoffen am Gesamtstrukturgewicht bei rund 50 % [DKK07] [Fri13]. Dort können ebenso die Widerstände beschleunigter Massen durch Einsatz leichterer Strukturbauteile und Komponenten verkleinert werden.

Dem breiten Einzug von CFK-Bauteilen in den Mobilitäts-, Energie- und Freizeitsektor stehen bisher noch das Umdenken der Konstrukteure vom isotropen Werkstoff Metall zu den orthotropen faserverstärkten Werkstoffen und die Kostenfrage gegenüber [EK14]. Einerseits ist die Herstellung des Fasermaterials energieintensiv, andererseits ist die Materialbearbeitung aufgrund der hohen Abrasivität der Carbonfasern mit hohen Werkzeugkosten verbunden. Zusätzlich ist aufgrund des frühzeitigen Verschleißes der Werkzeuge eine hohe Defektanfälligkeit des konsolidierten Laminates zu erwarten. Die materialographischen Defekte können bei der konventionellen Bearbeitung z.B. mittels Bohren, Fräsen oder Sägen zu Faserausrisen, Matrixbrüchen,

Delaminationen zwischen einzelnen oder mehreren Faserlagen und Ausfransungen führen [EFM12] [LTC12]. Da diese Defekte erst kurz vor der Fertigstellung des CFK-Bauteils auftreten, sind diese hochrelevant für die Fertigungskosten in der Gesamtprozesskette. Reparaturvorgänge sind aufgrund manueller Arbeitsschritte oder der funktionsintegralen Bauweise der Komponenten in diesem Stadium kosten- und zeitintensiv oder führen zu einem Ausschuss des nahezu fertigen Bauteils [Fri13].

Durch die Materialbearbeitung mittels Laserstrahlung werden für den Fertigungsprozess mehrere Chancen hinsichtlich der Herstellbarkeit neuer Geometrien für Funktionselemente und der Automatisierbarkeit und damit der Wirtschaftlichkeit bei hohen Losgrößen eröffnet. Gleichzeitig entstehen aber neue Fragestellungen und Risiken, die durch wissenschaftliche Untersuchungen der Laser-Materie-Wechselwirkung mit dem Kompositwerkstoff und seinen Komponenten geklärt und beherrscht werden müssen. Unter anderem können thermisch induzierte Defekte durch Einsatz von Laserstrahlung in konsolidierten CFK-Bauteilen aufgrund der sehr unterschiedlich thermophysikalischen Eigenschaften der Carbonfaser und Matrix auftreten [GW12]. Im Vergleich zu den konsolidierten Bauteilen kann die Bearbeitung des noch nicht mit dem Matrixwerkstoff versehenen, textilen Vorformlings, dem sogenannten Preform, potenzielle Vorteile beim Einsatz von Laserstrahlung zugunsten der Qualität bezüglich der Geometrie und Materialographie mit sich bringen. Ferner eröffnen sich weitere Potenziale zugunsten größerer Produktivität und Reproduzierbarkeit durch die Umstrukturierung zu einer automatisierten Prozesskette vom Preform bis zum fertigen, mit Krafteinleitungselementen (KEE) versehenen CFK-Bauteil.

In der Fachliteratur ist die Dokumentation der Effektmechanismen und erzielbaren geometrischen und materialographischen Qualitätsmerkmale bei der Bearbeitung von textilen Preforms aus Carbonfasern mittels Laserstrahlung noch nicht ausreichend dargestellt. Diese Arbeit widmet sich daher grundlegenden Untersuchungen mit dem Ziel der Identifikation von Mechanismen während der Laser-Materie-Wechselwirkung bei der Einbringung hochqualitativer Bohrungen in CFK-Preforms. Durch die neu gewonnenen Erkenntnisse werden bei einer gezielten Einflussnahme auf die Wirkmechanismen die materialgraphischen Eigenschaften des Textils und die Verbindung mit dem Matrixwerkstoff signifikant beeinflusst. Schlussendlich werden durch die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze zur Laserbearbeitung von Carbonfasergelegen eine Vergrößerung der mechanischen Belastbarkeit an den Krafteinleitungsstellen am Endbauteil sowie eine vergrößerten Lebensdauer erwartet.

2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation und Klärung grundlegender qualitäts- und materialbeeinflussender Phänomene bei der Laserstrahlbearbeitung von textilen Gelegen auf Basis von Carbonfasern und der Einfluss auf nachfolgende Prozessschritte.

Zur Klärung der in der Einleitung dargestellten Problemstellungen bei der lasertechnischen Bearbeitung von carbonfaserbasierten Preforms werden mehrere aufeinander aufbauende Forschungsfragen und -hypothesen aufgestellt. Durch experimentelle Untersuchungen werden die wesentlichen Effekte bei der Lasermaterialbearbeitung von Gelegen aus Carbonfasern ermittelt und in der Folge die mechanische Belastbarkeit bei mindestens gleicher Lebensdauer bzgl. der Korrosion von metallischen Krafteinleitungselementen in Carbonfaser verstärkten Kunststoffbauteilen vergrößert.

Forschungsfragen

- Welche Mechanismen beeinflussen die materialographische und geometrische Qualität beim Laserstrahl-Bohren von Preforms aus Carbonfasergelegen?
- Sind diese Mechanismen beeinflussbar und wie wirken sie sich auf die nachfolgenden Prozesse, wie z.B. die Matrixinfusion und Konsolidierung, aus?
- Wie können weiterhin durch gezielte Beeinflussung der relevanten Mechanismen die Prozessproduktivität vergrößert, Defektgrößen verkleinert und so die Auszugskräfte und die Lebensdauer vergrößert werden?

Forschungshypothesen

Für CFK-Bauteile, die mittels eines Harzinjektionsverfahrens, wie z.B. dem Resin Transfer Molding (RTM), hergestellt werden, findet die Formgebung des Endbauteils während der Matrixinfusion und Konsolidierung im RTM-Werkzeug statt. Durch die nach aktuellem Stand der Technik darauf folgenden Materialbearbeitungsprozesse zur Einbringung von Krafteinleitungselementen kann die innere Struktur hinsichtlich Faserbrüche und -auszüge sowie Delaminationen und Matrixrisse geschwächt werden. Daraus werden folgende Hypothesen aufgestellt:

- (1) Um minimale thermisch induzierte Schädigungen an den Fasern zu erzeugen, ist eine kurze Wechselwirkungszeit zwischen der Laserstrahlung und dem Carbonfasergelege erforderlich.
- (2) Der thermische Einfluss kann durch eine prozessspezifische Wahl einer Scanstrategie reduziert werden.
- (3) Durch die Entwicklung geeigneter Scanprozesse können die Verbindungskräfte zwischen einem Krafteinleitungselement und dem Carbonfasergelege vergrößert, die Lebensdauer gesteigert und die Prozessgeschwindigkeit erhöht werden.

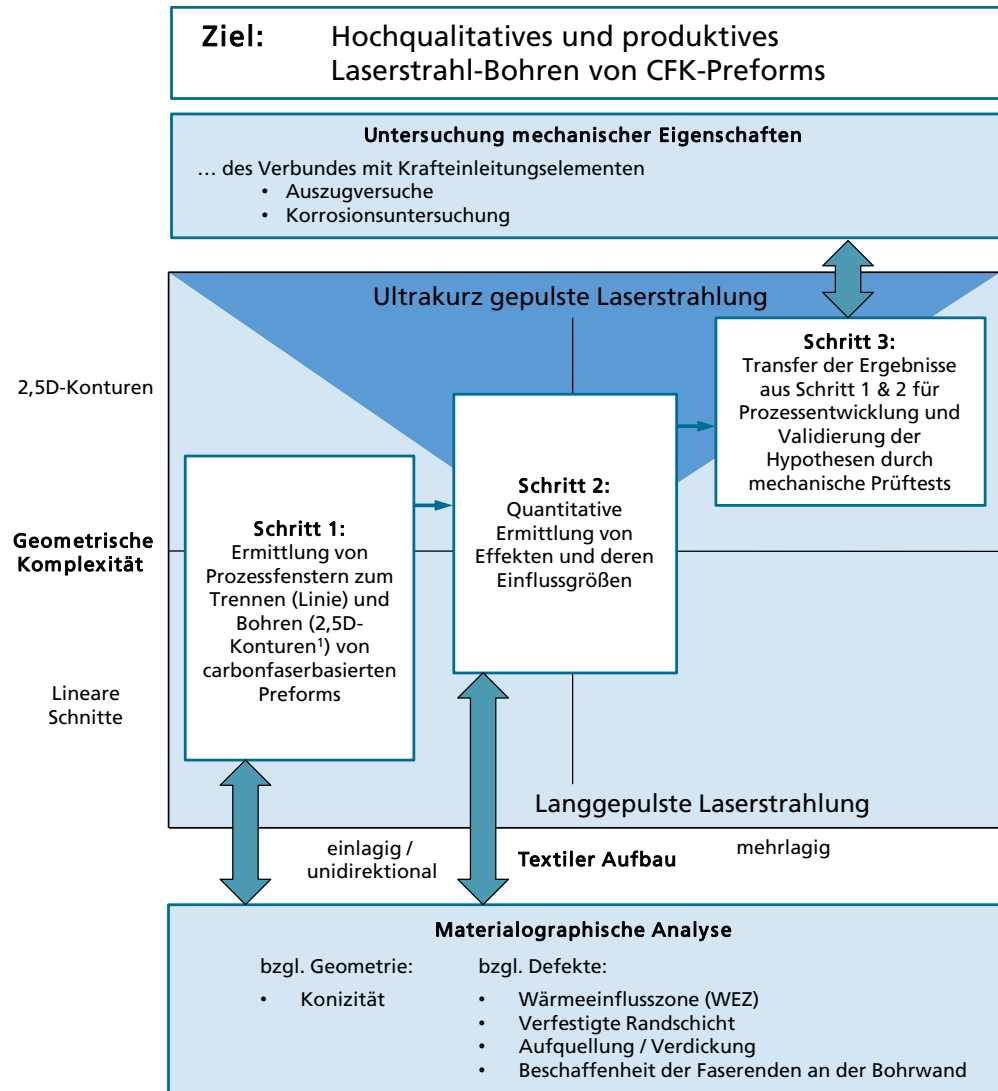
Überprüfung der Forschungshypothesen

Für die Überprüfung der Hypothesen werden Untersuchungen an zunächst einlagigen, später mehrlagigen Carbonfasergelegen mit $\pm 45^\circ$ orientierten Fasern vorgenommen. Dabei werden zuerst lineare Schnitte von ca. 20 mm Länge hergestellt, um den Einfluss der Laserstrahlung bzgl. der Wärmeeinflusszone und der materialographischen Qualität an der Schnittkante zu untersuchen. Daraufhin werden runde Konturen mit einem in der Automobilindustrie häufig verwendeten Gewindeeinsatzdurchmesser für M6 Schrauben von $\varnothing 8,5$ mm hergestellt und untersucht. In den folgenden Schritten wird die Materialdicke auf bis zu 10 bi-axiale Gelegelagen vergrößert und die erzielbare Qualität hinsichtlich geometrischer Kennwerte, wie z.B. Konizität und Bohrungsform, sowie der materialographischen Qualität, wie z.B. der Wärmeeinflusszone (WEZ) an Ein- und Austritt und der Schichtdicke an der Bohrungswand, untersucht.

Im letzten Schritt wird eine Formbohrung (abgerundete Sternkontur) aus mehrlagigen CFK-Preforms abgetragen und bzgl. der Auszugkraft des Inserts im Zugversuch überprüft. Für die Lebensdauereignung des neuen Integrationsverfahrens wird eine Korrosionsuntersuchung im Salznebelsprühtest durchgeführt.

Das Flussdiagramm zur Zielsetzung und Vorgehensweise in dieser Arbeit ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Bild 1:
Flussdiagramm zur
Zielsetzung und
Vorgehensweise



Schritt 1:

Im ersten Schritt wird ein geeignetes Prozessfenster für die Herstellung von linearen Schnitten und kreisrunden Bohrungen in einlagige bi-axiale Gelege mittels langgepulster Faserlaserstrahlung ermittelt. Dabei werden die relevanten Prozesseinflussgrößen untersucht und Mechanismen identifiziert, welche die geometrische und materialographische Qualität signifikant beeinflussen. Bei den zunächst linearen Schnitten in einlagigen Preforms wird die Wärmeeinflusszone um die Schnittkontur ohne einen zyklischen Einfluss von Wärmeakkumulation wie beim Scannen kleiner, geschlossener Konturen bezüglich ihrer maximalen

¹ 2,5D: eine in die Tiefe projizierte 2D-Form ohne Hinterschnitte

Ausdehnung ermittelt. Bei den geschlossenen, runden Konturen werden neben der WEZ vor allem die Entstehung einer verfestigten Schicht an der Bohrwand untersucht.

Bei der Verwendung langgepulster Faserlaserstrahlung in Kombination mit einem Scansystem werden die Prozessparameter Pulsspitzenleistung, Repetitionsrate, Pulsdauer und Scangeschwindigkeit variiert. Darauf aufbauend werden implizite Verfahrensparameter, wie z.B. Puls- und Streckenenergie sowie Pulsüberlapp, auf den Einfluss auf das Prozessergebnis hin untersucht.

Ziel von Schritt 1 ist die Identifikation von qualitätsbestimmenden Mechanismen während der Lasermaterialbearbeitung mittels hochenergetischer, langgepulster Faserlaserstrahlung zur Herstellung von Bohrungen in dünnen CFK-Preforms. Dabei soll die Produktivität des Bohrprozesses möglichst groß sein und materialographische Defekte an der Schnittkante oder Bohrwand vermieden werden. Aufgrund der hohen Wärmeleitung der Carbonfasern und der relativ großen Pulsenergie der Laserstrahlung ist eine große Wärmeeinflusszone um die Schnitte und Kreiskonturen im Preformmaterial zu erwarten.

Schritt 2:

Im zweiten Schritt erfolgt zusätzlich zur langgepulsten Faserlaserstrahlung die Untersuchung von Prozessgrenzen zum Abtragen von CFK-Preforms mittels ultrakurz gepulster (UKP) Festkörperlaserstrahlung. Aufgrund der relativ kleinen Pulsenergie von wenigen hundert Mikrojoule tritt ein schichtweiser Abtrag der Fasern während des sich wiederholenden Scanprozesses ein. Aufgrund des relativ kleinen Energieeintrags in die Fasern werden verfahrensbedingt die Untersuchungen mit der UKP-Laserstrahlung an zuerst kreisrunden Konturen durchgeführt. Aufgrund der sich ausbildenden schrägen Schnittkante werden neben den Laserprozessparametern Laserleistung (Pulsenergie) und Repetitionsrate auch weitere Verfahrensparameter wie z.B. Scangeschwindigkeit, Schnittspaltbreite und Bahnabstand der Scanbahnen variiert. Weiterhin wird der lineare Pulsüberlapp als implizierter, kombinierter Verfahrensparameter hinsichtlich des Einflusses auf die Ausbildung einer Wärmeeinflusszone und der Konizität untersucht. Bei einer konstanten Fokusslage ist eine sich stetig verjüngende Bohrungsform im Längsschnitt zu erwarten. Weiteres Ziel ist daher die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Bohrungsgeometrie und die prozesstechnische Verkleinerung der Konizität bei gleichzeitiger Vergrößerung der Produktivität durch eine geeignete dynamische Prozessstrategie.

Das übergeordnete Ziel von Schritt 2 ist die Identifikation und Untersuchung relevanter Prozesseinflussgrößen und Mechanismen zur Herstellung von Bohrungen in CFK-Preforms mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung. Dabei soll analog zu Schritt 1 die Wärmeeinflusszone möglichst klein sein und besonders

die Entstehung einer verfestigten Schicht an der Bohrungswand vermieden werden.

Schritt 3:

In Schritt 3 werden die Ergebnisse aus Schritt 1 und 2 auf mehrlagige Preforms mit bis zu 10 bi-axialen Lagen übertragen. Dabei werden die Ergebnisse bezüglich der geometrischen und materialographischen Qualität hinsichtlich der Auswirkung auf die Integration von Inserts in die Bohrungen in das gebohrte Textil und die erzielbare Produktivität verglichen.

Anschließend werden standardisierte Inserts in das Preform eingesetzt und mit einer Epoxidmatrix konsolidiert. Mittels statischer mechanischer Auszugtests wird die maximale Zugkraft bis zum Bruch gemessen. Die Lebensdaueruntersuchung erfolgt mittels einer Untersuchung der Korrosion in einem 72-stündigen Salznebelsprühtest.

Ziel von Schritt 3 ist die Herstellung von Bohrungen mittels lang- und ultrakurz gepulster Laserstrahlung in mehrlagige bi-axiale CFK-Preforms mit großer geometrischer und materialographischer Qualität. Anhand eines Vergleichs von quasistatischen Auszugtests und der Lebensdauer sollen die Vor- und Nachteile der beiden Lasermaterialbearbeitungsverfahren dargestellt werden.

3 Stand der Technik und Forschung

3.1 Herstellungsprozess carbonfaserverstärkter Kunststoffbauteile

Die Produktion eines CFK-Bauteils von der Faserherstellung bis zur fertigen Komponente ist ein relativ langer und bisher sehr energieintensiver Prozess. Ein schematischer Ablauf der Prozesskette von der Faser bis zum Endbauteil ist in Bild 2 dargestellt.

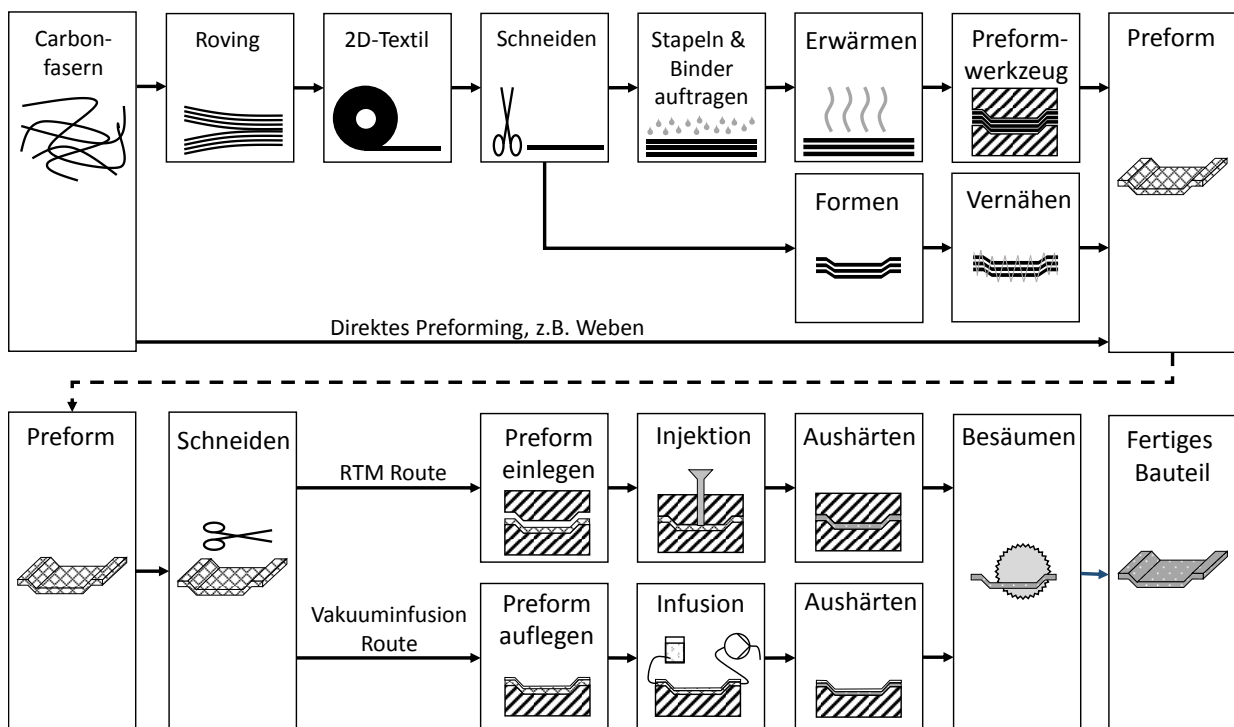


Bild 2: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von CFK-Bauteilen mittels Harzinfusion und -injektionsverfahren, nach [HLC 16]

Durch den Herstellungsprozess werden maßgeblich sowohl die thermophysikalischen Eigenschaften der Kohlenstofffasern als auch die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils beeinflusst. Somit entstehen qualitätsrelevante Einflüsse auf die Materialbearbeitung mittels Laserstrahlung (Laser-Materie-Wechselwirkung) und die daraus folgenden qualitätsrelevanten Phänomene. Damit die während der Materialbearbeitung auftretenden Phänomene besser verstanden werden können, wird im Folgenden der

Produktionsprozess von der Faserherstellung bis zu dem zu bearbeitenden Preform dargestellt.

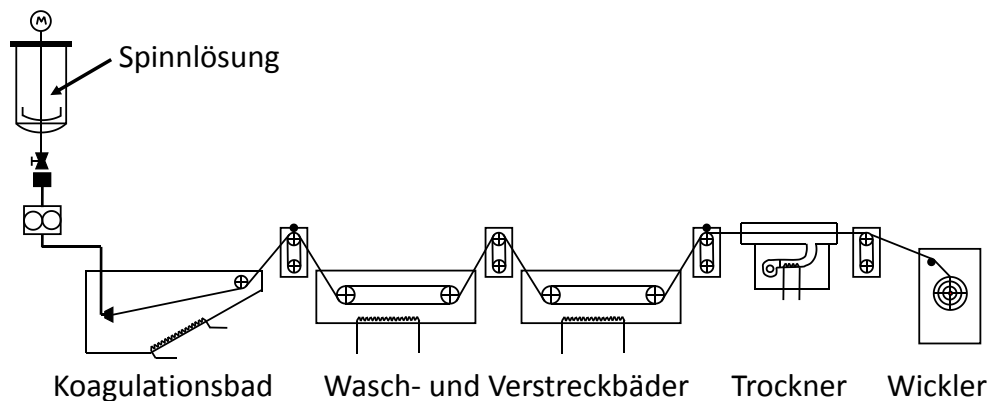
3.1.1 Carbonfaserherstellung

Das Ausgangsmaterial zur Herstellung von industriell genutzten Carbonfasern ist häufig Polyacrylnitril (PAN) oder alternativ Mesophasen-Pech (engl.: pitch) [VDI14]. Der CFK-Markt wird aktuell hauptsächlich von Bauteilen mit Carbonfasern auf PAN-Basis (Marktanteil: 95 %) dominiert. Auf dem Fasermarkt wird PAN mit 86% am häufigsten verwendet, gefolgt von Cellulose mit 11% und Pech mit 3% [Wit14]. Im Folgenden wird daher die Herstellungsrouten von PAN-Fasern dargestellt.

Kohlenstofffasern für Hochleistungs-CFK-Werkstoffe werden aus Vorläuferfasern, den sogenannten Precursoren hergestellt. PAN-Precursoren werden in einem Lösungsmittelspinnprozess erzeugt, da das Polymer PAN nicht schmelzbar ist und daher in einem Lösungsmittel gelöst werden muss.

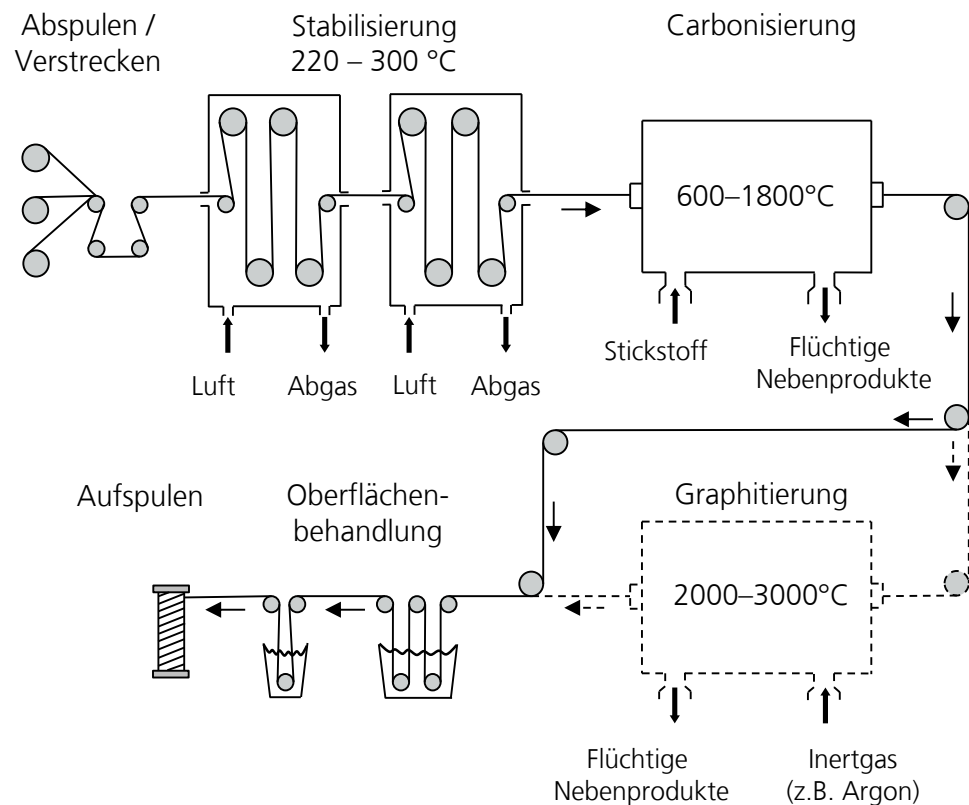
PAN ist ein milchiges, weißes Fluid, welches durch eine Spinnndüse mit einigen zehntausend kleinen Bohrungen in große Koagulationsbäder gesponnen wird. Im Koagulationsbad bilden sich die PAN-Fäden. In anschließenden Wasch- und Verstreckbädern wird das Lösungsmittel aus den Fasern entfernt und die Moleküle und Fibrillen entlang der Faserachse vorausgerichtet. Nach einer abschließenden Trocknung wird die Faser mit einer Präparation versehen und aufgewickelt. Der Lösungsmittelspinnprozess für PAN-Fasern ist schematisch in Bild 3 dargestellt.

Bild 3: Schematische Darstellung des Lösungsmittelspinnprozesses von PAN-Fasern, nach [Wit14]



Nach der Herstellung der Precursoren werden die Vorläuferfasern zu Carbonfasern verarbeitet. Der Herstellungsprozess von den Precursoren zu den Carbonfilamentgarnen ist in Bild 4 dargestellt.

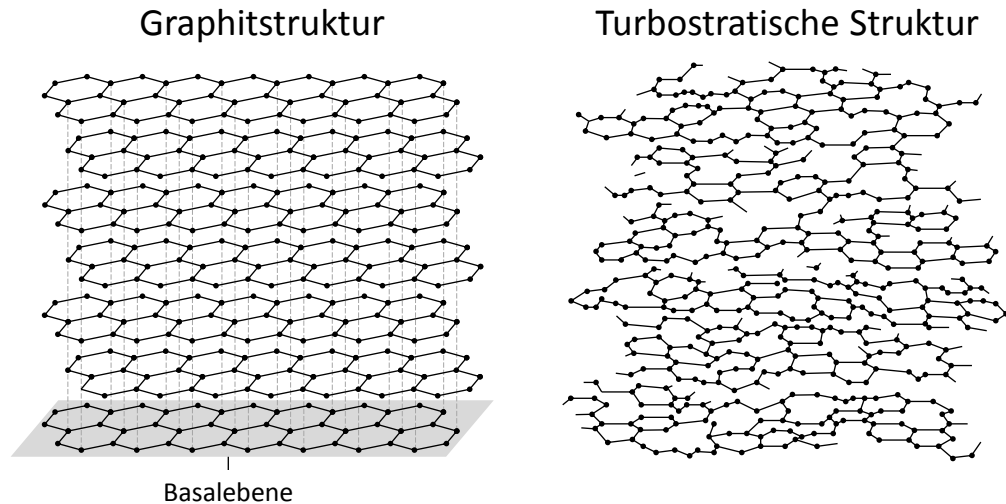
Bild 4: Schematische Darstellung der Prozessschritte zur Herstellung eines Carbon-filamentgarns, nach [Wit14]



Die Precursoren werden abgespult und unter definierter Fadenspannung bei mittleren Temperaturen (220 – 300 °C) stabilisiert (1. Verarbeitungsstufe: Stabilisierung). Dabei muss eine möglichst kleine Aufheizrate verwendet werden, um flüchtige exotherme Reaktionen zu vermeiden. Dies ist erforderlich, um den Precursor so zu stabilisieren, dass bei anschließenden Wärmebehandlungen keine Schmelz- oder Fusionsprozesse mehr aktiviert werden. Anschließend werden die dabei entstehenden Fasern in zwei Stufen carbonisiert (2. Verarbeitungsstufe: Carbonisierung) [Mor05]. Wesentliches Merkmal für die zweite Stufe ist die Vergrößerung des Kohlenstoffgehalts von 60 % auf bis zu 95 % [Che11].

Die Kohlenstoffatome liegen dabei in der Theorie schichtweise in einer Graphitstruktur vor. Dies entspricht aneinander verbundenen Sechsecken wie in einer Wabenstruktur. Eine planare Wabenebene wird Basalebene genannt. In der Realität befinden sich die Ebenen jedoch nicht in einem perfekt geordneten Zustand, sondern zeigen u.A. Irregularitäten bezüglich der Form und Ausrichtung innerhalb einer Ebene, Löcher, Fremdatomeinlagerungen oder Querverbindungen zu anderen Ebenen (Bild 5). Die Struktur entspricht daher eher turbostratischem Kohlenstoff [Fit89] [Pie93].

Bild 5: Schematische Darstellung einer perfekten und einer defektbehafteten (turbostratischen) Graphitstruktur, nach [Mor05] [SG12]



Je nach Faserhersteller liegt der Stickstoffgehalt nach der Carbonisierung in den Carbonfasern bei unter 5 % [Mor05]. Weiteres Ziel der genannten Verfahrensschritte ist die Ausrichtung der Basalebenen in Faserlängsrichtung, um die mechanischen Eigenschaften in dieser Richtung zu maximieren [Che11].

Je nach der zu erzielenden Festigkeitsklasse der Fasern werden Carbonfasern typischerweise in drei Hauptklassen unterteilt (Tabelle 1). Alle Fasern werden dem Stabilisierungs- und Carbonisierungsprozess unterzogen (Bild 4).

Tabelle 1:
Temperaturführung
nach Stabilisierung
verschiedener
Carbonfasertypen

Fasertyp	Festigkeits- klasse	Abkürzung	Temperaturführung (nach Stabilisierung)
Hochfeste Fasern	High Tensile	HT-Type	1200 – 1500 °C
Zwischenmodul- fasern	Intermediate Modulus	IM	1500 – 1800 °C
(Ultra-) Hochmodulfasern	(Ultra) High Modulus	(U)HM	1800 – 3000 °C

Um Fasern mit hohem (HM) oder sehr hohem (UHM) Elastizitätsmodul herzustellen, wird nach der Carbonisierung eine weitere Wärmebehandlung durchgeführt (3. Verarbeitungsstufe: Graphitierung). Hierbei werden die Fasern bei bis zu 3000 °C durch einen Ofen geführt. Dies führt zu einer höheren Orientierung der Graphitkristalle und ermöglicht eine Festigkeit von über 4 GPa entlang der Faserrichtung [Mor05], [Toh16]. Die Carbonisierung und Graphitierung laufen unter Stickstoff- bzw. Argon-Schutzgasatmosphäre ab, um Oxidationen zu verhindern.

Abschließend, vor dem Aufspulen des Faserbündels auf eine Spule, erhalten die Fasern noch eine Oberflächenbehandlung, wodurch die Adhäsionsfähigkeit der Fasern mit der Matrix vergrößert und die Faseroberfläche vor Umwelteinflüssen

geschützt wird. Durch das elektrochemische Auftragen dieser Schlichte werden zudem folgende Faser- und Faser-Matrixeigenschaften maßgeblich beeinflusst [AVK13]:

- Sicherstellung der Kohäsion zwischen den einzelnen Filamenten
- Reduzierung des Reibungskoeffizienten zwischen Faser und Maschinenteilen (z.B. bei Flächenbildung, Führung über Galetten)
- Reduzierung der elektrostatischen Aufladung
- Sicherstellung der Verbindung und Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix
- Beeinflussung der Imprägnierbarkeit

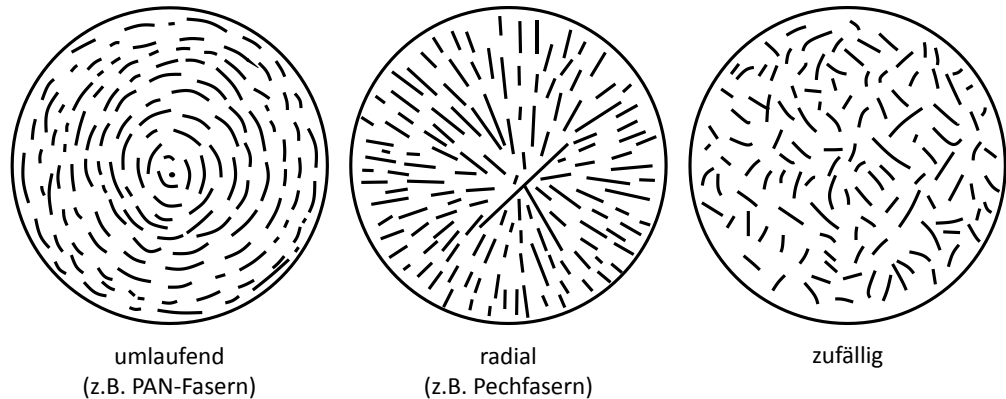
Die Schlichte, auch Sizing genannt, besteht aus einem Mehrkomponentensystem aus Haftvermittlern (z.B. Silanen), Filmbildnern, Gleitmitteln und Antistatika mit niedrigem Molekulargewicht [VFR06] [Wit14]. Die Zusammensetzung der Schlichte variiert je nach Faserhersteller und wird üblicherweise nicht veröffentlicht. Die Art der verwendeten Schlichte hängt jedoch von dem verwendeten Matrixwerkstoff ab.

Nach der Oberflächenfunktionalisierung werden die Einzelfilamente als Endlosfaserbündel (Roving) auf Spulen aufgewickelt. Typischerweise variiert die Anzahl der Filamente in einem Roving zwischen 1000 (1k) und 320000 (320k) [Bha16]. Die z.B. in der Flugzeugindustrie am häufigsten vorkommenden Garngrößen sind 1k bis 24k. Carbonfasern mit 48k oder mehr Filamenten werden heavy-tows genannt [CW14]. Heavy-tows sind kostengünstiger und ermöglichen eine höhere Produktivität bei der Flächenbildung [Fri13]. Der Durchmesser eines einzelnen Filamentes beträgt üblicherweise 3 – 10 µm.

Carbonfasern können neben PAN auch aus Pech hergestellt werden. Aufgrund der Thermoplastizität kann Pech direkt aus der Schmelze versponnen werden. Die Schmelzbarkeit ist dabei von der Schmelztemperatur und der Viskosität der Schmelze abhängig. Gelingt der Spinnprozess und damit die Herstellung eines Precursors auf Pech-Basis, kann danach analog zum PAN-Prozess die Herstellung von Carbonfasern durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass die pechbasierten Fasern empfindlicher und brüchiger als PAN-Fasern sind [Wit14]. Zudem haben die aus Pech hergestellten Carbonfasern mit ca. 99 % einen größeren Kohlenstoffanteil und sind chemisch reiner.

Die Anordnung der graphitartigen Schichten in PAN- und pechbasierten Fasern unterscheidet sich nach dem Verstreckungsprozess. PAN-basierte Carbonfasern weisen vorwiegend umlaufend angeordnete, zwiebelartige Schichten auf, während pechbasierte Fasern vorwiegend radial angeordnete Schichten aufweisen (Bild 6). Weiterhin existieren auch zufällige Anordnungen sowie Mischformen. [Pie93] [KH16] [SFS16]

Bild 6: Anordnung der graphitartigen, turbostratischen Schichten in PAN- und pechbasierten Carbonfasern, nach [KH16]



Die Anordnung der graphitartigen Schichten innerhalb der Carbonfaser kann später eine Erklärung für phänomenologische Ausprägungen der Faserenden an der Bohrungswand von laserbearbeiteten Preforms sein.

3.1.2 Herstellung von Halbzeugen aus Carbonfasern

Als nächstes werden aus den auf Spulen aufgespulten Rovings textile Flächengebilde erzeugt. Typische Verfahren zur Flächenbildung von Halbzeugen aus Endloscarbonfasern sind:

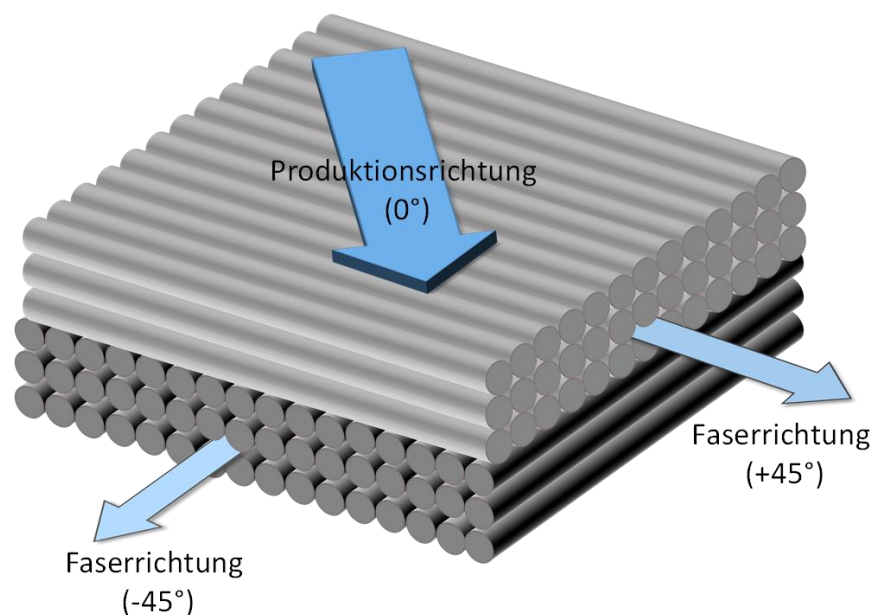
- Ablegen (Multiaxialkettengewirk oder Multiaxialgelege (MAG))
- Weben
- Flechten
- Stickten (Tailored Fiber Placement)

Im Folgenden wird kurz näher auf die Herstellung von Multiaxialkettengewirke bzw. Multiaxialgelegen (engl.: non-crimp fabrics, NCF) eingegangen, da diese häufig für CFK-Bauteile mit bekannten mechanischen Belastungsfällen in Hochleistungsanwendungen wie z.B. der Luft- und Raumfahrt verwendet werden [Har12] [Fri13] [SAE14].

Gelege bzw. Kettengewirke sind textile Flächen aus einem oder mehreren Lagen von parallel verlaufenden Fasern. Die Lagen werden in regelmäßigen Abständen an Kreuzungspunkten der Faserbündel untereinander fixiert. Die Fixierung kann entweder mechanisch über Reibung oder Formschluss, z.B. mittels Wirkfäden, oder adhäsiv, z.B. über ein Bindemittel, realisiert werden. Bei den etablierten Verfahren mittels Wirkfäden und Bindemittel müssen diese dabei an das später infundierte Matrixsystem angepasst sein, da sonst die Infusion der Matrix behindert oder die Benetzung zwischen Matrix und Carbonfasern verschlechtert werden kann. Weiterhin können vor allem während einer Lasermaterialbearbeitung Risse und Blasen in der Matrix durch Verdampfung der Fixierungspartner entstehen.

Je nach Anzahl und Anordnung der einzelnen Lagen in einem Gelege entstehen bei der Ausrichtung sämtlicher Fäden in einer Richtung monoaxiale Gelege oder durch Verdrehung einzelner Lagen multiaxiale Gelege. Zu den Multiaxialgelegen gehören u.A. die häufig in der Industrie vorkommenden bi- und tri-axiale Gelegesysteme, bei denen aus Sicht der Produktionsrichtung in der Textilmaschine bei der Gelegeherstellung die Fadenausrichtungen in zwei bzw. drei unterschiedliche Richtungen weisen [Sch07]. Somit können die anisotropischen Eigenschaften der Carbonfasern im Verbundsystem gezielt ausgenutzt und optimal für die mechanische Beanspruchung des finalen CFK-Bauteils ausgelegt werden. Als Beispiel für ein bi-axiales Gelege sei hier ein $\pm 45^\circ$ -Gelege genannt, bei welchem die Lagen um abwechselnd 45° im und gegen den Uhrzeigersinn aus Sicht der Produktionsrichtung (0°) verdreht sind. Eine schematische Darstellung eines $\pm 45^\circ$ bi-axialen Geleges ist in Bild 7 dargestellt.

Bild 7: Schematische Darstellung einer bi-axialen Lage eines $\pm 45^\circ$ Geleges



Werden mehrere multiaxiale Gelege übereinander gestapelt, um die Gesamtdicke und somit auch die Stabilität des später mit Matrix infundierten Bauteils zu vergrößern, spricht man von stacking. Um Missverständnisse zu vermeiden, sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Folgenden mit *Anzahl Lagen* die Anzahl gestapelter multiaxialer Gelegelagen gemeint ist. Ein z.B. fünfflagiges Preform besteht somit aus fünf bi-axialen Lagen. Weiter heruntergebrochen bedeutet dies, dass das Preform aus zehn Einzelschichten besteht.

Um die einzelnen unidirektionalen oder multiaxialen Gelege beim Stacking zu verbinden, können die Lagen formschlüssig vernäht, kraftschlüssig getuftet oder adhäsiv z.B. mittels Binder zusammengefügt werden [GK07]. Bereits vor oder nach Aushärten des Binders können die textilen Flächen vereinzelt oder auf die

Geometrie des finalen Bauteils vorgeschnitten werden. Die gängigsten Produktionsmittel zum Trennen von carbonfaserbasierten Textilien sind Scheren, Rollmesser, Stanzeisen, oszillierende oder ultraschallangeregte Schneiden sowie Laserstrahlung. In Kapitel 3.1.4 werden die Vor- und Nachteile der genannten Verfahren erläutert.

Das textile, endkonturnahe Gelegehalbzeug ist das Preform (Vorformling). Dieses kann vor der weiteren Verarbeitung noch dreidimensional umgeformt werden. In der klassischen Produktionskette für CFK-Bauteile würde das ggf. 3D-umgeformte Preform nun mit einem Matrixsystem z.B. mittels Vakuuminfusion oder Harzinjektion (RTM) infundiert und nach der Aushärtung (Konsolidierung) endbearbeitet werden.

3.1.3 Integration von Krafteinleitungselementen

Damit fertig konsolidierte CFK-Bauteile in der Anwendung mechanische Kräfte übertragen können, müssen sie häufig mit einer Grundstruktur, z.B. einer Automobilkarosserie oder Flugzeughülle, verbunden werden. Dazu ist stets eine Krafteinleitung erforderlich, die sich in eine oder mehrere der vier Verbindungstypen unterteilen lässt [Ber92]:

- kraftschlüssig (z.B. klemmen)
- formschlüssig (z.B. bolzen)
- stoffschlüssig (z.B. schweißen)
- adhäsiv (z.B. kleben)

Durch das Einschneiden eines Gewindes in die carbonfaserverstärkte Matrix können keine großen Belastungen aufgenommen werden. Die Kräfte und Momente werden in diesem Fall hauptsächlich von, der im Vergleich zu den Carbonfasern, relativ schwachen Matrix aufgenommen. Durch metallische Schrauben werden die Gewindegänge zudem bereits bei wenigen Befestigungs- und Löseprozessen sehr schnell abgenutzt.

Daher werden nach aktuellem Stand der Technik vorwiegend zwei Arten von Krafteinleitungselementen eingesetzt. Zum einen können z.B. mittels Bohrer, Fräser oder abrasiven Wasserstrahl Bohrungen in das ausgehärtete Bauteil eingebracht werden, in welche nachträglich mittels Kleben metallische Gewindeeinlege-teile, sogenannte Inserts, eingeklebt werden. Die oben genannten Werkzeuge führen in dem Fall jedoch einerseits zu Störungen des Kraftflusses im Endbauteil durch die lokale Trennung von lastübertragenden Fasern, zum anderen können durch die mechanisch kontaktbehaftete Bearbeitung eine Vielzahl von materialographischen Defekten in das Laminat eingebracht werden, die nach aktuellem Stand der Technik zu entweder sehr zeit- und kostenintensiven Reparaturmaßnahmen, wie z.B. einem Laminatneuaufbau, oder zu einem Ausschuss des nahezu fertigen Bauteils führen [IKA15].

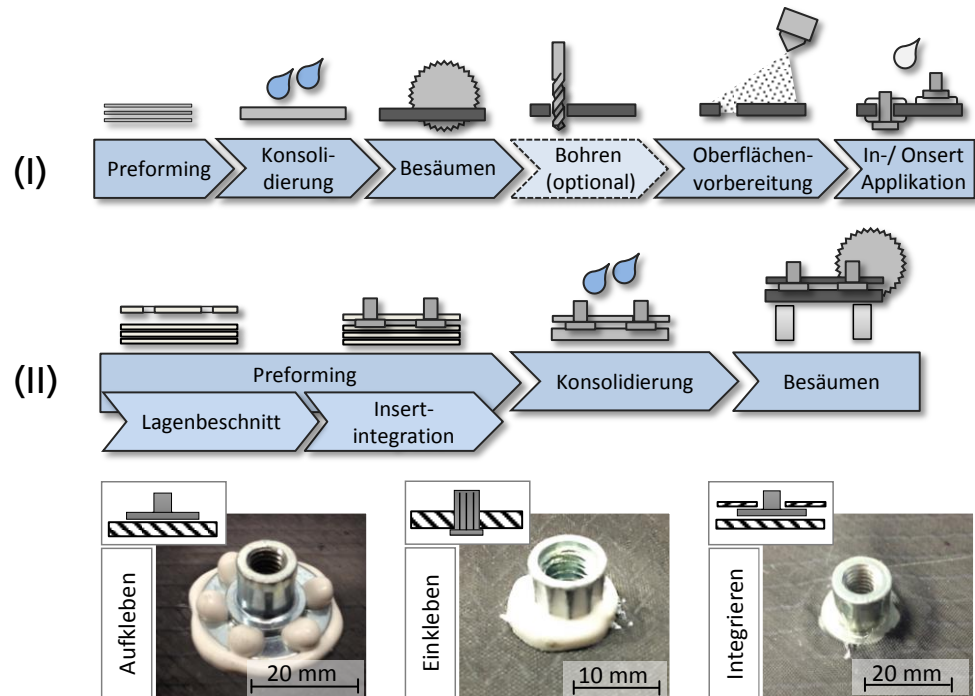
Weiterhin ist die konventionelle Bearbeitung beim mechanischen Bohren oder Fräsen mit einem hohen Werkzeugverschleiß verbunden [LTC12]. Als Schneidstoffe kommen daher Feinstkornhartmetalle, polykristalline Diamanten oder diamantbeschichtete Werkzeuge mit spezieller Schneidgeometrie zum Einsatz, um die Werkzeugstandzeit zu vergrößern [KK08]. Neben den erhöhten Gefahren von materialographischen Defekten ist die konventionelle Bearbeitung von konsolidierten CFK-Bauteilen mit hohen Werkzeugkosten und in der Serienfertigung gegebenenfalls längeren Produktionszeiten durch häufigen Werkzeugwechsel verbunden, was sich in der deutlichen Vergrößerung der Schneidkraft bei der kontinuierlichen Abnutzung der Werkzeugschneiden widerspiegelt [HXH13]. Durch laserunterstütztes Vorritzen (Laser-Scored-Machining) können Delaminationen minimiert werden, dennoch ist weiterhin ein mechanischer Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug vorhanden [HCG16].

Bei Verwendung einer thermoplastischen Matrix kann das thermische Dornen eingesetzt werden. Während der Konsolidierung wird die Matrix von einem mechanisch eingebrachten Dorn verdrängt und eine Öffnung entsteht, in welche ein Insert eingeklebt werden kann [Lei06]. Vorteil ist eine faser- und kraftflussgerechte Auslegung der lochartigen Öffnung, da keine Fasern getrennt werden. Nachteilig sind die Anwendungsbeschränkung auf thermoplastische Matrixwerkstoffe und eine lokale Belastungsschwächungen durch in Faser-richtung direkt vor und hinter größeren Öffnungen entzweigte Fasern. In den Bereichen der Faserstrangtrennung liegt primär Matrixwerkstoff vor.

Durch Vibrationsbohren können die Bohrgeschwindigkeit und die Werkzeugstandzeit vergrößert werden. Dabei wird dem Bohrwerkzeug eine Schwingung mit einer Frequenz von 12 - 125 Hz in Achsrichtung überlagert. Die erforderliche Schwingungsamplitude hängt von der Spangeometrie ab. Diese Technik wird besonders bei CFK-Metall-Hybridwerkstoffen angewandt. Nachteilig ist die aufwendigere Werkzeug- und Anlagentechnik. [MAV16] [PPK16] [VDI16]

Eine andere und nicht invasive Möglichkeit ist das Aufkleben einer Gewindehülse mit einem vergrößerten Bodenteller (Onsert) auf die Bauteiloberfläche. Besonders die dazu erforderliche Oberflächenvorbereitung zum Aufkleben ist mit zahlreichen Prozessschritten über Reinigen, Anrauen, Plasmaaktivierung, Applizierung des Klebstoffs und Onserts und dem abschließenden Setzvorgang verbunden. Fehlerquellen sind hierbei Schwächungen der Klebefläche durch unzureichende Entfernung von z.B. öligen Schichten und Partikeln oder Lufteinschlüssen im Klebstoff bei der Applikation. Zwei Anschauungsbeispiele von In- und Onserts und die jeweils zugehörigen Applikationsprozessschritte sind schematisch in Bild 8 dargestellt.

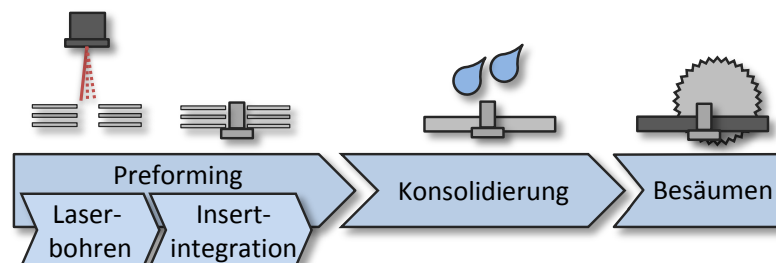
Bild 8: Schematische Darstellungen der Prozessschritte zur Applikation von In- und Onserts in konsolidierte CFK-Bauteile



Allen in diesem Kapitel beschriebenen Prozessen gemein ist die Kraftübertragung von außen in das CFK-Bauteil über mehrere Schnittstellen. Somit hängen die maximal zu übertragenden Kräfte und Momente von der Qualität der Verbindung zwischen Krafteinleitungselement und Klebstoff, des Klebstoffs selbst und zwischen Klebstoff und CFK-Bauteil ab. Mittels Ausreißversuchen kann gezeigt werden, dass die Versagensstelle bei eingeklebten Inserts oder aufgeklebten Onserts hauptsächlich im Klebstoff zu finden ist. Entweder reißt die Verbindung zum CFK-Bauteil bzw. zum Krafteinleitungselement ab oder der Klebstoff bricht.

Vorteilhaft ist daher, den Klebeprozess gänzlich zu vermeiden und den duroplastischen Matrixwerkstoff als Klebpartner zu nutzen (Bild 9).

Bild 9: Schematische Darstellung der CFK-Prozesskette mit vorgelagertem Laserstrahlbohrprozess



Dazu ist jedoch erforderlich, dass die Applizierung von Inserts vor der Konsolidierung stattfindet. Daraus folgt wiederum, dass die Einbringung einer

Bohrung für den metallischen Insert bereits in das noch nicht mit Matrix getränkte Textil erforderlich ist. Für das Einbringen von Bohrungen in textile Preforms existieren mehrere Fertigungsverfahren.

3.1.4 Trennverfahren für textile Preforms

Durch die Einbringung von Funktionselementen bereits im Preform, kann je nach geometrischer Ausführung der Bohrung und des Inserts eine form- und stoffschlüssige Verbindung beim Matrixinfusionsprozess realisiert werden. Nach aktuellem Stand der Technik bekannte und in der Industrie verwendete Verfahren zur Einbringung von Bohrungen in trockene Preforms mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen sind in Bild 10 dargestellt.

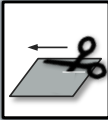
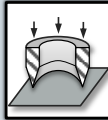
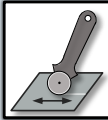
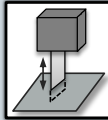
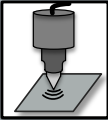
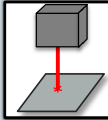
	Schere	Stanzeisen	Rollmesser	Oszillierende Schneide	Ultraschall angeregte Schneide	Laser
						
+	Kosten Verfügbarkeit	Kosten Geschwindigkeit	Kosten Verfügbarkeit Geschwindigkeit	Kosten Geschwindigkeit	Flexibilität Schnittqualität	Kontaktlos, kein mech. Verschleiß Hochaufgelöste Geometriefreiheit
-	Mech. Kontakt Verschleiß Präzision 3D Fähigkeit Geschwindigkeit	Mech. Kontakt Verschleiß Flexibilität 3D Fähigkeit	Mech. Kontakt Verschleiß Flexibilität 2D/3D Fähigkeit	Mech. Kontakt Verschleiß Begrenzte Flexibilität 3D Fähigkeit	Mech. Kontakt Verschleiß 3D Fähigkeit	Wärmeeinbringung Investitionskosten

Bild 10: Übersicht der gängigsten Produktionsmittel zum Trennen von Carbonfaser-Preforms

Besonders in der Fertigung von Flugzeugstrukturen und -komponenten sind viele Arbeitsschritte mit manuellen Prozessen verbunden [VDI14]. Zu den vorwiegend manuellen Trennverfahren gehören das Trennen mittels Schere und Rollmesser. Das Stanzen und Schneiden mittels oszillierender oder ultraschallangeregter Schneide können gut automatisiert werden. All diesen Werkzeugen gemein ist ein Trennvorgang durch mechanische Krafteinleitung in die textile Struktur. Dies hat zur Folge, dass besonders bei mehrlagigen Preforms die Faserorientierungen an der Schnittkante gestört werden. Weiterhin können einzelne Lagen verrutschen oder verdrehen. Die günstigsten Voraussetzungen für den Einsatz dieser Werkzeuge sind einlagige Textilien mit ausreichender Fixierung in der Bearbeitungsebene. Weiterhin sind die Präzision und die Konturauflösung von Bohrungen in textile Preforms mit den klassischen mechanischen Verfahren aufgrund der relativ großen Werkzeuggröße begrenzt. Bohrungen mit z.B. wenigen Millimetern Durchmesser sind nur für wenige oder einzelne textile Lagen möglich. Scharfe oder feinaufgelöste Ecken sind bei geschlossenen Schnittkonturen in der textilen Fläche nur mit großen Aufwand bei kleiner Lagenanzahl durch spezielle Stanzeisen realisierbar.

Durch den Einsatz von Laserstrahlung ist eine auf das Textil bezogene mechanisch kraftlose Bearbeitung möglich, wodurch gleichzeitig der Werkzeugverschleiß weitestgehend entfällt. Auch die Herstellung scharfer Ecken oder feinaufgelöster geometrischer Formen mit Radien kleiner 0,5 mm sind möglich.

Nachteile der Laserbearbeitung sowohl an einem trockenen Textil als auch am konsolidierten Bauteil sind die hohe Einbringung thermischer Energie und eine erforderliche Prozesskapselung zum Schutz vor Laserstrahlung und Prozess-emissionen. Die bei der Laserbearbeitung entstehenden Dämpfe und Partikel aus dem Carbonfasertextil müssen so abgeführt werden, dass sowohl mechanische Anlagen und elektrische Geräte als auch Anlagenbediener keiner Gefahr ausgesetzt sind. Die bei der Preformbearbeitung mittels Laserstrahlung frei werdenden Carbonfaserpartikel können durch die starke Oxidation einen aerodynamischen Durchmesser von $<10\text{ }\mu\text{m}$ unterschreiten und zählen somit nach DIN EN 481 zum A-Staub [DIN93] [KK08] [Brü14]. Dieser kann über die Atemwege in die Bronchien und dort über die Alveolen in den Blutkreislauf gelangen [Ker13]. Aufgrund der hohen Abrasivität von Carbonfasern und -partikeln können weiterhin im bewegten mechanischen Eingriff befindliche Körper wie z.B. Achsspindeln, Zahnräder oder Robotergelenke vorzeitig verschleifen. Hinzu kommt, dass Carbonfasern elektrische Leiter sind, wodurch die Gefahr von Spannungsüberschlägen oder Kurzschlüssen in elektrisch leitenden Geräten steigt [LQ16]. Sensible Anlagen und Geräte werden daher bei der Bearbeitung und dem Handling von Carbonfasertextilien mit einem Überdruck beaufschlagt oder vor dem Eindringen von Fremdkörpern hermetisch versiegelt [MK16].

3.2 Schädigungsformen bei der Bearbeitung konsolidierter CFK-Bauteile

Nach aktuellem Stand der Technik und Forschung wird die Lasermaterialbearbeitung vorwiegend bei bereits konsolidierten CFK-Bauteilen eingesetzt oder untersucht [WFK12], [Pho14], [Tin16]. Primäres Ziel ist die Substitution von mechanisch krafteinleitenden Werkzeugen wie Bohrer und Fräser durch Laserstrahlung. Häufig auftretende Defekte, die durch die mechanische Materialbearbeitung induziert werden, sollen somit vermieden oder signifikant verkleinert werden. Zu den durch die mechanische Bearbeitung induzierten Defekten bei konsolidierten CFK-Bauteilen zählen am häufigsten [HT03] [EFM12] [LTC12]:

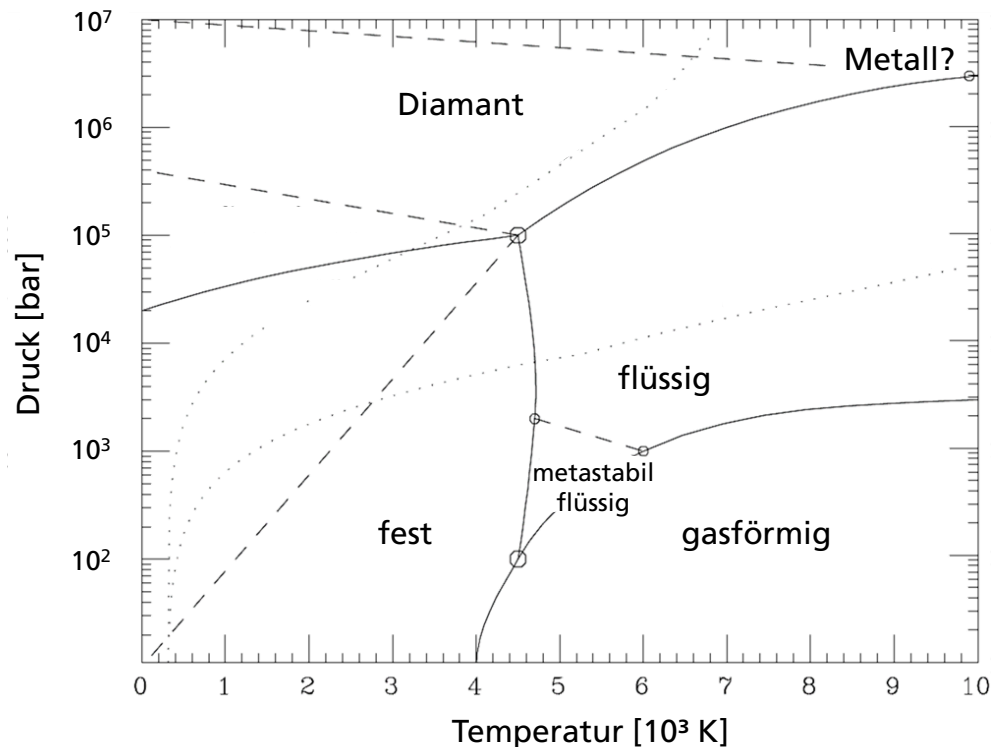
- Faserbrüche
- Matrixbrüche und -degradation
- Delaminationen
- Ausfransungen am Bohrungseingang und -ausgang

Die Schneiden von z.B. Bohr-, Säge- oder Fräswerkzeugen leiten bei der Spannerzeugung je nach Eingriffswinkel und Drehrichtung Druck- oder Zugkräfte

in die Fasern und Matrix ein [KK08]. Dadurch ändern sich je nach Faserorientierung die Oberfläche der geschnittenen Kante und die Abtragspartikelform. Da die Matrix den isotropen Partner des hybriden Verbundes darstellt, können Mikro- und Makrorisse ausgehend von der Trennzone entstehen. Bei mechanischer Belastung können sich die Risse durch die Matrix fortpflanzen. Durch die Kombination aus verschiedenen orientierten Faserkräften beim Trennen und der durch das Werkzeug eingebrachten Schwingungen in die Matrix können weiterhin lokale oder großflächige Delaminationen einzelner oder mehrerer Schichten auftreten. An Bohrungseintritten und -austritten überlastete oder nicht vollständig getrennte Fasern und Matrix führen zu Ausbrüchen bzw. Ausfransungen. Neben dem Bohren, Fräsen und Sägen hat sich das Wasserstrahlschneiden von CFK-Bauteilen etabliert. Durch die Abrasionspartikel des mit mehreren tausend bar Druck beaufschlagten Wasserstrahls, können sehr glatte Schneidkanten entstehen [Moe11] [ASA13]. Ein Hauptnachteil dieses Verfahrens für die Erzeugung von Bohrungen ist die Erfordernis einer Startbohrung, um oberflächennahe Abplatzungen zu vermeiden, wodurch wieder auf eines der oben genannten Verfahren zurückgegriffen werden muss.

Durch Einsatz von Laserstrahlung können alle mechanisch induzierten Defekte vermieden werden. Die Nachteile der Laserbearbeitung sind primär durch die sehr unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften der Carbonfasern und der Matrix begründet. Damit ein vollständiges Penetrieren des Werkstoffs mittels Laserstrahlung möglich ist, müssen sowohl die Schmelz- oder Verdampfungstemperatur der Matrix als auch die der Carbonfasern überschritten werden. Typische Schmelztemperaturen duroplastischer Matrixwerkstoffe liegen im Bereich weniger Hundert Grad Celsius. Kohlenstoff hingegen sublimiert bei einem Umgebungsdruck von 1 bar bei ca. 4000 °C [Zaz97]. Eine schmelzförmige Phase liegt nur oberhalb des Tripelpunktes ab ca. 4500 °C und mindestens 100 bar Druck vor. Das Phasendiagramm für Kohlenstoff ist in Bild 11 dargestellt.

Bild 11:
Phasendiagramm
von Kohlenstoff,
nach [Zaz97]



Die durch die Laserstrahlung erforderliche Energie, um die Carbonfasern zu trennen, führt bei Verwendung von kontinuierlicher oder langgepulster Laserstrahlung zu einem Rückbrand des Matrixwerkstoffs an der Bohrungswand. Bei einem erhöhten Energieeintrag ohne Einhaltung von Pausen kann sich der Werkstoff entzünden. Durch die signifikant verschiedenen Temperaturunterschiede in der Phasenumwandlung als auch die unterschiedliche Wärmeleitung und -kapazität von Matrix und Faser können Faserenden aus der Bohrungswand in die Bohrung hineinragen. Durch die bürstenartigen Faserenden kann die Korrosionsbeschichtung der Inserts verletzt werden, wodurch die Lebensdauer des Kraftübertragungselementes in dem CFK-Metallverbund verkleinert wird.

Der zeitliche Energieeintrag ist somit ein wichtiger Faktor für die geometrisch und materialographisch qualitativ hochwertige Materialbearbeitung von konsolidierten CFK-Bauteilen. Neuere Prozessstrategien mit Einsatz von Laserstrahlung für konsolidierte CFK-Bauteile nutzen ultrakurz gepulste Laserstrahlquellen mit mittleren Leistungen von mehr als 100 W und Pulsenergien von mehreren hundert Mikrojoule bis Millijoule [JGO16] [Fre17]. Bei den Scanstrategien werden überhöhte Wärmeeinträge in das hybride Bauteil vermieden, indem entweder Prozesspausen eingefügt oder Randbereiche der Konturen mit so kleiner Energie bearbeitet werden, dass ein Wärmeübergang während der anschließenden Bearbeitung aus dem Kernbereich der Bohrung in die Umgebung

unterbunden wird. Innerhalb der Bohrungskontur kann daraufhin die Abtragrate mittels Defokussierung maximiert werden [ZFW15]. Durch Anwendung dieser verfahrenstechnisch angepassten Strategien wird die Wärmeeinflusszone verkleinert und die Gefahr der Entzündung der Matrix unterbunden.

Die Schadensphänomene und deren Entstehungs- und Wirkmechanismen bei der Lasermaterialbearbeitung von Preforms auf Carbonfaserbasis sind bisher noch nicht ausreichend repräsentativ untersucht worden. Bisher beobachtet wurde die Entstehung einer schmelzartigen Schicht auf den Faserenden an der Bohrungswand beim Laserstrahlschneiden und -bohren mit hoher Intensität bzw. im Bereich einiger Joule Pulsenergie bei langgepulster Laserstrahlung. Die bisherigen Ergebnisse beschreiben einerseits die wattestäbchenartige Aufdickung der Faserenden an der Trennwand als auch die Verknüpfung des Rückbrandes der Wirkfäden bei Gelegen mit dem Verdampfen der Schlichte auf Faserbereichen nahe der Trennzone. [VFR06] [Pri15], [VFR06] [JGO16]

Fazit

Sämtliche Verfahren zum Trennen von CFK-Bauteilen, mit denen mechanische Kräfte z.B. zur Spanerzeugung in das Bauteil eingeleitet werden, können in großem Umfang Defekte hervorbringen. Auch laserbasierte Verfahren führen bei konsolidierten Bauteilen zu Matrixschädigungen, die an den kraftübertragenden Funktionsflächen bei Bohrungen vermieden werden müssen. Vorteilhafter ist die Materialbearbeitung mit nur einer Werkstoffkomponente: dem Textil aus Carbonfasern. In einem anschließenden Prozessschritt wird dann der Matrixwerkstoff hinzugefügt. Im Sinne der Prozesskette zur Herstellung von CFK-Bauteilen muss der Bohrprozess zur Applizierung von Krafteinleitungselementen der Matrixinfusion oder -injektion vorgelagert werden.

Um den Lagenaufbau und die Faserrichtungen nicht unnötig zu verändern oder zu stören, muss ein mechanisch kraftloser Trenn- oder Abtragprozess realisiert werden. Besonders im Falle von Carbonfaserpreforms mit mehreren Lagen bzw. mehreren Millimetern Dicke scheiden alle Verfahren zum Textilschneiden wie z.B. das Stanzen, Scher- oder Rollschneiden und Trennen durch mechanisch angeregte Klingen aus. Der Einsatz von Laserstrahlung bietet daher ein großes Potenzial zur präzisen und minimal defektbehafteten Einbringung von Bohrungen in Carbonfaserpreforms. Ein derartiger Prozess soll in dieser Arbeit in seinen Grundlagen untersucht und entwickelt werden.

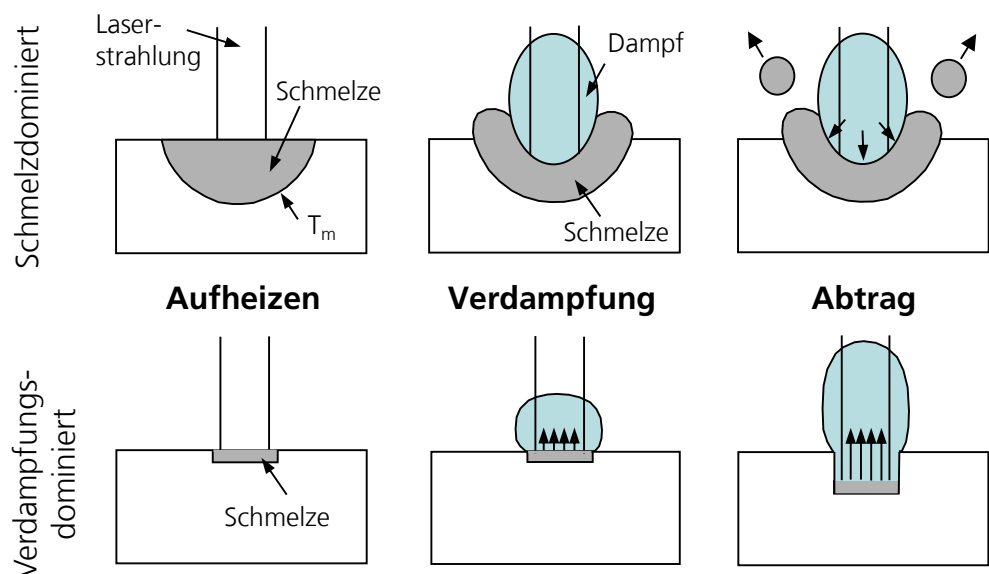
3.3 Einbringung von Bohrungen mittels langgepulster Faserlaserstrahlung

3.3.1 Grundlagen

Das Bohren mittels Laserstrahlung ist nach DIN 8590 der Untergruppe 3.4.1.5.2 (Thermisches Abtragen mit Laserstrahl) zuzuordnen [DIN03]. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch der im wissenschaftlich-technischen Sprachgebrauch verbreitete Begriff Laserstrahl-Bohren verwendet. Im Folgenden werden die relevanten Grundlagen für das Laserstrahl-Bohren von carbonfaserbasierten Preforms vorgestellt.

Bei der Laser-Materie-Wechselwirkung wird die Laserstrahlung durch die Erregung freier Elektronen im Atomgitter, z.B. Kohlenstoffgitter, nach dem Prinzip der inversen Bremsstrahlung absorbiert. Durch Elektron-Elektron-Stöße thermalisiert das Elektronensystem innerhalb einiger Hundert Femtosekunden. Die Elektronen transferieren die Energie durch Elektron-Phonon-Wechselwirkung an das Kohlenstoffgitter. Die Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit τ_{ep} liegt bei Graphit in der Größenordnung von einigen Hundert Femtosekunden bis zu einer Pikosekunde [JSG04]. Mit einem ausreichend großen Energieübertrag sind die induzierte Gitterschwingungen so groß, dass ein Materialabtrag stattfinden kann. Der Abtragprozess ist unter anderem von der Pulsdauer der verwendeten Laserstrahlung abhängig [Pop05]. Mit aktuellen, gepulsten Faserlaserstrahlquellen können Pulse mit Pulsdauern von einigen hundert Mikro- bis Millisekunden mit Intensitäten von ca. 10^9 W/cm^2 emittiert werden. Durch den großen Absorptionsgrad der Kohlenstofffasern (s. Kapitel 4.2, S.39) herrschen bei ausreichender Pulsenergie so hohe Temperaturen in der Wechselwirkungszone, dass die Kohlenstofffasern sublimieren. Der Abtragmechanismus ist für Umgebungsdrücke $< 100 \text{ bar}$ daher verdampfungsdominiert (Bild 12).

Bild 12: Schmelz- und verdampfungsdominierte Abtragarten, nach [Pop05]



Aufgrund der Wärmeleitung wird der Bereich um die Trennzone thermisch beeinflusst, wodurch sich z.B. in einem bi-axialen Carbonfasergelege die Wirkfäden mit einer Schmelztemperatur von wenigen hundert Grad Celsius auflösen können. Die thermische Eindringtiefe

3.1
[Pop05]

$$\delta_{th} = 2 \sqrt{\frac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \rho}} = 2\sqrt{\kappa \cdot t}$$

ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit λ bzw. der Temperaturleitfähigkeit κ , der Einwirkdauer t , der spez. Wärmekapazität c_p und der Dichte ρ . Bei anisotropen Werkstoffen ist δ_{th} entlang ($\delta_{th,\parallel}$) und quer ($\delta_{th,\perp}$) zur Faserrichtung verschieden. Während eines Pulses entspricht die Einwirkdauer t der Pulsdauer t_p . Die Wärmeleitfähigkeit für unidirektionale Fasern entlang der Faserachse ($\lambda_{\parallel}$) ist typischerweise zehnmal größer, kann aber bis zu 150 mal größer als quer zur Faser ($\lambda_{\perp}$) sein. Innerhalb eines bi-axialen Geleges mit einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$ sind $\lambda_{\parallel}$ und $\lambda_{\perp}$ wiederum nahezu gleich. [KN15]

3.3.2 Materialbearbeitung mittels langgepulster Laserstrahlung

Bisher ist nur eine relativ kleine Anzahl wissenschaftlicher Ansätze zur Lasermaterialbearbeitung von trockenen Preforms aus Carbonfasern diskutiert und veröffentlicht worden [VFR06] [HM11] [FST13] [MSW13] [Pri15], [JGO16], [VFR06], [MSW13], [FST13], [HM11] [JGO16]. Die Lasermaterialbearbeitung konsolidierter CFK-Bauteile wird hingegen mehrfach diskutiert und ist Gegenstand zahlreicher öffentlicher Forschungsvorhaben zum Thema Leichtbau mit faserverstärkten Kunststoffen in Deutschland [LZH13] [FR15] [Onu15], [FR15].

Fuchs und Zäh beschreiben bei Verwendung einer cw-Laserstrahlquelle, dass die Verwendung eines Schutzgases keinen wesentlichen Einfluss auf die Schnittgeschwindigkeit hat. Erklärt wird dies durch den entstehenden Dampfdruck bei der Vaporisierung des Kohlenstoffs durch die Laserstrahlung, der die Aerosole ausreichend aus der Schnittfuge austreibt. Lediglich bei Verwendung einer relativ geringen Laserleistung von 1 – 2 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit < 4 m/min konnte ein Einfluss des Schutzgases auf die Ausbreitung der Wärmeeinflusszone beobachtet werden. Bei Versuchen mit Laserleistungen von bis zu 4 kW und Vorschubgeschwindigkeiten bis 12m/min wurde kein wesentlicher Einfluss nachgewiesen. Dies wird mit der relativ kleinen Verweildauer der Strahldüse an einem Ort und der damit kurzen Einwirkzeit von sowohl Laserstrahlung als auch konvektivem Gasstrom begründet. Bei Drücken über 0,5 bar wird darüber hinaus die Kantenqualität durch ausfransende Fasern verschlechtert. Zudem ist bei mehrlagigen CFK-Preforms die WEZ in der Mitte durch die fehlende Konvektionskühlung in der Mitte des Geleges am größten [FZ14].

Voisey, Fouquet et al. sowie Prieß untersuchten das Phänomen, dass bei der Laserbearbeitung von CFK-Preforms die einzelnen Fasern an der Schnittkante aufquellen und der Durchmesser um bis zu 60 % vergrößert wird [VFR06], [Pri15]. Die Annahme dafür sind hohe Gasdrücke durch Verunreinigungen im Inneren der Faser durch, im Vergleich zum Kohlenstoff, vorzeitige Vaporisierung bei der kurzen, aber hohen Erwärmung der Fasern über deren Sublimationstemperatur von ca. 4000 K. Dadurch werden die Verunreinigungen aus der Kohlenstofffaser gedrückt und führen zu einer aufgequollene Struktur [VFR06].

Die Ausbreitung und Größe der WEZ hängt neben der Laserleistung auch mit der Verweilzeit der Strahlung an einem Ort zusammen [HM11] [FZ14], [HM11]. Unterstützt wird dies durch Untersuchungen zur Wärmeakkumulation [WGB14].

Fuchs stellt darüber hinaus auch fest, dass aktuell keine einheitliche und standardisierte Methode zur Ermittlung der Ausbreitung der WEZ für Preforms definiert ist. Die verwendeten Qualitätsmerkmale zur Analyse des Schnittes haben ihren Fokus auf den Eigenschaften, die zur Erfüllung der Bauteilfunktion und des Produktionsprozesses erforderlich sind. Dazu zählen die thermische Schädigung der Faseroberfläche sowie der Schlichte [FZ14]. Die Oberflächenschädigung kann dabei Einfluss auf die nachfolgenden Prozesse haben, da die Haftung zwischen den Fasern und der injizierten Matrix reduziert wird. Außerdem entfällt die Schutzfunktion der Fasern, die bei der Oberflächenbehandlung im Faserherstellungsprozess erzielt wurde [Che11]. Da der Rückbrand der Schlichte nur durch zeitlich aufwendige Verfahren auswertbar ist, wird analog der Rückbrand der Wirkfäden als Auswertehilfe verwendet [FZ14]. Dies gilt, da die aus Polyethersulfon (PES) bestehenden Wirkfäden mit $T_{PES} \approx 225 \text{ °C}$ eine ähnliche Zersetzungstemperatur wie die Schlichte ($T_{Schlichte} \approx 250 \text{ °C}$) hat [Che11] [Ker18]. Ebenfalls in dieser Größenordnung ist die Temperatur, ab der die Festigkeit der Fasern durch Oxideffekte verringert wird ($T_{Oxidation} \approx 300 \text{ °C}$) [Che11]. Folglich ist die Messung der Rückbrandweite der Wirkfäden eine einfache und schnell durchführbare Methode, um die Ausbreitung der Wärmeeinflusszone zu bestimmen. Darüber hinaus verlieren die Fasern bei Rückbrand des Wirkfadens ihre Stabilität im Gelege. Bei der Verwendung von Prozessgasen oder Absaugungen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten besteht die Gefahr der Umordnung der Fasern, sodass wiederum die mechanischen Eigenschaften des Geleges im konsolidierten Zustand nachteilig verändert werden.

Für die Erzeugung eines kontinuierlichen Schnittes mit bewegter, gepulster Laserstrahlung ist ein positiver Pulsüberlapp erforderlich. Dieser gibt an, zu welchem Anteil zwei aufeinanderfolgende Pulse eindimensional überlappen. Bei einem maximalen Pulsüberlapp von 100% wird die Laserstrahlung nicht bewegt, sondern bestrahlt fortlaufend die gleiche Stelle (Perkussionsbohren).

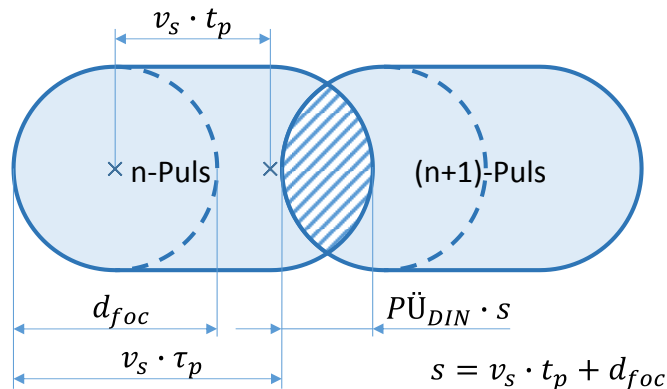
Bei Werten kleiner 0% findet kein Überlapp statt (z.B. On-the-Fly Bohren). Definiert ist der lineare Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{DIN}$ nach DIN 32540 durch

3.2
nach [DIN12]

$$P\ddot{U}_{DIN} = 1 - \frac{v_s \cdot \tau_p}{d_{foc} + v_s \cdot \tau_p}$$

mit der Vorschubgeschwindigkeit v_s , Pulsperiodendauer τ_p , dem Fokussdurchmesser d_{foc} und der Pulsdauer t_p . Die Pulsperiodendauer τ_p entspricht dem Kehrwert der Repetitionsrate f der Laserstrahlquelle. Bei ausreichend langen Pulsdauern und großen Scangeschwindigkeiten muss der Einfluss der bewegten Projektion des Pulses ($v_s \cdot t_p$, Langlocheffekt) beachtet werden. In Bild 13 ist das Prinzip des Pulsüberlapp schematisch dargestellt.

Bild 13:
Schematische
Darstellung des
linearen
Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{DIN}$
bei langgepulster
Laserstrahlung



Weiterhin ist die Streckenenergie eine relevante Einflussgröße. Die Streckenenergie E_s gibt die pro Wegstrecke eingebrachte Energie in das Werkstück an. Diese wird mit

3.3

$$E_s = \frac{\bar{P}}{v_s} = \frac{\hat{P} \cdot f \cdot t_p}{v_s}$$

berechnet. Dabei entspricht $\bar{P}$ der mittleren Leistung und $\hat{P}$ der Pulsspitzenleistung.

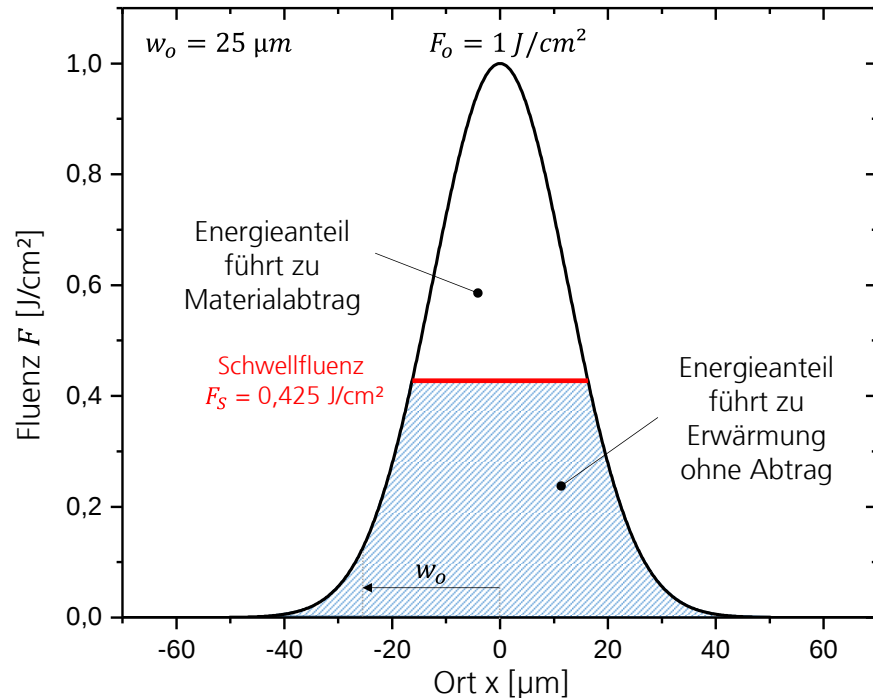
3.4 Einbringung von Bohrungen mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

3.4.1 Grundlagen

Der Abtragprozess bei Verwendung ultrakurz gepulster Laserstrahlung kann als verdampfungsdominiert angenommen werden. Die dabei verwendeten Pulsdauern liegen im Bereich einiger Pikosekunden und können somit kürzer als die Elektron-Phonon Wechselwirkungszeit ($t_p \leq \tau_{ep}$) sein. Der Energieübertrag der absorbierten Laserpulse geschieht aufgrund der kurzen Dauer von einigen Pikosekunden so schnell, dass Wärmediffusion während eines Pulses vernachlässigt werden kann. Die auf den Einzelpuls bezogene thermische Eindringtiefe ultrakurzer Pulse ist im Vergleich zu langgepulster Laserstrahlung vernachlässigbar klein [CMN96], [LDM97].

Aufgrund der häufig vorliegenden gaußförmigen Pulsform liegen in den räumlichen Pulsrändern Energien bzw. Fluenzen (Energie pro Fläche) vor, die nicht zu einem Materialabtrag führen. Diese Anteile führen aufgrund der Unterschreitung einer Mindestabtragschwelle (Schwellfluenz F_S) zu Wärmeentwicklung (Bild 14). Diese führt aber bei kleinen mittleren Laserleistungen zu keiner signifikanten Aufheizung des Werkstoffs. Besonders im Vergleich zu langgepulster Laserstrahlung ist die Wärmeentwicklung vernachlässigbar klein, solange bei Verwendung ultrakurz gepulster Laserstrahlung keine Wärmeakkumulationseffekte, wie z.B. durch hohe Repetitionsraten bei kleinen Vorschüben, hervorgerufen werden [Fin17]. Dennoch sollte der verdampfungsdominierte Abtragprozess aus physikalischer Sicht nicht als „kalter Abtrag“ deklariert werden.

Bild 14: Beispielhafte Darstellung einer gaußförmigen Pulsform mit zu Erwärmung und Materialabtrag führenden Energieanteilen



Bei der Materialbearbeitung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung ist im Vergleich zu langgepulster Laserstrahlung (Mikro- bis Millisekunden) keine ausgeprägte Abhängigkeit von Abtragschwelle und Intensität gegeben. Bei langgepulster Laserstrahlung kann die Intensität über die Leistung oder Einwirkdauer (Pulsdauer) so verändert werden, dass die Schwellintensität für einen Phasenübergang im Werkstoff überschritten wird. Dies funktioniert für kürzer werdende Pulse jedoch nur bis zu einer zeitlichen Einwirkgrenze, bei der eine ausreichende Thermalisierung des Materialgitters stattfindet. Die Zeitskala, in der eine Erwärmung des Werkstoffs hervorgerufen wird, liegt oberhalb der materialspezifischen Elektron-Phonon-Wechselwirkungszeit τ_{ep} . Da Pulsdauern bei ultrakurz gepulster Laserstrahlung typischerweise kleiner als τ_{ep} sind, ist die Verwendung der Intensität zur Beschreibung des Abtragprozesses nicht hinreichend. Primär relevant ist hierbei die insgesamt eingebrachte Energie pro Volumenelement. Da sich weiterhin die Abtragschwelle für ultrakurze Laserpulse unterhalb von τ_{ep} nur minimal ändert und der Abtrag von der eingebrachten Energie bezogen auf ein Flächenelement der Strahlkaustik dominiert wird, ist die Angabe einer Fluenz F geeignet. Die Spitzenfluenz F_0 wird angegeben durch:

3.4

$$F_0 = \frac{8 \cdot E_p}{d_{foc}^2 \cdot \pi} \quad \text{mit} \quad d_{foc} = 2 \cdot w_0$$

Dabei wird die Pulsenergie E_p auf die effektive Fokusfläche ($w_0^2 \cdot \pi$) entsprechend der Fläche bezogen, bei der die Fluenz auf $F_0 \cdot e^{-2}$ abgefallen ist [BBM14]. Somit ist auch die Verwendung der thermischen Eindringtiefe δ_{th} (s. Formel 3.1, S. 25) für ultrakurze Pulse mit $t_p \leq \tau_{ep}$ nicht möglich, wenn für t die Pulsdauer verwendet wird. Bei Verwendung einer Pulsdauer von wenigen Pikosekunden wäre δ_{th} nur wenige Nanometer groß und damit kleiner als die optische Eindringtiefe. Die effektive Energieeindringtiefe ultrakurzer Pulse liegt typischerweise jedoch bereits bei ca. zehn Nanometern.

Da Carbonfasern bei Erhitzung unter normalen Atmosphärendruck keine schmelzförmige Phase aufweisen, kann die zum Verdampfen erforderliche Mindestenergie E_V allgemein angegeben werden mit

3.5

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

wobei E_{heiz} die Energie ist, um ein Volumen V auf Verdampfungstemperatur zu erhitzen, während E_{sub} derjenige Energieanteil ist, der erforderlich ist, um das Volumen in den gasförmigen Aggregatzustand zu überführen. Dies entspricht der Masse ($\rho \cdot V$) multipliziert mit der spezifischen Wärmekapazität c_p und dem Temperaturunterschied von der Anfangstemperatur T_0 bis zur Verdampfungstemperatur T_V plus der Verdampfungsenthalpie H_V [Pop05], [Fre17]. Dies gilt jedoch nur für adiabate Vorgänge oder näherungsweise für einen Energieübertrag in einer sehr kurzen Zeitspanne wie z.B. bei ultrakurzer Laserstrahlung mit hohem Absorptionsgrad. Für längere Zeiten und reale Vorgänge müssen Verlusttherme in, z.B. Absorptionsgrad, und aus der Bilanzhülle, z.B. Energiediffusion durch u.A. Wärmeleitung und Konvektion, berücksichtigt werden.

3.4.2 Materialbearbeitung mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Da aktuell verfügbare UKP-Laserstrahlquellen mit hoher mittlerer Leistung ($\bar{P} \geq 100 \text{ W}$) häufig Repetitionsraten von mehreren hundert Kilohertz bis Megahertz darstellen können, ist eine schnelle Strahlablenkung erforderlich, um eine Wärmeakkumulation durch zwei aufeinander folgende, lokal nah beieinander liegende Pulse zu vermeiden (Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation). Bei kleinen geschlossenen Konturen, wie z.B. Bohrungen mit wenigen Millimetern Durchmesser, sollte die Zeit zwischen zwei sich wiederholender Scans groß genug sein, damit keine Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation auftritt. Ist dies nicht möglich, müssen Pausenzeiten eingehalten werden, um Schädigungsmechanismen zu unterbinden, die durch eine erhöhte Werkstofftemperatur hervorgerufen werden [Fin17] [Fre17].

Durch einen verdampfungsdominierten Abtrag ohne eine signifikante Puls-zu-Puls oder Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation ist die Herstellung von Bohrungen mit minimaler thermischer Belastung und dadurch sehr hoher materialographischer Qualität möglich. Die Produktivität des Abtrags ist jedoch

sehr klein und liegt üblicherweise im Bereich von wenigen Kubikmillimetern pro Minute. Aus diesem Grund sind mehrfache Überfahrten der Scankontur erforderlich, wodurch der Werkstoff schichtweise abgetragen wird. Weiterhin können durch die Laser-Material-Wechselwirkung Schockwellen entstehen, die Schwingungen in das Werkstück einleiten und so einen Einfluss auf den Bearbeitungsprozess haben können.

Aufgrund der anfangs begrenzten mittleren Leistung und Pulsenergie war der Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlquellen auf die Strukturierung von Oberflächen begrenzt. Durch minimal abgetragenes Material an Oberflächen mit Tiefen von einigen Nano- bis Mikrometern können Oberflächen getrennt oder funktionalisiert werden, um z.B. hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften aufzuweisen [LZF15] [VDW16], [LZZ15], [LZF15] [vDW16]. Die thermische Schädigung befindet sich im Nanometerbereich. Die Abtragvolumina betragen dabei aber einige Kubikmikrometer. Durch die mittlerweile in Laboren verfügbaren UKP-Strahlquellen mit hohen Repetitionsraten ab einigen Hundert Kilohertz, mittleren Leistungen von einigen Kilowatt und Pulsenergien von mehreren Millijoule hat sich das Anwendungsspektrum für UKP-Laserstrahlquellen signifikant erweitert [OFW15] [AMP16]. Mit schnellablenkenden Strahlführungssystemen können große Flächen produktiv bearbeitet werden. Bohrlochfelder können durch diffraktive optische Strahlteiler-elemente (DOE) oder Mikrolinsenarrays zeitlich parallel und somit um ein Vielfaches schneller bearbeitet werden.

Um die Bandbreite an Anwendungsbeispielen darzustellen, sind Prägungen für Presswerkzeuge sowie das Ablösen einzelner ultradünner bis atomarer Schichten bei Graphit zur Herstellung von Graphen genannt [RWF12] [YLL14], [LYH15]. Durch die Bearbeitung von Folien in der Photovoltaik [KLS13], [LAB13], Mikrostrukturierungen in Glas mittels *Selective Laser Etching* (SLE) [GHO12], die Herstellung und Reparatur von Masken in der Photolithographie [HHL98], [Kor03] und das Bohren von Formbohrungen für Einspritzdüsen für Dieselmotoren [MP05] werden weitere Anwendungsbeispiele abgedeckt.

Ein weiteres Feld, mit dem sich auch diese Arbeit beschäftigt, ist die Materialbearbeitung von faserverstärkten Werkstoffen in der Automobil- und Luftfahrt-industrie, die erst mit heutigen UKP-Strahlquellen hoher mittlerer Leistung erschlossen werden kann [WHM11], [JFK15].

4 Verwendete Anlagen- und Systemtechnik, Materialien sowie Analyseverfahren

4.1 Laserstrahlquellen, Strahlführung und -formung

4.1.1 Faserlaserstrahlung

In Bild 15 ist der in dieser Arbeit verwendete Versuchsaufbau zum Bohren von CFK-Preforms mittels Faserlaserstrahlung schematisch dargestellt. Die Faserlaserstrahlquelle ist über einen Faserkoppler und einen an den Scanner befestigten Kollimator verbunden. Die Laserstrahlquelle ist weiterhin über einen Puls-generator mit einem Computer verbunden. Sowohl die Laserstrahlquelle als auch der Scanner werden über die jeweiligen Steuerungsprogramme auf dem Computer bedient. Im Folgenden werden die relevanten Einzelkomponenten beschrieben.

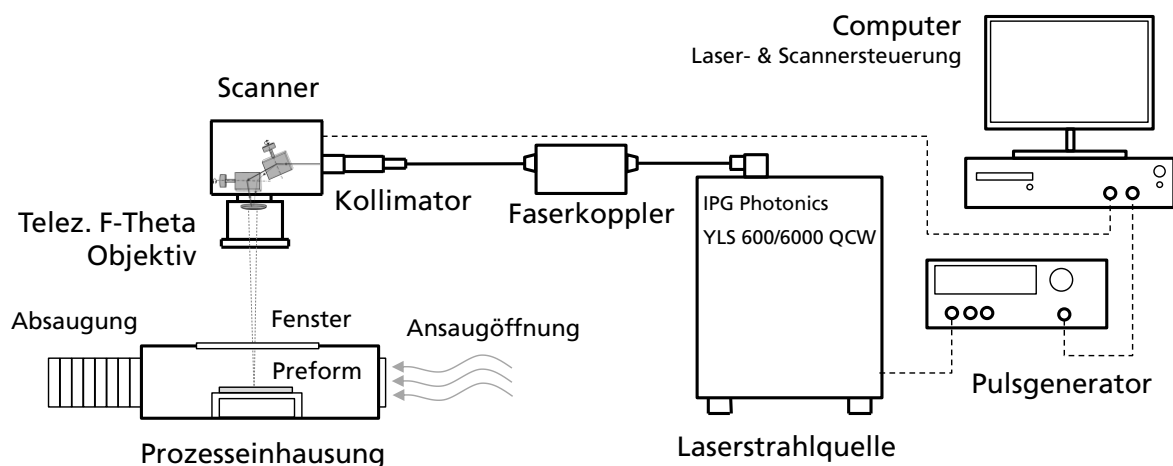


Bild 15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Bohren mit langgepulster Faserlaserstrahlung

Laserstrahlquelle

Von der verwendeten Faserlaserstrahlquelle vom Typ YLS 600/6000 QCW der Firma IPG Photonics wird infrarote (IR-) Strahlung mit einer Wellenlänge von 1070 nm emittiert. Im Dauerstrichbetrieb (continuous wave, cw) kann Strahlung mit einer maximalen Leistung von 600 W erzeugt werden. Im gepulsten Modus sind durch die zehnfache Leistungsüberhöhung der Dioden bis zu 6 kW Pulsspitzenleistung möglich. Durch den limitierten duty cycle dc (0,1, S.146) ist im gepulsten Betrieb eine Pause (Laser Off Time) von mindestens 90% der eingestellten Periodendauer τ_p erforderlich, damit die maximal mögliche mittlere

Leistung der Strahlquelle nicht überschritten wird. Die Spezifikationen der langgepulsten Faserlaserstrahlquelle sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2:
Spezifikationen
der multimode
Faserlaserstrahl-
quelle IPG
Photonics
YLS-600/6000-
QCW

Faserlaser IPG Photonics YLS-600/6000 QCW		
Wellenlänge	λ_{Laser}	1070 nm
Max. mittlere Leistung	$\bar{P}$	600 W
Max. Pulsspitzenleistung	$\hat{P}$	6000 W
Pulsdauer	t_p	0,2 – 10 ms
Repetitionsrate	f	1 – 500 Hz
Beugungsmaßzahl	M^2	~ 6
Durchmesser Strahlführungsfaser	d_{Faser}	50 μm
Max. duty cycle	dc	10 %

Strahlführungs- und Prozessfasern

Um die Strahlung von der Strahlquelle in den Scanner zu leiten, werden hochreine Glasfasern verwendet. Die Laserstrahlquelle hat werksseitig eine Strahlführungsfaser mit einem Kerndurchmesser von 50 μm . Damit der Fokusedurchmesser bei konstanter Kollimations- und Fokussierbrennweite verändert werden kann, können über einen Faserkoppler Prozessfasern mit unterschiedlichen Faserkerndurchmessern mit dem Scanner verbunden werden. Neben der Faser mit 50 μm Durchmesser der Laserstrahlquelle sind Prozessfasern mit Durchmessern von 100, 150, 200, 300, 400 und 600 μm installierbar. Die Prozessfasern stammen von der Firma IPG Photonics.

Faserkoppler & Kollimator

Zur Transformierung der Laserstrahlung von der strahlquellenseitigen Strahlführungsfaser ($\varnothing$ 50 μm) zu größeren Durchmessern wird ein Faserkoppler (Fiber to Fiber Coupling Unit, FCC) der Firma Optoskand AB verwendet. Der Wirkungsgrad ist laut Hersteller mit mindestens 98 % angegeben [Opt12]. In der Realität liegt der Leistungsverlust nach eigenen Messungen bei < 0,1 % und sind somit vernachlässigbar.

Der Kollimator vom Typ PA Coll Unit QB,d50 f200 der Firma Optoskand AB zur Aufweitung und Parallelisierung der aus der Prozessfaser austretenden Strahlung hat eine Kollimationsweite von 200 mm und ist über einen Adapterring vor die Öffnung am Scanner montiert. Die Transmission ist mit ≥ 97 % angegeben [Opt16].

Scanner und Optik

Zur Strahlablenkung wird ein Galvanometer-Scanner vom Typ intelliSCAN 30 der Firma Scanlab verwendet. Die technischen Spezifikationen des Scanners sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3:
Spezifikationen des
Galvanometer-
Scanners Scanlab
intelliSCAN 30

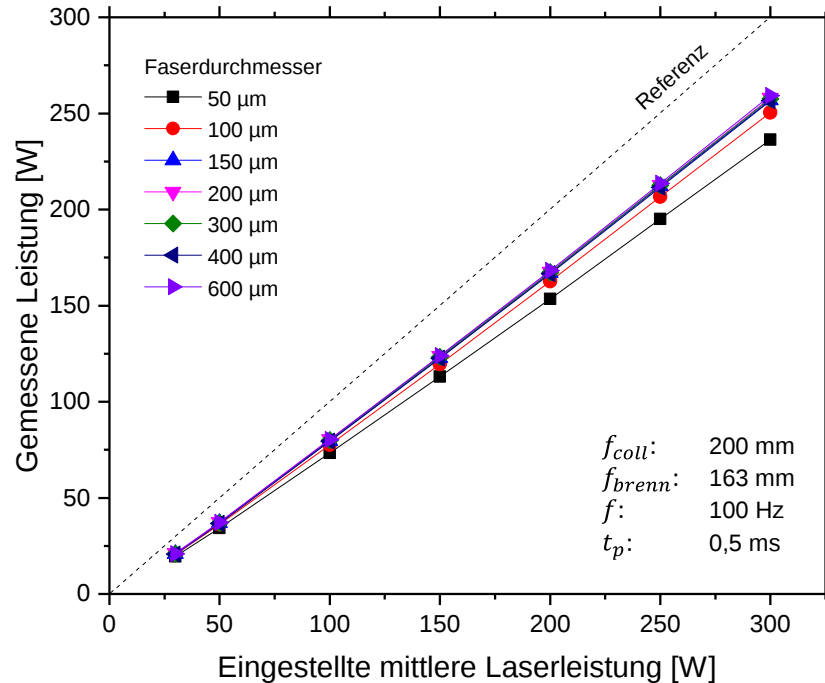
Galvanometer-Scanner Scanlab intelliSCAN III 30		
Apertur		30 mm
Bildfeldgröße (bei $f_{brenn}=163$ mm, telez.)		50 x 50 mm
Markiergeschwindigkeit	v_s	$\leq 0,7$ m/s
Positionierungsgeschwindigkeit	v_{sprung}	$\leq 8,0$ m/s
Dither (Positionsrauschen, RMS)		< 5 μ rad

Am Austritt des Scanners ist ein telezentrisches F-Theta-Objektiv der Firma Scanlab mit einer effektiven Brennweite $f_{brenn} = 163$ mm montiert. Der Scanner ist zur Höhenverstellung über eine Adapterplatte an einer mechanischen Achse befestigt. Der Scanner ist über eine RTC5 Karte mit dem Computer verbunden. Als Scannersteuerung wird das Programm Scan2D von Ortmann Digitaltechnik GmbH verwendet.

Gesamttransmissionswerte

Da der Durchmesser der kollimierten Strahlung im Kollimator mit ca. 35 mm größer als die Apertur des Scanners ($\varnothing 30$ mm) ist, tritt ein Leistungsverlust von ca. 15 % (bei großer Leistung) bis 30 % (kleiner Leistung) der eingestellten Laserleistung ein. Die Messung der am Werkstück ankommenden Leistung über die eingestellte Laserleistung ist in Bild 16 dargestellt. Bei der Messung wird die Strahlung von der Laserstrahlquelle durch einen Kollimator, Scanner, einer telezentrischen F-Theta-Objektiv und zwei Scannerschutzgläsern, eins am Objektiv, eins als Fenster an der Prozesseinhausung, geführt.

Bild 16: Messung des Leistungsverlustes bei Verwendung des Kollimators mit $f_{coll}=200\text{ mm}$



Die maximale optische Transmission beträgt bei einer Pulsspitzenleistung von 6 kW, einer Pulsdauer von 0,5 ms und je nach verwendeter Strahlführungsfaser zwischen 79 % (50 µm Faser) und 86 % (600 µm Faser).

Durch die Verwendung zweier Schutzgläser nach der letzten Fokussierlinse des F-Theta-Objektives tritt eine Fokusverschiebung in Propagationsrichtung der Laserstrahlung ein. Im Vergleich zur Verwendung von nur einem Schutzglas am Objektiv wird durch das zweite Schutzglas mit einer Dicke von 3,8 mm an der Prozesseinhausung (s. Bild 15, Fenster) der Fokussierabstand um 1,25 mm vergrößert. Dieser Umstand wird bei der Bestimmung der Fokuslage vor den Versuchsdurchführungen beachtet.

4.1.2 Ultrakurz gepulste Laserstrahlung

In Bild 17 ist der Versuchsaufbau zum Bohren von CFK-Preforms mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung schematisch dargestellt. Die aus der UKP-Strahlquelle emittierte Strahlung wird über Spiegel in einen an einer z-Achse befestigten Scanner der Firma Aerotech geführt. Die Laserstrahlquelle, bestehend aus einem Seedlaser und einer Verstärkereinheit, ist über einen Pulsgenerator zum Pulpicking an den elektrooptischen Modulator (EOM) und über den Seedlaser mit einem Computer zur Lasersteuerung verbunden. Auf einem weiteren Computer befindet sich die Achssteuerung und ein Interface zum externen Steuern des mechanischen Shutters der Laserstrahlquelle. Im Folgenden werden die relevanten Einzelkomponenten beschrieben.

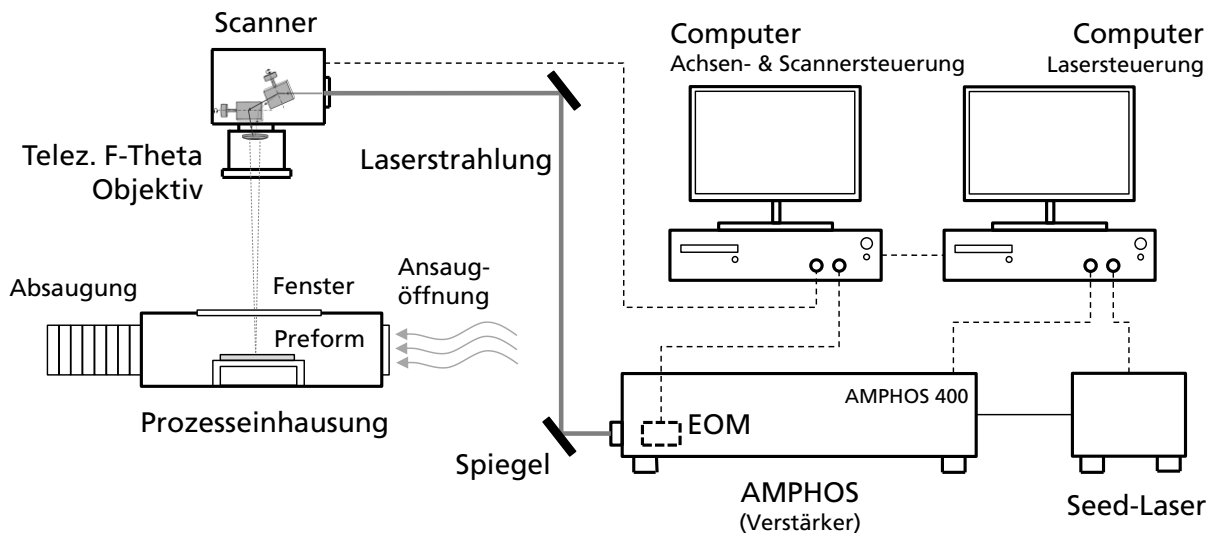


Bild 17: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Bohren und Abtragen mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Die ultrakurz gepulste Laserstrahlquelle ist ein AMPHOS 400 von der Firma Amphos. Dieser besteht aus einem Seedlaser zur Erzeugung der ultrakurzen Pulse, jedoch mit kleiner Pulsenergie. Die Pulsenergie ist ausreichend, um die Pulse über eine Lichtleitfaser in den Verstärker zu schicken, in dem die Strahlung mit einer mittleren Leistung von wenigen Watt auf bis zu 400 W verstärkt wird. Die aus dem Verstärker austretende Strahlung ist soweit kollimiert, dass die Strahlung ohne einen weiteren Kollimator in den Scanner geführt werden kann. Die Spezifikationen der UKP-Strahlquelle sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4:
Spezifikationen der
ultrakurz gepulsten
Laserstrahlquelle
AMPHOS 400

Ultrakurzpuls Laserstrahlquelle AMPHOS 400		
Wellenlänge	λ_{Laser}	1030 nm
Max. mittlere Leistung	$\bar{P}$	400 W
Pulsdauer	t_p	0,69 – 7,65 ps
Repetitionsrate	f	1,43 – 56,8 MHz
Beugungsmaßzahl	M^2	$\leq 1,7$
Max. Pulsenergie	E_p	285 μJ

Scanner und Optik

Ähnlich zum Faserlaseraufbau findet die Strahlablenkung über einen Galvanometer-Scanner statt. Beim UKP-Aufbau wird jedoch ein Scanner vom Typ AGV-20HP der Firma Aerotech verwendet. In Tabelle 5 sind die Spezifikationen des Scanners aufgelistet.

Tabelle 5:
Spezifikationen des
Galvanometer-
Scanners Aerotech
AGV-20HP

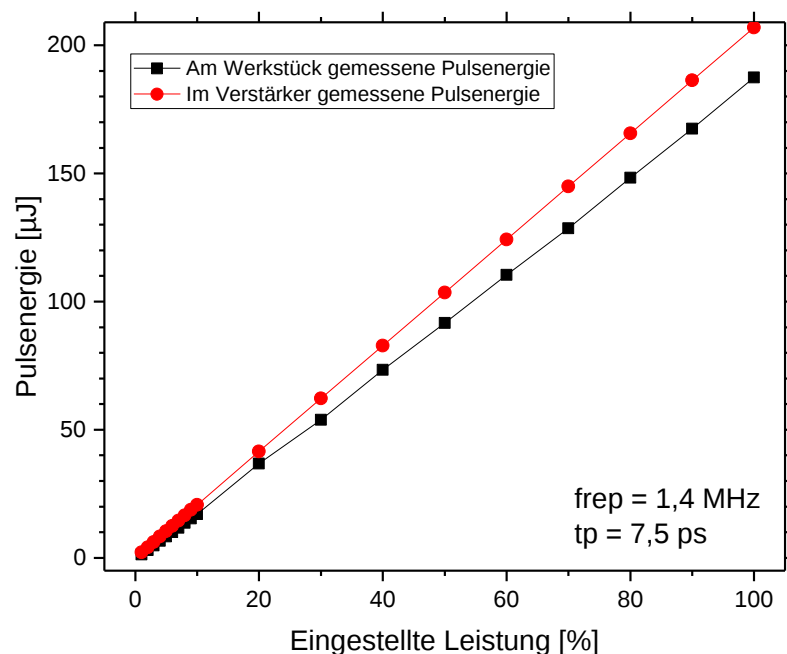
Galvanometer-Scanner Aerotech AGV-20HP		
Bildfeldgröße (bei $f_{brenn}=163$ mm)		80 x 80 mm
Max. Markiergeschwindigkeit	v_s	5 m/s
Max. Positionierungsgeschwindigkeit	v_{sprung}	50 m/s
Dither (Positionsrauschen, RMS)		< 0,2 μ rad

Auch an diesem Scanner wird eine telezentrische Optik installiert. Diese hat eine effektive Brennweite von ebenfalls 163 mm. Da die UKP-Laserstrahlung bereits kollimiert aus der Verstärkereinheit der Laserstrahlquelle austritt, ist kein zusätzlicher Kollimator erforderlich. Mit einem Rohstrahldurchmesser von ca. 4 mm wird unter dem telezentrischen Objektiv ein Fokus mit einem Durchmesser von 65 μ m erzeugt.

Prozesseinhausung

Im Rahmen der Untersuchungen wird die gleiche Prozesseinhausung wie bei den Versuchen mit Faserlaserstrahlung verwendet. Mittels Fokuslagenbestimmung wurde ermittelt, dass durch das Schutzglas an der Oberseite der Einhausung der Fokusabstand um ca. 1,25 mm im Vergleich zur freien Strahlung unter dem Objektiv vergrößert wird.

Bild 18: Gemessene
Pulsenergie im
Verstärker und am
Werkstück in
Abhängigkeit der
eingestellten
Leistung



4.2 Preformmaterial

Das im Rahmen der Untersuchungen verwendete Preformmaterial vom Typ HP-B415C stammt von dem Hersteller HP-Textiles und ist ein bi-axiales $\pm 45^\circ$ Gelege mit einem Flächengewicht von 410 g/m^2 . Die übereinander um 90° verdrehten Einzellagen (Flächengewicht jeweils 203 g/m^2) sind über einen Wirkfaden aus Polyethersulfon (Flächengewicht 4 g/m^2) miteinander fixiert, wodurch eine bi-axiale Lage entsteht (vgl. Bild 7, S. 15). Der in Trikotbindung vorliegende Wirkfaden löst sich etwa bei einer Temperatur von ca. 225°C auf. Dickere Preforms werden durch einfaches Übereinanderstapeln von mehreren bi-axialen Lagen hergestellt. Sofern eine gewisse Steifigkeit des Gesamttextils erforderlich ist, wird ein Binder auf thermoplastischer Polymerbasis verwendet. Der Binder vom Typ EPIKOTE 05390 von der Firma Hexion Speciality Chemicals wird als Pulver auf die Oberfläche zwischen den einzelnen Lagen verteilt und anschließend mit einem Heißdruckstempel verflüssigt. Nach der Wiederverstarrung sind die Einzellagen adhäsiv miteinander verbunden.

Im Rahmen der Untersuchungen werden Preforms mit Dicken von einer Einzellage bis zu 10 Lagen untersucht. Typischerweise ist eine bi-axiale Lage etwa $0,7 \text{ mm}$ dick. Ein Preform mit fünf Lagen hat dementsprechend eine Dicke von ca. $3,5 \text{ mm}$, wenn kein Binder verwendet wird. Bei Verwendung eines Binders ist die Gesamtdicke bei gleicher Lagenanzahl aufgrund der Presskraft des Heißstempels kleiner. Dadurch wird sowohl der Anteil der Fasern pro Volumenelement (Faservolumengehalt) als auch die Kontaktlängen innerhalb und zwischen den einzelnen Lagen vergrößert. Wird ein Binder verwendet, wird dies und die resultierende Gesamtdicke des Preforms an gegebener Stelle angegeben.

Die in den Preforms verarbeiteten Carbonfasern vom Typ Panex 35 (50k) des Herstellers Zoltek Inc. sind hochfeste (HT) Fasern. Die Carbonfasern haben nach Aussage des Herstellers folgende thermophysikalische Spezifikationen:

Tabelle 6:
Thermophysikalische
Eigenschaften der
Zoltek Panex 35
Carbonfasern

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Dichte	ρ	1,81	g/cm^3
Thermische Leitfähigkeit (bei Raumtemperatur)	$\lambda_{\parallel}$	13	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Spez. Wärmekapazität (bei Raumtemperatur)	c_p	741	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Berechnete Temperaturleitfähigkeit	$\kappa_{\parallel}$	0,097	cm^2/s
Verdampfungstemperatur	T_V	3.650	K
Verdampfungsenthalpie	H_V	32.067	kJ/kg

Die Verdampfungstemperatur T_V der Fasern wird hier mit 3.650 K abgeschätzt [Tri69] [Zaz97] [Sch07]. Die Temperaturleitfähigkeit $\kappa_{\parallel}$ entlang der Faser wird

über die (faserparallele) thermische Leitfähigkeit $\lambda_{\parallel}$, der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_p berechnet:

4.1
nach [Pop05]

$$\kappa_{\parallel} = \frac{\lambda_{\parallel}}{\rho \cdot c_p}$$

Da sich sowohl $\lambda_{\parallel}$ als auch c_p mit der Temperatur der Faser ändern, ist zur Referenzierung der Wert bei Raumtemperatur angegeben. Die spezifische Wärmekapazität nimmt bei steigender Temperatur bis ca. 1500 K stark zu ($c_p(1500 \text{ K}) \approx 2000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$), verbleibt dann auf relativ konstantem Niveau und steigt noch einmal ab ca. 3500 K bis zur Evaporationstemperatur stark an [Kel81] [Pie93]. Gleichzeitig nimmt die thermische Leitfähigkeit bei PAN-basierten Fasern mit steigender Temperatur bis 2000 °C zu [LDL17], bei pech-basierten Fasern und Graphit ab [Pie93] [YKT96]. Insgesamt bleibt die Temperaturleitfähigkeit mit steigender Temperatur bei PAN-Fasern in einem gewissen Schwankungsbereich gleich [PBG09].

Die o.g. Werte gelten für unidirektionale Fasern. Da in dieser Arbeit Gelege aus 90° zueinander verdrehten Einzellagen bearbeitet wurden, sind innerhalb einer bi-axialen Lage (engl.: in-plane) die thermophysikalischen Eigenschaften annähernd gleich [YRH13]. Entlang der Dickenrichtung des Preforms ist die im Vergleich zur Faserlängsrichtung deutlich kleinere Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser $\lambda_{\perp}$ relevant [Sch07].

Die Carbonfasern sind mit einer Schlichte überzogen. Die genaue Zusammensetzung der Additive ist aufgrund der allgemeinen Geheimhaltung der Hersteller nicht bekannt. Die hier verwendete Schlichte ist jedoch für Matrixwerkstoffe auf Epoxidbasis konzipiert.

4.3 Charakterisierung und materialographische Analyse von Bohrungen

Zur Bewertung der geometrischen und materialographischen Qualität der erstellten Bohrungen wurde eine Analyse bezüglich der Bohrgeometrie und möglichen Defekten durchgeführt. Zur Auswertung und Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse wurden die Versuche pro variiertem Parameter jeweils mindestens drei Mal wiederholt. Für die Erstellung der Diagramme wurden aus den Ergebnissen der Mittelwert und die einfache Standardabweichung für Stichproben berechnet und in Form eines Fehlerbalkens eingetragen. Zur geometrischen Charakterisierung der Bohrungen ohne Einfluss der Materialdicke wird die Konizität k

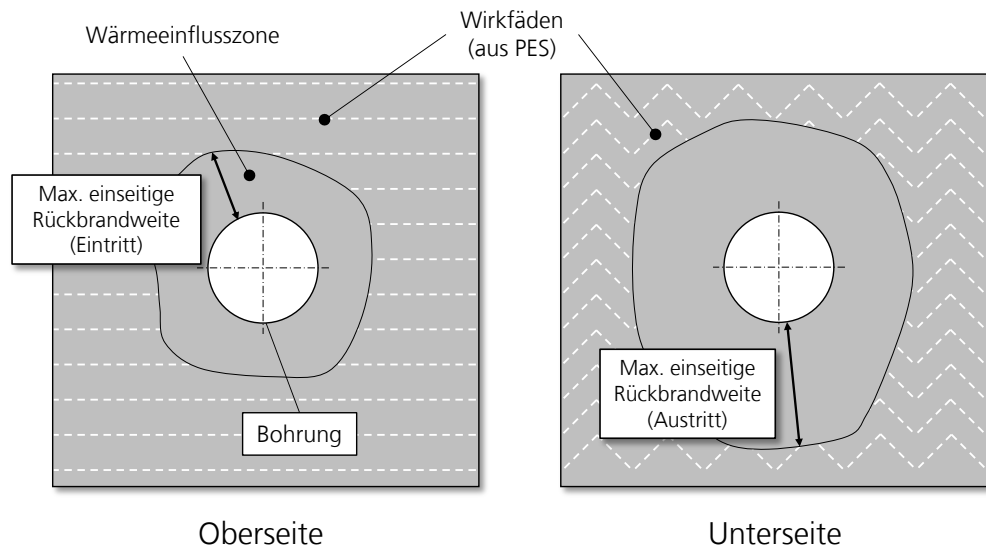
4.2

$$k = \frac{d_{\text{Eintritt}} - d_{\text{Austritt}}}{t_{\text{Probe}}} \cdot 100 [\%]$$

in Prozent angegeben. Dabei ist d_{Eintritt} der Eintrittsdurchmesser, d_{Austritt} der Austrittsdurchmesser und t_{Probe} die Dicke der Probe. Bei einer Konizität von 0 % ist die Bohrung zylindrisch.

Die Messung der Wärmeeinflusszone (WEZ) erfolgte direkt nach der Herstellung der Bohrung im trockenen Textil. Die Größe der WEZ wurde anhand der Rückbrandweite der aus PES bestehenden Wirkfäden gemessen, da die Zersetzungstemperaturen der Wirkfäden und der Schlichte in etwa gleich ist ($T_{\text{PES}} \approx T_{\text{Schlichte}}$). Der Messwert wurde durch den größten Abstand zwischen äußerem Rand der Bohrung und der Grenze des Wirkfadenrückbrandes bestimmt. Dieser wurde als einseitige Ausbreitung der WEZ bezeichnet. In Bild 19 ist die Messung der WEZ schematisch dargestellt.

Bild 19:
Schematische
Darstellung zur
Bestimmung der
WEZ anhand der
Rückbrandweite der
aus PES bestehenden
Wirkfäden



Um Aussagen bezüglich der Konizität und der möglichen Bildung einer Randschicht treffen zu können, wurde der Probenkörper nach der Laserbearbeitung in einer Kalteinbettmasse fixiert und anschließend materialographisch untersucht. Dazu wurde das in Bild 20 dargestellte Vorgehen angewendet.

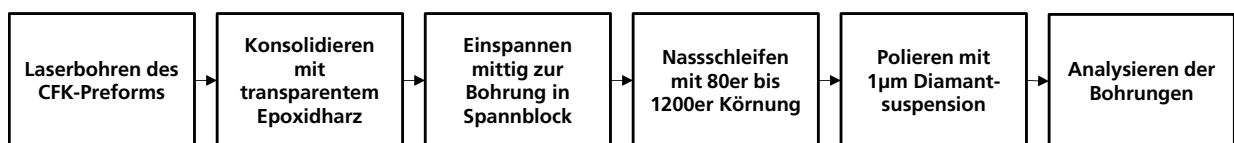


Bild 20: Schematische Darstellung des Prozesses der materialographischen Bearbeitung und Auswertung der gebohrten Proben

Zur Fixierung der gebohrten CFK-Preforms wurden die Proben in ausreichend große Formen gelegt. Als Einbettmasse wurde das schwindungsarme, transparente Epoxidharzeinbettmittel Epoclear 1000 der Firma Schmitz

Metallographie verwendet. Binde- und Härtemittel wurden im Verhältnis 1/0,55 für etwa 5 min unter Vermeidung von Luftbläschenbildung durchmischt. Anschließend wurden die Probenkörper mittig von innen nach außen getränkt, um Lufteinschlüssen im Textil vorzubeugen. Der Aushärteprozess des Einbettmittels ist nach etwa 24 Stunden abgeschlossen.

Die ausgehärteten Proben wurden mit einer Bandsäge getrennt und mittig in einen keramikbeschichteten Spannblock eingespannt. Anschließend wurde auf einem Schleifgerät vom Typ Phoenix 4000 der Firma Buehler mit Schleifpapier unterschiedlicher Körnung nach CAMI nass geschliffen. Zuerst wurde mit einer groben 80er Körnung geschliffen, bis die Bohrungen im Schnitt sichtbar werden. Anschließend wurde Schleifpapier mit einer 600er und zuletzt einer feinen 1200er Körnung verwendet. Zuletzt wird die Probe auf der Poliermaschine vom Typ Auto Met 300 der Firma Buehler poliert, um die Bohrungen unter dem Mikroskop sichtbar zu machen. Dazu wurde jeweils für 5 min auf einer Polierscheibe mit einer Diamantsuspension mit 6 µm Körnung und abschließend mit einer 1 µm Körnungssuspension poliert. Das sorgfältige Polieren der eingebetteten Proben war erforderlich, da bereits kleinste Kratzer den optischen Eindruck unter dem Lichtmikroskop trüben.

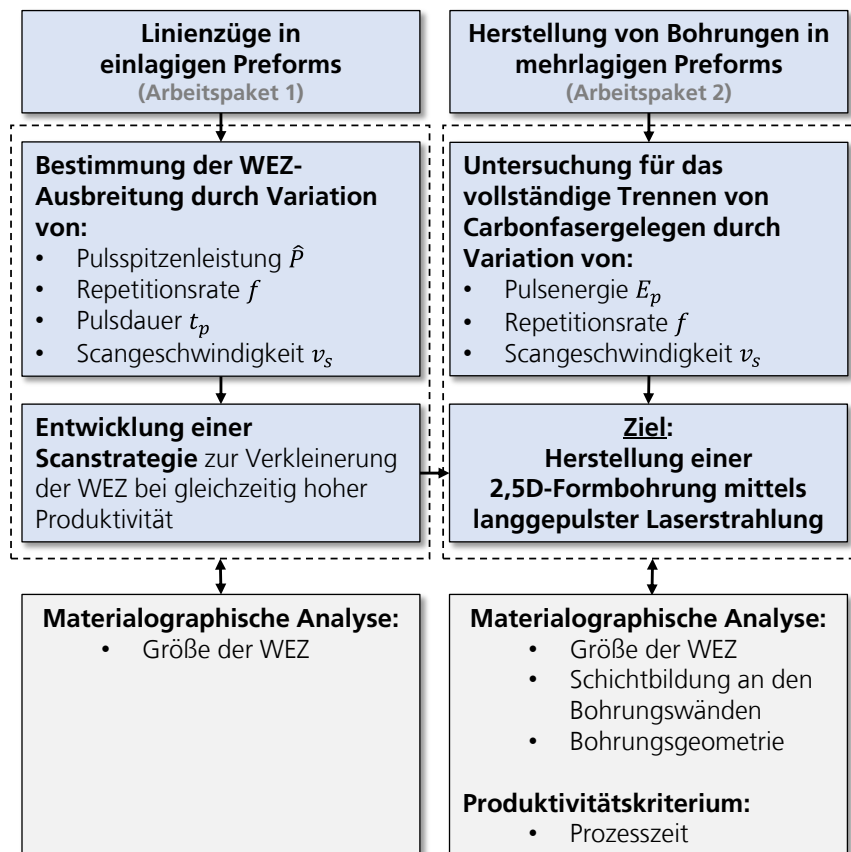
Die Definition der Größe der WEZ durch Messung des Rückbrandes der Wirkfäden ist eine hinreichende Methode, um materialographische Schädigungen zu charakterisieren. Da bisher keine standardisierten Verfahren zur Ermittlung der Größe der WEZ bei nichtinfundierten Carbonfasertextilien bekannt sind, kann aufgrund der Relation zwischen Rückbrand der Wirkfäden und der Zersetzungstemperatur der Schlichte verwiesen werden. Die verwendeten Qualitätsmerkmale zur Bewertung der geometrischen und materialographischen Qualität der Bohrung haben ihren Fokus auf den Eigenschaften, die zur Erfüllung der Bauteilfunktion und des Produktionsprozesses erforderlich sind. Dazu zählen die thermische Schädigung der Faseroberfläche sowie der Schlichte [FZ14]. Die Oberflächenschädigung kann dabei einen signifikanten Einfluss auf die nachfolgenden Prozesse haben, da die Haftung zwischen den Fasern und der injizierten Matrix abnimmt. Außerdem entfällt die Schutzfunktion der Fasern, die bei der Oberflächenbehandlung im Faserherstellungsprozess erzielt wurde [Che11]. Da der Rückbrand der Schlichte nur durch zeitlich aufwendige Verfahren auswertbar ist, wurde die Größe des Rückbrandes der Wirkfäden als Auswertehilfe verwendet.

5 Verfahrensentwicklung

5.1 Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Bohren mit langgepulster Faserlaserstrahlung

Die Versuchsdurchführung wurde in mehrere Arbeitspakete mit jeweils unterschiedlichen primären Fragestellungen unterteilt. Die Vorgehensweise ist in Bild 21 dargestellt.

Bild 21:
Flussdiagramm für
die Versuchsdurch-
führung mit
langgepulster
Laserstrahlung

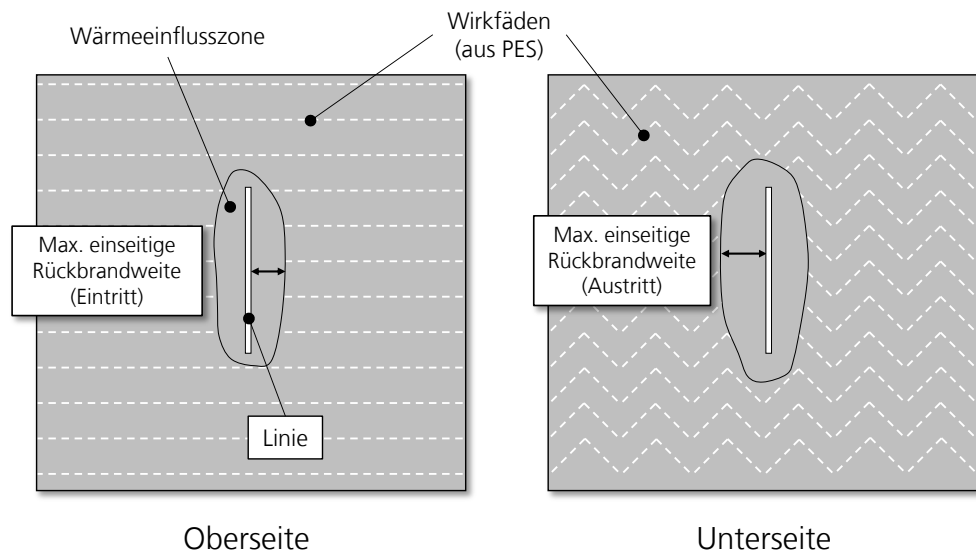


5.1.1 Linienzüge in einlagigen Preforms

Im ersten Arbeitspaket wurden einlagige Preforms verwendet, in die ein gerader, langer Schnitt erzeugt wurde. Die Länge der Schnitte betrug einheitlich 20 mm. Ziel dieser ersten Versuchsphase war die Untersuchung des Einflusses einzelner Prozessparameter auf die Ausbreitung der WEZ und die Entstehung einer verfestigten Schicht an der Schnittkante. Mit der Anfertigung von Längs-

schnitten besteht zudem die Möglichkeit, die Wärmeeindringtiefe senkrecht zum Schnitt anhand des zurückgebrannten Wirkfadens zu bestimmen ohne weitere Einflüsse, die aus der Geometrie herrühren, beachten zu müssen [FZ14]. Gemessen wurde die Rückbrandweite der Wirkfäden sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite der Preformproben (Bild 22). Das Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitung der WEZ mit einer Linie ist analog zu Bild 19 (S.41).

Bild 22:
Schematische
Darstellung der
Messwerterzeugung
für die WEZ bei
Längsschnitten

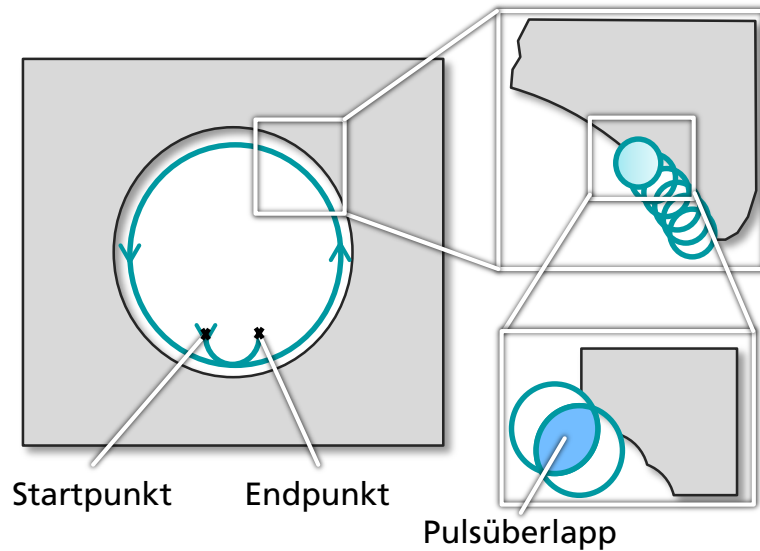


Nicht berücksichtigt wurde in diesem Teil der Versuchsdurchführung die vollständige Durchtrennung des Preforms. Die Fokusslage war in allen Versuchen auf der Oberfläche der Probenoberseite.

5.1.2 Herstellung von Bohrungen in mehrlagige Preforms

Im zweiten Arbeitspaket wurde die Anzahl der Gelegelagen schrittweise vergrößert und das Scanmuster auf Kreise verändert (Bild 23). Das Verschieben der Start- und Endpunkte hatte das Ziel, eine geschlossene Kontur zu erzeugen, die zum vollständigen Trennen des Bohrkerns aus dem Werkstück erforderlich ist. Der Scankreisdurchmesser der großen Kreiskontur betrug 5 mm.

Bild 23: Detailansicht der kreisförmigen Trepanierbewegung der Laserstrahlung



Durch die schrittweise Erhöhung der Anzahl der Gelegelagen sollte ein Zusammenhang der Prozessparameter zur Lagenzahl hergestellt werden. Der Fokus der Laserstrahlung lag auf der Oberseite der Werkstückoberfläche.

5.1.3 Ergebnisauswertung

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wurden die Versuche drei Mal wiederholt. Anschließend wurden in diesem Kapitel die maximalen und minimalen Ausprägungen des beobachteten Messwertes notiert und der Mittelwert $\bar{x}$ gebildet. Bei der Erstellung der Graphen wurde daher ein Fehlerbalken mit der maximalen Abweichung ($Er +$, $Er -$) der jeweiligen Messgröße vom Mittelwert dargestellt. Die Länge der Fehlerbalken wird für den positiven Anteil mit

$$5.1 \quad y(Er +) = \max(x_1, x_2, \dots, x_n) - \bar{x}$$

bzw. für den negativen Anteil mit

$$5.2 \quad y(Er -) = \bar{x} - \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

angegeben. Durch Kalteinbetten mit einem transparenten Epoxidharzeinbettmittel konnte die Ausbildung einer Schicht an der Bohrwand untersucht werden. Durch das Kalteinbetten tritt keine signifikante Schrumpfung des Werkstücks auf. Nach dem Aushärtvorgang wurden die Proben längs der Schnitte bzw. Bohrungen durchgeschnitten und poliert. Die Proben aus dem ersten Arbeitspaket wurden in der Mitte der Schnitte getrennt. Die Bohrungen aus dem zweiten Arbeitspaket wurden so getrennt, dass nach dem Schleifen und Polieren die Mittelebene der Bohrungen untersucht werden konnte.

5.1.4 Einfluss der Verfahrensparameter auf einlagige Preforms

Wegen einer zu kleinen Dicke ist die Konizität bei einlagigen Preforms nicht sinnvoll messbar. Anhand linearer Schnitte sollte die WEZ ohne einen möglichen Zeiteinfluss und Wärmeakkumulation bei geschlossenen Konturfahrten gemessen werden. Im Rahmen der Untersuchung an einlagigen CFK-Preforms wurden folgende Verfahrensparameter variiert:

Tabelle 7: Variation der Verfahrensparameter bei einlagigen Carbonfaser-preforms

Parameter	Ziel
Pulsspitzenleistung $\hat{P}$	Abhängigkeiten bzgl. eingebrachter Leistung und Pulsenergie
Repetitionsrate f	- Abhängigkeiten bzgl. Zeit (Pause zw. Pulsen) - Energie pro Zeit (Aufheizrate)
Pulsdauer t_p	- Abhängigkeiten bzgl. Zeit (Einwirkdauer) - Pulsenergie
Scangeschwindigkeit v_s	Abhängigkeiten bzgl. Pulsüberlapp und bestrahlter Fläche („Langlocheffekt“)

Die erste Versuchsreihe beinhaltete einlagige Preforms und die Abhängigkeit der Ausbreitung der WEZ von den Verfahrensparametern. Dazu wurden verschiedene Parametervariationen durchgeführt.

Variation der Pulsspitzenleistung

In einem ersten Versuch wurde die Pulsspitzenleistung variiert und alle weiteren Parameter konstant gehalten. Diese sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Scangeschwindigkeit wurde so variiert, dass ein konstanter linearer Pulsüberlapp von 50 % eingehalten wurde.

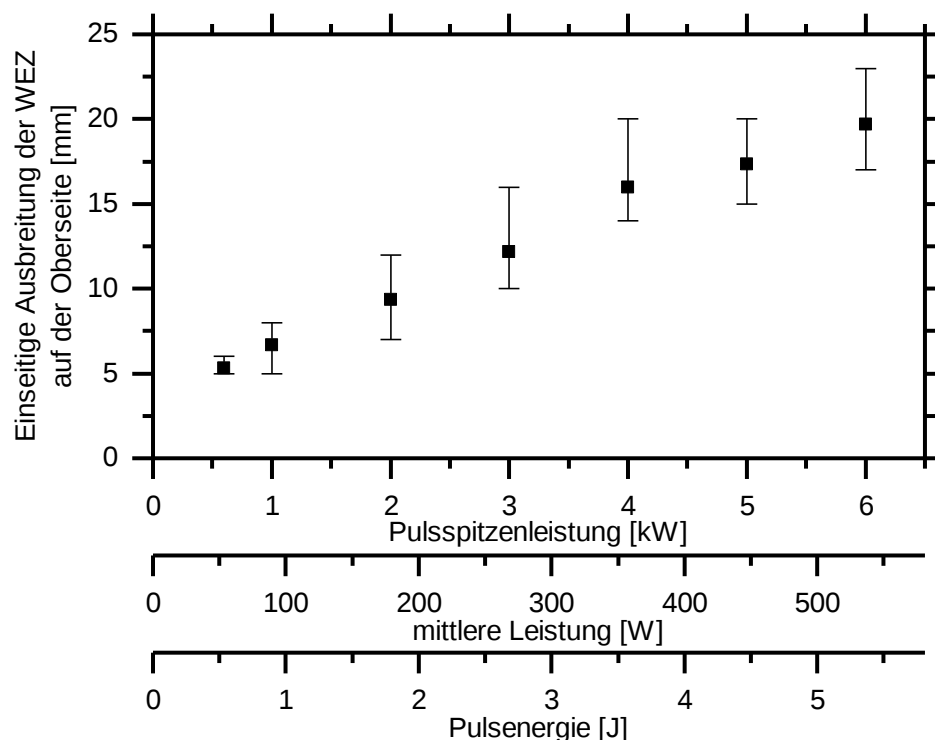
Tabelle 8: Verfahrensparameter für die Variation der Pulsspitzenleistung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Pulsspitzenleistung	$\hat{P}$	0,6; 1; 2; 3; 4; 5; 6	kW
Repetitionsrate	f	100	Hz
Pulsdauer	t_p	0,9	ms
Scangeschwindigkeit	v_s	2,13	mm/s
Linearer Pulsüberlapp	$P\ddot{U}_{DIN}$	50	%

Das Ergebnis der Variation ist eine eindeutige Vergrößerung der WEZ bei steigender Pulsspitzenleistung (Bild 24). Neben den konstant gehaltenen Prozessparametern steigen die Werte für die mittlere Leistung, die Streckenenergie

sowie die Pulsenergie linear mit der Pulsspitzenleistung, sodass der Einfluss dieser Werte im Folgenden gesondert untersucht wurde.

Bild 24: Einfluss der Parameter Pulsspitzenleistung, mittlere Leistung und Pulsenergie auf die maximale einseitige Ausbreitung der WEZ



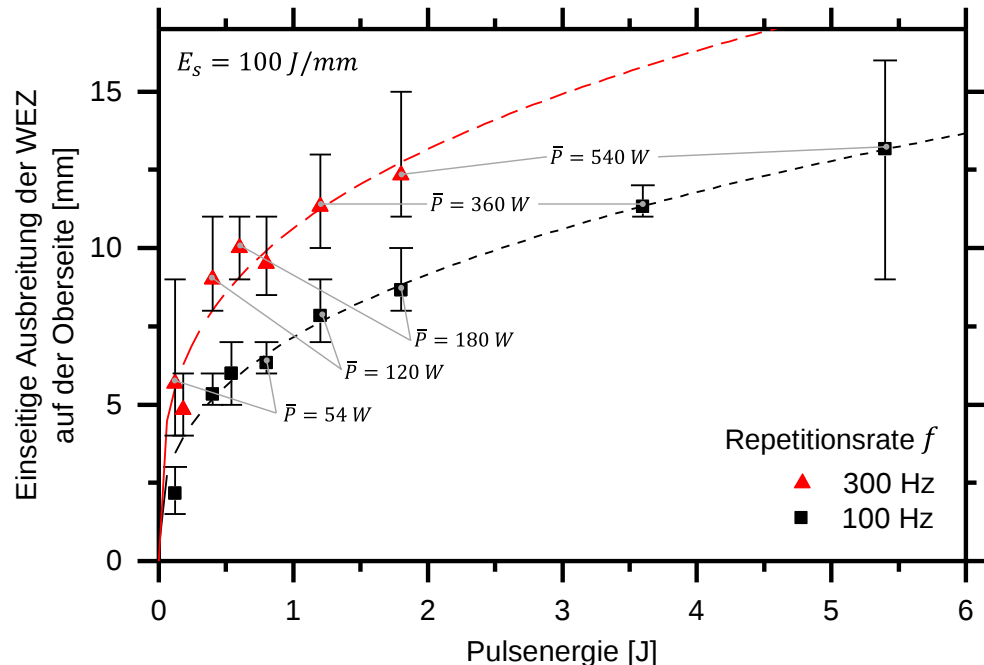
Variation der Repetitionsrate und Pulsdauer

Anhand dieser Versuche wurden die Einflüsse aus der Variation von Repetitionsrate und Pulsdauer auf die WEZ untersucht. Dazu blieb als Zwangsbedingung die Streckenenergie konstant. Die einzelnen Parameter Repetitionsrate, Pulsdauer und Pulsspitzenleistung wurden nacheinander variiert. Für die konstante Streckenenergie folgte daraus ebenfalls eine bedingte Variation der Scangeschwindigkeit. Durch die konstante Streckenenergie wurde die Ausbreitung der WEZ von der pro Strecke eingebrachten Energie entkoppelt. Durch umstellen der Formel 3.3 (S. 27) zur Berechnung der Streckenenergie wurden die Werte für die Scangeschwindigkeit berechnet. Die Prozessfenster dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Prozessparameter für den Einfluss der Repetitionsrate und Pulsdauer auf die WEZ

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Pulsspitzenleistung	$\hat{P}$	0,6; 2; 4; 6	kW
Repetitionsrate	f	100, 300	Hz
Pulsdauer	t_p	0,2; 0,3; 0,9	ms
Streckenenergie	E_s	100	J/mm

Bild 25:
Abhängigkeit der
WEZ von der
Pulsenergie bei
verschiedenen
Repetitionsraten



Wie in Bild 25 dargestellt, führt die Vergrößerung der Repetitionsrate bei gleicher Pulsenergie zu einer Vergrößerung der WEZ. Das bedeutet, dass der zeitliche Aspekt der Energieeinbringung (Periodendauer) für die Ausbreitung der WEZ relevant ist. Beim Vergleich der in Bild 25 dargestellten Fitfunktionen (gestrichelte Linien) fällt bei weiterer Untersuchung auf, dass die Umkehrfunktion für 300 Hz über den Messbereich etwa ein Drittel so groß wie die Fitfunktion für 100 Hz ist. Das bedeutet, dass die mittlere Leistung der bestimmende Einflussparameter für die Größe der WEZ ist. Bei konstanter mittlerer Leistung ist auch für hohe Repetitionsraten ($f \geq 100$ Hz) die WEZ gleich groß.

Dennoch hat auch die Repetitionsrate einen größeren Einfluss auf die Ausbreitung der WEZ als die berechnete Pulsenergie durch Multiplikation von Pulsspitzenleistung und Pulsdauer, s. Formel 0.3 (S. 146), vermuten lässt. Auch wenn die Scangeschwindigkeit bei der dreifachen Repetitionsrate dreimal größer ist, um eine konstante Streckenenergie zu gewährleisten, ist die von dem Werkstück aufgenommene Wärme größer. Da eine gepulste Strahlquelle verwendet wurde, kann der Einfluss durch Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation relevant sein. Offenbar existiert eine Grenzzepetitionsrate, bis zu der keine signifikante Wärmeakkumulation durch Puls-zu-Puls Effekte auftreten.

Konstante Pulsenergie bei variabler Pulsdauer

Die Größe der WEZ steigt sowohl mit der Pulsenergie als auch mit der Repetitionsrate an. Diese war im nachfolgenden Versuch konstant bei 100 Hz und die Pulsenergie wurde zwischen 0,5 J und 1,5 J variiert. Durchgehend variiert

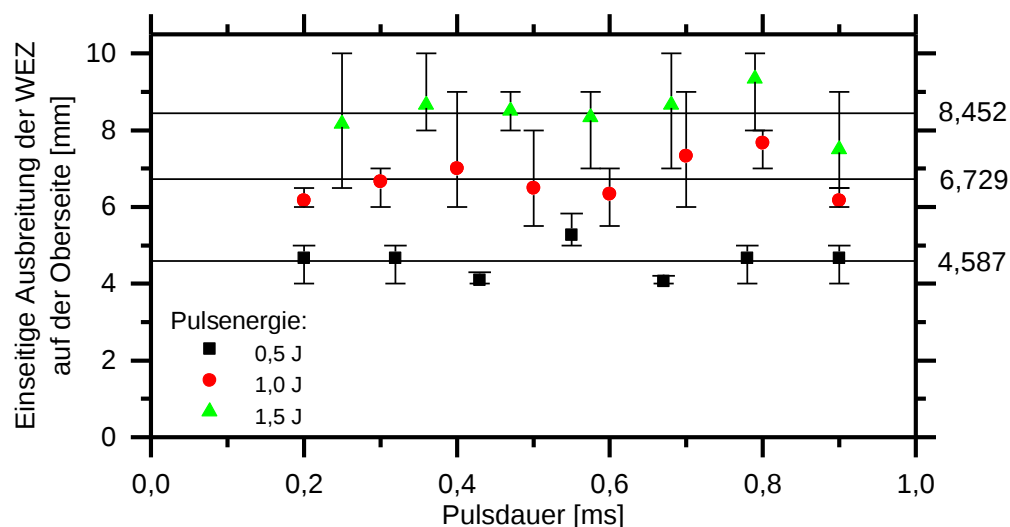
wurde die Pulsdauer. Mit konstanter Pulsenergie ändert sich auch die Pulsspitzenleistung in Abhängigkeit von Formel 0.3 (S.146). Die mittlere Leistung und die Streckenenergie waren innerhalb der Pulsdauervariation bei einer fest eingestellten Pulsenergie konstant. Das Prozessfenster ist in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10:
Prozessparameter für
die Variation der
Pulsdauer bei
konstanter
Pulsenergie

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Pulsdauer	t_p	0,2 - 0,9	ms
Repetitionsrate	f	100	Hz
Scangeschwindigkeit	v_s	2	mm/s
Pulsenergie	E_p	0,5; 1; 1,5	J

Die Ausbreitung der WEZ für diesen Versuch ist in Bild 26 dargestellt. Bei konstanter Pulsenergie ist die Ausbreitung der WEZ, unabhängig von der verwendeten Pulsdauer, nahezu konstant. Die Pulsdauer hatte im Rahmen des untersuchten Messbereiches bei konstanter Pulsenergie daher keinen signifikanten Einfluss auf die Größe der WEZ.

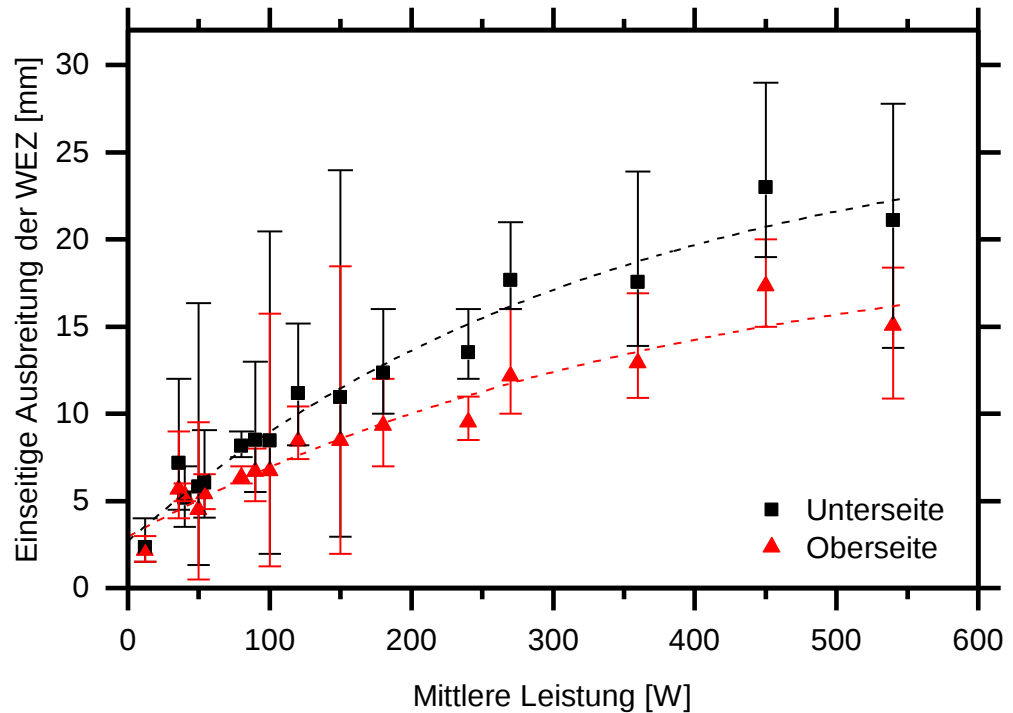
Bild 26: Ausbreitung
der WEZ in
Abhängigkeit der
Pulsenergie über der
Pulsdauer



Variation der mittleren Leistung

Auf Basis der bisher durchgeführten Versuche scheint ein wurzelförmiger Zusammenhang zwischen der mittleren Leistung und der einseitigen Ausbreitung der WEZ zu bestehen (Bild 27).

Bild 27: Ausbreitung der WEZ über der mittleren Leistung



Bei Vergrößerung der mittleren Leistung wird pro Zeiteinheit mehr Energie und damit Wärme von den Carbonfasern absorbiert. Dadurch fließt der Wärmestrom innerhalb der Fasern weiter von der Interaktionszone ins das umliegende Material als bei kleinen mittleren Leistungen. Durch die vergrößerte Reichweite nimmt die konvektive Oberfläche der Fasern zu, worüber Wärme an den Luftstrom abgegeben werden kann. Der Einfluss der konvektiven Kühlung eines angeströmten Faserbündels kann in ausreichender Entfernung dominant werden. Dadurch entsteht ein degressiver Verlauf der einseitigen Ausbreitung der WEZ mit größer werdender mittlerer Leistung. Die stets größere WEZ am Austritt kann durch Streuungen der Laserstrahlung innerhalb des Preforms begründet werden [FWG14]. Mit einem über die Tiefe zunehmenden Streuungsanteil geht mehr Energie in Wärme ohne Abtrag der Fasern über.

Die großen Streuungen in den Einzelmesswerten entstehen wahrscheinlich durch inhomogene Wärmeleitung aufgrund verschieden dicht gepackter Fasern. Je dichter die Fasern zusammenliegen, desto weniger Wärmeabfuhr durch Konvektion tritt ein. Ein Hinweis darauf war der Einfluss der Konvektionskühlung der Absaugung. Durch den erzeugten Luftstrom in der Prozesskammer mit einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 1 m/s wurde die Wärmeleitung auf der Oberfläche ebenfalls beeinflusst. Je größer der Luftstrom, desto kleiner die WEZ. Im Rahmen der Untersuchungen war die Strömungsgeschwindigkeit konstant. Aus Gründen der Gefahr für Bediener, Anlagen und Geräte wurde auf das Abschalten der Absaugung verzichtet.

5.1.5 Einfluss der Prozessstrategie (Sprungtrennverfahren)

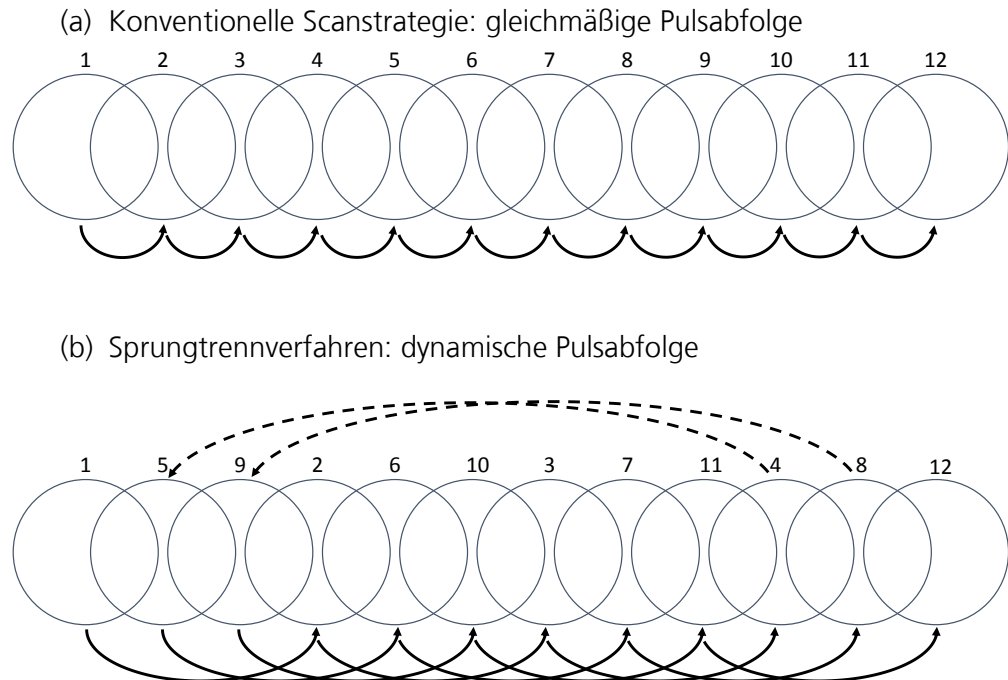
Die sukzessive Wärmeeinbringung beim konventionellen Trepanieren mit großer Repetitionsrate führt zu Wärmeakkumulation, durch die eine vergrößerte Wärmeeinflusszone begünstigt wird. Durch eine ausreichend große zeitliche oder örtliche Pulstrennung kann der Puls-zu-Puls oder bei kleinen geschlossenen Konturen der Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation entgegengewirkt werden, wobei die Erzeugung eines vollständigen Schnittes garantiert werden muss. Eine große zeitliche Pulstrennung bei konstantem Pulsüberlapp, welches einer niedrigen Repetitionsrate der Strahlquelle entspricht, führt zwangsweise zu einer Verkleinerung der Vorschubgeschwindigkeit, wodurch die Produktivität verkleinert wird. Demnach existieren für das konventionelle Trepanieren folgende Fälle:

Prozess- und Verfahrensparameter		(+) Hauptvorteil	(-) Hauptnachteil
Repetitionsrate:	↑	• vollständiger Schnitt	• hohe Wärmeakkumulation → große WEZ
Pulsüberlapp:	↑		
Repetitionsrate:	↑	• hohe Produktivität → kleine Prozesszeit	• Gefahr des unvollständigen Schnittes
Pulsüberlapp:	↓		
Repetitionsrate:	↓	• kleine WEZ	• kleine Produktivität → hohe Prozesszeit
Pulsüberlapp:	↑	• vollständiger Schnitt	
Repetitionsrate:	↓	• kleine WEZ	• Gefahr des unvollständigen Schnittes
Pulsüberlapp:	↓		

Tabelle 11: Einfluss verschiedener Prozess- und Verfahrensparameterkombinationen auf das Prozessergebnis beim kontinuierlichen Scanprozess

Jede zu trepanierende oder scannende Strecke erfordert bei ausreichendem Pulsüberlapp bzw. Vorschub eine minimale Anzahl von Pulsen, um eine vollständige Trennung aller Fasern im Schnittspalt zu ermöglichen. Ziel ist daher die Vergrößerung der Produktivität, indem die Repetitionsrate der Laserstrahlquelle so groß wie möglich sein sollte und die Vorschubgeschwindigkeit so anzupassen, dass eine ausreichend große örtliche Pulstrennung zu keiner signifikanten Wärmeakkumulation führt. Der Durchmesser von Trepanierbohrungen liegt für Krafteinleitungselemente in CFK-Preforms typischerweise im Bereich von einigen Millimetern bis mehreren Zentimetern. Damit ist der Radius häufig größer als die Rückbrandweite der Wirkfäden (WEZ). Hieraus erschließt sich die Untersuchung eines alternierenden Verfahrens mittels örtlicher Pulstrennung zur Erzeugung einer zeitlichen Pulstrennung direkt überlappender Pulse (Bild 28).

Bild 28:
Schematische
Darstellungen von
Scanstrategien zum
Trepanierbohren von
Carbonfasertextilien



Die Vergrößerung der zeitlichen Pulstrennung direkt benachbarter Pulse entspricht einer lokal vorherrschenden, simulierten Repetitionsrate der sich direkt überlappenden Pulse. Diese ist kleiner als die wahre Repetitionsrate der Laserstrahlquelle. Somit soll trotz großer Pulsfrequenz der Laserstrahlquelle die Wärmeeinflusszone verkleinert und die Produktivität konstant gehalten oder sogar vergrößert werden.

Dieses Verfahren wird im Folgenden Sprungtrennverfahren (Bild 28b) genannt und anhand relevanter Verfahrensparameter erläutert.

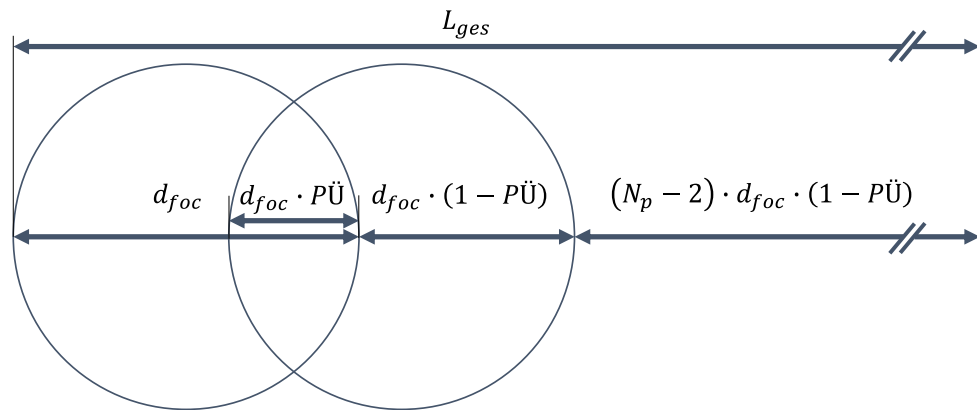
Für die Beschreibung und Analyse des Sprungtrennverfahrens wird im Folgenden jeder Rücksprung (in Bild 28 (b) als gestrichelte Pfeile dargestellt) als Beginn einer neuen Linie definiert. Mit dem Beispiel aus der schematischen Darstellung in Bild 28 (b) besteht demnach eine Linie aus einer Reihe örtlich deutlich voneinander getrennter Pulse, z.B. Pulse 1, 2, 3 und 4, bevor nach Rücksprung des Scanners eine neue Reihe (Pulse 5 bis 8) begonnen wird. Die Summe aller Reihen und Pulse führt zu einem vollständigen Schnitt aller Fasern mit einem auf das Prozessergebnis bezogenen definierten, gleichmäßigen Pulsüberlapp.

Die Vorgehensweise zur Bestimmung relevanter Prozessparameter zur Auslegung des Sprungtrennverfahrens erfolgt über die Bestimmung folgender Verfahrenskenngrößen:

1. Erforderliche Mindestanzahl Pulse $N_{p,min}$
2. Theoretisch minimale Prozesszeit $t_{proz,min}$
3. Anzahl erforderlicher Linien N_L
4. Anzahl Pulse pro Linie $N_{p/L}$
5. Reale Prozesszeit $t_{proz,real}$
6. Reale Anzahl Pulse $N_{p,real}$
7. Realer Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{p\&s,real}$ im Point-and-Shoot Modus
8. Länge einer Linie L_{Linie}
9. Versatz zwischen zwei aufeinander folgenden Linien ds
10. Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse innerhalb einer Linie Δs

Zuerst wird die erforderliche Mindestanzahl an Pulsen $N_{p,min}$ zum vollständigen Trennen berechnet. Aus der Beschreibung der erforderlichen Gesamtschnittlänge L_{ges} kann, bei mit einem vorerst gewünschten Pulsüberlapp $P\ddot{U}$, die Mindestpulsanzahl $N_{p,min}$ bestimmt werden. In Bild 29 ist die Gesamtschnittlänge als Funktion des Fokussdurchmessers d_{foc} , der Pulsanzahl N_p und dem gewünschten Pulsüberlapp $P\ddot{U}$ am vereinfachten Beispiel einer geraden Linie dargestellt.

Bild 29:
Schematische
Darstellung zur
Bestimmung der
minimalen
Pulsanzahl bei sich
überlappenden
Pulsen



Die Gesamtschnittlänge ist somit die Summe aus einem Fokussdurchmesser d_{foc} und aller Verschiebungen:

$$5.3 \quad L_{ges} = d_{foc} + (N_p - 1) \cdot d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U}) = d_{foc} \cdot (N_p \cdot (1 - P\ddot{U}) + P\ddot{U})$$

Dabei ist L_{ges} für alle $d_{foc} > 0$, $N_p \geq 1$ und $P\ddot{U} \leq 1$ definiert. Da bei gegebenem L_{ges} und vordefiniertem $P\ddot{U}$ die Pulsanzahl N_p nach Umstellen von Gleichung 5.3 nicht zwangsweise eine natürliche Zahl ergibt, muss das Ergebnis noch aufgerundet werden:

$$5.4 \quad N_{p,min} = \left\lceil \frac{L_{ges} - d_{foc} \cdot P\ddot{U}}{d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U})} \right\rceil$$

Mit der vorerst gewünschten Repetitionsrate der Laserstrahlquelle f_{Laser} wird die minimal erforderliche Prozesszeit $t_{proz,min}$ bestimmt:

5.5

$$t_{proz,min} = \frac{N_{p,min}}{f_{Laser}}$$

Weiterhin sollte eine ausreichend große Abkühlzeit Δt_{sim} zwischen zwei örtlich direkt benachbarten, sich überlappenden Pulsen gewährleistet werden, um einer Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation entgegenzuwirken. Die Abkühlzeit Δt_{sim} wird im Folgenden über eine vorher festzulegende, frei wählbare simulierte Repetitionsrate f_{sim} dargestellt:

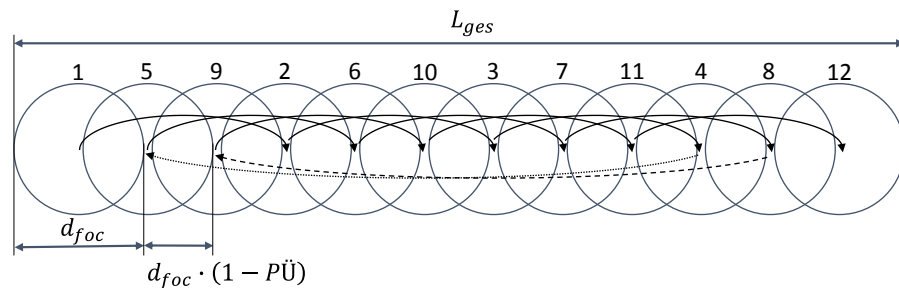
5.6

$$\Delta t_{sim} = \frac{1}{f_{sim}} = \frac{N_{p/L}}{f_{Laser}}$$

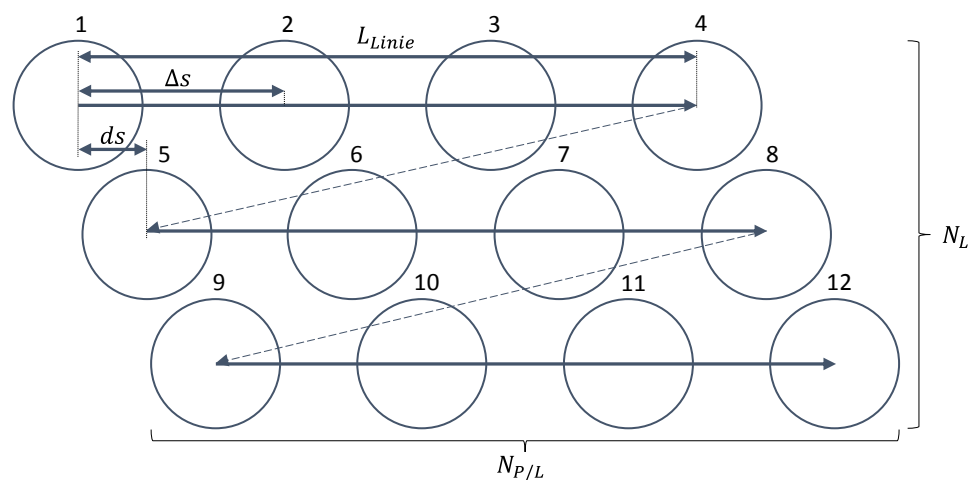
Zur Veranschaulichung ist die Zerlegung der Pulsreihenfolge in Linien in Bild 30b schematisch dargestellt.

Bild 30:
Schematische
Darstellung der
Dekomposition des
Sprungtrenn-
verfahrens in
mehrere Linien

(a) Wahre Pulsabfolge beim Sprungtrennverfahren



(b) Schematische Zerlegung der Pulsabfolge in Linien (kein lateraler Versatz!)



Mit der minimal erforderlichen Prozesszeit $t_{proz,min}$ und der simulierten Repetitionsrate f_{sim} kann die erforderliche Anzahl Linien N_L berechnet werden:

$$5.7 \quad N_L = \lceil t_{proz,min} \cdot f_{sim} \rceil$$

Die erforderliche Anzahl an Pulsen pro Linie $N_{P/L}$ kann über zwei Arten durch Aufrundung ermittelt werden. Mit der bekannten Mindestpulsanzahl $N_{P,min}$ und der erforderlichen Anzahl Linien N_L oder mit der Repetitionsrate des Lasers f_{Laser} und der simulierten Repetitionsrate f_{sim} zweier benachbarter Pulse:

$$5.8 \quad N_{P/L} = \left\lceil \frac{N_{P,min}}{N_L} \right\rceil \vee N_{P/L} = \left\lceil \frac{f_{Laser}}{f_{sim}} \right\rceil$$

Falls der Quotient aus f_{Laser} und f_{sim} eine natürliche Zahl aus $\mathbb{N} \setminus \{0\}$ ist, sind beide Lösungen für $N_{P/L}$ gleich. Falls die Lösung beider Gleichungen nicht gleich ist, hat dies einen direkten Einfluss auf die wahre simulierte Repetitionsrate $f_{sim,real}$, die analog zu Formel 5.6 gebildet wird:

$$5.9 \quad f_{sim,real} = \frac{f_{Laser}}{N_{P/L}}$$

Durch die Rundungen ändert sich folglich auch die reale Gesamtanzahl Pulse N_P für den Scanprozess:

$$5.10 \quad N_P = N_{P/L} \cdot N_L = t_{proz} \cdot f_{Laser}$$

Da $N_{P,min}$ und N_P nicht zwangsweise gleich sein müssen, wird der Pulsüberlapp verändert. Der neue wahre Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{p\&s,real}$ wird analog aus Formel 5.3 berechnet:

$$5.11 \quad P\ddot{U}_{p\&s,real} = 1 - \frac{L_{ges} - d_{foc}}{d_{foc} \cdot (N_P - 1)}$$

Mit dem wahren Pulsüberlapp kann die Länge einer Linie L_{Linie} vom Mittelpunkt des ersten bis zum letzten Puls berechnet werden:

$$5.12 \quad L_{Linie} = d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U}_{p\&s,real}) \cdot N_L \cdot (N_{P/L} - 1)$$

Der Versatz zweier aufeinanderfolgender Linien ds ist der Mittelpunktabstand zweier direkt benachbarter, überlappender Pulse:

$$5.13 \quad ds = d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U}_{p\&s,real})$$

Als letzter relevanter geometrischer Parameter wird der Abstand Δs zweier aufeinander folgender Pulse innerhalb einer Linie ermittelt:

5.14

$$\Delta s = \frac{L_{Linie}}{N_{P/L} - 1} = d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U}_{p\&s,real}) \cdot N_L$$

Der örtliche Abstand Δs zwischen zwei Pulsen sollte dabei so groß sein, dass sich die Wärmeeinflusszone zweier Einzelpulsbohrungen in der ersten Linie auf dem Carbonfasertextil nicht überlappen. Durch einen ausreichend großen örtlichen Pulsabstand innerhalb einer Linie und einer ausreichend großen zeitlichen Abstand (Periodendauer der simulierten Repetitionsrate) direkt benachbarter, überlappender Pulse, kann eine kleine Wärmeeinflusszone sichergestellt werden.

Weiterhin hängen Δs und f_{Laser} voneinander ab. Eine erste gute Näherung für Δs kann durch Vernachlässigung aller vorherigen oberen Gaußklammern hergestellt werden. Häufig ist die Gesamtlänge L_{ges} der Scankontur deutlich größer als der Fokusbereich. In diesen Fällen kann Δs abgeschätzt werden mit:

5.15

$$\Delta s \approx \frac{(L_{ges} - d_{foc} \cdot P\ddot{U})}{f_{Laser} \cdot f_{sim}^{-1}} \stackrel{L_{ges} \gg d_{foc}}{\approx} \frac{L_{ges} \cdot f_{sim}}{f_{Laser}}$$

Für einen Point-and-Shoot Modus beim Scannen kann unter Vernachlässigung eventueller Verzögerungen beim Springen des Scanners vom Ende einer Linie zum Anfang einer neuen Linie die Prozesszeit $t_{proz,p\&s}$ abgeschätzt werden:

5.16

$$t_{proz,p\&s} = \frac{N_{P/L} \cdot N_L}{f_{Laser}} = \frac{N_P}{f_{Laser}}$$

Falls die Rücksprungzeit aufgrund der limitierten Sprunggeschwindigkeit des Scanners v_{sprung} länger als eine Pulsperiode τ_p und der Pulsdauer t_p der Laserstrahlung andauert, muss die kumulierte Wartezeit aus den Rücksprüngen berücksichtigt werden. Die erforderliche Zeit für die Neupositionierung der Scannerspiegel ist bei einer geraden Linie maximal:

5.17

$$t_{sprung} = \frac{L_{Linie} - d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U}_{p\&s,real})}{v_{sprung}}$$

Angenommen wird, dass Beschleunigungs- und Abbremszeiten inkl. Lageregelung für die Spiegel vernachlässigbar klein sind. Der Zähler in Formel 5.17 entspricht dem Rücksprungweg von der Position des letzten Pulses einer Linie zur Position des Anfangspulses einer neuen Linie. Bei kurzen Scanstrecken mit wenigen Sprüngen oder einer Kreisgeometrie ist die Wartezeit aufgrund der hohen Dynamik heutiger Galvanometer-Scanner vernachlässigbar klein. Bei

langen, geraden Scanstrecken mit häufigen, weiten Sprüngen und ggf. nicht ausreichend großer Sprunggeschwindigkeit des Scanners kann die Gesamtprozesszeit durch die kumulierte Wartezeit signifikant vergrößert werden. Dadurch ändert sich wiederum die simulierte Repetitionsrate f_{sim} . Dabei gelten die Fälle:

$$\begin{aligned}
 \text{(a) Wartezeit muss beachtet werden:} \quad & \frac{1}{f_{Laser}} - t_p - t_{delay} < t_{sprung} \\
 & \rightarrow t_{warte} = t_{sprung} - \frac{1}{f_{Laser}} + t_p + t_{delay} \\
 \text{(b) Wartezeit nicht vorhanden:} \quad & \frac{1}{f_{Laser}} - t_p - t_{delay} \geq t_{sprung} \\
 & \rightarrow t_{warte} = 0
 \end{aligned}$$

Die Zeit t_{warte} kann in der Scannersteuerung dem jump delay t_{delay} hinzugefügt werden. Dies ist häufig eine manuell voreinzustellende Wartezeit für Regelvorgänge beim Einpendeln der Spiegel an der neuen Position bevor ein Laserpuls emittiert wird. Die neue simulierte Repetitionsrate f'_{sim} ist im Fall (a) bei einer erforderlichen Wartezeit des Scanners kleiner:

5.18

$$f_{sim} \xrightarrow{(a)} f'_{sim}: \frac{1}{f'_{sim}} = \frac{N_{P/L}}{f_{Laser}} + t_{warte}$$

Wird eine erforderliche Wartezeit nicht eingehalten, kann der Scanner bereits während der Pulsdauer zur nächsten Position springen, wodurch der Point-and-Shoot-Bohrprozess gestört wird. Die Pulsenergie wird in diesem Fall nicht mehr punktuell, sondern teilweise entlang des Sprungweges eingestrahlt. Daraus ergibt sich für die maximal mögliche Repetitionsrate der Laserstrahlquelle ohne weitere zusätzliche Wartezeiten:

5.19

$$f_{Laser,max} \leq \frac{1}{t_p + t_{delay} + t_{sprung}}$$

Die wahre Prozesszeit im Point-and-Shoot Modus $t_{proz,p\&s,real}$ im Fall signifikant großer Wartezeiten durch Sprungverzögerungen des Scanners beträgt:

5.20

$$t_{proz,p\&s,real} = \frac{N_p}{f_{Laser}} + (N_L - 1) \cdot t_{warte}$$

Die Ausgabe der Koordinatenabfolge bei der Erstellung eines oder mehrerer Schnitte erfolgt durch die nacheinander überlagerten Linien. Innerhalb einer Linie haben die Pulse den Abstand Δs und werden $N_{P/L}$ -oft platziert. Danach wird zum Anfang der Linie verfahren und der neue Startpunkt um ds verschoben. Diese

Iteration findet N_L -mal statt. Beispiele für die Vorgehensweise sind im Anhang auf den Seiten 148f (Linie) und Seite 150f (Kreis) mit den zugehörigen C/C++ Quellcodes dargestellt. Das Vorgehen für das Sprungtrennverfahren in Kreiskonturen ist im Anhang ab S. 154 dargestellt.

5.1.6 Ergebnisse und Vergleich am Beispiel eines fünfflagigen Preforms

Um die Effektivität des Sprungtrennverfahrens darzustellen, wurden die zum Erzeugen eines geraden Schnittes relevanten Parameter ermittelt. Als Grundkörper wurde ein Preform mit fünf bi-axialen Lagen verwendet. Im theoretisch nachfolgenden, konsolidierten Zustand hat das CFK-Bauteil eine resultierende Dicke von etwa 2-3 mm, was einer häufig auftretenden Dicke von CFK-Bauteilen entspricht.

Zur Realisierung des Sprungtrennverfahrens für ein fünfflagiges bi-axiales Gelege müssen folgende Faktoren bestimmt werden:

- 1) Die minimal erforderliche Pulsenergie $E_{P,min}$, um mit einem Puls das ganze Preform zu durchbohren (Einzelpulsbohren)
- 2) Der minimal erforderliche Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{min}$, um einen vollständigen Schnitt zu erzeugen ohne intakte Fasern in der Schnittfuge zu hinterlassen
- 3) Die simulierte Repetitionsrate f_{sim} zur Bestimmung der kleinstmöglichen Wärmeeinflusszone
- 4) Der geometrische Abstand Δs zweier aufeinanderfolgender Pulse innerhalb einer Linie, um Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation zu unterbinden

Als Referenz wurde ein Schnitt mit einer Länge von 30 mm erzeugt, welche im Falle einer Kreiskontur einen Durchmesser von ca. 9,5 mm entspricht. Diese Größe ist für Inserts mit einem M6 Innengewinde geeignet.

Bestimmung der minimal erforderlichen Pulsenergie $E_{P,min}$

Um die minimal erforderliche Pulsenergie zu bestimmen, wurden Pulse mit verschiedener Pulsspitzenleistung und Pulsdauer verwendet. Sofern im Auflichtmikroskop mit Rücklicht ein klarer Lichtpunkt zu erkennen ist, gilt das Preform als vollständig penetriert. Jeder Versuch wird dreimal wiederholt. In Tabelle 12 sind das Prozessfenster und das Ergebnis für die minimal erforderliche Pulsenergie zum Durchtrennen des Preforms mit einem Puls wiedergegeben.

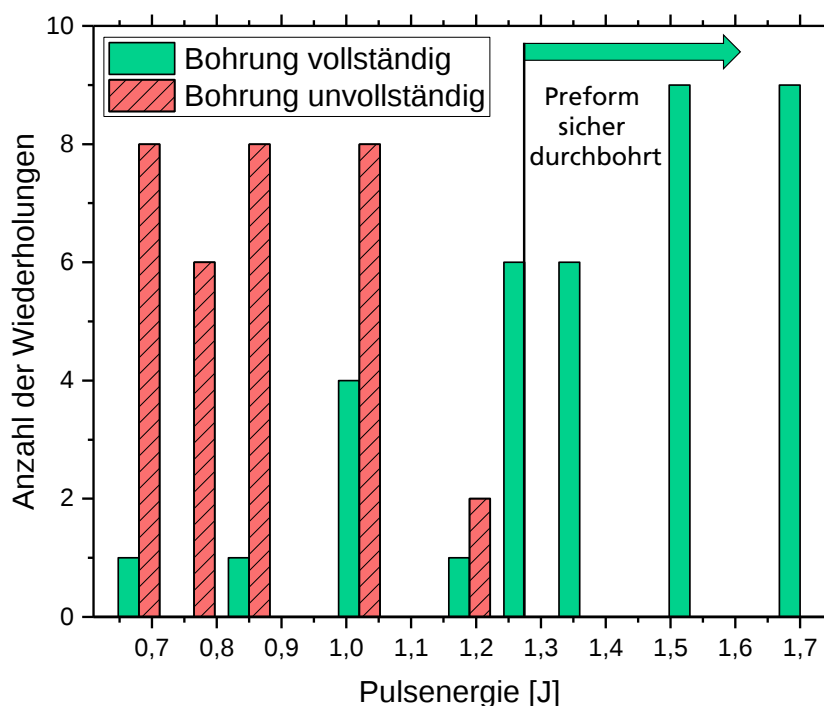
Tabelle 12:
Erforderliche
Pulsenergie in [J]
zum Durchtrennen
eines fünf-lagigen
Preforms mit einem
Puls (rot: nicht
getrennt; orange:
teilweise getrennt;
grün: sicher
getrennt)

		Pulsspitzenleistung $\hat{P}$ [kW]					
		1	2	3	4	5	6
Pulsdauer t_p [ms]	0,2	0,17	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02
	0,3	0,255	0,51	0,765	1,02	1,275	1,53
	0,4	0,34	0,68	1,02	1,36	1,7	2,04
	0,5	0,425	0,85	1,275	1,7	2,125	2,55
	0,6	0,51	1,02	1,53	2,04	2,55	3,06
	0,7	0,595	1,19	1,785	2,38	2,975	3,57
	0,8	0,68	1,36	2,04	2,72	3,40	4,08
	0,9	0,765	1,53	2,295	3,06	3,825	4,59
	1,0	0,85	1,70	2,55	3,40	4,25	5,10

(Werte im Raster entsprechen der gemessenen Pulsenergie in [J] am Werkstück)

Ab einer Pulsenergie $E_{P,min}$ von 1,275 J wurde ein fünf-lagigen bi-axialen Preform sicher getrennt. In der Balkendarstellung in Bild 31 ist der Einfluss der Pulsenergie zum Trennen des Preforms dargestellt.

Bild 31:
Balkendiagramm zur
Bestimmung der
minimal
erforderlichen
Einzelpulsenergie
 $E_{P,min}$ zum Trennen
eines fünf-lagigen
Preforms



Während der Untersuchung wurde ein Lochdurchmesser d_L von 133 μm am Eintritt und 125 μm am Austritt gemessen. Verglichen mit dem auf der Preformoberfläche positionierten Fokus mit einem Durchmesser von $d_{foc} = 82 \mu\text{m}$ war der Lochdurchmesser im Preform selbst bei einer minimalen Pulsenergie von 1,275 J etwa 50 μm (65 %) größer als der Fokusdurchmesser. Dies bedeutet,

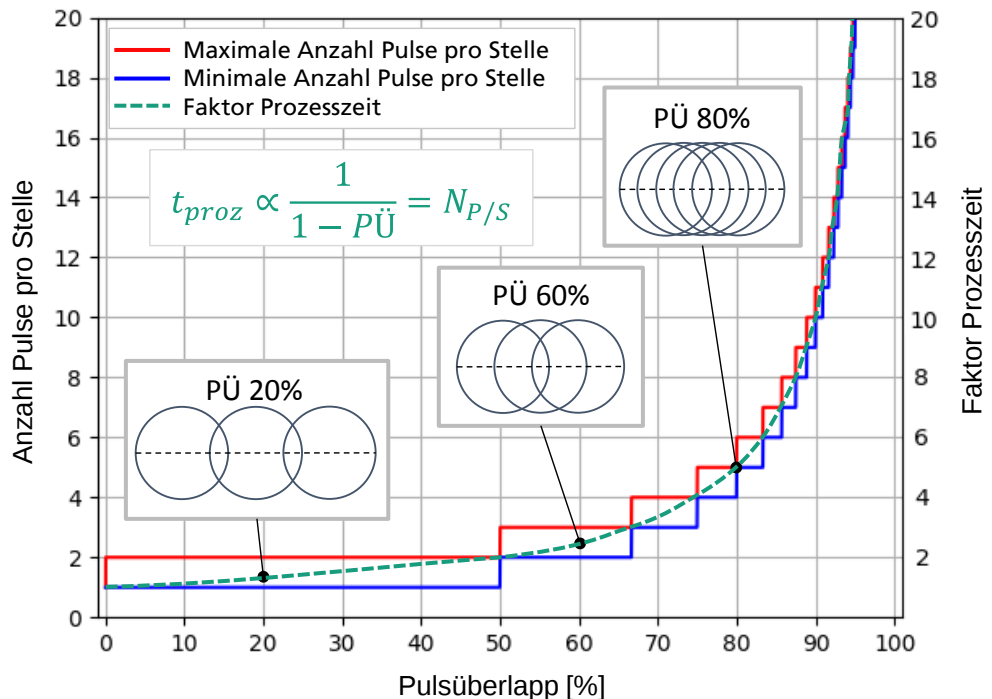
dass in einem umlaufenden Abstand von 25 µm vom gemessenen Fokusrand noch Verdampfungstemperatur vorgelegen haben musste.

Die erforderliche Energie E_V (Formel 3.5, S.30), um eine Bohrung mit durchschnittlich 129 µm Durchmesser herzustellen, liegt bei etwa 0,08 J. Dabei wurden eine Preformdicke von 3,5 mm, ein Faservolumengehalt von 35 % und die Materialkennwerte in Tabelle 6 (S.39) angenommen. Verglichen mit dem Ergebnis aus Bild 31 ist $E_{p,min}$ mit 1,275 J etwa 16 mal größer als E_V . Ein großer Anteil der Pulsenergie wurde beim Einzelpulsbohren demnach nicht für das Trennen der Fasern genutzt, sondern ging in Form von Wärmeübertrag in die Fasern ohne Abtrag (Wärmeleitung), Reflektionen (Faseroberfläche), Wechselwirkung mit abgetragenen Partikeln (Abschirmung) und Transmission (durch Bohrungsaustritt) verloren.

Minimal erforderlicher Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{min}$

Als nächstes wurde der minimal erforderliche Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{min}$ bestimmt. Unabhängig vom Fokusdurchmesser ist die Prozesszeit mit dem linearen Pulsüberlapp verknüpft und hat daher einen signifikanten Einfluss auf die erforderliche Prozesszeit. Das Verhältnis zwischen $P\ddot{U}$, t_{proz} und der Anzahl Pulse pro Stelle $N_{P/S}$ ist in Bild 32 dargestellt.

Bild 32: Einfluss des linearen Pulsüberlapp auf die Anzahl der Pulse pro Stelle und die Prozesszeit



Eine Erhöhung des Pulsüberlapp von z.B. 20 % → 60 % → 80 % → 90 % führt jeweils zu einer Verdopplung der Prozesszeit. Ein kleiner linearer Pulsüberlapp ist

demnach für einen produktiven Prozess anzustreben, wobei ein vollständiger Schnitt ohne ungetrennte Fasern im Schnittpalt gesichert sein muss.

In Tabelle 13 ist das Ergebnis für den minimal erforderlichen Pulsüberlapp, bezogen auf den Fokusbereich d_{foc} , für einen fünfflagigen bi-axialen Preform dargestellt. In den Versuchen wurden 30 mm lange Linien in einem konventionellen Scanprozess hergestellt. Die Repetitionsrate war einheitlich 10 Hz. Jeder Versuch wurde dreimal wiederholt. Aufgrund einer minimal einstellbaren Scangeschwindigkeit von 0,18 mm/s konnten nur Linien mit einem Pulsüberlapp bis 78 % erzeugt werden.

Tabelle 13: Minimal erforderlicher Pulsüberlapp zum vollständigen Trennen eines fünfflagigen bi-axialen Preforms

	$P\ddot{U}_{p\&s,real}$ [%]	v_{scan} [mm/s]	t_{proz} [s]	Anzahl der Pulse pro Stelle
nicht getrennt	0	0,81	37,0	1
	10	0,73	41,1	1-2
	20	0,65	46,1	1-2
teilweise getrennt	30	0,57	52,6	1-2
	40	0,49	61,2	1-2
vollständig getrennt	50	0,41	73,2	2
	60	0,32	93,7	2-3
	70	0,24	125,0	3-4
	78	0,18	187,5	4-5

Ab einem linearen Pulsüberlapp von 50 % wurde das fünfflagige Preform sicher und reproduzierbar getrennt. Dies bedeutet, dass jede Stelle auf der gescannten Strecke mindestens zweimal von einem Laserpuls getroffen wurde. Da mit einer minimalen Pulsenergie von 1,275 J das Durchtrennen mit einem Puls reproduzierbar möglich war, kann durch das Ergebnis in Tabelle 13 weiterhin angenommen werden, dass sich die Fasern während der Bearbeitung signifikant bewegen können. Anders als bei konsolidierten CFK-Bauteilen, bei dem die Fasern ortsfest von der Matrix fixiert werden, reichen die Faserdichte und die Wirkfäden im Preform nicht aus, um die Fasern in ausreichendem Maße zu fixieren. Aufgrund dieser Tatsache ist die Verwendung eines Binders zwischen den einzelnen Gelegelagen sinnvoll. Weitere eingehende Untersuchungen mit bebinderten Carbonfaserpreforms wurden im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Vielzahl verschiedener Bindemittel und den Auswirkungen auf das Prozessergebnis bei unterschiedlichen Bindermengen zwischen den Einzellagen nicht durchgeführt.

Identifikation einer geeigneten simulierten Repetitionsrate f_{sim}

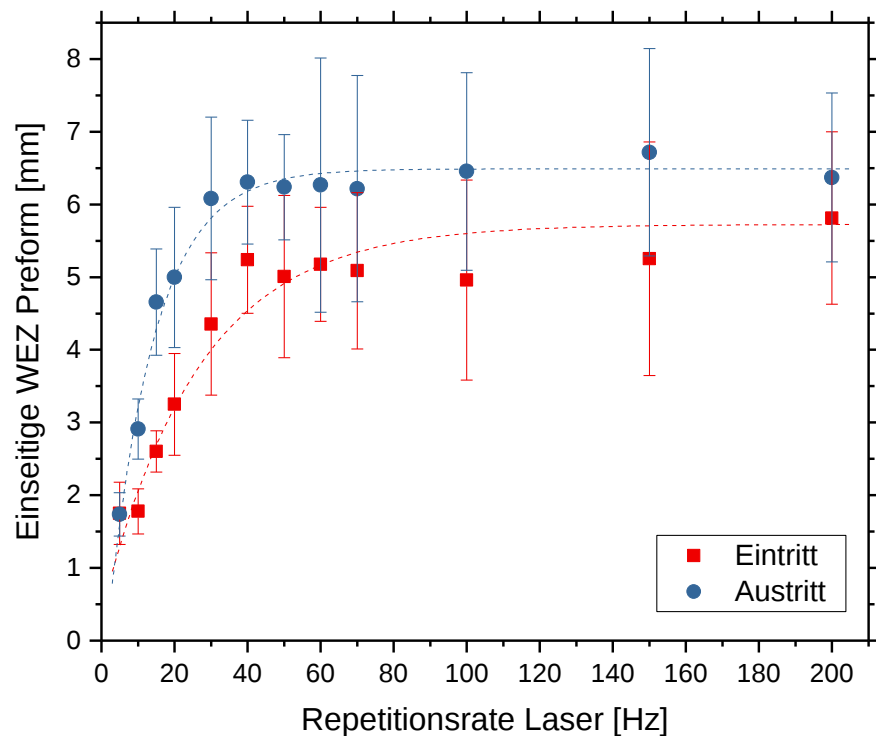
Zur Bestimmung einer geeigneten simulierten Repetitionsrate, um eine möglichst kleine WEZ zu erzeugen, wurden 30 mm lange Schnitte im konventionellen Scanverfahren hergestellt. Dies war zweckmäßig, da im Rahmen dieser

Versuchsreihe der Einfluss der Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation untersucht werden sollte, dies aber während des Sprungtrennverfahrens einer Scan-zu-Scan Wechselwirkung entspricht. Der Pulsüberlapp betrug in allen Versuchen ca. 50 %. Die Scangeschwindigkeiten wurden so angepasst, dass die von der Strahlquelle emittierte Gesamtenergie aller Pulse zusammen (E_{ges}) etwa gleich groß war. In Tabelle 14 und Bild 33 sind das Prozessfenster und die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt.

Tabelle 14: Variation der Repetitionsrate f_{Laser} zur Bestimmung von f_{sim} und der minimal erzielbaren WEZ

f_{Laser} [Hz]	v_{scan} [mm/s]	t_{proz} [s]	E_{ges} [J]	$P\ddot{U}$ [%]
5	0,20	150,00	1.125,00	50,92
10	0,41	73,17	1.097,56	49,69
15	0,61	49,18	1.106,56	50,10
20	0,81	37,04	1.111,11	50,31
30	1,22	24,59	1.106,56	50,10
40	1,63	18,40	1.104,29	50,00
50	2,04	14,71	1.102,94	49,94
60	2,44	12,30	1.106,56	50,10
70	2,85	10,53	1.105,26	50,04
100	4,07	7,37	1.105,65	50,06
150	6,11	4,91	1.104,75	50,02
200	8,15	3,68	1.104,29	50,00

Bild 33: Größe der einseitigen WEZ an Preformober- und -unterseite (fünf Lagen) über der Repetitionsrate des Lasers. Hier gilt: $f_{Laser} = f_{sim}$



Aus den Messwerten in Bild 33 wird deutlich, dass eine Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation bereits bei kleinen Repetitionsraten von 5 Hz und einer Pulsdauer von 0,5 ms auftritt. Die Abkühlzeit zwischen den Pulsen reicht demnach nicht aus, um eine lokale Temperaturerhöhung zu unterbinden. Da sich aufeinander folgende Pulse beim kontinuierlichen Scannen direkt überlappen, kann eine Vermeidung von Wärmeakkumulation bei Verwendung einer langgepulsten Faserlaserstrahlquelle nur durch eine ausreichende zeitliche und örtliche Trennung der Pulse erzielt werden. Bei den gewählten Prozessparametern nahm die Ausbreitung der WEZ bis zu einer Repetitionsrate von 40 Hz stark zu. Danach vergrößerte sich die WEZ nur noch leicht und näherte sich, unter Beachtung der statistischen Unsicherheit, einem Grenzwert asymptotisch an. Dieser Verlauf kann einerseits durch die Wärmeleitung entlang der Faser, andererseits durch den Einfluss der größer werdenden konvektiven Manteloberfläche der Einzelfasern begründet werden.

Bestimmung des zeitlich-örtlichen Abstandes Δs zweier aufeinander folgender Pulse innerhalb einer Linie

Zur Festlegung einer geeigneten Sprungtrennstrategie wurde der Abstand zweier aufeinander folgender Pulse innerhalb einer Linie Δs bestimmt, um den Einfluss der zeitlich-örtlichen Puls-zu-Puls Wechselwirkung zu minimieren. Anhand der Variationen von der Laserrepetitionsrate f_{Laser} und der Gesamtlänge der Scanstrecke L_{ges} wurde der Abstand Δs variiert. Gleichzeitig wurde die Pause zwischen zwei Pulsen mit dem Abstand Δs variiert, um den zeitlichen Einfluss bewerten zu können. Das Versuchsfenster ist in Tabelle 15 dargestellt.

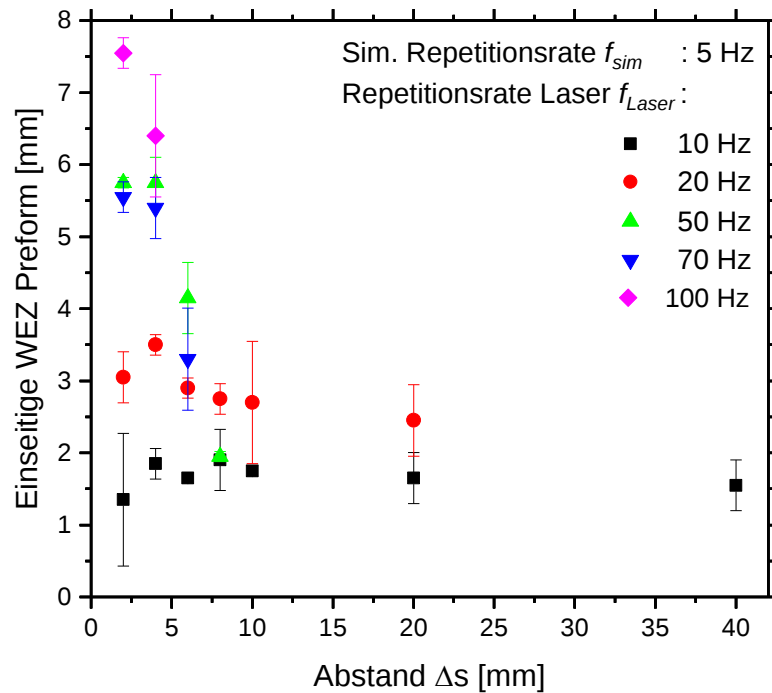
Tabelle 15: Zeitliche und örtliche Variation von Δs durch Variation von f_{Laser} und L_{ges} ($f_{sim} = 5$ Hz)

Repetitionsrate des Lasers f_{Laser} [Hz]	Gesamtlänge L_{ges} [mm]	Entspr. Abstand zweier Pulse in einer Linie Δs [mm]
10	4 – 20 ($\Delta 4$); 40; 80	2 – 10 ($\Delta 2$); 20; 40
20	8 – 40 ($\Delta 8$); 80	2 – 10 ($\Delta 2$); 20
50	20 – 80 ($\Delta 20$)	2 – 8 ($\Delta 2$)
70	28; 56; 84	2; 4; 6
100	40; 80	2; 4

Die Auswirkungen höherer Repetitionsraten von $f_{Laser} > 100$ Hz konnten aufgrund des begrenzten Arbeitsbereiches des Scanners von 80 mm x 80 mm und einer simulierten Repetitionsrate von $f_{sim} = 5$ Hz nicht untersucht werden (vgl. Formel 5.15, S.56).

Das Ergebnis der zeitlichen und örtlichen Variation von Δs ist in Bild 34 dargestellt. Zwischen jedem Versuch wurde eine Pause von 2 min eingehalten.

Bild 34: Größe der einseitigen WEZ auf der Preformoberfläche über den Abstand Δs bei verschiedenen Repetitionsraten f_{Laser}



Bei Verwendung einer Laserrepetitionsrate von 10 Hz reichen bereits wenige Millimeter Abstand zwischen zwei direkt aufeinander folgenden Pulsen aus, um eine konstante Wärmeeinflusszone zu erzeugen. Der zeitliche Effekt ist bereits bei 20 Hz zu beobachten: die Abkühlzeit zwischen den Pulsen reicht nicht mehr aus, um auch bei großen Pulsabständen von 20 mm eine kleine WEZ unter 2 mm Breite zu erzeugen. Besonders stark tritt der Wärmeakkumulationseffekt bei großen Repetitionsraten ab 50 Hz hervor. Wird der Abstand zwischen den Pulsen innerhalb einer Linie nur wenig verkleinert, vergrößert sich die WEZ stark. Ab einer Repetitionsrate von 50 Hz tritt während der Bearbeitung eine deutlich sichtbare Rauchentwicklung in der Bearbeitungszone auf. In diesem Fall ist die Wärmeentwicklung so groß, dass Schlichte und Wirkfäden verbrennen und die Fasern in großen Bereichen um die Trennzone stark oxidieren.

Mit den gewählten Verfahrensparametern konnte im Rahmen der Versuche eine minimale einseitige WEZ mit durchschnittlich ca. 1,5 mm erzeugt werden. Die kleinsten Wärmeeinflusszonen wurde mit einer Repetitionsrate von $f_{Laser} = 5$ Hz im konventionellen Verfahren und $f_{Laser} / f_{sim} = 10 \text{ Hz} / 5 \text{ Hz}$ im Sprungtrennverfahren erzeugt.

Demonstration eines erfolgreichen Sprungtrennverfahrens im Vergleich zu einem langsamen und einem schnellen kontinuierlichen Scanprozess

Zum Schluss wurde das Potenzial des Sprungtrennverfahrens anhand eines Vergleiches mit einem langsam und einem schnellen kontinuierlichen Scanprozess verglichen. Die Verfahrensparameter und Ergebnisse bezüglich der WEZ auf der Preformoberfläche sind in Bild 35 dargestellt.

Bild 35: Aufsicht auf lineare Schnitte von mit verschiedenen Prozessstrategien getrennten Preforms

Kontinuierliches Scannen (schnell)		a
Pulsspitzenleistung $\hat{P}$	3 kW	
Pulsdauer t_p	0,5 ms	
Repetitionsrate f_{Laser}	70 Hz	
Scangeschwindigkeit v_s	2,28 mm/s	
Pulsüberlapp $P\ddot{U}$	60 %	
Prozesszeit t_{proz}	36,89 s	
Sprungtrennverfahren		b
Pulsspitzenleistung $\hat{P}$	3 kW	
Pulsdauer t_p	0,5 ms	
Repetitionsrate f_{Laser}	70 Hz	
Sim. Repetitionsrate f_{sim}	10 Hz	
Pulsüberlapp $P\ddot{U}$	60 %	
Prozesszeit t_{proz}	39,51 s	
Kontinuierliches Scannen (langsam)		c
Pulsspitzenleistung $\hat{P}$	3 kW	
Pulsdauer t_p	0,5 ms	
Repetitionsrate f_{Laser}	10 Hz	
Scangeschwindigkeit v_s	0,33 mm/s	
Pulsüberlapp $P\ddot{U}$	60 %	
Prozesszeit t_{proz}	254,59 s	

Der in den Bildern 35a-c jeweils größere Messwert entspricht der Rückbrandweite der Wirkfäden und damit der maximal möglichen Schädigung der Gelegele. Der jeweils kleinere Messwert entspricht der oxidativen Schädigung der Fasern. In diesem Bereich ist die Struktur der Fasern gänzlich verschieden von der Faser im Ausgangszustand. Die oxidierten Faserenden sind sehr brüchig.

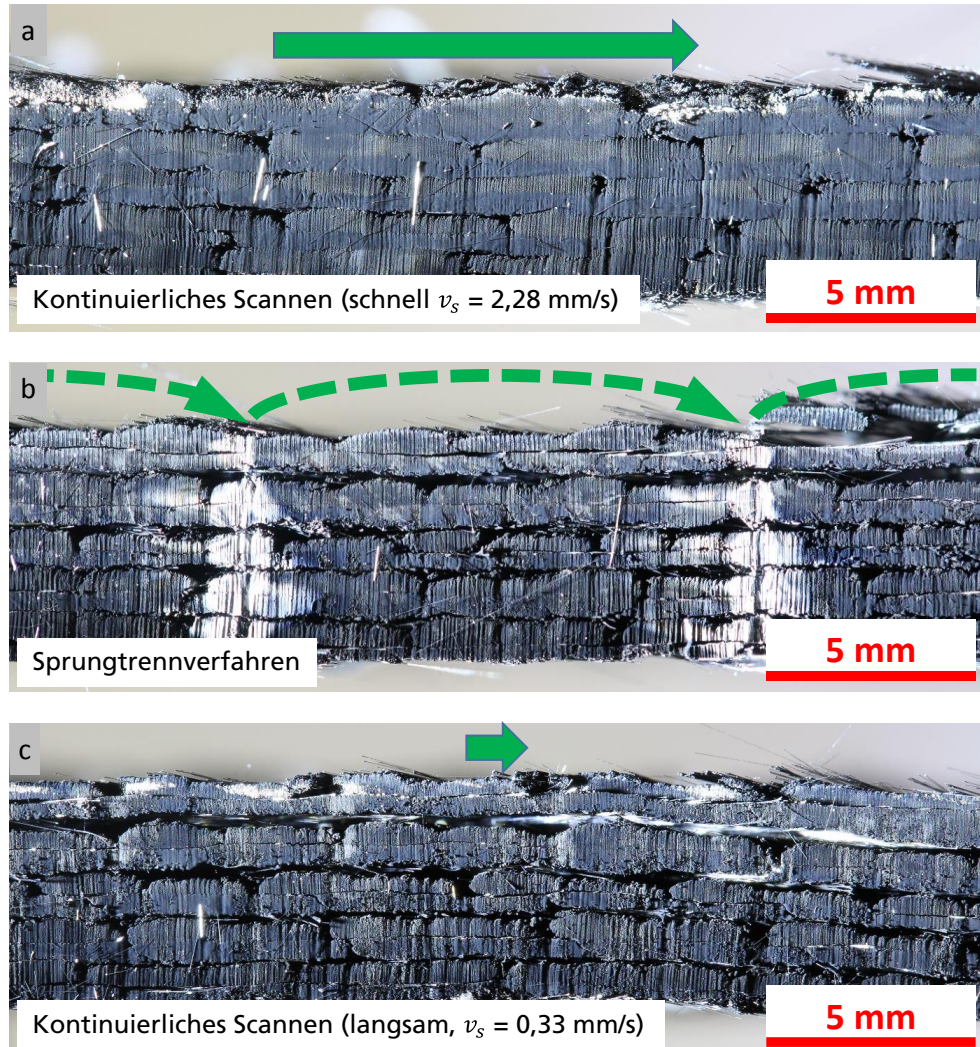
Dargestellt sind drei Verfahren zur Erzeugung eines 84 mm langen Schnittes in einen fünflagigen bi-axialen Preform. In dem Bild 35a dargestellten schnellen kontinuierlichen Scanprozess mit großer Repetitionsrate ist die Prozesszeit mit ca. 37 s relativ klein. Die Größe der einseitigen WEZ (5,6 mm) und der oxidierten Zone (2,8 mm), die ab Temperaturen von ca. 300 °C und bei Reaktion mit Sauerstoff entsteht, ist jedoch relativ groß. Die Fasern sind in der stark umgewandelten Zone bis 2,8 mm beschädigt und brüchig.

In Bild 35c ist die Preformoberfläche nach einem langsamen Scanprozess mit kleiner Repetitionsrate dargestellt. Sowohl die einseitige WEZ mit 1,8 mm als auch der stark beschädigte Bereich mit ca. 0,4 mm sind sehr klein. Durch die kleine Repetitionsrate des Lasers von 10 Hz ist die Prozesszeit mit ca. 4 min und 15 s jedoch siebenmal größer als im schnellscannenden Prozess.

Die Vorteile einer kleinen WEZ und einer kurzen Prozesszeit konnten mit dem Sprungtrennverfahren vereint werden. Durch die Pulsverteilung auf der Scanstrecke war der zeitliche und örtliche Abstand der einzelnen Pulse innerhalb und zwischen den Scanlinien so groß, dass keine signifikante Puls-zu-Puls oder Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation stattfand. Der Abstand Δs zwischen zwei Pulsen innerhalb einer Linie betrug hier 12 mm. In diesem Prozess wurden 368 sich überlappende Linien (N_L) mit jeweils sieben Pulsen pro Linie ($N_{P/L}$) gescannt.

Ein weiterer materialographischer Unterschied wird bei Betrachtung der Schnittkante deutlich. In Bild 36a-c sind die Schnittwände der drei oben beschriebenen Prozesse dargestellt.

Bild 36: Aufsicht auf die Schnittkanten der in Bild 35 dargestellten Scanprozesse



Beim kontinuierlichen Scanprozess mit einer Repetitionsrate von 70 Hz (Bild 36a) sind die Fasern im Vergleich zu den anderen Schnittkanten deutlich stärker miteinander verschmolzen. Dies ist zum einen für einen nachfolgenden Matrixinfusionsprozess nachteilig, da ausgebrochene Stücke aus der verfestigten Randschicht von dem flüssigen Matrixmaterial umspült werden und so nach der Konsolidierung bei alternierenden mechanischen Belastungen Risse in der Matrix entstehen können. Zum anderen kann durch die relativ stabile und harte Randschicht, die an der Preformoberfläche zu Quellungen der Fasern führt, die Folie in einem Vakuuminfusionsprozess beschädigt werden.

Die Kanten in Bild 36b und c sind deutlich weniger, vor allem zwischen den einzelnen bi-axialen Lagen, zusammengeschmolzen. Auch die Aufquellung der Fasern an der Oberfläche ist geringer. Die in Bild 36b zu erkennenden weißlichen

Streifen entlang der Preformdicke entstehen beim Abschluss des Scanprozesses, wenn die letzte Linie gescannt wird. Zu vermuten ist, dass die lokal stark erhitzten Fasern an diesen Stellen während der letzten Scanlinie mit dem Sauerstoff aus der Luft reagieren und während der langsamen Abkühlphase bis auf Raumtemperatur einen weißlichen ascheartigen Film bilden.

Da die Ausbildung einer zusammengeschmolzenen Randschicht an der Schnitt- oder Bohrwand stark negative Auswirkungen auf den Applikationsprozess des Krafteinleitungselementes als auch auf den Matrixinfusionsprozess haben, muss die Entstehung dieser Randschicht verstanden und kontrolliert werden.

5.1.7 Bohrungsqualität bei der Bearbeitung mit langgepulster Laserstrahlung

Im Folgenden werden besondere Schadensphänomene von Carbonfasern aufgezeigt, die durch Verwendung von langgepulster Faserlaserstrahlung mit hoher Pulsenergie auftreten können.

Nach der Herstellung einer Bohrung mittels langgepulster Faserlaserstrahlung kann eine Aufdickung der Bohrkante beobachtet werden. Nach manuellem Drücken ist zudem eine Verfestigung der Bohrwand über die gesamte Bohrlänge spürbar. Bei Erhöhung der Presskraft zerbricht die verfestigte Randschicht. Mittels Untersuchung an einem Rasterelektronenmikroskop (REM) und der Herstellung von Längsschliffen eines unidirektionalen (UD) Preform kann die verfestigte Randschicht charakterisiert werden (Bild 37).

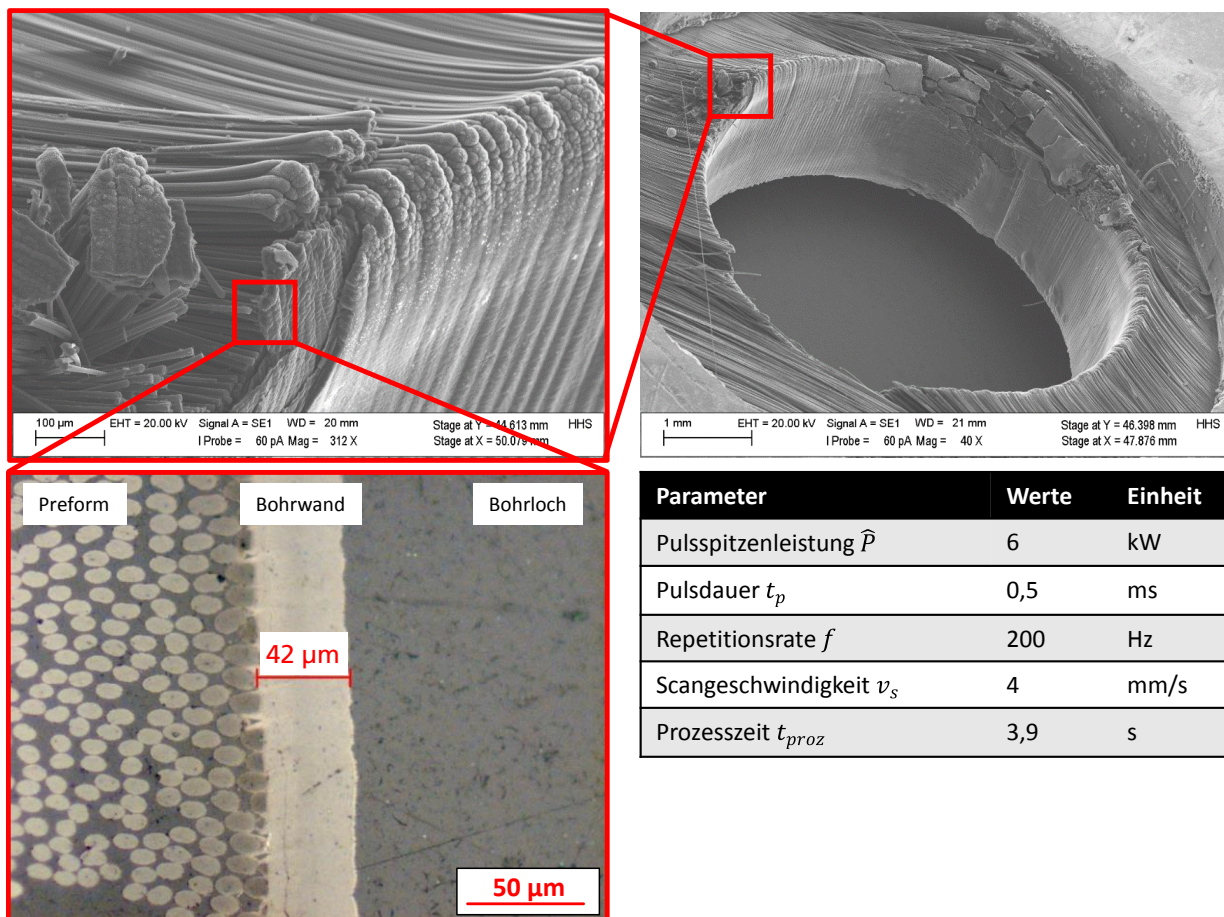


Bild 37: REM-Aufnahme der Randschicht an einem mittels langgepulster Faserlaserstrahlung gebohrten UD-Preform (PAN-Fasern)

Die verfestigte Randschicht an der Bohrwand ähnelt der einer beim Laserstrahl-Bohren von Metallen bekannten wiedererstarteten Schmelzschicht (engl.: recast layer) [Uch16]. Obwohl die beobachtete Randschicht beim Preform ein sehr ähnliches Aussehen aufweist, kann eine aus der flüssigen Phase wiedererstartete Schicht bei reinem Kohlenstoff nicht unter einem Atmosphärendruck von ca. 100 bar während der Laserbearbeitung entstehen (vgl. Phasendiagramm, Bild 11, S.22).

Für Detailaufnahmen wurde ein unidirektionales 2 mm dickes, flächiges PAN-Faserbündel laserstrahlgebohrt. Anschließend wurde das Bündel in transparenter schwindungsarmer Kalteinbettmasse fixiert und ein faserparalleler Querschliff durch das gebohrte Material angefertigt. Die mit einem Keyence VHX-2000 Digitalmikroskop und einem Rasterelektronenmikroskop angefertigten Bilder sind in Bild 38 bzw. Bild 39 dargestellt.

Bild 38:
Querschliffbilder von
laserstrahl-
geschnittenen,
eingebetteten,
unidirektionalen
Carbonfasern längs
und quer zur
Faserorientierung

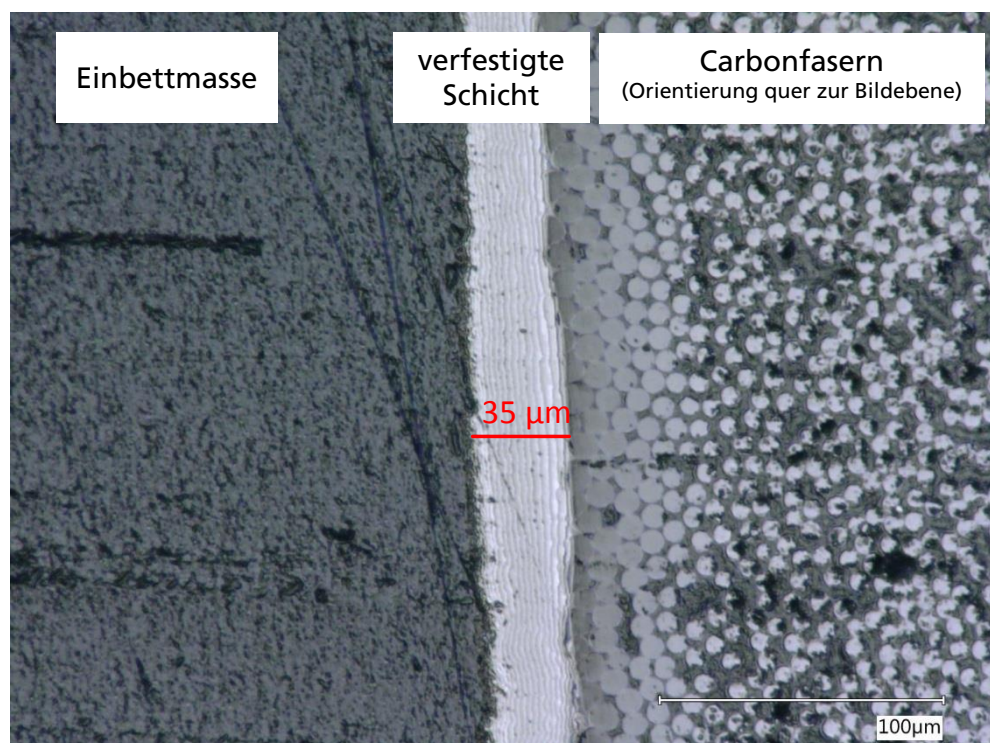
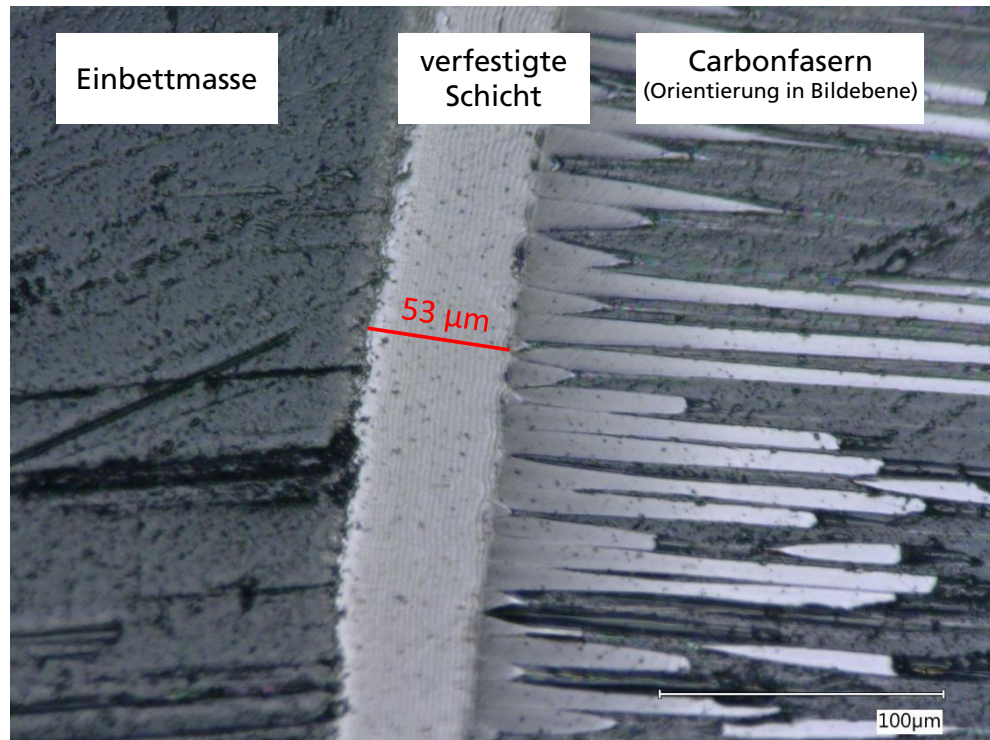
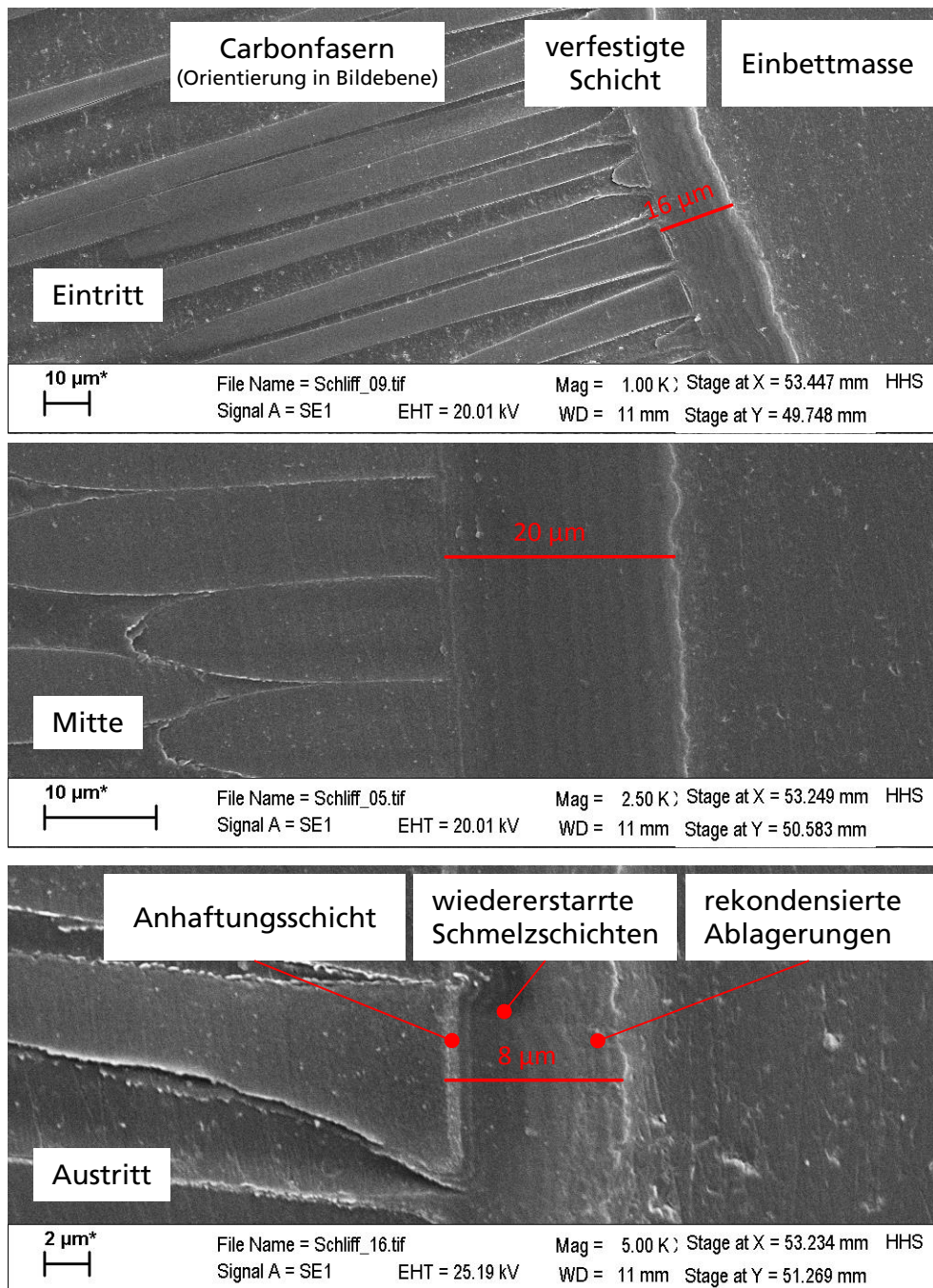


Bild 39: REM-Aufnahmen der verfestigten Randschicht an Eintritt, Mitte und Austritt des laserstrahl-geschnittenen UD-Faserstapels



Die Dicke der Randschicht variiert vom Eintritt bis zum Austritt der Bohrung. Der dickste Bereich befindet sich jedoch immer an der Bohrungswand in der Mitte der Bohrung. Die verfestigte Randschicht hat in Faserrichtung einen zwiebelhäutigen Aufbau. Die Schichten liegen einerseits auf den abgetrennten Faserköpfen auf, andererseits ist die Verbindung zwischen der Schicht und den

Faserköpfen nahezu porenlos. Bei näherer Betrachtung kann die Schicht in drei Bereiche eingeteilt werden (Bild 39, unten). Direkt am getrennten Faserkopf und Beginn der verfestigten Randschicht liegt ein Bereich vor, welche den Übergang zwischen der verfestigten Schicht mit der Faser herstellt. Die Haftung dieser Schicht ist nicht stark ausgeprägt. Bei manuellem Druck zerbricht die verfestigte Randschicht an dieser Stelle von der Faser. Im Inneren hat die verfestigte Randschicht ein dichtes Wellenmuster (Bild 38) und weist keine sichtbaren Poren auf. An der Außenseite (Bohrungswand) löst sich das geordnete Wellenmuster auf und weist eine losere, klumpenartige Struktur auf. Der Aufbau und das Aussehen dieses äußeren Bereiches deuten auf die Ablagerung von rekondensiertem Fasermaterial hin, während die innere Struktur auf das Vorliegen einer wiedererstarteten flüssigen Phase hinweist. Daher waren weitere Analysen zur Charakterisierung der verfestigten Randschicht erforderlich.

Anhand EDX-Messungen an den Faserenden nach der Laserbearbeitung in Luft- und Argon-Atmosphäre konnte die chemische Zusammensetzung der Randschicht im Vergleich zu den Fasern im Ausgangszustand, wie sie ab Werk geliefert werden, verglichen werden (Tabelle 16).

Tabelle 16: EDX-Messung der Faserenden vor und nach der Laserbearbeitung

Zustand der Carbonfaser	Chemisches Element [m-%]				
	C	N	O	Si	Rest
Ausgangszustand (ab Werk)	93,3	4,7	1,5	0,5	0,0
Faserlaser bearbeitet (in Luft-Atmosphäre)	91,7	1,5	5,2	1,5	0,1
Faserlaser bearbeitet (in Argon-Atmosphäre)	98,2	-	0,8	1,0	0,0
UKP-Laser bearbeitet (in Luft-Atmosphäre)	89,9	-	7,2	2,9	0,0

[-] bedeutet, dass das Element während der EDX-Messung aufgrund des Messrauschens nicht mehr eindeutig nachgewiesen werden kann ($\ll 1$ m-%)

Aus den EDX-Messungen ist zu erkennen, dass die Carbonfasern im Ausgangszustand primär aus den Elementen Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Silizium bestehen. Aufgrund der nicht vollständigen Carbonisierung der PAN-Fäden und der Schlichte auf den Fasern kann erklärt werden, dass sowohl bei der Bearbeitung mittels langgepulster Faserlaserstrahlung in Luft-Atmosphäre als auch ultrakurz gepulster Laserstrahlung der Anteil an Sauerstoff zu- und der Stickstoffanteil in der Randschicht abnimmt. Nach etwa 0,5 mm Entfernung von der verfestigten Randschicht liegt wieder die Zusammensetzung des Ausgangszustandes vor (Bild 40).

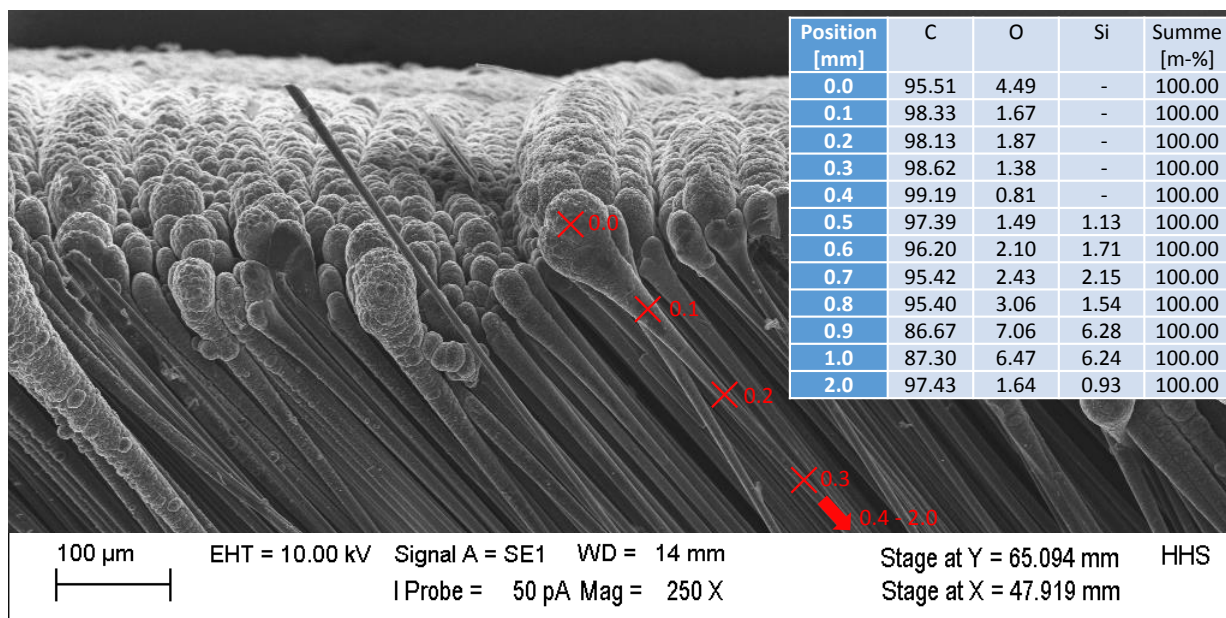


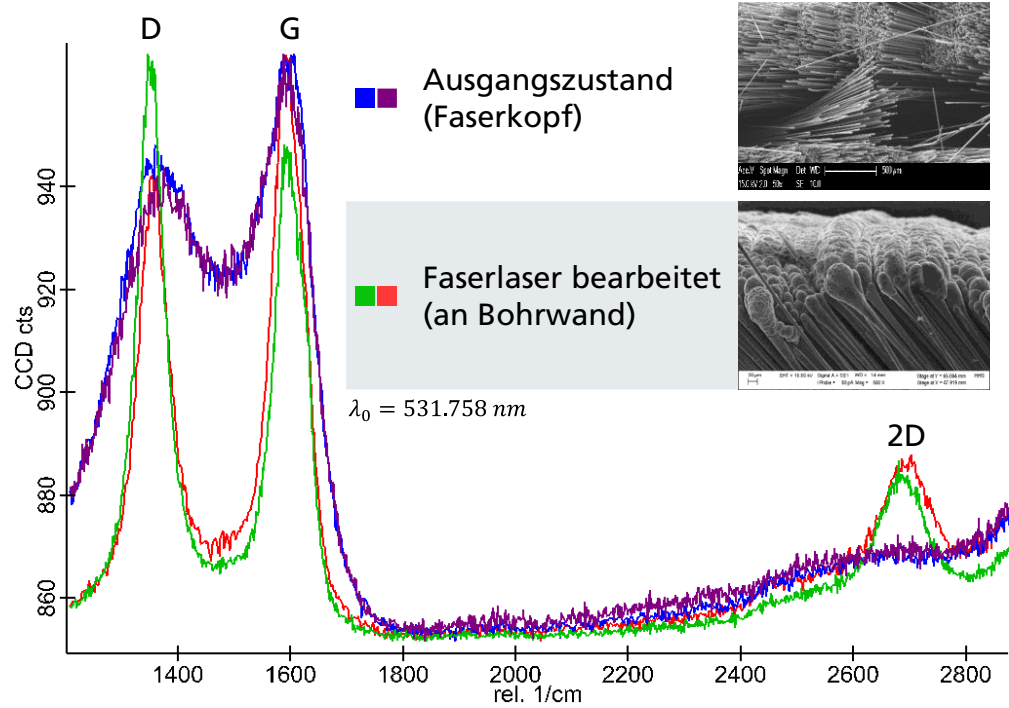
Bild 40: EDX-Messungen entlang einer Faser auf der Preformoberfläche nach dem Bohren mittels langgepulster Laserstrahlung

Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass Unreinheiten in den PAN-Fasern durch den plötzlich sehr starken Temperaturanstieg während der langgepulsten Laserbearbeitung noch vor der Sublimierung der Carbonfasern verdampfen und explosionsartig aus dem Kohlenstoffgitter entweichen. Dabei werden die Faserenden an der Bohrwand aufgeweitet und verdicken sich. Unter Berücksichtigung des zwiebelartigen Aufbaus (vgl. Bild 6, S.14) der PAN-Fasern lösen sich die turbostratisch angeordneten Schichten während der Interaktion mit der Laserstrahlung voneinander und führen so zu einer Verdickung der Faserenden.

Durch den in der Faser hohen Dampfdruck der bereits im gasförmigen Zustand befindlichen Unreinheiten (u.A. PAN-Reste) könnte außerdem der Druck innerhalb der Faser so groß werden, dass unter Beachtung der Sublimationstemperatur von Kohlenstoff eine flüssige Kohlenstoffphase auftritt. Der durch die verdampften Unreinheiten induzierte innere Druck wäre in diesem Fall größer als 100 bzw. 1000 bar (vgl. Bild 11, S.22). Eine weitere Untersuchung bezüglich der auftretenden Drücke in der Prozesszone wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter fortgeführt.

Mittels Raman-Spektroskopie kann die Veränderung der Gitterstruktur vor und nach der Faserlaserbearbeitung verglichen werden. Somit können Rückschlüsse über Modifikationen im Schichtaufbau in den Fasern geschlossen werden.

Bild 41: Raman-Spektrogramm der Carbonfasern (PAN) im Ausgangszustand und nach Bearbeitung mittels langgepulster Faserlaserstrahlung



Die Messkurve zeigt für den Ausgangszustand verwaschene, aber erkennbare, für Kohlenstoffgitter typische G- (Graphit) und D-Spitzen (Defekt) bei 1580 cm^{-1} bzw. 1360 cm^{-1} [MTG96] [VFR06]. Da die beiden Spitzen nicht deutlich voneinander getrennt sind, ist dies ein Hinweis auf Unreinheiten und Defekte in der (turbostratischen) graphitartigen Gitterstruktur. Nach der Materialbearbeitung mittels langgepulster Laserstrahlung sind die D- und G-Spitzen deutlich voneinander durch ein tiefes Tal getrennt. Die Form und das Höhenverhältnis weisen auf eine relativ langsame Abkühlrate hin [LLY11], [MTG96]. Die Gitterstrukturen in den laserbestrahlten Faserköpfen weisen weniger Defekte auf. Dies kann einerseits durch die verdampften, ausgetretenen Unreinheiten, andererseits durch eine der großen Prozesstemperatur von über 3500 K geschuldete Neuordnung der Gitterstruktur zu einer homogenen, offeneren Graphitstruktur erklärt werden. Gitterdefekte sind auch hier vorhanden, das Kohlenstoffgitter ist aber dem des reinen Graphits ähnlicher, wodurch eine in diesem Zustand stärker ausgeprägte Gitterresonanz bei 2730 cm^{-1} (2D) vorliegt.

Zum Vergleich wurden abschließend auf Pech basierende Carbonfasern mit Faserlaserstrahlung gebohrt (Bild 42). Pechfasern weisen neben einer radialen Anordnung der Schichten (vgl. Bild 6, S.14) einen höheren Kohlenstoffgehalt und damit weniger Unreinheiten auf.

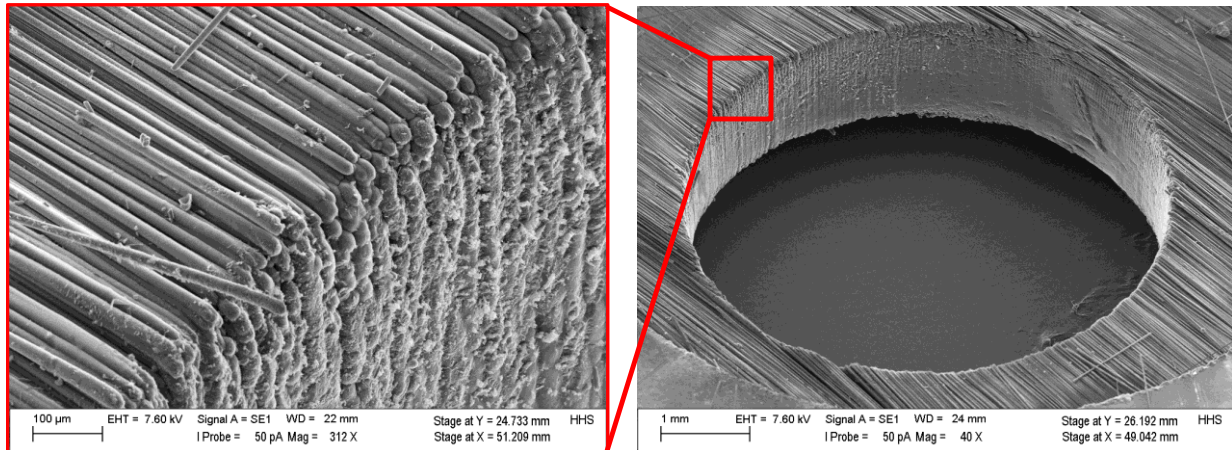


Bild 42: REM-Aufnahme der Randschicht an einem mittels langgepulster Faserlaserstrahlung gebohrten Preform (Pech Fasern)

Die Faserenden sind bei pechbasierten Fasern im Vergleich zu PAN-Fasern nur minimal aufgequollen. Das Preform quillt in Dickenrichtung nicht nennenswert auf. Trotz des höheren Kohlenstoffgehaltes der Fasern sind immer noch leicht verfestigte, zusammengeschmolzene Randschichten zu beobachten. Die Fasern könnten daher einen für die Ausbildung einer Schmelzschicht ausreichend hohen Anteil an Unreinheiten oder Poren aufweisen. Ein anderer Ansatz ist die radial aufgebaute Gitterstruktur von pechbasierten Fasern (vgl. Bild 6, S.14), die eine kompaktere Schädigungsform nach Einwirkung von langgepulster Laserstrahlung aufweist. Die Verwendung sowohl kleiner (5 Hz) als auch großer Repetitionsraten (bis zu 500 Hz) hat jedoch keine Auswirkung auf die makroskopische Anordnung der Fasern, solange das Gelege mit jedem Puls vollständig penetriert wird.

5.1.8 Zwischenfazit

Die Untersuchungen lassen somit folgende Schlussfolgerungen zur Entstehung der verfestigten Randschicht zu:

- 1) Die Aufdickung des Preforms aus PAN-Fasern erfolgt durch das Aufquellen der Faserenden an der Bohrwand. Die Aufquellung der Einzelfasern entsteht durch Loslösung der zwiebelartig aufgebauten Schichten in der Gitterstruktur und durch den Austritt von verdampfenden Unreinheiten in der Faser. Bei chemisch reineren, pechbasierten Fasern sind die Faserenden nur noch minimal aufgequollen. Die Gitterstruktur an den Faserenden orientiert sich neu zu einer dem Graphit ähnlicheren Struktur, hat jedoch noch zahlreiche Defekte.
- 2) Die Entstehung einer Schmelzschicht tritt möglicherweise durch den Dampfdruck der innerhalb der Fasern verdampfenden Unreinheiten auf.

Die Kohlenstoffgitterstruktur bleibt trotz Umordnung der Schichten innerhalb der Faser bei noch höheren Temperaturen stabil, während in den Fasern ein hoher Dampfdruck herrscht, so dass das Phasengebiet für flüssigen Kohlenstoff erreicht werden kann. Bei pechbasierten Fasern ist die Randschicht aufgrund weniger Unreinheiten in den Fasern deutlich kleiner.

Auffällig ist weiterhin die Durchgängigkeit der Randschicht vom Eintritt bis zum Austritt. Ebenfalls variiert die Dicke der Randschicht von Ein- bis Austritt der Bohrung. Durch leichtes Pressen der Bohrkanten vor dem Einbetten ist eine Aufdickung des Preforms um den Bohrungseintritt sichtbar. Ursache dafür ist die Ausbildung der Schicht auf der Bohrkante. Dargestellt werden beide Phänomene in Bild 43 anhand von REM-Aufnahmen. Bei einem Nenndurchmesser der CFK-Fasern von $5 - 7 \mu\text{m}$ ist eine Vergrößerung des Durchmessers am Faserkopfende an der Bohrwand um den Faktor 10 auf $50 \mu\text{m} - 70 \mu\text{m}$ messbar [Toh16]. Etwa $100 \mu\text{m}$ entfernt vom größten Durchmesser des Faserkopfes beträgt der Durchmesserzuwachs mehr als das Doppelte des Nenndurchmessers der Faser. Im rechten Teil von Bild 43 ist ebenfalls die Aufquellung der Faserendköpfe dargestellt. Darüber hinaus ist die Aufdickung des Materials anhand der nach oben gekrümmten Faserverläufe zu beobachten.

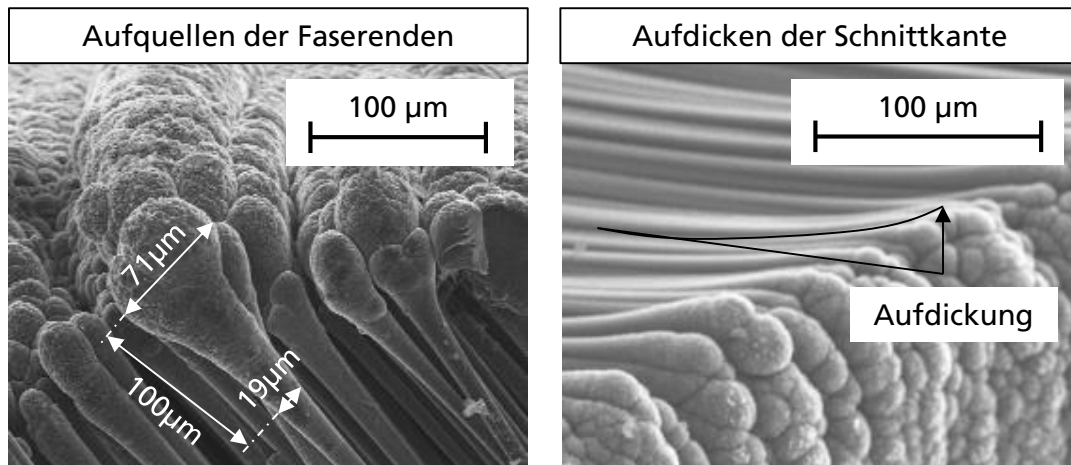
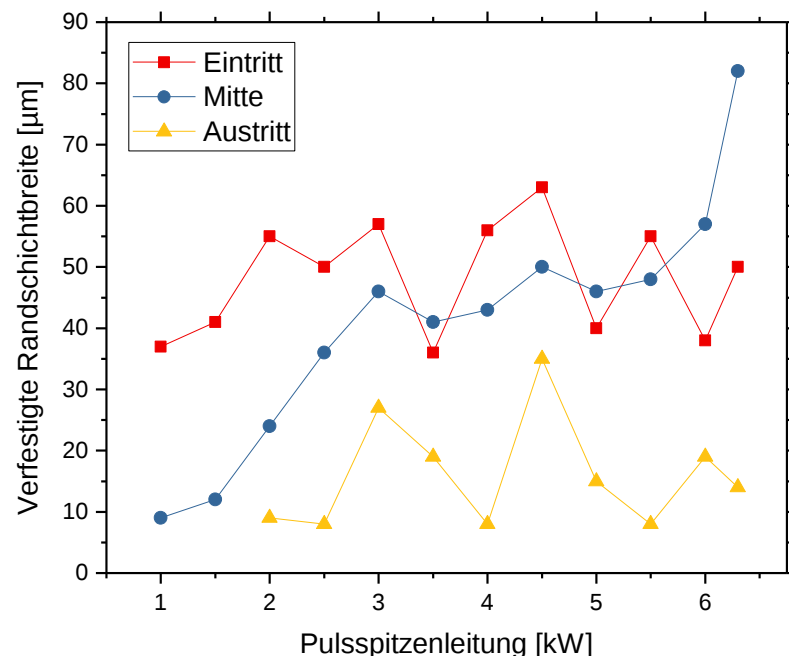


Bild 43: Aufquellen der Faserenden (links) und Aufdicken der Schnittkante eines CFK-Preforms (rechts)

Ein genereller Zusammenhang zwischen der Dicke der Randschicht und der verwendeten Pulsspitzenleistung konnte nicht gefunden werden. Die gemessenen Dicken der Randschicht am Eintritt, in der Mitte und am Austritt der 30 mm langen Schnitte sind in Bild 44 dargestellt.

Bild 44: Dicke der Randschicht über der Pulsspitzenleistung, $f=5\text{ Hz}$, $t_p=0,5\text{ ms}$, $v=0,19\text{ mm/s}$



Sowohl die Dicke der verfestigten Randschicht am Eintritt als auch am Austritt weisen keine Abhängigkeit von der verwendeten Pulsspitzenleistung auf. Am Eintritt variiert die Dicke der Randschicht zwischen 37 und 63 µm, am Austritt zwischen 8 und 35 µm. Allein in der Mitte des Preforms steigt die Dicke der Randschicht mit größer werdender Pulsspitzenleistung an. Eine mögliche Erklärung ist die Wärmeabfuhr an der Ober- und Unterseite des Preforms durch den Absaugluftstrom in der Prozesskammer. In der Mitte des Preforms ist sowohl eine freie als auch gezwungene konvektive Kühlung nicht oder nur eingeschränkt möglich, wodurch eine größere Wärmemenge in der Preformmitte verbleibt und primär über Wärmeleitung abgeführt wird. Dementsprechend ist der Temperaturgradient entlang der Faser kleiner, wodurch eine dickere Randschicht begünstigt wird.

Im Hinblick auf den Produktionsprozess für CFK-Bauteile sollte die Ausbreitung der Randschicht auf der Bohrungswand während der Laserbearbeitung minimiert werden. Durch die Abrasivität der verfestigten Randschicht kann die Korrosionsschicht der Inserts beschädigt werden. In Korrosionsversuchen mittels 72-stündigem Salzsprühnebel konnte mit sternförmigen Inserts der Firma Kohlhage [Koh15] jedoch gezeigt werden, dass eine Korrosionsschicht mit ca. 15 µm Dicke ausreichend ist, um Korrosion zu vermeiden. Die Kraftereinleitungsstellen im konsolidierten Material wiesen trotz Vorhandensein einer ausgeprägten verfestigten Randschicht im Preform keine Rostansätze auf.

Die jedoch teils starke Aufquellung der Faserenden an der Oberseite des Preforms können jedoch Probleme bei der Matrixinfusion mittels Vakuumfolie verursachen. Die ca. 60 µm dicke Kunststoffolie kann an den aufgequollenen Übergängen zwischen Preform und Insert reißen [HP-17]. Dadurch wird an den Rissstellen Luft eingesogen und Matrixflüssigkeit verdrängt. In diesem Fall ist eine Reparatur kaum möglich und das Bauteil muss entsorgt werden.

Sowohl bei der Matrixinjektion in RTM-Werkzeugen als auch bei der Infusion unter einer Vakuumfolie können sich durch den mechanischen Pressdruck Teile der Randschicht lösen. Der durch das Textil strömende flüssige Matrixwerkstoff umschließt die scharfkantigen Partikel, wodurch nach Konsolidierung Keimzellen für Risse und Delaminationen unter statischer und zyklischer mechanischer Belastung des CFK-Bauteils initiiert werden können. Zuletzt sei noch zu nennen, dass durch die Aufquellung sowohl der Faserverlauf als auch der lokale Faservolumengehalt gestört werden. Aus diesen Gründen ist die Größe und generell die Ausbildung einer verfestigten Randschicht zu vermeiden.

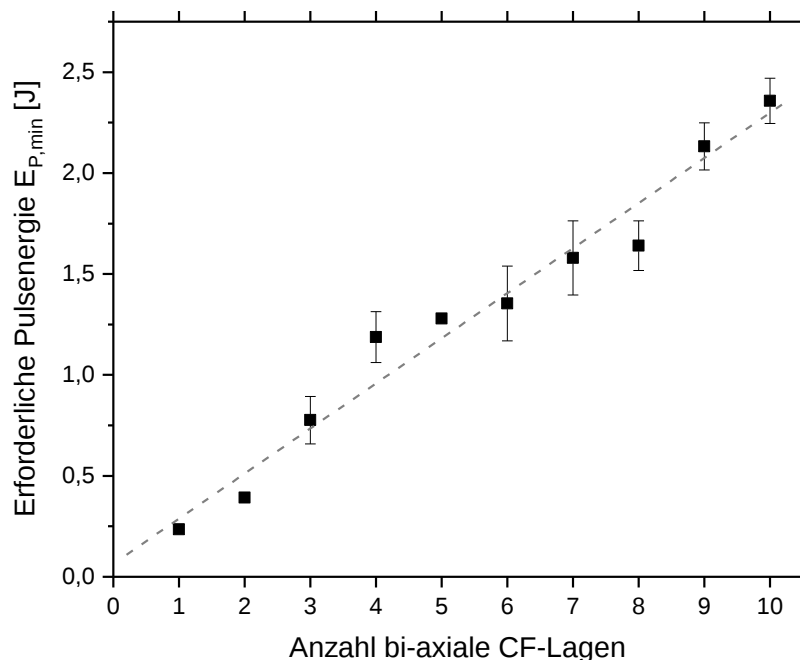
5.1.9 Trepanieren von mehrlagigen Preforms

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Anzahl der Lagen pro Probe vergrößert, um den Einfluss der Prozessparameter auf materialographische und geometrische Qualität der Bohrungswand, abhängig von der Lagenanzahl, zu identifizieren. Zur Herstellung der Bohrungen wurde nur eine Überfahrt verwendet, ohne das Sprungtrennverfahren anzuwenden, um die Verfahrenskomplexität gering zu halten und relevante Einflussfaktoren isoliert betrachten zu können.

Variation der Pulsenergie

Wie durch die Versuche an einlagigen Preforms ermittelt, hat die Pulsenergie als alleiniger Faktor keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbreitung der WEZ. Für die Penetration von gestapelten bi-axialen Lagen mittels Einzelpuls muss die Pulsenergie bei Erhöhung der Lagenanzahl ebenfalls vergrößert werden. Die erforderliche Pulsenergie $E_{P,min}$ zum Einzelpulsbohren in Abhängigkeit der Lagenanzahl ist in Bild 45 dargestellt.

Bild 45: Erforderliche Pulsenergie $E_{p,min}$ zum Einzelpulsbohren über der bi-axialen Lagenanzahl eines gestapelten Preforms



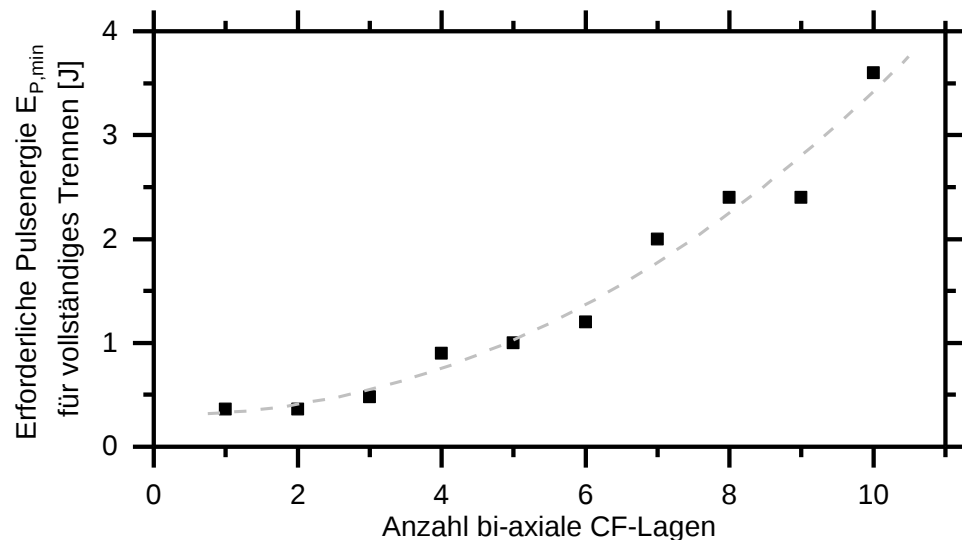
Trotz Streuungseffekten bei zunehmender Lagenanzahl [Fre17] steigt die erforderliche Pulsenergie zum Trennen von einer bis zehn bi-axiale Lagen mittels Einzelpuls nahezu linear an. Da im Folgenden auch Bohrungen mit mehreren Millimetern Durchmesser hergestellt wurden, wurde in einem ersten Versuch mit mehrlagigen CFK-Proben die erforderliche Pulsenergie zum Trepanieren ermittelt, die für Bohrungen mit einem Durchmesser von 5 mm zum vollständigen Trennen benötigt wird. Die Verfahrensparameter für die Versuche sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Verfahrensparameter für die Variation der Pulsenergie

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Pulsdauer	t_p	0,2 – 0,9	ms
Repetitionsrate	f	100	Hz
Scangeschwindigkeit	v_s	2	mm/s
Pulsüberlapp	$PÜ_{DIN}$	75	%
Pulsspitzenleistung	$\hat{P}$	600 – 6000	W
Anzahl der Lagen		1 – 10	-

Um die Versuchsergebnisse auch im Hinblick auf die Qualität der Bohrungen bei gleichbleibender Produktivität untersuchen zu können, war eine konstante Scangeschwindigkeit ein wichtiges Kriterium. Der Bohrvorgang wurde in diesem Versuch als vollständig definiert, sobald der ausgeschnittene Kern entweder von selbst oder mit minimalem, manuellem Druck aus der Bohrung herausfiel. Die Ergebnisse sind in Bild 46 dargestellt.

Bild 46: Erforderliche Pulsenergie zum Trepanierbohren einer Bohrung mit 5 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl bi-axialer Lagen



Beim Trepanierbohren mittels Scanner ist die erforderliche Pulsenergie zum vollständigen Trennen mehrerer gestapelter Gelegelagen nicht linear. Besonders bei größerer Anzahl an bi-axialen Lagen wird der absolute Unterschied zum Einzelpulsbohren deutlich. Primär können die Ursachen durch die Kaustik, dem Aspektverhältnis und den dadurch veränderten Propagationswegen der Laserstrahlung im Preform erklärt werden. Bei Entfernungen von der Fokusebene größer der Rayleighlänge nimmt die Intensität quadratisch ab. Durch den hohen Absorptionsgrad der Carbonfasern bei Inzidenzwinkeln bis zu ca. 80° tritt dabei nahezu keine Reflektion auf, um Pulsenergie an den Bohrgrund zu transportieren. Weiterhin nimmt die Streuung an den Bohrwänden im Fasermaterial so stark zu, dass ein relativ großer Anteil der Laserstrahlung in Wärme ohne Abtrag verloren geht [Fre17].

Bei kleinen Fokusdurchmessern war selbst bei ausreichend großer Pulsenergie nach dem Bohrprozess bei größerer Lagenanzahl stets axialer Druck erforderlich, um die Kerne auszutreiben. Häufig war der Kern am Austritt über einige wenige Fasern mit dem Preformmaterial verbunden. Dies deutet darauf hin, dass die Verbindungsfasern nicht ausreichend viel Energie für eine Verdampfung aufgenommen hatten. Eine weitere Erklärung neben dem hohen Grad der Streuung im Fasermaterial ist, dass die noch nicht getrennten, eingeschränkt beweglichen Fasern durch die plötzlich starke Volumenexpansion von verdampfenden Fasermaterial zu schwingen beginnen. Wenn die Schwingungsamplitude der Faser größer als der Fokusdurchmesser plus dem Pulsüberlapp ist, können einzelne Fasern trotz ausreichender Pulsenergie zum Trennen des Preforms intakt bleiben, da sie nicht von der Laserstrahlung getroffen wurden. Im Falle nicht getrennter Fasern lagen diese immer am Austritt an der untersten Gelegelage vor. Dies deutet auf eine starke Streuung der Laserstrahlung durch das Preform hin, sodass nicht genügend Energie für die

Verdampfung am Austritt vorlag. Eine weitere Erklärung ist, dass die Bohrkontur im Rahmen der Untersuchungen nur einmal gescannt wurde. Durch mehrfaches Überfahren der Bohrkontur wird die Wahrscheinlichkeit zum vollständigen Trennen des Kerns vergrößert, wodurch die Prozesszeit jedoch ebenfalls vergrößert wird.

Variation der Repetitionsrate

Weiterhin wurde der Einfluss der Repetitionsrate auf die vollständige Trennung der mehrlagigen CFK-Preforms untersucht. Dazu wurde bei einer nicht ausreichend großen Pulsenergie zur Durchdringung des CFK-Preforms die Repetitionsrate vergrößert. Dadurch wurde die Streckenenergie der Pulsenergie als zu untersuchende Prozessgröße gegenübergestellt. Der Pulsüberlapp wurde durch die Vergrößerung der Repetitionsrate ebenfalls vergrößert. Das Versuchsfenster für diese Versuchsreihe ist in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18:
Prozessparameter für
die Variation der
Pulsenergie

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Pulsdauer	t_p	0,2	ms
Repetitionsrate	f	200 – 400	Hz
Scangeschwindigkeit	v_s	2	mm/s
Pulsspitzenleistung	$\hat{P}$	600	W
Anzahl bi-axialer Lagen		3	-
Pulsenergie	E_p	0,12	J
Streckenenergie	E_s	12; 18; 24; 27	J/mm
Pulsüberlapp	$P\ddot{U}_{DIN}$	50 - 90	%

Die Schwellwerte für das erfolgreiche Durchbohren eines dreilagigen Preforms waren eine Pulsenergie von 0,48 J und eine Streckenenergie von 24 J/mm. Diese Werte wurden zu Beginn der Versuchsreihe unterschritten. Die Pulsenergie war konstant. Die Streckenenergie wurde entsprechend der in Tabelle 18 genannten Werte vergrößert. Durch eine Vergrößerung der Repetitionsrate wurde das Material nicht vollständig getrennt. Durch die größere Repetitionsrate wurde der o.g. Hypothese entsprechend mehr Wärme in das Gelege eingebracht, wodurch sich die WEZ vergrößerte. Da ebenfalls die Streckenenergie vergrößert wurde, kann die Repetitionsrate nicht als alleiniger Schwellwert für das vollständige Trennen von CFK-Preforms mit gepulster Laserstrahlung angegeben werden. Somit ist die Kombination aus minimal erforderlicher Pulsenergie und minimal erforderlichem Pulsüberlapp ein relevanter Indikator für eine vollständige Trennung der Fasern.

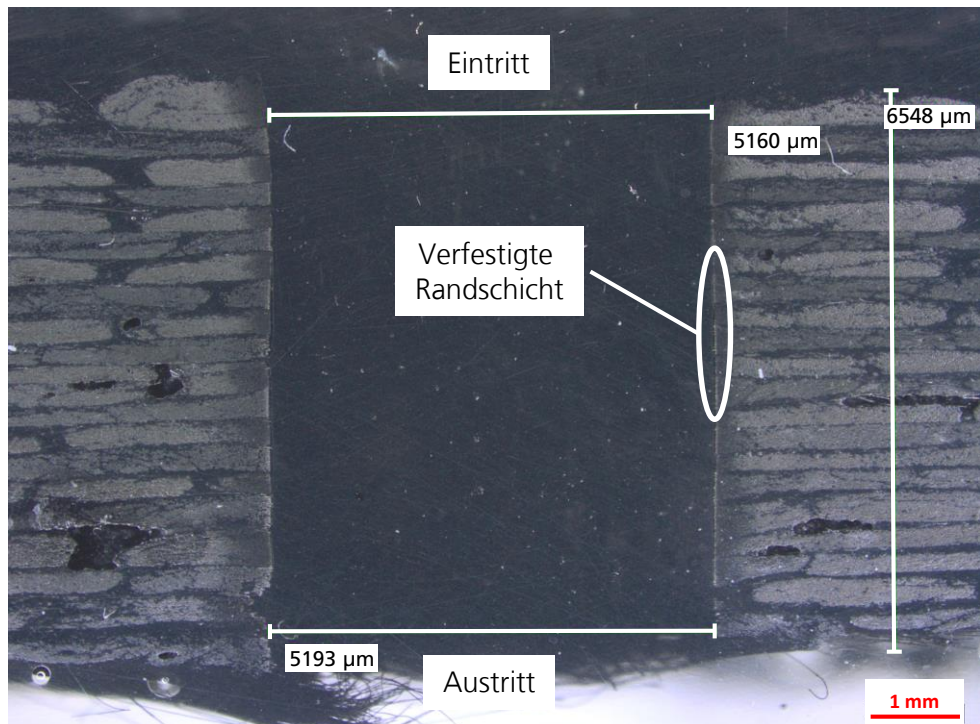
Weiterhin war entsprechend der Möglichkeit, dass einzelne Fasern während der Pulspausen schwingen können, ein Mindestpulsüberlapp erforderlich. Der sich aus dem Pulsüberlapp ergebene Vorschub sollte kleiner als die Schwingungsamplitude der Fasern sein. Während einer Untersuchung mit einem fünfteiligen und nicht mittels Binder fixierten Preform wurde ein minimaler Pulsüberlapp

$P\ddot{U}_{DIN}$ von 50 % ermittelt. Bei fixierten Preforms könnte der minimale Pulsüberlapp zum vollständigen Trennen aller Fasern in der Bohrkontur kleiner sein.

Analyse der Bohrungsgeometrie

Im Rahmen der materialographischen Auswertung wurde ebenfalls die Geometrie der Bohrungen in den mehrlagigen CFK-Preforms untersucht. Dazu wurden die Durchmesser der Bohrungen am Ein- und Austritt gemessen. In Bild 47 ist beispielhaft ein Längsschliff eines zehnlagigen bi-axialen Preforms dargestellt.

Bild 47: Längsschliff eines mittels langgepulster Laserstrahlung gebohrten und anschließend kalt eingebetteten, zehnlagigen bi-axialen Preforms



Anschließend wurde mittels Formel 4.2 (S. 40) die Konizität der Bohrung bestimmt. In Tabelle 19 sind die geometrischen Ergebnisse zweier typischer Bohrungen mit fünf und zehn bi-axialen Lagen dargestellt. Die Messwerte sind auf eine Genauigkeit von 0,01 mm gerundet.

Tabelle 19:
Bestimmung der
Konizität für
Bohrungen in
mehrlagigen CFK-
Preforms

Messwert	Lagenanzahl		Einheit
	5	10	
Durchmesser Bohrungseintritt	4,76	5,16	mm
Durchmesser Bohrungsaustritt	4,83	5,19	mm
Länge der Bohrung	4,33	6,55	mm
Konizität	-1,6	-0,46	%
Bohrwandwinkel (rel. zur Preformoberseite)	89,1	89,7	°

Die Standardabweichung (1σ) für den Eintrittsdurchmesser beträgt rund 30 μm und für den Bohrungsaustritt 45 μm . Die mittels langgepulster Laserstrahlung hergestellten Bohrungen sind mit einer Konizität von $|k| < 2 \%$ sehr zylindrisch. Dies wirkt sich positiv auf die Kontaktlänge und damit auf die Haltekraft zwischen einem KEE und dem Preform aus. Konische Bohrungen können bei einem nachfolgend eingesetzten Insert zu einer unzureichenden Kontaktlänge führen, so dass die Verliersicherheit des KEE während eines Transports des Textils nicht gewährleistet werden kann. Aufgrund der zwar eingeschränkten aber vorhandenen Flexibilität der Carbonfasern können Bohrungsdurchmesser kleiner als der KEE-Außendurchmesser hergestellt werden, um die Verliersicherheit ähnlich einer Presspassung zu erhöhen.

5.1.10 Wichtige Erkenntnisse und Fazit

Zusammenfassend konnten durch die Untersuchungen für das Bohren von Carbonfaserpreforms mittels langgepulster Laserstrahlung folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Größe der WEZ von textilen Gelegen aus Carbonfasern hängt primär von der eingebrachten mittleren Leistung und der durch die Repetitionsrate verursachten Wärmeakkumulation ab. Eine Veränderung der Pulsdauer zwischen 0,2 ms und 0,9 ms hat bei konstanter Puls- und Streckenenergie keinen Einfluss auf die Größe der WEZ. Die Pulsenergie bei langgepulster Laserstrahlung muss für eine kleine WEZ allerdings so groß sein, dass das Preform im Einzelpuls vollständig und sicher durchbohrt wird.
- Beim scannergeführten Trepanierbohren hängt die vollständige Trennung der Fasern sowohl von der Pulsenergie als auch von einem Mindestpulsüberlapp ab. Mit einer ausreichend hohen Pulsenergie müssen die Fasern entlang der Dicke getrennt werden. Durch einen ausreichend großen Pulsüberlapp muss die Trennung in Vorschubrichtung und besonders auch von schwingenden Fasern, vor allem an der Austrittsseite, sichergestellt werden. Bei Verwendung einer von der Lagenanzahl abhängigen Mindestpulsenergie zum Einzelpulsbohren ist ein Pulsüberlapp von mindestens 50 % erforderlich.

- Sowohl Perkussionsbohren als auch die mehrfache Überfahrt zum sukzessiven Abtragen mittels langgepulster Faserlaserstrahlung sollte vermieden werden, da sich die Faserenden an der Preformoberseite durch die schlagartig auftretende Evaporation aufstellen, das Preform aufquillt und sich vermehrt Partikelreste in das Textil einlagern. Durch größere Repetitionsraten können bei gleicher Streckenenergie diese Aufschwungs- und Aufplusterungseffekte vermindert werden, jedoch wird die WEZ durch Wärmeakkumulation vergrößert.
- Durch eine geeignete Pulsverteilstrategie (Sprungtrennverfahren) werden bei ausreichend großem geometrischen (Δs) und zeitlichen ($1/f_{sim}$) Abstand aufeinanderfolgender Pulse gleichzeitig sowohl die WEZ als auch die Gesamtprozesszeit signifikant verkleinert. Die Größe der zu scannenden Kontur ist der limitierende Hauptfaktor für die produktive Herstellung einer materialographisch hochqualitativen Bohrung.
- Der lineare Pulsüberlapp muss so klein wie möglich, aber so groß wie nötig sein, um ein vollständiges Trennen des Preforms zu garantieren und eine kurze Prozesszeit zu ermöglichen. Bei sehr dünnen, nicht bebinderten Preforms können die Fasern durch den Evaporationsdruck so verschoben werden, dass ein vollständiges Trennen des Textils nur mit größeren Pulsüberlappen ermöglicht wird.
- Bei Verwendung langgepulster Laserstrahlung mit Pulsdauern ab 100 μs entsteht während des Bohrens eine verfestigte Randschicht auf den Carbonfasern an der Bohrungswand. Die brüchige Schicht kann beim Zerschlagen scharfkantige Partikel im Textil hinterlassen, die nach dem Konsolidierungsprozess zu Rissinitiatoren in der Matrix führen können. Dies kann negative Auswirkungen auf nachfolgende Prozessschritte in der Fertigungskette haben. Eine Verkleinerung der Randschicht ist mit langgepulster Laserstrahlung mit Verkleinerung der eingebrachten mittleren Leistung möglich, scheint aber nicht vollständig vermieden werden zu können.

Auf Basis der Ergebnisse, die in den Untersuchungen erzielt wurden, wird in Bild 48 ein Prozessdiagramm aufgestellt. In diesem werden die gewonnenen Erkenntnisse über der erzielbare materialographische und geometrische Qualität beim Laserstrahl-Bohren mittels langgepulster Laserstrahlung über der Prozesszeit pro Bohrung dargestellt. Durch die Entwicklung des Sprungtrennverfahrens wird die Prozesskurve näher in Richtung des idealen Prozesses zum Bohren von Preforms aus Carbonfasergelegen verschoben. Der ideale Prozess wird in dieser Arbeit als derjenige Prozess definiert, mit dem eine kreisrunde Bohrung mit 8,5 mm Durchmesser in unter 10 s in ein fünfflagiges bi-axiales Carbonfasergelege hergestellt werden kann. Als geometrisches und materialographisches Qualitätsmerkmal wird für den

idealen Prozess eine Konizität von unter 5 % und eine einseitige WEZ-Größe von kleiner 0,1 mm für eine sehr hohe Qualität angegeben.

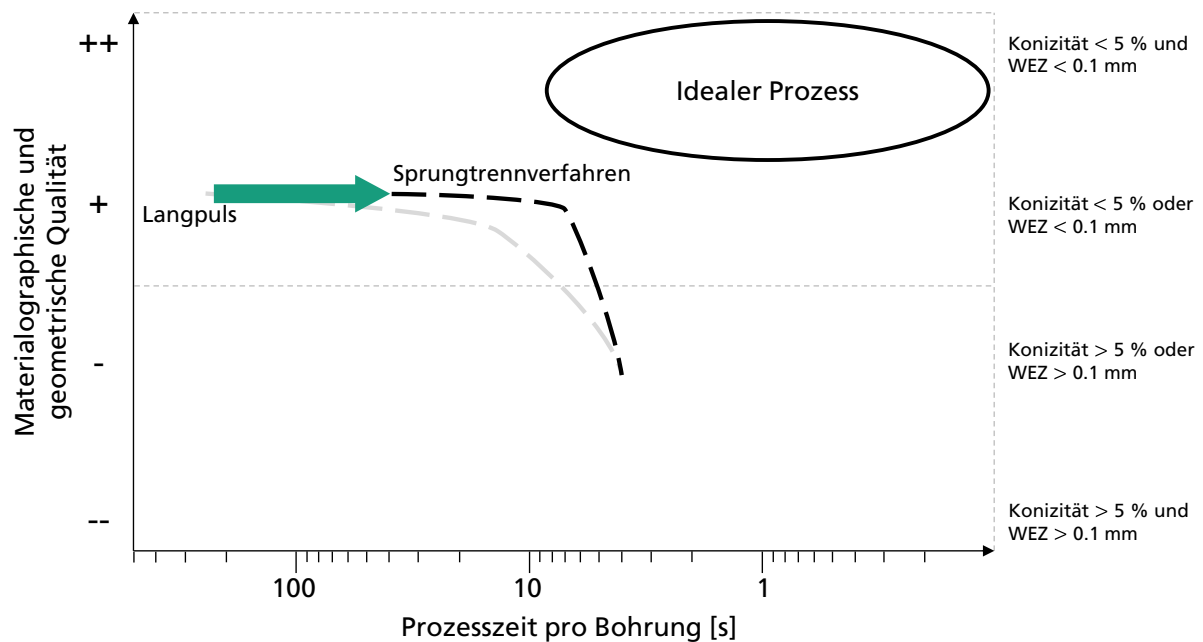


Bild 48: Einordnung des Laserstrahl-Bohrens mit langgepulster Laserstrahlung bzgl. Prozesszeit pro Bohrung und erzielbarer materialographischer und geometrischer Qualität vor und nach Anwendung des Sprungtrennverfahrens. Referenzgeometrie ist eine Bohrung mit 8,5 mm Durchmesser in einem fünflagigen, bi-axialen Preform.

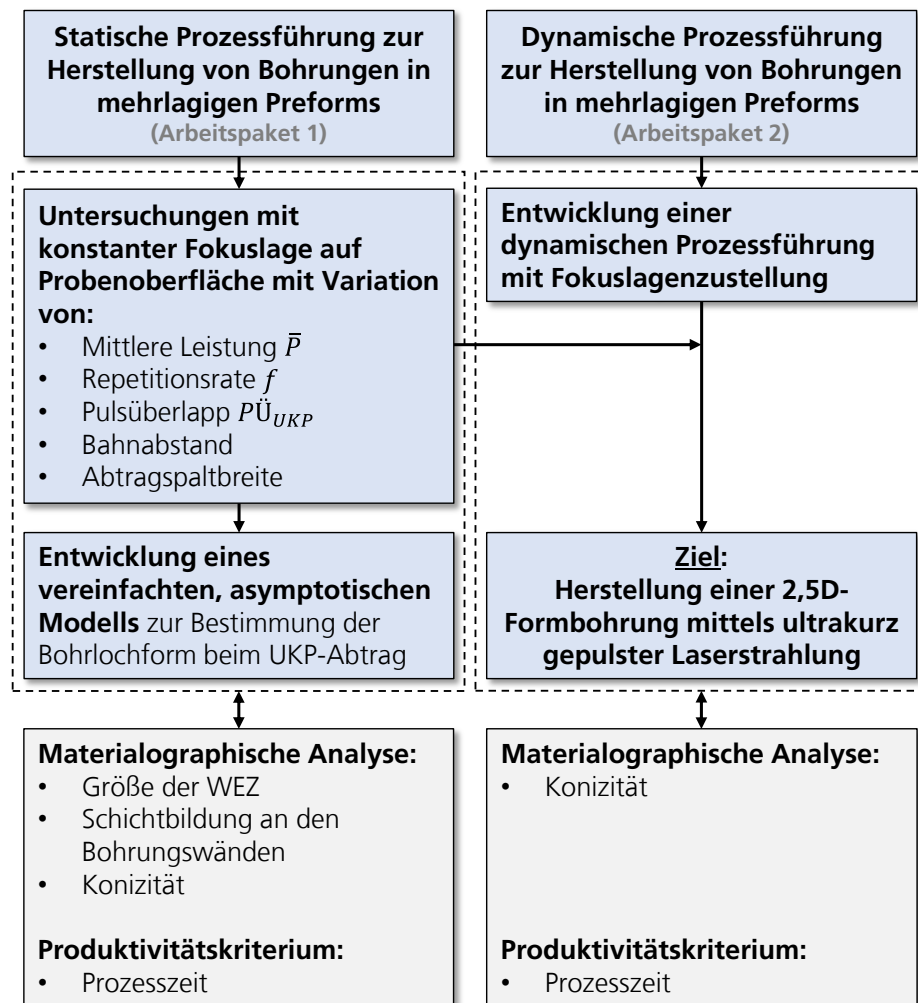
Das Stanzen von einfachen geometrischen Formen in einlagigen Preforms läge bezüglich der Produktivität und o.g. erzielbaren geometrischen und materialographischen Qualität im idealen Prozessfenster. Stanzen ist jedoch nicht für Formbohrungen mit kleinen Radien oder unbedingte, mehrlagige Preforms geeignet, da sich die einzelnen Lagen beim Durchstoßen verschieben und so Spalte und Kavitäten zwischen einem eingesetzten Insert und Preform auftreten können.

Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse und die Entwicklung einer Prozessstrategie zum Abtragen mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung untersucht und beschrieben.

5.2 Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters für das Abtragen mit ultrakurz gepulster Festkörperlaserstrahlung

Das Vorgehen für die Ermittlung geeigneter Prozessfenster für das Abtragen mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung ist in zwei Arbeitspakete unterteilt. Diese sind in Bild 49 schematisch dargestellt.

Bild 49:
Flussdiagramm für
die Versuchsdurch-
führung mit
ultrakurz gepulster
Laserstrahlung



5.2.1 Versuchseinrichtung und Voruntersuchungen

Im Rahmen der Versuchseinrichtung und Voruntersuchungen wurden zunächst Kaustikmessungen und Fokusfahrten durchgeführt, um den Fokusdurchmesser und die Fokuslage zu bestimmen. Zur Messung der Strahlkaustik wurde analog zu den Versuchen mit langgepulster Laserstrahlung ein MicroSpotMonitor 35 der Firma Primes verwendet. Zusätzlich wurde der Einfluss des Schutzglases der

Prozess-einhausung auf die Fokusslage untersucht und eine Korrektur des z-Abstands durchgeführt.

5.2.2 Untersuchungen mit konstanter Fokusslage auf der Probenoberfläche

Im ersten Arbeitspaket wird die Fokusslage konstant auf der Oberfläche der Probe gehalten und eine Variation der Laserparameter und der Scanbewegung durchgeführt. Dabei wurde zuerst die Ausprägung der Bohrwandgeometrie für den asymptotischen Fall betrachtet. Durch Variation der mittleren Leistung der Laserstrahlquelle wurde der Bohrprozess jeweils so lange durchgeführt, bis kein sichtbarer Materialabtrag mehr stattfand. Anschließend wurden mehrere Bohrungen durch Variation der Repetitionsrate und Scangeschwindigkeit hergestellt, um den Einfluss des Pulsüberlapp zu untersuchen. Hierdurch wurde der Pulsüberlapp systematisch variiert. Da die Scangeschwindigkeit bezogen auf die Pulsdauer der ultrakurz gepulsten Laserstrahlung relativ klein war, kann der örtliche Versatz während eines ultrakurzen Laserpulses, durch welchen die Entstehung eines Langloches berücksichtigt wird, vernachlässigt werden ($v_{scan} \cdot t_p \ll d_{foc} \ll d_{Bohrung}$). Der lineare Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{DIN}$ wird vereinfacht zu:

5.21

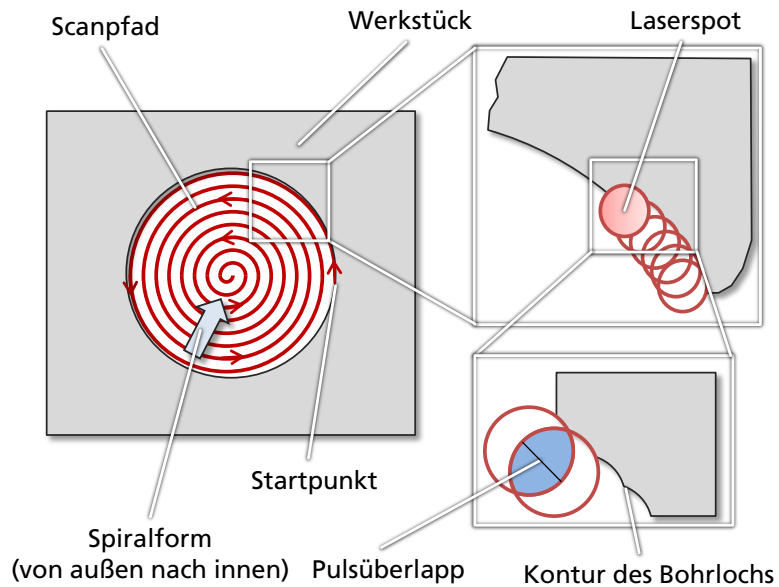
$$P\ddot{U}_{UKP} = \left(1 - \frac{v_{scan}}{f \cdot d_{foc}}\right) \cdot 100 [\%]$$

Eine Berechnung der maximal möglichen Scangeschwindigkeit, bevor ein signifikanter relativer Fehler α zwischen $P\ddot{U}_{UKP}$ und $P\ddot{U}_{DIN}$ auftritt, ist im Anhang auf S.152 dargestellt.

Um eine relativ große Pulsenergie bei Repetitionsraten von einigen Hundert Kilohertz zu ermöglichen, wurde strahlquellenbedingt eine konstante Pulsdauer von $t_p = 7,6$ ps verwendet.

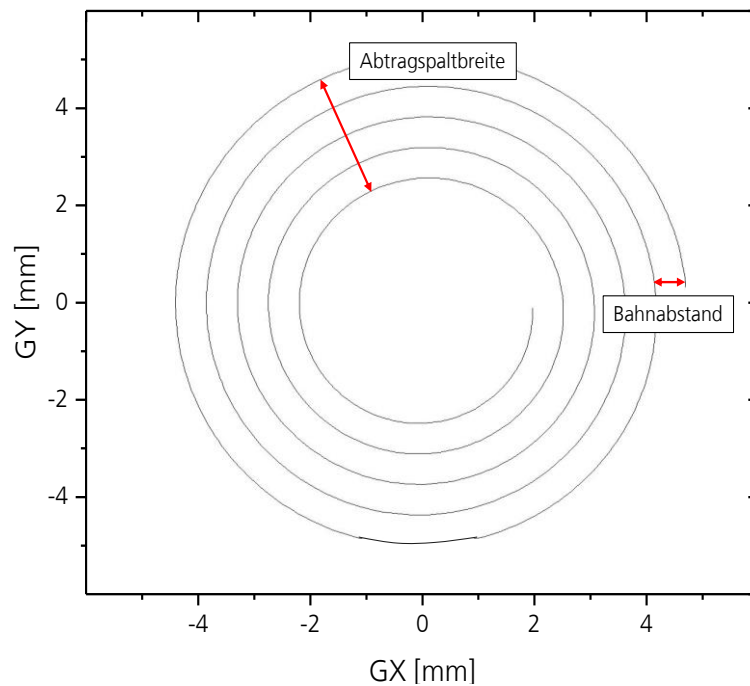
Als Scanpfad wurde eine Spiralform gewählt, auf der die Laserstrahlung gegen den Uhrzeigersinn von außen nach innen geführt wurde. Durch diese Methode sollte ein potenzieller Wärmefluss von der Bearbeitungszone in das Werkstück so klein wie möglich gehalten werden. In Bild 50 ist die Scanstrategie schematisch dargestellt.

Bild 50:
Schematische Darstellung der Scanstrategie beim UKP-Abtrag, nach [JFK15]



Im Folgenden wurden weitere Scanstrategien zur Steigerung der Produktivität des Abtragprozesses untersucht. Dazu wurde der Einfluss des Bahnabstands (engl.: track pitch) und der Abtragspaltbreite (engl.: kerf width) auf die Prozessdauer variiert. In Bild 51 ist der Bahnabstand und die Abtragspaltbreite schematisch innerhalb einer Scankontur dargestellt. Bei einer Abtragspaltbreite von 4,25 mm wird demnach die gesamte Bohrlochkontur ($\varnothing$ 8,5 mm) abgetragen.

Bild 51:
Schematische Darstellung des Bahnabstandes und der Abtragspaltbreite innerhalb der Scankontur mit den Scannerachsen GX und GY



5.2.3 Bestimmung der Zustellung und Verschieben der Fokusslage in z-Richtung

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurde auf Basis der vorherigen Ergebnisse ein Wert für das kontinuierliche Nachfahren der Fokusposition während des Bohrprozesses bei einer festen Abtragstrategie identifiziert. Mit dem berechneten Wert für die z-Zustellung wurde die Fokusposition in z-Richtung (entlang der Bohrungsachse) kontinuierlich verschoben.

Das Schema zur Berechnung der z-Zustellung staffelt sich in mehrere Iterationen und wird im Folgenden kurz erläutert. Zum Verschieben der Fokusslage wurde nach jeder Wiederholung der Scanbewegung die z-Achse um einen definierten Wert entlang der Bohrungsachse innerhalb des Werkstücks bewegt. Dazu wurde zunächst die Dauer einer einzelnen Wiederholung (engl.: repeat) t_{Wdh} gemessen. Des Weiteren wurde die durchschnittliche Prozessdauer t_{proz} mit konstanter Fokusslage auf der Probenoberfläche gemessen. Sobald der Bohrkern aus der Probe herausfällt, wurde der Prozess gestoppt und die Prozessdauer notiert.

Aus den ermittelten Werten lässt sich nach Formel 5.22 die Anzahl der Wiederholungen n für eine Bohrung berechnen.

5.22

$$n = \frac{t_{proz}}{t_{Wdh}}$$

Ferner wurde die Dicke der Probe t_{Probe} gemessen. Anschließend wurde nach

5.23

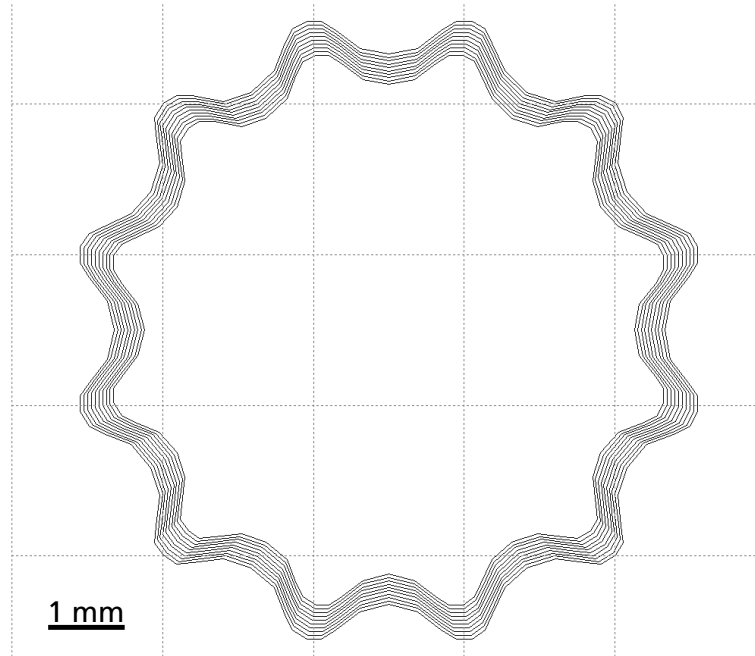
$$\Delta a_z = \frac{t_{Probe}}{n} [mm/Wdh.]$$

ein Wert für die z-Zustellung Δa_z berechnet. Anhand des zeitgleichen z-Versatzes während der Bearbeitung sollte einerseits die Bohrtiefe mittels UKP-Laserstrahlung vergrößert, andererseits die Prozessdauer verkleinert werden.

5.2.4 Herstellung von Formbohrungen

Abschließend wurden in Arbeitspaket 2 die bisher entwickelten Parameter auf Formbohrungen übertragen. Als Bohrkontur wurde eine Sternkontur (KIM®) mit einem Außenkreisdurchmesser von 8,5 mm verwendet [Koh15]. In Bild 52 ist die in Arbeitspaket 2 verwendete Bohrkontur schematisch dargestellt.

Bild 52:
Schematische Darstellung einer Sternkontur (KIM®) mit mehreren, jeweils 100 µm kleineren Innenkonturen (entspr. einem Bahnabstand 50 µm)



Wie in Arbeitspaket 2 wurde die z-Zustellung mittels Formel 5.22 sowie Formel 5.23 iterativ berechnet, um die Prozessdauer und die Konizität zu verkleinern.

5.2.5 Einfluss der Verfahrensparameter

Im Rahmen des ersten Arbeitspaketes wurden Variationen bezüglich der Laserparameter und der Scanbewegung durchgeführt. Dabei wurde die Fokusslage der Laserstrahlung konstant auf der Probenoberfläche gehalten.

Variation der mittleren Leistung und Repetitionsrate für den asymptotischen Fall

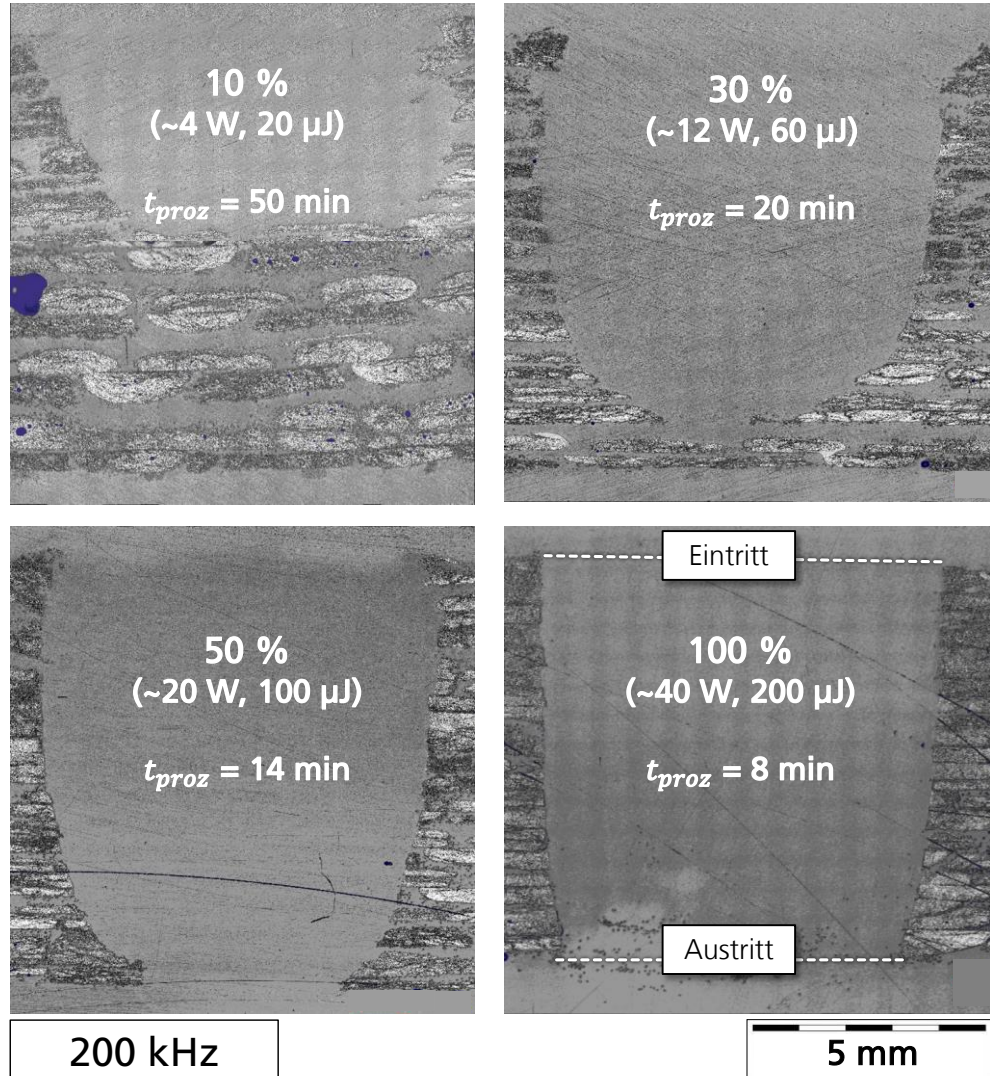
In einem ersten Versuch wurde die mittlere Leistung im Bereich von 4 W bis 280 W für den asymptotischen Fall variiert. Dazu wurden die restlichen einstellbaren Parameter konstant gehalten und der Bohrprozess jeweils so lange durchgeführt, bis kein sichtbarer Abtrag in Form von gelösten Faserpartikeln mehr stattfand. In Tabelle 20 sind die Parameter für die Versuchsdurchführung dargestellt. Der Pulsüberlapp wurde über die eingestellten Scangeschwindigkeit, Fokussdurchmesser und Repetitionsrate berechnet.

Tabelle 20:
Prozessparameter für
die Variation der
mittleren Leistung

Parameter		Werte		Einheit
Repetitionsrate	f	200 (über Pulspicking)	1400	kHz
Mittlere Leistung	$\bar{P}$	~ 4 - 40	~ 28 - 280	W
Pulsenergie	E_p	~ 20 - 200		μJ
Scangeschwindigkeit	v_s	2000		mm/s
Pulsüberlapp	$P\ddot{U}_{UKP}$	83,3	98	%
Bahnabstand		0,06		mm
Abtragspaltbreite		4,25 (Vollabtrag)		mm
Lagenanzahl / Dicke		10 / ~ 7		mm

Für die Analyse wurden Längsschliffe von Bohrungen betrachtet, die mit einer Repetitionsrate von 200 kHz (Bild 53) beziehungsweise 1,4 MHz (Bild 89, S.156) hergestellt wurden. In jedem Bild sind dabei Bohrungen bei jeweils 10-100 % der mittleren Leistung hergestellt worden. Über den Bohrungen sind jeweils die mittleren Leistungen in Watt angegeben. Bei einer Repetitionsrate von 200 kHz sind die Bohrungen bei kleinen Leistungen (4-20 W) nicht, beziehungsweise nur mit einem kleinen Austritt, durchgebohrt. Die Laserfluenz reicht aufgrund der relativ kleinen Pulsenergie nicht aus, um eine zehnlagige Probe vollständig zu trennen. Da der asymptotische Fall untersucht wurde, ist die Fluenz am Bohrgrund kleiner als die Abtragschwellfluenz der Carbonfasern. So entsteht die zum Austritt hin abgerundete Bohrgeometrie. Sobald diese Bohrgeometrie erreicht wird, führt der Bearbeitungsprozess zu einer reinen Energieaufnahme in Form von Wärme ohne weiteren Materialabtrag. Die Bohrung mit der kleinsten Konizität bei einer Repetitionsrate von 200 kHz wurde bei einer Leistung von 40 W hergestellt. Dies entspricht der maximalen Leistung für die eingestellte Repetitionsrate von 200 kHz. Bei einer Repetitionsrate von 1,4 MHz wurde bereits bei kleiner Leistung (28 W) eine Durchgangsbohrung erstellt. Ab einer mittleren Leistung von 84 W änderte sich die Konizität der Bohrungen mit größerer Leistung nicht mehr. Vermutlich wird innerhalb dieses Leistungsbereichs die Abtragschwellfluenz erreicht. Die Konizität der Bohrungen im Bereich von 84-280 W beträgt 12-13 %. Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurde untersucht, ob durch eine dynamische Zustellung der Fokusposition in z-Richtung während des Bohrprozesses eine kleinere Konizität ermöglicht wird.

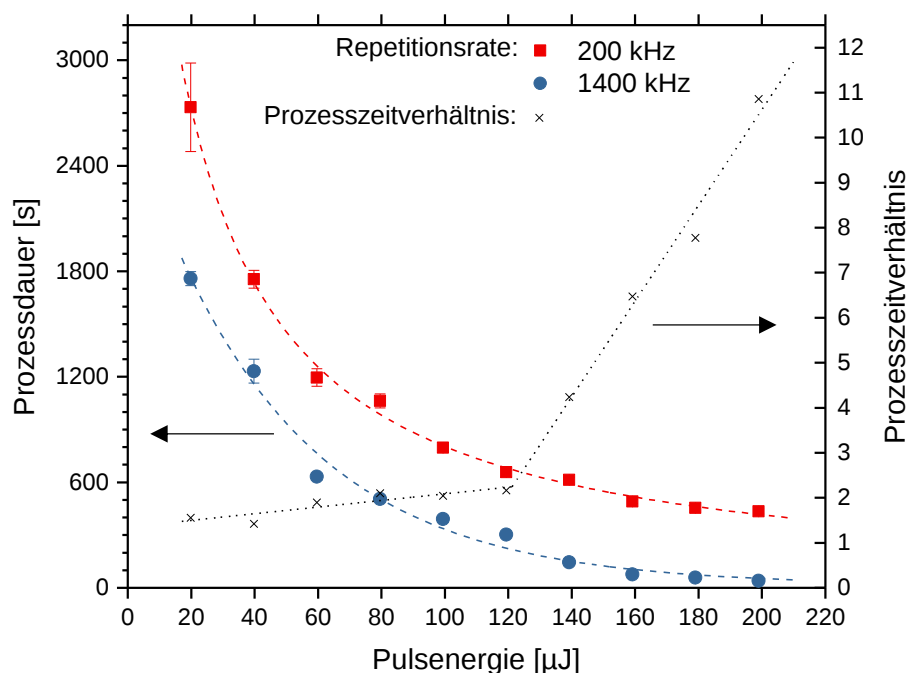
Bild 53:
Längsschliffe von
mittels UKP-
Laserstrahlung
abgetragenen
Bohrungen in
mehrlagigen
Preforms
($f_{\text{Laser}} = 200 \text{ kHz}$)



In Bild 54 ist die Prozessdauer der Bohrungen der Leistungsvariation in Abhängigkeit von der Pulsenergie dargestellt, um den Einfluss der verschiedenen Repetitionsraten auf die Prozessdauer vergleichen zu können. Mit größerer mittlerer Leistung, beziehungsweise Pulsenergie, wird die Prozessdauer zur Herstellung einer Bohrung, bis kein Materialabtrag stattfindet, kleiner. Bei einer Repetitionsrate von 200 kHz und einer Pulsenergie von 20 μJ (10 % mittlere Leistung) wurde nach durchschnittlich circa 2.700 s (45 min) kein sichtbarer Abtrag mehr beobachtet. Bei maximaler Leistung beträgt die Pulsenergie 200 μJ und die Prozessdauer wurde auf durchschnittlich 434 s (7:14 min) verkürzt. Zwischen der Prozessdauer und der Repetitionsrate besteht eine degressive Korrelation (Bild 54). Bei einer Repetitionsrate von 1,4 MHz und einer Pulsenergie von 20 μJ fand nach durchschnittlich 30 min kein sichtbarer Abtrag mehr statt. Bei

maximaler Leistung und einer maximalen Pulsenergie von 198,93 μJ betrug die durchschnittliche Prozessdauer einer Bohrung mit 1,4 MHz Repetitionsrate im Durchschnitt 40 s.

Bild 54:
Abhängigkeit der Prozessdauer von der Pulsenergie mit konstanter Fokuslage auf der Probenoberfläche bei einer Repetitionsrate von 200 kHz sowie 1,4 MHz; Das Prozesszeitverhältnis entspricht dem Quotienten der Prozesszeiten für die jeweilige Pulsenergie



Obwohl die mittlere Leistung bei Verwendung einer Repetitionsrate von 1,4 MHz im Vergleich zum Puls picking bei 200 kHz siebenmal größer ist, steigt das Prozesszeitverhältnis zwischen 200 kHz und 1400 kHz bei Pulsenergien zwischen 20 μJ und 120 μJ nur leicht an (1,55 auf 2,16). Ab 120 μJ steigt das Verhältnis plötzlich stark an, welches durch Auftreten von Wärmeakkumulationseffekten bei Verwendung einer Repetitionsrate von 1,4 MHz erklärt werden kann. Durch den vermehrten Wärmestau wird die Abtragleistung daher größer. Die Abtrageeffizienz wird trotz der siebenfachen mittleren Leistung bei 1,4 MHz kleiner, da die Prozesszeit im Vergleich zu einem Prozess mit 200 kHz bei einem ähnlich großen abgetragenen Volumen nur halbiert wird. Weiterhin könnte ab ca. 120 μJ ein Gleichgewicht zwischen Wärmeabfuhr und Wärmeeintrag vorliegen, wodurch bei Sättigung der Verdampfungsschwelle und effizienterer Abfuhr der ablatierten Prozessprodukte eine vergleichsweise höhere Abtragleistung vorliegt. Die kinetische Energie der ablatierten Produkte könnte dabei so groß werden, dass keine Reaktion der Laserstrahlung mit den abgetragenen Partikeln in der Bohrung mehr auftritt.

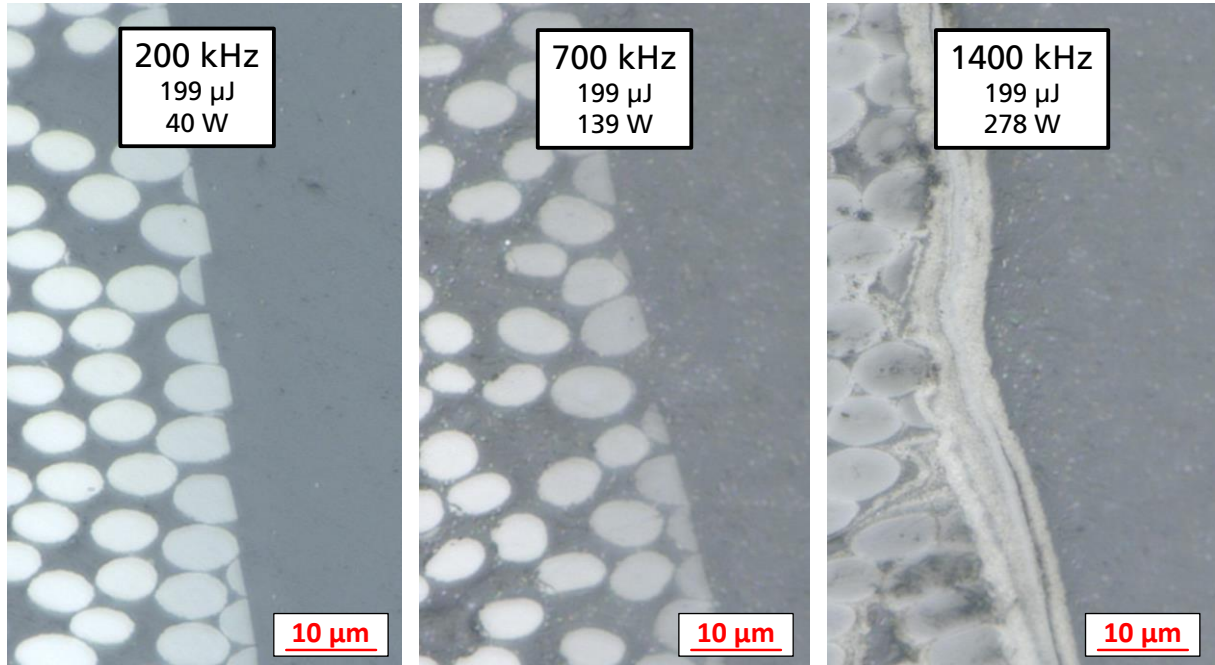


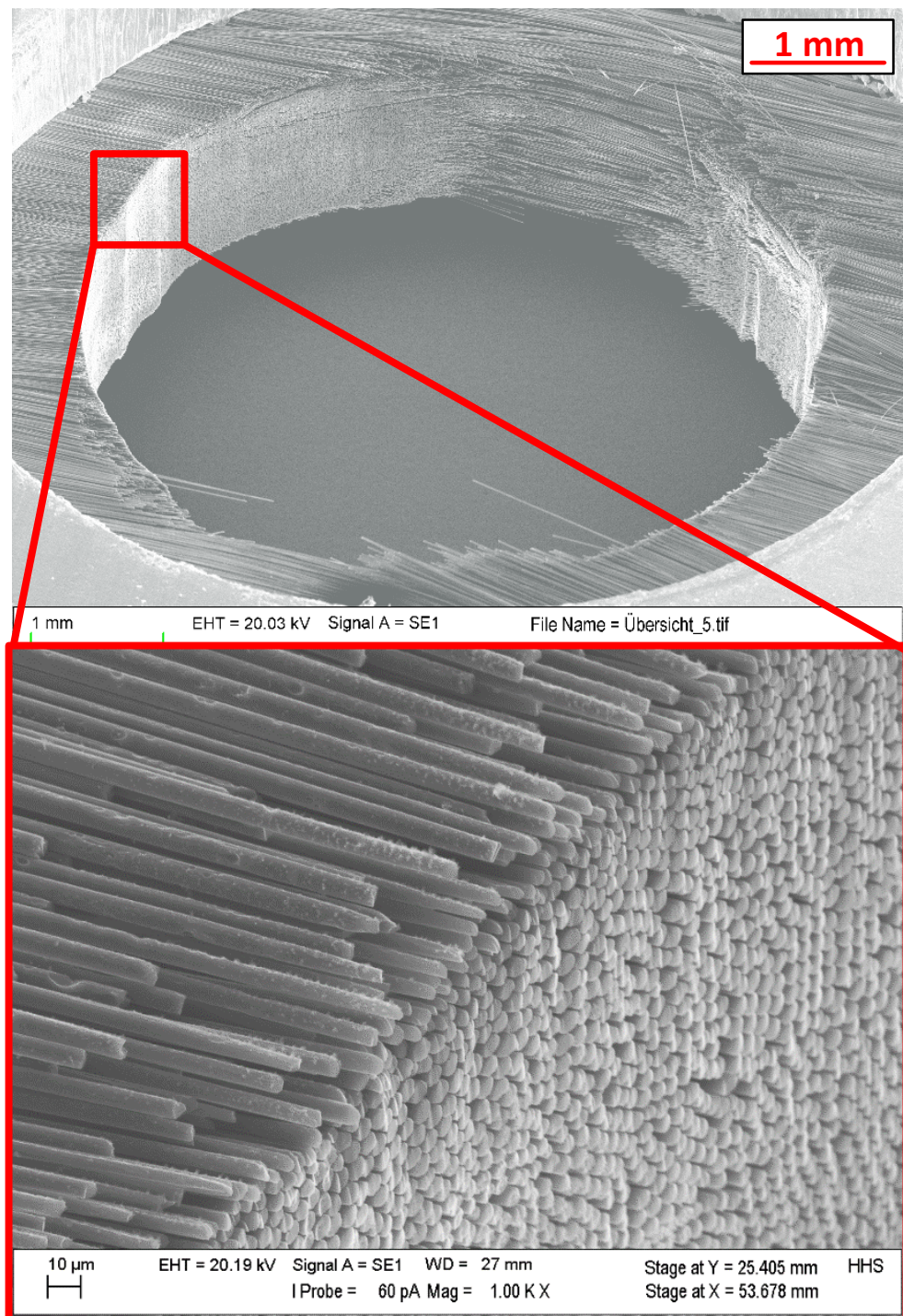
Bild 55: Längsschliffe von Bohrungen bei verschiedenen Repetitionsraten und konstanter Pulsenergie $E_p = 199 \mu\text{J}$. Ab 1,4 MHz und $199 \mu\text{J}$ Pulsenergie entsteht eine verfestigte Randschicht an der Bohrungswand

Bei Betrachtung der Bohrwände im Längsschliff ist bei allen Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 1,4 MHz hergestellt wurden, eine verfestigte Randschicht vorhanden (Bild 55, rechts). Vermutlich war die Puls-zu-Puls Überlagerung bei einer Repetitionsrate von 1,4 MHz und $199 \mu\text{J}$ Pulsenergie so groß, dass durch den Wärmestau thermische induzierte Defekte in Form einer Randschicht an der Bohrungswand auftraten. Die kurze Abkühlzeit zwischen den einzelnen Laserpulsen infolge der großen Repetitionsrate war nicht ausreichend, um die Bearbeitungszone auf Raumtemperatur abzukühlen [WGB14] [JFK15] [Fin17].

Analog zu der Randschicht bei mit langgepulster Faserlaserstrahlung gebohrten Preforms kann die Randschicht entlang der Bohrungswänden zu einer nachhaltigen Beschädigung der Inserts und der Matrix führen. Aus diesem Grund ist eine Repetitionsrate von 1,4 MHz bei einer Pulsenergie von $199 \mu\text{J}$ trotz deutlich größerer Produktivität nicht für die Herstellung von Bohrungen für Inserts geeignet. Während der kurzzeitigen Möglichkeit, einen EOM mit einer Schaltfrequenz von bis zu 1 MHz nutzen zu können, konnte für eine mit Teilerfaktor 2 gepickte Repetitionsrate von 700 kHz gezeigt werden, dass keine Randschicht auf den Bohrwänden im Preform entsteht. Die Übergangsgrenze zur Entstehung einer verfestigten Randschicht liegt demnach zwischen 700 kHz und 1,4 MHz, unter Beachtung der zugehörigen mittleren Leistungen von 139 W bzw. 278 W.

Weiterhin wurde bei der Verwendung von Repetitionsraten bis 700 kHz keine Aufquellung der Faserenden an der Bohrwand beobachtet (Bild 56).

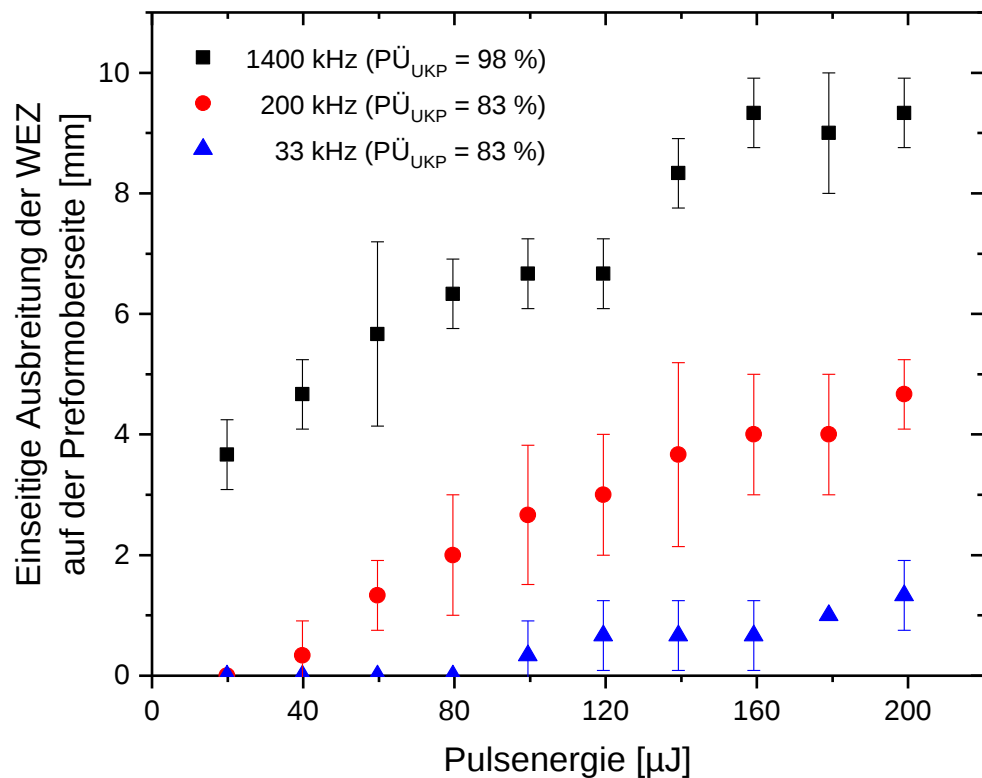
Bild 56: REM-Aufnahme der Bohrwand an einem mittels UKP-Laserstrahlung gebohrten UD-Preform (PAN-Fasern)
 $f_{\text{Laser}} = 700 \text{ kHz}$



Die Fasern sind an den Enden scharf getrennt und weisen nur leichte Partikelablagerungen auf der Faseroberfläche im Trennbereich auf. Hierdurch wird ein Matrixinfusionsprozess ohne signifikante Partikel- oder Lufteinschlüsse begünstigt.

In Bild 57 ist die einseitige Ausbreitung der WEZ auf der Oberseite über der Pulsenergie für verschiedene Repetitionsraten aufgetragen. Zusätzlich zu 200 kHz und 1,4 MHz wurde eine Repetitionsrate von 33 kHz als untere Grenze untersucht. Mit größerer mittlerer Leistung wurden Bohrungen mit einer größeren einseitigen Ausbreitung der WEZ hergestellt. Durch Vergrößerung der Repetitionsrate wird die Anfangssteigung der degressiven Verläufe für die einseitige Ausbreitung der WEZ größer. Demnach wird die Größe der WEZ im Vergleich zur Vergrößerung der Pulsenergie stärker durch eine größere Repetitionsrate beeinflusst.

Bild 57:
Abhängigkeit der WEZ von der mittleren Leistung bei verschiedenen Repetitionsraten



Im Rahmen von zukünftigen Arbeiten sollte der Einfluss einer Repetitionsrate im Bereich von 200-1400 kHz genauer untersucht werden. Technisch bedingt kann aufgrund der bisher mangelnden Verfügbarkeit und den bisher kurzen Standzeiten von Hochleistung-EOMs mit Schaltgeschwindigkeiten bis 1 MHz für mittleren Laserleistungen über 100 W dieses Intervall nicht näher untersucht werden.

Variation des Pulsüberlapp

Im Folgenden wurde der Einfluss des Pulsüberlapp auf die Ausbreitung der einseitigen WEZ, die Konizität und die Prozessdauer der Bohrungen untersucht. Um unterschiedliche Werte für den Pulsüberlapp nach Formel 5.21 (S. 87) zu erhalten, wurde eine Repetitionsrate von 42 kHz gewählt mit der ein linearer Pulsüberlapp von $P\ddot{U}_{UKP} = 0\%$ realisiert werden konnte, ohne die maximale Scangeschwindigkeit des verwendeten Scanners zu überschreiten. Weiterhin wurde die Scankontur bei einer Scangeschwindigkeit von ca. 2,5 m/s ohne Bahnfehler abgefahren. Für verschiedene Pulsüberlapp wurden die Scangeschwindigkeiten variiert. Da die Repetitionsrate relativ klein gewählt wurde, wurde für die Versuchsreihe eine Probe aus fünf bi-axialen Lagen verwendet, um Durchgangsbohrungen herzustellen. Die gemessenen Zeiten können daher nicht mit den anderen Versuchsreihen direkt verglichen werden. Die restlichen Parameter wurden konstant gehalten und sind in Tabelle 21 aufgeführt.

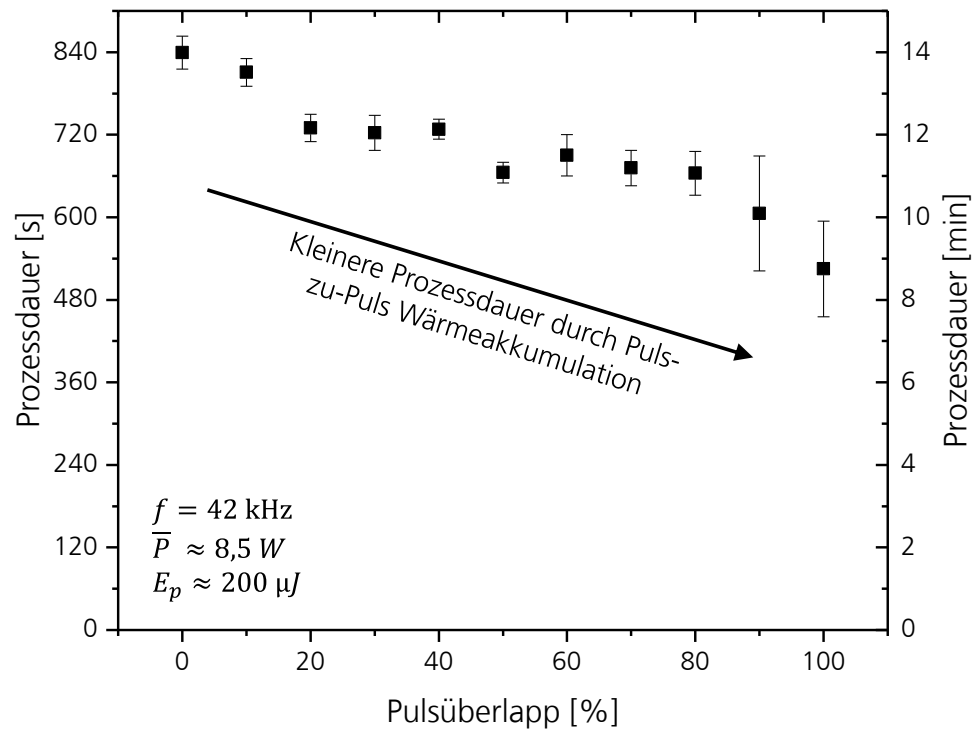
Tabelle 21:
Verfahrensparameter
für die Variation des
Pulsüberlapp für die
Herstellung von
Durchgangs-
bohrungen in
fünflagige bi-axiale
Preforms

Parameter	Werte											Einheit
Pulsüberlapp	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99,5	%
Scan- geschwindigkeit	2520	2268	2016	1764	1512	1260	1008	756	504	252	13	mm/s
Mittlere Leistung	~ 8,5											W
Repetitionsrate	42											kHz
Pulsenergie	~200											μJ
Bahnabstand	0,06											mm
Abtragspaltbreite	4,25 (Vollabtrag)											mm
Anzahl der Lagen / Probendicke	5 / ~ 3,5											mm

In Bild 58 ist die Prozessdauer der Bohrungen für den asymptotischen Fall über den Pulsüberlapp aufgetragen. Die Prozessdauer wird mit steigendem linearem Pulsüberlapp kleiner. Da die Repetitionsrate und die Scanstrategie nicht verändert wurden, kann die Verkleinerung der Prozesszeit auf eine Puls-zu-Puls Wärmeakkumulation zurückgeführt werden. Eine Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation scheidet aufgrund der kleiner werdenden Scangeschwindigkeit zu größeren Werten für den Pulsüberlapp aus. Bei kleineren Scangeschwindigkeiten wird die Zeit für eine Umfahrt bis zum Wiederkehren der Laserstrahlung an derselben Stelle sogar größer, welches in Bezug auf die Abkühldauer an den Carbonfasern einen positiven Effekt hat. Durch den größeren Pulsüberlapp treffen analog zu Bild 32 (S. 60) mehr Pulse pro Stelle auf, wodurch eine stärkere

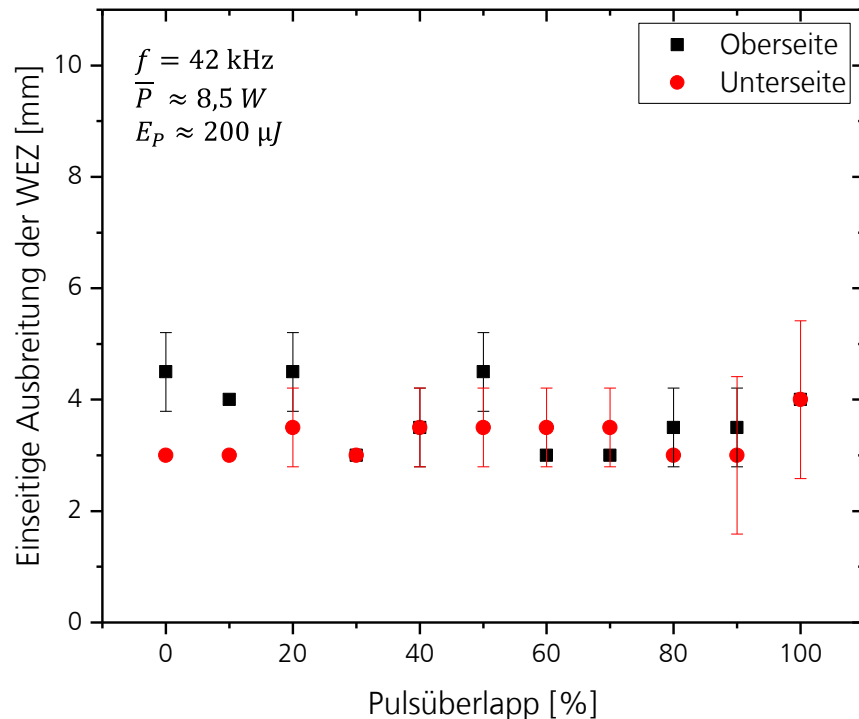
Wärmeakkumulation im Werkstoff erreicht und so ein thermisch induzierter Abtrag gefördert wird.

Bild 58:
Abhängigkeit der
Prozessdauer vom
Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{UKP}$



In Bild 59 ist die einseitige Ausbreitung der WEZ auf der Ober- und Unterseite der Probe über den Pulsüberlapp aufgetragen. Eine Variation des Pulsüberlapp hat keinen direkten Einfluss auf die WEZ. Die Werte für die einseitige Ausbreitung der WEZ liegen zwischen 3-4 mm. Da sowohl die mittlere Leistung als auch die Repetitionsrate für die Versuchsreihe konstant gehalten wurden, konnte wiederholt der Zusammenhang zwischen mittlerer Leistung und Repetitionsrate bezüglich der Ausbreitung der WEZ gezeigt werden. Hinsichtlich der Konizität der Bohrungen ist ebenfalls kein Zusammenhang für verschiedene Pulsüberlapp feststellbar. Die Konizität beträgt für die gesamte Versuchsreihe 10-18 %.

Bild 59:
Abhängigkeit der
WEZ vom Puls-
überlapp $P\bar{U}_{UKP}$ bei
konstanten
Laserparametern



Zusammenfassend ist die einseitige Ausbreitung der WEZ von der mittleren Leistung sowie der Repetitionsrate aufgrund von Wärmeakkumulationseffekten abhängig. Mit Vergrößerung der Repetitionsrate bzw. Verkleinerung des zeitlichen Pulsabstandes wird eine Vergrößerung der WEZ begünstigt. Der örtliche Pulsabstand in Form des Pulsüberlapps hat hingegen beim kontinuierlichen Scannen mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung keinen Einfluss auf die Ausbreitung der WEZ.

Variation des Bahnabstands und der Abtragspaltbreite

In der letzten Versuchsreihe des ersten Arbeitspakets wurde der Einfluss des Bahnabstands und der Abtragspaltbreite auf die Prozessdauer untersucht. Dazu wurde der Bahnabstand der Spiralarms im Bereich von 0,02-1,5 mm variiert. Zur Vermeidung der Bildung einer verfestigten Randschicht an der Bohrungswand wurde mittels Puls picking eine Repetitionsrate von 200 kHz bei einer maximalen mittleren Leistung von 40 W und einer Pulsenergie von 200 μJ verwendet. Die vollständigen Prozessparameter der Versuchsreihe sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22:
Prozessparameter für
die Variation des
Bahnabstands

Parameter	Werte	Einheit
Bahnabstand	0,02 - 0,2 (Δ 0,02); 0,5; 1,5	mm
Repetitionsrate	200	kHz
Mittlere Leistung	~ 40	W
Pulsenergie	~ 200	μJ
Scangeschwindigkeit	2000 60	mm/s
Pulsüberlapp	83,3 99,5	%
Abtragspaltbreite	4,25 (Vollabtrag)	mm
Anzahl der Lagen / Probendicke	10 / ~ 7	mm

In Bild 60 ist links die Konizität und rechts die Prozessdauer der Bohrungen über verschiedene Bahnabstände aufgetragen. Mit größeren Bahnabständen wird die Konizität der Bohrungen vergrößert. Am äußeren Rand der Bohrung wurde nicht ausreichend Material abgetragen. Daraus folgen mit steigendem Bahnabstand ein kleinerer Austrittsdurchmesser und eine größere Konizität. Bei Einstellung des Bahnabstands auf 0,5 mm sowie 1,5 mm wurde die Probe bis zu einer Prozessdauer von 5 min nicht vollständig durchbohrt und der Prozess daher abgebrochen. In Bezug auf die Fokusgröße war der Bahnabstand zwischen den Spiralarmen in den letzten beiden Fällen so groß, dass zwar mehrere nebeneinanderliegende Gräben entlang der Spiralkontur erzeugt wurden, aber kein vollständiges Durchtrennen aufgrund der kleinen Spaltbreiten möglich war.

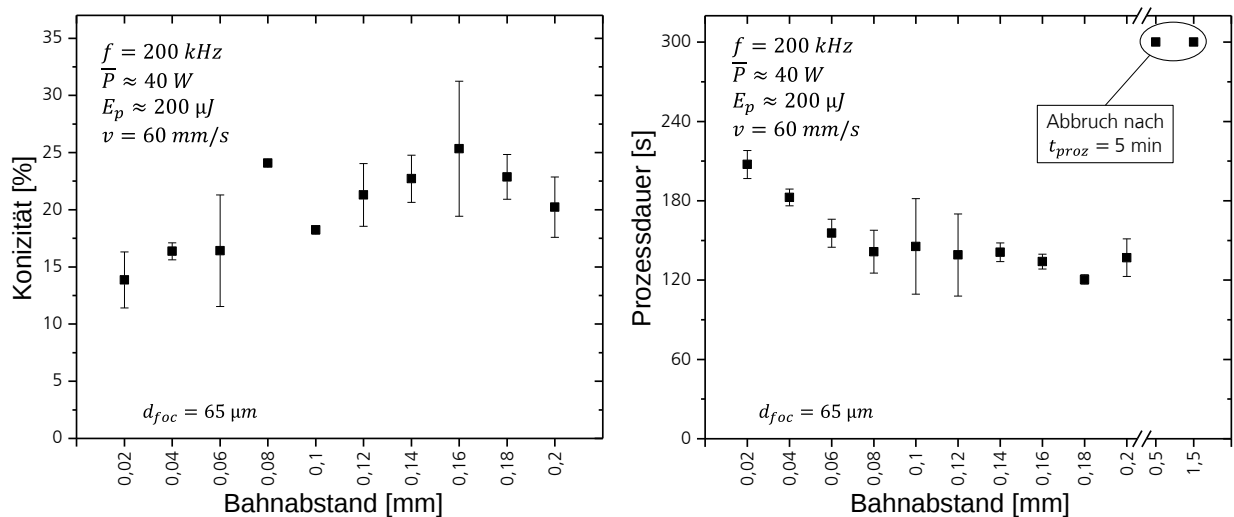


Bild 60: Abhängigkeit der Konizität (links) und der Prozessdauer (rechts) von verschiedenen Spiralbahnabständen

Bei einem Bahnabstand von 0,02 mm war die Prozessdauer mit über 3 min am größten. Da der Bahnabstand bei dieser Einstellung kleiner als der Fokusdurchmesser (0,065 mm) war, werden Bereiche mehrfach gescannt. Dies resultiert in einer Vergrößerung der Prozessdauer, jedoch gleichzeitig zu einer Verkleinerung der Konizität. Im Bereich von 0,06 mm bis 0,18 mm wurde der

Bahnabstand bis auf das Dreifache des Fokussdurchmessers vergrößert. Folglich wurde die Prozessdauer bei Verwendung eines Bahnabstands von 0,18 mm auf 2 min verkürzt. Aus weiterer Vergrößerung des Bahnabstands auf 0,2 mm folgte eine Vergrößerung der Prozessdauer. Die Abtrageeffizienz wurde also bis zu einem Spiralbahnabstand von 0,18 mm größer, was darauf hindeutet, dass nicht jede Stelle von Laserpulsen getroffen werden muss. Kleinere lose Faserreste wurden wahrscheinlich selbst in mehreren Millimetern Tiefe durch den Dampfdruck der evaporierten Faserpartikel und durch den Aufstieg der erwärmten Luft an der Abtragstelle herausgefördert [MSW13] [ZFW15].

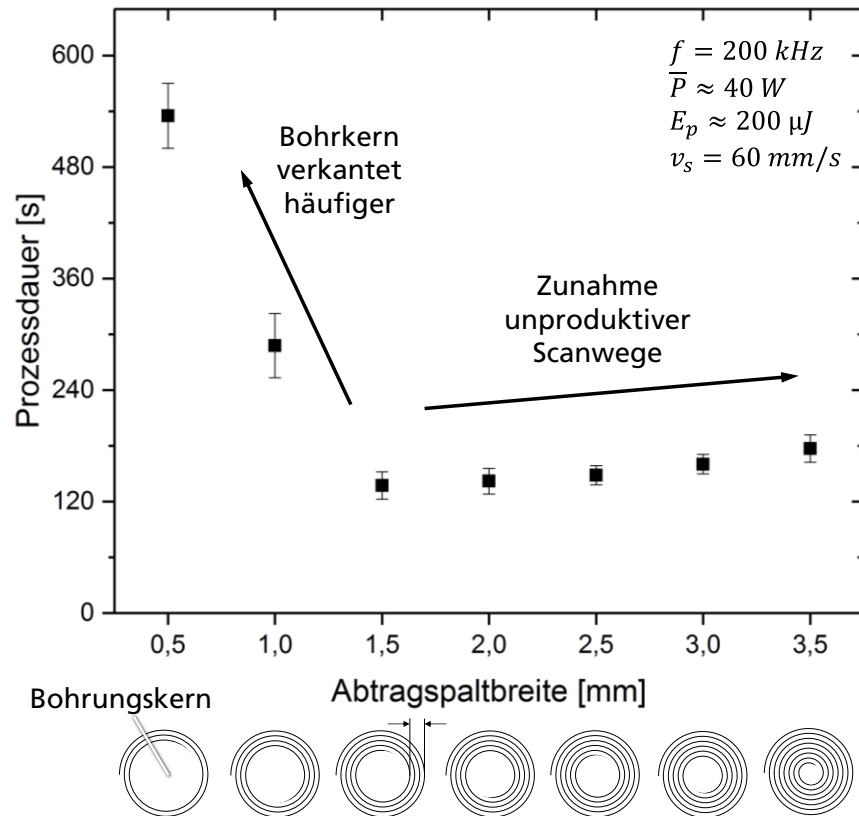
In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Abtragspaltbreite variiert, um den Einfluss auf die Prozessdauer zu untersuchen. Für eine möglichst große Produktivität wurde der gleiche Parametersatz wie für die Variation des Bahnabstands verwendet. Die vollständigen Parameter sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23:
Prozessparameter für
die Variation der Ab-
tragspaltbreite

Parameter	Werte	Einheit
Abtragspaltbreite	0,5 - 3,5 (Δ 0,5)	mm
Repetitionsrate	200	kHz
Scangeschwindigkeit	60	mm/s
Mittlere Leistung	~ 280	W
Pulsenergie	~ 200	μ J
Pulsüberlapp	99,5	%
Bahnabstand	0,06	mm
Anzahl der Lagen / Probendicke	10 / ~ 7	mm

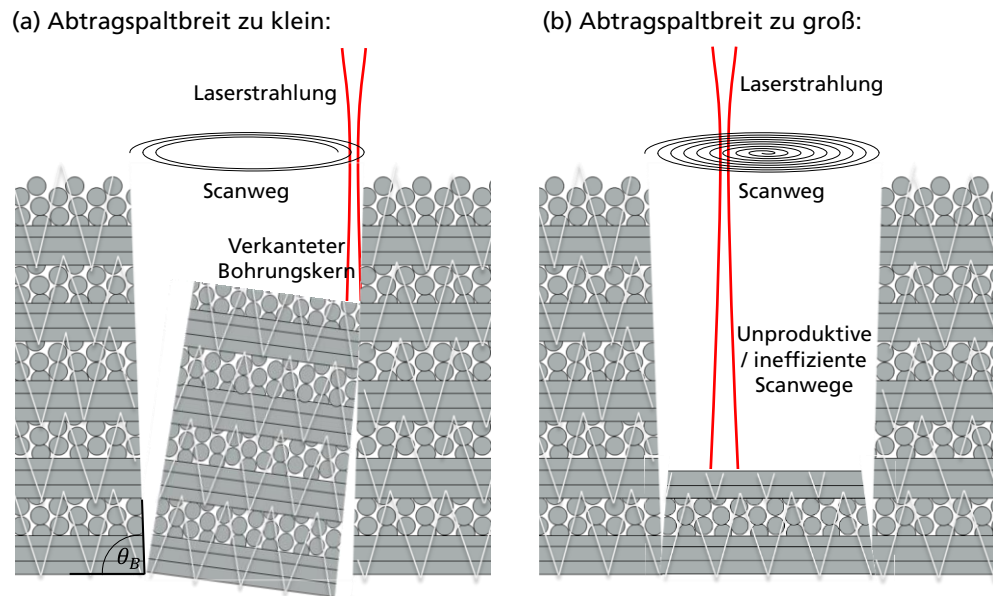
In Bild 61 ist die Prozessdauer über verschiedene Abtragspaltbreiten aufgetragen. Für Abtragspaltbreiten von 1,5 bis 3,5 mm für eine Bohrung mit 8 mm Durchmesser wurde die Prozessdauer mit Verkleinerung der Abtragspaltbreite kleiner. Durch die kleiner werdende Abtragspaltbreite wurde in der Mitte der Bohrung ein größer werdender Bohrkern erzeugt. Bei Herausfallen des Bohrkerns aus der Bohrung wurde der Bohrprozess beendet.

Bild 61:
Abhängigkeit der
Prozessdauer von
der Abtragspalt-
breite



Beim Scanprozess mit kleiner Abtragspaltbreite ist das Verhältnis zwischen Bohrkernlänge (entspricht der Preformdicke) und der abgetragenen Spaltbreite relativ groß, so dass der Kern, selbst wenn das Preform vollständig durchtrennt wurde, sehr leicht verkippen und verkanten kann (Bild 62). Durch das Verkanten mit der Bohrungswand wurde der Kern beim erneuten Scannen an den Kontaktpunkten zur Bohrwand abgetragen. Dieser Vorgang wiederholte sich so oft, bis der mehrfach abgetragene Kern aus der Bohrung fiel. In diesem Fall musste die Abtragspaltbreite vergrößert werden. Da nicht zwangsweise ein Verkanten des Bohrkerns eintritt, ist die statistische Unsicherheit für die Gesamtprozessdauer größer.

Bild 62:
Schematische
Darstellung der
Bearbeitungsfehler
beim spiralförmigen
UKP-Abtrag mit zu
kleiner (a) und zu
großer (b)
Abtragspaltbreite



Ist die Spaltbreite sehr groß wird der Bohrkern unnötig weit abgetragen (Bild 62b). Während der Gesamtprozessdauer findet zwar ein konstant hoher Materialabtrag statt, dieser erhöht aber nicht die Gesamtprozesseffizienz. Weiterhin kann der Bohrkern bereits aus der Bohrung gefallen sein und ein Großteil der Laserstrahlung transmittiert durch die Bohrung ohne Interaktion mit den Bohrungswänden. Ein Teil der Laserstrahlung nahe der Spiralbahnmitte wird in diesem Fall nur durch Luft geführt. Derartige ineffiziente und unproduktive Scanpfade müssen für einen produktiven Abtragprozess vermieden werden. Bei den verwendeten Verfahrensparametern wurde bei einem ca. 7 mm dicken Preform mit einer 8 mm großen Bohrung eine optimal Abtragspaltbreite von 1,5 mm identifiziert.

Bei Abtragspaltbreiten von kleiner als 0,5 mm konnte ein Preform mit 7 mm Dicke nicht vollständig getrennt werden. Dies liegt an dem maximalen Bohrwandwinkel von 88° bei Verwendung der oben genannten Laserparameter. Durch die Projektion der Laserstrahlung auf eine sehr schräge Oberfläche wird die belichtete Fläche proportional $\cos(\theta_B)^{-1}$ größer (vgl. Formel 5.29, S. 109). Dabei entspricht θ_B dem Winkel zwischen Austrittsfläche und Bohrwand im Längsschnitt (Bild 62a). Während des Prozesses findet ein Materialabtrag solange statt, bis die Abtragschwellfluenz unterschritten wird.

Aufgrund der Vielzahl an Versuchskombinationen hinsichtlich Preformdicke, Bohrlochdurchmesser sowie Spezifikationen der Laserstrahlquelle und des Optiksystems ist die Entwicklung eines einfachen aber ausreichend genauen Modells zur Abschätzung der zu erwartenden Bohrwandform erforderlich. Mit Hilfe eines derartigen Modells kann der Aufwand zur Identifikation von Laser-

und Strahlformungsparametern minimiert werden. Weiterhin kann durch die Abschätzung der Konizität der Bohrung eine zumindest qualitative Aussage über die Verliersicherheit der Inserts getroffen werden. Die Entwicklung eines derartigen Modells zur Vorhersage der Bohrwandkontur wird im folgenden Kapitel erarbeitet.

Ein weiterer Ansatz zur Verkleinerung der Prozesszeit ist eine Kombination verschiedener Scanbewegungen. So kann beispielsweise nach dem Freilegen eines Kerns die Scanbewegung so verändert werden, dass nach dem Herausfallen des Kerns nur noch die Bohrwand gescannt werden, um die Konizität der Bohrung zu verkleinern. So wird eine über die Prozessdauer durchgehende, vollflächige Scanbewegung ohne effektiven Materialabtrag, besonders nach Ausfallen der Kerns, vermieden. Eine weitere Möglichkeit zur Produktivitätssteigerung mittels einer kontinuierlichen Fokussachfahrt (dynamische Prozessführung) wird in Kapitel 5.2.7 auf S.118 beschrieben.

5.2.6 Relevante Mechanismen für die Ausbildung der Bohrlochform

Um die relevanten Einflussfaktoren für die Ausbildung der Bohrlochform einzugrenzen, wurde mit Hilfe eines athermischen Abtragmodells die asymptotische Bohrlochform angenähert. Somit konnte zum einen die Konizität des Bohrlochs bei verschiedenen Materialstärken im asymptotischen Zustand abgeschätzt als auch der thermische Einfluss quantifiziert werden, wenn die reale Bohrlochform signifikant größer als die des Modells ist, welches thermische Einflüsse vernachlässigt.

Um die Abtragbedingung beim Ultrakurzpulsabtrag in das vereinfachte Modell zu integrieren, wurden a priori drei Prämissen aufgestellt:

1. Bei Überschreitung der Schwellfluenz findet ein athermischer Materialabtrag statt.
2. Die Absorption der Laserstrahlung in den Carbonfasern ist inzidenzwinkelabhängig.
3. Aufgrund der durch Divergenz erzeugten Strahlvergrößerung und der winkelabhängigen Projektion der Laserstrahlung auf eine schräge Bohrwand wird die effektive bestrahlte Fläche vergrößert. Entsprechend wird die Fluenz kleiner.

Daraus folgt, dass ein Materialabtrag stattfindet, wenn

5.24

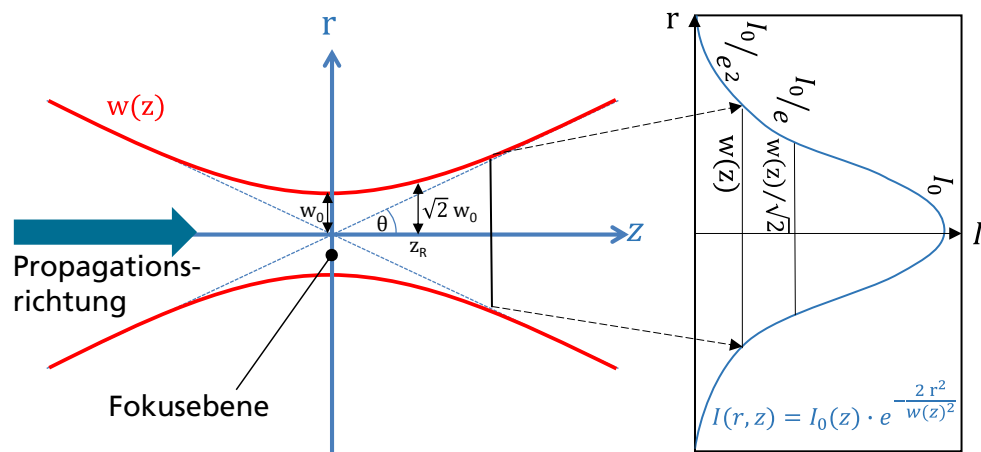
$$F_s \leq F(z) \cdot \cos(\theta_B) \cdot A(\theta_B)$$

erfüllt ist. Dabei ist F_s die Abtragschwellfluenz des Carbonfasern, $F(z) \cdot \cos(\theta_B)$ die vereinfachte, projizierte Fluenz der Laserstrahlung in einer Tiefe z auf eine

um den Winkel θ_B gekippte Fläche und $A(\theta_B)$ der inzidenzabhängige Absorptionsgrad.

Für die Modellbildung müssen Annahmen für die Form und den örtlichen Verlauf der verwendeten Laserstrahlung festgelegt werden. Geeignet ist die Beschreibung der Laserstrahlung als Gauß-Strahl (Bild 63).

Bild 63:
Schematische
Darstellung des
Strahlungsverlaufs
und des
Intensitätsprofils
(nach [BBM14])



Die Intensität des Strahlungsquerschnitts folgt einer Gaußverteilung, wobei die Pulsspitzenintensität $I_0(z)$ abhängig von der Position auf der z -Achse ist. Die Rayleighlänge z_R ist der Abstand vom Fokus, bei dem die Fläche des Laserspots doppelt so groß wie im Fokus (Bild 63) ist. Die Rayleighlänge z_R wird mit Formel 5.26 berechnet. Der Radius r ist der radiale Abstand zur Hauptachse (z -Richtung). Dabei bezeichnet $w(z)$ den Radius, bei dem die Intensität auf $1/e^2$ ($\sim 13,5\%$) von I_0 gesunken ist. Somit entspricht $w(z=0) = w_0$ dem Radius im Fokus. Dabei gilt für Gaußstrahlung [BBM14]:

5.25

$$I(r, z) = I_0(z) \cdot e^{-\frac{2 \cdot r^2}{w(z)^2}} \quad \text{und} \quad I_0(z) = I_0(0) \cdot \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2$$

Durch folgende Formel wird die Strahlaufweitung beschrieben und der Zusammenhang von $w(z)$ und z_R angegeben [BBM14]:

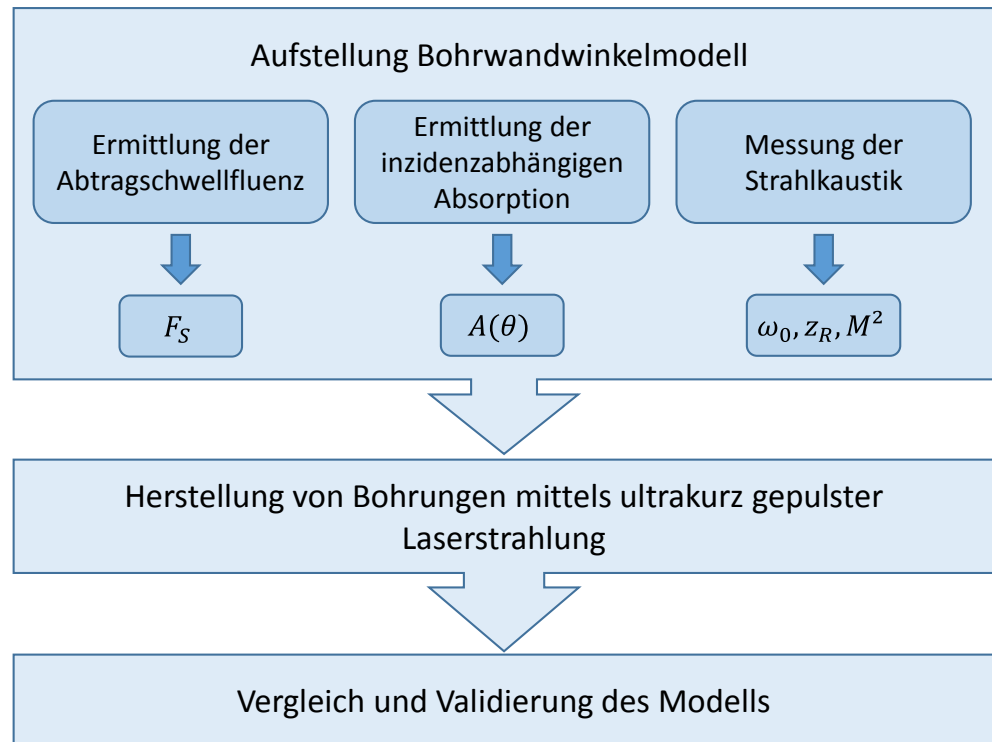
5.26

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad \text{mit} \quad z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot M^2}$$

Mit den Formeln 5.25 und 5.26 kann jeder Stelle unter Angabe der Koordinaten (x, y, z) bzw. aufgrund der Radialsymmetrie (r, z) eine Intensität zugeordnet werden.

Damit die athermische Modellierung des asymptotischen Bohrwandwinkels in Abhängigkeit relevanter Strahlparameter erfolgen kann, wird der Ablauf des Flussdiagramms, wie in Bild 64 dargestellt, durchgeführt:

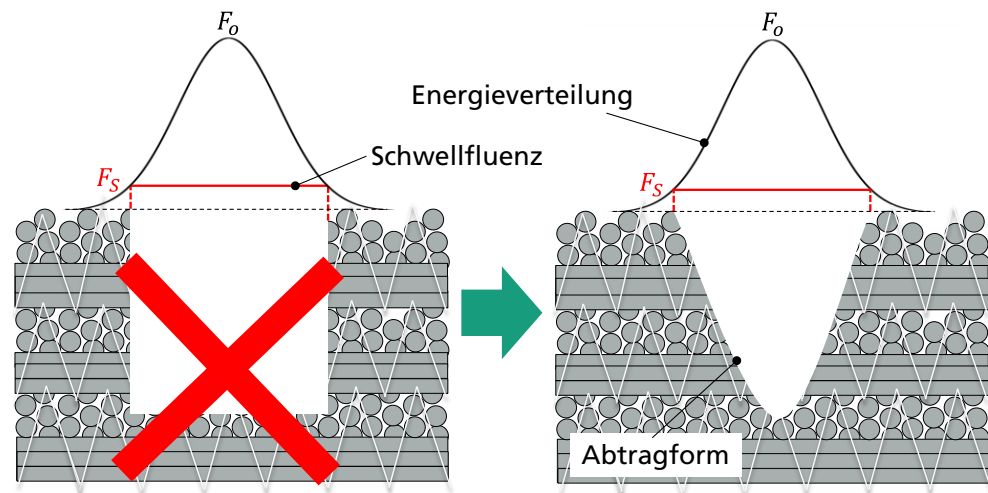
Bild 64:
Ablaufdiagramm zur
Modellierung des
Bohrwandwinkels



Für die vereinfachte Modellierung des Bohrwandwinkels unter Vernachlässigung thermischer Einflüsse werden weiterhin folgende Annahmen getroffen: Die Oberfläche des Werkstücks ist eben und auf derselben Höhe wie der Fokus der Laserstrahlung. In dem werkstückbezogenen Koordinatensystem liegt die Preformoberfläche bei $z = 0$.

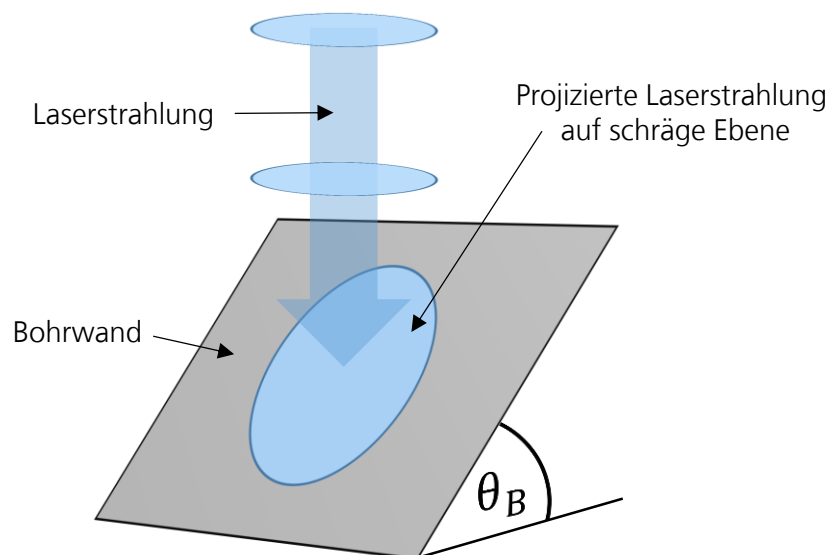
Der Abtragprozess beim Bohren von Preforms wird folgendermaßen beschrieben: Der erste Laserpuls trifft senkrecht auf die Oberfläche und die bestrahlten Kohlenstofffasern werden vaporisiert. Mit der zeitlichen Abfolge der Laserpulse entsprechend der Repetitionsrate wird das Material mit jedem Puls sukzessive abgetragen. Durch das gaußförmige Intensitätsprofil des Pulses ist die geometrische Form des Abtrags nicht rechtwinklig (Seitenwände des Abtragkrater nicht orthogonal zur Oberfläche, Bild 65). Die nachfolgenden Laserpulse treffen während des Scannens am Rand der Bohrung nicht mehr senkrecht auf das Material, sondern auf eine schräge Fläche. Das Ziel ist aus theoretischen Überlegungen eine Formel für den asymptotischen Bohrwandwinkel $\theta_B(z)$ zu erstellen und im Anschluss zu überprüfen.

Bild 65:
Schematische
Darstellung des
Materialabtrags
durch einen
Laserpuls auf einer
ebenen Oberfläche



Dabei wird der Einfluss der zuvor im Bohrprozess eingebrachten thermischen Energie vernachlässigt, sodass im Rahmen des Modells jeder Laserpuls auf eine schräge Fläche der Bohrwand trifft auf der Raumtemperatur herrscht. Für die projizierte Laserfluenz auf einer schrägen Fläche ist der Bohrwandwinkel θ_B relevant (Bild 66).

Bild 66:
Schematische
Darstellung der
projizierten
Laserstrahlung auf
eine schräge
Bohrwand



Durch das zu entwickelnde Modell wird nicht der Materialabtrag der einzelnen Pulse beschrieben, sondern nur angegeben, welcher Bohrwandwinkel sich durch einen rein dampfdominierten Abtrag im asymptotischen Zustand, also nach einer theoretisch unendlich langen Prozesszeit, einstellt. Bei einem Winkel größer als $\theta_B(z)$ bzw. bei einer steileren Bohrwand ist die Fluenz der Laserstrahlung kleiner

als die Schwellfluenz F_S des Werkstoffs. Dadurch kann kein Abtrag mehr stattfinden.

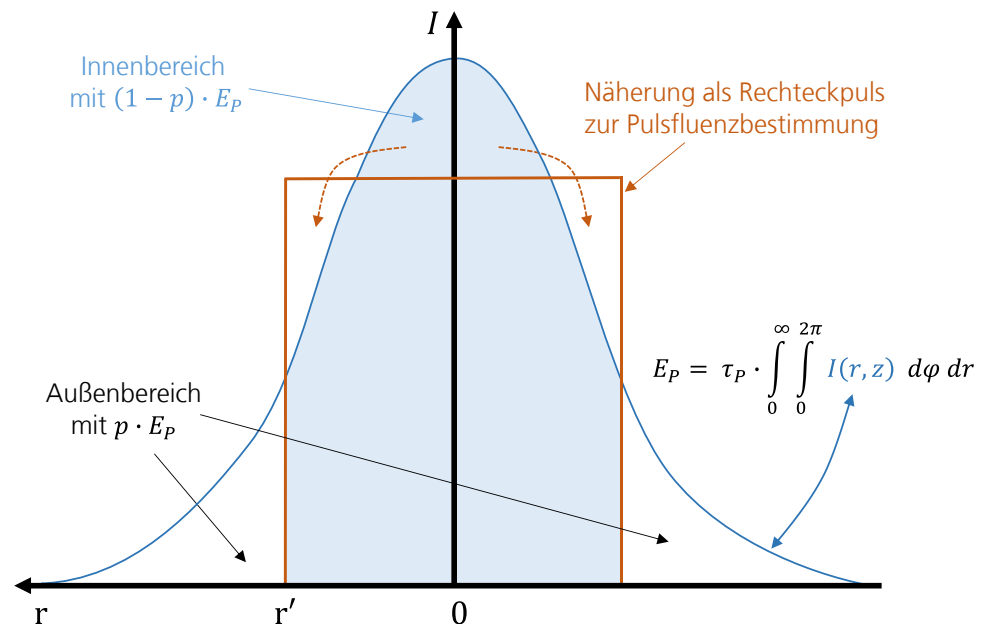
Als Grundlage zur Beschreibung der Propagation in z-Richtung dient die gaußsche Optik. Um die Fluenz eines Pulses zu beschreiben, wird die Intensitätsverteilung innerhalb eines bestimmten Radius r' um die Fokusmitte als ein Rechteckpuls mit der Pulsspitzenfluenz F_0

5.27

$$F_0 = \frac{2 \cdot E_P}{\pi \cdot w(z)^2}$$

angenähert (Bild 67).

Bild 67:
Schematische
Darstellung eines
gaußförmigen
Intensitätsprofils und
Näherung zur
Bestimmung der
Fluenz eines
entsprechenden
Rechteckpulses



Nach den Überlegungen zum senkrechten Einfall der Laserstrahlung auf das Material muss der Einfall der Laserstrahlung auf die Bohrwand beschrieben werden. Der Strahldurchmesser ist bei einer runden Bohrung für Insertdurchmesser von typischerweise einigen Millimetern mehrere Dimensionen kleiner. Damit kann die Krümmung der Bohrwand, die aus der Rundheit der Bohrung resultiert, als vernachlässigbar klein angenommen werden ($d_{foc} \ll d_{Bohrung}$) und der Laserpuls trifft in diesem Fall auf eine schräge Ebene (Bild 66). Diese Annahme wird aus Vereinfachungsgründen auch für größere Strahlungsdurchmesser, wie sie in mehreren Rayleighlängen Entfernung zur Fokusebene vorliegen, angewandt.

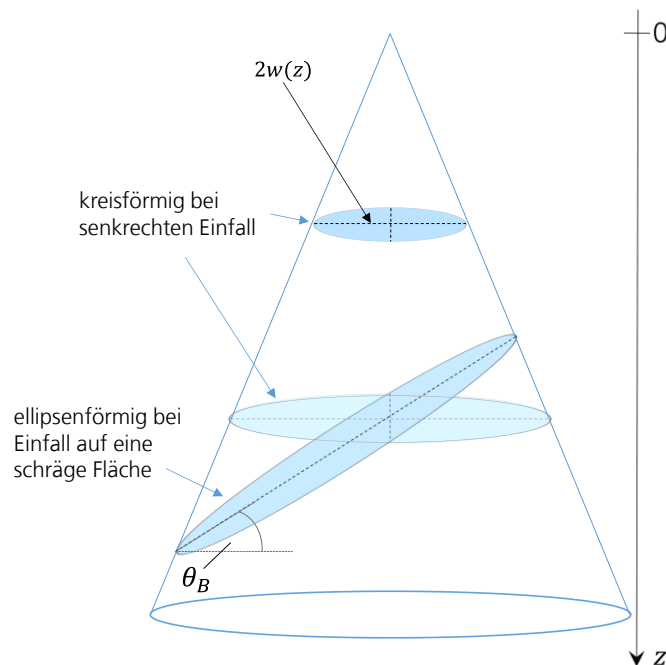
Durch die Fokusposition auf der Oberfläche des Preforms und dem Vorliegen fokussierter Strahlung wird der Strahldurchmesser aufgrund der Divergenz mit zunehmender Tiefe größer. Der Verlauf des Strahldurchmessers $2w(z)$ ist ab Bohrtiefen von zwei Rayleighlängen näherungsweise linear:

5.28

$$w(z) \approx w_0 \cdot \frac{z}{z_R} \quad \text{für} \quad z > 2 z_R$$

Formel 5.28 entspricht Formel 5.26 für den Fall, dass $z \gg z_R$ ist. Durch den annähernd linearen Verlauf des Strahldurchmessers entspricht die Projektion des kreisförmigen Laserspots auf die schräge Bohrwand einer Ellipse (Bild 68).

Bild 68:
Schematische
Darstellung einer
linearen
Strahlaufweitung
und Ausbildung
eines elliptischen
Laserspots beim
Auftreffen auf eine
schräge Fläche



5.29

$$A_{\text{Ellipse}}(z) = \frac{\pi \cdot w(z)^2}{\cos(\theta_B)}$$

Der Flächeninhalt einer Ellipse ist in Formel 5.29 gegeben. Die Fluenz ist somit proportional zu $\cos(\theta_B)$. Somit ist die Fluenz eines Laserpulses, der auf eine schräge Bohrwand trifft:

5.30

$$F(z, E_P, \theta_B, z_R, w_0, A(\theta_B)) = \frac{2 \cdot E_P}{\pi \cdot w(z)^2} \cdot \cos(\theta_B) \cdot A(\theta_B)$$

Je nach Art des winkelabhängigen Absorptionsgrades $A(\theta_B)$ führt die Auflösung nach θ_B aus Gleichung 5.30 zu einer impliziten Funktion. Anhand beispielweise graphischer oder numerischer Verfahren können jedoch mit entsprechender Genauigkeit Lösungen gefunden werden.

Bestimmung der Schwellfluenz

Die Bestimmung der Schwellfluenz ist erforderlich, da für carbonfaserbasierte Preforms keine Literaturwerte vorliegen. Die Kohlenstofffasern in den Preforms bestehen zu einem großen Teil aus Kohlenstoff. Die Fasern sind für eine erleichterte Maschinenverarbeitbarkeit (z.B. Flächenbildung) mit einer Schlichte beschichtet. Der Anteil der Schlichte auf den verwendeten Carbonfasern in den Preforms liegt typischerweise bei 1 Gew.-% [Tor17]. Der Schlichteanteil kann je nach Faserhersteller bis zu etwa 7 Gew.-% betragen [KV90]. Die Schlichte kann daher zu einer Veränderung der Schwellfluenz im Vergleich zu unbeschichteten Fasern führen.

Die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie kann durch das Lambert-Beer-Gesetz beschrieben werden [Pop05]. Für die Absorption von Laserstrahlung sind sowohl die thermische Eindringtiefe δ_{II} der energiereichen Elektronen wie auch die optische Eindringtiefe der Laserstrahlung δ_I relevant. Bei kleinen Fluenzen ($F < 1 \text{ J/cm}^2$) der Laserstrahlung ist die optische Eindringtiefe δ_I dominant. Für große Fluenzen nimmt die Dichte an energiereichen Elektronen zu und die thermische Eindringtiefe δ_{II} ist größer als die optische Eindringtiefe δ_I . [MCA97]

Aus dieser Überlegung wurden die folgenden Zusammenhänge aufgestellt, wobei Δt die Abtragtiefe pro Puls ist:

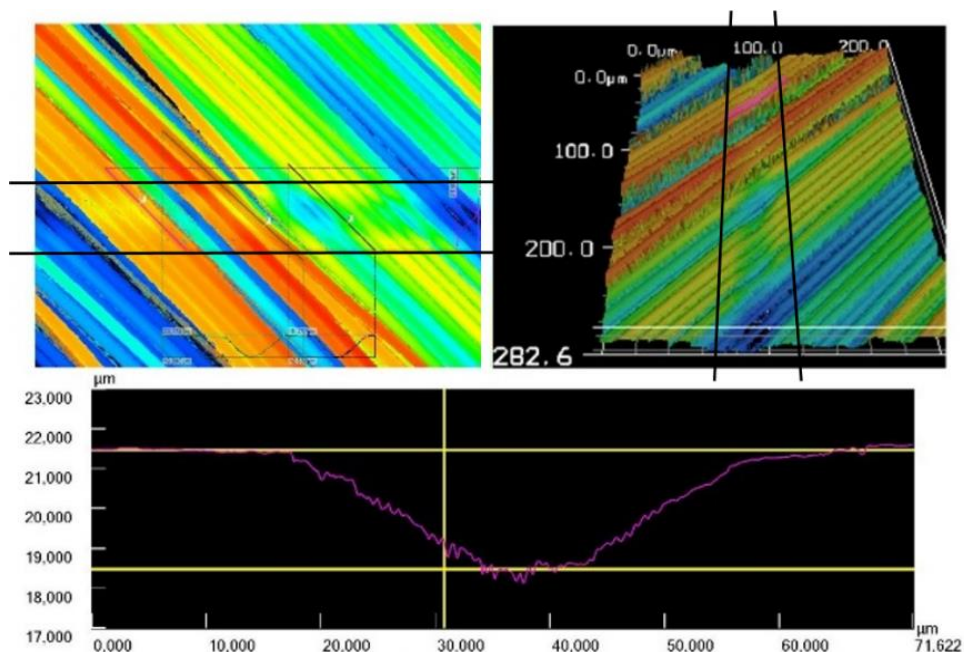
5.31

$$\begin{aligned} \Delta t &\approx \delta_I \cdot \ln\left(F/F_S^{\delta_I}\right) & \text{für } \delta_{II} \ll \delta_I \\ \Delta t &\approx \delta_{II} \cdot \ln\left(F/F_S^{\delta_{II}}\right) & \text{für } \delta_{II} \gg \delta_I \end{aligned}$$

Die Versuche zur Ermittlung der Schwellfluenz wurden an UKP-Laserstrahlquellen mit gleicher Pulsdauer, aber unterschiedlichen Fokusradien durchgeführt. Für die Versuche zur Bestimmung der Schwellfluenz wurde eine Laserstrahlquelle TruMicro 5050 der Firma Trumpf mit einem Fokusradius von $15 \mu\text{m}$ genutzt. Dadurch musste bei der Umrechnung von Pulsenergie zu Fluenz ein anderer Fokusradius w_0 verwendet werden. Zur Bestimmung der Schwellfluenz wurden auf einem Preform einfache Linien gescannt. Dabei wurden 26 Linien mit unterschiedlichen Pulsenergien erstellt. Mit zunehmender Pulsenergie wird die Abtragtiefe pro Puls größer. Um die Energie der Pulse zu bestimmen, wurde die mittlere Leistung $\bar{P}$ hinter der letzten Fokussierlinse des Scanners mit einem Leistungsmessgerät gemessen und durch die verwendete Frequenz $f = 200 \text{ kHz}$ umgerechnet. Der Fokusradius war in diesem Aufbau $30 \mu\text{m}$ groß.

Mit einem 3D Laserscanning-Mikroskop vom Typ VK-9700 der Firma Keyence wurde die Tiefe der gescannten Linien gemessen (Bild 69). Dabei wurden an drei unterschiedlichen Stellen (Fasern) die Höhenlinien aufgezeichnet und gemittelt.

Bild 69:
Tiefenmessung der
Linie (zwischen den
zwei schwarzen
Strichen) mit
 $v = 200 \text{ mm/s}$,
 $f = 200 \text{ kHz}$ und
 $9,75 \text{ }\mu\text{J}$ Pulsenergie



Aus den Parametern Fokusradius w_0 , Repetitionsrate f und Scangeschwindigkeit v_s wird die Anzahl der Pulse pro Fokusbereich m ermittelt (Formel 5.32). Die Abtragtiefe pro Puls Δt entspricht dem Quotient aus der Tiefe der Linie und der Anzahl der Pulse pro Fokusbereich m .

5.32

$$m = \frac{2 \cdot f \cdot w_0}{v_s}$$

Im nächsten Schritt wurde die Abtragtiefe pro Puls Δt über die Laserfluenz F aufgetragen. Aufgrund von Formel 5.31 wurde dazu eine halblogarithmische Darstellungsweise gewählt. Durch die Messwerte wurde im logarithmischen Diagramm eine Fitfunktion der Form $y = A \cdot (x - B)$ gelegt (Bild 70). Der Logarithmus der Schwellfluenz ist durch den Schnittpunkt der Fitfunktion mit der Abszisse B gegeben. Somit ist die Schwellfluenz $F_s = \exp(B)$ (Tabelle 24). Die Eindringtiefen sind mit $\delta = A$ ebenfalls durch die Anpassungen gegeben.

Bild 70: Bestimmung der Schwellfluenz $F_S^{\delta_I}$ bei den Parametern $f = 200$ kHz und $v = 200$ mm/s

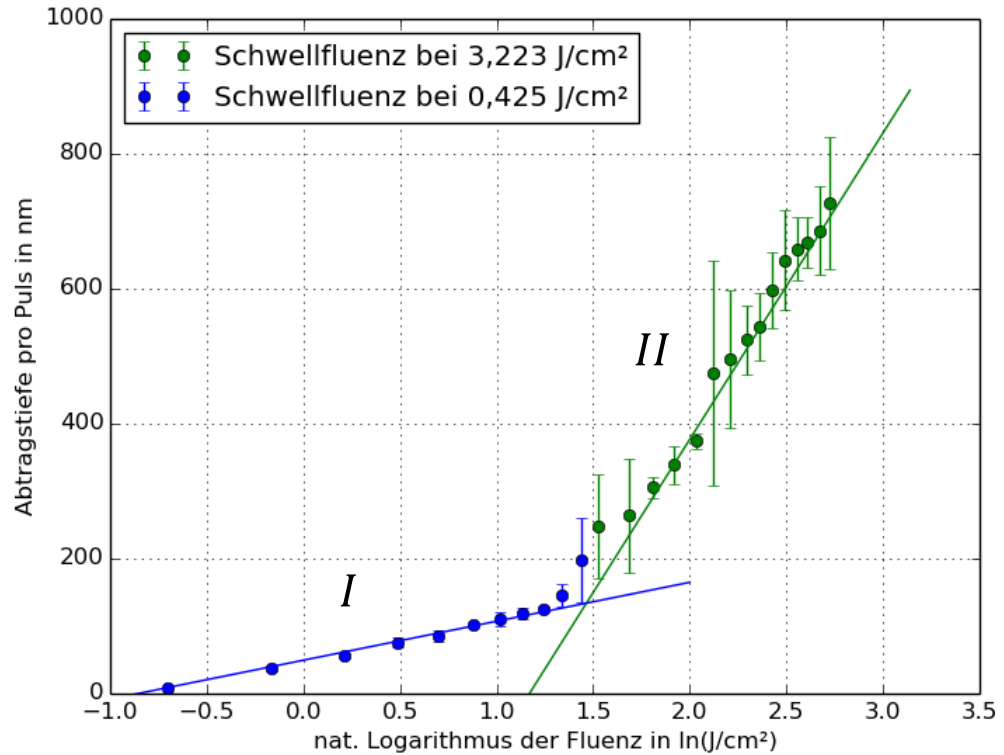


Tabelle 24: Bestimmte Schwellfluenzen für Carbonfasern

f	v_s	m	δ_I	$F_S^{\delta_I}$	δ_{II}	$F_S^{\delta_{II}}$
[kHz]	[mm/s]		[nm]	[J/cm²]	[nm]	[J/cm²]
200	200	30	58	0,425	454	3,223

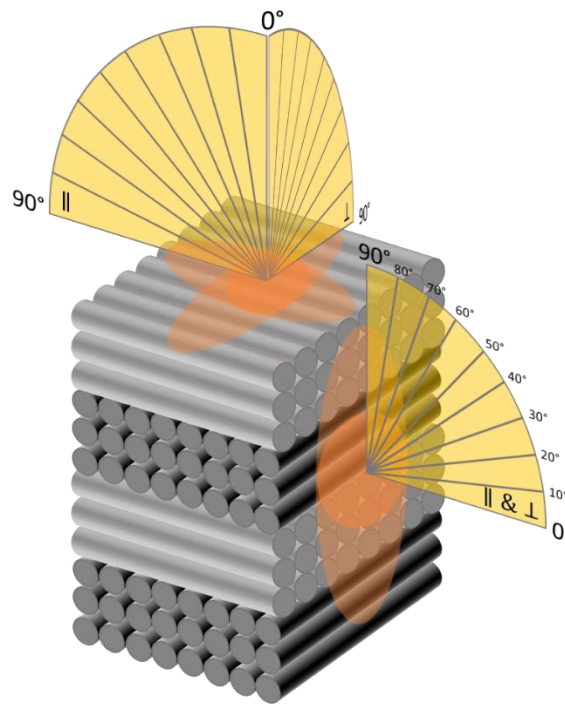
Für die Untersuchungen mit $f = 200$ kHz und $v_s = 200$ mm/s wurde eine Schwellfluenz von $F_S^{\delta_I} = 0,425$ J/cm² identifiziert. Die Schwellfluenz von mit Schlichte beschichteten HT-Carbonfasern auf PAN-Basis weicht damit von dem Literaturwert für reines Graphit ($F_S = 0,24$ J/cm²) ab [RKF14].

Ermittlung der inzidenzabhängigen Absorption

Mit Hilfe eines LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR Spektrometers der Firma PerkinElmer wurde die Absorption von Laserstrahlung in einem Wellenlängenbereich von 900 nm bis 1100 nm unter verschiedenen Auftreffwinkeln der Messstrahlung auf die Seitenfläche eines CFK-Preforms ermittelt. Der Auftreffwinkel der Messstrahlung kann über einen Drehwinkelgeber in der Ulbrichtkugel des Messgerätes variiert werden.

Das Preform wurde so in der Ulbrichtkugel positioniert, dass Inzidenzwinkel der Messstrahlung von 0° (senkrechter Einfall) bis nahezu 90° (seitenparalleler Einfall) eingestellt werden konnten (Bild 71).

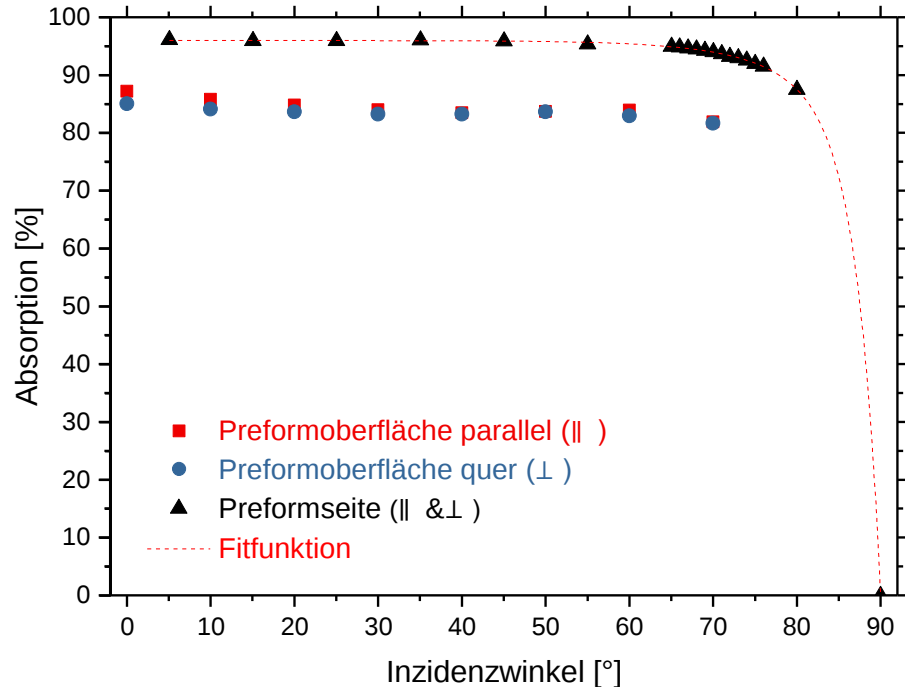
Bild 71:
Schematische
Darstellung eines
gestapelten Preforms
mit Definition der
Inzidenzwinkel von
 0° bis 90° in
verschiedenen
Messebenen



Die zu untersuchende Preformprobe bestand aus mehreren Einzellagen ohne Binderzusatz als Verbindungsmedium. Die Schlichte und Wirkfäden wurden nicht von den textilen Gelegen entfernt. Mehrere Einzellege wurden mit einer mit Ethanol gesäuberten Carbonfaserschere getrennt, von losen Restfasern befreit und unter Verwendung von Vinylhandschuhen manuell gestapelt.

Der Messstrahl des Spektrometers hat einen Durchmesser von ca. 1 mm. Daher konnten bei Veränderung des Inzidenzwinkels projektionsgrößenbedingt nur Absorptionsmesswerte von 0° bis ca. 85° aufgenommen werden. Die Ergebnisse der inzidenzwinkelabhängigen Absorptionsmessung sind in Bild 72 dargestellt.

Bild 72:
Inzidenzwinkel-
abhängige
Absorption
($\lambda = 1030 \text{ nm}$) an
Oberfläche und
Seitenfläche eines
carbonfaserbasierten
Preforms



Zwischen 0° (senkrechter Einfall) und 80° (nahezu paralleler Einfall) liegt die Absorption von Laserstrahlung mit 1030 nm Wellenlänge durchgehend über 80%. Die Ergebnisse decken sich mit Messwerten an Einzelfasern [Fre17]. Somit ist die Energieeinkopplung der Laserstrahlung in das Material auch beim Scannen nahezu zylindrischer Bohrungen mit kleiner positiver Konizität sehr groß. Besonders erwähnenswert sind die Ergebnisse der Absorptionskurve für die Preformseite (|| & ⊥). Aufgrund des häufigen Wechsels zwischen Fasermantelfläche und Faserköpfen ist die Absorption mit Werten über 95 % bis ca. 65° relativ groß. Zur Beschreibung der Absorptionsmesswerte sind die Fresnel Formeln aufgrund der sehr inhomogenen Oberflächen nicht geeignet. Als Fitfunktion wurde aufgrund der hohen Übereinstimmung mit den Messwerten eine zweidimensionale, exponentielle Wachstumsfunktion als Ansatz gewählt, die in das Modell zur Bestimmung des Bohrwandwinkels integriert wird. Die Fitfunktion ist in Formel 5.33 dargestellt.

5.33

$$A_{fit}(\theta_B) = y_0 + A_1 \cdot e^{\left(\frac{\theta - \theta_0}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{\left(\frac{\theta - \theta_0}{t_2}\right)}$$

Var.	Wert	Standardfehler	Var.	Wert	Standardfehler
y_0	95,96812	0,04952	θ_0	4,59883	818,35941
A_1	-6,42648E-13	1,99363E-10	t_1	2,63956	0,29241
A_2	-6,11329E-4	0,06192	t_2	8,0866	0,64232

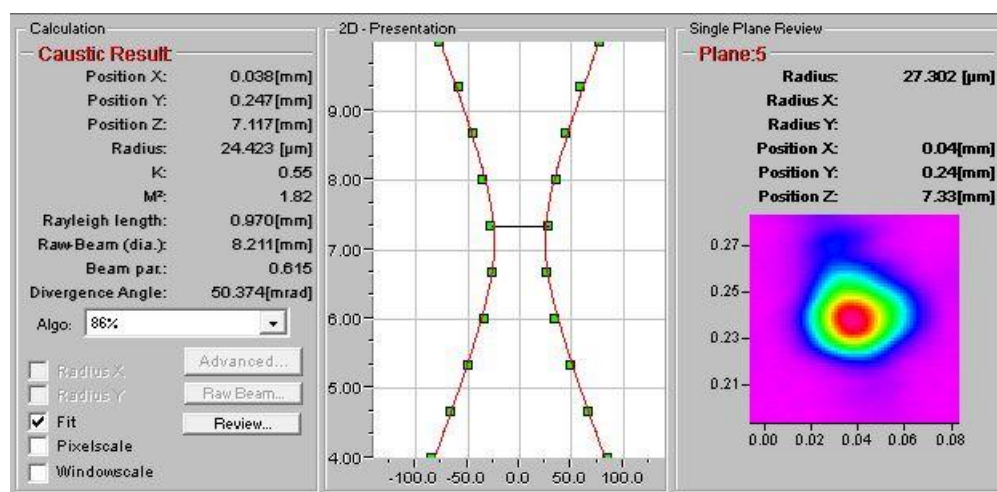
Trotz des relativ großen Standardfehlers für θ_0 , deckt die Fitfunktion die gemessenen Absorptionswerte sehr gut ab. Das reduzierte Chi-Quadrat ist $\chi_{red}^2 = 0,011$ bei 14 Freiheitsgraden. Eine mathematisch elegante Kosinus-fitfunktion, die nicht zu einer implizierten Funktion bei der Auflösung der Abtragbedingung (Formel 5.30, S.109) führen würde, wurde im Rahmen der Untersuchungen nicht gefunden.

Durch die in Formel 5.33 genannte Fitfunktion $A_{fit}(\theta_B)$ wird die winkelabhängige Absorption der Strahlung im Preform berücksichtigt.

Messung der Strahlkaustik

Das entlang der Strahlachse (z-Richtung) höhenabhängige Strahlprofil der Laserstrahlung wurde mit einem MicroSpot Monitor der Fa. PRIMES aufgenommen. Das Strahlprofil wurde in einem Bereich von jeweils drei Rayleighlängen ober- und unterhalb des Fokus aufgezeichnet (vgl. Bild 73). Die Software ermöglicht einen Fit an den Strahldurchmesser $2w(z)$. Aus dieser Anpassung wurden u.a. automatisch der Radius im Fokus, die Beugungsmaßzahl und die Rayleighlänge berechnet. Der Fokusbereich $2w_0$ beträgt ca. 50 μm .

Bild 73: Strahlkaustik des AMPHOS 400 nach Fokussierung durch ein telezentrisches Scannerobjektiv ($f=163\text{ mm}$)



Von Interesse ist der Verlauf der Laserstrahlung im Bearbeitungsbereich, der sich vom Fokus bis zu 10 mm unterhalb der Fokusslage erstreckt (vgl. Anhang S. 155, Bild 88). Mit Formel 5.26 und einer Beugungsmaßzahl $M^2 = 1,8$ wurde eine Rayleighlänge der Laserstrahlung der AMPHOS 400 UKP-Strahlquelle von $z_R = 1,01\text{ mm}$ gemessen.

Herstellung von Bohrungen mittels UKP-Laserstrahlung

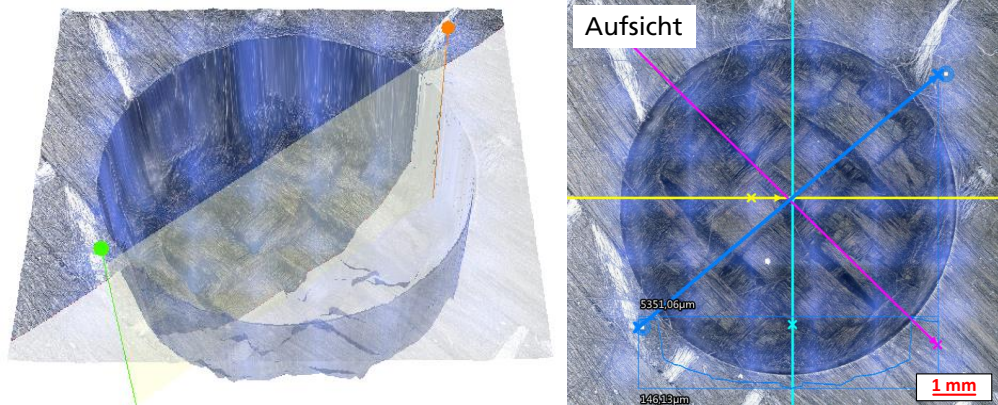
Insgesamt wurden fünf Bohrungen mit dem gleichen Parametersatz hergestellt (Tabelle 25).

Tabelle 25:
Parametersatz des
Experimentes für
Abgleich mit
asymptotischen
Modell

E_p [μJ]	f [kHz]	$\bar{P}$ [W]	v [mm/s]	$P\ddot{U}_{UKP}$ [%]	Bahn- abstand [μm]	t_{proz} [min]
162,5	10	1,625	175	50	30	30

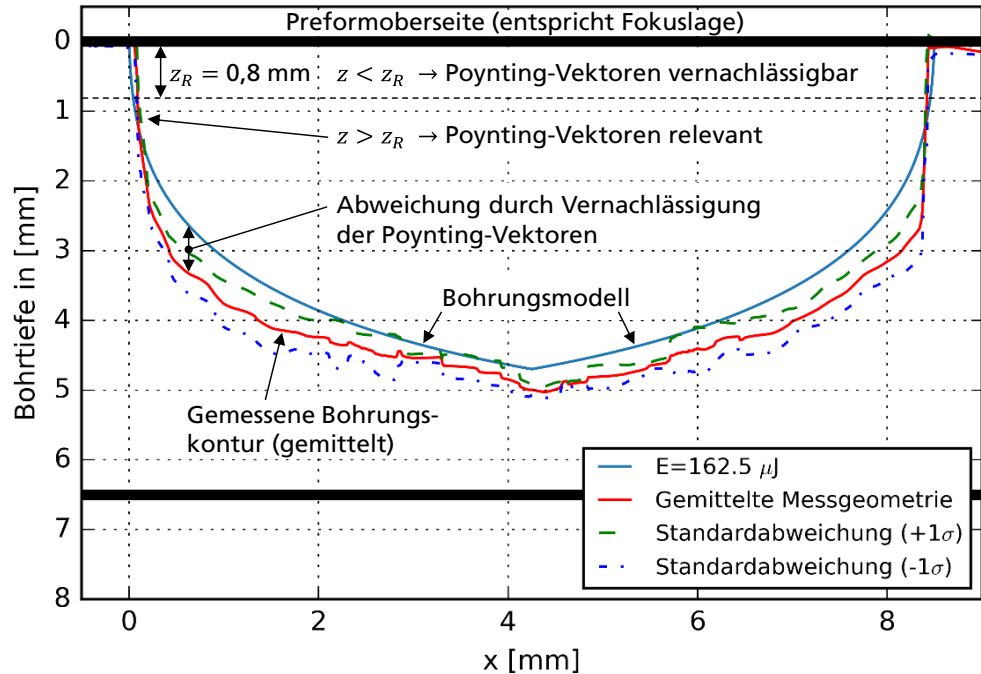
Die Höhenprofile der gebohrten Proben wurden mit einem Lichtmikroskop vom Typ VHX 5000 der Firma Keyence aufgenommen und ausgewertet. Dazu wurden die Höhenlinien von jeweils vier, 45° zu einander verdrehten Schnitten durch die Bohrungsmitte erzeugt und gemittelt Bild 74.

Bild 74:
Profilmessung an mit
UKP- Laserstrahlung
gebohrtem Preform



Eine Überlagerung der gemessenen und anschließend gemittelten Höhenprofile und der Vorhersage aus der Bohrungsmodells ist in Bild 75 dargestellt.

Bild 75: Vergleich zwischen modellierter und gemessener Bohrungskontur ($E_p = 162,5 \mu\text{J}$)



Solange die maximale Bohrungstiefe im Preform kleiner als die Rayleighlänge z_R der Laserstrahlung ist, ist die durch das Modell vorherbestimmte Bohrungsgeometrie akkurat. Bei Bohrungstiefen größer als z_R müssen die Poynting-Vektoren berücksichtigt werden (Bild 76, c) [Her18].

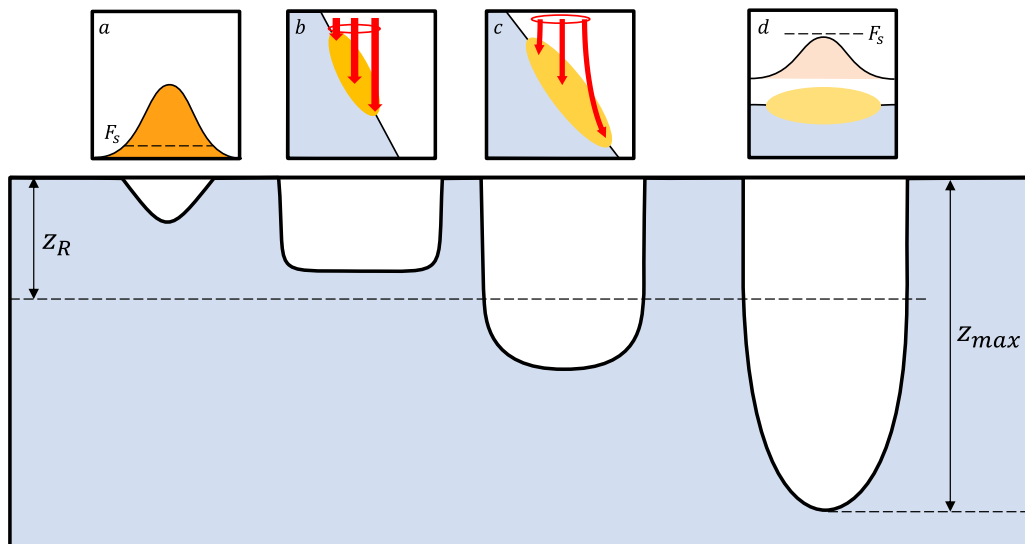


Bild 76: Einteilung des Bohrungsfortschritts während eines athermischen Bohrprozesses mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung
 (a) Abtrag durch Überschreitung der Schwellfluenz F_s
 (b) Ausformung eines steilen Bohrwandwinkels durch einfache Projektion der Strahlung auf die schräge Bohrwand bis $z \approx z_R$
 (c) Beeinflussung des lokalen Absorptionsgrades durch Poynting-Vektoren ($z > z_R$); dadurch bauchig ausgeformter Bohrgrund
 (d) Erliegen des Tiefenfortschritts bei Unterschreitung der Schwellfluenz F_s

Der lokal auftreffende Einstrahlwinkel auf der Bohrungswand unterliegt dem Divergenzwinkel θ der Laserstrahlung. Dies führt dazu, dass sich besonders im Übergangsbereich eines Bohrwandwinkels zwischen ca. 75° und 90° der Absorptionsgrad stark ändert (s. Bild 72, S.114).

Der größte Vorteil des bis hierhin entwickelten Modells zur Bestimmung der Bohrungsgeometrie ist die kurze Berechnungsdauer mit typischerweise wenigen Sekunden auch auf aktuellen, durchschnittlichen Bürocomputern. Um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen, muss der Einfluss der Poynting-Vektoren der Laserstrahlung auf die Projektion der Laserstrahlung auf die Bohrwand berücksichtigt werden. Dazu ist eine ortsabhängige zweidimensionale Parametrisierung der Strahlung erforderlich [Her18]. Da der lokale Einstrahlwinkel relativ zur Bohrwandoberfläche besonders vom horizontalen Ort (x-Richtung) des Fokus auf der Preformoberfläche und der Tiefe (z-Richtung) abhängt, müssen die lokal vorliegenden Poynting-Vektoren und die zugehörigen projizierten Fluenzen für jede laterale Fokusposition ausgewertet werden. Für Fokuspositionen nahe dem Bohrungsrand sind die halbseitigen Poynting-Vektoren nahezu senkrecht zur Preformoberfläche (Bild 76, b), während bei einer Fokusposition im Zentrum der Bohrung die Poynting-Vektoren, die auf den Rand der Bohrung treffen den Divergenzwinkel θ zur Strahlungsachse einnehmen (Bild 76, c). Die Laserstrahlung trifft dadurch relativ zur Bohrwandfläche gesehen näher zum Lot auf, wodurch der Absorptionsgrad steigt.

Für Preformdicken größer als die Rayleighlänge und aufgrund der noch relativ begrenzten Pulsenergie und mittleren Leistung von ultrakurz gepulsten Laserstrahlquellen ist bei statischer Fokusslage auf der Preformoberfläche eine sich stark verjüngende Bohrungsgeometrie zu erwarten. Bezüglich der Konizität der Bohrung ist daher der Einfluss einer einfachen dynamischen Abtragstrategie zu erwägen, bei der die Fokusslage während des Abtragprozesses mit dem Bohrungsfortschritt in z-Richtung nachgestellt wird.

5.2.7 Einfluss der Abtragstrategie

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets wurde die Zustellung in z-Richtung für einen Parametersatz ermittelt, um die Fokusslage während des Bohrprozesses in Abtragrichtung dynamisch zu ändern (s. Formel 5.22 und 5.23, S.89). Dabei sollte besonders der Einfluss auf die Konizität und die Prozessdauer untersucht werden. Für die Versuchsreihe wurden eine Repetitionsrate von 200 kHz und eine mittlere Leistung von 100 % (~ 40 W) bzw. eine Pulsenergie von ~ 200 μ J eingestellt, um eine große Produktivität ohne die Bildung einer Randschicht zu gewährleisten. Die Scangeschwindigkeit wurde auf 60 mm/s gesetzt ($P\dot{U}_{UKP} = 99,5$ %), um reproduzierbare Zeitmessung einer einzelnen Scanbewegung zu ermöglichen. Für die Scanbewegung wurden ein Bahnabstand von 0,18 mm und eine Abtragspaltbreite von 1,5 mm gewählt, um die Prozessdauer

so klein wie möglich zu halten. Der vollständige Parametersatz ist in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26:
Konstante
Prozessparameter für
die Variation der
Fokuslage

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Mittlere Leistung	$\bar{P}$	~ 40	W
Repetitionsrate	f	200	kHz
Scangeschwindigkeit	v_s	60	mm/s
Pulsüberlapp	$PÜ_{UKP}$	99,5	%
Bahnabstand		0,18	mm
Abtragspaltbreite		1,5	mm
Anzahl der Lagen / Probendicke		10 / ~ 7	mm

Die Ergebnisse der Berechnungen für die z-Zustellung der ersten Iteration sind in Tabelle 27 dargestellt. Mit der berechneten z-Zustellung wurden drei Bohrungen mit kontinuierlichem Verschieben der Fokuslage in z-Richtung durchgeführt. Anschließend wurden die Prozessparameter für die nächste Iteration neu berechnet. Dieses Vorgehen wurde solange durchgeführt, bis keine kürzere Prozessdauer erreicht wurde. Im Anhang auf Seite 156 sind die Ergebnisse der einzelnen Iterationen zur Bestimmung der z-Zustellung in Tabelle 33 aufgelistet.

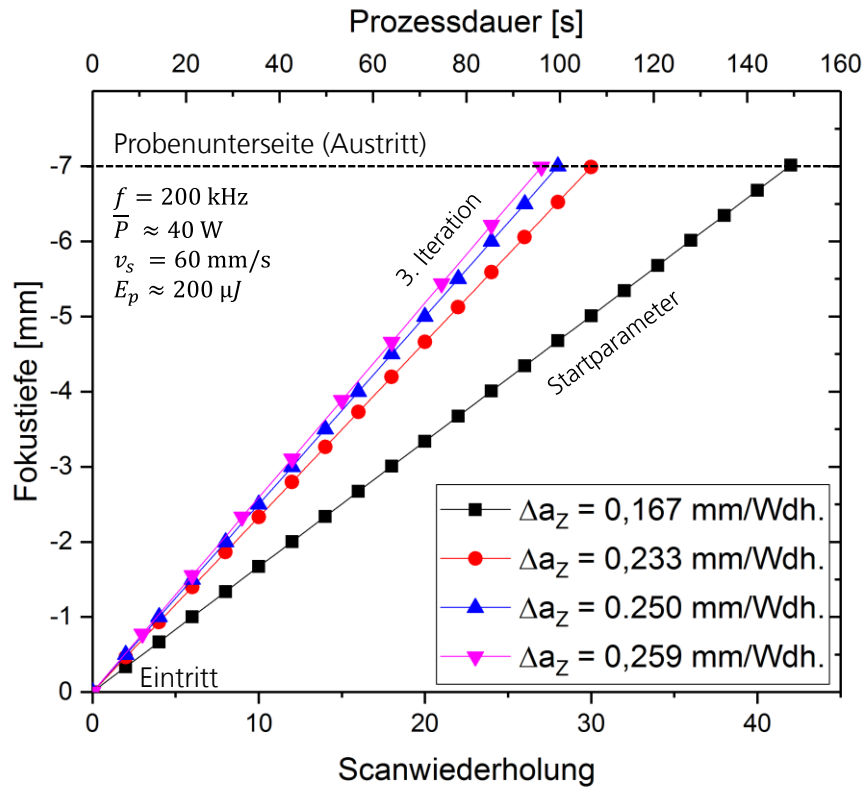
Tabelle 27:
Prozessparameter
der ersten Iteration
für das Verschieben
der Fokuslage in
z-Richtung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Dauer einer Wiederholung	t_{Wdh}	3,57	s
Dauer des Bohrprozesses	t_{proz}	147	s
Anzahl an Wiederholungen	n	~ 42	-
Dicke der Probe	z_{Probe}	~ 7	mm
z-Zustellung	Δa_z	0,167	mm/Wdh.

In Bild 77 ist die Fokustiefe über die Anzahl der Wiederholungen für die berechneten z-Zustellungen zum Verschieben der Fokuslage in z-Richtung aufgetragen. Eine Fokustiefe von 0 mm entspricht dabei der Probenoberfläche (Bohrungseintritt) und bei einer Fokustiefe von -7 mm wurde die Unterseite der Probe (Bohrungsausritt) erreicht.

Während zwischen den Prozesszeiten mit dem Startparametersatz und der ersten Iteration eine Verkleinerung der Prozesszeit um 43 s (30 %) erreicht werden konnte, ist der Produktivitätsgewinn bzgl. der Prozesszeit zwischen der zweiten und dritten Iteration mit ca. 3 s (3 %) marginal. Der Iterationsalgorithmus konnte daher hier bereits abgebrochen werden.

Bild 77:
Abhängigkeit der
dynamischen
Fokuszustellung Δa_z
auf die Prozessdauer
 t_{proz}



In Bild 78 ist links die Abhängigkeit der Konizität und rechts die Abhängigkeit der Prozessdauer von verschiedenen z-Zustellungen dargestellt. Eine z-Zustellung von 0 mm/Wdh. entspricht der konstanten Fokusposition auf der Probenoberfläche. Dabei ist die Konizität mit einem Wert von durchschnittlich 19,25 % am größten. Durch Verwendung einer z-Zustellung wurde die durchschnittliche Konizität auf 10,66 % verkleinert. Die Bohrung wurde somit zylindrischer. Auch die Prozessdauer wurde mit Vergrößerung der z-Zustellung verkleinert. Die ursprüngliche Prozessdauer von durchschnittlich 147 s mit einer konstanten Fokuslage auf der Oberfläche wurde bei einer z-Zustellung von 0,259 mm/Wdh. auf 96 s verkleinert. Dies entspricht einer Produktivitätssteigerung von ca. 35 %. Bei Verwendung einer z-Zustellung mit Werten $> 0,259 \text{ mm/Wdh.}$ wurde die zehnlagige Probe nicht vollständig durchbohrt und die Prozessdauer wurde größer. Die Fokuslage war in diesem Fall stets unterhalb des Bohrgrundes. Der Abstand zwischen Fokuslage und Bohrgrund nahm nach jeder Neupositionierung weiter zu.

Die einseitige Ausbreitung der WEZ wurde durch das Nachfahren der Fokuslage in z-Richtung nicht beeinflusst und betrug für alle z-Zustellung durchschnittlich 8-10 mm.

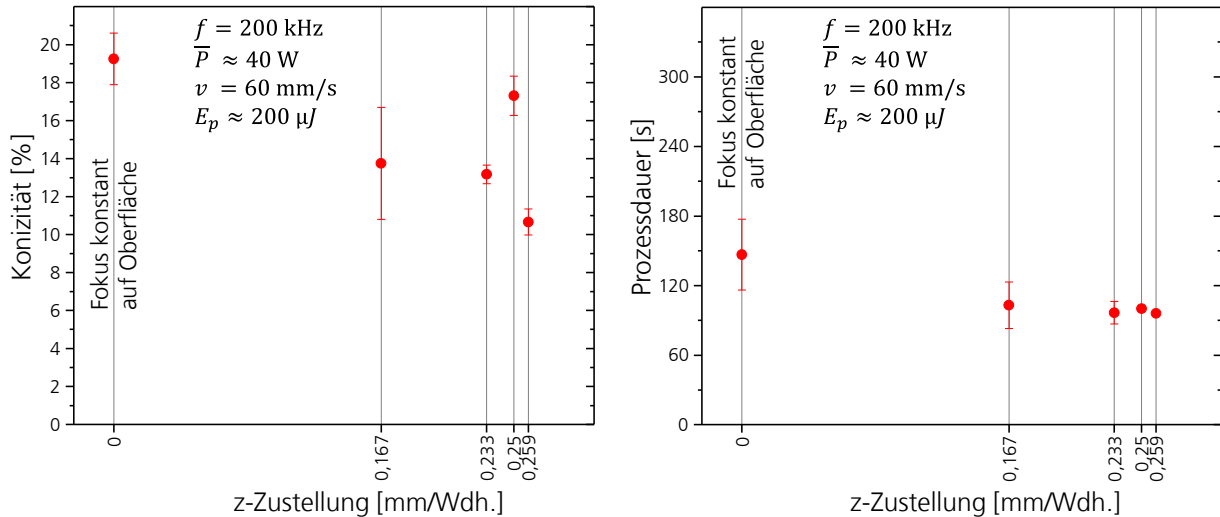


Bild 78: Abhängigkeit der Konizität (links) beziehungsweise der Prozessdauer (rechts) von verschiedenen z-Zustellungen

Zusammenfassend wurde im Rahmen des zweiten Arbeitspakets gezeigt, dass durch eine kontinuierliche z-Zustellung eine Verkleinerung der Prozessdauer sowie Konizität der Bohrungen erreicht werden kann. Die Größe der Wärmeeinflusszone ändert sich trotz Abschattungseffekten am Eintritt der Bohrung nicht. Bei einer berechneten z-Zustellung von 0,259 mm/Wdh. wurde eine 8 mm große Bohrung in einem zehnlagige bi-axialen Carbonfaserpreform in 96 s mit einer durchschnittlichen Konizität von 10,66 % hergestellt.

5.2.8 Herstellung von Formbohrungen

Als letzter Schritt im Rahmen des zweiten Arbeitspakets wurden Formbohrungen mit den entwickelten Parametern hergestellt. Als Bohrkontur wurde die Außenkontur eines sternförmigen KIM® Inserts mit einem Umkreisdurchmesser von 8,5 mm verwendet. Der Bahnabstand war 0,06 mm bei Vollabtrag. Der Wert für die z-Zustellung musste für die Bohrkontur aufgrund einer neuen Ergebnisse für eine Scanwiederholung neu bestimmt werden. Im Anhang sind die Ergebnisse für die Bestimmung der z-Zustellung in Tabelle 34 auf Seite 156 aufgelistet. Die restlichen Parameter entsprachen dem Parametersatz aus dem vorherigen Schritt des zweiten Arbeitspakets und sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28:
Prozessparameter für
die Herstellung einer
Formbohrung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Mittlere Leistung	$\bar{P}$	~40	W
Repetitionsrate	f	200	kHz
Scangeschwindigkeit	v_s	60	mm/s
Pulsüberlapp	$P\ddot{U}_{UKP}$	99,5	%
Bahnabstand		0,06	mm
Abtragspaltbreite		4,25 (Vollabtrag)	mm
z-Zustellung	Δa_z	1,167	mm/Wdh.
Anzahl der Lagen / Probendicke	z_{Probe}	10 / ~ 7	mm

In Bild 79 ist links die Abhängigkeit der Konizität und rechts die Abhängigkeit der Prozessdauer von verschiedenen z-Zustellungen dargestellt. Wie bereits im vorherigen Schritt gezeigt, wurden mittels einer kontinuierlichen z-Zustellung die Konizität sowie die Prozessdauer verkleinert. Die durchschnittliche Konizität bei konstanter Fokuslage auf der Probenoberfläche betrug 13,34 % und wurde durch eine z-Zustellung von 1,167 mm/Wdh. auf durchschnittlich 4,56 % verkleinert. Die Prozessdauer wurde von durchschnittlich 247 s auf 142 s verkleinert. Dies entspricht einer Produktivitätssteigerung von circa 42,5 %.

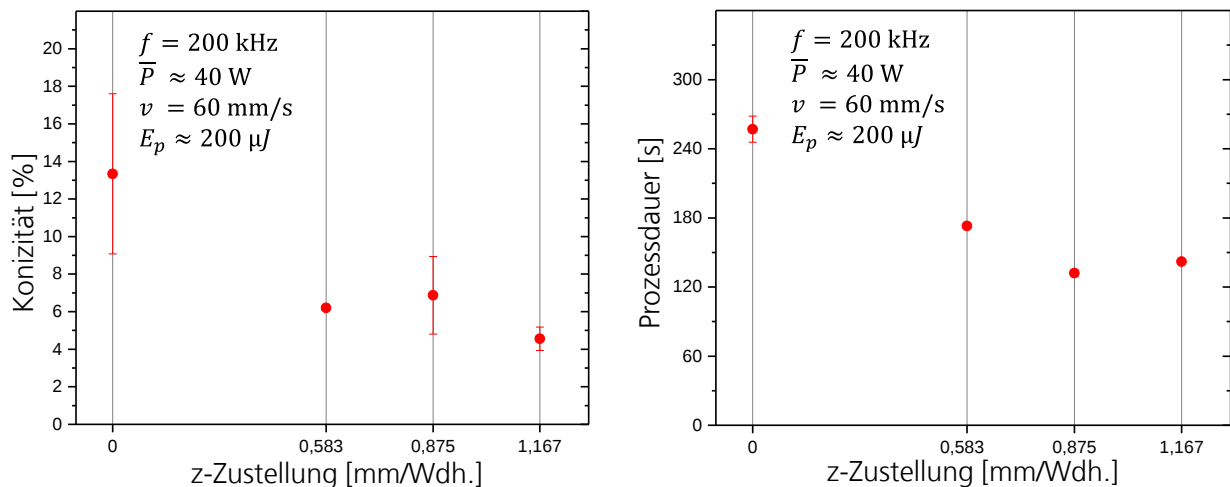


Bild 79: Abhängigkeit der Konizität (links) beziehungsweise der Prozessdauer (rechts) von verschiedenen z-Zustellungen Δa_z

Zusammenfassend wurde bei einer z-Zustellung von $\Delta a_z = 1,167$ mm/Wdh. die größte geometrische Qualität mit einer Konizität von durchschnittlich 4,56 % erreicht. Das beste Ergebnis bezüglich der Produktivität wurde mit einer Prozessdauer von durchschnittlich 132 s und einer z-Zustellung von 0,875 mm/Wdh. realisiert.

Als letzte geometrische Form wurde neben der kreisrunden Form noch eine sternförmige Bohrung erstellt, die der Mantelquerschnittsform eines KIM® Inserts mit Sacklochbohrung der Firma Kohlhage Fasteners entspricht [Koh15]. Die Zacken der Sternspitzen sind abgerundet. Dies hat den Vorteil, dass die Einbuchtung zwischen zwei abgerundeten Spitzen nur wenige hundert Mikrometer tief ist. Aufgrund der Faserorientierung besteht die Gefahr, dass bei zu tiefen Einbuchtungen Faserenden lose aufliegen können. Bei einem nicht bebinderten Preform können sich lose Faserpakete lösen und den Preformaufbau stören. Die Aufsicht auf einen Preformstreifen mit einer mittels UKP-Laserstrahlung abgetragenen Sternkontur sowie einem KIM® Insert sind in Bild 80 dargestellt.

Bild 80: Foto einer mittels UKP-Laserstrahlung hergestellten sternförmigen Formbohrung nebst zugehörigem M6 KIM® Metallinsert



Bei normalen Erschütterungsbedingungen, wie sie beim manuellen Transport eines Preforms auftreten, wird der eingesetzte Insert während des Handlingprozesses aufgrund der kleinen Konizität der Bohrung ausreichend gehalten. Gleichzeitig wird der textile Lagenaufbau beim Einsetzen des Inserts aufgrund der hohen geometrischen Präzision der Bohrung nicht gestört. Der Insert schmiegt sich der Bohrungsform sehr gut an und ist verliersicher.

5.2.9 Fazit

Zusammenfassend können durch die Untersuchungen für das Abtragen von Carbonfaserpreforms mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Eine Herstellung von geometrisch präzisen und materialographisch defektfreien Bohrungen in Preforms ist möglich, solange eine kritische Kombination aus Repetitionsrate und Pulsenergie nicht überschritten wird. Andernfalls treten materialographische Defekte auf, wie eine verfestigte Schicht an der Bohrungswand, ähnlich den Schäden beim Laserstrahl-Bohren mit langgepulster Laserstrahlung. Dadurch können die nachfolgenden Prozessschritte in der Bauteilfertigung gestört werden.
- Je größer die Pulsenergie, desto zylindrischer wird die Bohrung. Aufgrund der projizierten Fluenz auf eine schräge Bohrwand wird die effektive Fluenz kleiner, bis kein Materialabtrag mehr stattfindet. Ab einer Tiefe größer als die Rayleighlänge sind die Poynting-Vektoren für eine akkurate Bestimmung der Bohrungsform relevant.

Die Herstellung zylindrischer Bohrungen ist entweder mit einer sehr großen Pulsenergie oder durch Anstellen der Laserstrahlung relativ zur Werkstückoberfläche möglich, sofern thermisch induzierte Defekte vermieden werden sollen. Die Zylindrizität einer Bohrung kann ebenso durch Wärmeakkumulationseffekte begünstigt werden. Gleichzeitig werden dabei aber die Wärmeeinflusszone und die Entstehung einer verfestigten Randschicht begünstigt.

- Die Prozessdauer kann zwar durch Vergrößerung der Repetitionsrate verkleinert werden, gleichzeitig wird aber die Puls-zu-Puls bzw., bei kleinen Bohrungen und hoher Scangeschwindigkeit, die Scan-zu-Scan Wärmeakkumulation vergrößert.
- Durch das Nachfahren der Fokusposition während der Bearbeitung in das Bauteil hinein kann die Konizität verkleinert werden. Die Nachfahrgeschwindigkeit bzw. Zustellung pro Scanwiederholung sollte dabei nicht größer als der Bohrungstiefenzuwachs pro Zeiteinheit bzw. Wiederholung sein. Die expliziten Werte für den z-Shift hängen von den Scanbahnparametern sowie von der Repetitionsrate und Pulsenergie der Laserstrahlung ab.
- Die Abtragspaltbreite muss für eine große Prozessproduktivität so gewählt werden, dass das Preform vollständig getrennt, aber keine unnötig langen Scanwege gefahren werden. Im prozesstechnisch

optimalen Fall, fällt ein Kern ohne Verkanten am Ende des Prozesses aus der Bohrung.

Auf Basis der in den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse wird in Bild 81 das Prozessdiagramm dargestellt. Der UKP-Laserstrahlbohrprozess für carbonfaserbasierte Preforms wird bezüglich der erzielbaren materialographischen und geometrischen Qualität über die Prozesszeit pro Bohrung aufgetragen. Durch die Anwendung der dynamischen Fokuslagenzustellung während des Abtragprozesses wird die Prozesskurve näher in Richtung des idealen Prozesses zum Bohren von Preforms aus Carbonfasergelegen verschoben. Durch Verwendung höherer Pulsenergien wird die Prozessdauer verkleinert und gleichzeitig die Konizität der Bohrung vergrößert.

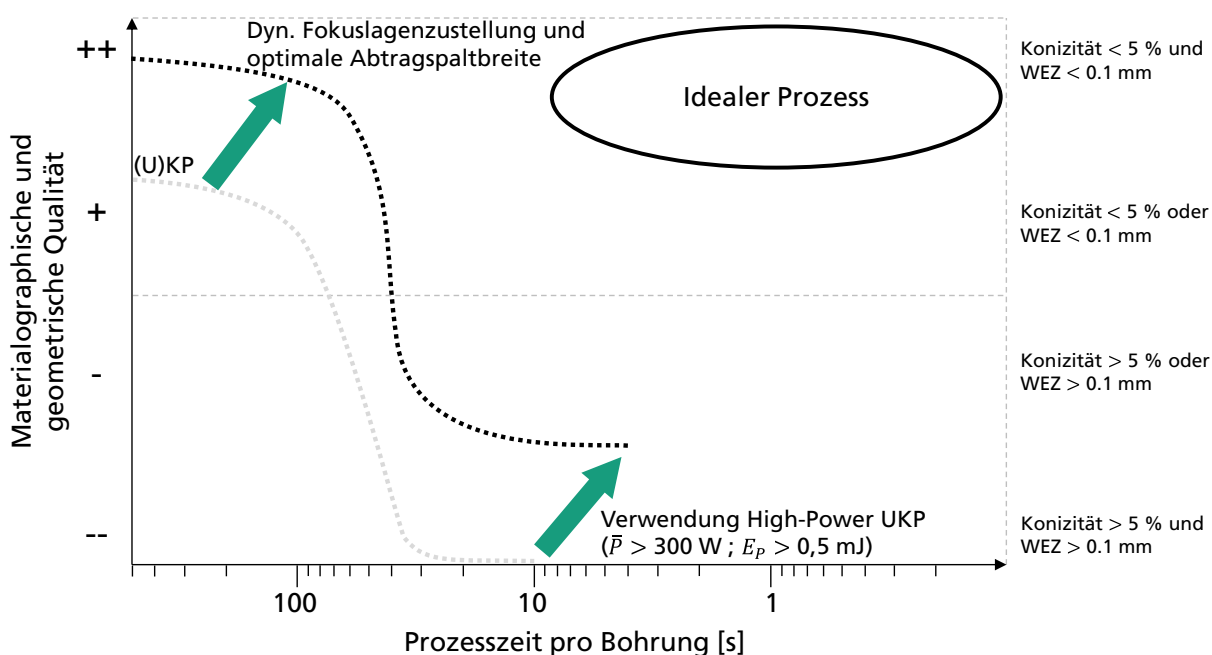


Bild 81: Einordnung des Laserstrahl-Bohrens mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung bzgl. Prozesszeit pro Bohrung und erzielbarer materialographischer und geometrischer Qualität vor und nach Anwendung der dynamischen Fokuslagenzustellung und Einstellung der optimalen Abtragspaltbreite. Durch die Verwendung von neuen UKP-Laserstrahlquellen hoher mittlerer Leistung ist bezüglich der Produktivität eine kürzere Prozessdauer aktuell zu Lasten der Qualität möglich. Referenzgeometrie ist eine Bohrung mit 8,5 mm Durchmesser in einem fünflagigen, bi-axialen Preform.

Der in Bild 81 zwischen 100 s und 10 s stark abfallende Bereich kann dadurch erklärt werden, dass aufgrund der begrenzten Pulsenergie von UKP-Strahlquellen eine Steigerung der mittleren Leistung über die Repetitionsrate vorgenommen wird. Dadurch steigt die Abtragsrate besonders zu Lasten der materialographischen Qualität. Wie in den Untersuchungen gezeigt, treten

zudem bei hohen Repetitionsraten in Kombination mit einer hohen Pulsenergie verfestigte Randschichten auf (Bild 55, S. 94).

5.3 Quasistatische Auszugstests

Um den Einfluss der Wärmeeinflusszone auf die mechanische Stabilität des mit Matrix umgebenen Inserts festzustellen, wurden quasistatische Auszugtests in Anlehnung an den amerikanischen Prüfstandard ASTM D7332 / D7332M – 16 durchgeführt [D3016].

Die Probenkörper bestanden vor der Matrixinfusion aus fünf aufeinander gestapelten, bi-axialen Carbonfasergelegelagen, in dessen Mitte ein Loch mit der Querschnittskontur eines KIM® Inserts (Sternkontur) mit 8,5 mm Durchmesser eingebracht war. Die Länge und Breite einer Lage ist 100 x 100 mm². Vor der Matrixinfusion ist das Preform ca. 3-4 mm dick. Nach der Infusion ist das CFK-Bauteil durchschnittlich 2,1 mm dick. Die zentrische Bohrung wurde mittels der folgenden Strahlquellen und Verfahrensparameter in die Preforms eingebracht:

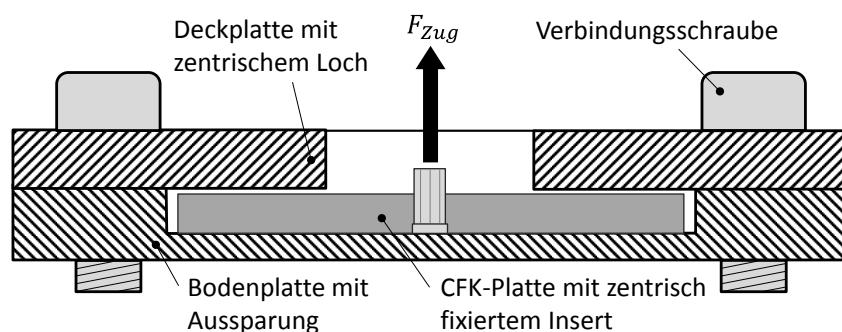
Tabelle 29:
Verfahrensparameter
zur Herstellung von
Sternkontur-
bohrungen in
fünflagige
Carbonfaser-
preforms

Laserstrahl- quelle	Repetitions- rate	Puls- energie	Scan- geschwindigkeit	Prozess- dauer	WEZ- Größe
UKP	10.000 Hz	821 µJ	120 mm/s	241 s	<0,1 mm
UKP	400.000 Hz	892 µJ	500 mm/s	60 s	5 mm
Faserlaser	5 Hz	1,2 J	0,19 mm/s	310 s	1 mm
Faserlaser	100 Hz	2,5 J	2 mm/s	14,9 s	8 mm

Mit jedem Parametersatz wurden jeweils vier Zugproben hergestellt. Nach dem Bohren wurden die sternförmigen Inserts in die Preforms eingesetzt. Mittels Vakuuminfusion wurden die Proben nacheinander mit einer Epoxidharzmatrix (EPIKOTE Resin MGS RIMR426 & Curing Agent MGS RIMH435) getränkt.

Als Haltevorrichtung in der Zugprüfmaschine wurden eine 10 mm dicke Bodenplatte aus Stahl mit einer Aussparung für einen Probenkörper und eine 10 mm dicke Deckplatte mit einem zentrischen Lochdurchmesser von 60 mm miteinander verschraubt. Die Haltevorrichtung ist in Bild 82 schematisch dargestellt.

Bild 82:
Schematische
Darstellung der
Haltevorrichtung für
die Auszuchtversuche



Die Zugproben wurden in dieser Vorrichtung nicht eingeklemmt und hatten in alle drei Raumrichtungen ein minimales Spiel. Mittels eines Einschraubaufsatzes mit Quaderkopf wurde die Verbindung zwischen dem Insert und den Klemmen der Zugprüfmaschine vom Typ Zwick/Roell Zmart.Pro der Firma Zwick GmbH & Co. KG hergestellt. Bei einer Geschwindigkeit von 1,5 mm/min wurden die Inserts nacheinander aus den CFK-Platten gezogen. Die Messung begann ab einem Kraftaufbau von 125 N und endete bei einem Kraftabfall von 50% der erreichten Maximalkraft. Die Ergebnisse der Zugprüfungen sind in Bild 83 dargestellt.

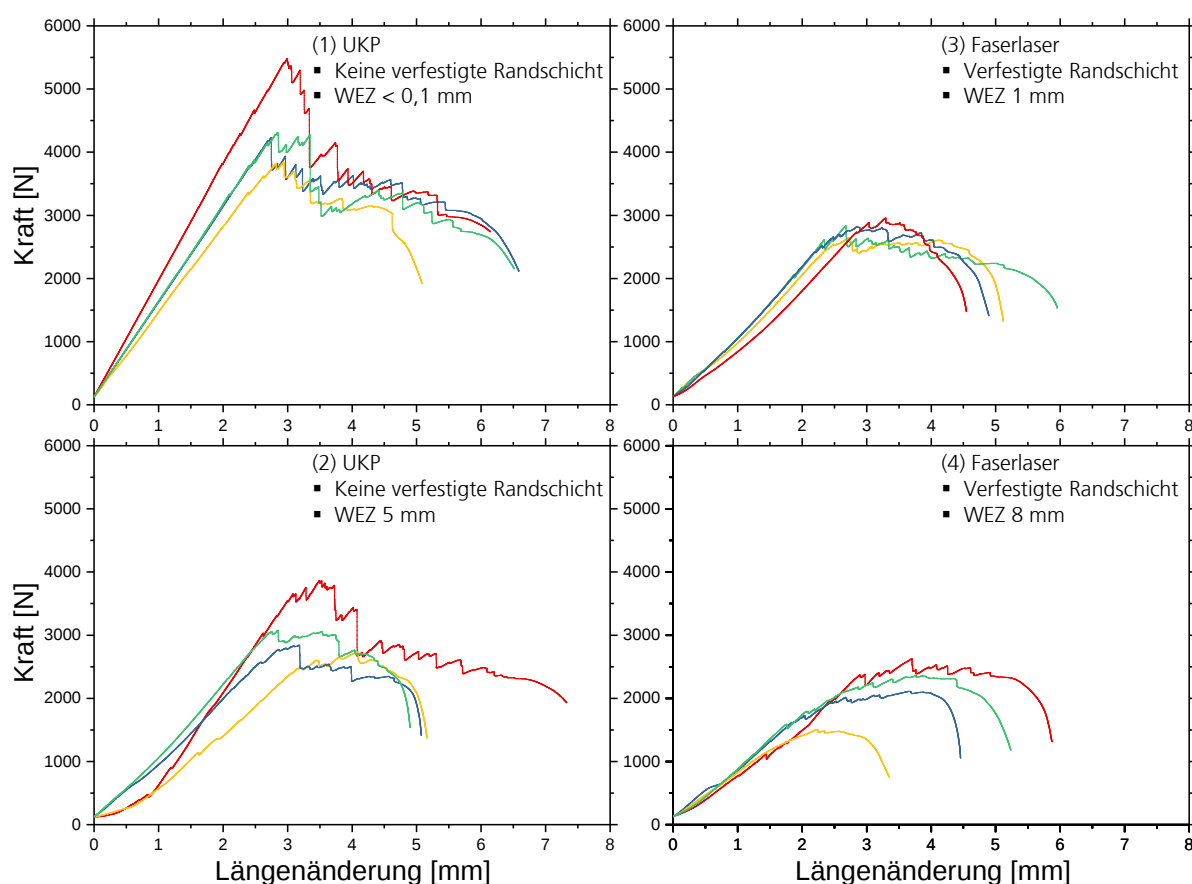


Bild 83: Ergebnisse der Auszugprüfungen von mit Epoxidharzmatrix eingebetteten Inserts in Anlehnung an ASTM D7332/D7332M-16

Als Ergebnis der Zugprüfungen erreichten Proben mit Inserts, deren Preforms mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung und kleiner Repetitionsrate gebohrt wurden, die höchste Auszugkraft von durchschnittlich ca. 4,5 kN. Dies ist rund 150 % größer als die durchschnittliche maximale Auszugkraft von mit langgepulster Faserlaser gebohrten Preforms mit einer 8 mm großen WEZ. Die übrigen Ergebnisse sind in Form der durchschnittlichen, maximalen Auszugkraft $\bar{F}_{max}$, der zugehörigen Standardabweichung σ_s sowie der größten ($\hat{F}_{max}$) und kleinsten ($\hat{F}_{min}$) gemessenen Maximalauszugkraft in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30:
Quantitative
Auswertung der
Auszugprüfungen

Verfahren	WEZ-Größe [mm]	$\bar{F}_{max}$ [N]	σ_s [N]	$\hat{F}_{max}$ [N]	$\hat{F}_{min}$ [N]
1 UKP	<0,1 mm	4.467,9	707,8	5.483,6	3.841,2
2 UKP	5 mm	3.134,2	508,8	3.868,4	2.584,1
3 Faserlaser	1 mm	2.814,7	130,4	2.960,9	2.643,6
4 Faserlaser	8 mm	1.789,8	542,5	2.952,3	1.594,4

Der eingesetzte KIM® Insert hat entlang der sternförmigen Kontur eine Umfangslänge von 29,7 mm und war nach der Vakuuminfusion über eine Tiefe von durchschnittlich 2,1 mm mit der CFK-Platte verbunden. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche maximale Auszugfestigkeit der Verbindung von 71 MPa für die mit UKP-Laserstrahlung gebohrten Proben nach Verfahrensparametersatz 1 (UKP) und noch rund 45 MPa für die Faserlaser gebohrten Proben nach Verfahrensparametersatz 3 (Faserlaser).

Der Hauptunterschied zwischen den Proben liegt in der Größe der WEZ und dem Vorliegen einer verfestigten Randschicht. Die mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung bearbeiteten Preforms wiesen keine verfestigte Randschicht auf. Die mit langgepulster Faserlaserstrahlung gebohrten Preforms wiesen in beiden Fällen eine verfestigte Randschicht auf.

Als Ergebnis der Tests auf Normalverteilung nach Shapiro-Wilk entstammen die gemessenen Daten jeweils mit einem 0,05-Niveau signifikant aus einer normalverteilten Grundgesamtheit. Auf Basis von Differenzbildung und t-Tests mit einem 0,05-Signifikanzniveau für jeweils zwei Datensätze der Verfahren aus Tabelle 30 ist der Einfluss einer verfestigten Randschicht auf die maximale Auszugkraft der Inserts signifikant und größer als das Vorliegen einer ausgeprägten WEZ. Besonders die Ergebnisse der Verfahrensparametersätze 2 und 4 sowie 1 und 3 sind signifikant unterschiedlich. Der t-Test zeigt zwischen den Datensätzen der Verfahrensparametersätze 2 und 3 keine signifikante Unterschiedlichkeit, wobei sich bei diesen Versuchen die Effekte aus dem Vorliegen einer verfestigten Randschicht und der Größe der WEZ überlagern. Dennoch hat auch die Größe der WEZ einen signifikanten Einfluss auf die maximale Auszugkraft. Letzteres wird besonders durch die statistische Unterschiedlichkeit der Mittelwerte und der zugehörigen Varianzen aus den Ergebnissen der Verfahrensparametersätzen 1 und 2 sowie 3 und 4 belegt.

Im Endergebnis führt die Vermeidung einer verfestigten Randschicht durch ultrakurz gepulste Laserstrahlbearbeitung zu einer defektfreien und festeren Verbindung zwischen Insert und dem Carbonfaser verstärkten Kunststoff. Die Größe der WEZ hat einen sekundären, jedoch nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die maximale Auszugkraft. Je kleiner die WEZ desto stabiler die Preform-Insert-Verbindung über das Matrixsystem. Die Gründe für die kleiner werdenden Auszugkräfte liegen in der brüchigen Randschicht, der verminderten Anbindung der Matrix an die Fasern in dem Bereich der verbrannten Schlichte sowie den brüchigen Faserenden in der oxidierten Zone um die Bohrungskontur.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe haben eine stetig wachsende Bedeutung für den Leichtbau. Im Vergleich zu den etablierten metallischen Werkstoffen bieten CFK deutlich größere spezifische mechanische Kennwerte und ermöglichen so die Substitution schwerer Bauteilkomponenten besonders im Automobil- und Luftfahrtbereich. Die klassische Prozesskette der CFK-Fertigung sieht dabei vor, dass Krafteinleitungselemente erst kurz vor Ende, nämlich nach dem Konsolidierungsprozess, eingebracht werden. Die Nachteile der mechanisch oder thermisch induzierten Defekte wie z.B. Delaminationen oder Matrixdegradationen im Laminat können entweder nicht oder nur mit großem wirtschaftlichen Aufwand repariert werden. Vorteilhaft kann daher ein Bohrprozess nach dem Preforming und vor der Konsolidierung sein, bei dem die erforderlichen Bohrungen für Krafteinleitungselemente, wie z.B. Inserts, im trockenen Textil eingebracht werden. Aktuelle mechanische Verfahren zum exakten und störungsfreien Trennen von Carbonfasertextilien sind für kleine Bohrungen mit Freiformgeometrie mit wenigen Millimetern Durchmesser in einem mehrlagigen Textilaufbau ungeeignet. Nach Applizierung der Inserts kann das Preform in einem Harzinjektionsprozess (RTM) konsolidiert werden. Durch das Werkzeug werden dabei die Inserts in einer exakten, reproduzierbaren Position fixiert. Ein zusätzlicher Einklebeprozess kann somit vermieden werden.

Die Materialbearbeitung mittels Laserstrahlung ermöglicht einen mechanisch kontaktlosen Bearbeitungsprozess und ist daher für die Bearbeitung von carbonfaserbasierten Preforms besonders geeignet. Aufgrund unzureichender Untersuchungen bezüglich der erzielbaren geometrischen und materialographischen Qualität beim Bohren und Abtragen von carbonfaserbasierten Preforms müssen relevante Wirkmechanismen identifiziert und beherrscht werden.

Diese Arbeit widmet sich den Phänomenen und Wirkmechanismen bei der gepulsten Laserstrahlbearbeitung von carbonfaserbasierten Preforms. Dazu werden eine ultrakurz gepulste (ps) und eine langgepulste (μ s-ms) Laserstrahlquelle mit mittleren Leistungen bis zu 400 W bzw. 600 W verwendet. Durch die Variation von Laser- und Verfahrensparametern wird der Einfluss auf Carbonfasergelege aus einzelnen und gestapelten bi-axialen Lagen untersucht.

Bei Verwendung einer langgepulsten Faserlaserstrahlquelle hängt die Größe der Wärmeeinflusszone primär von der eingebrachten mittleren Leistung und der Repetitionsrate ab. Ersteres beschreibt die Größe der Wärmemenge pro Puls, wobei eine Pulsdauer zwischen 0,2 und 0,9 ms bei konstanter Pulsenergie keinen signifikanten Einfluss auf die Größe der WEZ hat. Ein maßgeblicher Faktor für die

Größe der WEZ ist die Repetitionsrate und die damit verbundene Wärmeakkumulation, die bei langgepulster Laserstrahlung bereits bei einer Pulsfrequenz von unter fünf Hertz eintritt. Da für einen produktiven Bohrprozess mit kurzer Prozessdauer die Repetitionsrate groß sein muss, wird eine Strategie zur örtlichen Pulsverteilung (Sprungtrennverfahren) entwickelt, wodurch sowohl die zeitliche als auch örtlich bedingte Wärmeakkumulation beim Laserstrahl-Bohren mit Galvanometerscanner signifikant verkleinert werden. Dabei ist für jeden Puls die Penetration des Geleges mit einem Einzelpuls erforderlich. Bei nicht vollständiger Durchtrennung der Fasern im Einzelpuls wird das Gelege durch die schlagartige Evaporation der Fasern aufgedickt und Partikelreste lagern sich in das Textil ein. Durch die auf der Decklage hochstehenden Fasern werden sowohl die Interaktion der Folgepulse mit dem Preform als auch ein anschließender Matrixinfusionsprozess gestört. Ein weiterer relevanter Produktivitätsfaktor ist der lineare Pulsüberlapp. Abhängig von Preformdicke und der verwendeten Pulsenergie muss der Pulsüberlapp für eine maximale Produktivität so klein sein, dass die Herstellung eines vollständigen Schnittspaltes ohne restliche, ungetrennte Fasern in der Trennzone möglich ist.

Eine einheitliche Definition der Wärmeeinflusszone bei Gelegen ist bisher nicht vorhanden. Eine Möglichkeit ist die Rückbrandweite der Wirkfäden von der Schnittkante, da der Schmelzpunkt der Wirkfäden ähnlich zu dem der Schlichte auf den Fasern ist. Durch die Schlichte wird die Anhaftung der Matrix an die Fasern vergrößert und ist somit eine Bauteilperformance bestimmende Komponente. Die minimal erzielbare WEZ hängt primär von der Gesamtdicke des Preforms ab. Je dicker das Preform, desto mehr Pulsenergie ist zum Trennen der Fasern erforderlich. Im Einzelpulsfall steigt die erforderliche Pulsenergie linear mit der Anzahl der Gelegelagen, im Trepanierfall exponentiell.

Beim Bohren mittels langgepulster Faserlaserstrahlung tritt zudem eine verfestigte Randschicht an der Bohrung auf. Bisherige Untersuchungen erklären die Ausbildung dieser Schicht durch Rückablagerung rekondensierter Carbonpartikel. Aufgrund der Festigkeit, Uniformität und Dichte der Schicht ist nach Untersuchungen mittels Raman-Spektroskopie, REM und EDX ebenfalls möglich, dass kurzzeitig eine Schmelzphase vorgelegen hat. Der dafür erforderliche Umgebungsdruck, um einen Phasenübergang zu flüssigem Kohlenstoff herbeizuführen, könnte aus dem Dampfdruck der Unreinheiten und Poren in den PAN-Fasern herbeigeführt werden. Durch Untersuchungen an chemisch hochreinen Pechfasern kann gezeigt werden, dass die Ausbildung einer verfestigten Schicht nur noch in sehr kleinem Maße vorhanden ist. Gleichzeitig ist die Aufquellung der Faserenden an der Bohrwand kleiner als bei PAN-basierten Fasern aufgrund der Anordnung der graphitartigen Schichten in der Faser. Die Aufquellung muss vermieden werden, da dies negative Auswirkungen auf Folgeprozesse, wie z.B. der Matrixinfusion mittels Vakuumfolie, haben kann. Der Spalt und die teilweise scharfe Kante zwischen Insert und Preform können zu Rissen in der Vakuumfolie führen. Weiterhin können Teile aus der verfestigten

Schicht ausbrechen, wodurch Startpunkte für Matrixrisse bei wechselnder mechanischer Belastung des konsolidierten Bauteils entstehen können.

Beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung findet der Abtrag aufgrund der relativ kleinen Pulsenergie von einigen hundert Mikrojoule schichtweise statt. Die Produktivität steigt dementsprechend mit Vergrößerung der Repetitionsrate, wobei trotz der relativ kleinen Pulsenergie sehr schnell Wärmeakkumulation auftritt. Aufgrund der begrenzten Scangeschwindigkeit bei kleinen geschlossenen Konturen ist der Pulsüberlapp mit typischerweise $\geq 80\%$ relativ groß und führt daher zu Puls-zu-Puls und Scan-zu-Scan induzierter Wärmeakkumulation. Die mittels UKP-Laserstrahlung hergestellten Bohrungen haben bei einer statischen Fokusslage auf der Oberfläche in der Längsschliffebene eine tulpenähnliche Bohrungsform. Durch die Strahldivergenz besonders außerhalb der Rayleighlänge und die Projektion der Strahlungsfläche auf eine schräge Bohrwand sinkt im asymptotischen Fall die Laserfluenz bis auf die Abtragschwellfluenz der Carbonfasern, wodurch die Bohrungsform hergeleitet werden kann. Durch Nachfahren der Fokusposition in z-Richtung während der Bearbeitung kann einerseits die Konizität verkleinert, andererseits die Produktivität vergrößert werden. Für tiefe Bohrungen ist ein Nachfahren der Fokusposition bei sehr großer Divergenz über der Fokusebene und der dadurch auftretenden Abschattungen am Bohrungseintritt nur bedingt möglich.

Typischerweise treten bei der UKP-Bearbeitung keine verfestigten Randschichten auf. Jedoch ist dies von der Repetitionsrate und Pulsenergie abhängig, da sich z.B. ab 1,4 MHz und 200 μJ Pulsenergie eine Schicht an den Faserenden ausbildet. Analog zur langgepulsten Laserstrahlbearbeitung muss diese Randschicht aus oben genannten Gründen vermieden werden. Die Wärmeinflusszone ist primär abhängig von der Repetitionsrate der Strahlquelle. Bei kleinen Repetitionsraten von wenigen 10 kHz hat der Pulsüberlapp keinen Einfluss auf die Größe der WEZ. Durch eine athermische Modellierung der asymptotischen Bohrungsgeometrie kann die Bohrungsform in Abhängigkeit der Pulsenergie sowie weiterer Strahlungsparameter abgeschätzt werden. Im Vergleich mit realen Bohrungen ist die wahre Bohrgeometrie größer, was darauf hindeutet, dass die Poynting-Vektoren, die zu einer lokalen Veränderung des Absorptionsgrades auf der Bohrungswand führen, relevant sind. Weiterhin ist eine große Pulsenergie für eine kleine Konizität der Bohrung erforderlich, trotz der großen Absorption der Carbonfasern auch unter steilen Inzidenzwinkeln größer 80°.

Die Produktivität kann durch einen geeigneten Bahnabstand größer als der Fokusdurchmesser beim spiralförmigen Scanpfadmustern vergrößert werden. Bei einem zu großen Bahnabstand wird jedoch die Konizität der Bohrung ebenfalls größer, bis die Abtragkraterspuren nicht mehr überlappen und eine zerklüftete Oberfläche entsteht. Eine weitere Möglichkeit ist, die Abtragspaltbreite so anzupassen, dass ein Kern am Ende des Prozesses aus der Bohrung fällt. Die

Abtragspaltbreite muss jedoch so gewählt werden, dass der verbleibende Kern beim Herausfallen nicht verkantet.

Durch quasistatische Auszugversuche wurde gezeigt, dass sowohl die bei langgepulster Laserbearbeitung auftretende verfestigte Randschicht als auch die Größe der WEZ einen negativen Einfluss auf die maximale Auszugkraft haben. Bei CFK-Testkörpern, deren Preforms mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung gebohrt wurden, kann die Randschicht vermieden und die WEZ soweit verkleinert werden, dass Auszugkräfte von durchschnittlich ca. 4,5 kN erreicht werden, was mit dem verwendeten Insert einer Auszugfestigkeit von 71,6 MPa entspricht.

Die Bearbeitung mittels sowohl lang als auch ultrakurz gepulster Laserstrahlung ermöglicht die Herstellung von präzisen 2,5D-Formbohrungen. Dadurch sind neue Insertgeometrien möglich, die an verschiedenste Belastungsfälle des Endbauteils angepasst werden können. Durch die hohe Reproduzierbarkeit ist eine Automation des Laserstrahlbohrprozesses unter Beachtung der Prozesskapselung durch frei werdende Partikel möglich.

Durch die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und den Prozessentwicklungen für das langgepulste sowie ultrakurz gepulste Laserstrahl-Bohren werden sowohl die Produktivität als auch die materialographische und geometrische Qualität vergrößert (Bild 84).

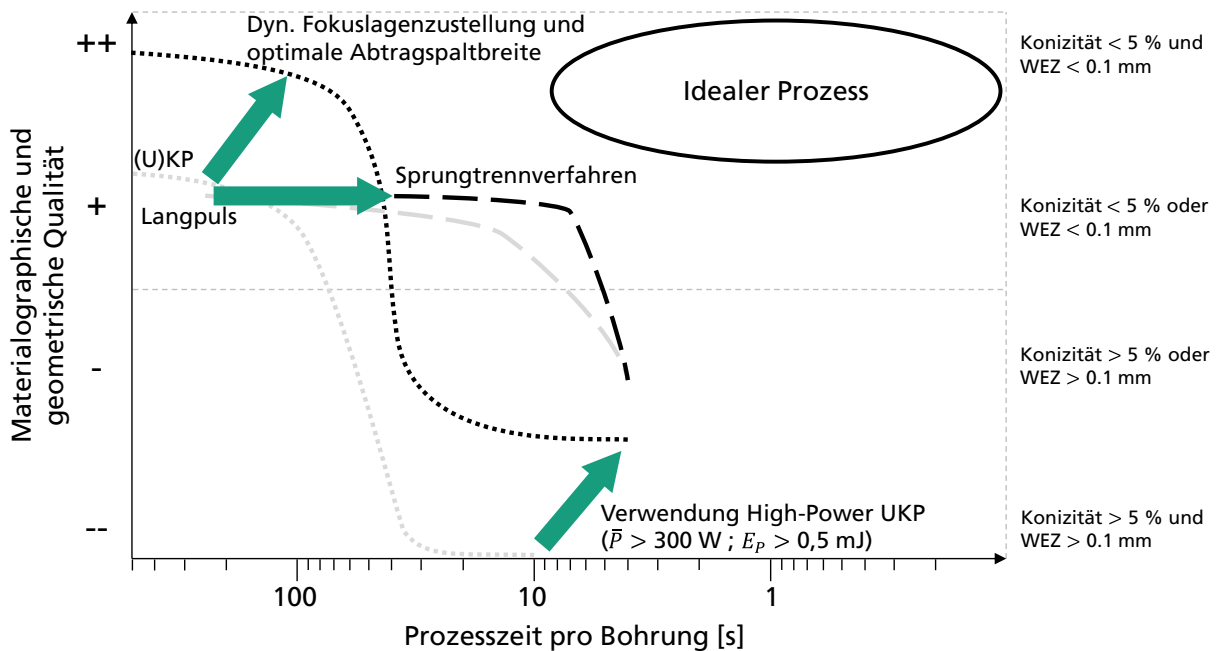


Bild 84: Prozesslandkarte der möglichen Verfahren zur Herstellung von Bohrungen für Krafteinleitungselemente in Preforms aus Carbonfasern. Referenzgeometrie ist eine Bohrung mit 8,5 mm Durchmesser in einem fünflagigen, bi-axialen Preform.

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen sind für ein detaillierteres und tieferes Prozessverständnis weitere Analysen erforderlich. Besonders bei der Bearbeitung mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung sollte die Abtrageffizienz durch den Einfluss der Pulsdauer untersucht werden. Durch die Verfügbarkeit von UKP-Strahlquellen mit mittleren Leistungen >1 kW sollten Untersuchungen zur Qualitäts- und Produktivitätssteigerung bei Verwendung von z.B. Mehrstrahl-optiken durchgeführt werden, sofern mehrere gleiche Bohrungen im Arbeitsfeld des Scanners platziert werden können. Bei Bohrungen mit sehr hohem Aspektverhältnis wird wahrscheinlich der Einfluss der Abschirmung der Laserstrahlung durch Partikelwolken im Bohrkanal relevant. Hierzu sind neue Abtragstrategien, vorzugsweise ohne die Einhaltung von Pausen, erforderlich.

Da die Pulsenergie bei langgepulster Laserstrahlung bereits bei kleinen Repetitionsraten zu Wärmeakkumulationseffekten und zur Bildung einer verfestigten Randschicht führt, sind weitere Untersuchungen mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen oder pump-probe Analysen erforderlich, um den Verdampfungs- und ggf. Phasenumwandlungsprozess zu beobachten und zu analysieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ungebinderte Preforms verwendet. Für industrielle Prozesse werden häufig mehrlagige Preforms mit Binder verwendet. Die Verwendung eines Binders zwischen den Einzellagen kann bei der Laserstrahlbearbeitung dazu führen, dass sich das Preform entzünden kann. Dieser Einfluss sollte daher hinsichtlich der erzielbaren materialographischen und geometrischen Qualität beim Laserstrahl-Bohren untersucht werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Produktivität zur Herstellung einer Bohrungen zu steigern, könnte durch die Vergrößerung des Fokusdurchmessers bis auf den eigentlichen Bohrungsdurchmesser realisiert werden. Bei ausreichender Pulsenergie kann somit die gesamte Bohrung mit einem oder wenigen Laserpulsen, ähnlich einem „photonischen Stanzprozess“, hergestellt werden. Da der Bohrungskern nicht zwingend verdampft werden muss, könnte durch eine geeignete Strahlformung, z.B. einem Donut-Profil, die Abtrageffizienz erhöht und gleichzeitig der Energiebedarf minimiert werden. Bei ausreichender Strahlqualität könnten über statische oder programmierbare diffraktive optische Elemente auch Freiformfoki erzeugt werden. Die erzielbare materialographische und geometrische Qualität sowie die maximal bearbeitbare Materialstärke müssen in diesem Zusammenhang noch untersucht werden.

Um einen umfangreicheren Vergleich mit klassisch hergestellten CFK-Bauteilen durchführen zu können, sind weitere Lebensdaueruntersuchungen erforderlich. Unter Anderem sollten wechselnde Belastungen (Zug-Druck, Torsion) und Biegeversuche durchgeführt werden, um sowohl Aussagen über mechanische Kennwerte als auch über Defektgrößen wie z.B. Lochleibung und Kerbwirkung treffen zu können.

Literaturverzeichnis

- [AMP16] AMPHOS GmbH: AMPHOS 400 Product Guide.
<http://amphos.de/sites/default/files/Amphos%20400%20Feb2016.pdf>, 11.02.2018.
- [ASA13] Alberdi, A. et al.: Composite Cutting with Abrasive Water Jet. In *Procedia Engineering*, 2013, 63; S. 421–429.
- [AVK13] AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013, S. 358.
- [BBM14] Barz, A.; Bliedtner, J.; Müller, H.: *Lasermaterialbearbeitung. Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Beispiele ; mit 110 Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.; Hanser, München, 2014; S. 71, 96-98.
- [Ber92] Bergmann, H. W.: *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992; S. 134-157.
- [Bha16] Bhat, G.: *Structure and Properties of High-Performance Fibers*. Elsevier Science, 2016; S. 7.
- [Brü14] Brünglinghaus, C.: Gesundheitsgefahren durch Carbonfasern: CFK-Valley Stade nimmt Stellung.
<https://www.springerprofessional.de/leichtbau/werkstoffe/gesundheitsgefahren-durch-carbonfasern-cfk-valley-stade-nimmt-st/6561178>, 11.02.2018.
- [Che11] Cherif, C.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011; S. 72, 76f, 464, 483.
- [CMN96] Chichkov, B. N. et al.: Femtosecond, Picosecond and Nanosecond Laser Ablation of Solids. In *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 1996, 63; S. 109–115.
- [CW14] CW Composites World: Fiber reinforcement forms.
<http://www.compositesworld.com/articles/fiber-reinforcement-forms>, 11.02.2018.
- [D3016] D30 Committee: *Test Method for Measuring the Fastener Pull-Through Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [DIN03] DIN 8590: *Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, 2003.
- [DIN12] DIN 32540: *Laserstrahlabtragen - Thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl - Begriffe, Einflussgrößen, Durchführung*. Beuth Verlag, 2012.
- [DIN93] DIN EN 481:1993-09: *Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel*, 1993.

- [DKK07] Drechsler, K.; Karb, I.; Kehrle, R.; Witzel, V.: Faserverbundstrukturen - Leichtbau in Natur und Technik. <https://www.uni-stuttgart.de/presse/archiv/themenheft/03/drechsler2.pdf>, 11.02.2018; S. 15.
- [DR06] Diels, J.-C.; Rudolph, W.: Ultrashort Laser Pulse Phenomena. Fundamentals, Techniques and Applications on a Femtosecond Time Scale. - Previous ed.: 1996. Academic Press, Burlington, MA, 2006; S. 10.
- [EFM12] e-mobil BW GmbH; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA; Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg: Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen: Einführung und Überblick. http://www.e-mobilbw.de/de/service/publikationen.html?file=files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/12307_LB-Studie_Bearbeitung_RZ_web.pdf, 11.02.2018; S. 17.
- [EK14] Eickenbusch, H.; Krauss, O.: Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2014; S. 53.
- [Fin17] Finger, J.-T.: Puls-zu-Puls-Wechselwirkungen beim Ultrakurzpuls-Laserabtrag mit hohen Repetitionsraten. Apprimus Verlag, Aachen, 2017; S. 24-26.
- [Fit89] Fitzer, E.: Pan-based Carbon Fibers. Present State and Trend of the Technology from the Viewpoint of Possibilities and Limits to Influence and to Control the Fiber Properties by the Process Parameters. In Carbon, 1989, 27; S. 621–645.
- [FR15] Faisst, B.; Rettich, T.: ProCaV - Produktive und schädigungsarme Laserbearbeitung von Carbonfaser-Verbundwerkstoffen. Trumpf GmbH + Co. KG, 2015.
- [Fre17] Freitag, C.: Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe. Utz, Herbert, München, 2017; S. 36, 45f, 52, 65, 67, 70.
- [Fri13] Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2013; S. 396ff.
- [FST13] Fuchs, A. N. et al.: Laser Cutting of Carbon Fiber Fabrics. In Physics Procedia, 2013, 41; S. 372–380.
- [FWG14] Freitag, C.; Weber, R.; Graf, T.: Polarization Dependence of Laser Interaction with Carbon Fibers and CFRP. In Optics Express, 2014, 22; S. 1474–1479.
- [FZ14] Fuchs, A. N.; Zäh, M. F.: Gasgeführtes Laserstrahlschneiden von CFK-Preforms. Bearbeitung textiler Halbzeuge aus Kohlenstofffasern. In wt Werkstattstechnik online, 2014, 104; S. 394–399.
- [GHO12] Gottmann, J.; Hermans, M.; Ortmann, J.: Digital Photonic Production of Micro Structures in Glass by In-Volume Selective Laser-Induced Etching using a High Speed Micro Scanner. In Physics Procedia, 2012, 39; S. 534–541.

- [GK07] Gries, T.; Klopp, K. Hrsg.: Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien. Verfahren und Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007; S. 7.
- [GW09] Grupp, M.; Westphäling, T.: Faserlaser - Das energieeffiziente Werkzeug. Verschiedene industrielle Anwendungen im Überblick. In Laser Technik Journal, 2009; S. 38–41.
- [GW12] Graf, T.; Weber R.: Die besonderen Herausforderungen beim Laserschneiden von CFK. In Laser Magazin, 2012, 1; S. 26–27.
- [Har12] Hartbrich, I.: Zerspaner nehmen CFK ins Visier. <http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Zerspaner-nehmen-CFK-Visier>, 11.02.2018.
- [HCG16] Hintze, W. et al.: Laser Scored Machining of Fiber Reinforced Plastics to Prevent Delamination. In Procedia Manufacturing, 2016, 6; S. 1–8.
- [Her18] Hermanns, T.: Interaktive Prozesssimulation für das industrielle Umfeld am Beispiel des Bohrens mit Laserstrahlung. Dissertation, Aachen, 2018; S. 59, 62, 65–69, 92–94.
- [HHL98] Haight, R. A. et al.: Implementation and Performance of a Femtosecond Laser Mask Repair System in Manufacturing: 18th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management. SPIE, 1998; S. 477–484.
- [HLC16] Herzog, D. et al.: Laser Cutting of Carbon Fibre Preforms. Influence on Handling, Drape and Infusion. In International Journal of Automotive Composites, 2016, 2; S. 97.
- [HM11] Hindersmann, A.; Malzahn, S., et al.: Endkonturnahe Faserverbundbauteile durch hochgenaue Preform-Feinbesäumung mittels Lasertechnologie, 2011; S. 493–502.
- [HP-17] HP-Textiles GmbH: Das IMC/MTI-Verfahren in der Vakuuminfusion. www.hp-textiles.com/arbeitsanleitungen/aa_Vakuuminfusion.pdf, 11.02.2018.
- [HT03] Hocheng, H.; Tsao, C. C.: Comprehensive Analysis of Delamination in Drilling of Composite Materials with Various Drill Bits. In Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140; S. 335–339.
- [HXH13] Haiyan, W. et al.: Analysis of Cutting Forces in Helical Milling of Carbon Fiber-Reinforced Plastics. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227; S. 62–74.
- [IFN98] Itatani, J. et al.: Suppression of the Amplified Spontaneous Emission in Chirped-Pulse-Amplification Lasers by Clean High-Energy Seed-Pulse Injection. In Optics Communications, 1998, 148; S. 70–74.
- [IKA14] IKA Institut für Kraftfahrzeuge - RWTH Aachen University: CO2-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020. http://www.bmwi.de/Redaktion/Migration/DE/Downloads/Publikationen/co2-emissionsreduktion-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen-nach-2020-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1, 11.02.2018; S. 51.

- [illegible]

- [Kor03] Korte, F.: Nanostrukturierung mit Femtosekundenlaserpulsen. Cuvillier, Göttingen, 2003.
- [KRS05] Kalashnikov, M. P. et al.: Double Chirped-Pulse-Amplification Laser: A Way to Clean Pulses Temporally. In Optics Letters, 2005, 30; S. 923.
- [KV90] Kroker, J.; Vargiu, S.: Europäisches Patent EP0393665: Schlichte für Kohlenstoff-Fasern und Glasfasern, 1990.
- [LAB13] Letsch, A. et al.: Ultrashort-Pulse Laser Structuring of Thin-Film Solar Modules. In Laser Technik Journal, 2013, 10; S. 16–19.
- [LDL17] Liu, X. et al.: Thermal Conductivity and Raman Spectra of Carbon Fibers. In International Journal of Thermophysics, 2017, 38; S. 1326.
- [LDM97] Liu, X.; Du, D.; Mourou, G.: Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses. In IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33; S. 1706–1716.
- [Lei06] Leiser, J.: Beitrag zu innovativen Verbindungstechniken für Hochleistungsverbundwerkstoffe. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2006. Inst. für Allg. Maschinenbau und Kunststofftechnik, Chemnitz, 2006; S. 43f, 63, 65.
- [LLY11] Li, C. et al.: Preparation of Single- and Few-Layer Graphene Sheets Using Co Deposition on SiC Substrate. In Journal of Nanomaterials, 2011, 2011; S. 1–7.
- [LQ16] Limburg, A.; Quicker, P.: Entsorgung von Carbonfasern - Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung. www.vivis.de/phocadownload/Download/2016_eaa/2016_EaA_135-144_Quicker.pdf, 11.02.2018.
- [LTC12] Liu, D.; Tang, Y.; Cong, W. L.: A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates. In Composite Structures, 2012, 94; S. 1265–1279.
- [LYH15] Lin, Z. et al.: Precise Control of the Number of Layers of Graphene by Picosecond Laser Thinning. In Scientific reports, 2015, 5; S. 1–7.
- [LZF15] Long, J. et al.: Wettability Conversion of Ultrafast Laser Structured Copper Surface. In Journal of Laser Applications, 2015, 27; S29107-01 - S29107-06.
- [LZH13] LZH Laser Zentrum Hannover: HolQueSt - 3D Hochleistungs-Laserbearbeitung zur Qualitäts- und Durchsatzsteigerung für die prozesssichere, automatisierte Fertigung von CFK-Leichtbau-Strukturen. <http://holquest.de/>, 11.02.2018.
- [LZZ15] Long, J. et al.: Superhydrophilicity to Superhydrophobicity Transition of Picosecond Laser Microstructured Aluminum in Ambient Air. In Journal of colloid and interface science, 2015, 441; S. 1–9.
- [MAV16] MAV - Innovation in der spanenden Fertigung: Besser bohren mit Vibration. Magnetgelagerte Spindeltechnologie erlaubt optimale Prozessanpassung. https://www.lti-motion.com/fileadmin/lti-motion/News/Fachartikel_mav_2016-09.pdf, 11.02.2018.

- [MCA97] Momma, C. et al.: Präzise Mikro-Bearbeitung mit Femtosekunden-Laserpulsen. In *Laser und Optoelektronik*, 1997, 29; S. 82–89.
- [MGP04] Müller, D. et al.: Ultrashort Pulse Thin-Disk Lasers and Amplifiers. In (Ascheron, C. E. et al. Hrsg.): *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004; S. 55–73.
- [MK16] Meitinger, M.; Königsreuther, P.: Maschinen mit CFK-„Gefühl“. <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/maschinen-mit-cfk-gefuehl-a-526616/>, 11.02.2018.
- [Moe11] Moeller, R.: Flow's Aerospace Activity - Machining of CFRP with Water-Jets in Aerospace Industry. www.iom3.org/sites/default/files/iom3-corp/wed_1555_moller.pdf, 11.02.2018; S. 32.
- [Mor05] Morgan, P.: *Carbon Fibers and Their Composites*. Taylor & Francis, Boca Raton, 2005; S. 30, 35, 90, 145, 185, 195, 202.
- [MP05] Mayer, H. W.; Pester, W.: Laser lässt Dieselmotoren sparsamer fahren. In *VDI nachrichten*, 2005, 49/2005.
- [MSW13] Mucha, P. et al.: Momentum and Velocity of the Ablated Material in Laser Machining of Carbon Fiber Preforms. In *Applied Physics A*, 2013, 113; S. 361–366.
- [MTG96] Melanitis, N.; Tetlow, P. L.; Galiotis, C.: Characterization of PAN-Based Carbon Fibres with Laser Raman spectroscopy. Part I: Effect of Processing Variables on Raman Band Profiles. In *Journal of Materials Science*, 1996, 31; S. 851–860.
- [OFW15] Onuseit, V. et al.: Efficient Processing of CFRP with a Picosecond Laser with up to 1.4 kW Average Power. In (Roth, S. et al. Hrsg.): *SPIE*. SPIE, 2015; S. 935012.
- [Onu15] Onuseit, V.: Abschlussbericht zum Teilvorhaben: Produktionsrelevante Grundlagen der CFK-Laserbearbeitung im Verbundprojekt ProCaV - Produktive und schädigungsarme Laserbearbeitung von Carbonfaser-Verbundwerkstoffen. IFSW Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart, 2015.
- [Opt12] Optoskand AB: Fiber to Fiber Coupling Unit 1239, Mölndal, Sweden, 2012.
- [Opt16] Optoskand AB: Prealigned External Optics D50 - Manual, Mölndal, Sweden, 2016.
- [PBG09] Pradere, C. et al.: Thermal Properties of Carbon Fibers at Very High Temperature. In *Carbon*, 2009, 47; S. 737–743.
- [Pho14] Photonikforschung Deutschland GmbH: Photonisch basierte Reparatur und Nacharbeit von Compositestrukturen - PRECISE. https://www.photonikforschung.de/media/lasertechnik/pdf/Precise_Leichtbau_Projekts_teckbrief_Korr2017-09_bf_C3.pdf, 11.02.2018.
- [Pie93] Pierson, H. O.: *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes. Properties, Processing and Applications*. Noyes Publ, Park Ridge, NJ, 1993; S. 55, 178, 186.

- [Pop05] Poprawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Springer, Berlin, 2005; S. 293f, 306, 311, 313, 322.
- [PPK16] Pecat, O.; Paulsen, T.; Katthöfer, P.; Brinksmeier, E.; Fangmann, S.: Vibration Assisted Drilling of Aerospace Materials. http://www.iwt-bremen.de/fileadmin/user_upload/Fertigungstechnik/PDF/SAE2016_Pec_V4.pdf, 11.02.2018; S. 12.
- [Pri15] Prieß, T.: Lokale Beeinflussung der Drapierbarkeit von Multiaxialgelegen durch Laserperforation. Dissertation, Stuttgart, 2015; S. 36, 57f, 74.
- [RKF14] Reininghaus, M. et al.: Dynamics of Ultrashort Pulsed Laser Radiation Induced Non-Thermal Ablation of Graphite. In Applied Physics A, 2014, 117; S. 1873–1878.
- [RMR09] Russbuedt, P. et al.: 400W Yb:YAG Innoslab fs-Amplifier. In Optics Express, 2009, 17; S. 12230–12245.
- [RP17] RP Photonics: Quasi-Continuous-Wave Operation. http://www.rp-photonics.com/quasi_continuous_wave_operation.html, 11.02.2018.
- [RWF12] Reininghaus, M. et al.: Laser Induced Non-Thermal Deposition of Ultrathin Graphite. In Applied Physics Letters, 2012, 100; 151606-1 - 151606-3.
- [SAE14] SAERTEX: Jungfernflug des Learjet 85 – mit Multiaxialgelegen (NCF) von SAERTEX an Bord. <https://www.saertex.com/de/service/news/jungfernflug-des-learjet-85-mit-multiaxialgelegen-ncf-von-saertex-an-bord>, 11.02.2018.
- [Sch07] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007; S. 41, 63, 268.
- [SFS16] The Society of Fiber Science and Techno, J. Hrsg.: High-Performance and Specialty Fibers. Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future. Springer Japan; Imprint: Springer, Tokyo, 2016.
- [SG12] Schimmelpfennig, S.; Glaser, B.: One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. In Journal of environmental quality, 2012, 41; S. 1001–1013.
- [SRW11] Schulz, M. et al.: Yb:YAG Innoslab Amplifier: Efficient High Repetition Rate Subpicosecond Pumping System for Optical Parametric Chirped Pulse Amplification: Optics Letters 2011; S. 2456 - 2458.; S. 2456–2458.
- [ST08] Saleh, Bahaa E. A; Teich, M. C.: Grundlagen der Photonik. Wiley-VCH, Weinheim, 2008; S. 653ff.
- [Tin16] Tinne, N: Labokomp - CFK-Bauteile in großen Stückzahlen präzise mit dem Laser bohren. http://www.lzh.de/sites/default/files/press_release_files/20161104_lzh_pm_labokomp_final.docx, 11.02.2018.

- [Toh16] Toho Tenax: Product Data Sheet (EU) Tenax filament yarn.
https://www.tohotenax.com/fileadmin/user_upload/Filament_Produktprogramm_v22_2016-04-07_en_eu.pdf, 11.02.2018.
- [Tor17] Toray Carbon Fibers America, Inc.: TORAYCA T300 Technical Data Sheet CFA-001.
www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf, 11.02.2018.
- [Tri69] Trigg, T. A.: Carbon Fibre Composites in Rocket Motor Systems, Banwell, Weston-Super-Mare, England, 1969; S. 1.
- [Uch16] Uchtmann, H.: Modulares hybrides Laserstrahl-Bohren. Dissertation. Apprimus Verlag, Aachen, 2016; S. 9.
- [VDI14] Studie: Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung. VDI-Gesellschaft Materials Engineering, 2014; S. 68, 51f, 180.
- [VDI16] VDI: Vibrationsbohren sichert hohe Qualität bei der Stack-Bearbeitung.
<http://www.ingenieur.de/VDI-Z/2016/Ausgabe-01-02/Sonderteil-Innovative-Fertigungstechnik/Vibrationsbohren-sichert-hohe-Qualitaet-bei-der-Stack-Bearbeitung?page=2>, 11.02.2018.
- [VDW16] van Ta, D. et al.: Laser Textured Superhydrophobic Surfaces and their Applications for Homogeneous Spot Deposition. In Applied surface science, 2016, 365; S. 153–159.
- [VFR06] Voisey, K. T. et al.: Fibre Swelling during Laser Drilling of Carbon Fibre Composites. In Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44; S. 1185–1197.
- [WFK12] Weber, R. et al.: Short-pulse Laser Processing of CFRP. In Physics Procedia, 2012, 39; S. 137–146.
- [WGB14] Weber, R. et al.: Heat Accumulation during Pulsed Laser Materials Processing. In Optics Express, 2014, 22; S. 11312–11324.
- [WHM11] Wolynski, A. et al.: Laser Ablation of CFRP using Picosecond Laser Pulses at different Wavelengths from UV to IR. In Physics Procedia, 2011, 12; S. 292–301.
- [Wit14] Witten, E. Hrsg.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014; S. 146-150.
- [YKT96] Yamane, T. et al.: Thermal Diffusivity Measurement of Single Fibers by an AC Calorimetric Method. In Journal of Applied Physics, 1996, 80; S. 4358–4365.
- [YLL14] Ye, X. et al.: Direct Laser Fabrication of Large-Area and Patterned Graphene at Room Temperature. In Carbon, 2014, 68; S. 784–790.
- [YRH13] Yang, Y.; Robitaille, F.; Hind, S. J.: Thermal Conductivity of Carbon Fiber Fabrics. In 19th International Conference on Composite Materials ICCM, Montreal, 2013; S. 1-10.
- [Zaz97] Zazula, J. M.: On Graphite Transformation at High Temperature and Pressure Induced by Absorption of the LHC Beam, LHC Project Note 78 / 97, 1997; S. 1-14.

- [Zel06] Zellmer, H.: Der Faserlaser - Strahlquelle für viele Anwendungen. Wie funktioniert er? Und was kann er? In Laser Technik Journal, 2006, 3; S. 52–55.
- [ZFW15] Zahedi, E. et al.: High Ablation Rate Laser Processing of CFRP for Repair Purpose. In Proceedings of International Conference on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO, Atlanta, 2015; Paper M304, 39-43.
- [ZNT05] Zellmer, H.; Nolte, S.; Tünnnermann, A.: Faserlaser. Kompakte Kurzpulsquellen mit hoher Pulsenergie und mittlerer Leistung eignen sich für die Materialbearbeitung und eröffnen völlig neue Anwendungen. In Physik Journal, 2005, 4; S. 29–34.

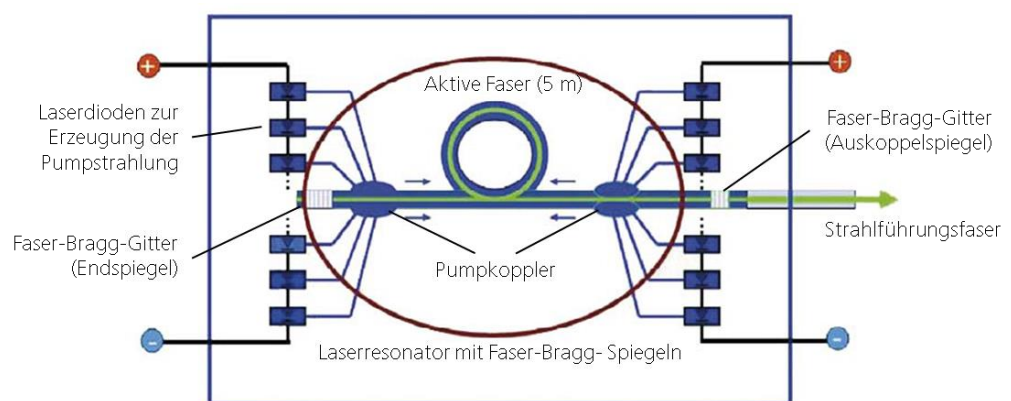
Anhang A

Faserlaserstrahlquellen

Faserlaser können mithilfe von seltenerddotierten Fasern vom sichtbaren bis in das nahe infrarote Spektrum betrieben werden [ST08]. Seit dem Jahr 2011 sind gepulste Faserlaserstrahlquellen mit Pulsspitzenleistungen von ≥ 6 kW kommerziell verfügbar. Somit sind die Strahlquellen für die Lasermaterialbearbeitung von Werkstoffen mit hohen Schmelz- und Verdampfungstemperaturen und mehreren Millimetern Dicke interessant.

Der Aufbau des Faserlasers ist schematisch in Bild 85 dargestellt. Die von mehreren Laserdioden erzeugte Pumpstrahlung wird über Pumpkoppler in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung in die aktive Faser eingespeist. Faser-Bragg-Gitter dienen als Endspiegel und Auskoppelspiegel und bilden mit der aktiven Faser den Resonator. Diese Gitter werden mithilfe ultravioletter Strahlung in die Faser eingebracht und eine periodische Modulation des Brechungsindex entsteht. Faser-Bragg-Gitter haben die Eigenschaften eines Interferenzgitters. Nur die gewünschte Wellenlänge wird im Resonator reflektiert und verstärkt. Nur die gewünschte Wellenlänge wird im Resonator reflektiert und verstärkt.

Bild 85:
Schematische
Darstellung eines
multimode
Faserlasers mit
Resonator [GW09]



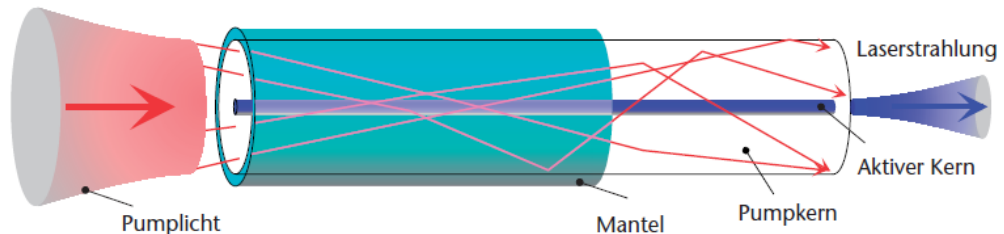
Die im Resonator erzeugte Laserstrahlung wird in eine Strahlführungsfaser ausgekoppelt, durch welche die Strahlung in die Bearbeitungsoptik einkoppelt wird. Dabei können bei multimode Faserlaserstrahlung Strahlführungsfasern mit verschiedenen Durchmessern von 50 μm bis zu mehreren hundert Mikrometern verwendet werden, um verschiedene Fokussdurchmesser zu erzeugen.

Die aktive Faser eines Faserlasers besteht wie auch bei Glasfasern aus der Telekommunikation aus hochreinem Quarzglas. Durch Dotierung mit Germanium, Aluminium und Phosphor wird ein Kernbereich mit größerer

Brechzahl im Vergleich zum Mantel geschaffen. Wird Strahlung in diesen Kernbereich eingekoppelt, bleibt diese durch den Effekt der Totalreflexion innerhalb der Faser. Um eine Verstärkung innerhalb der Faser zu generieren, wird der innere Kern, der Pumpkern, zusätzlich mit seltenen Erden wie z.B. Ytterbium dotiert. Eine lange aktive Faser ermöglicht eine große Verstärkung der Laserleistung bei Faserlasern. [ZNT05]

In Bild 86 ist der doppelwandige Aufbau der Faser nach dem Koppelkernkonzept dargestellt. Die Pumpstrahlung wird über die gesamte Länge der aktiven Faser immer wieder durch den aktiven Kern reflektiert.

Bild 86:
Schematische
Darstellung eines
Doppelkern-
Faserlasers mit
Mantel, Pumpkern
und aktivem Kern
[Zel06]



Bei einem quasi-continuous-wave (qcw) gepulsten Laser ist die Pumpquelle gepulst. Thermische Einflüsse werden auf das laseraktive Medium und die Pumpquelle verkleinert. Dadurch kann die Pumpquelle kurzzeitig mit sehr großer Leistung betrieben werden. Optisch wird der Laser also im continuous wave (cw)-Modus betrieben. Pulsdauern von einem qcw-gepumpten Laser reichen von 100 μs bis mehrere Millisekunden. Der duty cycle (On-Time im Verhältnis zur Periodendauer) liegt bei qcw-Faserlaser bei ca. 10 %. Die maximale Repetitionsrate und Frequenz in Abhängigkeit des duty cycle (dc) ist in Formel 0.1 dargestellt:

0.1

$$dc = f \cdot t_p$$

Dabei ist f die Repetitionsrate und t_p die Pulsdauer. Ein Nachteil des qcw-gepumpten Faserlasers ist die geringe Strahlqualität von $M^2 \gg 1$. Aufgrund der kurzen Dauer bis zum Erreichen der Pulsspitzenleistung und dem Abfall am Ende des Pulses liegt zeitlich gesehen eine nahezu rechteckige Pulsform vor. Die mittlere Leistung $\bar{P}$ kann daher über die Pulsspitzenleistung $\hat{P}$ und dem duty cycle wiedergegeben werden als:

0.2

$$\bar{P} = \hat{P} \cdot dc$$

Aufgrund der zeitlich rechteckigen Pulsform gilt für die Pulsenergie E_p :

0.3

$$E_p \approx \hat{P} \cdot t_p$$

Qcw-Laser werden in der Materialbearbeitung beim Bohren und Schneiden eingesetzt. Durch die Pausen zwischen den Pulsen kann der Werkstoff abkühlen,

wodurch die materialographische Bohrungsqualität, wie z.B. hinsichtlich einer kleineren Wärmeeinflusszone, vergrößert wird. Dies ist bei cw-Lasern aufgrund der konstant einwirkenden Strahlung während des Bearbeitungsprozesses nicht gegeben. [GW09], [RP17]

Ultrakurz gepulste Laserstrahlquellen

Anders als bei gütegeschalteten Laserstrahlquellen, mit denen Pulse mit Pulsdauern ab ca. 10 ns erzeugt werden können, werden ultrakurze Pulse durch Modenkopplung erzeugt. Bei der Kopplung verschiedener longitudinaler Moden, die durch eine spektrale Bandbreite im Lasermedium hervorgerufen und verstärkt werden können, interferieren diese sowohl konstruktiv als auch destruktiv je nach relativer Lage der elektrischen Felder. Bei Kopplung mit fester Phase entstehen ultrakurze Pulse. Die Pulsdauer ergibt sich dabei als Fouriertransformierte der Bandbreite des Emissionsspektrums $\Delta\nu$ des aktiven Mediums. Die erzielbare Pulsdauer t_p ist mit der Bandbreite des Emissionsspektrums $\Delta\nu$ über das Pulsdauer-Bandbreiten-Produkt verknüpft:

0.4

$$t_p \cdot \Delta\nu \geq c_B$$

Die Konstante c_B ist von der spektralen Intensitätsverteilung abhängig. Für gaußförmige spektrale Intensitätsverteilungen ist $c_{B,Gauss} = 0,441$. [DR06], [Uch16]

Zur Erzeugung von ultrakurzen Pulsen mit einer Pulsdauer von 10 ps oder kürzer werden aktive Lasermedien mit einer spektralen Bandbreite von einigen Nanometern verwendet. Die Strahlung im Resonator ist daher nicht monochromatisch, wodurch bei Reflexionen und Brechungen an z.B. optischen Gittern dispersives Verhalten auftritt. Aktive Lasermedien sind zum Beispiel Ti:Saphir, Yb:YAG oder Nd:YVO4.

Von den ersten ultrakurz gepulsten Laserstrahlquellen konnten aufgrund der kurzen Pulsdauer im Bereich von einigen 100 fs nur Laserpulse mit kleinen Pulsenergien erzeugt werden. Die Folge waren ultrakurz gepulste Laserstrahlquellen mit kleinen mittleren Leistungen von einigen 100 mW. Zur Vergrößerung der mittleren Leistung wird seit einigen Jahrzehnten das MOPA-Prinzip (Master Oscillator Power Amplifier) verwendet. Dabei ist der eine Teil der Laserstrahlquelle ein Master Oscillator, in dem die Laserpulse mit erforderlicher Strahlqualität ($M^2 < 1,1$) und Pulsdauer (z.B. 500 fs) erzeugt werden. Im anschließenden Power Amplifier wird die Laserstrahlung mit wenigen Milliwatt Leistung verstärkt, wodurch ultrakurze Laserpulse mit großer Strahlqualität ($M^2 < 1,1$) und mittleren Leistungen von mehreren Watt erzeugt werden. [KKW04], [MGP04] [MGP04]

Zur Verstärkung der Laserpulse ist vor allem die CPA-Technologie (Chirped Pulse Amplification) etabliert. Bei dieser Technologie wird der Laserpuls vor dem

Verstärken mithilfe des dispersiven Verhaltens der Laserstrahlung an einem Gitter zeitlich aufgeweitet, wodurch Schäden des Verstärkermediums aufgrund der großen Intensitäten bei ultrakurzen Pulsen vermieden werden. Nach dem Verstärken wird der Laserpuls wieder zeitlich komprimiert, wodurch ein ultrakurzer Laserpuls mit großer Pulsenergie resultiert. Mit dieser CPA-Technologie sind heute Laserstrahlquellen mit einer mittleren Leistung von bis zu einigen 100 W verfügbar. [KRS05], [IFN98] [KRS05] [AMP16]

Eine alternative Verstärkermethode, die ohne CPA auskommt, ist die InnoSlab-Technologie. Dabei wird die Laserstrahlung räumlich aufgeweitet, statt zeitlich gestreckt und nach dem Verstärken wieder gebündelt. Auf diese Weise sind mittlere Leistungen von einigen hundert Watt realisierbar [RMR09] [SRW11], [RMR09]. Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine ultrakurz gepulste Laserstrahlquelle mit der InnoSlab- und CPA Technologie mit einer mittleren Leistung von bis zu 400 W und einer Pulsspitzenleistung bis zu 500 MW verwendet.

C++ Beispiel zur Vorgehensweise beim Sprungtrennverfahren (Linie)

```
// Sprungtrennverfahren_Linie.cpp : Defines the entry point for the
// console application.
//

#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <cstdlib>
#include <cmath>
#include <fstream>

using namespace std;

int main()
{
    //User Input (mm, s, Hz)
    double dfaser = 0.1;
    double fcoll = 200;
    double fbrenn = 163;
    double tp = 0.0005;
    double PÜ_pref = 0.50;
    double fLaser = 100;
    double fsim = 5;
    double dcmax = 0.1;
    double x0 = 5;
    double y0 = 5;
    double Lges = 40;
```

```

//Working Variables
double Np_min;
double tproz_min;
double Nl;
double Np_l;
double Np;
double tproz;
double PÜ_real;
double Ll;
double s;
double ds;
double dL;
double fsim_real;

//Bedingungen Duty Cycle
if (dcmax < tp*fLaser)
{
    cout << "Fehler: Duty Cycle zu hoch" << endl;
}
else
{
    cout << "Duty Cycle: OK" << endl;
}

//Berechnungsteil

dL = dfaser*fbrenn/fcoll;// Lochdurchmesser (hier Fokusbereich)
Np_min = ceil((((Lges/dL)-1)/(1-PÜ_pref))+1);// Minimale Anzahl Pulse
tproz_min = Np_min/fLaser;           // Minimal Prozesszeit
Nl = ceil(tproz_min*fsim);           // Anzahl Linien
Np_l = ceil(Np_min/Nl);              // Anzahl Pulse pro Linie
Np = Np_l*Nl;                        // Wahre Anzahl Pulse
tproz = Np/fLaser;                   // wahre Prozesszeit
PÜ_real = 1-((((Lges/dL)-1)/(Np-1)); // wahrer linearer Pulsüberlapp
Ll = dL*(1-PÜ_real)*Nl*(Np_l-1);     // Länge einer p&s-Linie
s = dL*(1-PÜ_real)*Nl;               // Abstand Pulse innerhalb einer Linie
ds = dL*(1-PÜ_real);                 // Versatz Start neue Linie
fsim_real = fLaser/Np_l;              // wahre simulierte Repetitionsrate

//Laufvariable
double A;

//Dateiausgabe
ofstream out ("Pilgerschritt_Scan2D.txt");

for (int g=0; g < Nl; g++)
{
    for (int i=0; i < Np_l; i++)
    {
        A = x0+i*s+g*ds;
        out << A << "\t";
        out << y0 << endl;
    }
}

```

```

}
}

//Ausgabe der Parameter
cout << "Fokusbereich: " << dL << " mm" << endl;
cout << "Wahrer Ueberlapp: " << PÜ_real << endl;
cout << "Wahre sim. Rep.rate: " << fsim_real << " Hz" << endl;
cout << "Min. erforderliche Pulse " << Np_min << endl;
cout << "Gesamtanzahl Pulse: " << Np << endl;
cout << "Anzahl Linien: " << Nl << endl;
cout << "Laenge einer p&s-Linie: " << Ll << " mm" << endl;
cout << "Anzahl Pulse pro Linie: " << Np_l << endl;
cout << "Wahrer Abstand zweier Pulse in einer Linie: " << s << " mm"
<< endl;
cout << "Versatz zweier Linien: " << ds << " mm" << endl;
cout << "Reale Prozesszeit (ohne evtl. Sprungverzuege): " << tproz <<
" s" << endl;

//Offenhalten des Ausgabe Fensters
int test;
cin >> test;
}

```

C++ Beispiel zur Vorgehensweise beim Sprungtrennverfahren (Kreis)

```

// Sprungtrennverfahren_Kreis.cpp : Defines the entry point for the
console application.
//

#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <cstdlib>
#include <cmath>
#include <fstream>

using namespace std;

int main()
{
    //User Input (mm, s, Hz)
    double dfaser = 0.1;
    double fcoll = 200;
    double fbrenn = 163;
    double tp = 0.0005;
    double PÜ_pref = 0.80;
    double fLaser = 24;
    double fsim = 12;
    double dcmx = 0.1;
    double dbohrung = 8.5;
    double pi = 3.14159265358979323846;
}

```

```

//Working Variables
double dL;
double dscan;
double dphi;
double NP_R;
double fsim_real;
double delta_phi;
double NR;
double NP;
double dphi_real;
double delta_phi_real;
double tproz;
double PÜ_real;
double s;

//Bedingung duty cycle einhalten
if (dcmax < tp*fLaser)
{
    cout << "Fehler: Duty Cycle zu hoch" << endl;
}
else
{
    cout << "Duty Cycle: OK" << endl;
}

//Berechnungsteil (Winkelberechnungen in rad!)
dL=dfaser*fbrenn/fcoll;
dscan = dbohrung-dL;
dphi = 2*asin(dL*(1-PÜ_pref)/dscan);
NP_R = ceil(fLaser/fsim);
fsim_real = fLaser/NP_R;
delta_phi = 2*pi/360*(360+dphi)/NP_R;
NR = ceil(delta_phi/dphi);
NP = NR*NP_R;
dphi_real = 2*pi/NP;
delta_phi_real = 2*pi/360*(360+(360/NP))/NP_R; //dphi_real eingesetzt
ist beim Übertrag zu ungenau, nur 5 Stellen werden übergeben
tproz = NP/fLaser;
PÜ_real = 1-(dscan*pi)/(dL*(NP-1));
s = dscan*sin((delta_phi_real-dphi_real)/2);

//Laufvariable
double A;
double phi;
double xkor;
double ykor;

//Dateiausgabe
ofstream out ("Pilgerschritt_Scan2D.txt");

for (int g=0; g < NR; g++)
{

```

```

    for (int i=0; i < NP_R; i++)
    {
        phi = i*delta_phi_real+g*dphi_real; //Erzeugung Winkellage
        xkor = dscan/2*cos(phi); //Erzeugung X-Koordinate
        ykor = dscan/2*sin(phi); //Erzeugung Y-Koordinate
        out << xkor << "\t";
        out << ykor << endl;
    }
}

//Ausgabe der Parameter
cout << "Fokusedurchmesser dL: " << dL << " mm" << endl;
cout << "Wahrer Überlapp PÜ_real: " << PÜ_real << endl;
cout << "Wahre sim. Rep.rate fsim_real: " << fsim_real << " Hz" << endl;
cout << "Gesamtanzahl Pulse NP: " << NP << endl;
cout << "Anzahl Umfahrten NR: " << NR << endl;
cout << "Anzahl Pulse pro Repeat NP_R: " << NP_R << endl;
cout << "Wahrer Abstand zweier Pulse in einer Linie s: " << s << " mm" << endl;
cout << "Inkrementalwinkel dphi,real: " << dphi_real*360/(2*pi) << " °" << endl;
cout << "Verteilwinkel delta_phi,real: " << delta_phi_real*360/(2*pi) << " °" << endl;
cout << "Reale Prozesszeit (ohne evtl. Sprungverzögerungen): " << tproz << " s" << endl;

//Offenhalten des Ausgabe Fensters
int test;
cin >> test;

}

```

Maximale Scangeschwindigkeit bezogen auf eine relative Abweichung α zwischen $P\ddot{U}_{UKP}$ und $P\ddot{U}_{DIN}$

Aufgrund der Näherung, dass keine Langlochentstehung bei ultrakurz gepulster Laserstrahlung ($v_{scan} \cdot t_p \ll d_{foc} \ll d_{Bohrung}$) auftritt, ist $P\ddot{U}_{UKP} \leq P\ddot{U}_{DIN}$. Damit folgt für eine relative Abweichung α bezogen auf den exakten Pulsüberlapp $P\ddot{U}_{DIN}$:

0.5

$$\frac{P\ddot{U}_{DIN} - P\ddot{U}_{UKP}}{P\ddot{U}_{DIN}} = \frac{t_p \cdot v_s^2}{d_{foc}^2 \cdot f + d_{foc} \cdot f \cdot t_p \cdot v_s - d_{foc} \cdot v_s} = \alpha$$

Die positive und physikalisch sinnvolle Lösung für eine Scangeschwindigkeit v_s kleiner oder gleich einem Fehler α ist somit:

0.6

$$v_s \leq \frac{\alpha \cdot d_{foc} \cdot (f \cdot t_p - 1) + \sqrt{\alpha \cdot d_{foc} \cdot \alpha \cdot (f \cdot t_p - 1)^2 + 4 \cdot f \cdot t_p}}{2 \cdot t_p}$$

Dies gilt für $d_{foc}, f, t_p > 0$ und $\alpha \geq 0$. Trivial ist für $\alpha = 0$ der Perkussionsprozess, bei welchem die Laserstrahlung nicht bewegt wird ($v_s = 0$) und damit $P\ddot{U}_{DIN} = P\ddot{U}_{UKP} = 1$ ist.

In der nachfolgenden Tabelle ist jeweils ein Beispiel für Laserbohrprozesse mit langgepulster und ultrakurz gepulster Laserstrahlung dargestellt:

Tabelle 31: Beispiel für die maximale Scangeschwindigkeit bei einem zulässigen Fehlerverhältnis α zwischen $P\ddot{U}_{UKP}$ und $P\ddot{U}_{DIN}$

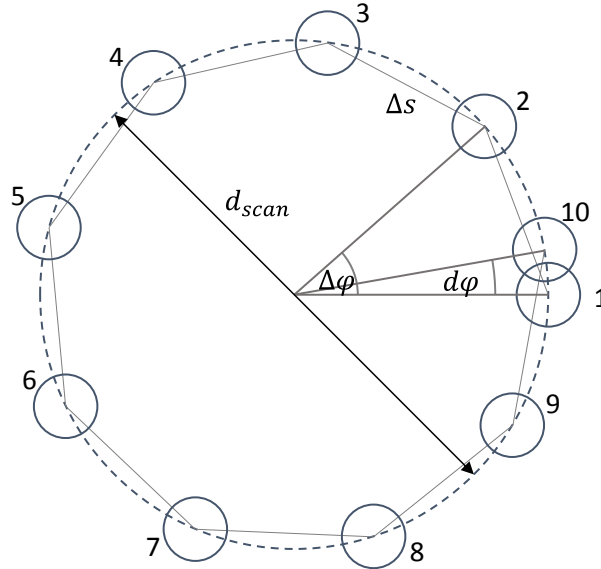
Parameter		Langgepulste Laserstrahlung	UKP- Laserstrahlung
Repetitionsrate [Hz]	f	20	200.000
Pulsdauer [s]	t_p	0,0005	$7,65 \cdot 10^{-12}$
Fokusedurchmesser [mm]	d_{foc}	0,05	0,05
Max. relative Abweichung	α	0,1	0,001
Maximale zulässige Scangeschwindigkeit [mm/s]	$v_{s,max}$	0,9239	9.900,0441

Bei langgepulster Laserstrahlung ist bereits bei kleinen Scangeschwindigkeiten von kleiner 1 mm/s eine signifikante Abweichung ($\alpha = 10\%$) zwischen dem realen und vereinfachten Pulsüberlapp festzustellen. Daher darf die Vereinfachung nicht bei langgepulster Laserstrahlung angewandt werden. Im o.g. Fall für ultrakurz gepulster Laserstrahlung ist bis ca. 9,9 m/s keine signifikante Abweichung ($\alpha = 0,1\%$) festzustellen. Zwischen 9,9 m/s und 10 m/s steigt der Fehler jedoch stark an.

Sprungtrennverfahren für Kreiskonturen

Das Sprungtrennverfahren für gerade Linien ist für geschlossene Kreiskonturen ähnlich. Der Hauptunterschied ist, dass am Ende eines Kreisumlaufes kein weiterer Sprung zum Anfang der nächsten Linie erforderlich ist. Ein weiterer und wichtiger Unterschied ist, dass der maximale Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen (Δs) ungefähr dem Scankreisdurchmesser d_{scan} ist (Bild 87).

Bild 87:
Schematische
Darstellung des
Sprungtrenn-
verfahrens bei
Kreisen



Der formelmäßige Ablauf ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

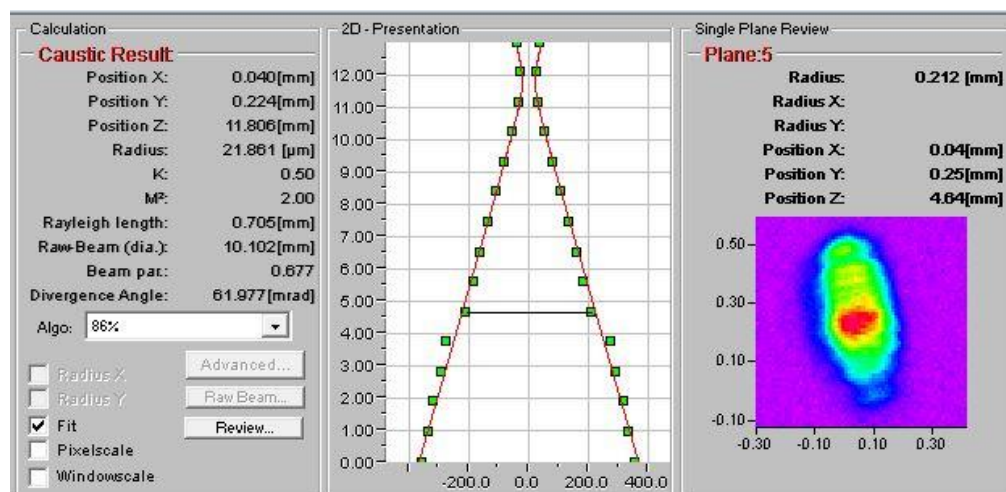
Tabelle 32:
Relevante Parameter
für das Sprungtrenn-
verfahren bei Kreisen

Pulsüberlappwinkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kreisumlaufstarts	$d\varphi = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{d_{foc} \cdot (1 - P\ddot{U})}{d_{scan}}\right)$
Minimale Gesamtanzahl erforderlicher Pulse	$N_{P,min} = \frac{360^\circ}{d\varphi}$
Anzahl Pulse pro Kreisumlauf	$N_{P/R} = \left\lceil \frac{f_{Laser}}{f_{sim}} \right\rceil$
Verteilwinkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen innerhalb eines Kreisumlaufes	$\Delta\varphi = \frac{360^\circ + d\varphi}{N_{P/R}}$
Anzahl Kreisumläufe	$N_R = \left\lceil \frac{\Delta\varphi}{d\varphi} \right\rceil$
Wahre Gesamtanzahl Pulse	$N_P = N_{P/R} \cdot N_R$
Wahrer Pulsüberlappwinkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kreisumläufen	$d\varphi_{real} = \frac{360^\circ}{N_P}$
Wahrer Verteilwinkel zwei aufeinanderfolgender Pulse innerhalb eines Kreisumlaufes	$\Delta\varphi_{real} = \frac{360^\circ + d\varphi_{real}}{N_{P/R}}$
Wahrer Pulsüberlapp	$P\ddot{U}_{real} = 1 - \frac{d_{scan} \cdot \pi}{d_{foc} \cdot (N_P - 1)}$
Linearer Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen innerhalb eines Kreisumlaufes	$\Delta s = d_{scan} \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$
Gesamtprozesszeit	$t_{proz,p\&s} = \frac{N_P}{f_{Laser}}$

Aufgrund des begrenzenden Scankreisdurchmesser und der dadurch bedingten Krümmung des Scanpfades ist die Einhaltung einer definierten WEZ im Vergleich zu geraden Linien nur mit kleineren Repetitionsraten der Laserstrahlquelle realisierbar. Dadurch wird die Gesamtprozesszeit pro Bohrung vergleichsweise größer.

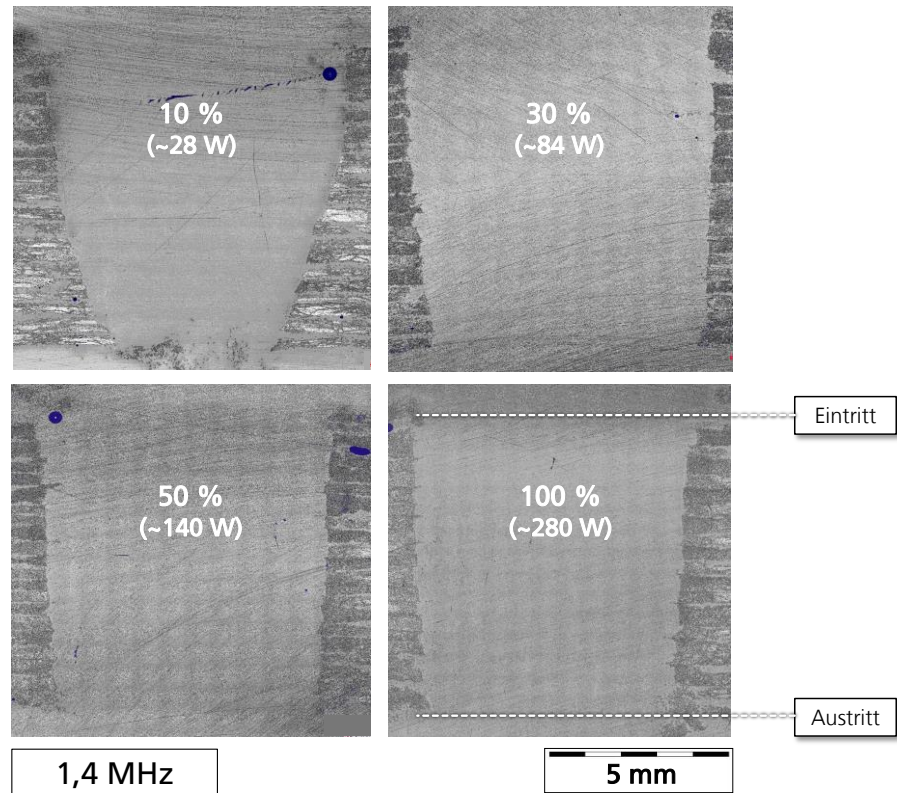
Kaustik der UKP-Laserstrahlquelle AMPHOS 400

Bild 88:
Kaustikmessung im
Bereich bis 10 mm
unter der
Fokusebene



Weitere Längsschliffe von UKP-gebohrten CFK-Preforms

Bild 89: Längsschliffe von vier Bohrungen, die mit einer Repetitionsrate von 1,4 MHz bei 10-100 % mittlerer Leistung (28-280 W) hergestellt werden



Ergebnisse zur Bestimmung der z-Zustellung

Tabelle 33:
Ergebnisse zur Bestimmung der z-Zustellung in Arbeitspaket 2, Berechnung mit Formel 5.22 und Formel 5.23

	Startparameter	1. Iteration	2. Iteration	3. Iteration
$t_{Whl.} [s]$	3,57			
$n_{Wdh.}$	42	30	28	27
$t_{Prozess} [s]$	~147	~103	~99	~96
$z_{Probe} [mm]$	~7			
$\Delta a_z [mm/Wdh.]$	0,167	0,233	0,25	0,259

Tabelle 34:
Ergebnisse zur Bestimmung der z-Zustellung in Arbeitspaket 2, Berechnung mit Formel 5.22 und Formel 5.23

	Startparameter	1. Iteration	2. Iteration
$t_{Wdh.} [s]$	24		
$n_{Wdh.}$	12	~8	6
$t_{Prozess} [s]$	~257	~173	~132
$z_{Probe} [mm]$	~7		
$\Delta a_z [mm/Wdh.]$	0,583	0,875	1,167