

Dissertation

Laserstrahlschneiden von Faser-Kunststoff-Verbunden

Der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Eingereicht von:

Dipl.-Ing. Andreas Fürst

Geboren am 30.07.1981 in Freital

Tag der Einreichung: 23.09.2016

Tag der Verteidigung: 11.04.2017

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer

Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

Prof. Dr.-Ing. Andrés Lasagni

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Ich habe nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die in Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Die Promotionsordnung wird anerkannt.

Dresden, den 23. 09. 2016

Andreas Fürst

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU-Dresden am Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer. Die damit einhergehende wissenschaftliche Arbeit fand am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in dem Geschäftsfeld Laserabtragen- und Trennen statt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit, Betreuung und die großzügige Unterstützung, gerade während der Beendigung der Arbeit.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Niels Modler für die Übernahme des Zweitgutachtens. An dieser Stelle ist auch den Mitgliedern des Sonderforschungsbereichs 639 der TU-Dresden zu danken. Hier hatte ich die Möglichkeit im integrierten Graduiertenkolleg meine Arbeit vorzustellen. Die damit einhergehenden zahlreichen Diskussionen waren Anregungen für den weiteren Verlauf der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Andrés Lasagni danke ich für die Anfertigung des Drittgutachtens.

Ganz besonderen Dank möchte ich Herrn Dr. Stefan Schädlich für die Betreuung und Motivation innerhalb der Finalisierung der Arbeit aussprechen. Meinem Geschäftsfeldleiter Dr.-Ing. Andreas Wetzig und meinem Abteilungsleiter und Dr.-Ing. Jan Hauptmann danke ich für die Anregungen und Diskussionen im Verlauf der Arbeit.

Für die wichtige fachliche Unterstützung danke ich ganz besonders Herrn Frank Kretschmar, Herrn Dominik Hipp, Herrn Michael Rose, Herrn Michael Leminski, Herrn Karsten Zenger, Herrn Thomas Wanski, Herrn Dr. Achim Mahrle und Frau Annett Klotzbach. Die Unterstützung war beispiellos.

Meinen Kollegen aus dem Geschäftsfeld Laserabtragen - und Trennen Herrn Dr. Patrick Herwig, Frau Ulrike Fiebig, Herrn Peter Rauscher, Herrn Marius Boden, Herrn Peer Pfohl, Herrn Daniel Mai, Herrn Thomas Pinder und Herrn Dr. Thomas Schwarz danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ohne die zahlreichen Schliffbilder von Frau Andrea Ostwaldt und ihrem Team, sowie die spektroskopischen Untersuchungen von Frau Beate Leupolt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ich danke weiterhin meinen fleißigen Erstkorrekturlesern Joachim Fürst und Katharina Schürer.

Die Arbeit über einen so langen Zeitraum ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Stimmungsschwankungen. Diese zu ertragen hatte hauptsächlich meine Frau, die mir gleichzeitig entsprechende Freiräume schaffte um die Arbeit fertig zu stellen. Meine Eltern haben mir das Studium ermöglicht und damit die Grundlage für diese Arbeit geschafft. Alle trugen damit zum Gelingen dieser Arbeit bei und deshalb möchte ich mich sehr herzlich dafür bedanken.

Inhaltverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN	4
2.1	Laserstrahlquellen für die Bearbeitung von FKV	4
2.2	Beschreibung des Absorptionsverhaltens von FKV	5
2.3	Thermische Eigenschaften von FKV	7
3	STAND DER TECHNIK	11
3.1	Trennende Bearbeitung von FKV	11
3.1.1	Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide	11
3.1.2	Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide	12
3.1.3	Thermisches Abtragen	14
3.2	Der Laserstrahl als trennendes Werkzeug zur Bearbeitung von FKV	14
3.2.1	Der Einsatz von kontinuierlich betriebenen Strahlquellen zum gasunterstützten Brenn- und Schmelzschneiden	15
3.2.2	Verfahrensvarianten des Remote-Laserstrahlschneidens mit kontinuierlich betriebenen Strahlquellen	19
3.2.3	Remote-Laserstrahlschneiden mit gepulsten Strahlquellen	22
3.2.4	Einordnung der Laserbearbeitungsstrategien	24
3.3	Zusammenfassung des Standes der Technik	26
4	GRUNDLAGEN ZUR STRAHL-STOFF-WECHSELWIRKUNG	27
4.1	Verwendete Werkstoffe	27
4.2	Einsatz spektroskopischer Messverfahren	28
4.3	Einsatz von Messlasern	30
4.4	Darstellung der Ergebnisse	31
5	MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG	35
6	SYSTEMTECHNIK ZUR STRAHLKOMBINATION UND -MANIPULATION	36
6.1	Art der Überlagerung von Laserstrahlung aus zwei Strahlquellen	36
6.2	Gesamtaufbau	39
6.3	Simulation des Strahlverlaufes innerhalb des Kombinationsmoduls	42
6.4	Charakterisierung der Systemtechnik	44

7 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM ABTRAGSVERHALTEN VON FKV	47
7.1 Versuchsaufbau	47
7.2 Versuchsdurchführung und Werkstoffe	48
7.2.1 Werkstoffe	51
7.2.2 Bestimmung der Kenngrößen	52
7.3 Ergebnisse	53
7.3.1 CFEP	53
7.3.2 GFPP-S	56
7.3.3 GFPP-W	58
8 VERIFIZIERUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	61
8.1 Methoden zur Darstellung	61
8.2 Verifizierung und Diskussion CFEP	65
8.3 Verifizierung und Diskussion GFPP-S	70
8.4 Verifizierung und Diskussion GFPP-W	75
9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	80
10 ABKÜRZUNGS UND FORMELVERZEICHNIS	86
11 LITERATURVERZEICHNIS	91
12 ANHANG	1

1 Einleitung

Die Etablierung von Fertigungs- und Verarbeitungsprozessen für Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) begleitet nach SCHÜRMAN, 2007, deren Entwicklung seit ihrer Einführung in den 1950er Jahren. Lagen die Anwendungsgebiete lange Zeit in der Luft- und Raumfahrt, wandelt sich der Markt nach HEUSS u. a., 2012, und LÄSSIG u. a., 2012, für Bauteile aus hochfesten Faser-Kunststoff-Verbunden hin zum Automobilbau und allgemeinen Maschinenbau. Generell wird aber auch im Bereich Luftfahrt in den kommenden Jahren von einem steigenden Anteil derartiger Hochleistungswerkstoffe ausgegangen, HEUSS u. a., 2012. Im Fokus liegen hier endlosfaserverstärkte Bauteile mit duro- oder thermoplastischen Matrixsystemen. Als Verstärkungsfasern kommen nach LÄSSIG u. a., 2012, hauptsächlich Glas- und Kohlenstofffasern zum Einsatz. Die Vorteile, die sich daraus ergeben, sind die hohen spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten sowie die Anpassung der Faserorientierung an die Lastflüsse in Strukturbauteilen. Darüber hinaus sind nach LÄSSIG u. a., 2012, und SCHÜRMAN, 2007, die Korrosionsbeständigkeit und der geringe thermische Ausdehnungskoeffizient der Werkstoffe unter wechselnden klimatischen Bedingungen ein nicht zu unterschätzendes Auswahlkriterium.

Für Glasfaser-Kunststoff-Verbunde ist ein überdurchschnittliches Wachstum von Bauteilen, basierend auf thermoplastischen Matrixsystemen festzustellen. Gegenüber klassischen duroplastischen Matrixsystemen sind nach WITTEN & KÜHNEL, 2014, hauptsächlich die kurzen Taktzeiten und die günstigen Werkstoffe ein Grund, diese Prozesse beispielsweise in der Automobilindustrie zu verwenden. Beispielhaft dafür steht die Entwicklung und Umsetzung von funktionsintegrativen Strukturbauteilen auf der Basis von Hybridgarn-Textil-Thermoplastwerkstoffen (HGTT). Bauteile basierend auf diesen Werkstoffen können nach HUFENBACH & ADAM, 2010, zu einer Gewichtsreduktion von 45 % gegenüber einem vergleichbaren Bauteil in Stahlbauweise führen. Darüber hinaus berichten HUFENBACH & ADAM, 2010 von einer Minimierung der Prozessschritte innerhalb der Fertigung. Die Gewichtsreduktion gegenüber einem Aluminiumbauteil wird von JÄSCHKE & WACKER, 2010, mit 20 % angeführt. Zusätzlich hat die Verwendung vorimprägnierter textiler Halbzeuge und die durch die thermoplastische Matrix gegebenen Verarbeitung in weiterentwickelten Spritzgussanlagen zu einem hohen Automatisierungsgrad für komplex geformte Bauteile geführt. Nach THURMEIER u. a., 2014, und STOCK & EGGER, 2011, werden nicht mehr nur vergleichsweise einfache schwerpunktfertige Verkleidungsteile gefertigt. Vielmehr stehen vollautomatisierte Fertigungslinien für funktionsintegrative, glasbasierte Strukturbauteile in der Entwicklung oder sind bereits umgesetzt.

Ein weiteres Leichtbaupotenzial ist durch die Verwendung von Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden gegeben. Um die hohen Steifigkeiten und Festigkeiten, die Kohlenstofffasern bieten, auszunutzen werden in der Regel duroplastische Matrixsysteme genutzt, SCHÜRMAN, 2007. Dabei erfolgt, nach GEIGER & WALTER, 2012, und LÄSSIG u. a., 2012, der Konsolidierungsprozess komplex geformter Bauteile in der Regel im Harzinfusionsverfahren. V. WEIZSÄCKER & BONTEN, 2014, sowie STEYER, 2013, legen dar, dass auch hier thermoplastische Matrixsysteme derzeit im Fokus der Forschung und Industrialisierung stehen. Auch hier gilt es, die hohen Anforderungen an die benötigte Taktzeit im Automobilbau zu erreichen oder großflächige komplex geformte Schalenbauteile zu erzeugen. Den Vorteilen, die Faser-Kunststoff-Verbunde liefern, stehen aber auch Nachteile gegenüber, die eine breite Akzep-

2 Einleitung

tanz derartiger Hochleistungswerkstoffe derzeit noch verhindert. Hier sind hauptsächlich die hohen Bauteilkosten zu nennen, die Faser-Kunststoff-Verbunde nach sich führen können. Gerade bei der Verwendung von Kohlenstofffasern halten die Bauteilkosten einem Vergleich zu einem Bauteil in Stahl- oder Aluminiumbauweise nicht stand. Bei einer Verringerung des Bauteilgewichts auf 25 %, infolge einer Bauweise in Faser-Kunststoff-Verbund mit Kohlenstofffaser ist nach LÄSSIG u. a., 2012, mit einer Steigerung der Bauteilkosten gegenüber einem vergleichbaren Stahlbauteil um das sieben- bis neunfache zu rechnen. HEUSS u. a., 2012, gehen sogar bei einer Gewichtsreduktion von lediglich 50 %, von einer Kostensteigerung um das fünffache, gegenüber Stahl aus. Derzeitige Bauteilkosten ergeben sich für kohlenstofffaserbasierte Werkstoffe nach LÄSSIG u. a., 2012, jeweils zu 50 % aus Material- und Prozesskosten. Sowohl HEUSS u. a., 2012, und LÄSSIG u. a., 2012, führen aber an, dass sich die Reduktion der Bauteilkosten zu einem großen Teil durch Prozessverbesserungen sowie durch die Entwicklung günstigerer Rohstoffe ergibt. Beide sehen in der Weiterentwicklung und in der Entwicklung neuartiger Prozesse das größte Einsparpotenzial bei Bauteilen. LÄSSIG u. a., 2012, sehen ein werkstoffübergreifendes Einsparpotenzial von 40 % bis zum Jahr 2020. HEUSS u. a., 2012, dagegen 45 - 67 % bis zum Jahr 2030 bei kohlenstofffaserbasierten Werkstoffen. Hinsichtlich der Bauteilkosten zeigt daher die Verwendung von glasfaserbasierten Hybridgarntextil- Thermoplasten einen entscheidenden Vorteil, wenn die geringen Steifigkeiten und Festigkeiten tolerierbar sind.

Um effiziente und automatisierte Prozesse zur Herstellung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden aufzubauen sind nach LÄSSIG u. a., 2012, eine Vielzahl an interdisziplinären Technologien aus dem Maschinen- und Anlagenbau notwendig. Hier kann das Laserstrahlschneiden aufgrund seiner überragenden Modulationsmöglichkeiten ein Prozess sein, dernach POPRAWE, 2005, an vielen Stellen als Bearbeitungsverfahren einzusetzen ist. Laserstrahlschneiden ist ein berührungsloses und damit kraftfreies sowie verschleißfreies Bearbeitungsverfahren. Aus der metallverarbeitenden Industrie ist es heute nicht mehr weg zu denken. Nach BEYER & WISSENBACH, 1998, sowie HÜGEL & GRAF, 2009, ist die Laserstrahlung ein thermisches Werkzeug, mit dem ganz gezielt eine bestimmte Prozesstemperatur eingestellt werden kann. Diese Eigenschaft ist letztlich auch für die Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden anwendbar und von KLEIN, 1990, und LIEBELT, 1998, durch Grundlagenarbeiten nachgewiesen. Allerdings stellen beide in ihren Arbeiten fest, dass die aus dem allgemeinen Maschinenbau und der Automobiltechnik gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des Laserstrahlschneidens von Metallen nicht ohne Einschränkung auf die Bearbeitung von Polymerwerkstoffen und Faser-Kunststoff-Verbunden übertragbar sind. Gerade das konventionelle, gasunterstützte Laserstrahlschneiden, das eine schmelzflüssige Phase des Werkstoffes erfordert, ist nur eingeschränkt auf Faser-Kunststoff-Verbunde anwendbar. Nach LIEBELT, 1998, sind nur dann hohe Prozessgeschwindigkeiten erreichbar, wenn die Einzelwerkstoffe des Verbundes ähnliche thermische und optische Eigenschaften aufweisen. Das ist bisher nur bei Aramidfaser-Kunststoff-Verbunden gegeben, die allerdings nach GEIGER & WALTER, 2012, keine breite Verwendung finden. Ein Ansatz zur Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden und deren Einzelbestandteile ist die Minimierung der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahlung und Werkstoff, was über hohe Vorschubgeschwindigkeiten erreicht werden kann. Typische gasunterstützte Laserstrahlschneidanlagen sind aber hinsichtlich ihrer Kinematik begrenzt, da große Massen bewegt werden müssen und die Schneiddüse nur knapp über der Werkstoffoberfläche geführt wird. Im Bereich Metallschneiden hat LÜTKE, 2011, das Remote-Laserstrahlschneiden

entwickelt. Unter Verwendung hochbrillanter Festkörperlaserstrahlquellen im Dauerstrichbetrieb und einer Strahlableitung durch hochdynamisch verkippbare Spiegel können diese Nachteile minimiert werden. Die Arbeiten von BLUEMEL u. a., 2014; FUCHS u. a., 2013; KLOTZBACH u. a., 2011a; SCHNEIDER u. a., 2013, und STOCK u. a., 2012, zeigen, dass vergleichbare Systemtechnik in der Lage ist Faser-Kunststoff-Verbunde zu trennen. Im Vordergrund steht hier die Nutzung hoher Intensitäten, die durch brillante Strahlquellen zur Verfügung gestellt werden können und daher geeignet sind, die hohen Verdampfungstemperaturen der Verstärkungsfaseranteile zu erreichen. Dennoch sind brillante Festkörperlaser nicht geeignet, um das gesamte Spektrum, welches Faser-Kunststoff-Verbunde bieten zu bearbeiten.

Sofern Glasfaser-Kunststoff-Verbunde getrennt werden sollen, verringern sich nach KLOTZBACH u. a., 2012, die Schnittgeschwindigkeiten trotz der hohen Intensitäten, die Festkörperlaserstrahlung ermöglicht erheblich. Neben der Verkürzung der Wechselwirkungszeiten hat der Anteil an absorbierter Laserstrahlung im Werkstoff einen maßgeblichen Anteil an der Schnittbildung. Für Polymerwerkstoffe haben sich Schneidanlagen mit CO₂-Laserstrahlquellen etabliert, da die Strahlung nach KLEIN, 1990, schon in Folien von einer Materialdicke von 100 µm vollständig absorbiert ist. Für Festkörperlaserstrahlung stellt KLEIN, 1990, einen absorbierten Anteil der einfallenden Laserstrahlung von weniger als 20 % fest. Liegt eine Verstärkung mit Glasfasern vor, erhöht sich der absorbierte Anteil lediglich um ca. 20 %. Sofern Kohlenstofffasern als Verstärkungsfasern in einem polymeren Matrixsystem zum Einsatz kommen erhöht sich der absorbierte Anteil der einfallenden Laserstrahlung nach FREITAG, 2013, auf Werte oberhalb 90 %. Hier stellt sich eine Diskrepanz zwischen benötigter hoher Intensität, um den Verstärkungsfaseranteil zu trennen, und dem absorbierten Anteil der einwirkenden Laserstrahlung ein.

Die vorliegende Arbeit will einen Beitrag zum Trennen von Faser-Kunststoff-Verbunden mit dem Laserstrahl leisten, daher wird ein Ansatz gewählt, der das Werkzeug Laserstrahl an die Anforderungen des Werkstoffes anpasst. Neben Grundlagenuntersuchungen zur Laserstrahl-Werkstoffwechselwirkung wird eine Systemtechnik dargestellt, die das übliche Parameterfenster des Laserstrahlschneidens derart erweitert, dass sowohl die gute Fokussierbarkeit von brillanter Festkörperlaserstrahlung als auch das gute Absorptionsverhalten der Werkstoffe bei Bestrahlung mit CO₂-Laserstrahlung ausgenutzt werden. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ist der spätere Nutzer in die Lage versetzt den Laserschneidprozess auf die Anforderungen zum Trennen von Faser-Kunststoff-Verbunden auszulegen. Zielstellung ist dabei eine maximale Trenngeschwindigkeit bei geringer thermischer Last im Werkstoff.

2 Grundlagen

Ein Faser-Kunststoff-Verbund ist nach SCHÜRMAN, 2007, eine Konstruktion aus zwei Bestandteilen, den Verstärkungsfasern und dem Matrixwerkstoff. Die Kombination beider Werkstoffe führt zu Eigenschaften die der jeweilige Einzelwerkstoff nicht hat. Der Verstärkungsfaseranteil übernimmt dabei die anliegenden mechanische Beanspruchung. Der Matrixwerkstoff fixiert den Verstärkungsfaseranteil in seiner Position und überträgt die Last von der Lasteinleitung auf den Faseranteil.

2.1 Laserstrahlquellen für die Bearbeitung von FKV

Das Wort „Laser“ ist eine Abkürzung für „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“ und weist sowohl auf die Funktionsweise als auch auf die Bezeichnung der Vorrichtung hin die Laserstrahlung erzeugt. Der physikalische Prozess ist in A 3 erläutert. Aus der trennenden Bearbeitung von Kunststoffen sind CO₂-Laser bekannt. Während bei der Bearbeitung von reinen Kunststoffen Laserstrahlquellen mit geringen Leistungen zum Einsatz kommen sind laut CENNA & MATHEW, 2002; CHOUDHURY & CHUAN, 2013, und PAN & HOCHENG, 1998, für die Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden, aufgrund der hohen Zersetzungstemperaturen des Verstärkungsfaseranteiles weitaus höhere Leistungen im Multikilowattbereich notwendig. Weitere Laserstrahlquellen für die trennende Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden sind kontinuierlich betriebene Festkörperlaser mit Wellenlängen im Bereich von $\lambda = 1,03 - 1,07 \mu\text{m}$, mit mittleren Leistungen im Multikilowattbereich, wie sie in den Untersuchungen von FUCHS u. a., 2013; KLOTZBACH, 2011, und STOCK u. a., 2012, 2014, Verwendung finden. Entsprechend den Bauformen der jeweiligen Festkörperlaser erfolgt die Bearbeitung nach HERZOG u. a., 2008; JAESCHKE u. a., 2011, und JUNG, 2012, mit Scheibenlasern mit der Wellenlänge $\lambda = 1,03 \mu\text{m}$, sowie mit Faserlasern der Wellenlänge $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$, siehe FUCHS u. a., 2013; FÜRST u. a., 2014; KLOTZBACH u. a., 2011a, und STOCK u. a., 2012. Innerhalb der Bearbeitung von Kunststoffen und Faser-Kunststoff-Verbunden finden nach MAMUSCHKIN u. a., 2013, und STEYER, 2013, Dioden-Laser hauptsächlich in Fügeprozessen Einsatz .

Aus der Literatur konnte die Eignung gepulster Laserstrahlquellen für die Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden nachgewiesen werden. Neben der Wellenlänge ist die Pulslänge ein weiteres Unterscheidungskriterium. Als Nanosekundenlaser werden nach POPRAWE, 2005, Laserstrahlquellen bezeichnet, die gepulste Strahlung mit einer Dauer zwischen 10 - 500 ns bei Repititionsraten bis zu $f_{\text{Rep}} = 100 \text{ kHz}$ emittieren. Im Bereich von Pulslängen im ns- Bereich werden von BLUEMEL u. a., 2014, 2014; EMMELMANN u. a., 2011; LEONE u. a., 2014; SCHILLING u. a., 2013, und USHIDA, 2012, in der Regel Faserlaser mit den Wellenlängen von $\lambda = 532 \mu\text{m}$ und $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ eingesetzt. Eine weitere Verkürzung der Pulslängen ist durch Pikosekundenlaser erreichbar. Nach HÜGEL & GRAF, 2009, emittieren diese Laser Strahlung mit Pulslängen, die kürzer als 100 ps sind. Typische Wellenlängen sind $\lambda = 355 \text{ nm}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$ und $\lambda = 1064 \text{ nm}$ bei Pulslängen innerhalb $t_p = 7 - 9 \text{ ps}$, WOLYNSKI u. a., 2011.

2.2 Beschreibung des Absorptionsverhaltens von FKV

Ausschlaggebend für den Energieeintrag durch Laserstrahlung in den Werkstoff ist die Absorption von elektromagnetischen Wellen einer bestimmten Wellenlänge λ im Werkstoff. Der absorbierte Anteil der Strahlung wird derart in Wärme umgesetzt, dass ein Teil des Materials innerhalb der Wechselwirkungszone bis zur Zersetzung- und Verdampfungstemperatur erwärmt wird. Der dabei entstehende Dampfdruck trägt das Material aus der Schnittkerbe aus. Da nur der absorbierte Anteil zur Erwärmung führt, ist die Kenntnis von der Abhängigkeit der Wellenlänge der einfallenden Laserstrahlung und der Materialien von entscheidender Bedeutung. Im Gegensatz zu Metallen ist bei Polymerwerkstoffen die Transmission nicht nahezu null, und die optischen Eigenschaften sind von dem kettenförmigen Aufbau der Makromoleküle innerhalb der Polymerwerkstoffe abhängig, KLEIN, 1990.

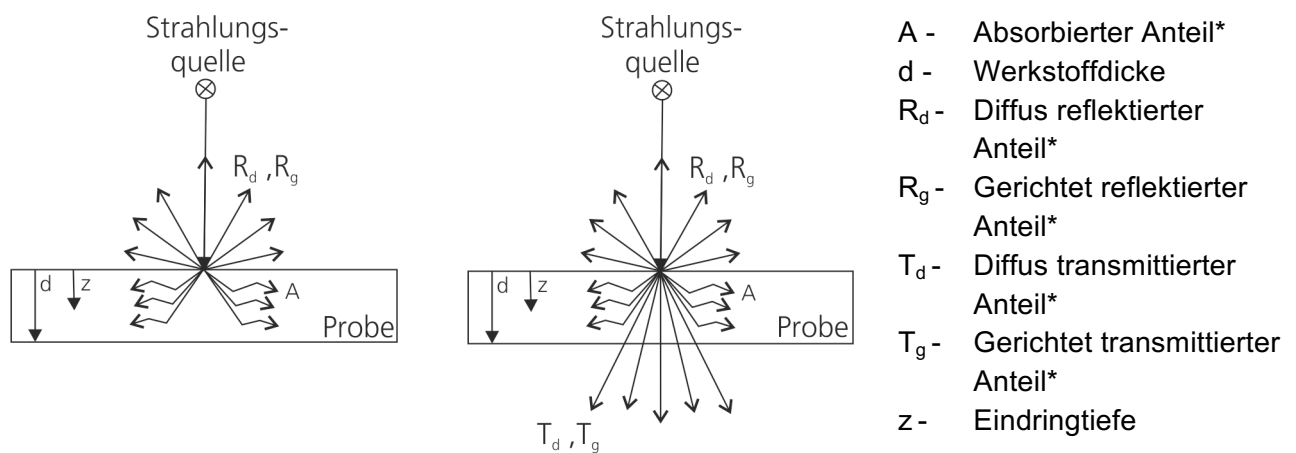


Abb. 1 Modellhafte Darstellung der Absorptionsverhalten von Metallen (links) und Kunststoffen (rechts) HÜGEL, 1992; MAMUSCHKIN u. a., 2013 (*der einfallenden Strahlung)

Ein Teil der auf den Werkstoff auftreffenden Laserstrahlung wird direkt an der Oberfläche diffus und gerichtet reflektiert, während der Rest nach dem Lambert-Beerschen Gesetz eindringt (Abb. 1), MAMUSCHKIN u. a., 2013 und RÖSNER u. a., 2009. Dabei gilt für die Intensität der einwirkenden Laserstrahlung in Abhängigkeit der Eindringtiefe, die kleiner als die Materialdicke ist:

$$I_z = I_0 e^{-C_{ex} \cdot z} \quad C_{ex} = C_{abs} + C_{sc} \quad (1)$$

für $0 < z < d$

C_{ex} ist der Extinktionskoeffizient, der aus dem Absorptionskoeffizienten C_{abs} und dem Streukoeffizienten C_{sc} besteht. Während C_{abs} den in Wärme umgesetzten Anteil der Strahlung beschreibt, umfasst C_{sc} den diffus und direkt reflektierten (R_d , R_g) sowie transmittierten (T_d , T_g) Anteil der nicht absorbierten Strahlung (Abb. 1). Das Maß für die absorbierte und innerhalb einer Zeiteinheit eingebrachte Energie ist der Absorptionsgrad A (Abb. 1). Dabei ergeben sich alle reflektierten, transmittierten und absorbierten Anteile zu 1.

$$1 = A + (R_d + R_g) + (T_d + T_g) \quad (2)$$

6 Grundlagen

Hier wird allerdings nicht die Änderung des Absorptionsgrades bei Temperaturerhöhung beachtet. Zum Verständnis des Absorptionsverhaltens ist zwischen polymerer Matrix und dem Verstärkungsfaseranteil zu unterscheiden. Polymerwerkstoffe sind durch eine statistische Anordnung ihrer Molekülketten gekennzeichnet. Deren Länge und Ausrichtung hat nach FRICK, 2007; KLEIN, 1990, und MAMUSCHKIN u. a., 2013, einen gesicherten Einfluss auf das Absorptionsverhalten der Werkstoffe. KLEIN, 1990, beschreibt, dass Streuung von Laserstrahlung mit der Wellenlänge von $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ an der Struktur der Molekülketten, an kristallinen Bereichen innerhalb amorpher Phasen und an Fremdkörpern, wie es der Verstärkungsfaseranteil darstellt, auftritt. Die Art der Streuung ist dabei von der Größe der streuenden Struktur abhängig. MAMUSCHKIN u. a., 2013, stützen die Aussage, dass die Streuung und damit letztlich die Größe des absorbierten Anteiles der Laserstrahlung mit der Länge der kristallinen Bereiche innerhalb der amorphen Phase der Polymerwerkstoffe gleichsinnig korreliert. Die Absorption von CO_2 -Laserstrahlung mit der Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ erfolgt in Polymerwerkstoffen infolge einer Wechselwirkung der Strahlung mit Makromolekülen durch Anregung von Dehnungs- oder Knickschwingungen einzelner Bausteine der Molekülkette, KLEIN, 1990. Betrachtet man das Absorptionsverhalten von FKV erweitern sich die hier aufgezeigten Modelle durch Streuungseffekte am Fasermaterial. Nach FREITAG, 2013, und FÜRST u. a., 2013, tritt hier sowohl diffuse und gerichtete Reflexion an der Werkstoffoberfläche, als auch an der Faseroberfläche auf. FREITAG, 2013 betrachtet die Reflexion an Kohlenstofffasern und stellt einen Zusammenhang zwischen Auftreffpunkt auf dem Umfang einer Faser und der damit einhergehenden Reflexion im weiteren Strahlverlauf dar. Dies wird als Mehrfachreflexion beschrieben

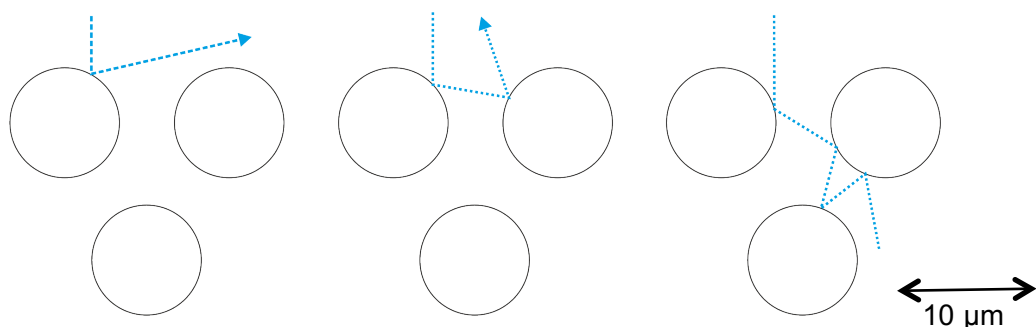


Abb. 2 Beispiele für Mehrfachreflexion an Faserbündeln je nach Auftreffpunkt der Strahls auf die Einzelfaser, FREITAG, 2013

Die für diese Arbeit verwendeten Laserstrahlquellen emittieren Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ und $10,6 \mu\text{m}$, die dem Nahinfrarotbereich (NIR) von $0,76 - 2,5 \mu\text{m}$ und dem Infrarotbereich (IR) von $0,8 \mu\text{m}$ und $1000 \mu\text{m}$ zugeordnet werden können (GÜNZLER & BÖCK, 1983; OSBORNE u. a., 1993). In der Literatur wird das Absorptionsverhalten von fasergefüllten Kunststoffen mit Faservolumengehalten über 50 % als oberflächennah beschrieben. BOLEY & RUBENCHIK, 2013, beschreiben in einem Modell, basierend auf Raytracing-Methoden, den Strahlverlauf in einem Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund. In Abb. 3 zeigen die horizontalen Linien den an der Epoxidharzoberfläche diffus reflektierten Anteil der Strahlung. Die Punktlinien zeigen den an den Kohlenstofffasern reflektierten Anteil der Strahlung. Darüber hinaus ist der in das Material eingedrungene Anteil zu erkennen. Die in Abb. 3 dargestellte Eindringtiefe z entspricht dem doppelten Radius einer Kohlenstofffaser, also ca. $14 \mu\text{m}$. Weitere

Literaturstellen, wie FÖRSTER, 2014, und WU u. a., 2012, stützen diese Darstellung einer oberflächennahen Absorption der Strahlung .

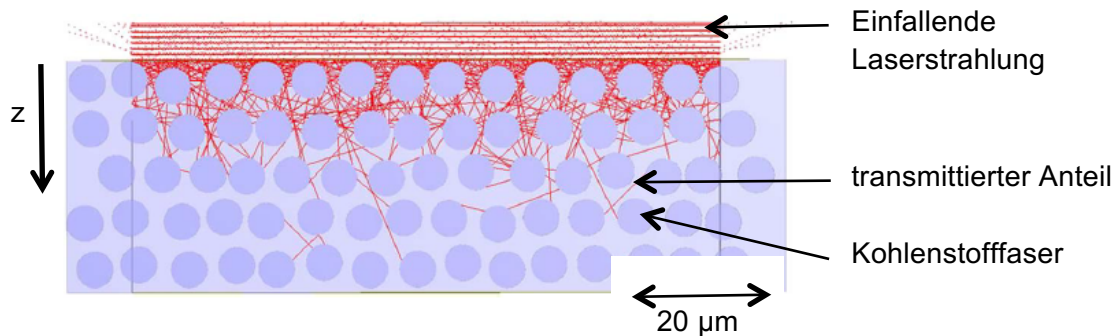


Abb. 3 Simulierter Strahlverlauf der einfallenden Strahlung mit einer Wellenlänge von 1,064 µm in CF-gefülltem Kunststoff, (BOLEY & RUBENCHIK, 2013)

Bei den für diese Arbeit verwendeten Laserstrahlquellen und Optiken kann davon ausgegangen werden, dass der Laserstrahl im Fokuspunkt immer größer ist als der Faserdurchmesser, weshalb eine Vielzahl an möglichen Reflexionen auftreten wird. Daher erscheint eine experimentelle und phänomenologische Betrachtung des Absorptionsverhaltens der vorliegenden Werkstoffe in Abhängigkeit der eingesetzten Verstärkungsfaser, Faservolumengehaltenes und des Matrixmaterials als sinnvoll. Eine theoretische Bestimmung der absorbierten Laserleistung aufgrund der zu erwartenden großen Abweichungen zu Realwerkstoffen ist nach FREITAG, 2013, und KLEIN, 1990, nicht zielführend.

2.3 Thermische Eigenschaften von FKV

Neben den optischen Eigenschaften sind die thermischen Eigenschaften der Werkstoffe, die getrennt werden sollen, nach CHOUDHURY & CHUAN, 2013; FUCHS u. a., 2013; LIEBELT, 1998, und STOCK u. a., 2012, ein entscheidendes Kriterium für die Ausbildung der Schnittkerbe, sowie der Schnittqualität. BLUEMEL u. a., 2014, beschreibt, dass die infolge der Laserbearbeitung und der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes entstehende wärmebeeinflusste Zone durch fehlende oder zerstörte Matrix - und Faseranteile sowie thermisch zersetzte Matrix infolge der Überschreitung der jeweiligen Zersetzungstemperaturen gekennzeichnet ist.

Abb. 4 zeigt beispielhaft die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone innerhalb eines Faser-Kunststoff-Verbundes mit Kohlenstofffaser und Glasfaseranteil sowie einer umgebenden Epoxydharzmatrix infolge der Laserbearbeitung, ROSE, 2013. Es sei darauf hingewiesen, dass die wärmebeeinflusste Zone zur besseren Anschaulichkeit, infolge nicht optimaler Laserschneidparameter übertrieben groß im Werkstoff ausgebildet ist.

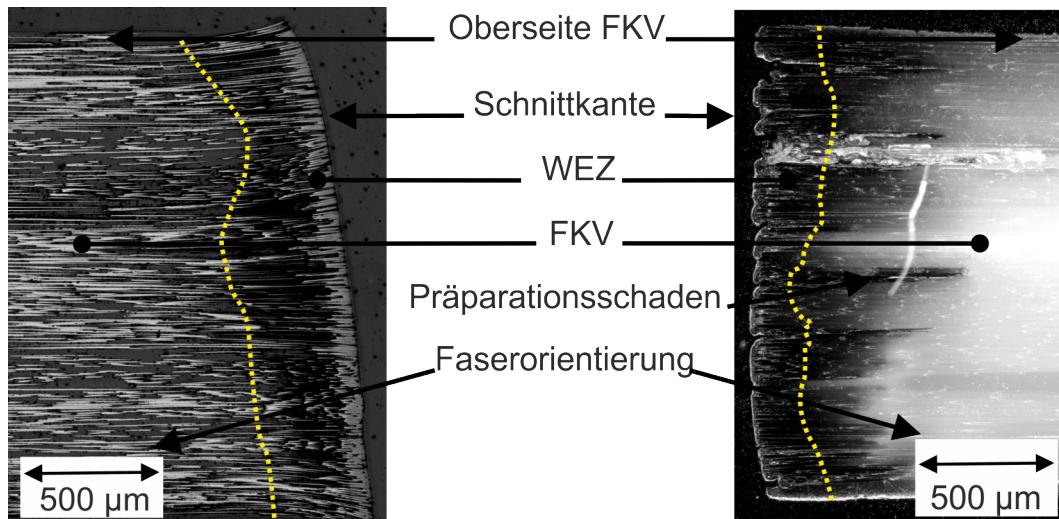


Abb. 4 Lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffes einer wärmebeeinflussten Zone infolge von Laserbearbeitung von links: CFEP, $\square = 60\%$ (CO_2 -Laser, $P_L = 3\text{ kW}$, $v_v = 0,5\text{ m/s}$) und rechts: GFEP, $\square = 54\%$, (Festkörperlaser, $P_L = 3\text{ kW}$, $v_v = 1\text{ m/s}$),

Aufgrund des anisotropen, also richtungsabhängigen Materialverhaltens von Faser-Kunststoff-Verbunden ist die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone abhängig vom Lagenaufbau des Werkstoffes. Richtungsabhängige Kennwerte sind dabei nach SCHÜRMAN, 2007, die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeausdehnungskoeffizient. Zusätzlich weisen Kohlenstofffasern aufgrund des hexagonalen Atomgitteraufbaus ein transversal isotropes Materialverhalten auf. Glasfasern dagegen besitzen aufgrund des amorphen Aufbaus ein isotropes Materialverhalten. Darüber hinaus zeigen die Einzelwerkstoffe der Faser-Kunststoff-Verbunde sehr unterschiedliche Schmelz (T_S)- und Verdampfungstemperaturen (T_V), die zu einem komplexen Schädigungsverhalten im Bereich der wärmebeeinflussten Zone führen können (Tabelle 15, A 1). Je nach Graphitisierungsgrad der Kohlenstofffasern zeichnen sich diese durch eine erhöhte Gitterorientierung aus. Dies führt unter anderem zu einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit der hochmoduligen Fasern in Faserlängsrichtung.

Einen Eindruck über die richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Faser-Kunststoff-Verbunde liefert Abb. 5. Für die entsprechenden Faservolumenanteile ergeben sich die dargestellten Wärmeleitfähigkeiten für Glasfaser-Polypropylenverbund (GFPP) und Kohlenstofffaser-Epoxydharzverbunde (CFEP) mit hohem Graphitisierungsgrad (HM) und niedrigem Graphitisierungsgrad (HT). Die zugrundeliegende Berechnung ist in Anhang A 2 ersichtlich. Darüber hinaus sind die bei Raumtemperatur ermittelten Wärmeleitfähigkeiten der Werkstoffe in Faserlängsrichtung eingetragen (Tabelle 15). Die Dimensionen entsprechen den berechneten Werten und sind daher als belastbar anzusehen.

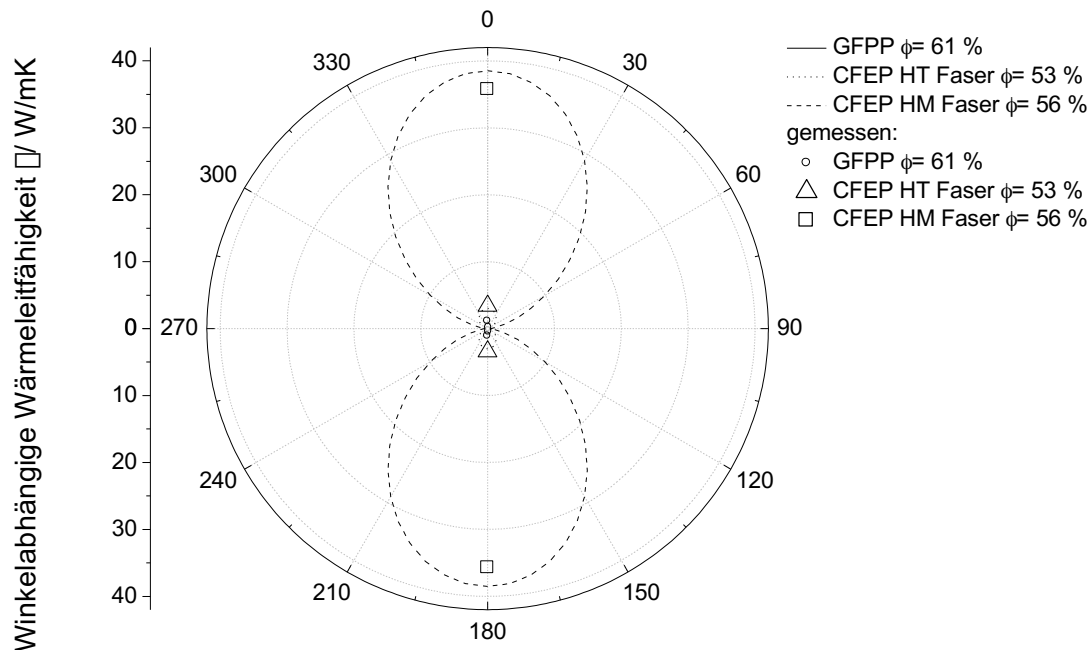


Abb. 5 Winkelabhängige Wärmeleitfähigkeit innerhalb einer Einzelschicht bei ansteigendem Winkel α in einem Mehrschichtkoordinatensystem (GFPP, CFEP-HT, CFEP-HM, $\phi = 60\%$)

Anhand dieser Darstellung ist nachvollziehbar, dass die Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe ein entscheidendes Kriterium zur räumlichen Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone ist. Dazu konnten beispielsweise PAN & HOCHENG, 1996 und RIVEIRO u. a., 2012 zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Verstärkungsfasern unter anderem die Größe des Ausbreitungsbereiches thermisch zersetzter Matrix bestimmt. Weitere Arbeiten dazu wurden von KLOTZBACH u. a., 2011b, durchgeführt.

Unter der Annahme, dass das Faserende während der Wechselwirkungszeit mit der Laserstrahlung Verdampfungstemperatur aufweist, kann eine Abschätzung über die Temperaturbereiche getroffen werden (Abb. 6, links). Dabei geben die Temperaturen T_V die Verdampfungstemperatur und T_Z die Zersetzungstemperatur einer umgebenden Epoxydharzmatrix an. Abb. 6, rechts, zeigt die charakteristische wärmebeeinflusste Zone in einem unidirektional verstärkten CFEP infolge der Laserbearbeitung. Auffällig sind hier unterschiedlich hell verfärbte Bereiche, ausgehend von der Schnittkante, die auf eine Veränderung der Materialien hindeuten. Vergleicht man die Ausbreitung der verfärbten Bereiche mit den durch KLOTZBACH u. a., 2011b, ermittelten Temperaturprofilen einer Kohlenstofffaser beim Laserstrahlschneiden, kann eine Abschätzung über die Temperaturbereiche getroffen werden. Es gilt weiterhin die Annahme, dass nur Wärmeleitung längs zur Faserorientierung stattfindet und die Anzahl der Überfahrten des Laserstrahles über die selbe Stelle die räumliche Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone nicht beeinflusst.

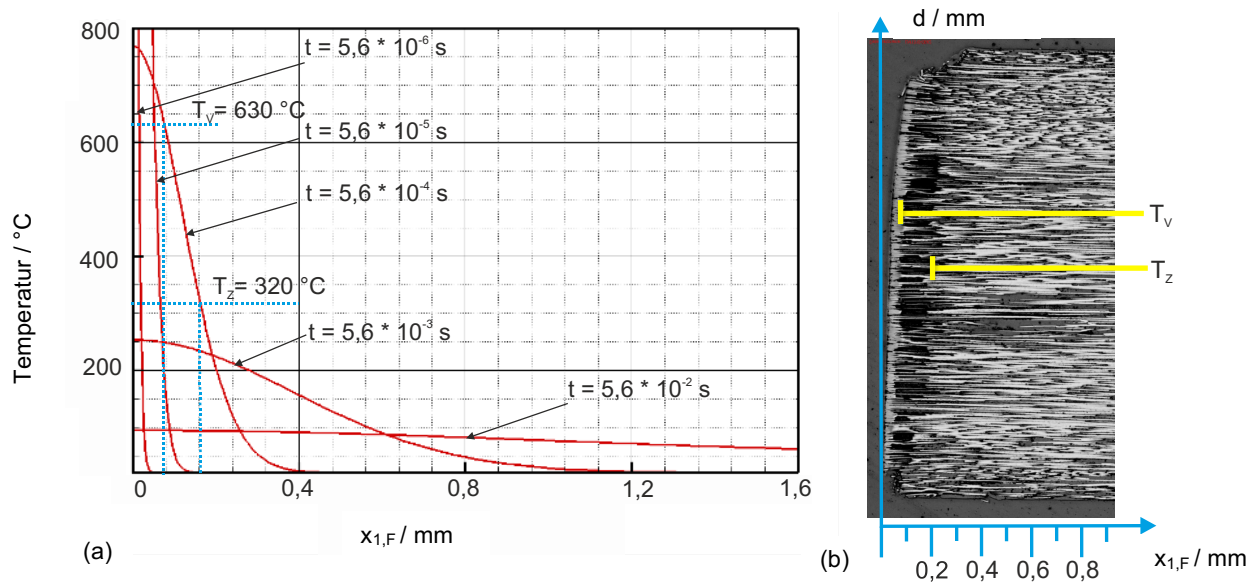


Abb. 6 Temperaturprofil einer laserbearbeiteten Kohlenstofffaser (a) (KLOTZBACH u. a., 2011b), Ausbreitung einer charakteristischen wärmebeeinflussten Zone (b), (CFEP, Festkörperlaser, $P_L = 3$ kW, $v_v = 1$ m/s, $n = 10$)

Demnach ist bei einer Überfahrt des Laserspots, der einen angenommenen Durchmesser von $d_f = 50$ μm hat über eine Faser mit einem Durchmesser von $d_{\text{Faser}} = 6$ μm und einer Spotvorschubgeschwindigkeit $v_v = 1$ m/s, von einer Wechselwirkungszeit $T_W = 5,6 \cdot 10^{-5}$ s auszugehen. Nach KLOTZBACH u. a., 2011, ist nach einer Zeit von $t = 5,6 \cdot 10^{-4}$ s die Verdampfungstemperatur T_V von Epoxydharz in einem Abstand von $x_{1,F} = 0,1$ mm und die Zersetzungstemperatur T_Z in einem Abstand von $x_{1,F} = 0,2$ mm erreicht. Die Darstellung zeigt näherungsweise die Temperaturenbreitung in einer Kohlenstofffaser und dient zur Abschätzung der zu erwartenden Größe der Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone in dem Werkstoff. Allerdings erfolgt keine Berücksichtigung der Kaustik des Laserstrahles oder des Absorptionsverhaltens der Werkstoffe bei unterschiedlichen Wellenlängen. Bei der Bearbeitung von FKV mit Glasfaseranteil ist davon auszugehen, dass die wärmebeeinflusste Zone nur geringfügig von der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes beeinflusst wird.

3 Stand der Technik

3.1 Trennende Bearbeitung von FKV

Die Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden unterscheidet sich stark von der Bearbeitung von Metallen. Wie in dem Grundlagenkapitel dargestellt ist das Werkstoffverhalten von dem eingesetztem Verstärkungs- und Matrixmaterial abhängig. Während das Verstärkungsmaterial eine hohe Festigkeit und sprödes Materialverhalten aufweist, kann das Matrixmaterial als duktil und von geringerer Festigkeit angesehen werden, FLEMMING u. a., 1995. Entsprechend ist ein trennendes Bearbeitungsverfahren an den jeweiligen Anwendungsfall und an den Zeitpunkt der Bearbeitung innerhalb des Herstellungsprozesses anzupassen. Industriell angewendete Verfahren zur trennenden Bearbeitung von FKV sind nach DIN 8580: 2003-09 in Trennen mittels geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide zu unterteilen. Je nach Art der Verstärkungsfaser und der Matrix können die in Tabelle 1 dargestellten Verfahren auf die Werkstoffe angewendet werden. Grundsätzlich sind alle Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide für eine 3D-Bearbeitung geeignet.

Tabelle 1 Industriell angewendete Bearbeitungsverfahren und deren Einsatzgebiete, (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT DFG, 2011; HOCHENG, 2012; SHEIKH-AHMAD, 2009; DIN 8580: 2003-09; CHERIF, 2011)

	geometrisch bestimmte Schneide					geometrisch unbestimmte Schneide	thermisches Abtragen		
	Fräsen	Bohren	Sägen	Drehen	Ultraschall	Wasserstrahl	Laserstrahl	Plasmastrahl	Erodieren
Textil					x		x	x	
Prepreg					x		x	x	
Preform					x	x	x	x	
Halbzeug	x	x	x	x	x	x	x		x
Bauteil	x	x	x	x	x	x	x		x

3.1.1 Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide

Zu den Strahlverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, die für die Bearbeitung von konsolidiertem Faser-Kunststoff-Verbunden Verwendung finden, gehört das Wasserstrahlschneiden. KÖNIG u. a., 1984; SHANMUGAM u. a., 2008, und WEBERPALS, 2014, führen an, dass die Vorschubgeschwindigkeiten, Schnittqualität und Dicke der zu trennenden Werkstoffe materialspezifisch sind. Zur Bearbeitung wirkt eine punktförmige Belastung auf den Werkstoff ein. Durch den fokussierten Wasserstrahl wird ein pulverförmiges Abrasivmittel transportiert. Die wirkende Bearbeitungskraft wird durch dieses Abrasivmittel auf den Werkstoff übertragen und ergibt sich aus dem anliegenden Wasserdruck und dem Grad der Fokussierung, SHANMUGAM u. a., 2008. Darüber hinaus führen die während der Bearbeitung entstehenden Strahlurbulenzen nach KÖNIG u. a., 1984, zu der Gefahr der Delamination der ein-

zelenen Lagen des Werkstoffes schon bei sehr geringen Vorschubgeschwindigkeiten. Die resultierenden Schnittkanten weisen keinen senkrechten Verlauf auf. Nach SHANMUGAM u. a., 2008, und WANG, 1999, ist entsprechend der Strahlkaustik von unterschiedlichen Eintritts- und Austrittsbreiten der entstehenden Schnittkerbe auszugehen. Der Kerbwinkel ist dabei von den Strahlparametern Wasserdruck, Düsendurchmesser und Anteil des Abrasivmittels abhängig. Die Vorschubgeschwindigkeit der Strahldüse spielt laut WANG, 1999, dabei eine untergeordnete Rolle. Einschränkungen ergeben sich darüber hinaus durch den Verschleiß des Abrasivmittels und des Düsenwerkstoffes. Mit zunehmender Härte der Verstärkungsmaterialien ist hier von einer Verringerung der Standzeit auszugehen. Typische Düsenstandzeiten betragen nach KÖNIG u. a., 1984, ca. 200 h. Kritisch zu sehen ist die Wasseraufnahme der Werkstoffe an den Schnittkanten, die zusätzlich durch Einlagerung von Partikeln überlagert sein kann (Abb. 7).

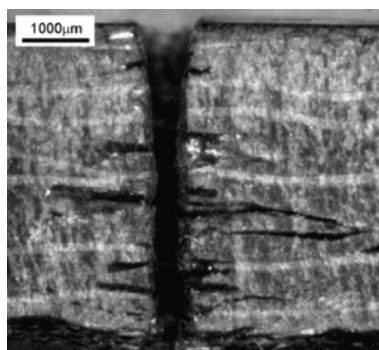


Abb. 7 Lichtmikroskopische Aufnahme eines wasserstrahlgeschnittenen Faser-Kunststoff-Verbundes, (SHANMUGAM u. a., 2008)

Die Wasseraufnahme erfolgt nach SCHÜRMAN, 2007, hauptsächlich durch Anlagerung von Wasser an den Molekülketten, in Zwischenräumen sowie, verstärkt durch Kapillarwirkung entlang der Fasern. Weitere Anforderungen ergeben sich an den Anschnitt. Wird er nicht von außen in den Werkstoff geführt, ist eine mechanisch ausgeführte Bohrung unabdingbar. Andernfalls entstehen laut SHANMUGAM u. a., 2008, und WEBERPALS, 2014, Delaminationen über die gesamte Dicke des Werkstoffes. Obgleich nach HASHISH, 1995, hohe Materialdicken bei vergleichsweise hohen Vorschubgeschwindigkeiten trennbar sind, ist die 3D-Bearbeitung von Bauteilen nur eingeschränkt möglich, da der Strahl auf der Austrittseite gefangen werden muss. Gleichzeitig unterliegt das Abrasivmittel einem Verschleiß. Darüber hinaus sind Delaminationen als kritisch zu bewerten, da sowohl Wasser als auch Abrasivmittel in die entstehenden Spalte eindringen kann, siehe WEBERPALS, 2014, und Abb. 7.

3.1.2 Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide

Die Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide ist ein spanbildendes Verfahren. Darunter zählen Fräsen, Sägen, Bohren und Drehen, wobei Fräsen die übliche Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden darstellt. Hier sind sowohl Bohrungen als auch Umriss- und Konturbearbeitung möglich. Typische Fräsköpfe sind einfach zu automatisieren und in mehrachsigen Portalanlagen auch robotergeführt einsetzbar, SHEIKH-AHMAD, 2009. Vergleichbar zu Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide ergibt sich die Schneidkerbform durch das Werkzeug. Hier ist von einer senkrechten Schnittflanke auszugehen, weshalb Fräsen bevorzugt in der Endkonturbearbeitung zum Einsatz kommt. Der Wirkmechanismus beim

Fräsprozess ist laut HINTZE u. a., 2015, sowie HU & ZHANG, 2004, abhängig von der Faserorientierung (Abb. 8).

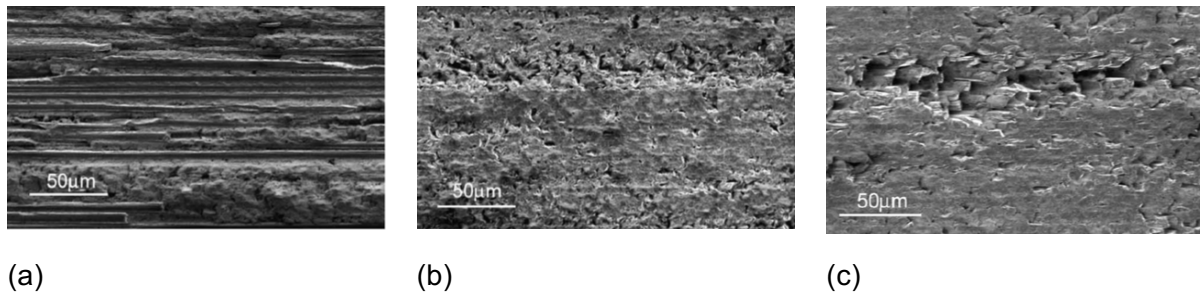


Abb. 8 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Schnittkanten, Schnitt in Faserrichtung (a), Schnitt quer zur Faserrichtung (b), Schnitt 150° zur Faserrichtung (c), (CFK, $d = 20 \mu\text{m}$), (HU & ZHANG, 2004)

Je nach Schneidgeometrie hebt sich ein Span bei Bearbeitung längs zur Faserorientierung durch Abschälen der einzelnen Lagen voneinander oder durch Ausknicken ab. In beiden Fällen wird von einem Überschreiten der interlaminaren Scherfestigkeit ausgegangen, HU & ZHANG, 2004. Bei einer Bearbeitung annähernd 45° zur Faserorientierung erfolgt der Spanabhub durch druckinduzierte Schubspannung innerhalb der Fasern und einer Überschreitung der Faser-Matrix-Haftung entlang der Faserorientierung. Schnitte nahezu 90° zur Faserorientierung erfolgen durch eine Überschreitung der Bruchfestigkeit des Fasermaterials quer zur Faserorientierung und Überschreiten der Faser-Matrix-Haftung entlang der Faserorientierung, HU & ZHANG, 2004. Typische Laminataufbauten sind multiaxial, weshalb nach HINTZE u. a., 2015, von einer Überlagerung mehrerer Mechanismen auszugehen ist. Übereinstimmend berichten FARAZ u. a., 2009; GROPE & URBAN, 2002, und KÖNIG u. a., 1984, von einem Verschleiß der Werkzeuge, aufgrund der abrasiven Wirkung des Verstärkungsfaseranteiles. Nach FARAZ u. a., 2009 tritt im Bereich der Bearbeitungskanten eine veränderte Geometrie und eine Verrundung am Standzeitende auf. Nach KÖNIG u. a., 1984, sind bei optimierten Bearbeitungsparametern Schnittlängen von 60-150 m erreichbar. Eine Steigerung der Standzeit der Werkzeuge erfolgt durch Beschichtung mit harten Materialien wie polykristallinem Diamant, kubischem Bornitrit oder der Verwendung von Werkzeugen aus Feinstkornhartmetall, TETI, 2002. Nach GROPE & URBAN, 2002; KÖNIG u. a., 1984; SHEIKH-AHMAD, 2009, und TETI, 2002, hat sich bisher die Bestückung mit Diamanten als ideale Beschichtung erwiesen.

Charakteristische Schädigungen bei der Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden mit geometrisch bestimmten Schneiden ist die werkzeuginduzierte Schädigung in Form von Delamination. In der Literatur sind verschiedene Arten von Delamination bekannt. Hier ist die Ausbruchdelamination der unteren Schicht bekannt. Mit abnehmender Materialdicke steht nicht mehr genug Material zum gegenseitigen Abstützen zur Verfügung, infolge dessen die interlaminare Scherfestigkeit abnimmt, DIPAOLO u. a., 1996. Diese Schädigung tritt hauptsächlich bei Bohrungen auf. Schädigungen auf der Oberseite des Faser-Kunststoff-Verbundes entstehen aufgrund der nach oben gerichteten Geometrie, die ein Abtragen von Material ermöglichen soll. In Folge dessen wirkt auf die oberen Decklagen eine Kraft entgegen der Dickenrichtung des Werkstoffs. Dadurch werden Spannungen zwischen den Einzelschichten induziert, die sich folglich voneinander abheben. Untersuchungen dazu liefern DAVIM & REIS, 2003; KHASHABA, 2004. Delamination wird hauptsächlich durch die Vorschubge-

schwindigkeit der Frässpindel beeinflusst, da diese maßgeblich die Schnittkraft und damit die auf das Material einwirkende Kraft bestimmt, siehe SHEIKH-AHMAD, 2009. Zur Vermeidung von Delaminationen haben sich Verfahrenskombinationen etabliert. Hier ist beispielsweise das ultraschallüberlagerte Bohren von HOCHENG, 2012 und HOCHENG & TSAO, 2005 zu nennen. Vorteilhaft für die Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden sind laut SHEIKH-AHMAD, 2009 die 3D-Fähigkeit. In Abhängigkeit der Werkstoffe, der Materialstärke sowie des Laminataufbaus sind sehr hohe Vorschubgeschwindigkeiten möglich. Allerdings sind die erreichbaren Schnittgeschwindigkeiten, der Verschleiß und die räumliche Ausbreitung der Delamination sich gegenseitig beeinflussende Parameter und abhängig von den grundlegenden Werkstoffparametern, wie Verstärkungsfasertyp, Matrixsystem und Faservolumengehalt. Darüber hinaus variiert die Schnittkantenqualität über der Standzeit des verwendeten Werkzeuges. Aufgrund der benötigten Schneidkräfte ist eine entsprechende Einspannung des Schnittgutes auszulegen.

3.1.3 Thermisches Abtragen

Zum thermischen Abtragen gehört nach DIN 8580 das Plasmastrahlschneiden. Nach CHERIF, 2011, wird dieses hauptsächlich zum Zuschnitt von mehrlagigen textilen Werkstoffen eingesetzt, die eine schmelzflüssige Phase aufweisen können. Aufgrund langer Wechselwirkungszeiten und hoher Temperatur des in der Regel fokussierten Plasmastrahles ergeben sich ausgeprägte wärmebeeinflusste Zonen bei der Bearbeitung von Kohlenstoff-Kunststoff-Verbunden, weshalb Plasmastrahlschneiden in diesem Gebiet keine Anwendung findet.

Ein weiteres Verfahren innerhalb der Gruppe der thermischen Abtragsverfahren ist das Funkenerodieren. Infolge einer Funkenentladung zwischen Elektrode und Werkstoff entsteht die zum Aufschmelzen oder Verdampfen erforderliche Wärme in der Bearbeitungszone, SHEIKH-AHMAD, 2009. Somit ist das Verfahren auf leitfähige Werkstoffe und damit Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde beschränkt, die von einem flüssigen dielektrischen Medium umgeben sein müssen. LAU u. a., 1995, wenden hier beispielsweise Petroleum an. Nach LAU u. a., 1995, ist die Ausbreitung der entstehenden wärmebeeinflussten Zone deutlich kleiner, verglichen zur Laserbearbeitung. Hier wird aber lediglich mit gasunterstützter, gepulster Laserstrahlung mit den Wellenlängen $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ und $\lambda = 0,308 \mu\text{m}$ verglichen. Aus diesem Grund ist diese Aussage nicht auf alle Laserbearbeitungsverfahren anwendbar. Nach SHEIKH-AHMAD, 2009, sind mittels Funkenerosion komplexe Geometrien mit höchster Präzision möglich. Darüber hinaus erfolgt die Bearbeitung kraftfrei. Die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone ist prozess- und werkstoffabhängig. Der Verschleiß der Elektrode führt zu einer schwankenden Schnittqualität über die Standzeit der Elektrode. Nach FU u. a., 1994, entstehen Delaminationen ausgehend von der Schnittkante in Abhängigkeit der Faserorientierung.

3.2 Der Laserstrahl als trennendes Werkzeug zur Bearbeitung von FKV

Das Laserstrahlschneiden ist innerhalb der DIN 8580: 2003-09 dem thermischen Abtragen zugeordnet. Nach LIEBELT, 1998, und TRASSER, 1991, ist es als kraft- und verschleißfreies Trennverfahren dazu geeignet, die in 3.1.1 und 3.1.2 dargestellten Problematiken, wie Delamination, Wassereintritt und Verschleiß zu minimieren. In der entsprechenden Norm und nach BEYER, 1998; HÜGEL & GRAF, 2009, und POPRAWE, 2005, ist es üblich, das Laserstrahlschneiden in Brennschneiden, Schmelzschneiden und Sublimierschneiden zu unterteilen.

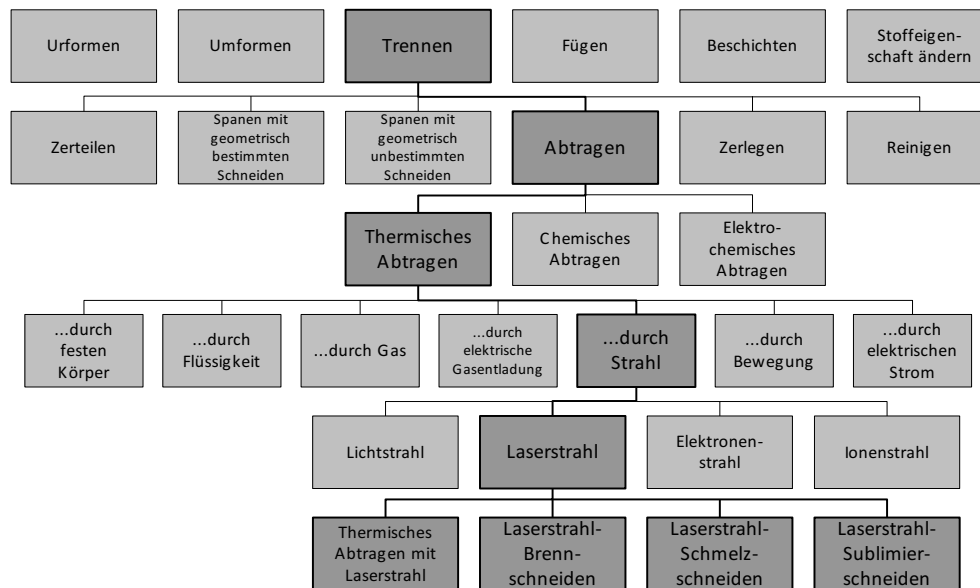


Abb. 9 Einordnung des Laserstrahlschneidens in DIN 8580: 2003-09

3.2.1 Der Einsatz von kontinuierlich betriebenen Strahlquellen zum gasunterstützten Brenn- und Schmelzschnitten

Sowohl beim Brenn-, Schmelz- und Sublimierschneiden dient ein fokussierter Laserstrahl einer kontinuierlich betriebenen Strahlquelle zum Erwärmen des Materials auf die jeweiligen Zersetzungstemperaturen. Ein koaxial geführter Gasstrahl treibt anschließend das zersetzte Material aus der Prozesszone. Durch eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug erfolgt die Ausbildung eines Schnittspaltes. Im Gegensatz zum Schmelzschnitten wird beim Brennschneiden mit Sauerstoff als reaktives Schneidgas gearbeitet. Dabei geht der Sauerstoff eine exotherme Reaktion mit dem Material der Schneidfront ein und setzt so zusätzliche thermische Energie frei. Neben der Bearbeitung von Metallen sind auch thermoplastische Kunststoffe und Glasfaser-gefüllte thermoplastische Kunststoffe mit diesen Technologien prinzipiell trennbar, da eine Schmelze durch Erwärmen entstehen kann. Im Gegensatz zu Metallen sind dabei keine leistungsstarken Laser notwendig, da sich die Schmelztemperaturen der Kunststoffe deutlich von denen der Metalle unterscheiden. Wie auch bei der Bearbeitung von Metallen, haben sich nach KLEIN, 1990, und LIEBELT, 1998, kontinuierlich betriebene CO₂-Laser zur Bearbeitung von Kunststoffen und Faser-Kunststoff-Verbunden durchgesetzt. Jedoch ist bei der Metallbearbeitung von einem Rückzug des CO₂-Lasers nach BEYER 2016, auszugehen. Der Einsatz des Schmelz- und Brennschneidens bei der trennenden Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden wird durch mehrere Literaturstellen im Folgenden belegt. Hinsichtlich der großen Materialspektren, die Faser-Kunststoff-Verbunde bieten, muss bei der Bearbeitung zwischen schmelzbaren Werkstoffen und nicht schmelzbaren Werkstoffen unterschieden werden. Zu den schmelzbaren Werkstoffen zählen alle Arten von thermoplastischen Matrixsystemen und Verstärkungsmaterialien, sowie Glasfasern. Hier erfolgt der Abtrag des Materials aus der Schmelzphase heraus, KLEIN, 1990. Dagegen gelten duroplastische Matrixsysteme und Kohlenstofffasern als nicht schmelzbar, LIEBELT, 1998. Aus diesem Grund erfolgt hier der Abtrag durch thermisches Zersetzen des Materials in der Wechselwirkungszone. In der Literatur werden hauptsächlich CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 µm genannt. Typische Fokussdurchmesser betragen nach CENNA

& MATHEW, 2002, 180 μm , HERZOG u. a., 2008, 240 μm , KLOTZBACH, 2011, dabei 100 μm , und nach CAPRINO u. a., 1995, bis zu 500 μm . Neben den Werkstoffeigenschaften sind hauptsächlich die Laserleistung und die Vorschubgeschwindigkeit qualitäts- und prozessbestimmend. Hohe Schnittgeschwindigkeiten lassen sich dabei bei Faser-Kunststoff-Verbunden erreichen, deren thermische Kennwerte, wie Wärmeleitfähigkeit sowie die Zersetzung- bzw. Verdampfungstemperatur eng beieinander liegen. Dementsprechend sind nach CAPRINO u. a., 1995; CAPRINO & TAGLIAFERRI, 1988; CENNA & MATHEW, 2002; CHOUDHURY & CHUAN, 2013, und LIEBELT, 1998, beim Schneiden von Aramid- und Glasfaser-Kunststoff-Verbunden die höchsten Schneidgeschwindigkeiten erzielbar. Dagegen muss aufgrund der sehr hohen Verdampfungstemperatur und der fehlenden schmelzflüssigen Phase der Kohlenstofffaser eine deutlich längere Wechselwirkungszeit in Kauf genommen werden um den Werkstoff über die gesamte Materialdicke so zu zersetzen, dass dieser durch den koaxialen Arbeitsgasstrom nach unten ausgetrieben wird. Übereinstimmende Untersuchungen wurden darüber von CAPRINO u. a., 1995; KLOTZBACH u. a., 2011a; PAN & HOCHENG, 1996, und RIVEIRO u. a., 2012, durchgeführt. JUNG, 2012; MATHEW u. a., 1999; MÜLLER, 1990, und NEGARESTANI, 2013, beschreiben, dass durch das Verdampfen des Werkstoffes über die gesamte Materialdicke ein der Vorschubrichtung entgegenwirkender Verdampfungsgasstrom entsteht. Dabei zeigen MATHEW u. a., 1999, dass mit Erhöhung des Schneidgasdruckes eine Absenkung der Vorschubgeschwindigkeit einher geht. Unabhängig davon kann ein Freilegen von Faserenden im Bereich der wärmebeeinflussten Zone von HOCHENG, 2012; KLEIN, 1990, KLOTZBACH u. a., 2013a, und HARADA, 2012, festgestellt werden. Ursächlich zeichnet sich hier die sehr viel höhere Verdampfungstemperatur der Kohlenstofffasern gegenüber dem umgebenden Matrixmaterial aus. Unterstützt durch die Wärmeleitung der Verstärkungsfasern kann so ein großer Bereich an Matrix thermisch zersetzt werden ohne die Fasern geometrisch zu schädigen. Infolge dessen wird dann lediglich die Matrix aus dem Werkstoff abtransportiert und die Faserenden liegen frei. Damit einhergehend ist eine signifikante Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone messbar. Messungen von HERZOG u. a., 2008; NEGARESTANI, 2013; PAN & HOCHENG, 1996, und RIVEIRO u. a., 2012, zeigen übereinstimmend, dass diese bis zu 2,5 mm in das Material hineinreichen kann. Dazu zeichnen sich die Schnittflächen durch eine gegenläufige Verschiebung der geometrischen Grenzen (Abb. 10), sowie inter- und intralaminare Schäden aus, was sich auf die Scherzugfestigkeit der Werkstoffe auswirkt, CENNA & MATHEW, 2002; HERZOG u. a., 2008.

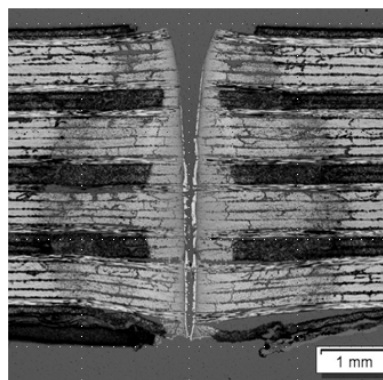


Abb. 10 Lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffes eines vollständig gasunterstützten Schnittes (CFRP, $\square = 60\%$), (KLOTZBACH u. a., 2013a)

Für alle Faser-Kunststoff-Verbunde zeichnet sich aber die Tendenz ab, dass mit Verringerung der Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Material eine Minimierung der thermi-

schen Schädigung verbunden ist. In Verbindung mit hohen Intensitäten ist der Einfluss der Wärmeleitung durch den Verstärkungsfaseranteil nach CAPRINO u. a., 1995; HOCHENG, 2012; KLOTZBACH, 2011, sowie PAN & HOCHENG, 1996, 1998, minimal. Diesen Zusammenhang haben HASHEMZADEH u. a., 2014 mit der lokalen Wechselwirkungsenergie dargestellt. Mit der mittleren Laserleistung P_L , dem Fokusbereich d_f und der Vorschubgeschwindigkeit des Laserspots v_v ergibt sich diese zu:

$$S_{PE} = P_L \cdot t_i = \frac{P_L \cdot d_f}{v_v} \quad (3)$$

Dabei ist t_i , die Zeit, die der Strahl benötigt, um seinen Durchmesser abzufahren, also die Wechselwirkungszeit.

$$t_i = \frac{d_f}{v_v} \quad (4)$$

Je nach verwendetem Material, gekennzeichnet durch Materialstärke, Verstärkungsfasermaterial sowie Verstärkungsfaseranteil, ergeben sich aus dem Stand der Technik, die in Abb. 11 dargestellten typischen Laserschneidparameter für gasunterstütztes Schneiden. Als Arbeitsgase kommen zum Schmelzschnitten Stickstoff oder Argon mit Drücken zwischen 2 und 10 bar und zum Brennschnitten Sauerstoff in einem vergleichbaren Druck zum Einsatz, HERZOG u. a., 2008; KLOTZBACH, 2011; MÜLLER, 1990; RIVEIRO u. a., 2012. In Abb. 11 stehen kleine Symbole für die Verwendung einer CO_2 -Strahlquelle und große Symbole für den Einsatz eines Festkörperlaser.

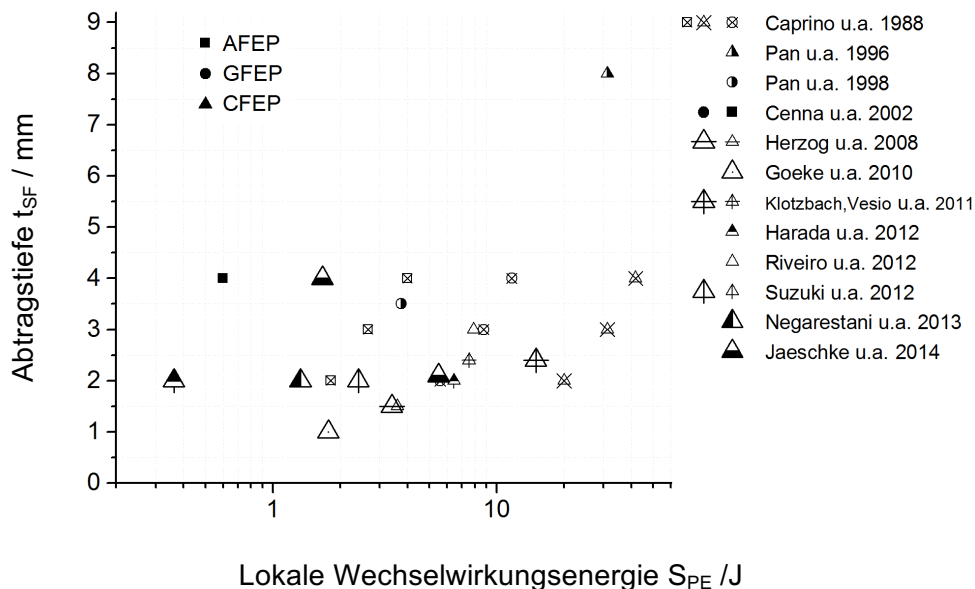


Abb. 11 Abtragstiefe als Funktion der lokalen Wechselwirkungsenergie für gasunterstützte Bearbeitung für Aramidfaser-Kunststoff-Verbund (AFEP), Glasfaser-Kunststoff-Verbund (GFEP) und Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund (CFEP), (kleine Symbole stehen für CO_2 -Laserbearbeitung, große Symbole stehen für Festkörperlaserbearbeitung)

Dargestellt ist, dass zum Erreichen vergleichbarer Abtragstiefen bei Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden höhere lokale Wechselwirkungsenergien im Vergleich zu Aramid- oder Glasfaser-Kunststoff-Verbunden benötigt werden. Die ähnlichen optischen und thermischen

Eigenschaften der Einzelwerkstoffe Glas, Aramid sowie der umgebenden polymeren Matrixanteile resultieren in kürzeren Wechselwirkungszeiten, was eine Minimierung der lokalen Wechselwirkungsenergie zur Folge hat. Um Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde mit CO₂-Laserstrahlung zu trennen, sind sehr hohe Intensitäten durch den Einsatz von leistungsstarken Strahlquellen oder eine Herabsetzung der Vorschubgeschwindigkeit notwendig, um die notwendige Verdampfungstemperatur zu erreichen. Vergleichbar hohe Intensitäten führen zu einer Verkürzung der Wechselwirkungszeit und können beispielsweise durch den Einsatz von Festkörperlaser erreicht werden. Hier hat die Emissionswellenlänge der eingesetzten Strahlquellen einen maßgeblichen Einfluss auf die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung.

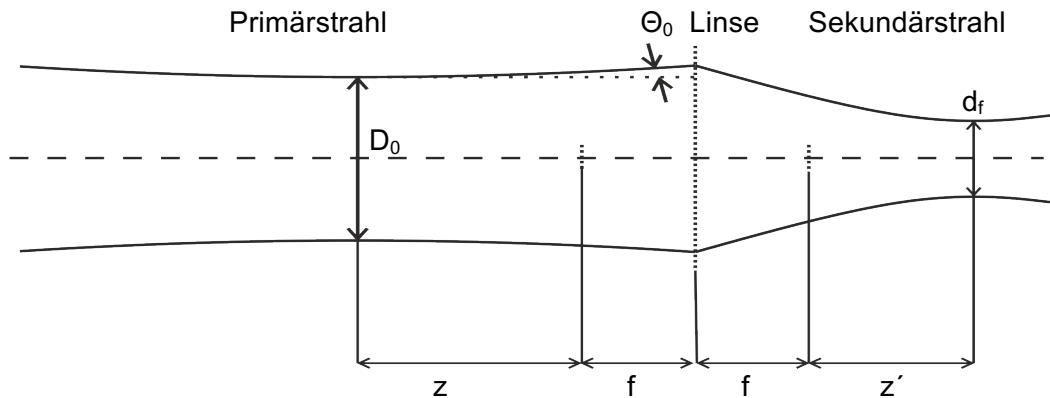


Abb. 12 Strahlfokussierung durch eine Linse

Mit dem Rohstrahldurchmesser D und der Brennweite f gilt, näherungsweise für den Fokusradius für gaußförmige, freistrahrende Laserstrahlung nach BLIEDTNER, U.A., 2013:

$$d_f \approx D_0 \cdot \theta_0 \cdot \frac{f}{D_0} \approx \frac{f \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0} \quad (5)$$

Weiterhin gilt nach HÜGEL, 1992, für das Strahlparameterprodukt von idealen Laserstrahlen mit gaußförmiger Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt und einem Divergenzwinkel θ_0 :

$$SPP = \frac{D_0 \cdot \theta_0}{2} = \lambda / \pi. \quad (6)$$

Hier ist erkennbar, dass kleine Fokusradien dann erreichbar sind, wenn eine kurze Wellenlänge, eine kurze Brennweite und ein großer Rohstrahldurchmesser vorliegt. Laserstrahlung ist umso besser fokussierbar, je kleiner diese optische Größe ist. Allerdings kann das SPP nicht beliebig klein sein. Ein mit gaußförmiger Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt oder beugungsbegrenzter Strahl besitzt das kleinste SPP. Weiterhin wird der reale Strahl zum idealen beugungsbegrenzten Strahl mit Hilfe der Beugungsmaßzahl M^2 in Bezug gesetzt:

$$M^2 = \frac{SPP_{real}}{SPP(TEM_{00})} = \frac{\theta_{0,real} \cdot d_{f,real} \cdot \pi}{2 \cdot \lambda} \quad (7)$$

Dabei können Yttrium-dotierte Faserlaser eine Beugungsmaßzahl nach OVERTON, 2009, von nahezu eins liefern. Ihr Emissionswellenlängenbereich von $\lambda = 1,06 - 1,07 \mu\text{m}$ lässt ein SPP von 0,35 mm mrad zu. Dies erlaubt, je nach Anwendungsfall kleine Foki oder längere Brennweiten. Kleinere Foki und damit verkürzte Wechselwirkungszeiten sowie höhere Inten-

sitäten gehen einher mit einer Verringerung der thermischen Schädigung, also der geometrischen Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone innerhalb der Werkstoffe. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 13 dargestellt und zeigt die aus der Literatur entnommene geometrische Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone in Abhängigkeit der lokalen Wechselwirkungsenergie und der Materialien sowie Laserstrahlquellen. Dargestellt ist, dass eine hohe lokale Wechselwirkungsenergie unabhängig von der Art der Strahlquelle zu einer ausgeprägten wärmebeeinflussten Zone führen kann. Sofern die lokale Wechselwirkungsenergie gering ist, beispielsweise infolge einer geringen Materialdicke oder durch hohe Intensitäten in Verbindung mit kurzen Wechselwirkungszeiten, ist von einer geringen Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone in das Material auszugehen. Liegen Werkstoffe mit vergleichbaren optischen Eigenschaften vor, verringert sich die wärmebeeinflusste Zone deutlich.

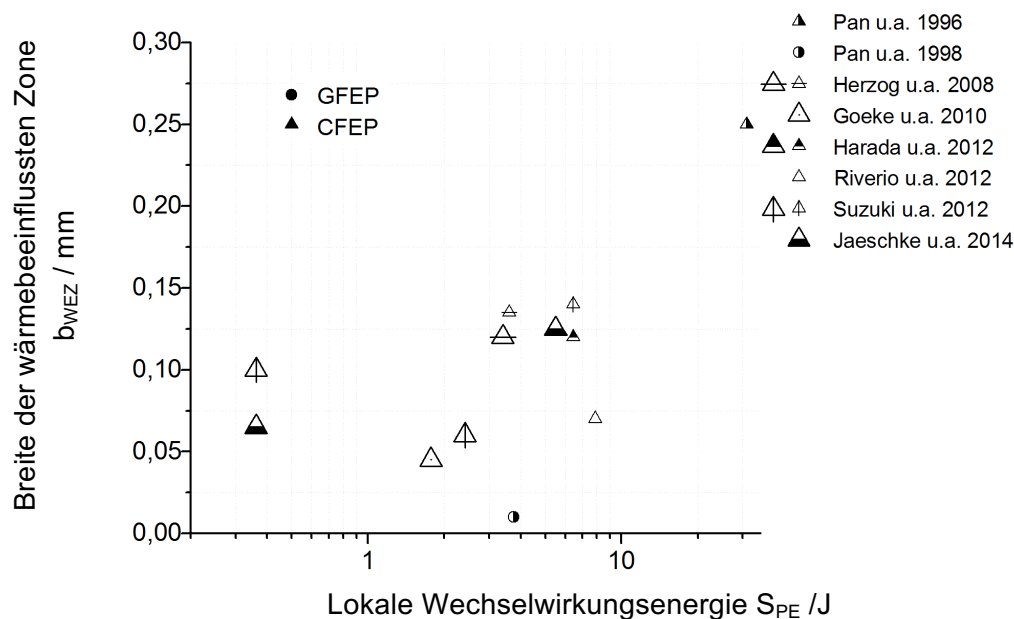


Abb. 13 Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone als Funktion der lokalen Wechselwirkungsenergie für gasunterstützte Bearbeitung für Glasfaser-Kunststoff-Verbund (GFEP) und Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund (CFEP), (kleine Symbole stehen für CO₂-Laserbearbeitung, große Symbole stehen für Festkörperlaserbearbeitung)

3.2.2 Verfahrensvarianten des Remote-Laserstrahlschneidens mit kontinuierlich betriebenen Strahlquellen

Der Forderung nach kurzen Wechselwirkungszeiten und damit einer herabgesetzten lokalen Wirkenergie wird in der Literatur unter anderem durch die Arbeiten von JUNG, 2012; KLOTZBACH u. a., 2013a; KLOTZBACH, 2011; SCHNEIDER u. a., 2013, und STOCK u. a., 2012, mit dem Remote-Laserstrahlschneiden Rechnung getragen. Entgegen dem gasunterstützten Schneiden, bei dem der Bearbeitungskopf wenige zehntel Millimeter über dem Werkstoff geführt werden muss, wird beim Remote-Laserstrahlschneiden auf ein Schneidgas zum Materialaustrieb verzichtet und der Abstand zwischen Werkstoff und Bearbeitungskopf deutlich erhöht. Durch die Verwendung schnell verkipperbarer Spiegel, die galvanometrisch angetrieben sind, erfolgt die Ablenkung des Laserstrahles einer kontinuierlich betriebenen Strahlquelle auf das Werkstück. Aufgrund der deutlichen Reduzierung der bewegten Massen lassen sich mit solchen Scansystemen wesentlich höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erzielen. Durch Anordnung von zwei Spiegeln ist eine Ablenkung des Laserstrahles in X-als auch in Y-Richtung möglich.

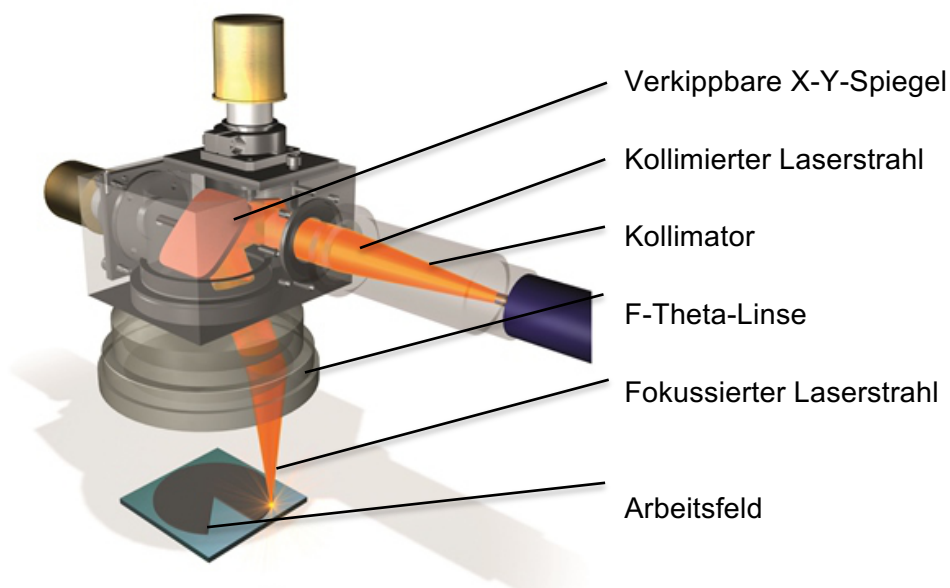


Abb. 14 Schematische Darstellung einer Strahlableitung durch verkippbare Spiegel und durch ein F-Theta-Objektiv entstandene Fokussierebene, (LÜTKE, 2011)

Die mit der Remote-Technologie erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten ermöglichen gegenüber dem gasunterstützten Laserstrahlschneiden eine signifikante Minimierung der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Werkstoff, LÜTKE, 2011. Dabei ist nach FUCHS u. a., 2013; JUNG, 2012; KLOTZBACH u. a., 2011a, 2011b, 2013a; NIINO, 2014, und STOCK u. a., 2012, übereinstimmend der Abtrag des Materials pro Überfahrt so minimiert, dass ein zyklisches Verfahren anzuwenden ist, um ein vollständiges Durchtrennen des Werkstoffes zu erreichen. Abb. 15 zeigt die Abfolge des Abtrages über der Materialdicke bis zur vollständigen Ausbildung des Schnittes bei einer Materialdicke von 2 mm.

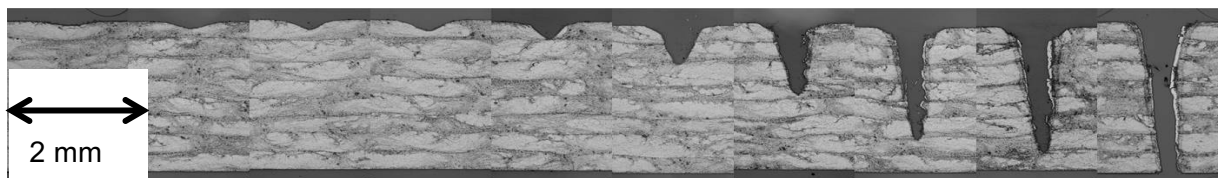
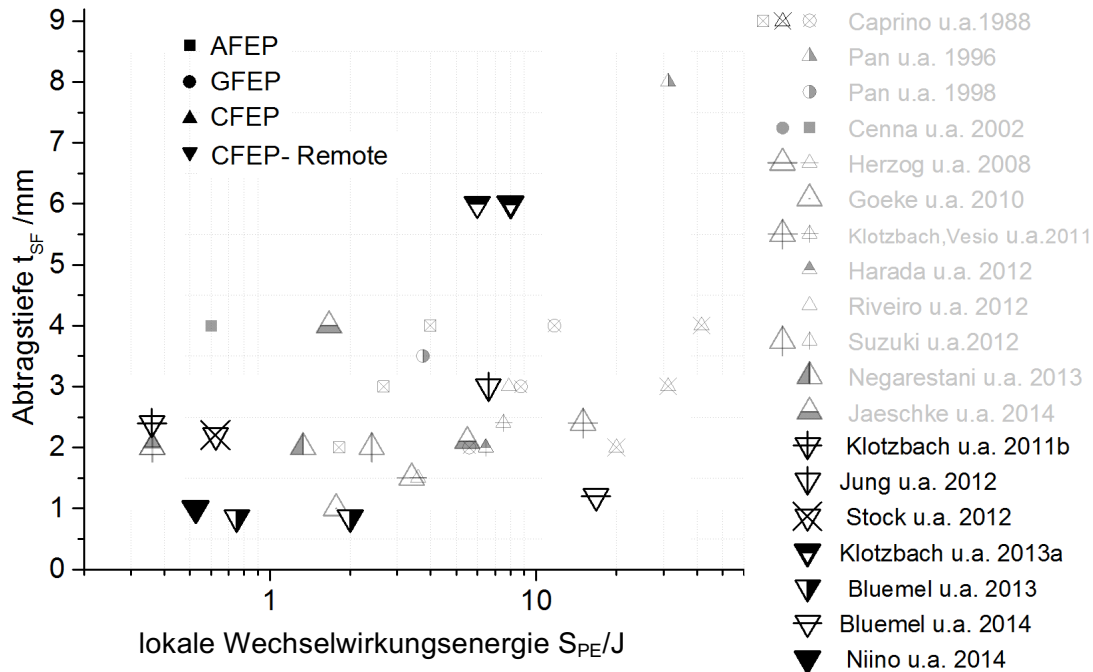


Abb. 15 Zyklischer Materialabtrag mit ansteigender Zyklanzahl von links nach rechts (2 mm CFRP, $\eta = 60\%$, $P_{L,FKL} = 1\text{ kW}$, $v_V = 1\text{ m/s}$, $n = 10$)

Typischerweise ist der Materialabtrag von den in der lokalen Wechselwirkungsenergie zusammengefassten Parametern abhängig. In Tabelle 19 und Tabelle 20 in Anhang A 5 sind typische Parameter dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit mit der gasunterstützten Bearbeitung zu erreichen ergibt sich die resultierende Bearbeitungsgeschwindigkeit aus dem Quotienten von Vorschubgeschwindigkeit v_V und der Anzahl an Überfahrten n bis zum vollständigen Durchtrennen des Werkstoffes.

$$S_{PE} = P_L \cdot t_i = P_L \cdot \frac{d_f}{v} \quad \text{mit } v = \frac{v_V}{n} \quad (8)$$

Abgeleitet aus den Literaturstellen ergeben sich damit typische kumulierte lokale Wechselwirkungsenergien in Abhängigkeit der Abtragstiefe und der eingesetzten Laserstrahlquellen für das Remote-Laserstrahlschneiden (Abb. 16).



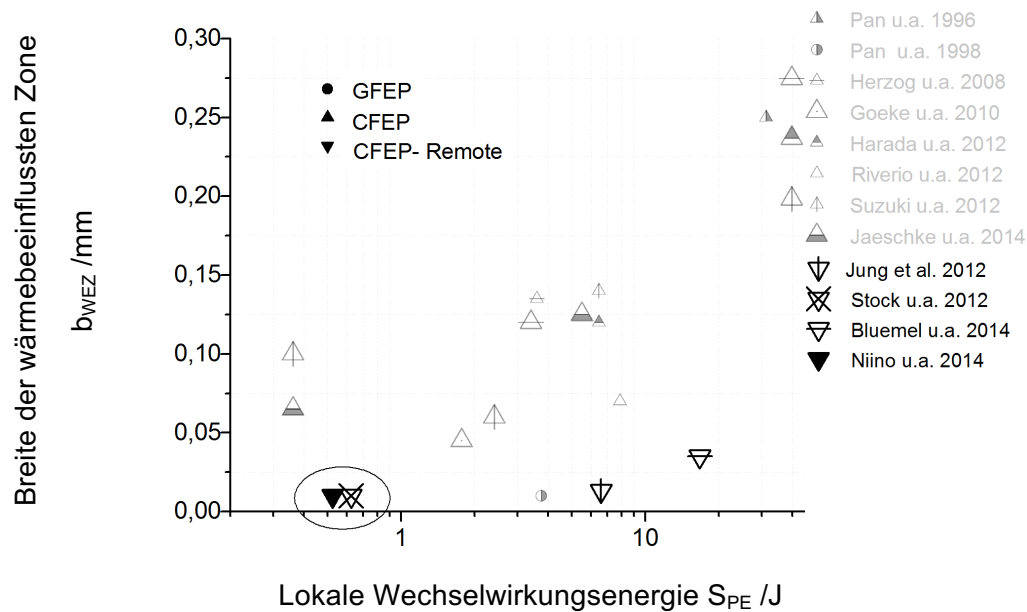


Abb. 17 Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone als Funktion der lokalen Wechselwirkungsenergie, Remote Laserstrahlschneiden im Vergleich zu gasunterstützter Bearbeitung (ausgegraut), (kleine Symbole stehen für CO₂-Laserbearbeitung, große Symbole stehen für Festkörperlaserbearbeitung)

Neben der Minimierung der Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Material sowie der notwendig hohen Intensität zeigen FUCHS u. a., 2013; FÜRST u. a., 2013, und STOCK u. a., 2012, dass der Anteil der absorbierten Strahlung im Werkstoff einen Einfluss auf die Schneidbarkeit hat. Allerdings ergeben sich hier wieder Verfahrensgrenzen. Die anteilig im Werkstoff enthaltene polymere Matrix ist nahezu transparent für Laserstrahlung im Emissionwellenlängenbereich von 1,06 – 1,07 μm . Dadurch wird die Strahlung erst an den darunter befindlichen Kohlenstofffasern absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der beim thermischen Zersetzen der Kohlenstofffasern entstehende Druck führt zu Abplatzung der darüber befindlichen polymeren Matrix und damit zu unregelmäßigen Schnittqualitäten. Damit stellen sich nach FÜRST u. a., 2013; KLOTZBACH u. a., 2013b, und STOCK u. a., 2012, keine signifikanten Erhöhungen der Schnittgeschwindigkeiten ein. Ein Ansatz zur Angleichung des Absorptionsverhaltens beider Werkstoffe zeigt STOCK u. a., 2012, durch die Füllung der polymeren Matrix mit Ruß. Hier reicht schon ein Gewichtsanteil von 2 - 4 % aus um das Absorptionsverhalten der polymeren Matrix so zu verändern, dass eine deutliche Verbesserung der Schnittqualität oder des Abtragsverhaltens eintritt. Allerdings stellt das Absorptionsverhalten der Werkstoffe, vor allem aufgrund der Inhomogenität der Faserverteilung, eine Verfahrensgrenze dar. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit die stark voneinander abweichenden thermischen und optischen Eigenschaften zu berücksichtigen.

3.2.3 Remote-Laserstrahlschneiden mit gepulsten Strahlquellen

Eine deutliche Minimierung der Wechselwirkungszeit kann durch die Kombination von gepulsten Lasersystemen mit der Remote-Technologie erreicht werden. Arbeiten dazu liefern BLUEMEL u. a., 2014; EMMELMANN u. a., 2011; FREITAG u. a., 2012; JAESCHKE u. a., 2014; KLOTZBACH u. a., 2013a; LEONE u. a., 2014; SCHILLING u. a., 2013; SCHNEIDER u. a., 2013; WEBER u. a., 2012, und WOLYNSKI u. a., 2011.

Im folgenden wird auf die Darstellung von gepulsten Strahlquellen in Verbindung mit einer Schneidgasunterstützung verzichtet, da der negative Einfluss des Gasstromes schon dargestellt wurde. Übereinstimmend werden von BLUEMEL u. a., 2014; LEONE u. a., 2014, und SCHNEIDER u. a., 2013, bei Verwendung von Nanosekundenlasern und optimierten Parametern sehr geringe Ausbreitungen der wärmebeeinflussten Zonen in das Material von annähernd 100 μm genannt. Bis zu 10 μm sind bei Verwendung von Lasern mit der Wellenlänge von $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ von EMMELMANN u. a., 2011, nachgewiesen. WOLYNSKI u. a., 2011, stellen eine Minimierung der wärmebeeinflussten Zone hauptsächlich bei Verkürzung der Wellenlänge fest. Die Untersuchungen dazu wurden an Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden mit einem Laser mit variablen Wellenlängen von $\lambda = 0,355 \mu\text{m}$, $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ und $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$, der Pikosekundenpulse ($t_p = 7 - 9 \text{ ps}$) emittiert, durchgeführt. Die geringere geometrische Ausdehnung der wärmebeeinflussten Zone wird damit erklärt, dass ein höherer Anteil an Strahlung mit der Emissionswellenlänge von $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ innerhalb der polymeren Matrix absorbiert. Aufgrund der geringen Zersetzungstemperaturen der Matrix zersetzt sich diese eher als die Kohlenstofffaser. WOLYNSKI u. a., 2011 berichten weiterhin, dass aufgrund der erhöhten Photonendichte der Strahlung mit der Wellenlänge $\lambda = 0,355 \mu\text{m}$ die Wahrscheinlichkeit einer nichtlinearen Absorption aufgrund von Mehrphotonenprozessen stark erhöht ist. Aus diesem Grund steht ein Anteil der eingestrahnten Laserleistung zur Verfügung, um Bindungskräfte innerhalb der Molekülketten des Matrixwerkstoffes aufzuheben und damit „wärmelos“ eine Zersetzung der polymeren Matrix hervorzurufen.

Ähnliches Verhalten haben auch SCHILLING u. a., 2013, bei der Bearbeitung von Glasfaser-Kunststoff-Verbund mit UltrakurzpulsLasern nachweisen können. Hier sind Abtragsversuche mit gepulsten Systemen dargestellt, die Strahlung mit den Emissionswellenlängen $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ ($t_p = 10 \text{ ps}$, $d_f = 60 \mu\text{m}$), $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ ($d_f = 33 \mu\text{m}$) und $\lambda = 0,355 \mu\text{m}$ ($d_f = 25 \mu\text{m}$) emittieren. Für die Wellenlängen im UV- und grünen Bereich sind die Pulslängen variabel von 500 fs bis 20 ps einstellbar. In Abhängigkeit der Pulslänge und Wellenlänge konnten zwei Abtragsregime festgestellt werden. Bei Verkürzung der Pulsdauer war es sowohl mit Wellenlängen im grünen als auch im UV-Bereich möglich, ausschließlich Matrixmaterial abzutragen. Bei Verlängerung der Pulse erfolgte ein Abtrag des gesamten Werkstoffes. Unabhängig von der Pulslänge war es mit der Wellenlänge $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ nicht möglich einen selektiven Matrixabtrag zu erreichen. Übereinstimmend wird von BLUEMEL u. a., 2014; JAESCHKE u. a., 2014; USHIDA, 2012, und WEBER u. a., 2012, festgestellt, dass bei Erhöhung der Repititionsrate und Konstanthaltung von Scangeschwindigkeit und Pulsspitzenleistung, pulslängenunabhängig deutlich höhere Abtragsraten zu erzielen sind. Nach BLUEMEL u. a., 2014; JAESCHKE u. a., 2014, und WEBER u. a., 2012, geht das aber einher mit einer deutlichen Zunahme der Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff. Dazu untersuchen BLUEMEL u. a., 2014, die Zugfestigkeit laserbearbeiteter Probekörper und stellen diese in einen Vergleich zu konventionell bearbeiteten Probekörpern. Die mittels Pikosekundenlaser bearbeiteten Probekörper zeigen keine Veränderung der Zugfestigkeit mit steigender Scangeschwindigkeit. Dagegen ist bei der Bearbeitung mit Nanosekundenlasern eine Abnahme der Zugfestigkeit bei abnehmender Scangeschwindigkeit festzustellen. WEBER u. a., 2012, zeigen auf, dass die Verkürzung der Wechselwirkungszeit zwar eine Minimierung der wärmebeeinflussten Zone nach sich führt, jedoch müssen für relevante Abtragsraten hohe Repititionsraten erreicht werden, die zu einem Wärmestau im Werkstoff führen. Sie stellen dazu fest, dass die nachgeschaltete Remote-Systemtechnik in der Lage sein muss, derart

hohe Vorschubgeschwindigkeiten zu erzeugen, dass trotz hoher Repititionsraten und damit verbunden hohen mittleren Leistungen ein schädigungsarmer Abtrag erfolgen kann.

Neben der Optimierung des Pulsüberlapps ist die Maximierung der mittleren Leistung der Strahlquellen ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Abtragsraten. EMMELMANN u. a., 2011; WEBER u. a., 2012, und WIEDENMANN u. a., 2014, stellen dar, dass mit einer Zunahme des Überlapps der einzelnen Pulse und mit ansteigender Pulsspitzenleistung hohe Abtragsraten möglich sind. WIEDENMANN u. a., 2014 zeigen die Bearbeitung von Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund mit einem gepulsten System mit einer maximalen mittleren Leistung von $P_m = 1,1$ kW. Dabei werden Pulsenergien von 3,7 mJ bei Repititionsraten von $f_{Rep} = 300$ kHz und einer Pulsdauer von $t_p = 7$ ps erreicht. Hier sind Scangeschwindigkeiten von bis zu $v_v = 30$ m/s notwendig, um bei den gegebenen Repititionsraten die Anzahl an Pulsen pro Fokusbereich einstellen zu können. Durch Verringerung der Scangeschwindigkeit nimmt nach WEBER u. a., 2012, dieser Wert zu. Dies führt nach WEBER u. a., 2012, und WIEDENMANN u. a., 2014, zu einer gesteigerten Effizienz des Prozesses. Die hohen Pulsenergien bewirken allerdings Wärmestau in Folge von Puls-zu-Puls-Akkumulation im Werkstoff und resultierend in einer wärmebeeinflussten Zone mit einer Ausbreitung von bis zu 1,5 mm.

3.2.4 Einordnung der Laserbearbeitungsstrategien

Hinsichtlich der sehr unterschiedlichen Ansätze zur Minimierung der Wechselwirkungszeit und damit der Minimierung der Schädigung des Werkstoffes erfolgt eine prinzipielle Einordnung der Verfahren. Angenommen wird die Bearbeitung mit kontinuierlich betriebenen Strahlquellen mit Gasunterstützung und im Remote-Verfahren sowie dem Remote-Verfahren mit Strahlquellen, die Strahlung mit Pulslängen im ns- und ps-Bereich emittieren. Ausgehend von einer Bearbeitungsstrecke von 50 μ m kann die dabei benötigte Wechselwirkungszeit, die abgegebene Laserleistung und die eingebrachte Energie pro Überfahrt des Laserspots berechnet werden. Angenommen wird die Bearbeitung mit den im Anhang A 4 zusammengefassten Parametern nach KLOTZBACH u. a., 2011b, und SCHILLING u. a., 2013. Die dabei ermittelten Wechselwirkungszeiten zur Absorption der zur Verfügung stehenden Laserleistung und der resultierenden Energie sind in Abb. 18 ersichtlich.

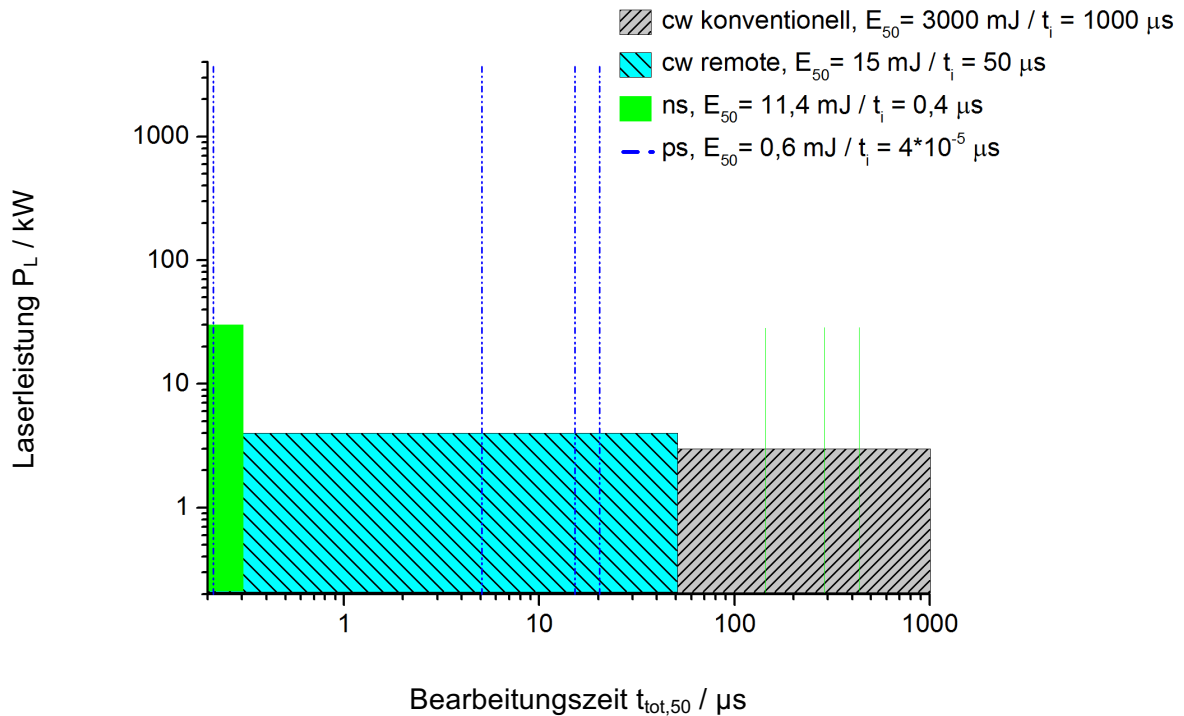


Abb. 18 Vergleich der Bearbeitungszeit, abgegebene Laserleistung und Energie für eine Bearbeitungsstrecke von 50 µm ($d_f = 50 \text{ µm}$, Pulsüberlapp 66%)

Die gasunterstützte Bearbeitung führt zu einer sehr langen Wechselwirkungszeit, die mit den in Abb. 11 verbundenen hohen Abtragsraten und damit aber signifikant ausgeprägten wärmebeeinflussten Zonen, wie in Abb. 13 dargestellt, einher geht. Eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit wird durch das Remote-Verfahren im CW-Betrieb erreicht. Es ist ersichtlich, dass die dabei pro Überfahrt eingebrachte Energie deutlich geringer ist als bei gasunterstützter Bearbeitung. Dies geht mit einer deutlichen Minimierung der wärmebeeinflussten Zone einher (Abb. 17). Von einer zyklischen Bearbeitung ist dabei auszugehen, weshalb die zum vollständigen Durchtrennen benötigten lokalen Wirkenergien in der Regel zu einer gasunterstützten Bearbeitung vergleichbar sind (Abb. 16). Eine weitere Verkürzung der Wechselwirkungszeit ist durch gepulste Systeme erreichbar. Hier ist die Wechselwirkungszeit maßgeblich von der Pulslänge abhängig, weshalb die resultierend eingebrachte Energie, trotz der hohen Pulsspitzenleistungen signifikant geringer als bei kontinuierlich betriebenen Strahlquellen ist. Dies führt, in Verbindung mit den langen Pausenzeiten zwischen den Pulsen, zu optisch nicht messbaren wärmebeeinflussten Zonen wie sie von BLUEMEL u. a., 2014; SCHILLING u. a., 2013, und WOLYNSKI u. a., 2011, gemessen wurden. Allerdings nimmt auch der Materialabtrag deutlich ab bzw. eine hohe Anzahl an Bearbeitungszyklen ist notwendig um vergleichbare Schnitttiefen zu erhalten.

In Abb. 18a sind die Ergebnisse für einen Pulsüberlapp von 66 % dargestellt. Sofern dieser erhöht wird, beispielsweise durch Erhöhung der Repetitionsraten oder Verringerung der Scangeschwindigkeiten, ist von einer Erhöhung der Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Material auszugehen, was zu einer Steigerung der innerhalb der Strecke eingebrachten Energie führt. Dabei kann nach WEBER u. a., 2012, und WIEDENMANN u. a., 2014, von einer Zunahme der Effizienz des Prozesses, aber auch von einer ausgeprägteren wärmebeeinflussten Zone ausgegangen werden.

3.3 Zusammenfassung des Standes der Technik

Aus den bisher dargestellten Zusammenhängen sind für den Verlauf der Arbeit folgende Punkte ableitbar. Faser-Kunststoff-Verbunde sind sowohl mit CO₂- als auch mit Festkörperlaserstrahlung zu trennen. Große Abtragstiefen mit vergleichsweise geringen lokalen Wirkenergien sind bei allen Werkstoffen mit optisch und thermisch ähnlichen Einzelwerkstoffen erreichbar. Mit Verkürzung der Wellenlänge ist eine höhere Intensität und damit auch eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit zu erreichen. Dies führt in der Regel zu einer geringeren Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone, aber nur dann wenn ausreichend hohe Anteile der einfallenden Laserstrahlung vom Werkstoff absorbiert werden. Weiterhin geht aus dem Stand der Technik hervor, dass eine gaußförmige Intensitätsverteilung, bereitgestellt durch brillante Laserstrahlung besonders geeignet ist, da sie, im Gegenteil zu einer Top-Hat-Intensitätsverteilung hohe Intensitäten bei langen Brennweiten erzeugt. Eine gaußförmige Intensitätsverteilung ermöglicht weiterhin eine trennende Bearbeitung mit hohen Aspektverhältnissen bei geringer Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff.

Weiterhin ist nach GUDE, 2015, davon auszugehen, dass zukünftige Werkstoffgruppen Entwicklungen im Bereich Multi-Material-Design nach sich führen. Daher ist es zwingend erforderlich einen Trennprozess zu entwickeln, der auf diese Anforderungen einstellbar ist.

4 Grundlagen zur Strahl-Stoff-Wechselwirkung

In der Literatur wird die Kombination aus Bestrahlung mit Laserstrahlung und Fouriertransformationspektroskopie (FT) als ein übliches Verfahren zur Ermittlung der absorbierten Anteile der einwirkenden Laserstrahlung angegeben, siehe dazu DEVRIENT u. a., 2012; GRÄHLERT, 2002; HÄNSCH, 2001; MAMUSCHKIN u. a., 2013, und RÖSNER u. a., 2009. Dabei erfassen die Arbeiten innerhalb dieser Literaturstellen den durch den Probekörper transmittierten Anteil der einwirkenden Laserstrahlung auf dessen Rückseite. Die Bestimmung der reflektierenden Anteile der Laserstrahlung erfolgt durch die FT im nahen Infrarotbereich (FT-NIR) und im Infrarotbereich (FT-IR). Nach GRÄHLERT, 2002, und HÄNSCH, 2001, ist dieses Vorgehen sinnvoll, da gerade durch den Anteil an Verstärkungsfasern die spektroskopischen Untersuchungen auf die Bestimmung der diffusen Reflexion der Werkstoffoberfläche beschränkt sind. Laut BUSSE, 2005, und FRICK, 2007, ist eine Kombination unterschiedlicher Verfahren zulässig, da der Anteil der Oberflächenreflexion in erster Näherung unabhängig von der Leistungsdichte der auf den Werkstoff einwirkenden Strahlung ist.

4.1 Verwendete Werkstoffe

Als Verstärkungsmaterialien kamen unidirektional angeordnete Glasfasern (GF) und hochmodulige Kohlenstofffasern (CF) vom Typ MJ46 zum Einsatz, die in Matrixsystemen aus Polypropylen oder Epoxydharz (PP, EP) eingebettet sind. Die Bezeichnung PP-W weist auf naturfarbendes Polypropylen und die Bezeichnung PP-S auf rußadditiviertes Polypropylen hin. Um einen faserverbundgerechten und praxisnahen Lagenaufbau der Probekörper zu garantieren sind Mindestabmessungen der Dicke notwendig. Daraus ergeben sich Probekörper mit unidirektionalem Lagenaufbau mit den Abmessungen $40 \times 40 \times (1-4) \text{ mm}^3$ (GF) oder $40 \times 40 \times (0,5-4) \text{ mm}^3$ (CF). In Tabelle 15 in Anhang A 1 sind entsprechende Stoffkennwerte zusammengestellt. Die Berechnungen sowohl der Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda_{\perp}, \lambda_{\parallel}$) als auch der Wärmekapazität (c_p) erfolgen nach der Mischungsregel wie es im Anhang zusammengefasst ist. Weiterhin erfolgte die Bestimmung des Faservolumengehaltes von allen glasfasergefüllten Werkstoffen nach dem Kalcinierungsverfahren entsprechend DIN EN ISO 1172. Der von kohlenstofffaserhaltigen Werkstoffen erfolgte nach DIN EN ISO 2564 mittels chemischer Extraktion. In Abb. 19 und Abb. 20 sind die zunehmende Dichte der Verstärkungsfasern mit steigendem Faservolumengehalt dargestellt.

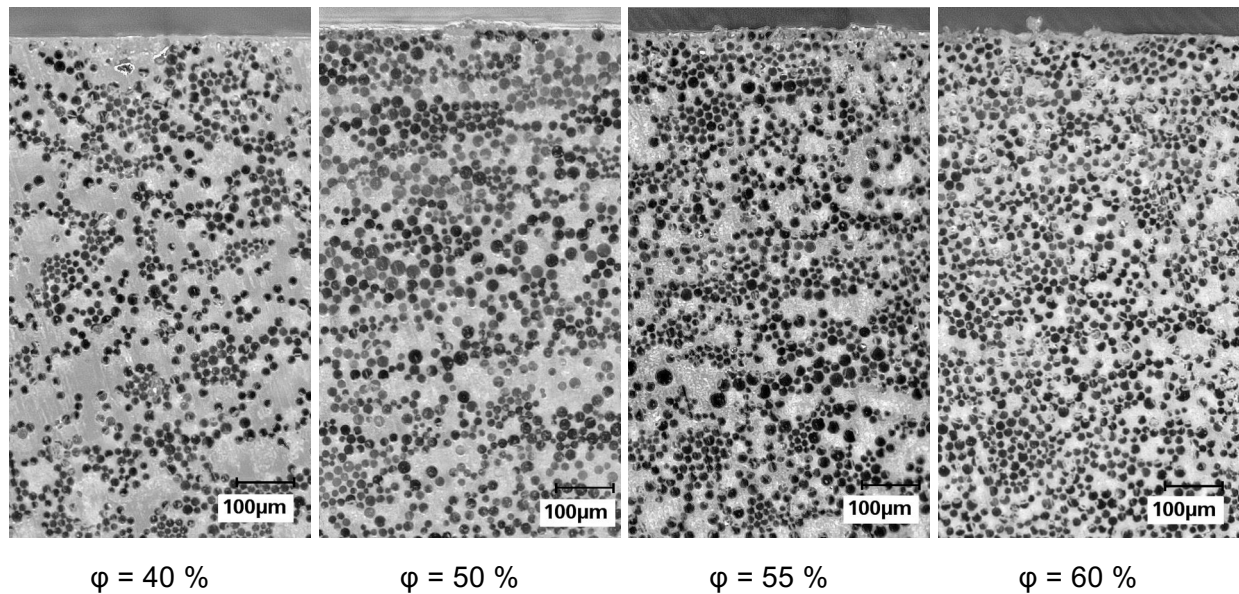


Abb. 19 Lichtmikroskopische Aufnahme von Querschliffen von unidirektional verstärktem GFPP mit ansteigendem Faservolumengehalt φ

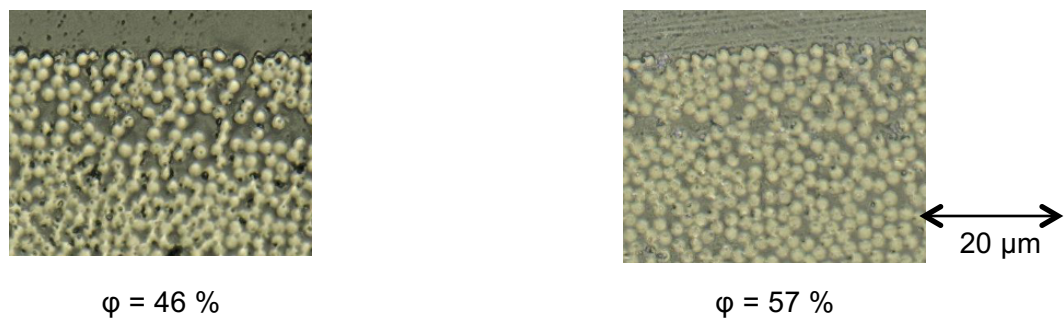


Abb. 20 Lichtmikroskopische Aufnahme von Querschliffen unidirektional verstärkter CFEP mit unterschiedlichem Faservolumengehalt φ

4.2 Einsatz spektroskopischer Messverfahren

GRÄHLERT, 2002, empfiehlt für die Charakterisierung von Polymeren die Bestimmung der transmittierten und gerichtet reflektierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung und für Faser-Kunststoff-Verbunde die diffus reflektierten Anteile. Um das gesamte Spektrum im IR- und NIR-Bereich abzudecken, erfolgte die Charakterisierung der transmittierten und diffus reflektierten Anteile mit den in Tabelle 2 dargestellten Messgeräten.

Tabelle 2 Messtechnik zur Bestimmung der reflektierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung

Messgerät	Strahlquelle	Spektralbereich	Detektorform	α	Referenz
Perkin Elmer Lambda 900	Wolfram	0,78 - 2,85 μm	Ulbrichtkugel	8°	Alu
Perkin Elmer Spektrum 2000	Siliciumcarbid	1,3 - 25 μm	Ulbrichtkugel	12°	Gold

Hervorzuheben sind die ungleichen Strahlquellen und Referenzen, womit eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den Spektralbereichen nur bedingt gegeben und eine Einordnung der Verfahren zueinander unabdingbar ist. Eine grundsätzliche Eignung der Messtechnik wurde innerhalb von Voruntersuchungen festgestellt und die Bestimmung des diffus reflektierten Anteils der einfallenden Strahlung als zielführend erkannt (Abb. 21), siehe FÜRST u. a., 2013.

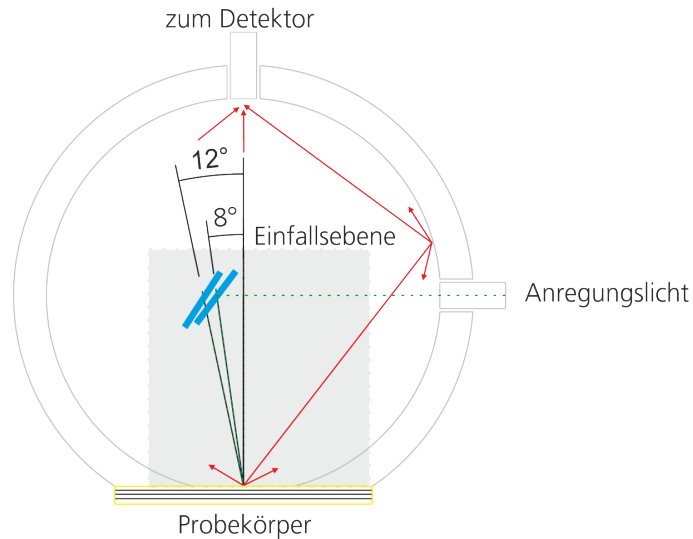


Abb. 21 Prinzipskizze eines Detektors in Form einer Ulbrichtkugel mit Einfallswinkeln für IR ($\alpha = 8^\circ$) und NIR ($\alpha = 12^\circ$)

Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den Messgeräten abzuschätzen, wird der Überlappbereich der Spektren betrachtet. Die in Abb. 22 dargestellten Kurven zeigen den Überlappbereich der gemessenen diffusen Reflexionen an exemplarischen Probekörpern (GFPP-W $\varphi = 40\%$ und CFEP $\varphi = 46\%$). Obwohl sich die Messprinzipien hinsichtlich der Referenz (Tabelle 2) und des Einstrahlwinkels unterscheiden (Abb. 21), ist eine ausreichend gute Übereinstimmung der Spektren im Überlappbereich festzustellen.

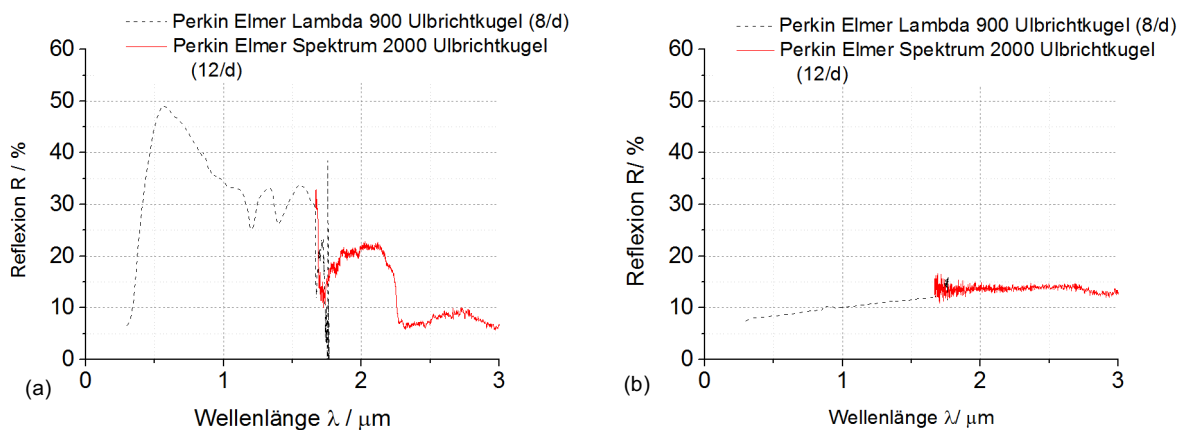


Abb. 22 Einordnung der Messverfahren bei GFPP-W (a), $\varphi = 40\%$ und CFEP (b), $\varphi = 46\%$, Detektor Ulbrichtkugel

Im Falle von CFEP und GFPP-W gehen BOLEY & RUBENCHIK, 2013, und FÖRSTER, 2014, von stark absorbierenden Materialien aus, was in Voruntersuchungen übereinstimmend nach FÜRST u. a., 2013, nachzuweisen ist. Aus diesem Grund wird von der Bestimmung der transmittierten Anteile der einwirkenden Strahlung mit Hilfe von FT-Verfahren abgesehen. Die Bestimmung der transmittierten Anteile der auf GFPP-S einwirkenden Strahlung führte ebenfalls, aufgrund der Probendicke und der auftretenden Streueffekte, zu keinen verwertbaren Messergebnissen.

4.3 Einsatz von Messlasern

Entsprechend den Vorbetrachtungen und den Mindestabmessungen der verwendeten Probekörper können spektroskopische Messverfahren nicht das gesamte Absorptionsverhalten der Materialien abdecken. Aus diesem Grund erfolgte die Bestimmung von transmittierten Anteilen der einwirkenden Laserstrahlung mit Hilfe der Bestrahlung mit Laserstrahlquellen geringer Leistung. Dabei fand ein Aufbau wie in Abb. 23 Verwendung. Zum Einsatz kamen Laser im NIR-Bereich mit der Wellenlänge $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ und im IR-Bereich mit einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

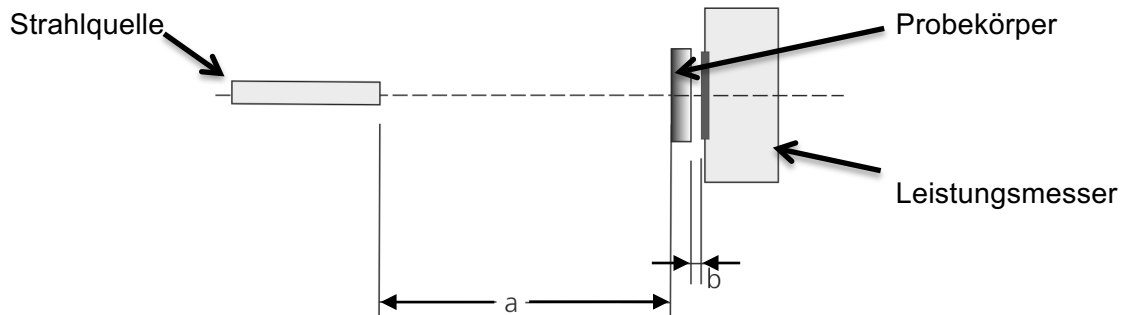


Abb. 23 Prinzipskizze Messaufbau

Ein Spotdurchmesser von $d_f = 5 \text{ mm}$ beider Strahlquellen schaffte vergleichbare Messbedingungen. Eine Angleichung der Intensitätsprofile der eingesetzten Laserstrahlung wurde nicht vorgenommen. Um eine Veränderung des Aggregatzustandes der Matrixwerkstoffe zu verhindern erfolgte die Bestrahlung mit einer Laserleistung von $P_L = 0,5 \text{ W}$. Dies erschien als sinnvoll, da der Absorptionsgrad laut FRICK, 2007, und KLEIN, 1990, temperaturabhängig ist. Weiterhin stellt FRICK, 2007, Veränderungen der Absorptionseigenschaften in Folge des Aufschmelzens von Matrixmaterial fest.

Tabelle 3 Verwendete Systemtechnik Messlaser

	Eigenschaften
Strahlquelle NIR	$\lambda = 1,07 \mu\text{m}$; $P_{L\text{max}} = 25 \text{ W}$; $M^2 < 1,1$
Strahlquelle IR	$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$; $P_{L\text{max}} = 10 \text{ W}$; $M^2 < 1,2$
Leistungsmesser	$\varnothing_{\text{Apertur}} = 19 \text{ mm}$

Tabelle 4 Parameter der Versuchsaufbaus

Parameter	NIR	IR
a [mm]	700	
b [mm]	5	
P_L [W]	0,5	
d_f [mm]	5	
t_B [sec]	60	

4.4 Darstellung der Ergebnisse

Die aufgenommenen Daten gestatten eine phänomenologische Betrachtungsweise der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Material. Die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen und die der Bestrahlung mit Laserstrahlquellen werden gemeinsam betrachtet, da innerhalb der Voruntersuchungen eine Vergleichbarkeit der Messprinzipien nachgewiesen werden konnte. In Abb. 24 sind die Anteile der diffus reflektierten Strahlung bei den Wellenlängen $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ (NIR) und $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (IR) dargestellt.

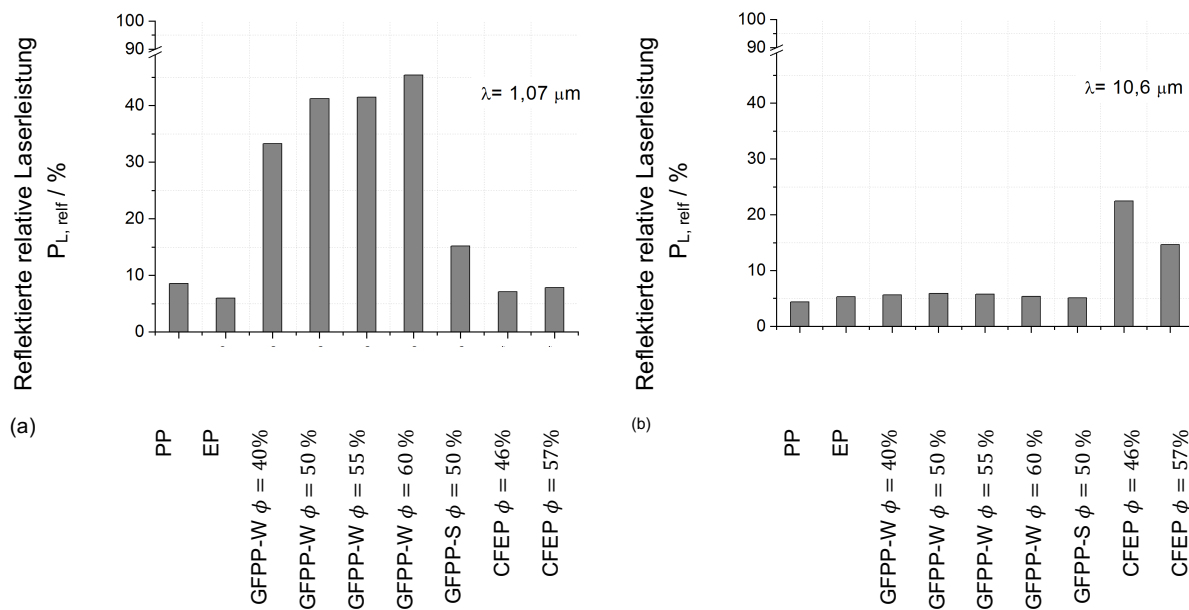


Abb. 24 Diffuse, reflektierte relative Laserleistung in Abhängigkeit von Verstärkungsmaterial und Faservolumengehalt, für Strahlen im NIR- (a) und IR-Bereich (b)

Die Ergebnisse im NIR-Bereich (Abb. 24, a) zeigen, dass der diffus reflektierte Anteil des eingestrahnten Lichts an glasfasergefüllten Probekörpern mit steigendem Faservolumengehalt zunimmt. Dagegen wird nur ein geringer Anteil des eingestrahnten Lichts an reinen PP und EP reflektiert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ hauptsächlich am Verstärkungsfaseranteil reflektiert wird und dieser Anteil durch die Matrix kaum abgeschwächt wird. Übereinstimmend dazu nimmt der transmittierte Anteil der einwirkenden Strahlung bei steigendem Faservolumengehalt und zunehmender Materialdicke ab (Abb. 25).

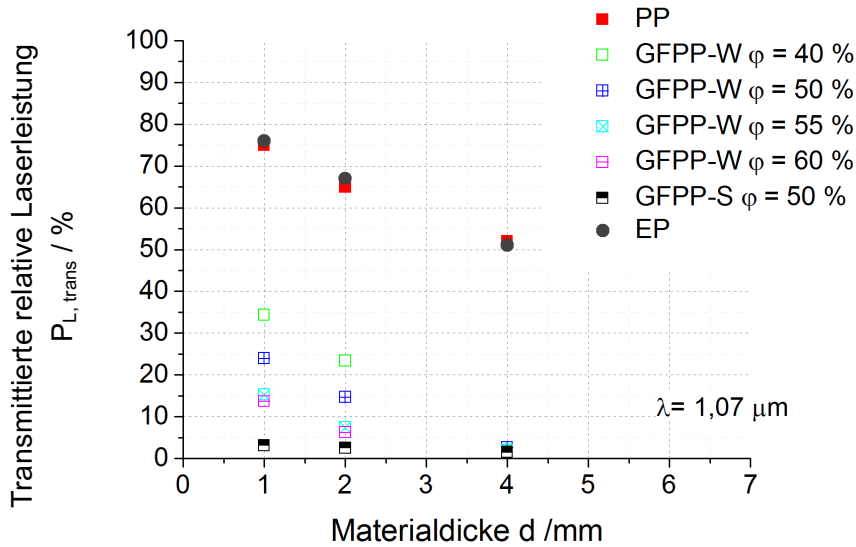


Abb. 25 Experimentell bestimmte, dickenabhängig transmittierte relative Laserleistung in Abhängigkeit von Verstärkungsmaterial und Faservolumengehalt für Strahlen im NIR-Bereich

Reflexion findet hauptsächlich an den Faseroberflächen statt, weshalb von einer Erhöhung der reflektierenden Anteile bei Erhöhung des Faservolumengehaltes auszugehen ist. Deutlich niedrigere Werte für die reflektierten und transmittierten Anteile der einfallenden Laserleistung nimmt der Werkstoff mit schwarz eingefärbter Matrix an. Nach STOCK u. a., 2014, ist von einer Steigerung der absorbierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung durch eine Additivierung des Matrixmaterials im Werkstoff auszugehen. Sofern Kohlenstofffasern als Verstärkungsmaterial vorliegen sind nur geringe reflektierte Anteile messbar. Bestätigend wird in der Literatur von BOLEY & RUBENCHIK, 2013; FÖRSTER, 2014; FREITAG, 2013, und WU u. a., 2012, von einem hohen Anteil an Streueffekten innerhalb der ersten 14 μm der Materialdicke ausgegangen, die eine Durchdringung der Strahlung verhindert. Mit Hilfe der transmittierten und reflektierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung kann der absorbierte Anteil ermittelt werden:

$$P_{Labs} = 100 \% - P_{Lref} - P_{Ltrans} \quad (9)$$

Die absorbierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung sind in Abb. 26 für Laserstrahlung mit der Wellenlänge $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ und in Abb. 27 für Laserstrahlung mit der Wellenlänge $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ dargestellt. Entsprechend der Verringerung der transmittierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung im NIR- Bereich (Abb. 25) ergeben sich erhöhte Anteile der absorbierten Laserstrahlung (Abb. 26). Ein höherer Faservolumengehalt wirkt sich positiv auf die absorbierte Laserleistung aus. Als unabhängig von der Dicke und des Faservolumengehaltes der Werkstoffe erweisen sich dagegen Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde.

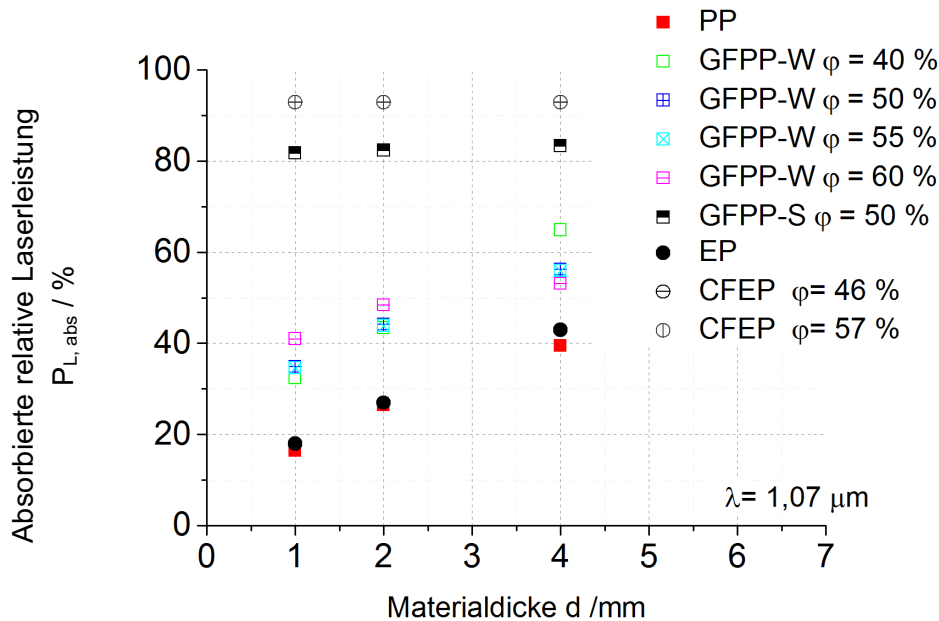


Abb. 26 Experimentell bestimmte, dickenabhängig absorbierte relative Laserleistung in Abhängigkeit von Verstärkungsmaterial und Faservolumengehalt für Strahlen im NIR-Bereich

Die transmittierten Anteile der einfallenden CO₂-Laserstrahlung lagen unterhalb der Ansprechschwelle des verwendeten Leistungsmessers. Aus dem Grund sind sie nicht dargestellt. Abb. 24 zeigt, dass auch die reflektierten Anteile der einwirkenden Strahlung nicht von der Faserfüllung oder deren Anteil im Werkstoff abhängig sind. Dieses Verhalten spricht dafür, dass die Strahlung hauptsächlich mit der Polymermatrix wechselwirkt. KLEIN, 1990, gibt an, dass glasfasergefüllte Polymerfolien die Strahlung schon ab Materialstärken von 350 μm vollständig absorbieren. Werden Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde bestrahlt, so ergibt sich ein geringfügig erhöhter Anteil an diffus reflektierter Strahlung. Die Darstellung der absorbierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung (Abb. 27) zeigt für die Bestrahlung mit dem CO₂-Laser keine Abhängigkeit von der Materialdicke und dem Faservolumengehalt. Ausschließlich die höheren Anteile der Reflexion an oberflächennaher Kohlenstofffaser verringern den Absorptionsgrad von Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden geringfügig. Dennoch kann hier nicht zweifelsfrei zwischen Absorption an den Verstärkungsfasern oder an den verwendeten polymeren Matrixsystemen unterschieden werden.

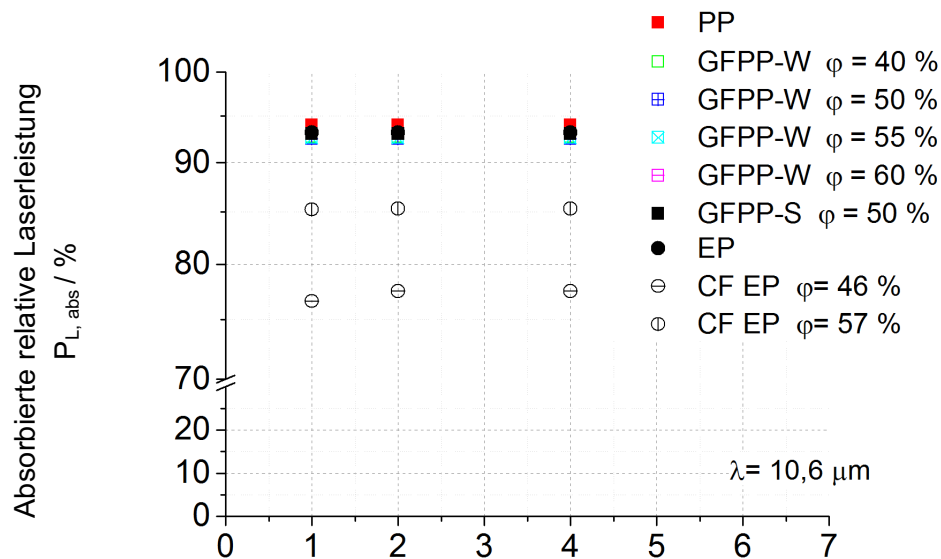


Abb. 27 Experimentell bestimmte, dickenabhängig absorbierte relative Laserleistung in Abhängigkeit von Verstärkungsmaterial und Faservolumengehalt für Strahlen im IR-Bereich

Tabelle 5 Experimentell bestimmte, dickenabhängige absorbierte Laserleistung in Abhängigkeit von Verstärkungsmaterial und Faservolumengehalt

Werkstoff	φ in %	$P_{\text{Labs}} (1,07 \mu\text{m})$ in %				$P_{\text{Labs}} (10,6 \mu\text{m})$ in %
		0,5	1	2	4	1
PP	0		16	26	39	94
EP	0		18	27	43	93
GFPP	40		32	43	64	93
GFPP	50		35	44	65	93
GFPP	55		34	44	56	93
GFPP	60		41	48	53	93
GFPP-S	50		82	82	83	93
CFEP	46	92	92	92	92	77
CFEP	57	92	92	92	92	85

5 Motivation und Aufgabenstellung

Der Einsatz des Lasers als Werkzeug in Prozessketten zur Herstellung von Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden ist derzeit nur in engen Grenzen möglich. Hauptgründe dafür sind die stark voneinander abweichenden optischen und thermischen Eigenschaften der Einzelkomponenten des Werkstoffs. Aus dem Stand der Technik sind Remote-Laserstrahlschneidprozesse für Faserkunststoffe bekannt. KLOTZBACH u. a., 2011b, und STOCK u. a., 2012, stellen dar, dass aufgrund der systembedingt sehr hohen Dynamiken die Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Werkstoff deutlich minimiert werden kann und somit die thermische Last auf das Material minimiert ist. Um die Wechselwirkungszeit noch weiter zu verringern, eignen sich Strahlquellen, die gepulste Strahlung emittieren. Jedoch erscheinen diese Systeme, aufgrund des geringen Abtragvolumens nach KLOTZBACH u. a., 2014, und ONUSEIT u. a., 2015, als unattraktiv für ein industriell anwendbares thermisches Trennen. Daher haben sich kontinuierlich betriebene, brillante Festkörper- und CO₂-Laser als zielführend erwiesen. Weiterhin geht aus dem Stand der Technik hervor, dass Verfahrensgrenzen hinsichtlich der optischen Eigenschaften der Werkstoffe und dessen jeweiligen Einzelkomponenten gegeben sind. Beispielsweise wird in STEYER, 2013, das laserunterstützte Tapelegeverfahren für Kohlenstoffasertapes mit Diodenlaserstrahlung dargestellt. Hier wird die Strahlung genutzt, um die thermoplastische Matrix indirekt über die, von den Kohlenstofffasern absorbierte und in Wärme umgesetzte Laserstrahlung aufzuschmelzen. Liegen dagegen Glasfasern vor, kann das Verfahren nicht angewendet werden, da die Absorption der Diodenlaserstrahlung in der Glasfaser nicht ausreicht, um diese ausreichend zu erwärmen. STOCK u. a., 2012, zeigen, wie die optischen Eigenschaften von Kohlenstofffaser und Matrixmaterial durch eine Additivierung der Polymermatrix angleichbar sind. Dieser Ansatz erscheint aber als unattraktiv, da die eingebrachten Additive einen Zusatzwerkstoff darstellen, der Einfluss auf die Eigenschaften des Matrixmaterials haben kann.

Somit ergibt sich als übergeordnetes Ziel der vorliegenden Dissertation die Entwicklung eines Laserstrahlschneidverfahrens für Faser-Kunststoff-Verbunde, basierend auf dem Remote-Laserstrahlschneiden, unter Beachtung der thermischen und optischen Eigenschaften des Werkstoffes. Hierfür soll ein grundlegendes Verständnis der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Werkstoff ausgearbeitet werden. Daher wird in den experimentellen Vorbetrachtungen auf das Absorptionsverhalten der Werkstoffe in Abhängigkeit ihrer Materialeigenschaften bei Bestrahlung mit Wellenlängen von $\lambda = 10,6$ und $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ eingegangen. Anhand der hier bestimmten absorbierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung können die zum Abtragen erforderlichen materialspezifischen Laserleistungen bestimmt werden, die als Startbedingung und Kontrolle für die nachfolgenden Untersuchungen dienen.

Ausgehend von den Grundlagenuntersuchungen ergibt sich die Notwendigkeit der Kombination von Laserstrahlung mit beiden Wellenlängen. Dazu ist im Rahmen dieser Arbeit eine Optik zu entwickeln, die eine simultane Fokussierung und Ablenkung ermöglicht. Dadurch bildet sich ein neues Parameterfenster zum Laserstrahlschneiden. Innerhalb dessen die experimentelle und analytische Beschreibung des Abtragverhaltens der Werkstoffe erfolgt. Dabei sind relevante Prozessparameter in Abhängigkeit der Materialeigenschaften und der eingesetzten Laserstrahlung mit den oben genannten Wellenlängen und deren Kombinationsmöglichkeiten zu ermitteln.

6 Systemtechnik zur Strahlkombination und -Manipulation

Die Überlagerung von Laserstrahlung mit unterschiedlichen Wellenlängen ist hauptsächlich aus dem Bereich Fügen von Kupfer und Aluminium, also von Werkstoffen, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, nach BERGMANN u. a., 2013; STEEN, 1998; TRAUTMANN, 2009, und WITZENDORFF u. a., 2013, bekannt. Hier ist das grundsätzliche Wirkprinzip die Verlängerung der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahlung und Werkstoff. Aufgrund der Wärmeleitung der Werkstoffe erfolgt ein Abtransport der in Wärme umgesetzten absorbierten Laserleistung von der Wechselwirkungszone in Richtung des unbehandelten, also noch kalten Werkstoffes. Die zusätzlich einwirkende Laserstrahlung erwärmt einen die Fügestelle umgebenden Bereich derart, dass das Erstarren der Schmelze verlangsamt, und so weniger oder gar keine Schweißfehler in Form von Wärmerissen und Poren auftreten. Typische Strahlquellen, die bisher miteinander kombiniert werden, sind Festkörperlaser, die gepulste Strahlung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ emittieren, und kontinuierlich betriebene Diodenlaser mit Wellenlängen im Bereich von $\lambda = 0,808 - 0,98 \mu\text{m}$. Hier werden die unterschiedlichen Strahlqualitäten der Laserstrahlquellen ausgenutzt, um definierte Intensitätsverteilungen auf dem Werkstoff zu generieren. (BERGMANN u. a., 2013; KRONTHALER u. a., 2011; OKAMOTO u. a., 2013; TRAUTMANN, 2009; WITZENDORFF u. a., 2013)

Innerhalb der trennenden Bearbeitung von Werkstoffen findet die hybride Bearbeitung nur geringe Verbreitung. OKAMOTO u. a., 2013, wenden ein hybrides Verfahren für die abtragende und trennende Bearbeitung von Halbleitergehäusen an. Der hier bearbeitete Werkstoff besteht aus einem mit Siliziumdioxid gefüllten Epoxydharz und zum anderen aus glasfasergefülltem Epoxydharz. Zielführend ist demnach die Verwendung von Laserstrahlung mit der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ für die Bearbeitung des beschichteten glasfasergefüllten Epoxydharzes. Hier führt die höhere Photonendichte der Strahlung zu einer verminderten wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff. Zum Trennen des Grundwerkstoffes findet Laserstrahlung mit der Wellenlänge $\lambda = 1,09 \mu\text{m}$ Einsatz. Nach dieser Literaturstelle weist diese Laserstrahlquelle eine deutlich höhere Strahlqualität auf und ist daher besser zu fokussieren, womit eine höhere Intensität zur Verfügung steht. Die Bearbeitung eines Faser-Kunststoff-Verbundes, in diesem Fall Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund, mittels hybrider Laserstrahlung wird von HILLMAN u. a., 2015, beschrieben. Hier kommen drei Strahlquellen zum Einsatz. Zwei CO_2 -Laser mit Laserleistungen von jeweils $P_L = 75 \text{ W}$ ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) und $P_L = 50 \text{ W}$ ($\lambda = 9,3 \mu\text{m}$) und ein Festkörperlaser mit einer Leistung von $P_L = 40 \text{ W}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. Die Einzelstrahlen sind zueinander achsparallel ausgerichtet und derart geformt, dass sie in einem Punkt fokussiert sind. Die Autoren gehen damit auf die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften der Einzelwerkstoffe ein, eine Angabe über die Durchmesser der Strahlung in der Strahltaile und ob die jeweiligen Anteile der Einzellaserstrahlung variabel sind fehlen jedoch.

6.1 Art der Überlagerung von Laserstrahlung aus zwei Strahlquellen

Grundsätzlich sind unterschiedliche Methoden zur Überlagerung von Strahlung mit abweichenden Wellenlängen bekannt. Bei der so genannten off-Axis-Anordnung ist je ein Bearbeitungskopf pro Wellenlänge vorhanden, die derart angeordnet sind, dass sich die Foki beider Einzelstrahlen, nach BERGMANN u. a., 2013, in einem Punkt überlagern. Dies bietet die Mög-

lichkeit, die jeweiligen optischen Konfigurationen so auszulegen, dass es für die entsprechende zugehörige Wellenlänge optimal ist. Allerdings führt diese Anordnung in jedem Fall zu einer schräg auf das Werkstück einfallenden Laserstrahlung. Für eine trennende Bearbeitung mit hohen Aspektverhältnissen erscheint diese Anordnung nicht geeignet, da davon ausgegangen werden kann, dass sich die Schrägstellung des Laserstrahles auf die Ausrichtung der Schneidkerbe in Dickenrichtung des zu trennenden Werkstoffes abbildet. Dagegen bietet die axiale Anordnung von Laserstrahlung mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen ein hohes Potenzial und wird innerhalb dieser Arbeit aufgegriffen. Die betreffenden Literaturstellen stimmen darin überein, dass unter Nutzung eines wellenlängenselektiven Spiegels eine axiale Überlagerung der Strahlung beider Strahlquellen prinzipiell möglich ist. Vergleichbare Anwendungen sind auch im Bereich der Diodenlaser bekannt. Nach POPRAWA, 2005, erfolgt eine Überlagerung von Laserstrahlung mittels wellenlängenselektiver Spiegel zur Erhöhung der Ausgangsleistung unter Beibehaltung der Strahlqualität. Weiterhin ist den betreffenden Literaturstellen gleich, dass der Werkstoff des optischen Elementes und dessen einseitig aufgebrauchte reflektierende Schicht derart ausgewählt ist, dass er für die Laserstrahlung der langen Wellenlänge hochtransmitiv und für die mit der kürzeren Wellenlänge reflektiv ist. Für den in dieser Arbeit verwendeten wellenlängenselektiven Spiegel gilt eine Transmission von CO₂-Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ von 98,5 % und für die Reflexion der Festkörperlaserstrahlung von $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ von 99 %. Das Reflexionsmaximum liegt bei einem Einfallswinkel von 14° (Abb. 28, b).

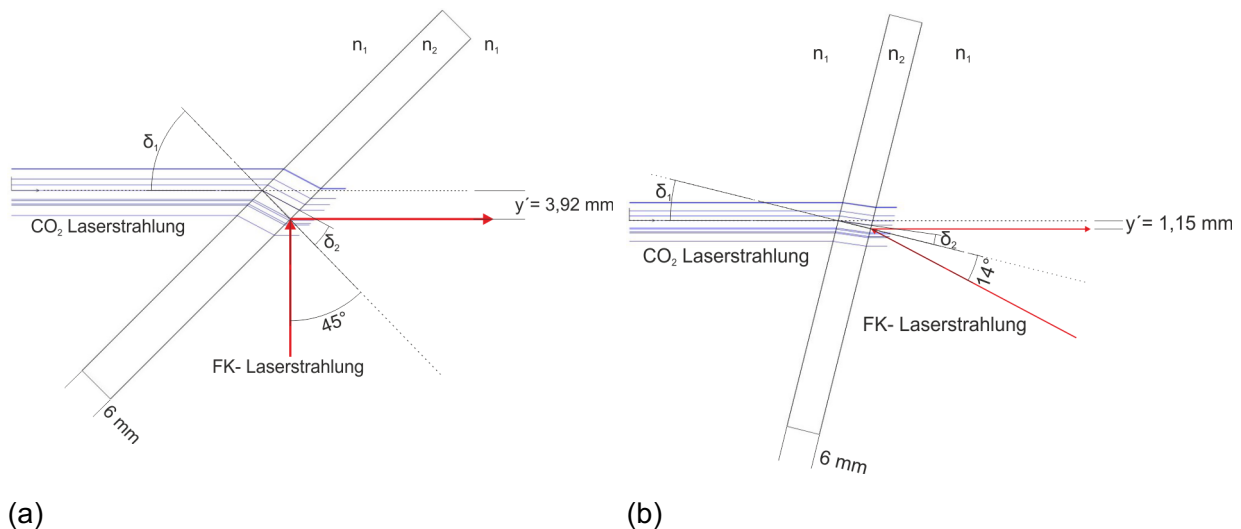


Abb. 28 Strahlverlauf von transmittierter CO₂-Laserstrahlung und Reflexion der einfallenden Festkörperlaserstrahlung unter einem Winkel von 45° (a) und 14° (b)

Die Wahl eines spitzen Einfallswinkels der zu reflektierenden Strahlung ist anhand der mit der Simulationsumgebung ZEMAXTM berechneten Strahlverläufe in Abb. 28 nachzuvollziehen. Nach dem snelliuschen Gesetz ist die Änderung der Ausbreitungsrichtung der Strahlung an den Grenzflächen des Spiegels zu beachten:

$$n_1 \cdot \sin \delta_1 = n_2 \cdot \sin \delta_2 \quad (10)$$

Hier sind mit n_1 und n_2 die Brechungsindizes der jeweiligen Medien und mit δ_1 der Winkel des einfallenden Strahles gegenüber dem Lot der Oberfläche und mit δ_2 der Winkel des gebrochenen Strahles gegenüber dem Lot der Oberfläche gemeint. Für eine Reflexion der Festkörperlaserstrahlung unter einem Winkel von 45° (Abb. 28, links) und mit dem gegeb-

nen Brechungsindex $n_2 = 2,4$ von ZnSe, nach ICLO, 2015, geht ein Versatz der optischen Achse des nichttransmittierten zum transmittierten Strahl von $\hat{y} = 3,92 \text{ mm}$ einher. Um die Strahlung mit den unterschiedlichen Wellenlängen so zu überlagern, dass deren optische Achsen deckungsgleich angeordnet sind, würde ein Aufbau mit einem derartigen Spiegel einen großen Justieraufwand der restlichen Strahlableitungselemente nach sich führen. Aus diesem Grund ist eine Minimierung des Einfallswinkels δ_1 der zu transmittierenden Strahlung anzustreben. Durch die Wahl einer reflektierenden Schicht, deren Reflexionsmaximum bei einem Einfallswinkel von 14° liegt, kann dieser Versatz der optischen Achsen auf $\hat{y} = 1,15 \text{ mm}$ minimiert werden. Die damit einhergehenden Randbedingungen, gegeben durch den Einfallswinkel der Festkörperlaserstrahlung, führen zu einem prinzipiellen Aufbau des Kombinationsmoduls nach Abb. 29.

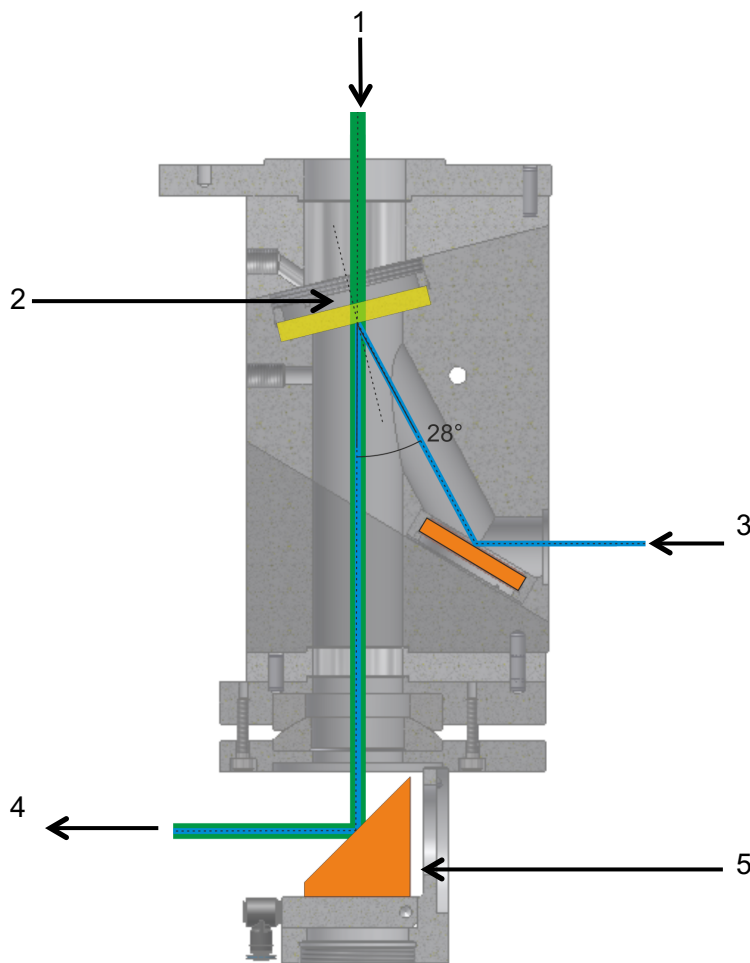


Abb. 29 Prinzipskizze des Kombinationsmoduls mit angedeutetem, nichtmaßstäblichem Strahlverlauf, CO₂-Laserstrahlung (1), dichroitischer Spiegel (2), Festkörperlaserstrahlung (3), kombinierte Laserstrahlung (4) und Fokussierspiegel (5)

6.2 Gesamtaufbau

Die für die experimentellen Untersuchungen eingesetzte Systemtechnik umfasst die folgenden wesentlichen Komponenten (Abb. 30):

- Festkörperlaserstrahlquelle,
- Kollimation für die Festkörperlaserstrahlung,
- CO₂-Laserstrahlquelle,
- X-Y-Strahlableiteneinheit (Scanner),
- Strahlkombinationsmodul mit Fokussierspiegel für die kombinierte Laserstrahlung und
- je ein adaptiver Spiegel pro Strahlquelle.

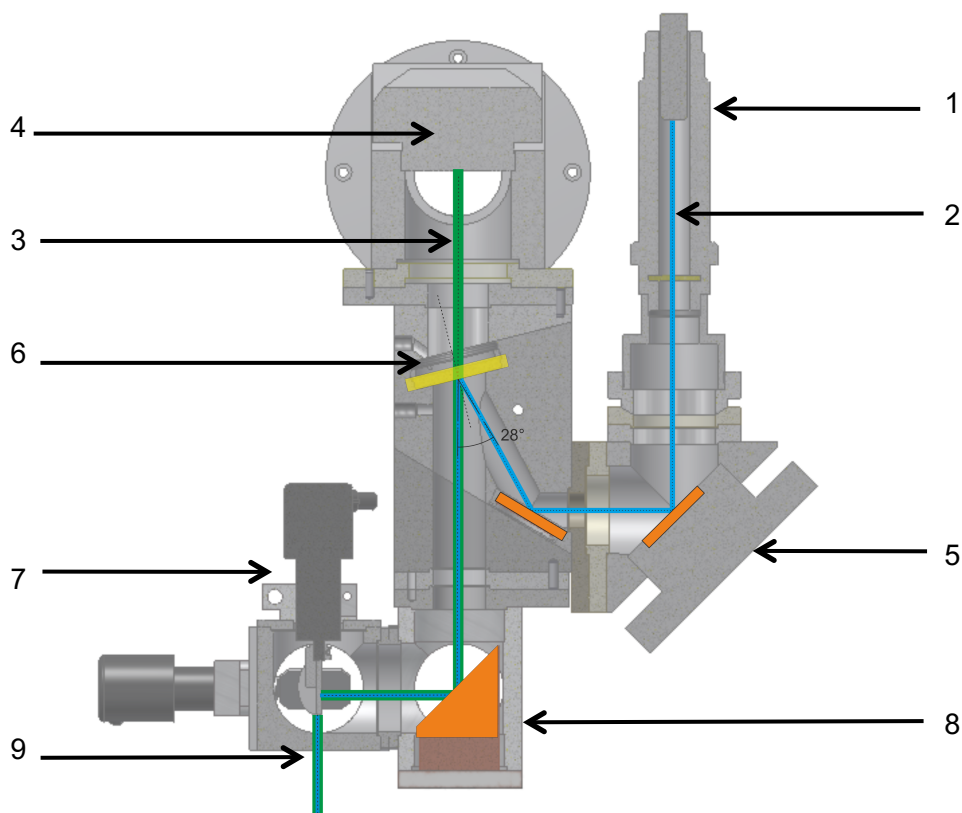


Abb. 30 Gesamtaufbau Strahlkombinationsmodul mit Kollimation (1), FK-Laserstrahl (2), CO₂-Laserstrahl (3), adaptiver Spiegel CO₂-Laserstrahl (4), adaptiver Spiegel FKL (5), dichroitischer Spiegel (6), X-Y-Strahlableiteneinheit (7), Fokussierspiegel (8), fokussierter, kombinierter Laserstrahl (9)

Die Ausrichtung der optischen Achsen der Strahlung gegenüber den Achsen der optischen Elemente innerhalb des Kombinationsmoduls und der Strahlableiteneinheit erfolgt durch definiertes Verkippen von reflektierenden Elementen gegenüber der optischen Achse der jeweiligen Strahlung. Dieses wird bei der CO₂-Laserstrahlung über zwei, dem Kombinationsmodul vorgelagerten Spiegeln ermöglicht. Die Ausrichtung der Festkörperlaserstrahlung erfolgt durch Verkippen des Kollimators und eines Spiegelelementes gegenüber der optischen Achse der Festkörperlaserstrahlung. Mit den dargestellten Maßnahmen ist es nun möglich, die Strahlung beider Strahlquellen derart zu formen und auszurichten, dass die

Fokuslagen in jeglicher Hinsicht horizontal und auch vertikal übereinander gelegt werden können. Ausgehend vom Kombinationsmodul erfolgt die Fokussierung der kombinierten Laserstrahlung mit Hilfe eines für beide Wellenlängen geeigneten gekühlten parabolischen Spiegels, der die Strahlung um 45° reflektiert und der Strahlableitung zuführt (Abb. 30). Das dafür verwendete Spiegelmaterial ist unbeschichtetes Kupfer. Nach STEEN & MAZUMDER, 2010, beträgt der Anteil der reflektierten Strahlung mit der Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ 95 %. Die Strahlung mit der Wellenlänge $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ wird zu 99 % reflektiert. Auf die Funktionsweise einer solchen Strahlableitung wurde bereits in Kapitel 3 eingegangen. Die Verwendung einer fokussierenden Optik nach der Strahlableitung, wie sie in LÜTKE, 2011, zum Einsatz kommt, ist in dieser Arbeit nicht zielführend. F-Theta-Linsen können zwar die durch die Schrägstellung des Laserstrahls veränderten Brennweiten ausgleichen sowie den auf die Linse einfallenden schrägen Strahl derart ablenken, dass er in einem Winkel von 90° auf den Werkstoff auftritt, allerdings würden sich dann für die kombinierte Strahlung in vertikaler Richtung je eine Fokuslage für Strahlung mit $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ und $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ergeben. KRONTHALER u. a., 2011, verwenden zur Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Fokuslage eine bifokale fokussierende Linse. Eine derartige transmissive fokussierende Optik kann aber nicht nach der Strahlableitung zum Einsatz kommen, da keine Relativbewegung zwischen Optik und Strahlung möglich ist. Allerdings ist der Einsatz als fokussierendes Element vor der Strahlableitung möglich. Jedoch wird in dieser Arbeit davon Abstand genommen, da ein geringer Anteil der einfallenden Laserleistung im Linsenwerkstoff absorbiert wird und daher von einer Erwärmung des optischen Elementes auszugehen ist. Nach LITFIN, 2005, ist der Brechungsindex von transmissiven Optiken temperaturabhängig. Daher ist von einer Verschiebung der Fokusposition während des Prozesses auszugehen. Die Fokussierung und Ablenkung der Laserstrahlung mit einem Parabolspiegel erscheint für die in dieser Arbeit definierten Ziele als zweckmäßig (Abb. 30). Hier ist aber besonders auf die Justagemöglichkeit des Parabolspiegels gegenüber der einfallenden Laserstrahlung zu achten. Durch die Justage sind Einflüsse auf die Abbildungsqualität im Fokus infolge einer astigmatischen Differenz der beiden senkrecht zueinander stehenden tangentialen und sagittalen Brennlinien zu minimieren. Dazu ist eine Justagemöglichkeit des Parabolspiegels gegenüber der einfallenden Strahlung erforderlich. Abb. 31 zeigt die Strahlpropagation vor und nach der Justage des Parabolspiegels. Gleichzeitig sind deutlich kleinere Durchmesser in der Strahltaile zu erreichen, denn die Schärfe der Abbildung wird deutlich gesteigert.

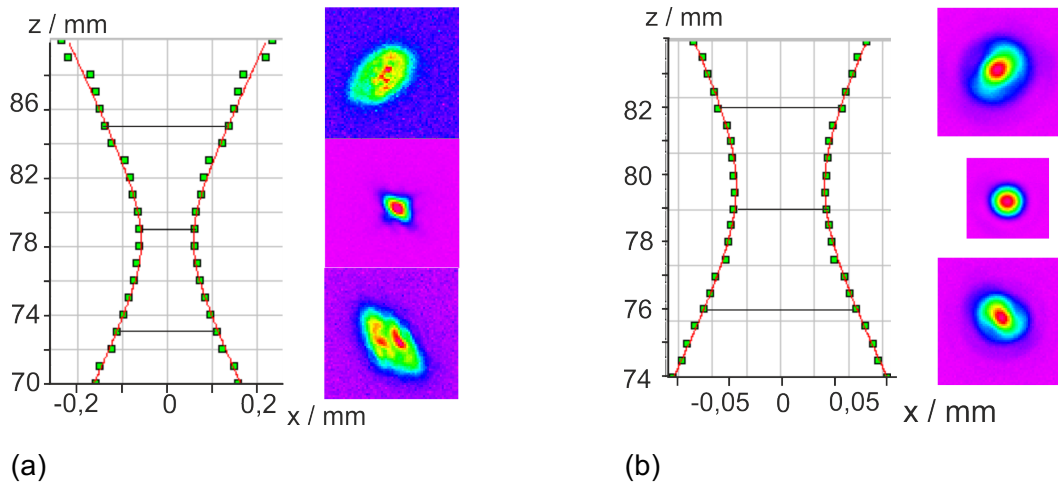


Abb. 31 Strahlpropagation vor (a) und nach der Justage des Parabolspiegels (b) für Festkörperlaserstrahlung mit $P_{L,FKL} = 100 \text{ W}$

Weitere strahlformende Elemente sind die Kollimation der Festkörperlaserstrahlung und das Teleskop im Strahlengang des CO_2 -Laserstrahles. Die Kombination von Teleskop und fokussierendem Parabolspiegel erlaubt die Einstellung eines definierten Fokusradius und der Fokuslage des CO_2 -Laserstrahles. Der Rohstrahldurchmesser des CO_2 -Laserstrahles ergibt sich nach dem Teleskop zu $D_{FKL} = 12,5 \text{ mm}$. Genauso liefert die Kombination aus Kollimator und fokussierendem Parabolspiegel die Einstellung eines definierten Fokusradius und der Fokuslage der Festkörperlaserstrahlung. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass möglichst hohe Intensitäten zu einem hohen Abtrag bei gleichzeitig minimierter wärmebeeinflusster Zone, infolge von kurzen Wechselwirkungszeiten führen. Typische Fokusradien für Festkörperlaserstrahlung liegen dabei bei $d_{f,FKL} \approx 50 - 80 \mu\text{m}$. Weiterhin ist bekannt, dass ein möglichst großer Rohstrahldurchmesser zu einem kleinen Fokusradius führt. Der in dieser Arbeit verwendete Festkörperlaser ist mit einer Lichtleitfaser mit dem Durchmesser $D_K = 20 \mu\text{m}$ ausgestattet. Der verfügbare Kollimator mit der längsten Brennweite von $f_K = 160 \text{ mm}$ führt zu einem Rohstrahldurchmesser von $D_{FKL} = 9,2 \text{ mm}$. Durch Verwendung einer festen Brennweite des Fokussierspiegels ist weiterhin davon auszugehen, dass die vertikalen Fokuslagen in Abhängigkeit der Wellenlänge unterschiedliche Werte annehmen. Hier soll die Verwendung von adaptiven reflektierenden Elementen eine Verstellung der jeweiligen Fokuslagen vertikal ermöglichen. Die prinzipielle Wirkungsweise ist in Abb. 32 dargestellt. Es wird eine Membran, die die einfallende Strahlung unter einem Winkel von 45° zu deren optischen Achse reflektiert, so mit Luftdruck beaufschlagt, dass sie die Strahlung entweder aufweitet oder fokussiert. Über ein elektronisch betätigtes Druckregelventil und einen Steuerrechner kann somit auf die vertikale Fokuslage Einfluss genommen werden.

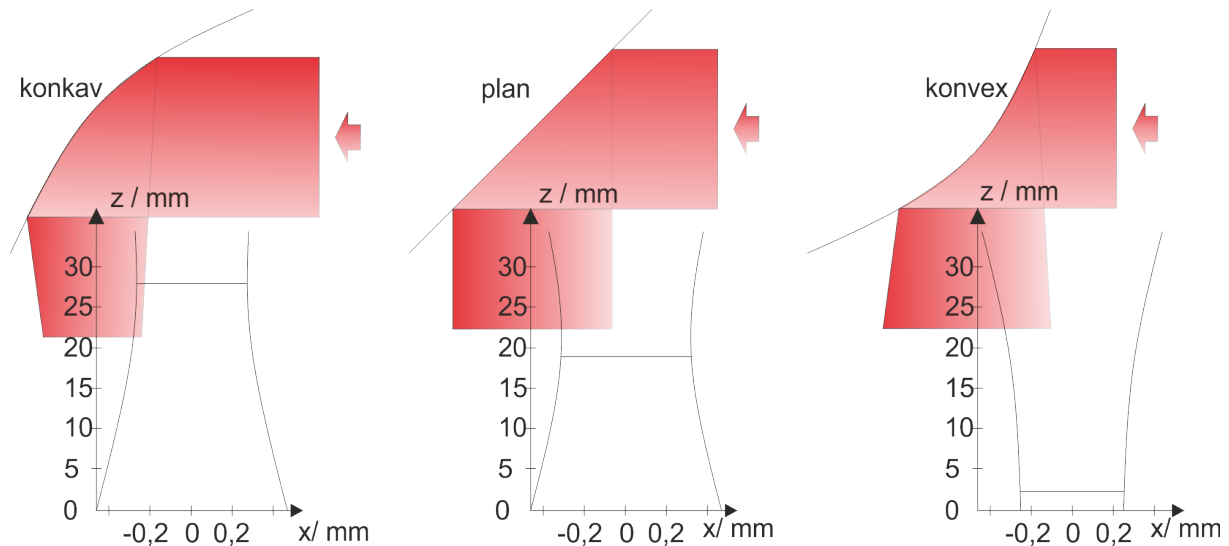


Abb. 32 Wirkprinzip eines adaptiven reflektierenden Elements

Die eingesetzten adaptiven reflektierenden Elemente erlauben einen maximalen Hub von $\Delta z_{f,max} = 26 \text{ mm}$. Die berechneten Strahldurchmesser führen zu einem Unterschied in der Brennweite von $z_f = 8 \text{ mm}$, der mit dem maximalen Hub auszugleichen ist.

6.3 Simulation des Strahlverlaufes innerhalb des Kombinationsmoduls

Für die Bearbeitung von Werkstoffen ist die Strahlqualität und der Durchmesser der Strahltafle der Laserstrahlung von entscheidendem Interesse. Einfluss darauf haben maßgeblich die Güte der optischen Komponenten und deren Ausrichtung zueinander. Die Simulation dient der Bestimmung der erreichten Qualität des gewählten Aufbaus und des zu erwartenden Fokusbereichs der jeweiligen Einzellaserstrahlung. Dies erfolgt über den Vergleich der geometrischen Abmessungen der jeweiligen Kaustiken. Die Simulationsumgebung ZEMAX™ (ZEMAX Development Corporation, Bellevue, USA) ermöglicht die Simulation des Strahlverlaufes auf der Grundlage angewandter Optik. Das zu simulierende System besteht dabei aus zwei Ausgangsebenen für die jeweilige Laserstrahlung, dem abbildenden optischen System und einer Ziel- und der Detektorebene. Der Weg der Strahlung über das optische System erfolgt über sequentielle Strahlverfolgung. Innerhalb der Simulationsumgebung ist immer von einer optimalen Ausrichtung der optischen Komponenten und von einer idealen optischen Güte auszugehen. Weichen die real ermittelten Kaustiken von der simulierten stark ab, so ist von Abbildungsfehlern und damit von einem fehlerhaften optischen Aufbau des Kombinationsmoduls auszugehen. Die durch die Strahlquellen gegebene Kennwerte sind in Tabelle 6 dargestellt und gelten als Eingangsgrößen zur Simulation des Strahlverlaufes.

Tabelle 6 Grundlegende Parameter der Laserstrahlquellen

	Festkörperlaser	CO ₂ -Laser
Wellenlänge λ / μm	1,07	10,6
Leistung P_{Lmax} / kW	1,8	2,9
Kollimationsbrennweite f_K / mm	160	
Faserdurchmesser D_K / μm	20	
Rohstrahldurchmesser D / mm	9,6	12,5

Abb. 33 zeigt den simulierten Strahlverlauf innerhalb des Kombinationsmoduls. Zu erkennen ist der bereits kollimierte Strahl des Festkörperlaser (Abb. 33- 2, blau), der über ein reflektierendes Element an den dichroitischen Spiegel geführt wird. Zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen der Strahlkaustiken wurde auf die Darstellung der X-Y-Strahlableitheit innerhalb der Simulation verzichtet. Die CO₂-Laserstrahlung (Abb. 33- 1, grün) wird durch den dichroitischen Spiegel geführt. Der kombinierte Strahl fällt dann auf einen Parabolspiegel, der die Strahlung um 90° ablenkt und mit einer Brennweite von $f_f = 500$ mm fokussiert.

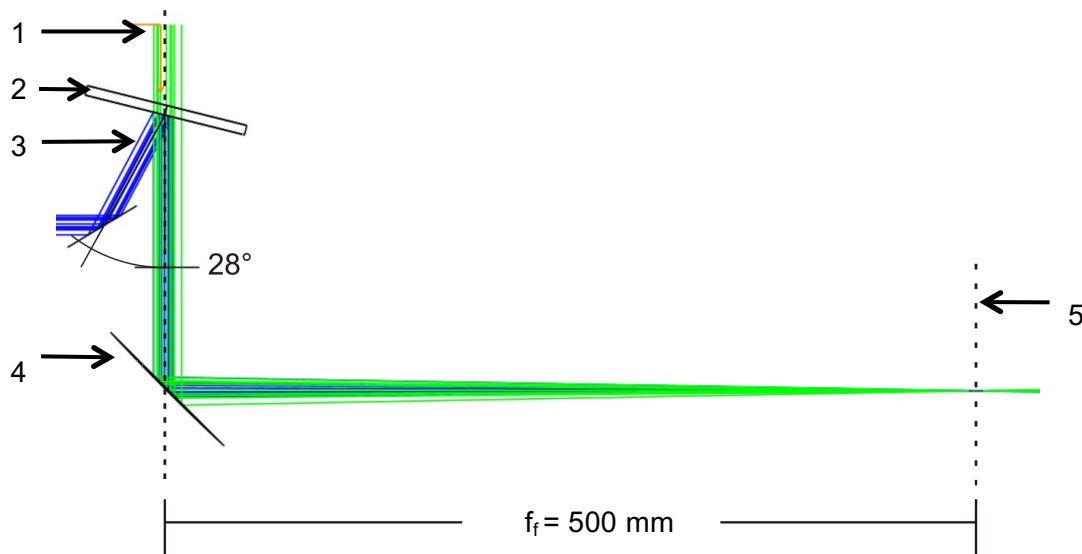


Abb. 33 Mittels Zemax simulierter Strahlverlauf innerhalb des Kombinationsmoduls mit CO₂-Laserstrahlung (1), dichroitischer Spiegel (2), FK-Laserstrahlung (3), Fokussierspiegel (4) und Detektorebene im Bereich des erwarteten Fokus der kombinierten Strahlung (5)

Die Ermittlung der Strahlkaustik erfolgt im nicht sequentiellen Berechnungsmodus innerhalb von ZEMAXTM. Hier wird neben der rein optischen Betrachtung auch der Wellencharakter der simulierten Laserstrahlung berücksichtigt und ZEMAXTM führt auf dem Detektor eine Huygens-Integration durch. Damit wird jeder auf dem Detektor auftreffende Strahl als Welle betrachtet. Die Intensität der einfallenden Welle wird auf alle Pixel des Detektors verteilt. Dabei wird nach TÜRCK, 2016, die Amplitude der einfallende Welle zu allen Pixeln unter Berücksichtigung der Phase addiert. Somit kann auf dem Detektor eine typische ortsaufge-

löste Beugungsfigur ermittelt werden. Vergleichbar zu den in Anhang A 7 dargestellten Messsystemen kann der Detektor entlang der Z- Achse verschoben und die geometrische Abmessung der Kaustik aufgenommen werden.

6.4 Charakterisierung der Systemtechnik

Die Charakterisierung der Systemtechnik erfolgt anhand einer Vermessung der geometrischen Abmessung der Kaustik, der Intensitätsverteilung der fokussierten Einzellaserstrahlung und der fokussierten kombinierten Laserstrahlung. Die Messgeräte sind nach dem X-Y-Scansystem positioniert. Die Vermessung erfolgt bei einer jeweiligen Laserleistung von $P_{L,FKL} = 0,1 \text{ kW}$ und $P_{L,CO_2} = 0,5 \text{ kW}$. Der Grund für die geringen Anteile der Laserleistung liegt in der Dauer der Messungen. Die optischen Komponenten sind nicht für einen Dauerbetrieb über mehrere Minuten ausgelegt, da eine typische zyklische Bearbeitung durch kurze Lasereinschaltzeiten gekennzeichnet ist. Daher ist die thermische Last für die optischen Komponenten als gering einzustufen. Für die Messung sind die adaptiven reflektierenden Elemente so eingestellt, dass die Fokusebenen beider Strahlquellen übereinander liegen. Die Vermessung der Strahltaile der CO₂-Laserstrahlung erfolgt mit dem Messgerät Focusmonitor. Da dieses Messgerät aufgrund seines Aufbaus auf einen minimalen Fokusbereich von 50 μm ausgelegt ist, ist die Vermessung der Strahltaile der FK-Laserstrahlung mit dem Messgerät Microspotmonitor durchzuführen. Der jeweilige Aufbau und die Messwertfassung der Messgeräte ist in Anhang A 7 dargestellt.

Tabelle 7 Vergleich simulierter und gemessener Parameter

Parameter	Festkörperlaser	CO ₂ -Laser
M ² (simuliert)	1,29	1,01
M ² (gemessen)	1,32	1,01
simulierter Durchmesser der Strahltaile $d_{f,sim} / \mu\text{m}$	64	540
gemessener Durchmesser der Strahltaile $d_f / \mu\text{m}$	65	572
simulierte Rayleighlänge $z_{R,sim} / \text{mm}$	2,1	20,14
gemessene Rayleighlänge z_R / mm	1,7	20,5
astigmatische Differenz	-0,43	-0,18

Der Vergleich zwischen der simulierten und der gemessenen Strahlkaustik ist in Abb. 34 dargestellt. Aufgrund der Rotationssymmetrie der Strahlung entlang der Z-Achse ist vereinfachend der Strahlradius angegeben.

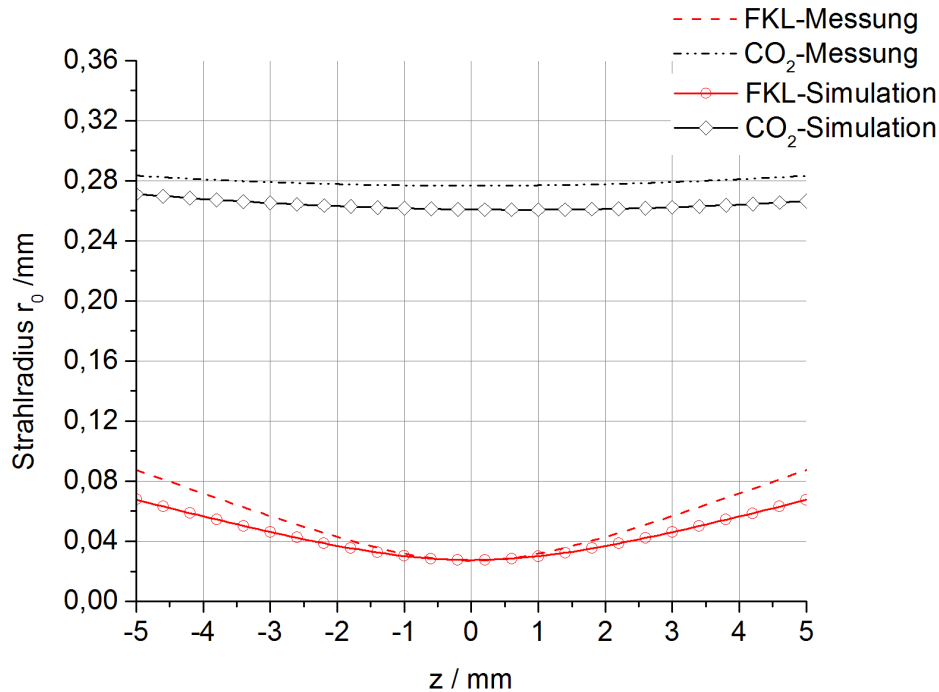


Abb. 34 Verläufe der Strahlkaustiken der jeweiligen Einzellaserstrahlung

Die hier dargestellten Verläufe der gemessenen Kaustiken der jeweiligen Einzellaserstrahlen entsprechen denen der simulierten nahezu. Aufgrund der guten Übereinstimmung von simulierter und gemessener geometrischer Abmessung der jeweiligen Strahlung ist davon auszugehen, dass durch den optischen Aufbau und die Möglichkeiten zur Strahljustage vernachlässigbare Abbildungsfehler auftreten. Darüber hinaus ist die Beugungsmaßzahl in Betracht der Vielzahl an verbauten optischen Elementen mit $M_{CO_2}^2 = 1,01$ und $M_{FKL}^2 = 1,32$ hoch, wenn in Betracht gezogen wird, dass im simulierten Aufbau die X-Y-Strahlableitheit nicht berücksichtigt ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die zusätzlichen reflektierenden Elemente zu der geringfügigen Abweichung der Ergebnisse, gerade im Hinblick auf die geringfügig abweichenden Rayleighlängen führen. Für die Bearbeitung der Werkstoffe ist es essentiell, dass die Z-Achsen der Strahlung beider Strahlquellen deckungsgleich übereinander liegen. Mit dem weiter oben dargestellten Aufbau ist es möglich, durch Verkippen der adaptiven Spiegel und durch Verwölben der Spiegelmembranen auf die Ausrichtung der Strahlung und auf die Brennweite einzuwirken und somit die jeweiligen vertikalen und horizontalen Fokuspositionen auf einen gleichen Wert einzustellen. Die Darstellung der Intensitätsverteilung ist ein adäquates Mittel um beide Z-Achsen so zu justieren, dass die geometrischen Abmessungen der jeweiligen Kaustiken konzentrisch angeordnet sind.

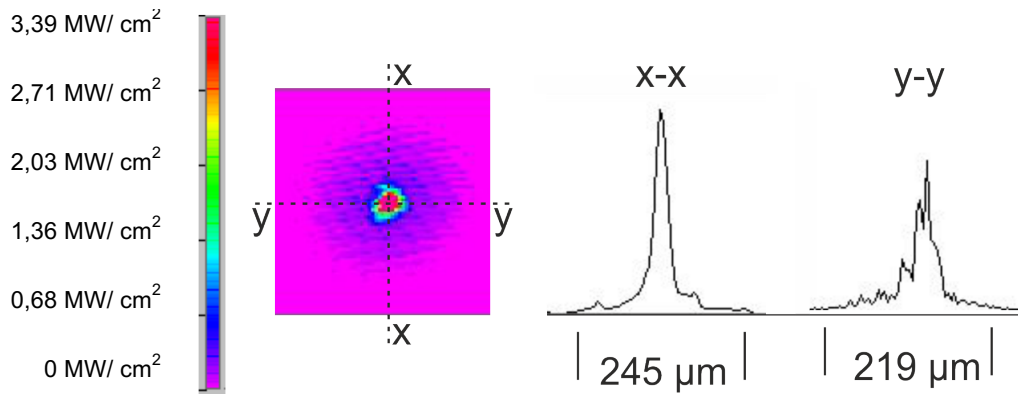


Abb. 35 Intensitätsverteilung innerhalb der Fokusebene der kombinierten Laserstrahlung bei $P_{L,FKL} = 0,1 \text{ kW}$ und $P_{L,CO_2} = 0,5 \text{ kW}$

In Abb. 35 ist in Falschfarben die Intensitätsverteilung dargestellt. Weiterhin sind die Schnitte durch den Mittelpunkt in X- und Y-Richtung des Detektors abgebildet. Das mittig angeordnete Intensitätsmaximum ist das der Festkörperlaserstrahlung. Unregelmäßig um das Maximum ist die Intensitätsverteilung der CO_2 -Laserstrahlung erkennbar. Diese unregelmäßige Darstellung ist messprinzipbedingt. Aufgrund der inkrementellen Erfassung der Messwerte von Einzelpositionen innerhalb des Messfensters kann ein geschlossenes Abbild der Intensitätsverteilung nur bei sehr hohen Laserleistungen abgebildet werden, die aber aufgrund der dauerhaften thermischen Belastung der optischen Komponenten zu vermeiden sind. Erschwerend kommt hinzu, dass die Messspitzen des Messgerätes Focusmonitor für die jeweilige Laserstrahlung ausgelegt sind. Würde eine Messspitze für reine CO_2 -Laserstrahlung verwendet, wäre die durch den Anteil der Festkörperlaserstrahlung einwirkende Intensität auf dem Detektor des Messgerätes zu groß. Daher wird eine Messspitze für Festkörperlaserstrahlung gewählt und die unscharfe Darstellung der Intensitätsverteilung der CO_2 -Laserstrahlung in Kauf genommen, um die jeweilige Einzellaserstrahlung zu justieren.

7 Experimentelle Untersuchungen zum Abtragsverhalten von FKV

7.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die experimentellen Untersuchungen zum Abtragsverhalten setzt sich im Wesentlichen aus der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Systemtechnik zur Strahlkombination- und Manipulation sowie den Komponenten zusammen:

- Werkstückaufspannung,
- Absaugung und
- Schutzkabine.

Der Bearbeitungsplatz ist in Abb. 36 dargestellt.

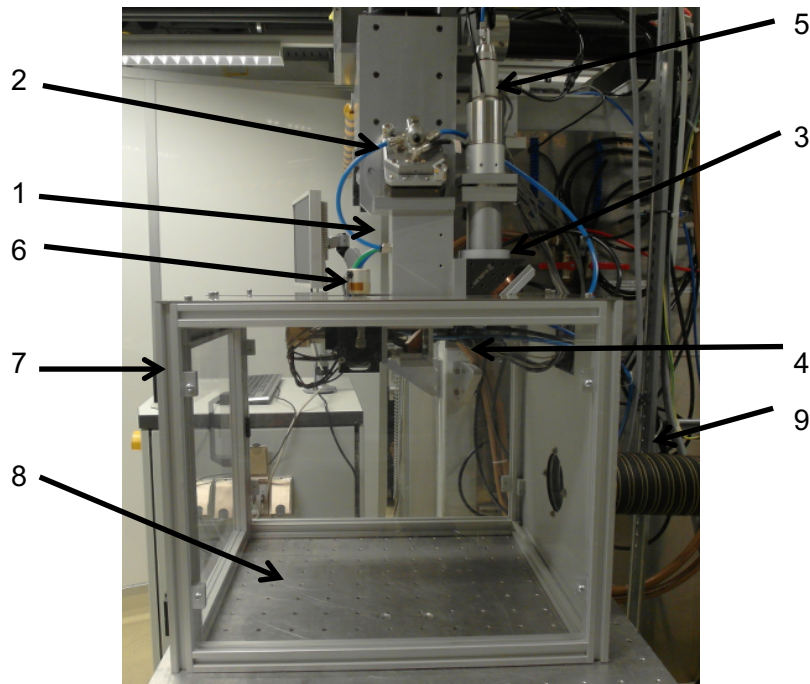


Abb. 36 Versuchsaufbau bestehend aus Kombinationseinheit (1) mit adaptiven Spiegeln (2, 3), Fokussierspiegel (4) und Kollimation der FK-Laserstrahlquelle (5), sowie X-Y-Scanneinheit (6), Schutzkabine (7), Hubtisch (8) und Absaugeinrichtung (9)

Die Einstellung des korrekten Arbeitsabstandes z_a zwischen Scansystem und Probekörper erfolgte durch Verstellung eines elektrisch betriebenen Hubtisches. Dieser Wert ist für die Versuche auf $z_a = 232 \text{ mm}$ eingestellt. Eine Relativbewegung zwischen Probenaufspannung und Scanneinheit während des Bearbeitungsprozesses ist für die grundlegenden Untersuchungen nicht erforderlich.

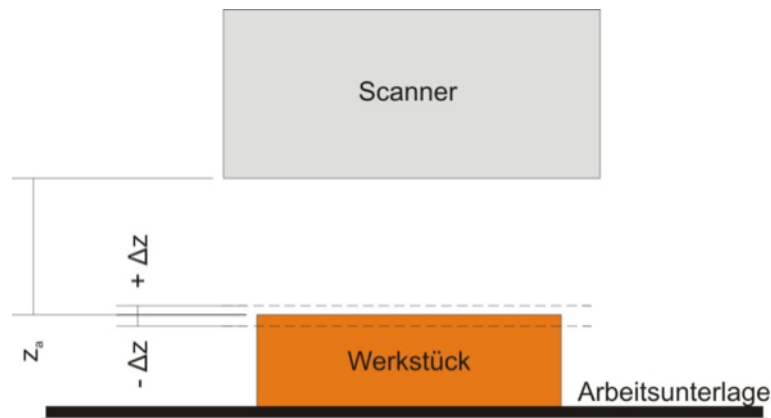


Abb. 37 Geometrische Anordnung von Scanneinheit und Probekörper

Ein Steuerrechner reguliert Strahlquellen, die adaptiven reflektierenden Elemente und die Scanneinheit. Zum Schutz des Anwenders vor der Belastung durch Laserrauch kam eine leistungsstarke Absaugung mit Aktivkohlefiltern und eine definiert belüftete Schutzkabine zum Einsatz, die das abzusaugende Volumen auf ein Minimum beschränkt.

7.2 Versuchsdurchführung und Werkstoffe

Die trennende Bearbeitung der Werkstoffe erfolgt, wie weiter oben schon beschrieben, durch mehrmaliges Überfahren einer Bearbeitungsspur mit dem Laserstrahl. Dabei können hohe Abtragsraten mit langsamen Spotvorschubgeschwindigkeiten und einer hohen Anzahl an Überfahrten erreicht werden. Jedoch ergeben sich in Übereinstimmung mit KLOTZBACH u. a., 2013a, und STOCK u. a., 2012, in diesem Fall große wärmebeeinflusste Zonen, die den Werkstoff schädigen. Dagegen stellt sich eine minimale wärmebeeinflusste Zone durch geringe Wechselwirkungszeiten ein, die aber mit einer Anhebung der Überfahrtenanzahl einher geht. Hier ergibt sich eine Diskrepanz aus einerseits hohen Abtragsraten, um hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu erreichen, und zum anderen hohe Vorschubgeschwindigkeiten des Laserspots, um die Wechselwirkungszeit so gering wie möglich zu halten. Die Ermittlung eines Optimums zwischen Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit des Laserspots und Anzahl an Überfahrten erfolgt durch Anwendung dieser Faktoren in einem statistischen Versuchsplan. Die Untersuchungen wurden als Reihenfolge einer 30-stufigen Parametervariation, bereitgestellt durch die Software Design Expert 9.0, durchgeführt. Das Aufstellen des Versuchsplanes erfolgt unter Anwendung einer Response Surface Methode, die nach SIEBERTZ u. a., 2010, geeignet ist, unter Ausschluss irrelevanter Faktoren ein Optimum aufzufinden. Design of Experiment (DoE) ist eine Methodik zur Planung und Analyse von Versuchen, um mit einem Minimum an Aufwand und Versuchen die wichtigsten Einflussfaktoren auf ein Ergebnis zu ermitteln. Dabei werden die Parameter in dem zu untersuchenden Versuchsraum gezielt variiert und gleichzeitig die Veränderung des Ergebnisses derart gemessen, dass der Zusammenhang zwischen Parameter und Ergebnis bestimmt werden kann. Zusätzlich werden jeweils 5 Schnitte je Parameter durchgeführt um den Einfluss der inhomogenen Werkstoffe statistisch abzusichern.

Dabei wird folgendes Vorgehen angewendet:

- Auswahl der Parameter für die Versuche,
- Festlegung des Parameterraumes,
- Aufstellen des Versuchsplanes,
- Versuchsdurchführung,
- Analyse der Versuchsergebnisse,
- Bestimmung des Zusammenhanges $Y = f(x_n)$ sowie
- Bestimmung und Verifizierung optimaler Parameter zum Erreichen einer Zielabtragtiefe.

Die Eingrenzung des Parameterraumes erfolgte über Voruntersuchungen, die auf Grundlage eines vollfaktoriellen Versuchsplanes für jede Strahlquelle einzeln zu folgenden Randbedingungen führten:

- Laserleistung $P_{L, \max} = 1200 \text{ W}$,
- Minimale Vorschubgeschwindigkeit $v_{V, \min} = 1 \text{ m/s}$,
- Maximale Vorschubgeschwindigkeit $v_{V, \max} = 4 \text{ m/s}$,
- Pausenzeit $t_{\text{pause}} = 1 \text{ s}$,
- Fokusslage in Abhängigkeit der Werkstoffdicke $d \Delta z = \frac{1}{3} \cdot d$.

Die Abtragtiefe t_{SF} ergibt sich maßgeblich aus den Parametern Laserleistung P_L , Vorschubgeschwindigkeit des Laserspots v_V und Anzahl an Überfahrten n . Es ist aus dem Stand der Technik nachvollziehbar, dass hohe Intensitäten, die sich durch eine hohe Laserleistung P_L und kleinen Strahldurchmessern ergeben, immer zu den größten Abtragstiefen führen. Die mit der dargestellten Systemtechnik maximal mögliche Laserleistung ist auf $P_L = 1200 \text{ W}$ begrenzt, weshalb dieser Parameter konstant zu halten ist. Durch die Überlagerung der Strahlung beider Strahlquellen ergibt sich aber der Faktor der anteiligen Laserleistung $P_{L, \text{Proz,FKL}}$ und $P_{L, \text{Proz,CO}_2}$. Dies ist ein neuer Freiheitsgrad innerhalb der Lasermaterialbearbeitung von Werkstoffen und wird in der Darstellung der Ergebnisse und der Diskussion als Anteil der Festkörperlaserstrahlung $P_{L, \text{Proz,FKL}}$ mitgeführt. Hinter der Angabe des Leistungsanteiles der FK-Laserstrahlung stehen die in der Bedienungssoftware umgesetzten Vorwahlen für den Einstellwert der Laserleistung der jeweiligen Strahlquelle. Die entsprechenden Verhältnisse und die dazugehörigen Laserleistungen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Einstellwerte des Leistungslevels für den Faktor A:

Parameter	Laserleistung P_L in W	
	CO ₂ -Laser	FK-Laser
$P_{L, \text{proz, FKL}} = 1$	0	1200
$P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,75$	300	900
$P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,5$	600	600
$P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,25$	900	300
$P_{L, \text{proz, FKL}} = 0$	1200	0

Weiterhin gelten die Faktoren:

- B: Vorschubgeschwindigkeit v_V : 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s und
- C: Anzahl an Überfahrten n : 5, 10, 15, 20

Der resultierende Versuchsplan ist in Tabelle 21 bis Tabelle 26 in Anhang A 8 dargestellt. Es wird ein nichtlineares, kubisches Verhalten der Faktoren untereinander erwartet, weshalb der Versuchsplan 30 Stützstellen umfasst.

Als Bearbeitungsgeometrie kam eine linienförmige Kontur zum Einsatz. Gerade bei anisotropen Werkstoffen ist davon auszugehen, dass die in Wärme umgesetzte Laserleistung symmetrisch von der Wechselwirkungszone in den Werkstoff geleitet wird. Kämen kreisförmige Konturen zum Einsatz, wie sie von LÜTKE, 2011 verwendet werden, würde sich das im Inneren der Kreiskontur befindliche Restmaterial thermisch anders verhalten als der umgebende Werkstoff und gegebenenfalls thermisch und geometrisch differierende Schnittflanken aufweisen. Der Abstand der benachbarten Konturen ist dabei so groß gewählt, dass keine thermische Beeinflussung der jeweiligen Wechselwirkungszonen auftritt. Da kein systemtechnischer Ausgleich der Brennweiten bei Manipulation der Laserstrahlung vorgenommen wird, ist die Bearbeitungskontur mittig im Arbeitsfeld zu positionieren. Dieses hat zur Folge, dass die Strahlung in einer Achse des Scannerarbeitsfeldes immer in der eingestellten Fokusposition verbleibt. Für die andere Achse ergeben sich aber unterschiedliche Abstände der Fokusposition von der Arbeitsfläche. Um den damit induzierten Fehler möglichst gering zu halten, wird die Länge der Bearbeitungskontur von der Tiefenschärfe der einfallenden Laserstrahlung, bei der sich der Radius der Strahltaile ω_f um den Faktor $\sqrt{2}$ vergrößert, bestimmt. Die dafür charakteristische Kenngröße ist die Rayleighlänge, die sich mit:

$$d_f = 2 \cdot \omega_f \quad (11)$$

zu

$$z_r = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4 \cdot \lambda \cdot M^2} \quad (12)$$

ergibt.

Die Rayleighlänge ergibt sich aus der in Kapitel 6 dargestellten optischen Konfiguration und wurde für den verwendeten Grundmode-Festkörperlaser zu $z_{r,FKL} = 1,7 \text{ mm}$ und für den CO₂-Laser zu $z_{r,CO_2} = 20,5 \text{ mm}$ gemessen. Die Länge der Bearbeitungskontur wird so gewählt, dass an den Endpunkten der Bearbeitungskontur die Verlängerung der Brennweite nicht über den Wert der Rayleighlänge hinaus geht (Abb. 38).

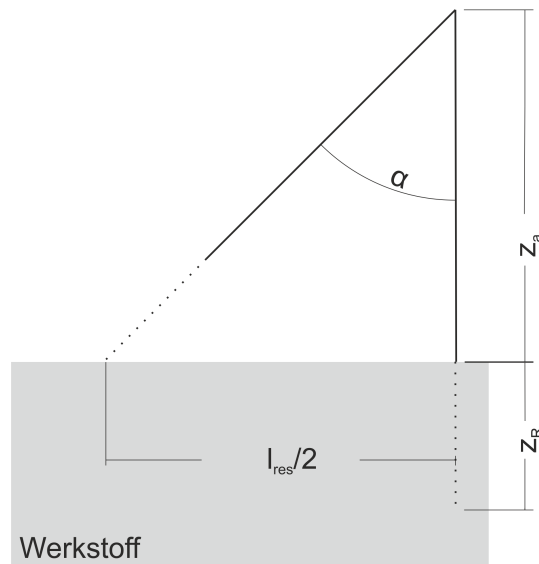


Abb. 38 Geometrische Verhältnisse, Rayleighlänge, Konturlänge

Somit ergibt sich für die linienförmige Bearbeitungskontur eine Länge von 20 mm. Aufgrund des begrenzten Dynamikverhaltens der Spiegelantriebe sind Beschleunigungs- und Verzögerungswege einzuplanen, weswegen die resultierende Länge auf 28 mm festgelegt wird, um eine Länge von 20 mm mit konstanter Spotvorschubgeschwindigkeit zu gewährleisten.

Da anisotrope Werkstoffe mit unidirektionalem Lagenaufbau bearbeitet werden, ist die Schnitttrichtung gegenüber der Faserorientierung zu beachten. Es erfolgen Abtragsversuche senkrecht und längs zur Faserorientierung.

7.2.1 Werkstoffe

Die entwickelte Systemtechnik erlaubt es dem späteren Benutzer, einen Laserstrahlschneidprozess unabhängig von dem zu bearbeitenden Material auszulegen. Die Bandbreite der für die Untersuchungen zur Verfügung stehenden Werkstoffe ist dem Umstand geschuldet, dass die industrielle Anwendung des Werkstoffes belastungsgerecht erfolgt. Demnach müssen die Prozesse, die den werkstoff- und formgebenden Prozessen innerhalb der Fertigungskette nachgelagert sind, auf eine Vielzahl an Werkstoffparametern flexibel einzustellen sein. Typische Bauteile aus Faser-Kunststoff-Verbunden weisen Faserlängen auf, die der Bauteildimension entsprechen. In der Regel sind nach HUFENBACH & ADAM, 2010; LÄSSIG u. a., 2012, und CHERIF, 2011, die einzelnen Lagen gestreckt im Bauteil angeordnet. Die Werkstoffe mit Polypropylen als Matrixwerkstoff wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereich 639 der Technischen Universität zur Verfügung gestellt. Die Wahl zu diesem Werkstoff fiel aufgrund seiner Verarbeitungseigenschaften, der hinsichtlich seiner produktiven Fertigung ein hohes Zukunftspotential bietet. Um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe zu untersuchen wurden zusätzlich Werkstoffe, basierend auf Kohlenstofffasern mit unterschiedlichen Graphitierungsgrad in den Versuchumfang aufgenommen.

Die zur Untersuchung zur Verfügung stehenden Werkstoffe werden im folgenden beschrieben:

- CFEP-HM, Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund, basierend auf hochmoduligen Kohlenstofffasern und Epoxydharz
- CFEP-HT, Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund, basierend auf hochsteifen Kohlenstofffasern und Epoxydharz
- GFPP-S, Glasfaser-Polypropylenverbund mit rußgefüllter Matrix und
- GFPP-W, Glaserfaser-Polypropylenverbund mit naturbelassener Matrix.

Innerhalb der Untersuchungen lagen die Werkstoffe mit unidirektionalem Lagenaufbau zur Verfügung. Auf die thermischen und optischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe wurde schon in den vorhergehenden Kapiteln eingegangen. Darüber hinaus sind die Materialeigenschaften in Tabelle 15 in Anhang A1 zusammengefasst. Die Faservolumenanteile für GFPP-S und GFPP-W liegen bei $\varphi = 42,5\%$ und für CFEP bei $\varphi = 55\%$.

7.2.2 Bestimmung der Kenngrößen

Die Bestimmung des Einflusses der Prozessparameter auf die Schnitteigenschaften erfolgt durch die Auswertung von lichtmikroskopischen Aufnahmen von Querschliffen. Dazu sind die Proben mittig entsprechend der Schnittlänge zu trennen. Im Anschluss erfolgt die Einbettung der Proben in eine Epoxydharzmatrix, um freigelegte Faserenden für die anschließenden Schleif- und Poliervorgänge zu stützen. Anhand des so erzeugten Schliffes lassen sich die Kenngrößen Abtragstiefe t_{SF} , Abtragsquerschnitt A_{SF} , Öffnungswinkel der Kerbe α und Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} ermitteln. Um die Kontrastarmut der Probekörperquerschnitte auszugleichen, erfolgt die Bestimmung der Größe der wärmebeeinflussten Zone in Dunkelfeldaufnahmen. Die Vermessung der wärmebeeinflussten Zone erfolgte anhand der maximalen Ausbreitung des verfärbten Bereiches $b_{WEZ, ges}$. Interessant ist aber die Beeinflussung des Werkstoffes, ausgehend von der Schnittkante. Unter Nutzung der maximalen Abtragsbreite b_{SF} ergibt sich für die Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{weZ} damit:

$$b_{WEZ} = \frac{b_{WEZ, ges} - b_{SF}}{2} \quad (13)$$

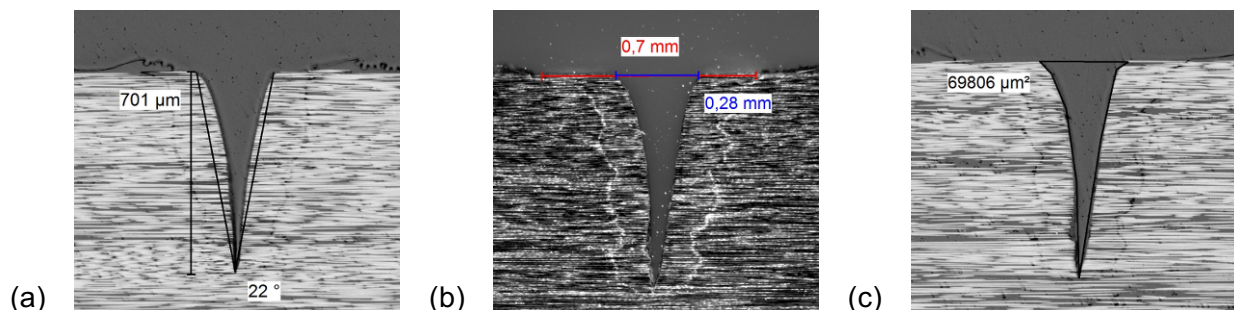


Abb. 39 Querschliff eines exemplarischen Probekörpers mit beispielhaften Messwerten für die Abtragstiefe $t_{SF} = 701\ \mu\text{m}$ und Kerbwinkel $\alpha = 22^\circ$ (a), Gesamtbreite der wärmebeeinflussten Zone $b_{weZ, ges} = 0,7\ \text{mm}$ und Abtragsbreite $b_{SF} = 0,28\ \text{mm}$ (b), sowie der Oberflächeninhalt des abgetragenen Querschnittes $A_{SF} = 69806\ \mu\text{m}^2$ (c)

Weiterhin werden zur Auswertung der Ergebnisse die Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{eff} , gegeben durch

$$v_{eff} = \frac{v_V}{n} \quad (14)$$

und die Prozesszeit, die sich durch

$$t_{proz} = \frac{n \cdot l_{SF}}{v_V} \quad (15)$$

ergibt, herangezogen.

7.3 Ergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse resultieren aus den Messungen entsprechend dem 30-stufigen Versuchsplan. Die detaillierte Darstellung der Ergebnisse ist in A 8 ersichtlich. Nachfolgende Ergebnisse zeigen den Verlauf über den gesamten Parameterraum grafisch und diejenigen Parameter, mit denen festgelegte Schnitttiefen mit der maximal möglichen Vorschubgeschwindigkeit zu erreichen sind, tabellarisch.

7.3.1 CFEP

Trägt man die Ergebnisse der erreichten Abtragstiefen t_{SF} über der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{eff} des gesamten Parameterraumes auf, zeigen sich die aus dem Stand der Technik bekannte Zusammenhänge.

Eine Verringerung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, infolge der Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit oder Zunahme der Zyklenanzahl hat eine ansteigende Abtragstiefe zu Folge. Gleichzeitig ist durch Zunahme der Bearbeitungsgeschwindigkeit, durch Verringerung der Überfahrten oder aber einer Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit eine kleinere wärmebeeinflusste Zone zu verwirklichen (Abb. 40-b). Hierbei sind die mittlere Standardabweichung über den gesamten Parameterraum für die Abtragstiefe $\bar{\sigma}_{t_{SF},CFEP} = 0,06 \text{ mm}$ und für die Breite der wärmebeeinflussten Zone $\bar{\sigma}_{b_{WEZ},CFEP} = 0,01 \text{ mm}$.

Der in Abb. 40-a dargestellte Verlauf zeigt aber auch die Abhängigkeit der Zielgrößen von dem neuen Freiheitsgrad des Mischungsverhältnisses der Strahlung beider Strahlquellen. Gerade hohe Anteile an FK-Laserstrahlung resultieren in großen Abtragstiefen. Diese stehen auch in Verbindung mit geringen wärmebeeinflussten Zonen im Werkstoff (Abb. 40-b). Dagegen führt die Bearbeitung mit reiner CO_2 -Laserstrahlung nicht zu vergleichbaren Abtragstiefen. Gleichzeitig ist die Breite der wärmebeeinflussten Zone deutlich größer.

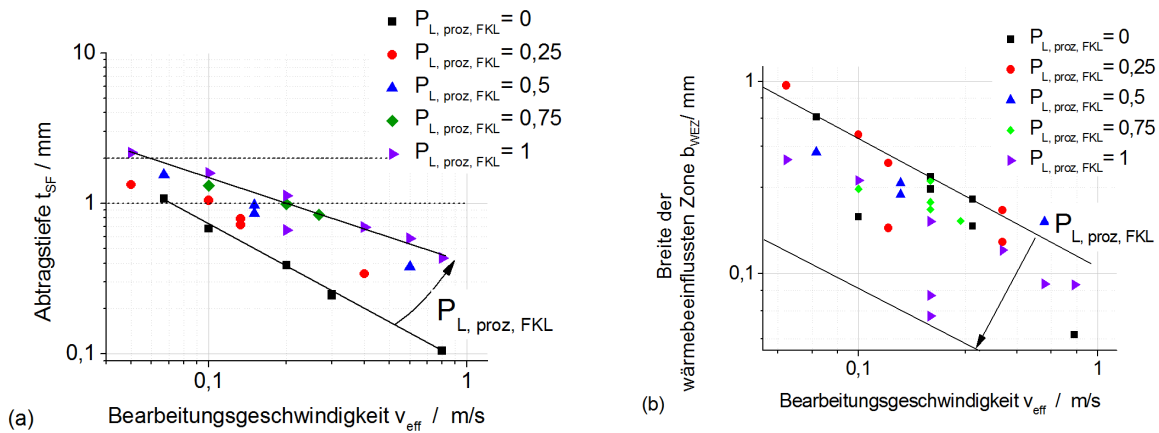


Abb. 40 Abtragstiefe t_{SF} (a) und Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} (b) als Funktion der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{eff} für CFEP-HM

Bei Betrachtung von Abb. 40-b kann festgestellt werden, dass sowohl ein hoher Anteil an FK-Laserstrahlung als auch eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit zu einer geringen Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone führt.

Festgelegte Zielgrößen ermöglichen die Charakterisierung des Prozesses, wofür sich die Abtragstiefe t_{SF} eignet. Dabei ist die Frage zu stellen, mit welchen optimalen Parametern diese Zielgröße erreichbar ist. Die Parameter zum Erreichen der Abtragstiefen von $t_{SF} = 1$ mm und $t_{SF} = 2$ mm sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9 Parameter zum Erreichen der Abtragstiefen $t_{SF} = 1$ mm und $t_{SF} = 2$ mm für CFEP-HM

t_{SF} in mm	n	$P_{L, \text{proz, FKL}}$	v_V in m/s	b_{WEZ} in mm	α_{SF} in °	v_{eff} in m/s	t_{proz} in s
1	5	0,95	1,2	0,25	<20	0,24	0,12
1	10	0,93	2	0,2	<20	0,20	0,14
1	15	0,9	2,6	0,15	□15	0,17	0,16
1	20	0,94	2,8	0,1	□10	0,14	0,20
2	15	0,9	1,2	0,35	□10	0,08	0,35
2	20	0,8	1,4	0,3	<10	0,07	0,40

Unter Einbeziehung des neuen Freiheitsgrades des Mischungsverhältnisses der Strahlung beider Strahlquellen ergibt sich beispielsweise ein Maximum an Bearbeitungsgeschwindigkeit zum Erreichen von Abtragstiefen von $t_{SF} = 1$ mm bei einer Zyklenanzahl von $n = 5$ bei einem Anteil der FK-Laserstrahlung von $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,95$. Sollen höhere Abtragstiefen, beispielsweise $t_{SF} = 2$ mm erreicht werden, so müssen die Zyklenanzahl erhöht oder die Vorschubgeschwindigkeit verringert werden. Beispielsweise kann eine Abtragstiefe von $t_{SF} = 2$ mm sowohl mit 15 als auch mit 20 Überfahrten bei einem Anteil der FK-Laserstrahlung von ca. $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,8$ erreicht werden. Innerhalb des gewählten Parameterraumes ist die Abtragstiefe von $t_{SF} = 2$ mm nicht mit 5 und 10 Überfahrten zu verwirklichen.

Da die Abtragstiefen von $t_{SF} = 1$ mm und $t_{SF} = 2$ mm jeweils mit 5, 10, 15 und 20 Überfahrten zu erreichen sind, stellt sich die Frage, welche Strategie sinnvoll erscheint. Daher ist die Beachtung der wärmebeeinflussten Zone und die durch die Vorschubgeschwindigkeit v_V und Anzahl an Überfahrten n zu ermittelnde Prozessbearbeitungszeit t_{proz} sinnvoll. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit verringert sich die Breite der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff (Abb. 40-b). Allerdings muss eine steigende Anzahl an Überfahrten in Kauf genommen werden, in dessen Folge sich die Bearbeitungszeit verlängert, da die Pausenzeit zwischen den Überfahrten konstant gehalten wird. Aus Tabelle 9 kann nun ein Optimum je nach Anforderung abgelesen werden. Besteht die Anforderung an eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit, ist eine langsame Vorschubgeschwindigkeit sowie eine geringe Anzahl an Überfahrten zu wählen. Dabei muss allerdings eine große wärmebeeinflusste Zone im Werkstoff in Kauf genommen werden. Andererseits ist die Schädigungstiefe gering, wenn mit einer hohen Vorschubgeschwindigkeit v_V bearbeitet wird. Eine hohe Anzahl an Überfahrten in Verbindung mit einer vergleichsweise langen Prozesszeit müssen hier aber in Kauf genommen werden. In Abb. 40-a ist weiterhin dargestellt, dass aus der Bearbeitung mit geringen Anteilen an FK-Laserleistung geringe Abtragstiefen bei langsamen Vorschubgeschwindigkeiten resultieren. Gleichzeitig sind die Öffnungswinkel der Kerbe bei der Bearbeitung mit geringen Anteilen an FK-Laserstrahlung groß, gegenüber der Bearbeitung mit hohen Anteilen an FK-Laserstrahlung. Abb. 41 zeigt diesen Zusammenhang. Hier ist die mittlere Standardabweichung über den gesamten Parameterraum $\bar{\sigma}_{\alpha_{SF},CFEP} = 2,6^\circ$. Hohe Abtragsraten und damit große Aspektverhältnisse zwischen der Abtragsbreite b_{SF} und der Abtragtiefe t_{SF} resultieren in kleinen Öffnungswinkeln der Abtragskerbe.

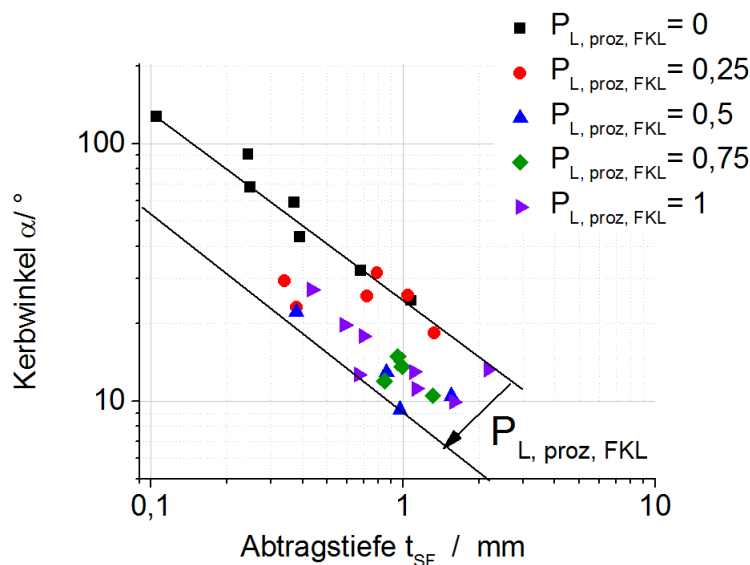


Abb. 41 Kerbwinkel α als Funktion der Abtragtiefe t_{SF} für CFEP

Wie aus Abb. 40-b ersichtlich, geht ein hoher Anteil an CO_2 -Laserstrahlung auch mit einer vergleichsweise großen wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff einher. Gleichzeitig kann Tabelle 9 entnommen werden, dass hohe Vorschubgeschwindigkeiten zu einer Minimierung der wärmebeeinflussten Zone infolge einer geringen Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Werkstoff führen. Daher ist zu prüfen, inwiefern der geringe Anteil an CO_2 -Laserstrahlung einen positiven Einfluss auf die Bearbeitung hat. Die anschließende Darstel-

lung und Diskussion der Ergebnisse aus der Verifikation der eben dargestellten Ergebnisse soll dazu beitragen.

7.3.2 GFPP-S

Betrachtet man den Gesamtparameterraum, sind im Gegensatz zu CFEP deutlich größere Abtragstiefen bei vergleichbaren Bearbeitungsgeschwindigkeiten aufgrund der geringeren Verdampfungstemperatur und des geringeren Faservolumengehaltes erreichbar (Abb. 42-a). Hierbei sind die mittlere Standardabweichung über den gesamten Parameterraum für die Abtragstiefe $\bar{\sigma}_{t_{SF},GFPP-S} = 0,1 \text{ mm}$ und für die Breite der wärmebeeinflussten Zone $\bar{\sigma}_{b_{WEZ},GFPP-S} = 0,05 \text{ mm}$.

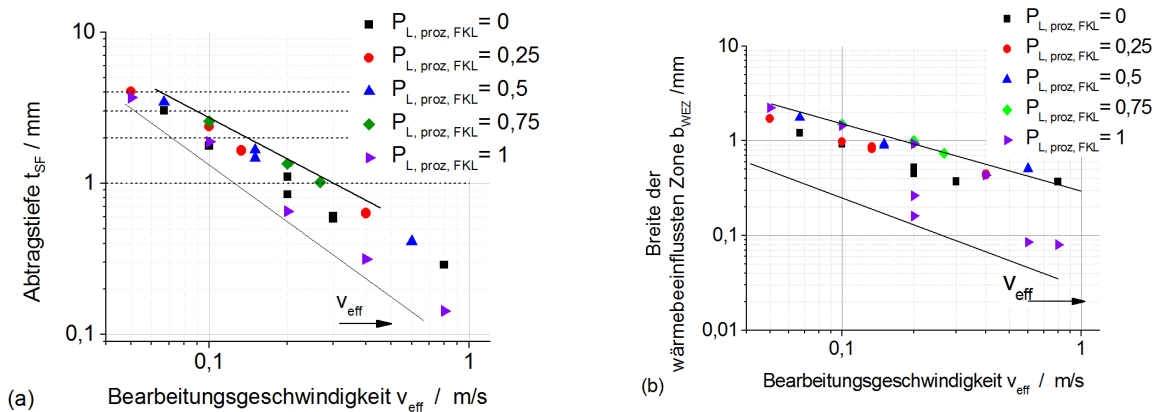


Abb. 42 Abtragstiefe t_{SF} (a) und Breite der wärmebeeinflussten Zone (b) als Funktion der Bearbeitungsgeschwindigkeit v_{eff} für GFPP-S

Im Gegensatz zu CFEP-HM spielt der Anteil der FK-Laserstrahlung eine untergeordnete Rolle. Vielmehr hat die Bearbeitungsgeschwindigkeit einen maßgeblichen Anteil an der Abtragstiefe und an der Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff. Mit zunehmender Bearbeitungsgeschwindigkeit nimmt die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} im Werkstoff ab (Abb. 42- b). Die Verkürzung der Wechselwirkungszeit hat hier zwei Effekte zur Folge. Zum einen kann die Wechselwirkungszeit durch hohe Vorschubgeschwindigkeiten erreicht werden. Da die Pausenzeit zwischen den Überfahrten konstant ist, steht dem Werkstoff mehr Zeit zum Abkühlen zwischen den Überfahrten zur Verfügung. Zum anderen ist aber auch in Abb. 42-b erkennbar, dass eine geringe Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone durch einen hohen Anteil an FK-Laserstrahlung resultiert. Die geringe geometrische Abmessung der Strahltaile dieser Strahlung hat eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit zur Folge. Die Werte der Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone erscheinen allerdings sehr hoch, gerade auch im Hinblick darauf, dass der Werkstoff als thermisch isotrop gilt. Betrachtet man einen typischen Querschliff eines Probekörpers, so ist diese ausgeprägte optisch veränderte Zone sichtbar (Abb. 43).

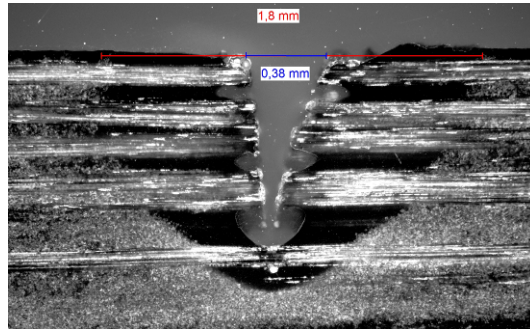


Abb. 43 Exemplarische Dunkelfeldaufnahme eines Probekörpers, $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,6$, $v = 3 \text{ m/s}$, $n = 10$

In Abb. 43 sind die Gesamtbreite der wärmebeeinflussten Zone $b_{\text{wez, ges}} = 1,8 \text{ mm}$ und die Abtragsbreite $b_{\text{SF}} = 0,38 \text{ mm}$. Eine Beeinflussung des Werkstoffes in diesem Bereich durch die Schleif- und Polierprozesse ist nicht auszuschließen. Dennoch verhält sich der Werkstoff in diesem Bereich anders, sodass von einer thermischen Beeinflussung ausgegangen werden muss. Im Gegensatz zu CFEP ist aber von einer mechanischen Schädigung des Werkstoffes infolge der thermischen Bearbeitung nach Fürst u. a., 2014, nicht auszugehen.

Tabelle 10 Parameter zum Erreichen der Abtragstiefen t_{SF} : 1 mm, 2 mm, 3 mm und 4 mm für GFPP-S

t_{SF} in mm	n	$P_{L, \text{proz, FKL}}$	v_V in m/s	b_{WEZ} in mm	α_{SF} in °	v_{eff} in m/s	t_{proz} in s
1	5	0,5	1,4	0,8	≈28	0,28	0,10
1	10	0,6	2,9	0,5	≈20	0,29	0,10
1	15	0,8	4	0,5	≈18	0,27	0,11
1	20	1	4	0,5	<10	0,20	0,14
2	10	0,6	1,3	1,2	≈12	0,13	0,22
2	15	0,7	2,1	1,1	≈10	0,14	0,20
2	20	0,7	2,4	1,2	≈10	0,12	0,23
3	15	0,75	1,3	1,5	<10	0,09	0,32
3	20	0,75	1,8	1,6	<10	0,09	0,31
4	15	0,75	1,1	1,6	<10	0,07	0,38
4	20	0,8	1,3	2	<10	0,07	0,43

Hohe Vorschubgeschwindigkeiten sind immer dann erreichbar, wenn beide Strahlquellen in einem Mischungsverhältnis, entsprechend Tabelle 10 angewendet werden. Wober der Anteil an FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz, FKL}}$ mit zunehmender Zyklenanzahl ansteigt. Vergleichbares Verhalten zeigt sich auch bei hohen Abtragstiefen. Die Abtragstiefen $t_{\text{SF}} = 3 \text{ mm}$ und $t_{\text{SF}} = 4 \text{ mm}$ sind ausschließlich mit einer hohen Anzahl an Überfahrten bei vergleichsweise geringen Vorschubgeschwindigkeiten zu erreichen. Dabei sind die Anteile der FK-Laserstrahlung hoch. Die Bearbeitung mittels FK-Laserstrahlung führt zu großen Abtragstie-

fen in Verbindung mit kleinen Öffnungswinkeln der resultierenden Korbgeometrie (Abb. 44). Die mittlere Standardabweichung über den gesamten Parameterraum des Korbwinkels beträgt $\bar{\sigma}_{\alpha_{SF},GFPP-S} = 5,4^\circ$. Es ist darstellbar, dass die geringe geometrische Abmessung der Strahltaile der FK-Laserstrahlung positiv bei der Bearbeitung dieses Werkstoffes ist, da sie, bezogen auf die Schnitttiefe, vorteilhaft gegenüber der reinen CO₂-Laserstrahlung ist. Anhand der nachfolgenden Verifizierung und Diskussion ist der hier dargestellte Einfluss der CO₂-Laserstrahlung an der Gesamtlaserstrahlung kritisch zu bewerten.

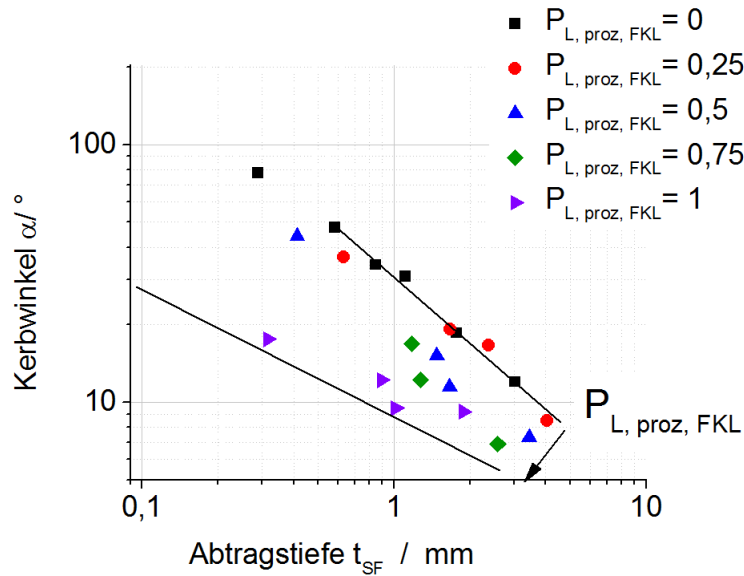


Abb. 44 Korbwinkel α als Funktion der Abtragtiefe t_{SF} für GFPP-S

7.3.3 GFPP-W

Betrachtet man die Ergebnisse des gesamten Parameterraumes von GFPP-S (Abb. 45), so sind die erreichbaren Abtragstiefen gegenüber GFPP-S deutlich geringer, obwohl vergleichbare thermische Eigenschaften der Einzelwerkstoffe vorliegen. Weiterhin ist festzustellen, dass die maximalen Vorschubgeschwindigkeiten zum Erreichen der Zielabtragstiefen mit einem sehr geringen Anteil an FK-Laserleistung umsetzbar sind (Tabelle 11 und Abb. 45). Die mittleren Standardabweichungen über den gesamten Parameterraum betragen für die Abtragtiefe $\bar{\sigma}_{t_{SF},GFPP-W} = 0,1 \text{ mm}$ und für die Breite der wärmebeeinflussten Zone $\bar{\sigma}_{b_{WEZ},GFPP-W} = 0,03 \text{ mm}$. Die Zielabtragtiefe von $t_{SF} = 1 \text{ mm}$ ist mit 5, 10, 15, und 20 Überfahrten erreichbar, wohingegen die Zielabtragtiefe $t_{SF} = 2 \text{ mm}$ lediglich mit 15 und 20 Überfahrten in Verbindung mit signifikant geringeren Vorschubgeschwindigkeiten erreichbar ist.

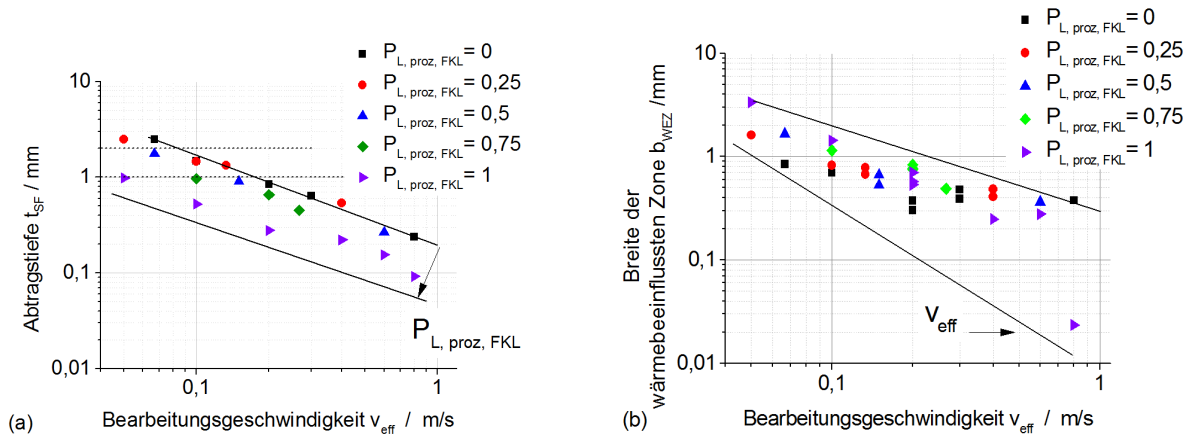


Abb. 45 Abtragstiefe t_{SF} (a) und Breite der wärmebeeinflussten Zone (b) als Funktion der Bearbeitungsgeschwindigkeit v für GFPP-W

Darüber hinaus sind Abtragstiefen von 3 und 4 mm nicht umsetzbar. Konträr zu CFEP-HM sind hohe Abtragstiefen mit einem sehr geringen Anteil an FK-Laserstrahlung erreichbar (Abb. 45- a). Hier ist davon auszugehen, dass die Wahl einer entsprechenden Bearbeitungsgeschwindigkeit einen größeren Einfluss auf die Abtragstiefe hat als die Wahl eines entsprechenden Mischungsverhältnisses beider Laserleistungsanteile.

Auch bei der Bearbeitung dieses Werkstoffes kann die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff eher durch Anhebung der Bearbeitungsgeschwindigkeit als durch Anpassung des Mischungsverhältnisses beider Laserleistungsanteile verringert werden. Allerdings bewegen sich diese Werte in einem deutlich geringeren Bereich, verglichen zu GFPP-S. Tabelle 11 zeigt die aus dem Gesamtparameterraum ermittelten optimalen Parameter zum Erreichen definierter Zielabtragstiefen.

Tabelle 11 Parameter zum Erreichen der Abtragstiefen $t_{SF} = 1$ mm und 2 mm für GFPP-W

t_{SF} in mm	n	$P_{L,proz,FKL}$	v_V in m/s	b_{WEZ} in mm	α_{SF} in °	v_{eff} in m/s	t_{proz} in s
1	5	0,1	1,2	0,45	≈ 40	0,24	0,07
1	10	0,16	2,1	0,45	≈ 30	0,21	0,13
1	15	0,2	2,8	0,45	≈ 28	0,19	0,17
1	20	0,28	3,3	0,4	≈ 28	0,17	0,23
2	15	0,1	1,2	0,8	≈ 17	0,08	0,35
2	20	0,18	1,7	1	≈ 20	0,09	0,33

Obwohl die Werkstoffe GFPP-S und GFPP-W hinsichtlich der thermischen Eigenschaften nahezu vergleichbar sind, resultiert die Bearbeitung von GFPP-W in deutlich geringeren Abtragstiefen, verglichen zu GFPP-S. Dazu liefert die Betrachtung des Öffnungswinkels der Kerbe und die resultierende Abtragsbreite b_{SF} einen Hinweis in Abb. 46. Hier beträgt die

mittlere Standardabweichung über den gesamten Parameterraum für den Kerbwinkel $\bar{\sigma}_{\alpha_{SF},GFPP-W} = 7,2^\circ$.

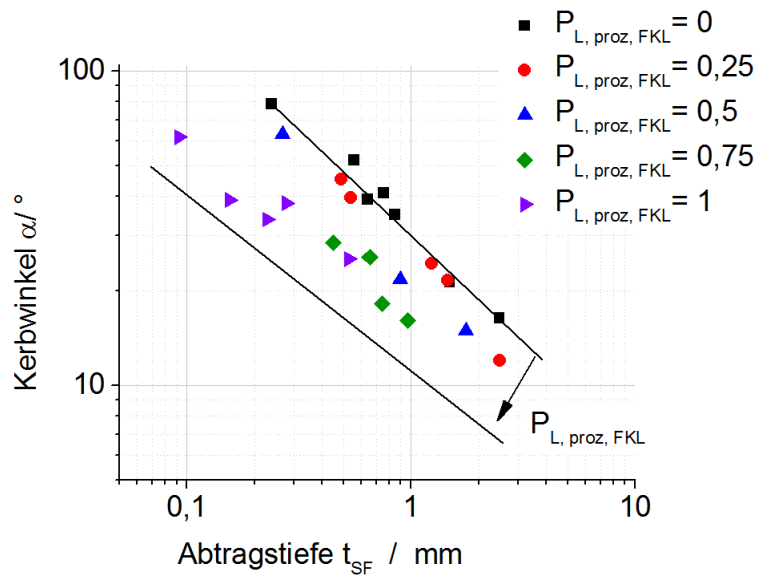


Abb. 46 Kerbwinkel α als Funktion der Abtragstiefe t_{SF} für GFPP-W

Große Öffnungswinkel werden schon bei sehr viel kleineren Abtragstiefen erreicht. Hier ist das Aspektverhältnis von Abtragsbreite und Abtragstiefe geringer, gegenüber GFPP-S. Vergleichsweise hohe Abtragstiefen resultieren bei der Bearbeitung von GFPP-W aus einem hohen Anteil an CO_2 -Laserstrahlung, der durch große geometrische Abmessungen seiner Strahltaile gekennzeichnet ist. Somit ist nachvollziehbar, dass dadurch breitere Abtragsspuren entstehen, die in größeren Öffnungswinkeln der Kerbe resultieren.

8 Verifizierung und Diskussion der Ergebnisse

Um die Ergebnisse der aufgestellten Modelle der statistischen Versuchsplanung und der daraus resultierenden Abtragsergebnisse zu verifizieren, wurden mit dem vorhandenen Versuchsaufbau zusätzliche Experimente durchgeführt.

Eine Möglichkeit, den Prozess zu charakterisieren, ist die Abtragstiefe t_{sf} auf einen bestimmten Wert festzusetzen und hier die Parameter zu ermitteln, die zur höchsten Prozessgeschwindigkeit führen. Den Abb. 73, Abb. 76 und Abb. 79 in Anhang A 8 kann entnommen werden, dass eine Schnitttiefe von $t_{sf} = 1$ mm für alle Werkstoffe mit einer Zyklenanzahl von $n = 10$ und $n = 20$ erreichbar ist. Beispielsweise kann der Werkstoff GFPP-S mit einem Anteil von $P_{L, \text{proz}, \text{FKL}} = 0,6$ bei einer Zyklenanzahl von $n = 10$ mit einer maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_V = 3$ m/s getrennt werden.

Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich dieser optimalen Parameterkonstellation der Bearbeitung mit den jeweiligen Einzelstrahlquellen unter Konstanzhaltung der jeweiligen Vorschubgeschwindigkeit und Zyklenanzahl. Dem Stand der Technik ist zu entnehmen, dass infolge der Verkürzung der Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Werkstoff eine Minimierung der wärmebeeinflussten Zone resultiert. Mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit wird diesem Rechnung getragen, allerdings bedingt das auch eine Verdopplung der Zyklenanzahl. Unter Konstanzhaltung der Pausenzeit zwischen den Zyklen tritt aber eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit ein, gleichzeitig wird dem Werkstoff eine längere Zeit zum Abkühlen zwischen einzelnen Überfahrten ermöglicht. Dieser Annahme folgen STOCK u. a., 2012, und WEBER u. a., 2012, die den Einfluss der Pausenzeit zwischen den Überfahrten auf die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone darstellen konnten. Die aus der Hauptversuchsreihe ermittelte optimale Parameterkonfiguration für alle Werkstoffe ist in Tabelle 12 dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 27 bis Tabelle 29 in A 8 dargestellt.

Tabelle 12 Optimale Parameterkonstellation zum Erreichen einer Abtragstiefe von $t_{sf} = 1$ mm

Werkstoff	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
	Leistungsanteil $P_{L, \text{proz}, \text{FKL}}$	Geschwindigkeit v_V in m/s	Zyklenanzahl n
CFEP	0,94	2	10
	0,93	3	20
GFPP-S	0,6	3	10
	0,93	4	10
GFPP-W	0,16	2	10
	0,28	3,4	20

8.1 Methoden zur Darstellung

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt über zwei Ansätze. Zur Darstellung der Ergebnisse der Versuche mit der optimalen Parameterkonfiguration eignet sich die Abbildung der Abtragstiefe und des abgetragenen Querschnittes als Funktion der Streckenenergiedichte $E_{S,I}$. Diese Größe ist geeignet, da sie die geometrischen Verhältnisse der einfallenden Laserstrahlung berücksichtigt. Der abgetragene Querschnitt ist ein Maß für das abgetragene

Volumen innerhalb der Schnittkerbe, da die Schnittlänge über die gesamte Versuchsreihe konstant gehalten wurde. Die geometrischen Verhältnisse der einfallenden Laserstrahlung finden unter Anwendung der mittleren Intensität I_0 Berücksichtigung, diese ergibt sich mit der Laserleistung P_L und dem Radius der Strahltaile r zu:

$$I_0 = \frac{P_L}{\pi r^2} \quad (16)$$

Durch die Überlagerung der Laserstrahlung aus zwei unterschiedlichen Strahlquellen, ergeben sich nach Kapitel 6 unterschiedliche Anteile der einfallenden Laserstrahlung. Die Berücksichtigung erfolgt unter Anwendung der Mischungsregel:

$$I_0 = I_{0,CO_2} + I_{0,FKL} = \frac{P_L \cdot p_{proz,CO_2}}{\pi \cdot r_{CO_2}^2} + \frac{P_L \cdot p_{proz,FKL}}{\pi \cdot r_{FKL}^2} \quad (17)$$

Mit der eingestrahnten Intensität und der Vorschubgeschwindigkeit ergibt sich die Streckenenergiedichte zu:

$$E_{s,I} = \frac{I_0}{v_v} = \frac{I_{0,CO_2} + I_{0,FKL}}{v_v} \quad (18)$$

Mit (16) und (17) kann für die Streckenenergiedichte für die Wechselwirkung innerhalb einer Überfahrt mit

$$E_{s,I} = \frac{P_L}{v_v \cdot \pi} \left(\frac{P_{L,proz,CO_2}}{r_{CO_2}^2} + \frac{P_{L,proz,FKL}}{r_{FKL}^2} \right) \quad (19)$$

angegeben werden. Da die Bearbeitung immer durch mehrere Überfahrten erfolgt, ist die Anzahl dieser zu berücksichtigen:

$$E_{s,I,ges} = \frac{P_L \cdot n}{v_v \cdot \pi} \left(\frac{P_{L,proz,CO_2}}{r_{CO_2}^2} + \frac{P_{L,proz,FKL}}{r_{FKL}^2} \right) \quad (20)$$

Ein zweiter Ansatz wird mit Hilfe einer Abschätzung der zum Trennen von Faser-Kunststoff-Verbunden benötigten Energie verfolgt. Unter der Annahme, dass die einfallende Laserstrahlung den Werkstoff in der Schnittkerbe vollständig verdampft, kann über eine Leistungsbilanz die erforderliche Energie zum Trennen ermittelt werden. Die für die Berechnung notwendigen Abtragsvolumina entstammen experimentell ermittelten Ergebnissen eines vollfaktoriellen

Versuchsplanes nach HIPP, 2015. Unter Beibehaltung einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von $v_V = 1$ m/s erfolgt die Variation der Streckenenergie E_S durch Veränderung der Laserleistung P_L und der Zyklenanzahl n . Die Verwendung der geometrieunabhängigen Streckenenergie E_S ist an dieser Stelle gerechtfertigt, da die Breite der resultierenden Schnittkerbe in Dickenrichtung des Werkstoffes variiert und auch von der Wechselwirkung der Abprodukte mit den Kerbflanken abhängig ist. Zur Abschätzung der benötigten Laserleistung für die Generierung von Schnittspalten kann eine Leistungsbilanz verwendet werden. Dabei gilt für die erforderliche Laserleistung:

$$P_{V,erf} = \rho * \dot{V}_C * \Delta h_{Vges} \quad (21)$$

Das innerhalb einer Zeiteinheit in einer Schnittfuge verdampfte Volumen V_C ist das Produkt aus dem experimentell ermittelten abgetragenen Querschnitt A_{SF} und der Schneidgeschwindigkeit v und wird als Volumenstrom \dot{V}_C geführt. Weiterhin sind ρ die Dichte des Werkstoffes und Δh_{Vges} die spezifische Enthalpieänderung bis zur Verdampfung des Werkstoffes. Die zur vollständigen Verdampfung benötigte Laserleistung ergibt sich aus dem mit Hilfe der Mischungsregel ermittelbaren anteiligen Volumen des Matrixmaterials:

$$\dot{V}_{Mat} = A_{SF} * v_V * (1 - \varphi) \quad (22)$$

und dem anteiligen Volumen des Verstärkungsfasermaterials:

$$\dot{V}_{Fas} = A_{SF} * v_V * \varphi \quad (23)$$

zu:

$$P_{V,ges} = \rho_{Mat} * \dot{V}_{Mat} * \Delta h_{VMat} + \rho_{Fas} * \dot{V}_{Fas} * \Delta h_{VFas} \quad (24)$$

Für die Annahme einer vollständigen Verdampfung des Werkstoffes gilt:

$$\Delta h_{VMat} = \Delta h_{SM} + \Delta h_{SM}^U + \Delta h_{VM} + \Delta h_{VM}^U \quad (25)$$

und

$$\Delta h_{VFaser} = \Delta h_{SV} + \Delta h_{SV}^U + \Delta h_{VF} + \Delta h_{VF}^U \quad (26)$$

Hierbei sind Δh_{SM}^U und Δh_{VM}^U die jeweiligen spezifischen Schmelz- und Verdampfungsenthalpien des Matrixmaterials und Δh_{SV}^U , sowie Δh_{VF}^U die jeweiligen spezifischen Schmelz- und Verdampfungsenthalpien des Verstärkungsfaseranteiles. Unter der Annahme, dass alle Materialien keine schmelzflüssige Phase aufweisen, gilt bis zum Erreichen der Verdampfungstemperatur T_V :

$$\Delta h_V = \int_{T_0}^{T_V} c_p dT \quad (27)$$

Die entsprechenden Terme des Übergangs vom festem zum schmelzflüssigen Aggregatzustand ergeben sich damit zu null. Die mit Laserstrahlung aufzubringende erforderliche Streckenenergie zum vollständigen Verdampfen des Werkstoffes ist durch diese Leistungsbilanz darstellbar und ergibt sich aus dem Quotienten der maximal erforderlichen Laserleistung P_L unter Beachtung der absorbierten Laserleistung $P_{L,abs}$ und der Vorschubgeschwindigkeit:

$$E_{erf} = \frac{P_{V,erf}}{v} = \frac{P_{L,abs} \cdot P_L}{v} \quad (28)$$

Hierbei führen die absorbierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung zu einer oberflächennahen Erwärmung des Werkstoffes. Es wird weiterhin die Annahme getroffen, dass die reflektierten und transmittierten Anteile der Laserstrahlung nicht an der Wechselwirkung teilnehmen.

Tabelle 13 Erforderliche Stoffkennwerte zur Erstellung der Energiebilanz (HESSE, 1995; LIEBELT, 1998; SHEIKH-AHMAD, 2009)

Werkstoff	Δh_V^U [kJ/kg]
PP	3700
EP	1100
GF	31000
CF	41000

8.2 Verifizierung und Diskussion CFEP

Abb. 47 zeigt, dass die Zielabtragstiefe von $t_{SF} = 1$ mm durch die optimierten Parameter für die Bearbeitung mit 10 und 20 Überfahrten tendenziell erreichbar sind. Interessant ist hier die Betrachtung des abgetragenen Querschnittes. Hier liegen vergleichbare Werte, unabhängig von der aufgetragenen Streckenenergie für alle Bearbeitungsparameter vor.

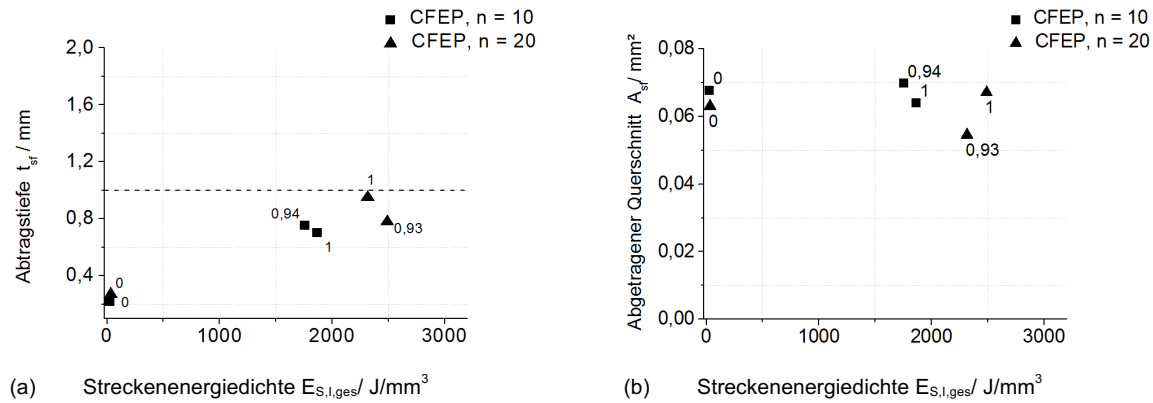


Abb. 47 Abtragstiefe (a) und abgetragener Querschnitt, je Zyklus (b) als Funktion der Streckenenergie für CFEP (Zahlenwerte stehen für den Anteil der Festkörperlaserstrahlung $P_{L,proz,FKL}$)

In Kapitel 4 wurde dargestellt, dass die Anteile der absorbierten Laserleistung unabhängig von der Strahlquelle in CFEP gleichermaßen hoch sind. Die Anteile der absorbierten Laserstrahlung in der polymeren Matrix sind in Übereinstimmung mit BOLEY & RUBENCHIK, 2013; FREITAG, 2013, und WU u. a., 2012, jedoch minimal. Bei Bestrahlung mit CO_2 -Laserstrahlung sind hohe Anteile absorbiertes Laserstrahlung sowohl im Werkstoff als auch im polymeren Anteil nachgewiesen. Die geometrische Abmessung der Strahltaile der CO_2 -Strahlung führt hier zu einer deutlich breiteren Schnittkerbe, resultierend in einem großen Öffnungswinkel und damit zu einem minimierten Abtrag in Tiefenrichtung (vgl. Abb. 41). Interessant ist vor allem, dass trotz eines geringen abgetragenen Volumens bei der Bearbeitung mittels 20 Überfahrten unabhängig vom Anteil der FK-Laserstrahlung eine größere Abtragstiefe erreichbar ist. Dagegen nimmt das abgetragene Volumen vergleichbare Werte an, bzw. wird bei der Bearbeitung mit einem Anteil an FK-Laserstrahlung von $P_{L,proz,FKL} = 0,93$ ein geringeres Volumen abgetragen. Es ist offensichtlich, dass die mit der höheren Vorschubgeschwindigkeit einhergehende Verkürzung der Wechselwirkungszeit zu einer Minimierung des Abtrages je Zyklus führt. Das geht auch einher mit einer schmaleren Schnittkerbe in Verbindung mit einem kleineren Öffnungswinkel (vgl. Abb. 41). Die hinsichtlich der Schnitttiefe optimalen Prozessparameter sind für einen Anteil an FK-Laserstrahlung von $P_{L,proz,FKL} = 0,94$ bei 10 und $P_{L,proz,FKL} = 0,93$ bei 20 Überfahrten berechnet. Abb. 47-a zeigt auch, dass hier die größten Abtragstiefen zu erreichen sind. Allerdings sind diese nur geringfügig größer als bei Bearbeitung mit reiner FK-Laserstrahlung. Hier ist die Frage zu stellen, ob die geringen Anteile an CO_2 -Laserstrahlung einen positiven Effekt auf das Schnittergebnis haben. Die Schnittproben in Abb. 48 zeigen die resultierenden Abtragsgeometrien, die mit dem optimierten Parametersatz (Abb. 48-a) und mit dem Parametersatz mit reiner FK-Laserstrahlung (Abb. 48-b) erzeugt wurden. Die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone, die aus der Bearbeitung mit reiner FK-Laserstrahlung resultiert, ist kleiner im Vergleich zum optimierten Parametersatz. Der sehr geringe Anteil der CO_2 -Laserstrahlung führt hier nur zu einem äußerst geringfügigen Anstieg der Abtragstiefe aber infolge seiner geometrischen Abmes-

sungen zu einer Wechselwirkung mit den Kerbflanken, die sich negativ auf die wärmebeeinflusste Zone auswirkt.

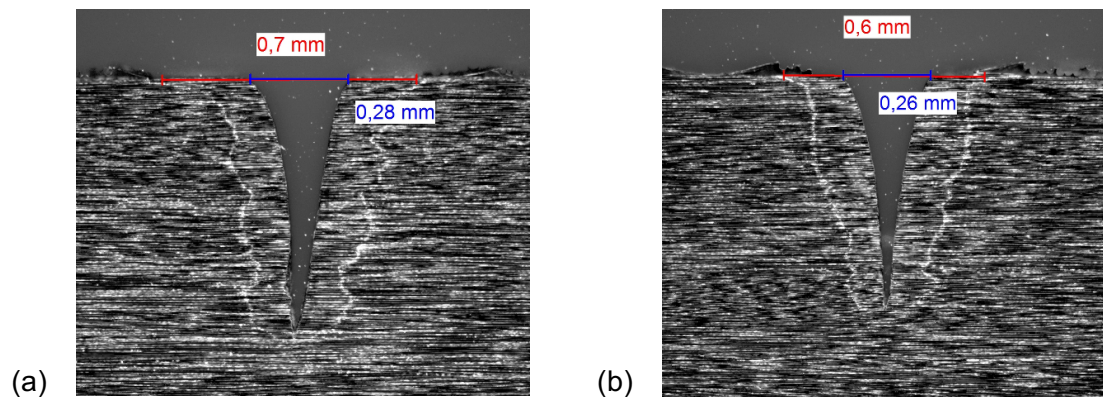


Abb. 48 Dunkelfeldaufnahmen von Schnittproben, $P_L = 1200 \text{ W}$, $v_V = 3 \text{ m/s}$, $n = 10$ mit $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,94$, $b_{\text{wez, ges}} = 0,7 \text{ mm}$, $b_{\text{SF}} = 0,28 \text{ mm}$ (a) und $P_{L, \text{proz, FKL}} = 1$, $b_{\text{wez, ges}} = 0,6 \text{ mm}$, $b_{\text{SF}} = 0,26 \text{ mm}$ (b)

Ein vergleichbares Verhalten tritt auf, wenn die Bearbeitung mit 20 Überfahrten ausgeführt wird. In Abb. 49 ist dargestellt, dass sich der geringe Anteil an CO_2 -Laserstrahlung negativ auf die wärmebeeinflusste Zone auswirkt. Neben der Wechselwirkung des Anteiles der CO_2 -Laserstrahlung mit den Kerbflanken ist auch von einer längeren Wechselwirkungszeit des Laserstrahles mit dem Werkstoff infolge der größeren geometrischen Abmessungen der kombinierten Strahlung auszugehen. In Übereinstimmung mit dem Stand der Technik muss somit eine größere Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone in Kauf genommen werden.

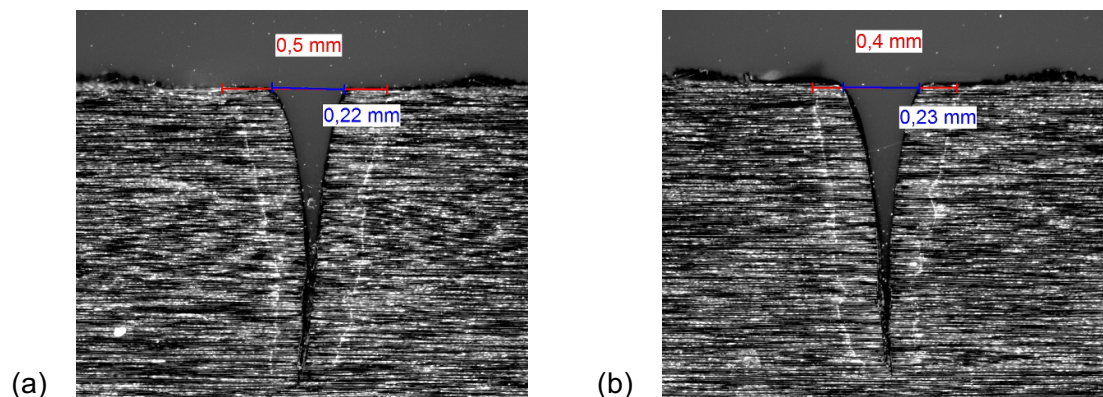


Abb. 49 Dunkelfeldaufnahmen von Schnittproben, $P_L = 1200 \text{ W}$, $v_V = 4 \text{ m/s}$, $n = 20$ mit $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,93$, $b_{\text{wez, ges}} = 0,5 \text{ mm}$, $b_{\text{SF}} = 0,22 \text{ mm}$ (a) und $P_{L, \text{proz, FKL}} = 1$, $b_{\text{wez, ges}} = 0,4 \text{ mm}$, $b_{\text{SF}} = 0,23 \text{ mm}$ (b)

Dahingegen hat aber die Verkürzung der Wechselwirkungszeit je Zyklus, die mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit einher geht, einen positiven Effekt auf die Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff. Da die Pausenzeiten zwischen den Überfahrten konstant bei einer Sekunde gehalten wurden, resultiert die Bearbeitung mit der hohen Vorschubgeschwindigkeit in einer längeren Abkühlphase zwischen den Überfahrten. Einen vergleichbaren Zusammenhang haben WEBER u. a., 2012, in einem Modell zur Berechnung des Wärmestaus in Werkstoffen infolge des Pulsüberlapps bei Bearbeitung mit Strahlquellen, die gepulste Strahlung emittieren, erstmals aufgestellt. Weiterentwickelt wurde das Modell in der Art, dass auch die scannerbasierte Bearbeitung berücksichtigt wird, siehe WEBER, 2014. Neben der kürzeren Wechselwirkungszeit erfährt der Werkstoff eine längere Abkühlphase

zwischen den Überfahrten, sodass sich die thermische Last im Werkstoff deutlich verringert. Gegenüber einer Bearbeitung mit Anteilen beider Strahlquellen an der Laserstrahlung ist hier eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit vorzuziehen.

Zur weiteren Diskussion der Ergebnisse ist der Vergleich zwischen der zum vollständigen Verdampfen des Werkstoffes erforderlichen Energie und der tatsächlichen, durch die Strahlquelle eingebrachten Energie interessant. Mit Hilfe von Gleichung (21) und den in dieser Arbeit bestimmten absorbierten Anteilen der einfallenden Laserstrahlung, sowie den Kennwerten aus Tabelle 13 lässt sich das abgetragene Volumen bei einer Spotvorschubgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ m/s}$ in Abhängigkeit der eingebrachten oder erforderlichen Energie abbilden (Abb. 50). Die Vermessung der Querschnittsflächen der generierten Schnitffugen erfolgte anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen von Querschliffen entsprechend Abb. 39 zur Zielgrößenbestimmung.

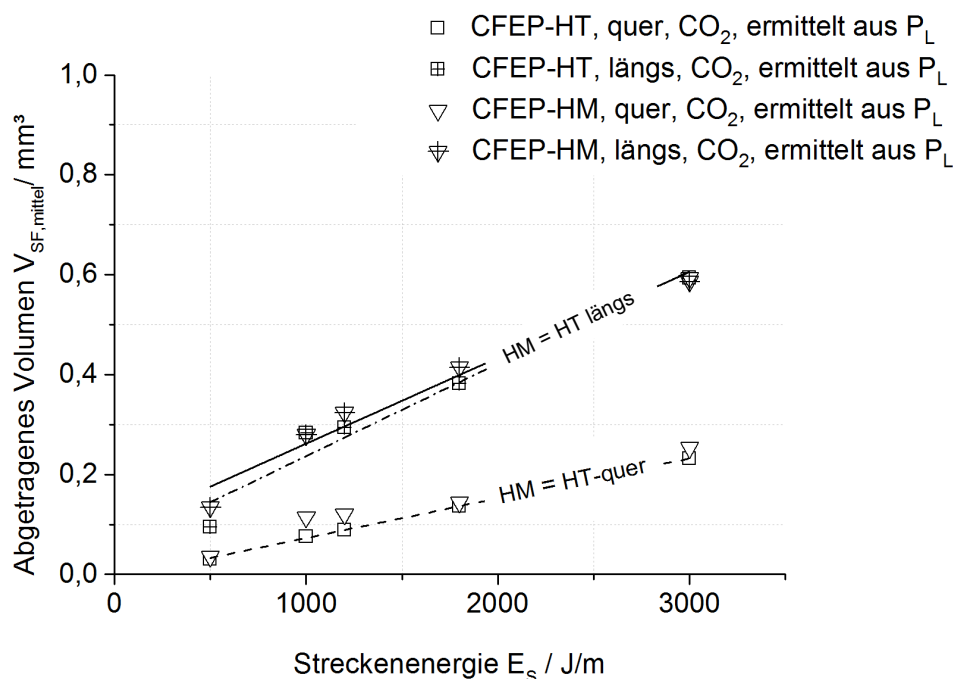


Abb. 50 Benötigte Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für CFEP mit CO_2 -Laserstrahlung bearbeitet $v_v = 1 \text{ m/s}$

In Abb. 50 ist die durch die Laserstrahlquelle eingebrachte Energie und das daraus resultierende abgetragene Volumen dargestellt. Der einfache Zusammenhang eines steigenden abgetragenen Volumens bei steigender Streckenenergie ist linear und durch eine Ausgleichsgerade dargestellt. In Abb. 50 ist weiterhin zu erkennen, dass die Schnittrichtung gegenüber der Faserorientierung einen Einfluss auf das abgetragene Volumen hat. Bei gleicher Streckenenergie wird bei der Bearbeitung längs zur Faser ein größeres Volumen abgetragen als quer zur Faser. Da die Energiebilanz keine thermischen Effekte, hervorgerufen durch die Wärmeleitung der Kohlenstofffaser, vornehmlich in deren Längsrichtung berücksichtigt, muss die Vermutung geäußert werden, dass von einer auf das abgetragene Volumen negativen Beeinflussung durch die Wärmeleitfähigkeit auszugehen ist. Es ist aber darüber hinaus die Frage zu stellen, ob ausschließlich die Wärmeleitfähigkeit einen Einfluss auf das Abtragsergebnis hat. Vielmehr wird angenommen, dass sich das Abtragsverhalten in Abhängigkeit der Bearbeitungsrichtung gegenüber der Faserorientierung ändert, da in Abb. 50 sehr große Unterschiede zwischen den abgetragenen Volumen in Abhängigkeit der Fa-

serorientierung dargestellt sind. Im Gegensatz zur Bearbeitung quer zur Faserrichtung muss längs dazu nicht die Faser vollständig abgetragen werden. Die Auflösung der Faser-Matrix-Haftung in Verbindung mit dem entstehenden Druck in der Abtragskerbe führt zum Austreiben des Werkstoffes aus der Abtragskerbe. Diese Vermutung wird durch die Betrachtung der in Abb. 50 dargestellten sehr geringen Unterschiede des abgetragenen Volumens zwischen dem Werkstoff mit hochmoduliger Faser und mit hochsteifer Faser gestützt. Trotz der um den Faktor 10 voneinander abweichenden Wärmeleitfähigkeiten (A 1- Tabelle 15) ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf das Abtragsverhalten nicht nachweisbar. Unterstützt wird diese Aussage weiterhin durch die in FÜRST u. a., 2014, nicht nachweisbare wärmeleitfähigkeitsabhängige Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone.

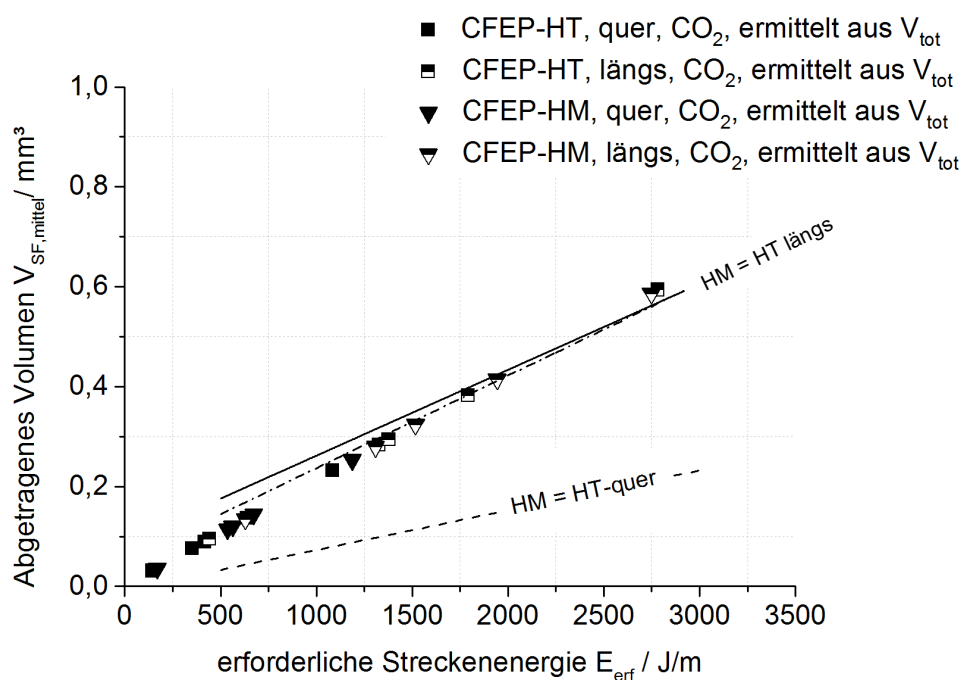


Abb. 51 Erforderliche Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für CFEP mit FK-Laserstrahlung bearbeitet $v_v = 1 \text{ m/s}$ (linearer Verlauf übertragen aus Abb. 50)

Der ermittelte lineare Verlauf der Daten in Abb. 50 ist in Abb. 51 übertragen. Darüber hinaus ist in Abb. 51 zusätzlich die erforderliche Streckenenergie abgetragen, die sich aus der Annahme des vollständig verdampften Volumens ergeben. Hier nehmen die erforderlichen Streckenenergien geringere Werte an als die Streckenenergien, die durch die Strahlquelle eingebracht werden. In Abb. 51 ist weiterhin dargestellt, dass die erforderlichen Streckenenergien vergleichbar sind zum abgebildeten experimentell ermittelten linearen Verlauf für Schnitte in längs zur Faserorientierung. Das ist ein Hinweis darauf, dass der Werkstoff in der Schnittkerbe nahezu vollständig verdampft wird. Da der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf das Abtragsverhalten nicht nachweisbar ist muss ein anderer Einfluss auf das Abtragsverhalten des Werkstoffes vorliegen. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass aufgrund der hohen Verdampfungstemperatur der Kohlenstofffaser lange Wechselwirkungszeiten in Kauf genommen werden müssen. Diese können verkürzt werden, indem die Intensität der einfallenden Strahlung so hoch wie möglich gewählt wird. Ein Mittel dazu ist die Verkürzung der Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung. Die Verwendung von FK-Laserstrahlung führt hinsichtlich des linearen Verlaufes der experimentell ermittelten Abtragsrate und der einge-

brachten Streckenenergie zu einem, zur Bearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung vergleichbaren linearen Zusammenhang (Abb. 52).

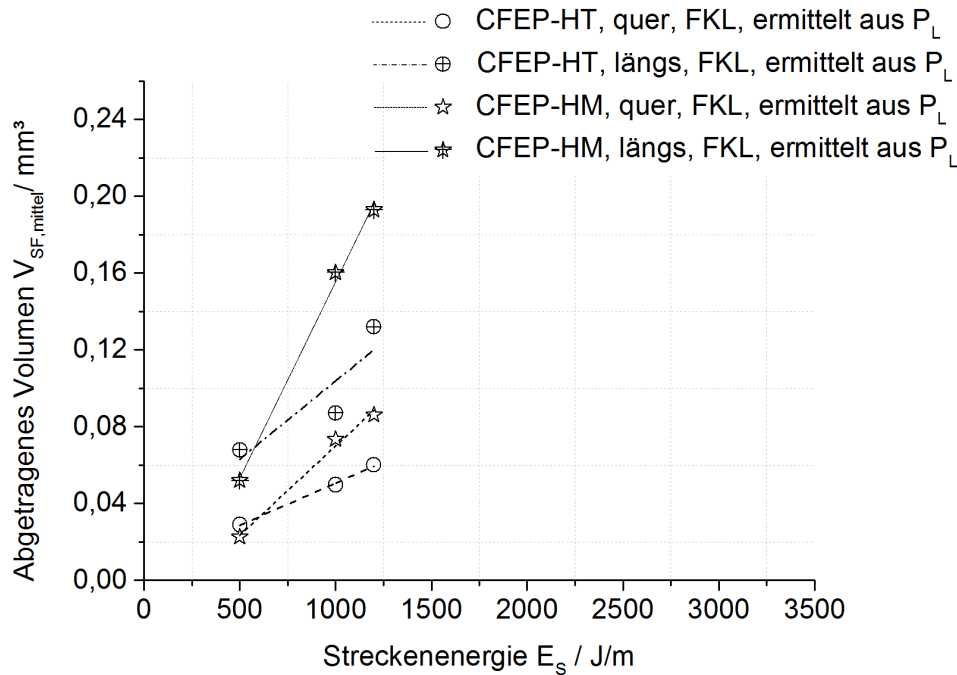


Abb. 52 Benötigte Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für CFEP mit Festkörperlaserstrahlung bearbeitet $v_v = 1$ m/s,

Im Vergleich zur Bearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung sind die Abtragsraten bei vergleichbaren Streckenenergien in einem ähnlichen Bereich. Dieses Verhalten ist analog zu der Darstellung in Abb. 47 und weist auf ähnliche Absorptionseigenschaften des Werkstoffes gegenüber der jeweils einfallenden Laserstrahlung hin. Die resultierende Abtragsgeometrie unterscheidet sich jedoch deutlich zur Abtragsgeometrie, die durch CO₂-Laserstrahlung erzeugt wird (Abb. 53). Aufgrund der geringeren geometrischen Abmessung der einfallenden Laserstrahlung ergeben sich bei Bearbeitung mit FK-Laserstrahlung schmalere Abtragsbreiten, die in größeren Abtragstiefen resultieren. Beiden ist aber gleich, dass die Kerbflanken äußerst glatt sind und keine Ausbrüche zu erkennen sind.

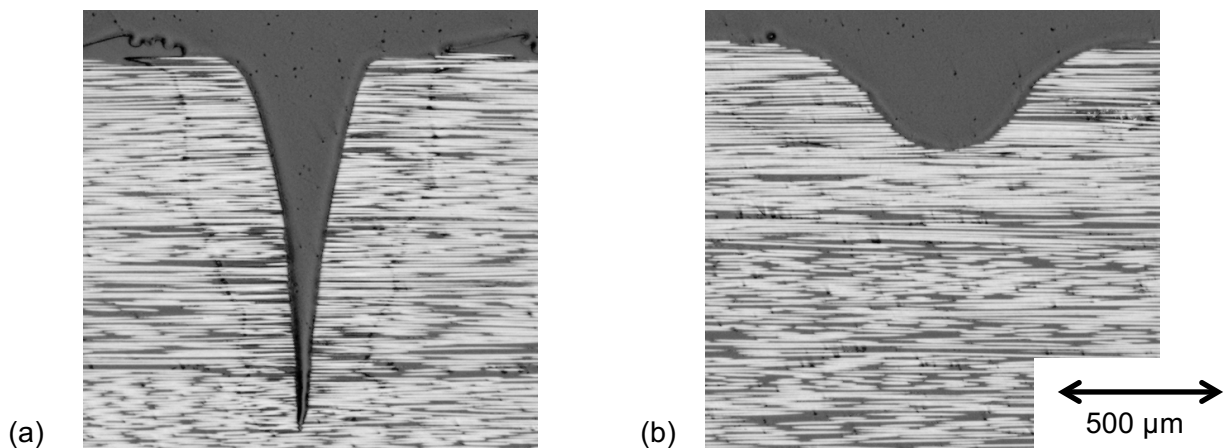


Abb. 53 Lichtmikroskopische Aufnahme repräsentativer Querschliffe von Schnittproben, $P_{L,FKL} = 1200$ W, $v_v = 3$ m/s, $n = 10$ (a) und $P_{L,CO_2} = 1200$ W, $v_v = 3$ m/s, $n = 10$ (b)

Der Vergleich zu den erforderlichen Streckenenergien, ausgehend von der Annahme, dass das abgetragene Volumen vollständig verdampft ist, zeigt, dass auch mittels FK-Laserstrahlung ein Großteil des Werkstoffes zur Schnittbildung unabhängig von der Faserorientierung verdampft wird. Weiterhin ist auch bei der Bearbeitung mit FK-Laserstrahlung ein verminderter Abtrag bei der Bearbeitung quer zur Faserorientierung gegenüber der Bearbeitung längs zur Faserorientierung festzustellen (Abb. 52).

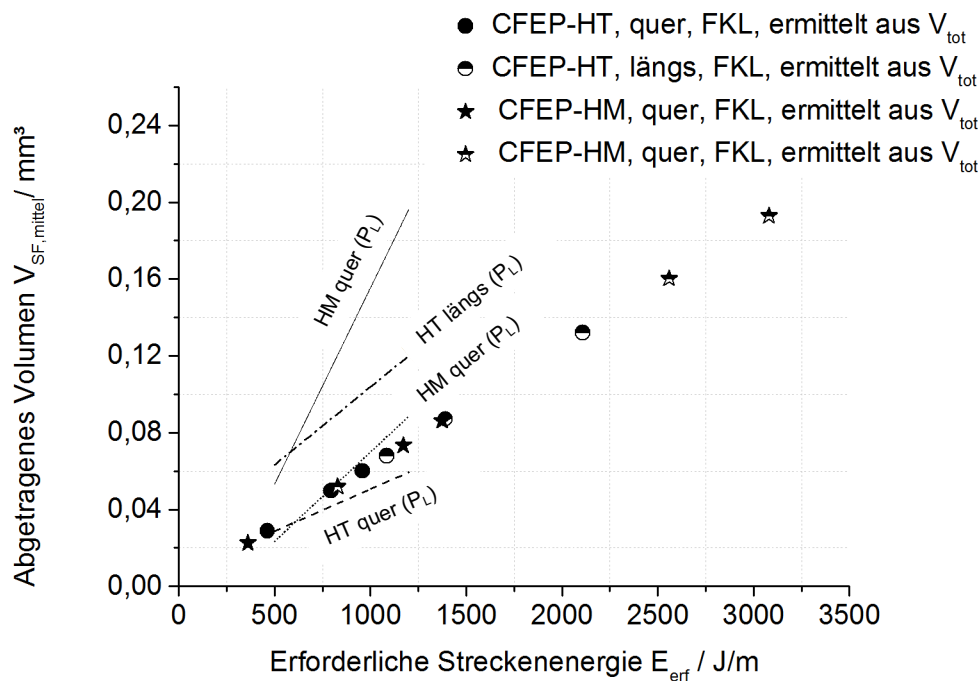


Abb. 54 Erforderliche Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für CFEP mit Festkörperlaserstrahlung bearbeitet $v_f = 1 \text{ m/s}$ (linearer Verlauf übertragen aus Abb. 52)

Unter der Annahme, dass das Volumen innerhalb der Schnittkerbe vollständig verdampft wird, resultieren geringere erforderliche Streckenenergien im Vergleich zum abgebildeten experimentell ermittelten Verlauf bei der Betrachtung von der Bearbeitung längs zur Faserorientierung. Dagegen sind höhere erforderliche Streckenenergien bei Bearbeitung quer zur Faserorientierung notwendig.

Aufgrund dieser Differenz kann, vergleichbar zur Bearbeitung mittels CO_2 -Laserstrahlung darauf geschlossen werden, dass das Abtragsverhalten in Abhängigkeit der Bearbeitungsrichtung zur Orientierung der Verstärkungsfaser einen Einfluss auf die Schnittbildung hat. Allerdings ist dieser Einfluss bei Bearbeitung mittels FK-Laserstrahlung deutlich geringer als bei der Bearbeitung mittels CO_2 -Laserstrahlung. Das lässt sich durch die kürzere Wechselwirkungszeit zwischen FK-Laserstrahl und Werkstoff, gegeben durch dessen geringere geometrische Abmessung begründen und steht in Übereinstimmung mit dem Stand der Technik, siehe dazu KLOTZBACH u. a., 2013a; STOCK u. a., 2014.

8.3 Verifizierung und Diskussion GFPP-S

Generell zeigt Abb. 55-a, dass die berechneten Parametersätze zu der festgelegten Abtrags-tiefe von $t_{\text{sf}} = 1 \text{ mm}$ führen.

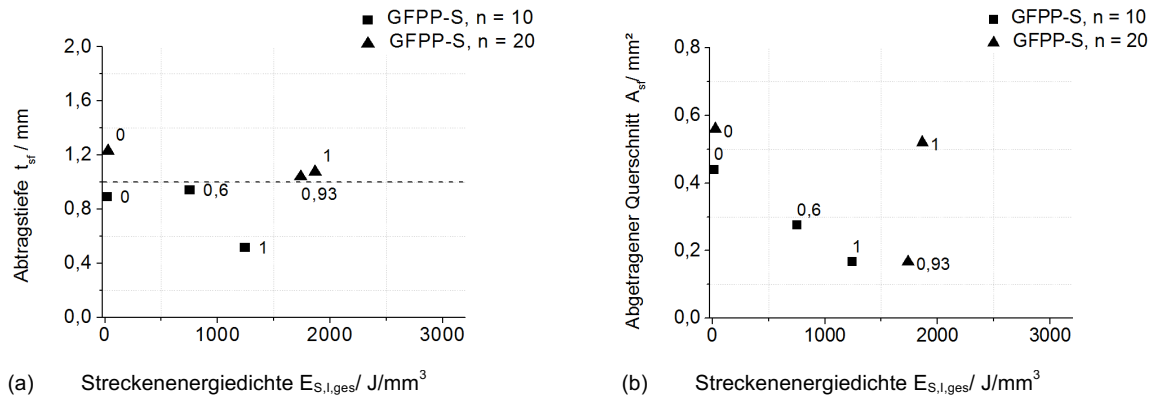


Abb. 55 Abtragtiefe (a) und abgetragener Querschnitt, je Zyklus (b) als Funktion der Streckenenergiedichte für GFPP-S (Zahlenwerte stehen für den Anteil der Festkörperlaserstrahlung $P_{L,proz,FKL}$)

Betrachtet man die abgetragenen Querschnitte in Abb. 55-b so ergibt sich mit steigender Streckenenergiedichte ein konträres Bild zu dem vorher betrachteten Werkstoff CFEP. Mit zunehmender Streckenenergiedichte nimmt der abgetragene Querschnitt bei der Bearbeitung mit 10 Überfahrten ab. Der optimierte Parametersatz, der durch einen Anteil von FK-Laserstrahlung von $P_{L,proz,FKL} = 0,6$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_V = 3$ m/s gekennzeichnet ist, führt zur vorgegebenen Schnitttiefe von $t_{sf} = 1$ mm. Interessant ist hier die erreichte Abtragtiefe bei Bearbeitung mittels reiner FK-Laserstrahlung. Trotz der hohen Streckenenergiedichte kann lediglich die halbe Abtragtiefe erreicht werden. Maßgeblichen Einfluss hat hier das Absorptionsverhalten des Werkstoffes, der die Vorteile der geometrischen Abmessung der FK-Laserstrahlung überlagert. Aufgrund der Additivierung des Matrixwerkstoffes durch Ruß sind die absorbierten Anteile der einfallenden Laserstrahlung im Matrixwerkstoff vergleichsweise hoch. Allerdings sind diese Anteile nicht hoch genug, um die Vorteile, die sich durch die geometrischen Abmessungen dieser Strahlung ergeben, vollständig auszunutzen. Der Anteil an CO_2 -Laserstrahlung erhöht hier, aufgrund seiner hohen absorbierten Anteile im Werkstoff, die Abtragsrate in der Art, dass bei Bearbeitung mit 10 Überfahrten die Zielabtragtiefe von 1 mm mit einem Maximum an Vorschubgeschwindigkeit erreichbar ist. Ein konträres Bild ergibt sich bei der Bearbeitung mit 20 Überfahrten. Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit bedingt eine Erhöhung der Überfahrtenanzahl, um die Zielabtragtiefe zu erreichen. Damit einher geht eine Verringerung der Streckenenergiedichte und eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit je Überfahrt, da der Anteil an FK-Laserstrahlung an der Gesamtlaserstrahlung steigt. Hier führt der optimierte Parameter zwar zur größten Annäherung an die Zielabtragtiefe, aber nicht zu einem Maximum der Abtragtiefe. Das spiegelt sich auch bei der Betrachtung der abgetragenen Querschnitte wieder (Abb. 55-b). Es wird angenommen, dass über die längere Gesamtbearbeitungsdauer, die sich durch die konstante Pausenzeit zwischen den Überfahrten ergibt, der Faservolumengehalt und der Anteil thermisch zersetzter Matrixbestandteile in einem höheren Maße gegenüber der Bearbeitung mit 10 Überfahrten ansteigt. Somit können die Vorteile, die durch die geometrischen Abmessungen der FK-Laserstrahlung gegeben sind, besser ausgenutzt werden. Im Gegensatz zu CFEP führt die Bearbeitung mit 20 Überfahrten aber nicht zu einer Verringerung der Breite der wärmebeeinflussten Zone. Vielmehr ist eine Vergrößerung der thermisch beeinflussten Bereiche von 1,8 auf 2,1 mm festzustellen. Unter Beachtung der geringen Kerbbreiten vergrößert sich dieser Bereich von 0,71 mm auf 0,9 mm. Dies unter-

stützt die Vermutung der lokalen thermischen Zersetzung und einer Anreicherung an Absorbieren für die FK-Laserstrahlung des Matrixwerkstoffes (Abb. 56).

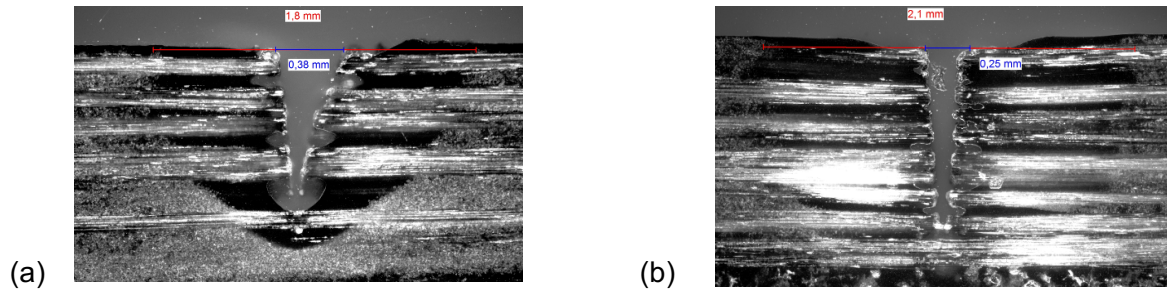


Abb. 56 Dunkelfeldaufnahme von Schnittproben, $P_L = 1200 \text{ W}$, mit $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,6$, $v = 3 \text{ m/s}$, $n = 10$, $b_{\text{wez, ges}} = 1,8 \text{ mm}$, $b_{\text{SF}} = 0,38 \text{ mm}$ (a) und $P_{L, \text{proz, FKL}} = 0,93$, $v = 4 \text{ m/s}$, $n = 20$, $b_{\text{wez, ges}} = 2,1 \text{ mm}$, $b_{\text{SF}} = 0,25 \text{ mm}$ (b)

Neben der hohen Prozessgeschwindigkeit steht aber auch die Minimierung der wärmebeeinflussten Zone im Vordergrund. Daher ist von der Bearbeitung mit der Zyklenanzahl 20, trotz der höheren Vorschubgeschwindigkeit abzusehen, da dieser Parameter zu einer Vergrößerung der wärmebeeinflussten Zone führt, auch wenn FÜRST u. a., 2014, nachweisen, dass die thermische Beeinflussung der Schnittkanten von glasfaserverstärkten Werkstoffen keinen Einfluss auf das Schädigungsverhalten des Werkstoffes hat.

In Abb. 57-a ist die durch die Laserstrahlquelle eingebrachte Energie und das daraus resultierende abgetragene Volumen für GFPP-S dargestellt. Vergleichbar zu CFEP ist der Zusammenhang zwischen abgetragenem Volumen je Zyklus und der eingebrachten Streckenenergie linear und mit Hilfe der Ausgleichsgeraden dargestellt. Die im Vergleich zur Kohlenstofffaser deutlich geringere und isotrope Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit der geringeren Verdampfungstemperatur der Glasfaser ermöglicht bei vergleichbaren Bearbeitungsparametern höhere Abtragsvolumen. Der Einfluss der Schnittrichtung gegenüber der Faserorientierung ist durch höhere abgetragene Volumina bei Schnitten längs zur Faserorientierung in Abb. 57 erkennbar.

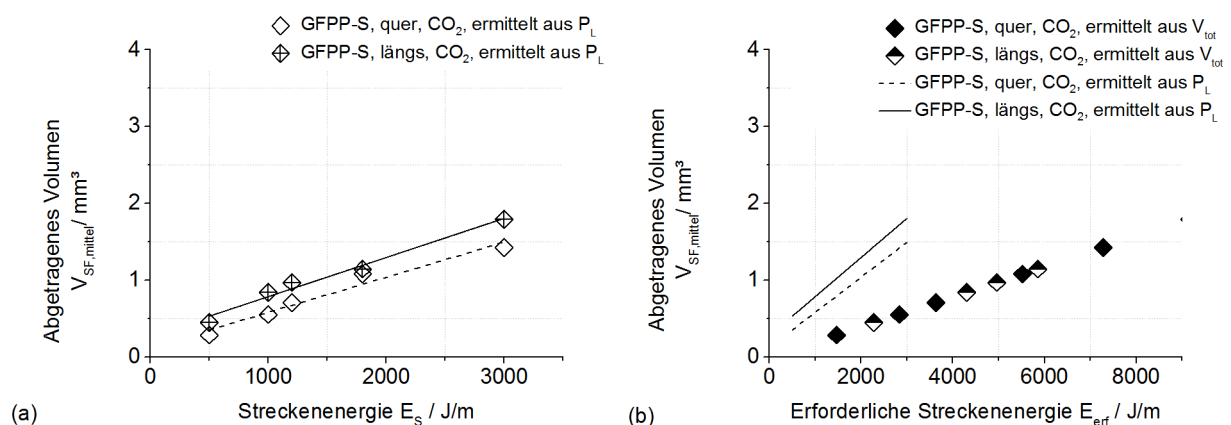


Abb. 57 Benötigte Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für GFPP-S mit CO_2 -Laserstrahlung bearbeitet, bei $v_V = 1 \text{ m/s}$, (a) und ermittelte erforderliche Streckenenergie (b)

Abb. 57-b liefert einen weiteren interessanten Aspekt. Unter der Annahme, dass das aus der Schnittkerbe entfernte Volumen vollständig verdampft, ist eine erhebliche Differenz der daraus berechneten erforderlichen zur tatsächlich eingebrachten Energie, gerade bei Schnitt-

ten längs zur Faserorientierung, zu erkennen. Diese Differenz lässt sich durch Betrachtung repräsentativer Aufnahmen erklären. Die Abb. 58-a und -b zeigen Schnittproben, die mittels CO_2 -Laserstrahlung erzeugt wurden. Schnitte, die quer zur Faserorientierung ausgeführt werden, sind dadurch gekennzeichnet, dass das Verstärkungsmaterial vollständig durchtrennt werden muss. Das ist bei Schnitten längs zur Faserorientierung nicht notwendig. Hier erfolgt ein Abtrag des Werkstoffes schon durch Überwindung der Faser-Matrixhaftung. Auf Grund des in der Schnittkerbe vorhandenen Verdampfungsdruckes werden die Faserbestandteile aus der Schnittkerbe ausgetrieben. Im Gegensatz zur Bearbeitung von CFEP in Faserlängsrichtung sind die Geometrien der Kerbflanken deutlich unregelmäßiger ausgebildet. In Verbindung mit den höheren Werten, die die erforderlichen Streckenenergien zum vollständigen Verdampfen des Werkstoffes einnehmen, ist davon auszugehen, dass im Gegensatz zu CFEP der Verdampfungsdruck einen nicht unerheblichen Anteil an der Schnittbildung hat.

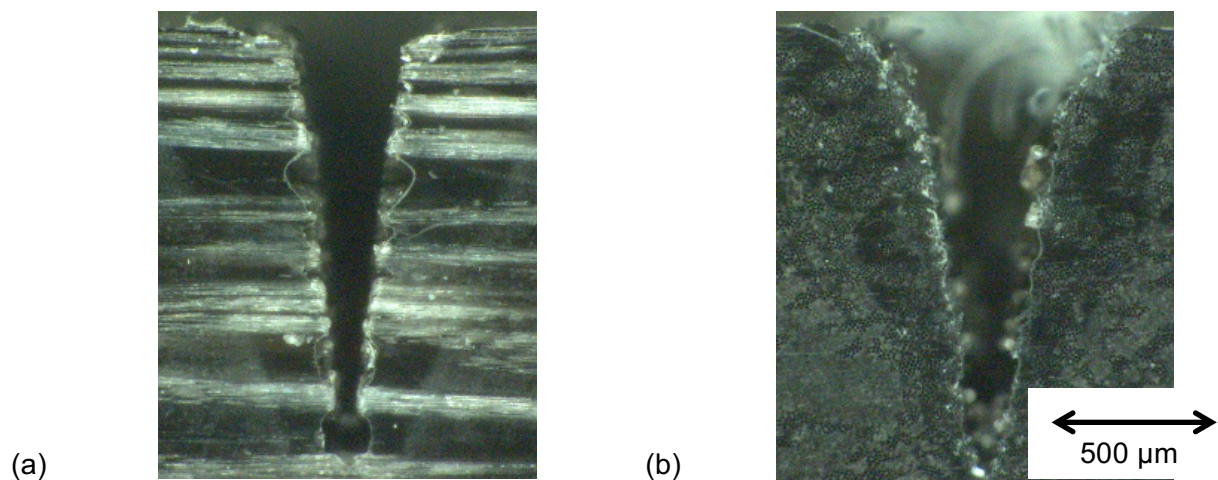


Abb. 58 Lichtmikroskopische Aufnahme repräsentativer Querschliffe von Schnittproben, GFPP-S, $P_{L, \text{CO}_2} = 1200 \text{ W}$, $v_V = 1 \text{ m/s}$, $n = 10$, quer zur Faserorientierung (a) und längs zur Faserorientierung (b)

Ein vergleichbares Bild ergibt sich für die Bearbeitung dieses Werkstoffes mit FK-Laserstrahlung (Abb. 58-b). Die Kerbflanken sind gegenüber der Bearbeitung mit CO_2 -Laserstrahlung deutlich unregelmäßiger, weshalb die erforderlichen Streckenenergien deutlich höhere Werte annehmen, als die durch die Strahlquelle eingebrachten (Abb. 59). Bezieht man das Absorptionsverhalten in die Betrachtung mit ein (vgl. Tabelle 5), so ist nachvollziehbar, dass im Gegensatz zu CFEP und der Bearbeitung mittels CO_2 -Laserstrahlung ein Anteil der einfallenden Festkörperlaserstrahlung in den Werkstoff eindringt und erst in tieferen Schichten vom Werkstoff absorbiert wird.

74 Verifizierung und Diskussion der Ergebnisse

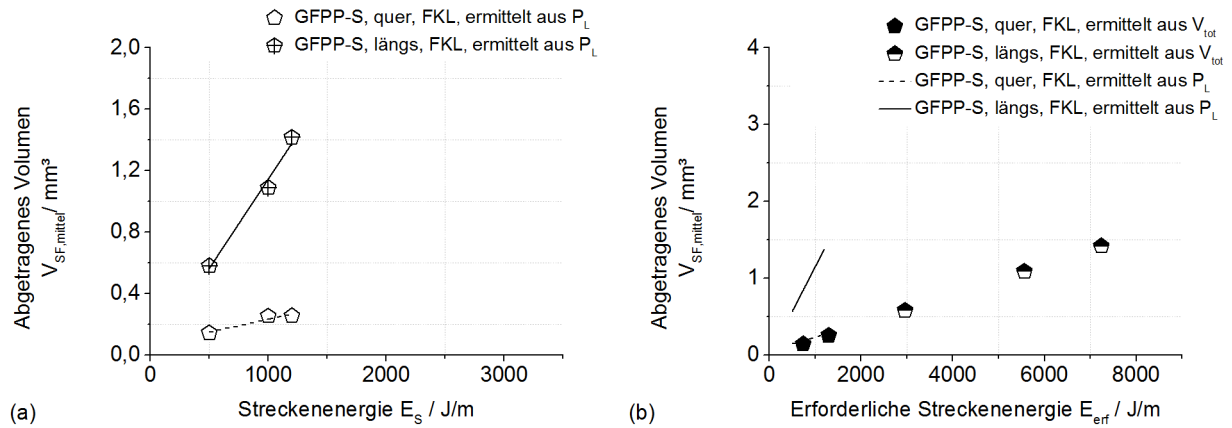


Abb. 59 Benötigte Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für GFPP-S mit Festkörperlaserstrahlung bearbeitet, bei $v_v = 1 \text{ m/s}$, (a) und ermittelte erforderliche Streckenenergie (b)

Neben dem Absorptionsverhalten des Werkstoffes muss auch das Abtragsverhalten in Abhängigkeit der Schnitttrichtung betrachtet werden. In Abb. 59-a ist dargestellt, dass die zum vollständigen Verdampfen des Werkstoffes erforderliche Streckenenergie bei Schnitten quer zur Faserorientierung vergleichbar zur eingebrachten Streckenenergie ist. Dies resultiert in schmalen Schnittfugen, wie in Abb. 60-a dargestellt ist. Dahingegen ist die Schnittkerbe bei der Bearbeitung in Faserlängsrichtung deutlich breiter ausgeprägt (Abb. 60-b). Auch bei der Bearbeitung mittels FK-Laserstrahlung tritt der oben beschriebene Effekt unterschiedlichen Abtragsmechanismen in Abhängigkeit zur Schnitttrichtung auf. Schnitte, die quer zur Faserorientierung ausgeführt werden, sind dadurch gekennzeichnet, dass das Verstärkungsmaterial vollständig zu durchtrennen ist, wohingegen bei der Bearbeitung in Faserlängsrichtung ein Abtrag des Werkstoffes schon durch Überwindung der Faser-Matrixhaftung und infolge des in der Schnittkerbe vorhandenen Druckes ein Austrieb der Faserbestandteile aus der Schnittkerbe erfolgt.

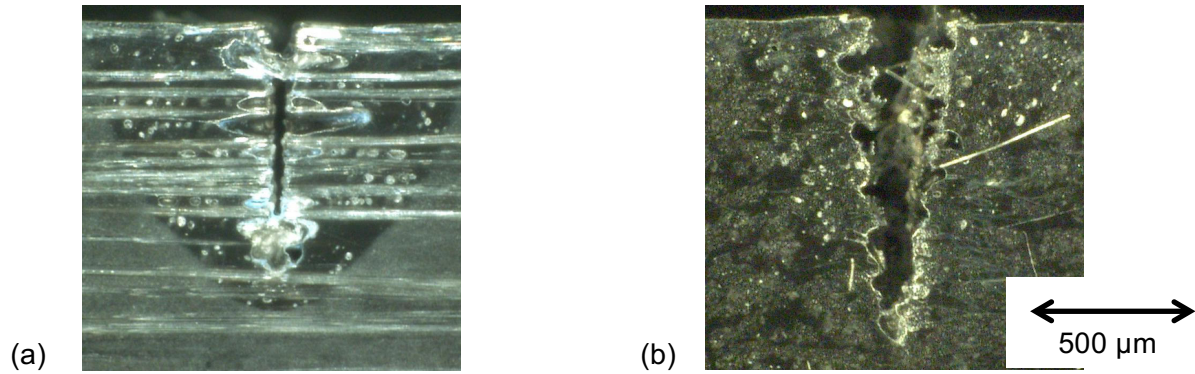


Abb. 60 Lichtmikroskopische Aufnahme repräsentativer Querschliffe von Schnittproben, GFPP-S, $P_{L,FKL} = 1200 \text{ W}$, $v_V = 1 \text{ m/s}$, $n = 10$, quer zur Faserorientierung (a) und längs zur Faserorientierung (b)

Allerdings muss festgehalten werden, dass sich beide Effekte - die der größeren Eindringtiefe der FK-Laserstrahlung in das Material und der beschriebene Abtragsmechanismus bei Schnitten in Faserlängsrichtung - überlagern. Innerhalb dieser Arbeit ist eine klare Trennung beider Effekte aber nicht möglich.

8.4 Verifizierung und Diskussion GFPP-W

Die in Abb. 61 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass auch mit den berechneten optimierten Parametern zum Trennen von GFPP-W die definierte Abtragstiefe erreicht, bzw. überschritten wird.

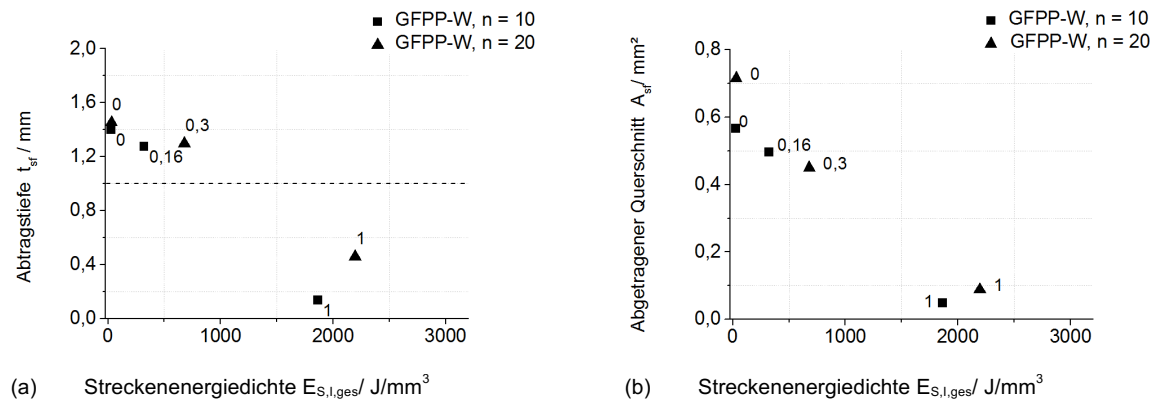


Abb. 61 Abtragstiefe (a) und abgetragener Querschnitt je Zyklus (b) als Funktion der Streckenenergiedichte für GFPP-W (Zahlenwerte stehen für den Anteil der Festkörperlaserstrahlung $P_{L,proz,FKL}$)

Betrachtet man die abgetragenen Querschnitte in Abb. 61-b, so muss festgestellt werden, dass mit sinkender Streckenenergiedichte, also mit Zunahme des Anteiles an FK-Laserstrahlung ein minimierter Abtrag zu verzeichnen ist. Das geht einher mit einer außerordentlich geringen Abtragstiefe (Abb. 61-a). Erst mit Vergrößerung der Streckenenergiedichte durch Erhöhung der Anteile an CO_2 -Laserstrahlung erhöht sich auch der abgetragene Querschnitt je Zyklus und damit auch die Abtragstiefe. Dieses Verhalten ist ausschließlich über die Anteile der absorbierten Laserleistung im Werkstoff zu erklären. Zieht man Abb. 26 (Kapitel 4) hinzu sind sehr geringe Anteile an absorbierte FK-Laserstrahlung im Werkstoff zu verzeichnen. In dem Matrixwerkstoff werden hohe Anteile an FK-Laserstrahlung transmittiert, gleichzeitig ist ein vergleichsweise hoher Anteil an gestreut reflektierter Strahlung ermittelt,

der von der Oberfläche der Glasfasern reflektiert wird. An der Umwandlung in Wärme haben der reflektierte und transmittierte Anteil der einfallenden Laserstrahlung keinen Anteil. Aufgrund der geringen Anteile der absorbierten FK-Laserleistung können die Vorteile, die sich durch die geringen geometrischen Abmessungen der Strahlung in der Strahltaile ergeben, nicht ausgenutzt werden um eine hohe Abtragtiefe zu erreichen. Vergleichbar zu GFPP-S führen optimierte Parameter, die durch ein Mischungsverhältnis beider Strahlquellen gekennzeichnet sind, zur größten Annäherung an die zu erreichende Abtragtiefe $t_{sf} = 1$ mm. Mit steigender Zyklenanzahl geht, vergleichbar zur GFPP-S eine geringe Erhöhung des Anteiles an FK-Laserstrahlung einher. Erklärbar ist dies durch die während der Bearbeitung freigelegten Fasern an den Kerbflanken (Abb. 62). Damit einher geht eine lokale Anhebung des Faservolumengehaltes und infolge dessen eine lokal erhöhte Absorption der einfallenden FK-Laserstrahlung, wie es auch in Kapitel 4 dargestellt ist.

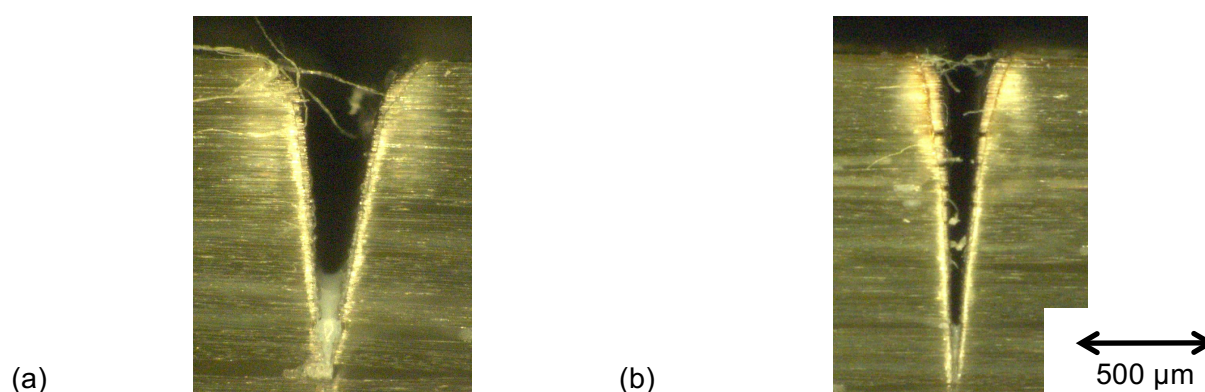


Abb. 62 Lichtmikroskopische Aufnahme repräsentativer Querschliffe von Schnittproben, GFPP-W, $P_{L, \text{proz, FKL}} = 16 \%$, $v_v = 2$ m/s, $n = 10$ (a) und $P_{L, \text{proz, FKL}} = 30 \%$, $v_v = 3,4$ m/s, $n = 20$ (b)

Bedingt durch die Erhöhung der Zyklenanzahl auf 20, sind höhere Vorschubgeschwindigkeiten realisierbar, um eine vergleichbare Abtragtiefe zu erreichen. Allerdings bedingt die Verdopplung der Zyklenanzahl auch eine Erhöhung der Bearbeitungszeit und damit eine Verlängerung der Wechselwirkungszeit mit den aus der Schnittkerbe entweichenden Abprodukten, die mit den Kerbflanken wechselwirken. Das vergrößert den Bereich des lokal angehobenen Faservolumengehaltes, infolge dessen sich die lokalen Absorptionseigenschaften in der Art verändern, dass ein höherer Anteil an FK-Laserstrahlung zu einer vergleichbaren Abtragtiefe führt. Es ist allerdings festzustellen, dass ein Maximum der Abtragtiefe durch die Bearbeitung mit reiner CO_2 -Laserstrahlung erreichbar ist, weshalb eine Überlagerung der Strahlung beider Strahlquellen als nicht sinnvoll betrachtet wird. Die Vorteile die sich durch die geringen geometrischen Abmessungen der Strahlkaustik des FK-Lasers ergeben, haben infolge der geringen Anteile an absorbierte FK-Laserstrahlung keinen positiven Einfluss auf die Schnittbildung.

Der Vergleich der durch die Strahlquelle eingebrachten Streckenenergie und der erforderlichen Streckenenergie, die sich unter der Annahme des vollständigen Verdampfens des Werkstoffes in der Schnittkerbe ermitteln lässt, bestätigt die oben getroffenen Annahmen. Vergleichbar zu den bisher betrachteten Werkstoffen steigt das abgetragene Volumen pro Zyklus mit steigender Streckenenergie bei Bearbeitung mittels CO₂-Laserstrahlung linear an (Abb. 63-a). Aufgrund der isotropen thermischen Eigenschaften ist das Abtragsverhalten nahezu unabhängig von der Ausrichtung des Schnittes gegenüber der Faserorientierung.

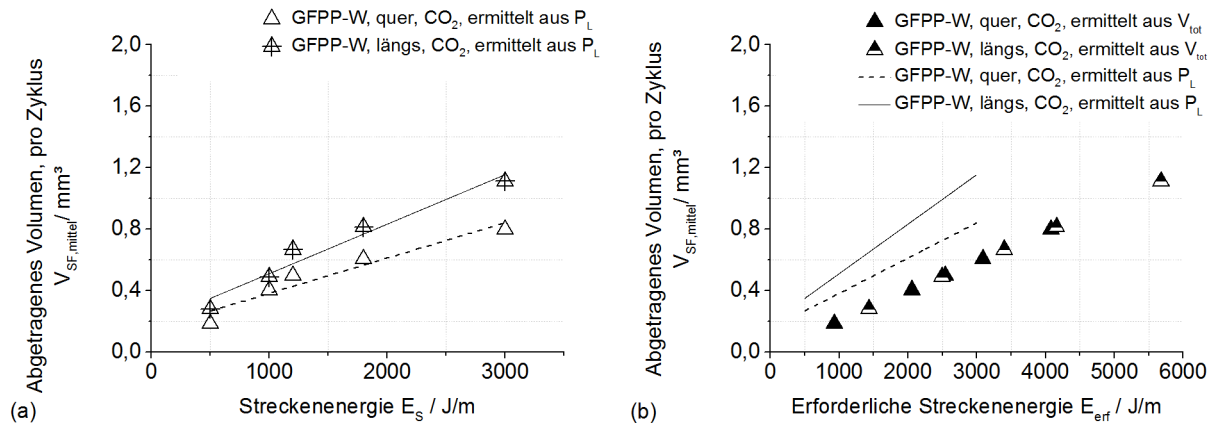


Abb. 63 Benötigte Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für GFPP-W mit CO₂- Laserstrahlung bearbeitet, bei $v_v=1$ m/s, (a) und ermittelte erforderliche Streckenenergie (b)

Die geringen Differenzen zwischen dem Abtragsverhalten entlang der jeweiligen Faserorientierung sind anhand der Probekörper in Abb. 64 nachvollziehbar und durch die thermischen und optischen Eigenschaften der Einzelwerkstoffe erklärbar. In Abb. 27 (Kapitel 4) kann der hohe absorbierte Anteil der einfallenden CO₂-Laserstrahlung nachvollzogen werden. Gleichzeitig weisen Glasfaser und Matrixwerkstoff und damit auch der Werkstoff isotrope Wärmeleitfähigkeiten auf. In Verbindung mit der vergleichsweise geringen Verdampfungstemperatur der Glasfaser sind hohe Abtragsraten unabhängig von der Schnitttrichtung gegenüber der Faserorientierung erreichbar.

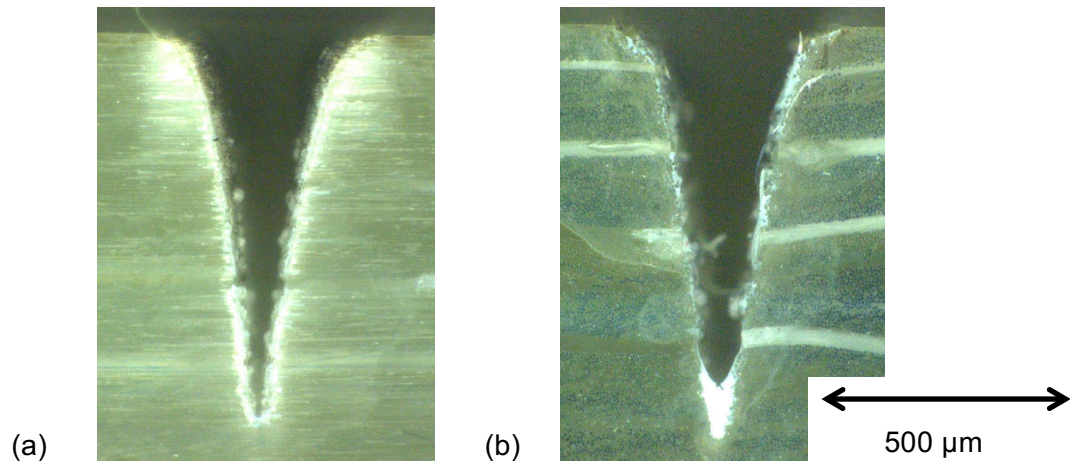


Abb. 64 Lichtmikroskopische Aufnahme repräsentativer Querschliffe von Schnittproben, GFPP-W, $P_{L, CO_2} = 1200 \text{ W}$, $v_v = 1 \text{ m/s}$, $n = 10$, quer zur Faserorientierung (a) und längs zur Faserorientierung (b)

Vergleichbar zu GFPP-S ergeben sich aber höhere erforderliche Streckenenergien aus der Annahme, dass das Abtragsvolumen vollständig verdampft ist (Abb. 63-b). Auch bei diesem Werkstoff ist davon auszugehen, dass ein Anteil des Werkstoffes in der Schnittkerbe nicht infolge der Laserbearbeitung verdampft, sondern durch den entstehenden Verdampfungsdruck aus der Schnittkerbe ausgetrieben wird. Die aus dem abgetragenen Volumen ermittelten erforderlichen Streckenenergien sind bei der Bearbeitung entlang der Faserorientierung höher als quer dazu. Vergleichbar zu den bisher betrachteten Werkstoffen muss der Verstärkungsfaserteil vollständig durchtrennt werden, um einen Schnitt quer zur Faserorientierung zu erhalten. Dahingegen ist bei Schnitten entlang der Faserorientierung vergleichbar zu GFPP-S davon auszugehen, dass ein Abtrag schon dann erfolgt, wenn die Faser-Matrixhaftung überwunden ist und der in der Schnittkerbe erzeugte Verdampfungsdruck in der Lage ist das Material aus der Schnittkerbe auszutreiben. Ein vollständig gegensätzliches Bild ergibt sich bei der Bearbeitung mittels FK-Laserstrahlung. In Abb. 65-a sind signifikant unterschiedliche abgetragene Volumina je nach Bearbeitungsrichtung gegenüber der Faserorientierung dargestellt. Das abgetragene Volumen bei Bearbeitung längs zur Faserorientierung, ist bei gleicher Streckenenergie deutlich höher als quer zur Faserorientierung, und die erreichbaren abgetragenen Volumina sind deutlich geringer gegenüber der Bearbeitung mit CO_2 -Laserstrahlung. Die geringen geometrischen Abmessungen der FK-Laserstrahlung führen zwar zu einer schmalen Schnittkerbe mit geraden Schnittkanten bei einer Schnittrichtung quer zur Faserorientierung (Abb. 66- a), allerdings können die Vorteile, die sich durch die geringen Abmessungen der FK-Laserstrahlung ergeben, nicht ausgenutzt werden, da der Anteil der vom Werkstoff absorbierten Laserstrahlung gering ist.

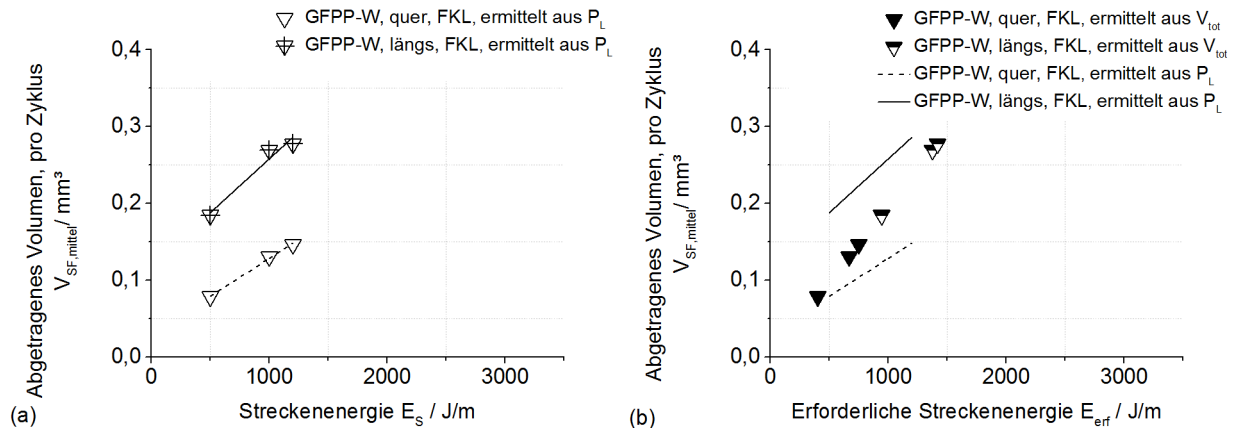


Abb. 65 Benötigte Streckenenergien zum Erreichen des mittleren abgetragenen Querschnittes pro Zyklus für GFPP-W mit FK-Laserstrahlung bearbeitet, bei $v_v = 1$ m/s (a) und ermittelte erforderliche Streckenenergie (b)

Die Bearbeitung von GFPP-W mit FK-Laserstrahlung längs zur Faserorientierung liefert die in Abb. 66-b dargestellte äußerst unregelmäßige Kerbgeometrie. Entsprechend große Differenzen der aus dem verdampften Volumen ermittelten erforderlichen Streckenenergie und der durch die Strahlquelle eingebrachten Streckenenergie sind in Abb. 65- b dargestellt. Es ist davon auszugehen, dass sich die Effekte, der hohen Eindringtiefe der Strahlung in den Werkstoff einerseits, und ein Abtragsmechanismus, der sich schon bei Überschreiten der Faser- Matrix- Haftung einstellt, überlagern und zu diesen außerordentlich unregelmäßigen Kerbgeometrien führt.

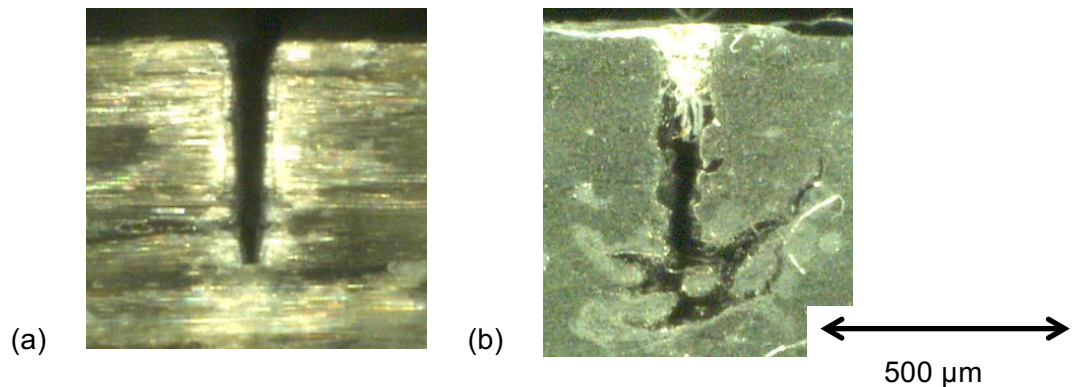


Abb. 66 Lichtmikroskopische Aufnahme repräsentativer Querschliffe von Schnittproben, GFPP-W, $P_{L,FKL} = 1200$ W, $v_v = 1$ m/s, $n = 10$, quer zur Faserorientierung (a) und längs zur Faserorientierung (b)

9 Zusammenfassung und Ausblick

Zielstellung der vorliegenden Dissertation war die Entwicklung des Remote-Laserstrahlschneidens für Faser-Kunststoff-Verbunde mit der Möglichkeit, die Laserstrahlung zweier Strahlquellen mit den Wellenlängen $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ und $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ simultan zu nutzen. Damit ergeben sich neuartige Freiheitsgrade innerhalb der Lasermaterialbearbeitung. Zum einen ermöglicht die Systemtechnik ein einstellbares Mischungsverhältnis der Ausgangsleistung beider Strahlquellen und damit eine simultane Bearbeitung des Werkstückes. Zum anderen bietet die schnelle Ansteuerbarkeit der Strahlquellen die Möglichkeit einer sequentiellen Bearbeitung also einer Abarbeitung einer Schneidkontur mit alternierender Anwahl der Strahlquellen.

Die Eruierung des Standes der Technik erbrachte, dass ein gasunterstützter Bearbeitungsprozess nicht geeignet ist, Faser-Kunststoff-Verbunde mit stark voneinander abweichenden thermischen und optischen Eigenschaften zu trennen. Dem Stand der Technik ist zu entnehmen, dass eine Verkürzung der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Werkstoff, zu einer Anhebung der Schnittqualität führt. Allerdings ergibt sich hier eine Differenz aus prozesstechnisch möglichen und prozesstechnisch erforderlichen Wechselwirkungszeiten, die mit einem gasunterstützten Schneidprozess nicht realisierbar sind. Der Stand der Technik offenbarte, dass mehrere Konzepte bekannt sind, um diese Problematik zu lösen. Den Konzepten ist die Verwendung des Remote-Verfahrens gleich, das eine Ablenkung der Laserstrahlung in X- und Y-Richtung eines Arbeitsfeldes ermöglicht. Als Strahlquellen kommen kontinuierlich und gepulst emittierende brillante Laserstrahlquellen zum Einsatz. Die mit dem Remote-Verfahren möglichen hohen Vorschubgeschwindigkeiten verkürzen die Wechselwirkungszeit derart, dass gegenüber dem gasunterstützten Laserstrahlschneiden geringere thermisch bedingte Schäden im Werkstoff resultieren. Eine weitere Verkürzung der Wechselwirkungszeit, mit der auch eine signifikante Anhebung der Schnittqualität einher geht, ist durch die Verwendung von gepulst emittierenden Strahlquellen mit Pulslängen bis zu kleiner 10 ps erreichbar. Allerdings geht damit auch eine Verringerung der Abtragsrate einher. Anhand eines typischen Bearbeitungsszenarios konnten beispielhaft die Verfahren gasunterstütztes Laserstrahlschneiden, Remote-Laserstrahlschneiden mit kontinuierlich betriebenen Strahlquellen und das Remote-Laserstrahlschneiden mit gepulst emittierenden Strahlquellen gegenüber gestellt werden. Trotz der hohen Pulsspitzenleistungen ist der Abtrag, aufgrund der vergleichsweise langen Pausenzeit zwischen den Pulsen gering. Erst durch eine Anhebung der Repititionsrate und einer deutlichen Steigerung des Überlapps der Pulse ist eine hohe Abtragsrate erreichbar. Ausgehend von den Kenntnissen, die aus dem Stand der Technik gewonnen wurden, stellte sich die Nutzung des Remote-Laserstrahlschneidens mit kontinuierlich betriebenen brillanten Strahlquellen mit den Wellenlängen $\lambda = 1 \mu\text{m}$ und $\lambda = 10 \mu\text{m}$ als zielführend heraus. Im Gegensatz zu Metall ist das thermische und optische Verhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden nicht homogen. Vielmehr weisen die polymeren Matrixanteile als auch die Verstärkungsfaserteile thermisch und je nach einwirkender Laserstrahlung auch optisch gegensätzliche Eigenschaften auf. Hier sind unter anderem die hohen transmittierten Anteile der einfallenden Festkörperlaserstrahlung in Polymeren, bei Bestrahlung mit Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 1 \mu\text{m}$, und die richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit der Kohlenstofffaser zu nennen. Weiterhin gestalten sich die Werkstoffeigenschaften auch infolge des jeweiligen Herstellungsprozesses als inhomogen. Beispielsweise konnte

gezeigt werden, dass die Verteilung der Verstärkungsfaserteile im Werkstoff, je nach Faservolumengehalt sehr unregelmäßig sein kann. Um dieser inhomogenen Materialcharakteristik Rechnung zu tragen, erfolgte die Entwicklung und Umsetzung einer Systemtechnik, die in der Lage ist, Laserstrahlung von zwei kontinuierlich betriebenen Strahlquellen mit den Wellenlängen $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ und $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ zu superpositionieren und in einen Punkt zu fokussieren. Die Bearbeitung der Werkstoffe erfolgte mit dem Remote-Verfahren, um die prozesserforderlichen Wechselwirkungszeiten realisieren zu können. Die angewendete Simulation des Strahlenganges innerhalb des Kombinationsmoduls minimierte die Iterationschleifen der Prototypenfertigung. Da hier der Strahlverlauf als ideal angesehen werden kann, resultiert der Vergleich der ermittelten optischen Parameter mit dem Simulationsmodell in einer Aussage über die Güte des umgesetzten Strahlenganges. Die anschließenden experimentellen Untersuchungen zum Abtragsverhalten unterstützen die Entwicklung des Prozessverständnisses. Als neuartiger Prozessparameter kam hier der Anteil der jeweiligen Laserstrahlung an der Gesamtlaserstrahlung zum Einsatz. Innerhalb der Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden muss immer mit einer hohen Variation an Werkstoffen, je nach Belastungsfall gerechnet werden. Aus diesem Grund kamen für die Untersuchungen mehrere verschiedenartige Endlosfaser-Kunststoff-Verbunde in Frage. Neben den thermisch weitestgehend isotropen Glasfaser-Kunststoff-Verbunden wurde das Abtragsverhalten an Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden, aufgrund deren hoher Wärmeleitfähigkeit in Faserlängsrichtung untersucht. Darüber hinaus wiesen die polymeren Matrixsysteme der Glasfaser-Kunststoff-Verbunde abweichende optische Eigenschaften auf. Weiterhin konnte durch die durchgeführte energetische Betrachtung der Einfluss der Bearbeitungsrichtung gegenüber der Faserorientierung verdeutlicht werden. Hier konnte die Annahme getroffen werden, dass die Bearbeitungsrichtung in Abhängigkeit zur Faserorientierung zu einem unterschiedlichen Abtragsverhalten führt. Zum einen hat die Wärmeleitfähigkeit einen Einfluss auf das Abtragsverhalten, was anhand der Ergebnisse der Bearbeitung des Kohlenstofffaserverbundkunststoffes nachweisbar war. Zum anderen stellen sich bei thermisch isotropen Werkstoffen abweichende Abtragsmechanismen infolge der zum Ausbilden der Schnittkerbe stark differierenden erforderlichen Streckenenergien ein. Eine Überlagerung beider Effekte bei der Bearbeitung von Kohlenstofffaserverbundkunststoffen kann nicht ausgeschlossen werden, ist aber anhand der Ergebnisse innerhalb dieser Arbeit nicht nachweisbar. Die Charakterisierung des Prozesses erfolgte weiterhin durch die Ermittlung optimierter Parameter, um eine Zielabtragtiefe von 1 mm zu erreichen. Der Vergleich der optimierten Parameter mit den äquivalenten Parametern der jeweiligen Einzellaserstrahlung führte zu einer kritischen Diskussion der Vorteile, die eine Superposition beider Laserstrahlen ermöglicht. Hier war nicht in jedem Fall die Vorteilhaftigkeit der Überlagerung darzustellen, sondern gleichermaßen auch der Einfluss der Wechselwirkungszeit und der Intensitätsunterschiede zwischen Laserstrahlung und Werkstoff auf das Abtragsverhalten und die Ausbildung der wärmebeeinflussten Zone im Werkstoff.

Die schnelle Ansteuerung der Strahlquellen erlaubt neben der simultanen Bearbeitung der Werkstoffe auch eine sequentielle Bearbeitung. Das bedeutet, dass die jeweilige für den gerade zu bearbeitenden Werkstoff optimale Strahlquelle während der Abarbeitung der Bearbeitungskontur ausgewählt und entsprechend zugeschaltet werden kann. Damit einher geht eine weitere Möglichkeit zur Anpassung der Bearbeitungskontur an den Werkstoff. Wie dargestellt, können die Werkstoffe aufgrund hoher optischer Qualitätsanforderungen Bereiche mit geringen bis gar keinen und umgekehrt Bereiche mit außerordentlich hohen Faservo-

lumengehalten aufweisen. Durch Auswahl einer angepassten Schneidkontur mit sequentieller Bearbeitung konnte die Bearbeitungsgeschwindigkeit nahezu verdoppelt werden.

Aus dem Stand der Technik sind stellenweise sehr viel größere Abtragstiefen bei vergleichbaren bis geringeren Ausbreitungen der wärmebeeinflussten Zonen bekannt. Innerhalb dieser Arbeit ist die prototypische Systemtechnik auf eine Laserleistung von $P_L = 1200 \text{ W}$ begrenzt, da die verwendeten Kupferspiegel des Remote- Systems nicht ideal zur Ablenkung der Festkörperlaserstrahlung sind. Im Stand der Technik konnte dargestellt werden, dass eine Strahlableitung, beispielsweise für Festkörperlaserstrahlung deutlich über eine Laserleistung von $P_L = 3000 \text{ W}$ möglich ist. In Verbindung mit den sehr kleinen Durchmessern der Strahltaile können, im Vergleich zu dieser Arbeit, deutlich höhere Streckenenergiedichten erzeugt werden. In dessen Folge sind Schnitttiefen von bis zu 8 mm erreichbar. In einer zweiten Ausbaustufe der vorgestellten Systemtechnik, die derzeit umgesetzt wird, sind deutlich höhere Laserleistungen über das Remote-System ablenkbar. Damit einher geht auch eine Vergrößerung des Rohstrahldurchmessers der CO_2 -Laserstrahlung, infolge dessen der Fokussdurchmesser dieser Strahltaile signifikant verringert werden kann. Es ist davon auszugehen, dass sich dadurch das Prozessfenster deutlich verändern wird. Der Fokussierspiegel für die Gesamtlaserstrahlung ist in der derzeitigen Umsetzung derart angeordnet, dass eine Reflexion, frei von Astigmatismus erreichbar ist, wenn dieser korrekt gegenüber der einfallenden Laserstrahlung ausgerichtet ist. Eine alternative Spiegelanordnung sieht zwei reflektierende und fokussierende Elemente vor, die eine Reflexion der Laserstrahlung unter einem flacheren Winkel ermöglichen. Das soll die astigmatische Reflexion verhindern und die Justage der zu reflektierenden Laserstrahlung vereinfachen und weitere Zusatzachsen innerhalb des Strahlengangs ermöglichen.

Innerhalb der experimentellen Versuche mit dem dargestellten Aufbau zur simultanen Überlagerung von Laserstrahlung aus zwei Strahlquellen ist die sequentielle Bearbeitung unter Umständen sinnvoll, um die Vorteile der Systemtechnik auszunutzen und einen Mehrwert gegenüber konventionellen Bearbeitungsmethoden zu schaffen. Die durch die Softwareumgebung nutzbare Ansteuerung der Systemtechnik ist in der Lage, die Strahlquellen innerhalb kürzester Zeit anzuwählen, sodass ein Wechsel zwischen den Strahlquellen innerhalb der Bearbeitung einer Kontur möglich ist. Vorteilhaft zeigt sich diese Eigenschaft bei der Bearbeitung von Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden, die eine hochglänzende, optisch ansprechende Oberfläche aufweisen. Ziel dieser Oberflächen ist die Sichtbarmachung der textilen Struktur der eingesetzten Flächengebilde als Designelement in der Gestaltung optisch ansprechender Bauteile. Beispielhaft zeigt Abb. 67 eine Draufsicht und eine lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffes eines plattenförmigen Werkstoffes, basierend auf Kohlenstofffasern und einer Epoxydharzmatrix mit einem mittleren Faservolumengehalt von $\varphi = 45 \%$.

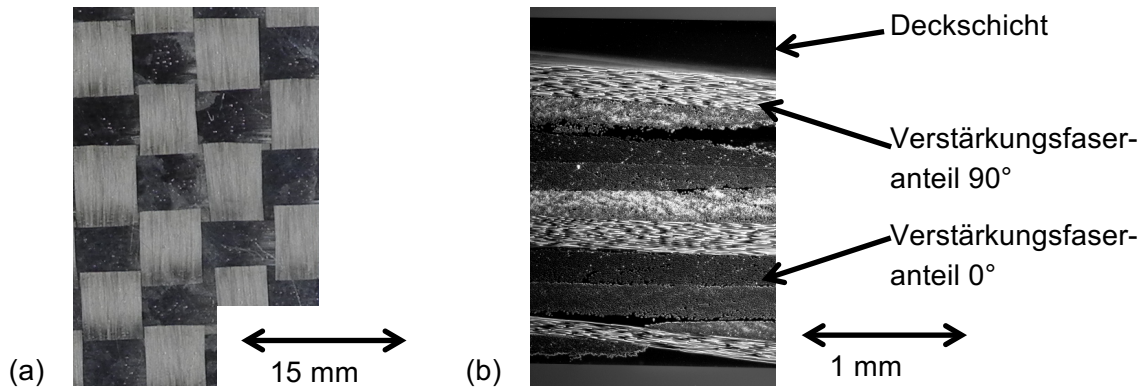


Abb. 67 Draufsicht (a) und lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffes (b) des verwendeten Plattenwerkstoffes

Klar zu erkennen ist in Abb. 67-a die gewebeartige Struktur des verwendeten Flächengebildes mit 90° zueinander versetzter Faserorientierung der eingesetzten Kohlefaserrovings. In Abb. 67-b ist ein repräsentativer Querschnitt dieses Werkstoffes dargestellt. Hier sind klar die Deckschicht, die vollständig aus Epoxydharz besteht und der Verstärkungsfaseranteil zu erkennen. Für die Bearbeitung mit einer spezifischen Wellenlänge ergeben sich mehrere Herausforderungen. Aufgrund der hohen Anteile absorbiertes Laserstrahlung in der polymeren Deckschicht ist die Bearbeitung mit reiner CO_2 -Laserstrahlung in diesem Bereich sinnvoll. Allerdings wird eine schlechte Schnittqualität im Bereich des Verstärkungsfaseranteiles erwartet, da keine ausreichend hohen Intensitäten erreicht werden können um einen effektiven Schnitt durchzuführen. Auch für die Bearbeitung mit FK-Laserstrahlung wird eine ungenügende Schnittqualität erwartet. Für das Durchtrennen des Verstärkungsfaseranteiles stehen ausreichend hohe Anteile der absorbierten Laserstrahlung in diesem Bereich zur Verfügung. Weiterhin ist die Intensität aufgrund der geometrischen Abmessungen der Strahltaile hoch, um kurze Wechselwirkungszeiten realisieren zu können. Demgegenüber steht aber die harzreiche Deckschicht und die geringen absorbierten Anteile der einfallenden FK-Laserstrahlung in diesem Bereich. Die experimentell ermittelten Schneidparameter und die daraus resultierenden Schnittergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14 Experimentell ermittelte Schneidparameter

Strategie	\square in μm	P_L in W	v_v in m/s	n	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm^2
singulär	1,07	1200	1	20	0,165	0,29
singulär	10,6	1200	1	20	0,298	0,62
sequentiell	10,6	600	1	1	0,124	0,29
	1,07	1200	1	10		

Abb. 68 zeigt die Ergebnisse der experimentellen Schneiduntersuchungen. Klar zu erkennen sind die Unterschiede in den Schnittergebnissen, resultierend aus sehr verschiedenartigen Schneidstrategien.

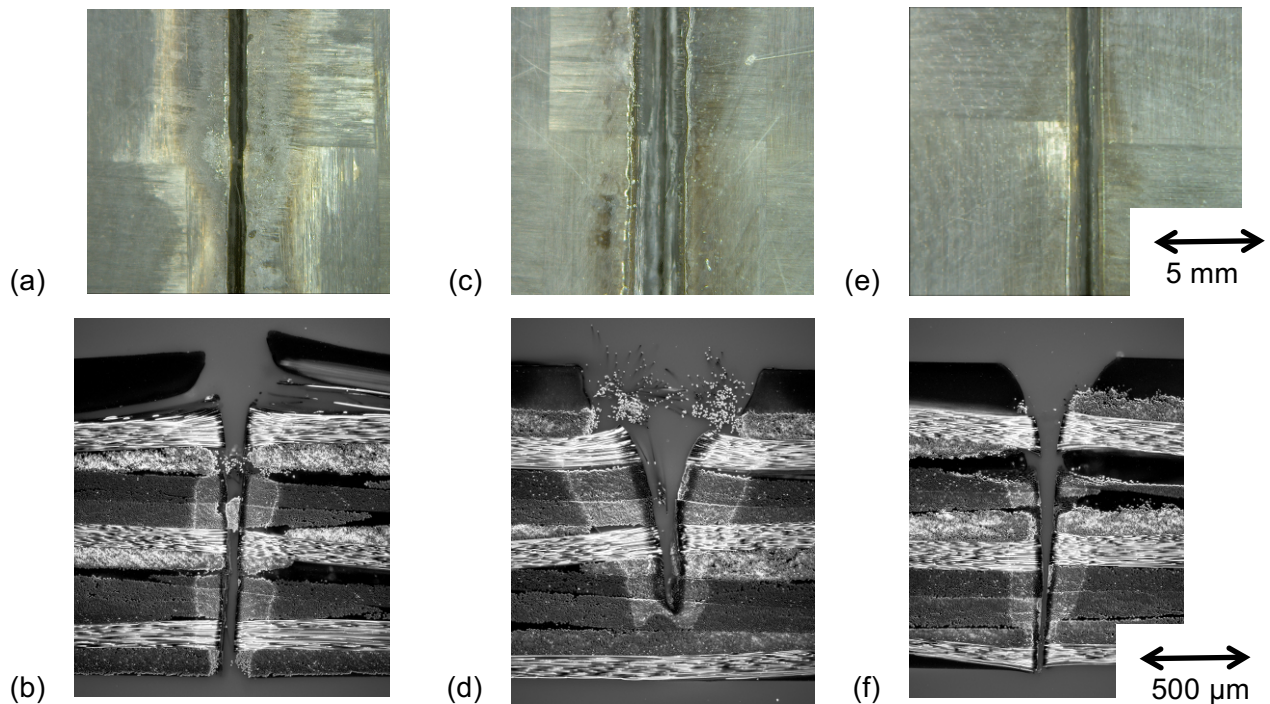


Abb. 68 Draufsicht und Dunkelfeldaufnahme des dazugehörigen Querschliffes für die Bearbeitung mit $P_{L,FKL} = 1200 \text{ W}$, $v_v = 1 \text{ m/s}$, $n = 20$ (a, b), $P_{L,CO} = 1200 \text{ W}$, $v_v = 1 \text{ m/s}$, $n = 20$ (c,d) und $P_{L,CO} = 600 \text{ W}$, $v_v = 1 \text{ m/s}$, $n = 1$ und $P_{L,FKL} = 1200 \text{ W}$, $v_v = 1 \text{ m/s}$, $n = 10$ (e,f)

Die Bearbeitung mit reiner FK-Laserstrahlung führt zu einer Kerbform mit geometrisch äußerst unregelmäßigen Flanken, gerade im Bereich des Strahleintrittes. Hier ist eine Delamination der Deckschicht von der oberen Faserlage erkennbar (Abb. 68-b). Diese Delamination resultiert aus dem Umstand, dass ein Großteil der FK-Laserstrahlung durch die polymere Deckschicht transmittiert und erst von der obersten Faserlage absorbiert wird. Der dabei entstehende Verdampfungsdruck wirkt allseitig und löst die Faser-Matrixhaftung zwischen Deckschicht und erster Faserlage großflächig auf. Weiterhin ist die Oberfläche gekennzeichnet durch Verfärbungen, deren Größe abhängig von der Faserorientierung ist (Abb. 68-a). Diese Verfärbungen müssen als wärmebeeinflusste Zone angesehen werden, demnach ist ein großer Bereich von mehreren Millimetern thermisch zersetzt, bzw. beeinflusst.

Betrachtet man die Schnittergebnisse der Bearbeitung mit reiner CO_2 -Laserstrahlung ergibt sich ein anderes Bild. Abb. 68-d zeigt, dass die verwendeten Parameter nicht zu einem vollständigen Durchtrennen des Werkstoffes führen. Vergleichbar zu den vorhergehenden Untersuchungen ist die Schnittkerbe breiter und weist einen größeren Öffnungswinkel auf. Im Gegensatz zur Bearbeitung mittels FK-Laserstrahlung ist nur eine geringe Ausbreitung der wärmebeeinflussten Zone in Abhängigkeit der Faserorientierung auf der Oberfläche zu erkennen. Hervorzuheben ist der Anteil an verbliebenen Fasern, die längs zur Schnittrichtung orientiert sind (Abb. 68-d). Entsprechend der Annahme, dass bei Schnitten in Faserlängsrichtung ein Abtrag schon dann erfolgt, sobald die Faser-Matrixhaftung überwunden ist, ist der Verbleib dieser Fasern in der Schnittkerbe ein Nachweis für diese Aussage.

Ein vollständig anderes Bild bieten die Schnittergebnisse der sequentiellen Bearbeitung. Hier kann die harzreiche Deckschicht mit Hilfe der CO_2 -Laserstrahlung mit einer sehr geringen Intensität abgetragen und die obere Faserlage somit freigelegt werden. Die anschließende Bearbeitung erfolgt mit FK-Laserstrahlung. Der lokale Faservolumengehalt ist derart hoch,

dass die Vorteile, die die geometrischen Abmessungen der FK-Laserstrahlung bieten, vollständig ausgenutzt werden können. Im Gegensatz zur Bearbeitung mit reiner FK-Laserstrahlung konnte die Anzahl an Überfahrten, bei vergleichbarem abgetragenen Volumen nahezu halbiert werden, was einer annähernden Verdopplung der Bearbeitungsgeschwindigkeit gleich kommt. Gleichzeitig ist die wärmebeeinflusste Zone gegenüber der Bearbeitung mit reiner FK-Laserstrahlung minimiert.

10 Abkürzungs und Formelverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AF	Aramidfasern
AFK	Aramidfaser-Kunststoff-Verbund
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund
CFEP	Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund mit Epoxydharzmatrix
CW-Betrieb	kontinuierliche Wellenform (engl. Continuous Wave)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
EP	Epoxydharz
FKL	Festkörperlaser
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaser-Kunststoff-Verbund
GFPP-S	Glasfaser-Kunststoff-Verbund mit Polypropylenmatrix, rußgefüllt
GFPP-W	Glasfaser-Kunststoff-Verbund mit Polypropylenmatrix, ungefüllt
HM	Hochsteif (engl. High-Modulus)
HT	Hochfest (engl. High-Tensity)
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. International Organization for Standardization)
POS	Post-Objective Scanning
PP	Polypropylen
PROS	Pre-Objective Scanning
RTM	Spritzpressen (engl. Resin Transfer Moulding)
SPE	Lokale Wirkenergie
SPP	Strahlparameterprodukt
UD	Unidirektional
WEZ	Wärmeeinflusszone
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	–	Anteil der im Werkstoff absorbierten Laserleistung
A_{SF}	mm^2	Fläche des verdampften Werkstoffes
b_{SF}	mm	Schnittbreite bei Strahleintritt
b_{WEZ}	mm	Breite der Wärmeeinflusszone bei Strahleintritt
$b_{WEZ,ges}$	mm	Gesamtbreite der Wärmeeinflusszone bei Strahleintritt
C_{ex}		Extinktionskoeffizient
C_{abs}		Absorptionskoeffizient
C_{sc}		Streuungskoeffizient
c_{pF}	$J/kg \cdot K$	Spezifische Wärmekapazität der Faser
c_{pM}	$J/kg \cdot K$	Spezifische Wärmekapazität der Matrix
d	mm	Werkstoffdicke
D_{CO}	mm	Rohstrahldurchmesser des CO ₂ -Laserstrahls
$d_{f,CO}$	mm	Durchmesser des CO ₂ -Laserstrahles im Fokuspunkt
$d_{f,FKL}$	μm	Durchmesser des FK-Laserstrahles im Fokuspunkt
D_k	mm	Faserdurchmesser des Festkörperlaserstrahles
D_{FKL}	mm	Rohstrahldurchmesser des FK-Laserstrahls
E_p	mJ	Pulsenergie
E_s	J/m	Streckenenergie
$E_{s,erf}$	J/m	Erforderliche Streckenenergie
$E_{s,l}$	J/m^3	Streckenenergiedichte
$E_{s,l,ges}$	J/m^3	Gesamtstreckenenergiedichte
E_{tot}	J	Absolut eingebrachte Energie
E_{50}	mJ	Energie, die innerhalb einer Strecke von 50 μm abgegeben wurde
f_k	mm	Brennweite der Kollimation
f_{rep}	Hz	Repititionsrate
I_0	W/mm^2	Durchschnittliche Intensität des Laserstrahls
l_{SF}	mm	Länge der Schnittfuge

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
M^2	–	Beugungsmaßzahl
n	–	Zyklenanzahl
$n_{1,2}$		Brechungsindizes
P_L	W	Mittlere Laserleistung
$P_{L,abs}$	%	Absorbierter Anteil der einfallenden Laserstrahlung
$P_{L,max}$	W	Maximal zur Verfügung stehende Laserleistung
$P_{L,refl}$	%	Reflektierter Anteil der einfallenden Laserstrahlung
$P_{L,trans}$	%	Transmittierter Anteil der einfallenden Laserstrahlung
p_{Proz,CO_2}	%	Prozentualer CO ₂ -Leistungsanteil an Gesamtleistung
$p_{Proz,FKL}$	%	Prozentualer FK-Leistungsanteil an Gesamtleistung
$P_{V,erf}$	W	Erforderliche Leistung, aus dem verdampften Volumen ermittelt
R_d	%	Diffus reflektierter Anteil der einfallenden Strahlung
R_g	%	Gerichtet reflektierter Anteil der einfallenden Strahlung
S_{PE}	J	Lokale Wirkenergie
SPP	$mm\ mrad$	Strahlparameterprodukt
T_0	$^{\circ}C$	Umgebungs- und Anfangstemperatur
T_G	$^{\circ}C$	Glasübergangstemperatur
t_i	s	Wechselwirkungszeit
t_p	s	Pulsdauer
T_S	$^{\circ}C$	Schmelztemperatur
T_d	%	Diffus transmittierte Anteile der einfallenden Strahlung
T_g	%	Gerichtet transmittierte Anteile der einfallenden Strahlung
T_{VF}	$^{\circ}C$	Verdampfungstemperatur der Faser
T_{VM}	$^{\circ}C$	Verdampfungstemperatur der Matrix
V_C	mm^3	Volumen
\dot{V}_C	$\frac{mm^3}{s}$	Volumenstrom

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
\dot{V}_{Mat}	$\frac{mm^3}{s}$	Volumenstrom Matrixwerkstoff
\dot{V}_{Fas}	$\frac{mm^3}{s}$	Volumenstrom Faserwerkstoff
V_{Faser}	mm^3	Volumen der im FKV eingebetteten Fasern
V_{Matrix}	mm^3	Volumen der die Fasern umschließenden Matrix
$x_{1,F}$	mm	Abstand von der Schnittflanke
y	mm	Versatz der Strahlung
z_A	mm	Arbeitsabstand zwischen Unterkante Cross-Jet und Oberkante des Probekörpers
z_R	mm	Rayleigh-Länge
α_{SF}	$^\circ$	Kerbwinkel
ΔV_{SF}	mm^3	Abtragsvolumen der Schnittfuge
Δh_{SM}^U	J/kg	Spezifische Schmelzenthalpie der Matrix
Δh_{VM}^U	J/kg	Spezifische Verdampfungsenthalpie der Matrix
Δh_{VF}^U	J/kg	Spezifische Verdampfungsenthalpie der Faser
$\delta_{1,2}$	$^\circ$	Winkel des einfallenden Laserstrahles
λ	μm	Wellenlänge
λ_{\parallel}	$W/(m K)$	Wärmeleitfähigkeit Gesamtverbund in Faserrichtung
λ_{\perp}	$W/(m K)$	Wärmeleitfähigkeit Gesamtverbund in Faserquerrichtung
$\lambda_{1,F}$	$W/(m K)$	Wärmeleitfähigkeit Faser in Längsrichtung
$\lambda_{2,F}$	$W/(m K)$	Wärmeleitfähigkeit Faser in Querrichtung
λ_M	$W/(m K)$	Isotrope Wärmeleitfähigkeit Matrix
ρ	g/cm^3	Dichte
ρ_{Fas}	g/cm^3	Dichte Faserwerkstoff
ρ_{Mat}	g/cm^3	Dichte Matrixwerkstoff
φ	$\%$	Faservolumengehalt
Θ_0	$^\circ$	Divergenz des Rohlaserstrahles
$\bar{\sigma}_{t_{SF}}$	mm	Mittlere Standardabweichung der Abtragstiefe

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\bar{\sigma}_{b_{WEZ}}$	<i>mm</i>	Mittlere Standardabweichung der wärmebeeinflussten Zone
$\bar{\sigma}_{\alpha_{SF}}$	°	Mittlere Standardabweichung des Kerbwinkels

11 Literaturverzeichnis

- BERGMANN, J.P.; BIELENIN, M.; STAMBKE, M.; FEUSTEL, T.; WITZENDORFF, P. V.; HERMSDORF, J. (2013): Effects of Diode Laser Superposition on Pulsed Laser Welding of Aluminum. In: *Physics Procedia*, Bd. 41, S. 180–189.
- BEYER, E. (1998): *Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 978-3-642-58726-9.
- BEYER, E. WISSENBACH, K. (1998): *Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung, Laser in Technik und Forschung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 3-540-63224-7.
- BEYER, E. (2016): Vorlesung Lasersystemtechnik CO₂-Laser am 23. 05. 2016
- BLIEDTNER, J.; MÜLLER, H.; BARZ, A. (2013): *Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele ; mit 110 Tabellen*. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, ISBN 978-3-446- 42168-4
- BLUEMEL, S.; JAESCHKE, P.; SUTTMANN, O.; OVERMEYER, L. (2014): Comparative Study of Achievable Quality Cutting Carbon Fibre Reinforced Thermoplastics Using Continuous Wave and Pulsed Laser Sources. In: *Physics Procedia*, Bd. 56, S. 1143–1152.
- BLUEMEL, S.; STAEHR, R.; JAESCHKE, P.; STUTE, U. (2013): Determination of Corresponding Temperature Distribution within CFRP during Laser Cutting. In: *Physics Procedia*, Bd. 41, S. 408–414
- BOLEY, C.; RUBENCHIK, A. (2013): Modeling of laser interactions with composite materials. In: *Applied Optics*, Bd. 52, Nr. 14, S. 3329
- BUSSE, L. (2005): *Laserdurchstrahlenschweißen von Thermoplasten: Werkstoffeinflüsse und Wege zur optimierten Prozessführung*, Bd. 2., 1. Aufl. Garbsen : PZH, Produktionstechn. Zentrum, ISBN 978-3-936888-90-4.
- CAPRINO, G.; TAGLIAFERRI, V. (1988): Maximum Cutting Speed in Laser Cutting of Fiber Reinforced Plastics. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 28, Nr. 4, S. 389–398.
- CAPRINO, G.; TAGLIAFERRI, V.; COVELLI, L. (1995): The Importance of Material Structure in the Laser Cutting of Glass Fiber Reinforced Plastic Composites. In: *Journal of Engineering Materials and Technology*, Bd. 117, Nr. 1, S. 133–138.

- CENNA, A. A.; MATHEW, P. (2002): Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials. In: *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, Bd. 42, Nr. 1, S. 105–113.
- CHERIF, C. (2011): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 978-3-642-17991-4.
- CHOUDHURY, I. A.; CHUAN, P. C. (2013): Experimental evaluation of laser cut quality of glass fibre reinforced plastic composite. In: *Optics and Lasers in Engineering*, Bd. 51, Nr. 10, S. 1125–1132.
- DAVIM, J.P.; REIS, P. (2003): Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study. In: *Materials and Design*, Bd. 24, S. 315–124.
- DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT DFG, FORSCHERGRUPPE FOR 278: Textile Verstärkungen für Hochleistungsrotoren in komplexen Anwendungen.
- DEVRIENT, M.; DA, X.; FRICK, T.; SCHMIDT, M. (2012): Experimental and Simulative Investigation of Laser Transmission Welding under Consideration of Scattering. In: *Physics Procedia*, Bd. 39, S. 117–127.
- DIN 8580: 2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 1172:1998-12: Textilglasverstärkte Kunststoffe - Prepregs, Formmassen und Laminat - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts; Kalzinierungsverfahren, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 2564:1998-08: Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH.
- DIPAOLLO, G.; KAPOOR, S.G.; DEVOR, R.E. (1996): An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials. In: *Journal of Engineering for Industry*, ASME Transaction, Nr. 118, S. 104–110.
- EMMELMANN, C.; PETERSEN, M.; GOEKE, A.; CANISIUS, M. (2011): Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength. In: *Physics Procedia*, Bd. 12 (2011), Nr. 1, S. 565–571.
- FARAZ, A.; BIERMANN, D.; WEINERT, K. (2009): Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 49, Nr. 15, S. 1185–1196.

- FLEMMING, M.; ROTH, S.; ZIEGMANN, G.(1995): *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices, Fasern und Matrices*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 3-540-58645-8.
- FÖRSTER, D. (2014): Raytracing Simulationen zur Absorption von Laserstrahlung in CFK. In: *CFK Workshop des IFSW Stuttgart*, 28.- 30. Juli 2014, Freudenstadt.
- FREITAG, C. (2013): Absorption in Carbonfasern und CFK. In: *CFK Workshop des IFSW Stuttgart*, 23.- 24. Juli 2013, Freudenstadt.
- FREITAG, C.; ONUSEIT, V.; WEBER, R.; GRAF, T. (2012): High-speed Observation of the Heat Flow in CFRP During Laser Processing. In: *Physics Procedia*, Bd. 39, S. 171–178.
- FRICK, T. (2007): *Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen, Fertigungstechnik - Erlangen.*, Bd. 189. Bamberg: Meisenbach Verlag, ISBN 978-3-87525-268-2.
- FU, C.; WU, J.; LIU, D. (1994): The effect of electrodischarge machining on the fracture strength and surface microstructure of an Al₂O₃ Cr₃C₂ composite. In: *Materials Science and Engineering: A*, Bd. 188, Nr. 1-2, S. 91–96.
- FUCHS, A. N.; SCHOEBERL, M.; TREMMER, J.; ZAEH, MICHAEL F. (2013): Laser Cutting of Carbon Fiber Fabrics. In: *Physics Procedia*, Bd. 41, S. 372–380.
- FÜRST, A.; KLOTZBACH, A.; HÜHNE, S.; HAUPTMANN, J.; BEYER, E. (2013): Remote Laser Processing of Composite Materials with Different Opto–Thermic Properties. In: *Physics Procedia*, Bd. 41, S. 389–398.
- FÜRST, A.; ROSE, M.; KLOTZBACH, A.; HAUPTMANN, J.; HEBER, T.; BEYER, E. (2014): Influence of Laser Irradiation on the Failure Behavior of Unidirectional Fibre Reinforced Polymers. In: *ECCM16 – 16th European Conference on Composite Materials*, 22.- 26. Juni 2014, Sevilla, Spanien.
- GEIGER, R.; WALTER, A.(2012): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. In: *e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg*.
- GOEKE, A. (2010): Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. In: *Physics Procedia*, Bd. 5 (2010), Nr. 2, S. 253–258.
- GRÄHLERT, W. (2002): *Simulationsrechnungen zur FTIR-reflexionsspektroskopischen Charakterisierung von Schicht- und Fasersystemen*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 3-8167-6166-6.

- GROPPE, M.; URBAN, B. (2002): Zirkular durch CFK. In: *Produktionstechnik Hannover informiert*, Bd. 3, S. 14–15.
- GUDE, M. (2015): *ForelStudie Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität*. Dresden : FOREL, ISBN 978-3-00-049681-3
- GÜNZLER, H.; BÖCK, H. (1983): *IR-Spektroskopie: Eine Einführung*. 2. überarbeitete Auflage Weinheim: Verlag Chemie, ISBN 3-527-21095-4.
- HÄNSCH, D. (2001): *Die optischen Eigenschaften von Polymeren und ihre Bedeutung für das Durchstrahlschweissen mit Diodenlaser, Berichte aus der Lasertechnik*. Aachen: Shaker Verlag, ISBN 3-8265-9053-8.
- HARADA, Y.; SUZUKI, T.; NISHINO, M. NIINO, H. (2012): Investigations on the tensile strength of cfrp/cfrtp manufacturing using high power lasers. In: *LPCC 2012 Digitaler Tagungsband*. Yokohama, 2012, S. Session 4: Paper zu Vortrag 4.
- HASHEMZADEH, M.; SUDER, W.; WILLIAMS, S.; POWELL, J.; KAPLAN, A.F.H.; VOISEY, K.T. (2014): The Application of Specific Point Energy Analysis to Laser Cutting with 1µm Laser Radiation. In: *Physics Procedia*, Bd. 56, S. 909–918.
- HASHISH, M. (1995): Waterjet Machining of Advanced Composites. In: *Materials and Manufacturing Processes*, Bd. 10, Nr. 6, S. 1129–1152.
- HERZOG, D.; JAESCHKE, P.; MEIER, O.; HAFERKAMP, H. (2008): Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. In: *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, Bd. 48, S. 1464–1473.
- HESSE, D. (1995): *Abtragen und Schneiden von Kohlefaserverbundwerkstoffen mit Excimer-Laserstrahlung, Fortschritt-Berichte / VDI Fertigungstechnik.*, Bd. Nr. 333. Als Ms. gedr. Aufl. Düsseldorf : VDI-Verl., ISBN 3-18-333302-3.
- HEUSS, R.; MÜLLER, N.; V. SINTERN, W.; STARKE, A.; TSCHIESNER, A. (2012): Light-weight, heavy impact, Studie, McKinsey&Company.
- HILLMAN, J.; SUKHMANN, Y.; RISSER, C. (2015): Multiple Wavelength Laser Processing Technology for Flexible Manufacturing. In: *Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference*, 22.- 25.6. 2015, München.
- HINTZE, W.; CORDES, M.; KOERKEL, G. (2015): Influence of weave structure on delamination when milling CFRP. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 216, S. 199– 205.

- HIPP, D. (2015): *Experimentelle Untersuchungen zum Trennen von Faser-Kunststoff-Verbunden mittels kombinierter Laserstrahlung*. Masterarbeit, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik.
- HOCHENG, H. (2012): *Machining technology for composite materials: Principles and practice*. Philadelphia, Pa.: Woodhead Pub., ISBN 978-0-85709-030-0.
- HOCHENG, H.; TSAO, C.C. (2005): The path towards delamination-free drilling of composite materials. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 167, Nr. 2-3, S. 251–264.
- HUFENBACH, W.; ADAM, F. (2010): Neue Materialien – Chancen für den Leichtbau. In: 3. ACOD-Kongress, Fachforum „Leichtbau/Exterieur“. Leipzig.
- HÜGEL, H. (1992): *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart : Teubner, 1992 — ISBN 3-519-06134-1.
- HÜGEL, H.; GRAF, T. (2009): *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-8351-0005- 3
- HU, N.S.; ZHANG, L.C. (2004): Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 152, Nr. 3, S. 333–338.
- ICLO (2015): International Crystal Laboratories, Optics & Spectroscopy Supplies & Accessories. http://www.internationalcrystal.net/iclsite3/optics_18.htm (Zuletzt aufgerufen am 13. 08. 2016).
- JAESCHKE, P.; STOLBERG, K.; BASTICK, S.; ZIOLKOWSKI, E.; ROEHNER, M.; SUTTMANN, O.; OVERMEYER, L. (2014): Cutting and drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by 70W short pulse nanosecond laser. In: *SPIE Photonics West: LA-SE*, 1.-6. Februar 2014, San Francisco..
- JAESCHKE, P.; KERN, M.; STUTE, U.; HAFERKAMP, H.; PETERS, C.; HERRMANN, A.S. (2011): Investigation on interlaminar shear strength properties of disc laser machined consolidated CF-PPS laminates. In: *Express Polymer Letters*, Bd. 5, Nr. 3, S. 238–245.
- JAESCHKE, P.; KERN, M.; STUTE, U.; KRACHT, D.; HAFERKAMP, H. (2014): Laser processing of continuous carbon fibre reinforced polyphenylene sulphide organic sheets-Correlation of process parameters and reduction in static tensile strength properties. In: *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Bd. 27, Nr. 3, S. 324–337.

- JÄSCHKE, A.; WACKER, M. (2010): Funktioneller Leichtbau durch SpriForm. In: *Zulieferer Innovativ Wertigkeit & Emotion - Antrieb & E-Mobilität - Strategien & Wettbewerb*. In: Ingolstadt, Juni 2010.
- JUNG, K. (2012): Ultra-high speed disk laser cutting of carbon fiber reinforced plastics. In: *Journal of Laser Applications*, Bd. 24 (2012), Nr. 1.
- KHASHABA, U.A. (2004): Delamination in drilling GFR-thermoset composites. In: *Composite Structures*, Bd. 63, S. 313–327.
- KLEIN, R. (1990): *Bearbeitung von Polymerwerkstoffen mit infraroter Laserstrahlung*. Dissertation, RWTH Aachen, 1990, RWTH Aachen.
- KLOTZBACH, A.; FÜRST, A.; HAUPTMANN, J.; BEYER, E. (2012): Remote Processing of Tailored Fiber Reinforced Lightweight Structures. In: *The 31th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO)*, 23.- 27. September, Anaheim, USA.
- KLOTZBACH, A.; FÜRST, A.; HAUPTMANN, J.; BEYER, E. (2013a): Investigations on laser Remote cutting of tailored fiber reinforced structures. In: *The second International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials LPCC*, 23.- 25. April 2013, Yokohama.
- KLOTZBACH, A.; FÜRST, A.; HAUPTMANN, J.; BEYER, E. (2014): Flexibler Zuschnitt von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden mittels Laser-Remote-Technologie. In: *Fachtagung Thermoplastische Faserverbundkunststoffe*, 5.- 6. November 2014, Erlangen.
- KLOTZBACH, A.; FÜRST, A.; KRETZSCHMAR, F.; ZENGER, K.; HAUPTMANN, J.; BEYER, E. (2013b): Investigations of multi-wavelengths treatment at composite materials. In: *The 32th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO)*, 6.- 10. Oktober 2013, Miami, USA.
- KLOTZBACH, A.; HAUSER, M.; BEYER, E.; SCHMIDT, M. (2011a): Laser cutting of carbon fiber reinforced polymers using highly brilliant laser beam sources. In: *Proceedings of the 6th International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, LiM*. München, ISBN 18753884, S. 572–577.
- KLOTZBACH, A. (2011b): Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Polymers using Highly Brilliant Laser Beam Sources. In: *Physics Procedia*, Bd. 12, S. 572–577.
- KLOTZBACH, A.; VESSIO, P.; KLOTZBACH, U.; HAUPTMANN, J. (2011b): Investigations in remote cutting of carbon fiber composite materials. In: *30th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics*, 23.- 27. Oktober 2011, Orlando, USA

- KÖNIG, W.; MEIS, U.F.; GRAß, P.; WULF, C.; WILLERSCHIED, H. (1984): Konturbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe. In: *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure für Maschinenbau und Metallbearbeitung*, Bd. 126/21, S. 785.
- KRONTHALER, M.R.; BRAUNREUTHER, S.; ZAEH, M.F. (2011): Bifocal Hybrid Laser Welding - More than a Superposition of two Processes. In: *Physics Procedia*, Bd. 12, S. 208– 214.
- LÄSSIG, R.; EISENHUT, M.; MATHIAS, A.; SCHULTE, R.T.; PETERS, F.; KÜHMANN, T.; WALDMANN, T.; BEGEMANN, W. (2012): Serienproduktion von hochfesten Faser-verbundbauteilen, Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Studie Roland Berger 2012.
- LAU, W.S.; YUE, T.M.; LEE, T.C.; LEE, W.B. (1995): Un-conventional machining of composite materials. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 48, Nr. 1-4, S. 199– 205.
- LEONE, C.; GENNA, S.; TAGLIAFERRI, V. (2014): Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. In: *Optics and Lasers in Engineering*, Bd. 53, S. 43– 50.
- LIEBELT, S. (1998): *Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen*, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Dissertation, Berlin 1998 : PTZ [u.a.], ISBN 3-8167-5190-3.
- LITFIN, G. (2005): *Technische Optik in der Praxis: mit 20 Tabellen*. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Aufl. Berlin: Springer Verlag — ISBN 978-3-540-21884-5.
- LÜTKE, M. (2011): *Entwicklung des Remote-Laserstrahlschneidens metallischer Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2011: Fraunhofer-Verlag, ISBN 978-3- 8396-0359-8.
- MAMUSCHKIN, V.; RÖSNER, A.; ADEN, M. (2013): Laser Transmission Welding of White Thermoplastics with Adapted Wavelengths. In: *Physics Procedia*, Bd. 41, S. 172–179.
- MATHEW, J.; GOSWAMI, G.L.; RAMAKRISHNAN, N.; NAIK, N.K. (1999): Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 89–90, S. 198–203.
- MÜLLER, R. (1990): Die Bedeutung der Gasführung beim Laserstrahlschneiden von kurzglasverstaerkten Verbundwerkstoff. In: *Laser und Optoelektronik*, Bd. 22, S. 46– 53.
- NEGARESTANI, R. (2013): *Laser Cutting of Carbon Fibre-Reinforced Polymer Composite Materials*. Manchester : The University of Manchester.

- NIINO, H. (2014): Laser cutting of carbon fiber reinforced thermo-plastics (CFRTP) by single-mode fiber laser irradiation. In: PROC. SPIE 8967, Laser Applications in Micro-electronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XIX, 89670J, 6. März 2014.
- OKAMOTO, Y.; SHIRASAYA, K.; KITADA, R.; OKADA, A. (2013): Singulation of Semiconductor Package by Superposition of Pulsed Fiber Laser and Green YAG Laser. In: *The 32th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO)*, 6.- 10. Oktober 2013, Miami, USA.
- ONUSET, V.; PRIEß, T.; FREITAG, C.; WIEDENMANN, M.; FAISST, B.; GIEDL-WAGNER, R.; RETTICH, T.; WEBER, R.; MIDDENDORF, P. (2015): Productive Laser Processing. In: *Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference*, 22.- 25.6. 2015, München.
- OSBORNE, B. G.; FEARN, T.; HINDLE, P. T. (1993): *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis, Longman food technology*. 2.Aufl. Harlow, Essex, England; New York : Longman Scientific & Technical, ISBN 978-0-470-22128-0.
- OVERTON, G. (2009): IPG Photonics offers World's first 10 kW Single Mode Production Laser. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/06/ipg-photonics-offers-worlds-first-10-kw-single-mode-production-laser.html> (Zuletzt aufgerufen am 13. August 2016).
- PAN, C. T.; HOCHENG, H. (1996): The anisotropic heat-affected zone in the laser grooving of fiber-reinforced composite material. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 62, S. 54–60.
- PAN, C. T.; HOCHENG, H. (1998): Prediction of Laser-Induced Thermal Damage of Fiber Mat and Fiber MatUD Reinforced Polymers. In: *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 7, Dezember 1998, S. 751–756.
- POPRAWA, R. (2005): *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, ISBN 3-540-21406-2.
- PRIMES (2013): Originalbetriebsanleitung Microspotmonitor, Primes GmbH.
- PRIMES (2015): Originalbetriebsanleitung Focus Monitor, Primes GmbH.

- RIVEIRO, A.; QUINTERO, F.; LUSQUINOS, F.; DEL VAL, J.; COMESANA, R.; BOUTINGUIZA, M.; POU, J. (2012): Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite. In: *Composites Part A-applied Science And Manufacturing*, Bd. 43, Nr. 8, S. 1400–1409.
- ROSE, M. (2013): Experimentelle und numerische Studien zur thermomechanischen Beeinflussung faserverstärkter Kunststoffe infolge des Laserschneidprozesses. *Diplomarbeit*, Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau- und Kunststofftechnik.
- RÖSNER, A.; ADEN, M.; OLOWINSKY, A. (2009): Laser Transmission Welding Under Special Consideration of Scattering: *Proceedings of the Fifth International WLT-Conference Lasers in Manufacturing, LIM 2009* : 15.- 18. Juni 2009, München.
- SGL (2013): Die Carbonfaser auf der Basis von PAN, Carbon Fibers., Wiesbaden, Meitingen: SGL Technologies GmbH
- SCHILLING, N.; LASAGNI, A.; KLOTZBACH, U. (2013): Energy Dependent Processing of Fiber Reinforced Plastics with Ultra Short Laser Pulses. In: *Physics Procedia*, Bd. 41, S. 421–427.
- SCHNEIDER, F.; WOLF, N.; PETRING, D.; EMMELMANN, C. (2013): High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers. In: *Physics Procedia* 41 S. 415–420.
- SCHÜRMAN, H. (2007): *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, VDI-Buch. 2.*, bearbeitete und erw. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 978-3-540-72190-1.
- SHANMUGAM, D.K.; NGUYEN, T.; WANG, J. (2008): A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining In: *Composites*, Nr. A 39, S. 923–929.
- SHEIKH-AHMAD, JAMAL Y. (2009): *Machining of polymer composites*. New York, London: Springer-Verlag, ISBN 0-387-35539-1.
- SIEBERTZ, K.; BEBBER, D.; HOCHKIRCHEN, T. (2010): *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-05492-1.
- STEEN, WILLIAM M. (1998): *Laser Material Processing*. 2. Aufl. London: Springer-Verlag, ISBN 3-540-76174-8.
- STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. (2010): *Laser Material Processing*. 4. Aufl. London: Springer-Verlag, ISBN 978-1-84996-061-8.

- STEYER, M. (2013): *Laserunterstütztes Tapelegeverfahren zur Fertigung endlosfaserverstärkter Thermoplastlaminare*, Edition Wissenschaft Apprimus., Bd. 2/2013. Dissertation, RWTH Aachen, 2013 : Apprimus-Verl., ISBN 978-3-86359-105-2.
- STOCK, A.; EGGER, P. (2011): Organobleche verlassen das Hochpreissegment. In: *Maschinenmarkt Composites World Februar 2011*, S. 12–15.
- STOCK, J.; CONRAD, M.; ZAEH, M.F. (2012): Remote Laser Cutting of CFRP: Improvements in the Cut Surface. In: *Physics Procedia*, Bd. 39, S. 161–170.
- STOCK, J.; SPAETH, J. P.; ZAEH, M.F. (2014): Remote laser cutting of CFRP: influence of the edge quality on fatigue strength. In: *PROC. SPIE 8963, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications III*, 89630T, 20. Februar 2014.
- TETI, R. (2002): Machining of Composite Materials. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 51, Nr. 2, S. 611–634.
- THURMEIER, M.; STOCK, A. (2014); FISCHLSCHWEIGER: Heiztechnik als Schlüsselfaktor. In: *Kunststoffe 6/2014*, München: Carl Hanser Verlag, S. 66–69.
- TORAYCA (2014): Technical data sheet No. CFA-014, M40J data sheet, Santa Ana, CA, Toray Carbon Fibers America, Inc
- TRASSER, F. (1992): *Laserstrahlschneiden von Verbundkunststoffen*. Dissertation RWTH Aachen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, ISBN: 3-18-143802-2.
- TRAUTMANN, A. (2009): *Bifocal hybrid laser welding: a technology for welding of aluminium and zinc-coated steels*, Forschungsberichte IWB. München : Herbert Utz Verlag, ISBN 978-3-8316-0876-8.
- TÜRCK, V.(2016): Schulung: Zemax Seminar NSC & Beleuchtung, Dr. Türck Ingenieurbüro.
- USHIDA (2012): Characteristic analysis of CFRP cutting with nanosecond pulsed laser. In: *Journal of Advanced Research in Physics*, Bd. 3 (1), 011211.
- WANG, J.: A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology. In: *Journal of Materials Processing Technology*., Bd. 94, S. 30–35.
- WEBERPALS, J-P. (2014): Wasserstrahlschneiden von CFK. In: *CFK Workshop des IFSW Stuttgart*, 28.- 30. Juli 2014, Freudenstadt.
- WEBER, R. (2014): Einführung aus der Sicht der Laserbearbeitung. In: *CFK Workshop des IFSW Stuttgart*, 28.- 30. Juli 2014, Freudenstadt.

- WEBER, R.; FREITAG, C.; KONONENKO, T. V.; HAFNER, M.; ONUSEIT, V.; BERGER, P.; GRAF, T. (2012): Short-pulse Laser Processing of CFRP. In: *Physics Procedia*, Bd. 39, S. 137– 146.
- V. WEIZSÄCKER, E.U.; BONTEN, C. (2014): Ressourceneffizienz mit Kunststofftechnik. In: *Kunststoffe 6/2014.*, Bd. 6, 2014, S. 16–23, München: Carl Hanser Verlag.
- WIEDENMANN, M.; FREITAG, C.; NEGEL, J-P.; LOESCHER, A. (2014): UKP- Bearbeitung von CFK mit 1,1 kW mittlerer Leistung. In: *CFK Workshop des IFSW Stuttgart*, 28.- 30. Juli 2014, Freudenstadt.
- WITTEN, E.; KÜHNEL, K. (2014): Composites Marktbericht 2014. In: *AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.*.
- WITZENDORFF, P. V.; GEHRMANN, L.; BIELENIN, M.; BERGMANN, J.P.; KAIERLE, S.; OVERMEYER, L. (2013): Laser Micro Welding of Aluminium with the Superposition of a Pulsed Diode Laser and a Pulsed Nd:YAG Laser. In: *The 32th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO)*, 6.- 10. Oktober 2013, Miami, USA.
- WOLYNSKI, A.; HERRMANN, T.; MUCHA, P.; HALOUI, H.; L'HUILLIER, J. (2011): Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. In: *Physics Procedia*, Bd. 12, Nr. 2, S. 292–301.
- WU, S. S.; BOLEY, C. D.; FLORANDO, J. N.; LEBLANC, M. M.; LOWDERMILK, W. H.; RUBENCHIK, S. M.; STANLEY, J. R. (2012): Deep Penetration in Aerospace Composite Materials Using Near-Infrared Laser Radiation. *Lawrence Livermore National Laboratory*, 2012.

12 Anhang

A 1	WERKSTOFFKENNWERTE	2
A 2	RICHTUNGSABHÄNGIGE WÄRMELEITFÄHIGKEIT	3
A 3	AUFBAU UND WIRKUNGSWEISE VON LASERSTRAHLQUELLEN	4
A 4	BERECHNUNG ZU EINORDNUNG BEARBEITUNGSSTRATEGIE	5
A 4.1	Gepulste Systeme	5
A 4.2	Kontinuierlich betriebene Strahlquellen	6
A 5	BEARBEITUNGSPARAMETER FÜR FASER-KUNSTSTOFF-VERBUNDE	7
A 6	ASTIGMATISMUS	9
A 7	MESSTECHNIK ZUR STRAHLVERMESSUNG	10
A 8	ERGEBNISSE DES TEILFAKTORIELLEN, STATISTISCHEN VERSUCHSPLANES	11
A 8.1	Kohlenstofffaser-Epoxydharzverbund CFEP	11
A 8.1.1	Abtragstiefe CFEP	13
A 8.1.2	Breite der wärmebeeinflussten Zone- CFEP	14
A 8.1.3	Kerbwinkel- CFEP	15
A 8.2	Glasfaser- Polypropylen- Verbund GFPP-S	16
A 8.2.1	Abtragstiefe GFPP-S	18
A 8.2.2	Breite der wärmebeeinflussten Zone- GFPP-S	19
A 8.2.3	Kerbwinkel- GFPP-S	20
A 8.3	Glasfaser- Polypropylen- Verbund GFPP-W	21
A 8.3.1	Abtragstiefe GFPP-W	23
A 8.3.2	Breite der wärmebeeinflussten Zone- GFPP-W	24
A 8.3.3	Kerbwinkel- GFPP-W	25
A 9	ERGEBNISSE DER PARAMETEROPTIMIERUNG	26
A 9.1	KohlenstoffFaser-Kunststoff-Verbund CFEP	26
A 9.2	GlasFaser-Kunststoff-Verbund (rußgefüllte Matrix) GFPP- S	27
A 9.3	GlasFaser-Kunststoff-Verbund (ungefüllte Matrix) GFPP- W	28

A 1 Werkstoffkennwerte

Tabelle 15 Grundlegende Werkstoffkennwerte

Werkstoff	Bezeichnung	φ in %	$\rho_{FKV}, \rho_F, \rho_M$ in g/cm^3	$\lambda_{\parallel}, \lambda_{1,F}, \lambda_M$ in $W/(m K)$	$\lambda_{\perp}, \lambda_{2,F}$ in $W/(m K)$	c_P, c_F, c_M in J/kgK	T_V in $^{\circ}C$	T_S in $^{\circ}C$	T_G in $^{\circ}C$
Polypropylen	PP	0	0,9 [7]	0,17 [7]	-	1800 [7]	460 [8]	165 [7]	-20 [7]
Epoxydharz	EP	0	1,2 [1]	0,21 [1]	-	1400 [1]	630 [6]		100 [6]
E-Glasfaser	GF	100	2,54 [1]	1,21 [1]	1,21 [1]	850 [4]	2300 [4]	1300 [4]	
Kohlenstofffaser, hochmodulig	CF MJ46	100	1,77 [2]	68,66 [3]	-	712 [3]	3600 [5]		
Kohlenstofffaser, hochsteif	CF HT	100	1,8 [3]	4,9 [1]	1,7 [1]	710 [1]	3600 [5]		
endlosfaserverstärkte FKV mit unidirektionalem Lagenaufbau	GFPP-W ($\varphi = 40\%$)	40	1,56	0,59	0,59	1420	Quellen		
	GFPP-W ($\varphi = 50\%$)	50	1,72	0,69	0,69	1325	[1] (SCHÜRMAN, 2007)		
	GFPP-W ($\varphi = 55\%$)	55	1,80	0,74	0,74	1277	[2] (SGL, 2013)		
	GFPP-W ($\varphi = 60\%$)	61	1,88	0,79	0,79	1230	[3] (TORAYCA, 2014)		
					1,1*		[4] (LIEBELT, 1998)		
	GFPP-S	≈ 50	1,72	0,69	0,69	1325	[5] (HESSE, 1995)		
	CFEP ($\varphi = 46\%$)	≈ 46	1,46	31,7	0,11	1083	[6] (ROSE, 2013)		
	CFEP ($\varphi = 56\%$)	≈ 56	1,52	38,5	0,37	1014	[7] (SCHEIK-AHMAD, 2009)		
				35,7*	-	[8] (KRISMANN, 1994)			

*Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der ausgewählten Werkstoffe erfolgte durch Bestimmung der absoluten Temperaturleitfähigkeit der Werkstoffe mittels der Vergleichsapparat TCT426 (Netzsch Gerätebau GmbH) in Anlehnung an DIN 51908, die Messungen erfolgten bei Raumtemperatur

A 2 Richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit

Kohlenstofffasern besitzen eine transversal isotrope Wärmeleitfähigkeit. Das bedeutet, dass sie innerhalb eines Faserquerschnittes richtungsunabhängige Werkstoffkennwerte aufweisen. Diese Größe unterscheidet sich aber von der in Faserlängsrichtung, weshalb für Kohlenstofffasern Werte längs $\lambda_{1,F}$ und quer $\lambda_{2,F}$ zur Faserrichtung anzugeben sind. Im Gegensatz dazu sind für Glasfasern beide Werte gleich. Zusammen mit dem Faservolumengehalt φ , sowie der Wärmeleitfähigkeit des Matrixmaterials λ_M ergeben sich die Wärmeleitfähigkeiten des Verbundes nach der Mischungsregel längs zur Faserorientierung zu:

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{1,F} \cdot \varphi + \lambda_M \cdot (1 - \varphi) \quad (29)$$

und für die Wärmeleitung des Gesamtverbundes quer zur Faserorientierung zu:

$$\frac{1}{\lambda_{\perp}} = \frac{1}{\lambda_{2,F}} \cdot \varphi + \frac{1}{\lambda_M} \cdot (1 - \varphi). \quad (30)$$

Diese Kennwerte beziehen sich auf das lokale Einzelschichtkoordinatensystem mit der Achse \parallel in Faserrichtung und der Achse \perp quer dazu. Um die Winkelabhängigkeit dieser Kenngröße innerhalb eines Mehrschichtverbundes darzustellen wird eine Polarkoordinatentransformation nach SCHÜRMAN, 2007, angewendet:

$$\lambda_x = \lambda_{\parallel}^2 \cdot \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp}^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (31)$$

Wobei λ_x die Wärmeleitfähigkeit in X-Richtung eines Mehrschichtverbundkoordinatensystems (MSV-KS) darstellt (Abb. 69). Mit α ist der Winkel zwischen MSV-KS und der Achse \parallel des Einzelschichtkoordinatensystem bezeichnet.

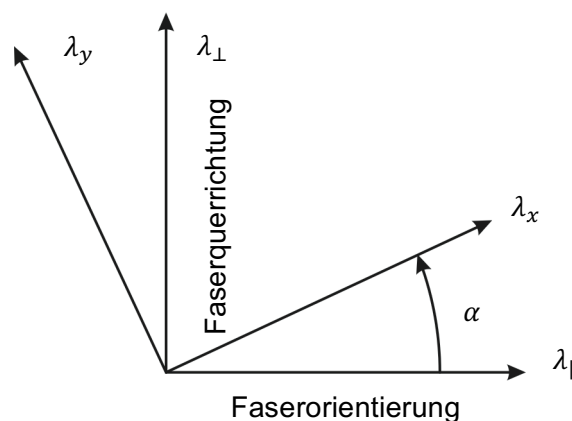


Abb. 69 Transformation des Einzelkoordinatensystems in das Werkstoffkoordinatensystem

Läuft nun der Winkel α von 0 - 360°, kann für die Einzelschicht in jede Richtung die Wärmeleitfähigkeit berechnet und in einem Polardiagramm dargestellt werden.

A 3 Aufbau und Wirkungsweise von Laserstrahlquellen

Das Wort Laser ist die Abkürzung für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ und weist auf die prinzipielle Funktionsweise hin. In einem Resonator befindet sich das laseraktive Medium, das durch Energiezufuhr angeregt wird. In der Vorstellung des Atommodells bedeutet das, dass seine Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben werden. Verlassen sie dieses wieder, senden sie jeweils ein Photon aus. Trifft ein solches auf ein anderes angeregtes Atom, zwingt es dasselbe in den energieärmeren Zustand, wobei ein weiteres Photon frei wird. Gleichzeitig bleibt das erste selbst erhalten. Beide Lichtteilchen haben die gleiche Richtung und sind phasengleich nach STEEN & MAZUMDER, 2010. Durch verschiedene Pumpstrategien ist ein Energieeintrag in das aktive Medium möglich. Existierende Methoden sind unter anderem das Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung, Laser- oder Elektronenbestrahlung sowie chemische Reaktionen. Die Beschaffenheit des aktiven Mediums ist dabei das hauptsächliche Unterscheidungskriterium zwischen den Strahlquellen und deren Emissionswellenlängen. In der Verarbeitungstechnik kommen hauptsächlich Kohlenstoffdioxid- und Monoxid-, Neodym, Erbium oder Yttrium dotierter Yttrium-Aluminium Granatlasers, sowie Excimer- und Dioden-Laser zum Einsatz.

A 4 Berechnung zu Einordnung Bearbeitungsstrategie

A 4.1 Gepulste Systeme

Für gepulste Systeme ergibt sich die eingebrachte Laserleistung auf einer Strecke von 50 μm und einem angenommenen Spotdurchmesser von $d_f = 50 \mu\text{m}$ sowie einem Pulsüberlapp von 66 % nach Abb. 70. Um die Strecke vollständig zu bearbeiten, werden 4 Pulse benötigt.

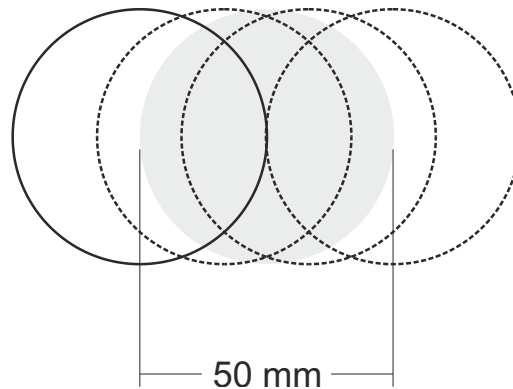


Abb. 70 Schematische Darstellung der Laserspotpositionen bei 66 % Pulsüberlapp

Damit ergibt sich die total eingebrachte Pulsenergie E_{50} zu:

$$E_{50} = 4 \cdot E_P = 4 \cdot \frac{P_m}{f} \quad (32)$$

Die Wechselwirkungszeit t_i ergibt sich aus der Pulsdauer τ in Abhängigkeit der Anzahl der abgegebenen Pulse:

$$t_i = 4 \cdot \tau \quad (33)$$

Die innerhalb eines Pulses abgegebene Pulsspitzenenergie ergibt sich zu:

$$E_P = \frac{P_m}{f} \quad (34)$$

Die innerhalb der Bearbeitungszeit abgegebene Laserleistung ergibt sich zu:

$$P_P = \frac{E_P}{\tau} \quad (35)$$

Die Pulsweite ergibt sich zu:

$$t_P = \frac{1}{f} \quad (36)$$

Resultierend ergibt sich die Gesamtbearbeitungszeit $t_{tot,50}$ zu:

$$t_{tot,50} = 4 \cdot t_p \quad (37)$$

Mit typischen Parametern zur Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden aus der Literatur ergeben sich die in Tabelle 16 dargestellten Berechnungsergebnisse:

Tabelle 16 Typische Bearbeitungsparameter für FKV mit gepulsten Systemen (KLOTZBACH u. a., 2011b; SCHILLING u. a., 2013)

Strahlquelle	P_m in W	f in kHz	τ in ns	t_p in μ s/Puls	t_i in ns
ns $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$	20	7	100	142,8	400
ps $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$	30	200	0,01	5	0,04

Tabelle 17 Fortsetzung typische Bearbeitungsparameter für FKV mit gepulsten Systemen, nach KLOTZBACH u. a., 2011b, und SCHILLING u. a., 2013

Strahlquelle	$t_{tot,50}$ in μ s	E_p in mJ	E_{50} in mJ	P_p in kW
ns $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$	571,2	2,9	11,4	28,6
ps $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$	20	0,15	0,6	3750

A 4.2 Kontinuierlich betriebene Strahlquellen

Für kontinuierlich betriebene Systeme ergibt sich die resultierende Bearbeitungszeit eingebrachte auf einer Strecke von $50 \mu\text{m}$ und einem angenommenen Spottdurchmesser von $d_f = 50 \mu\text{m}$ zu:

$$t_{tot,50} = \frac{d_f}{v} \quad (38)$$

Die in dieser Zeit eingebrachte Energie E_{50} ergibt sich zu:

$$E_{50} = P_L \cdot t_{tot,50} \quad (39)$$

Für typische gasunterstützte und remote Bearbeitung ergeben sich somit folgende Parameter in Tabelle 18.

Tabelle 18 Parameter für kontinuierlich betriebene Strahlquellen (FÜRST u. a., 2013; KLOTZBACH u. a., 2011b)

	P_L in W	v in m/s	$t_{tot,50}$ in μ s	E_{50} in mJ
Gasunterstützt	3000	0,05	1000	3000
Remote	4000	1	50	15

A 5 Bearbeitungsparameter für Faser-Kunststoff-Verbunde

Tabelle 19 Typische Schneidparameter und die daraus resultierende lokale Wirkenergien für gasunterstützte Bearbeitung

Werkstoff				Laserschneidparameter					Quelle
Verstärkungsfaser	Matrix	φ in %	d in mm	P_{Lmax} in W	v_{eff} in m/s	d_f in μm	t_i in ms	S_{PE} in J	
Aramidfaser	k.A.	k.A.	4	600	0,1	100	1	0,6	(CENNA & MATHEW, 2002)
Glasfaser	k.A.	k.A.		1000	0,06		1,6	1,6	
Glasfaser	Polyesterharz	40 - 50	3- 5	500					(CHOUDHURY & CHUAN, 2013)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	57	3	2000	0,03	130	3,9	7,8	(RIVEIRO u. a., 2012)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	50	1	1500	0,08	98*	1,2	1,8	(GOEKE, 2010)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	50	2,4	2800	0,08 0,4	240 240*	2,8 5,8	7,84 16,24	(KLOTZBACH u. a., 2011a)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	60 - 70	2	1000	0,05	70*	1,4	1,4	(NEGARESTANI, 2013)
Glasfaser	Epoxydharz	50	2	1400	0,15	500	3,3	4,62	(CAPRINO & TAGLIAFERRI, 1988)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	50		2000	0,05		0,1	20	
Aramidfaser	Epoxydharz	50		800	0,21		2,3	1,84	
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	45 - 54	1,5	500	0,025 0,016	180 113*	7,2 7,8	3,6 3,9	(HERZOG u. a., 2008)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz Polypropylen	50 8 - 26**	8 3,5	1250	0,01 0,083	250	2,5 3	31,25 3,75	(PAN & HOCHENG, 1998)
Kohlenstofffaser	Polyphenylensulfid	50	0,9 1,23 2,17 3,1	Streckenergie: $E = 120 - 550 \text{ J/cm}$		150*		1,8 3 5,6 8,25	(JAESCHKE u. a., 2011)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	50	2,14	6000	0,22	200*	9	5,5	(JAESCHKE u. a., 2014b)

* Festkörperlaser, ** Kurzglasfaserverstärkung

Tabelle 20 Typische Schneidparameter und daraus resultierende lokale Wirkenergien für Remote Bearbeitung

Werkstoff				Laserschneidparameter							Quelle
		φ in %	d in mm	P_{Lmax} in W	v_{eff} in m/s	d_f in μm	t_w in ms	n	$t_{i,g}$ in ms	S_{PE} in J	
Kohlenstofffaser	Polyphenylensulfid	50	1,2	4000*	1	418	0,42	10	41,8	16,7	(BLUEMEL u. a., 2014)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	50	0,85	500	0,02 0,16	80		1 3			(BLUEMEL u. a., 2013)
Glasfaser	Polyamid 6	47	1	1500*	2,5	k.A.	k.A.	7			(SCHNEIDER u. a., 2013)
Kohlenstofffaser	Polyamid	45	2								
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	43	2,4	3000*	1	50	0,05	4	2	0,6	(KLOTZBACH u. a., 2011b)
Kohlenstofffaser	Epoxydharz	45	2,2	3000*	6	60	0,01	25	0,25	0,8	(STOCK u. a., 2012)
Kohlenstofffaser (Langfaser)	Polyamid 6	20 %			5			22	1,32	6,6	(JUNG, 2012)
Kohlenstofffaser (Kurzfaser)	Polyamid 6	20 %	3	5000*	5	300	0,06	18	1,1	5,4	

* Festkörperlaser

A 6 Astigmatismus

Astigmatismus bedeutet, dass ein ursprünglich runder Strahl nach der Fokussierung elliptisch erscheint, weil für verschiedene Ebenen unterschiedliche Brennweiten wirksam sind. Dabei bilden sich die tangentielle (F_T) und die saggitale (F_S) Brennlinie aus (Abb. 71). Der Abstand beider Brennlinien zueinander wird als astigmatische Differenz bezeichnet. Der Querschnitt des Strahlenbündels ist in den Schnittebenen an diesen Stellen nicht kreisrund, sondern elliptisch. Die Ausrichtung des elliptischen Querschnittes des Strahles unterhalb der Fokusposition ist um 90° zur oberen elliptischen Querschnitt gedreht.

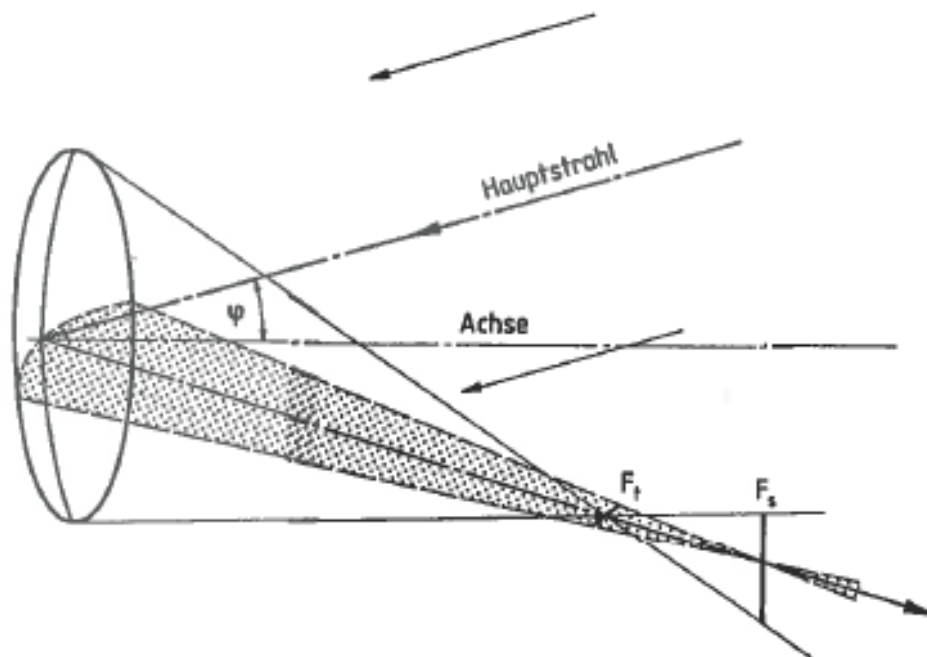


Abb. 71 Astigmatismus eines Parabolspiegels (HÜGEL, 1992)

A 7 Messtechnik zur Strahlvermessung

Zur Strahlvermessung kommen zwei unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz. Das mechanisch abtastende Verfahren erfasst inkrementell einzelne Bereiche einer Strahlebene. Die Positionsbestimmung dieser dabei erfassten Einzelintensitäten erfolgt durch Verfahren einer rotatorisch angetriebenen Messspitze innerhalb einer 3D-Messsäule. Durch eine Mikrobohrung wird ein Teil der Laserstrahlung auf einen Detektor umgelenkt und ausgewertet. Durch Variation und Kombination der Bohrungsdurchmesser der Messspitze und der verwendeten Sensoren ist das Messgerät auf die Wellenlänge der zu vermessenden Strahlung und auf den zu erwartenden Durchmesser der Strahltaile einzustellen. Für CO₂-Laserstrahlung kommen pyroelektrische Detektoren und für Festkörperlaserstrahlung Photodioden zum Einsatz. Eine vollständige Messung nimmt mehrere Minuten in Anspruch, weshalb thermische Effekte das Messergebnis überlagern können. (PRIMES, 2015)

Dagegen erfolgt die Messung der Festkörperlaserstrahlung durch die Abbildung abgeschwächten Laserstrahles auf einem CCD-Chip. Gegenüber der Bestimmung der Intensitätsverteilung des CO₂-Strahles wird der Strahl vollständig auf dem Detektor abgebildet. (PRIMES, 2013)

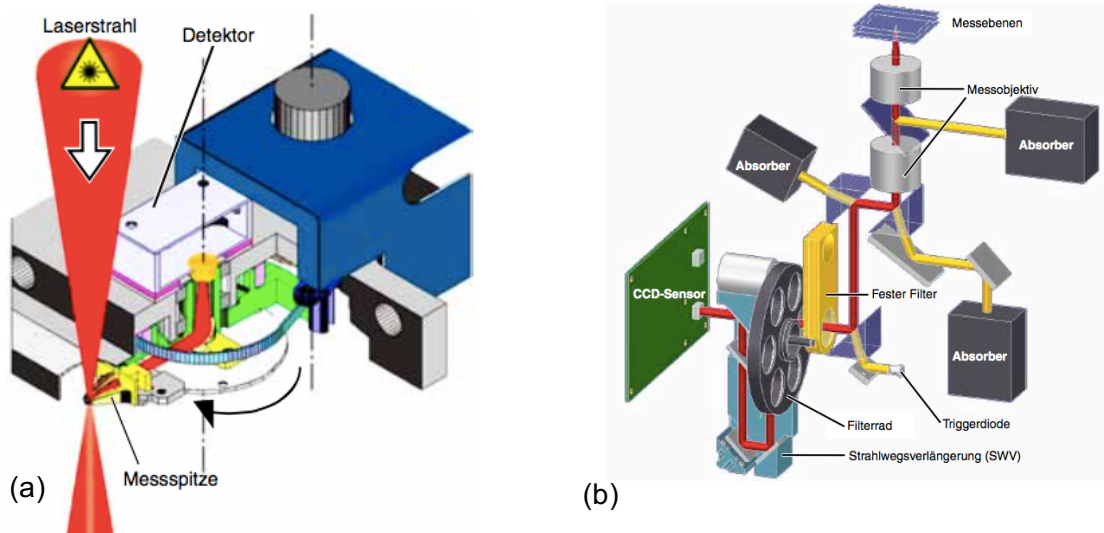


Abb. 72 Mechanisch scannendes Messsystem (a) (PRIMES, 2015), kamerabasiertes Messsystem (b) (PRIMES, 2013)

A 8 Ergebnisse des teilfaktoriellen, statistischen Versuchsplanes

A 8.1 Kohlenstofffaser-Epoxydharzverbund CFEP

Tabelle 21 Parameter und resultierende Ergebnisse CFEP

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n -	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	b_{SF} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
1	0,25	1,0	10	0,1	1,002	0,45	24,8	0,53	0,137
2	0,00	1,0	5	0,2	0,319	0,56	67,8	0,32	0,11
3	0,75	2,0	20	0,1	1,423	0,35	16,6	0,28	0,095
4	1,00	4,0	20	0,2	1,046	0,25	16,4	0,08	0,085
5	0,25	4,0	10	0,4	0,355	0,51	22,5	0,15	0,043
6	1,00	3,0	15	0,2	0,717	0,18	12,1	0,06	0,035
7	1,00	1,0	20	0,1	2,071	0,32	10,8	0,39	0,23
8	0,00	3,0	10	0,3	0,24	0,55	67,4	0,18	0,066
9	0,00	4,0	20	0,2	0,348	0,45	55,2	0,27	0,063
10	1,00	2,0	5	0,4	0,681	0,24	17,8	0,13	0,064
11	0,00	4,0	5	0,8	0,109	0,50	123,8	0,05	0,025
12	0,50	3,0	5	0,6	0,4	0,23	22,2	0,19	0,027
13	0,75	2,0	10	0,2	1,029	0,23	14,3	0,24	0,075
14	0,75	2,0	10	0,2	0,941	0,27	12,5	0,22	0,081
15	0,00	1,0	15	0,1	0,968	0,49	29,1	0,65	0,19
16	1,00	1,0	10	0,1	1,676	0,29	11	0,31	0,18
17	0,75	1,0	5	0,2	1,003	0,29	13,1	0,3	0,11
18	1,00	3,0	5	0,6	0,547	0,22	21,8	0,09	0,047
19	0,00	2,0	20	0,1	0,661	0,51	33	0,2	0,12

12 Anhang

Tabelle 22 Fortführung Tabelle 21 Parameter und resultierende Ergebnisse CFEP

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n -	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	b_{SF} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
20	0,25	2,0	15	0,1	0,763	0,45	32	0,17	0,099
21	1,00	3,0	15	0,3	0,948	0,23	11,5	0,19	0,091
22	0,25	1,0	20	0,3	1,277	0,40	18,1	0,95	0,15
23	0,75	4,0	15	0,2	0,791	0,22	12	0,19	0,058
24	0,50	3,0	20	0,2	0,884	0,41	9,8	0,3	0,076
25	0,25	2,0	15	0,1	0,705	0,45	30,7	0,38	0,087
26	0,25	2,0	5	0,1	3,54	0,47	27,2	0,21	0,13
27	0,50	1,0	15	0,5	1,625	0,35	8,8	0,43	0,15
28	0,50	3,0	20	0,2	0,858	0,38	13,9	0,26	0,065
29	0,00	3,0	10	0,0	0,22	0,51	91,7	0,24	0,056
30	1,00	4,0	5	0,3	0,37	0,22	30,6	0,09	0,039

A 8.1.1 Abtragstiefe CFEP

Abb. 73 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für die Abtragstiefe als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und dem Anteil der FK-Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

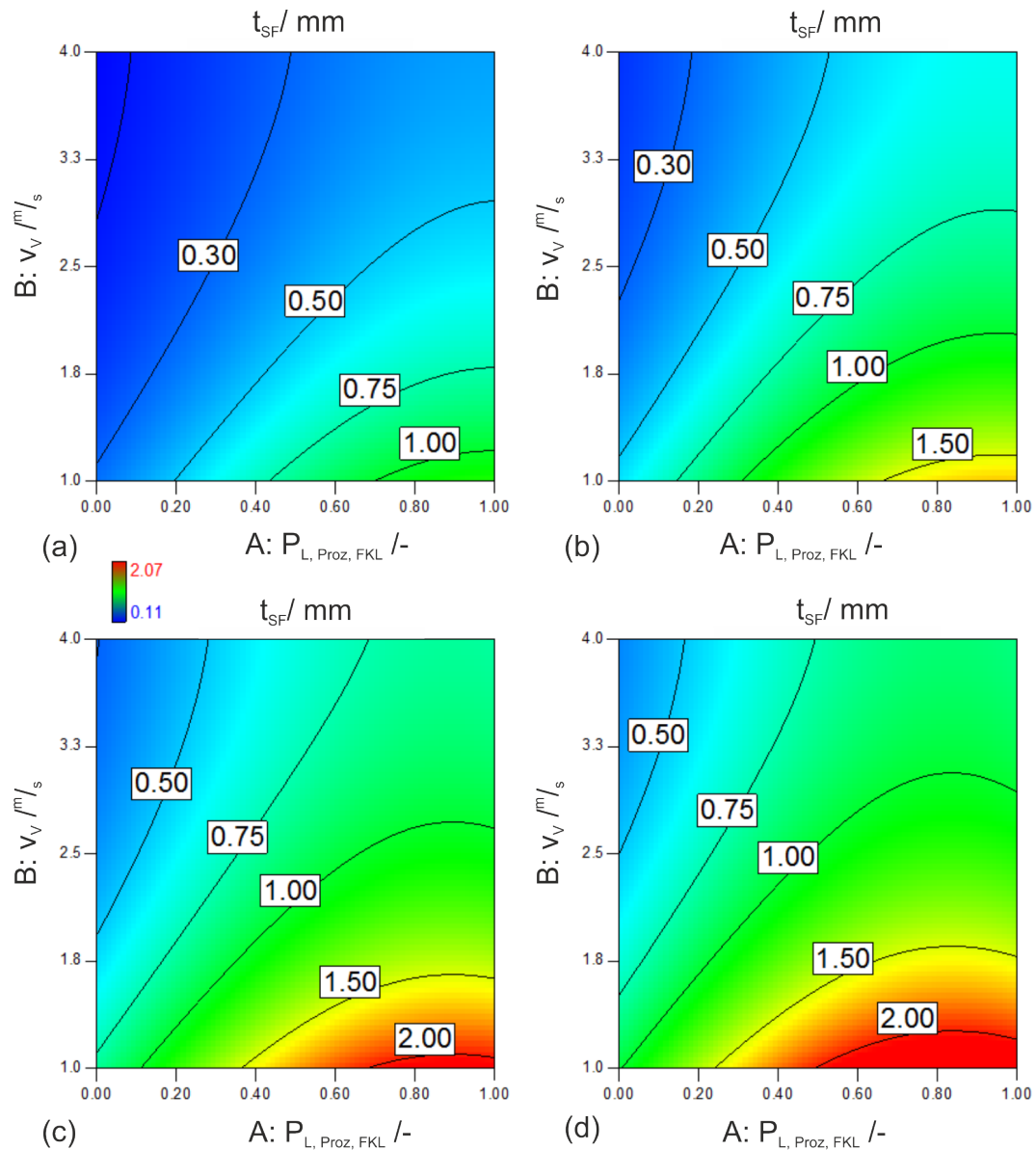


Abb. 73 Abtragstiefe t_{SF} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz, FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d)

A 8.1.2 Breite der wärmebeeinflussten Zone- CFEP

Abb. 74 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für die Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_v und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

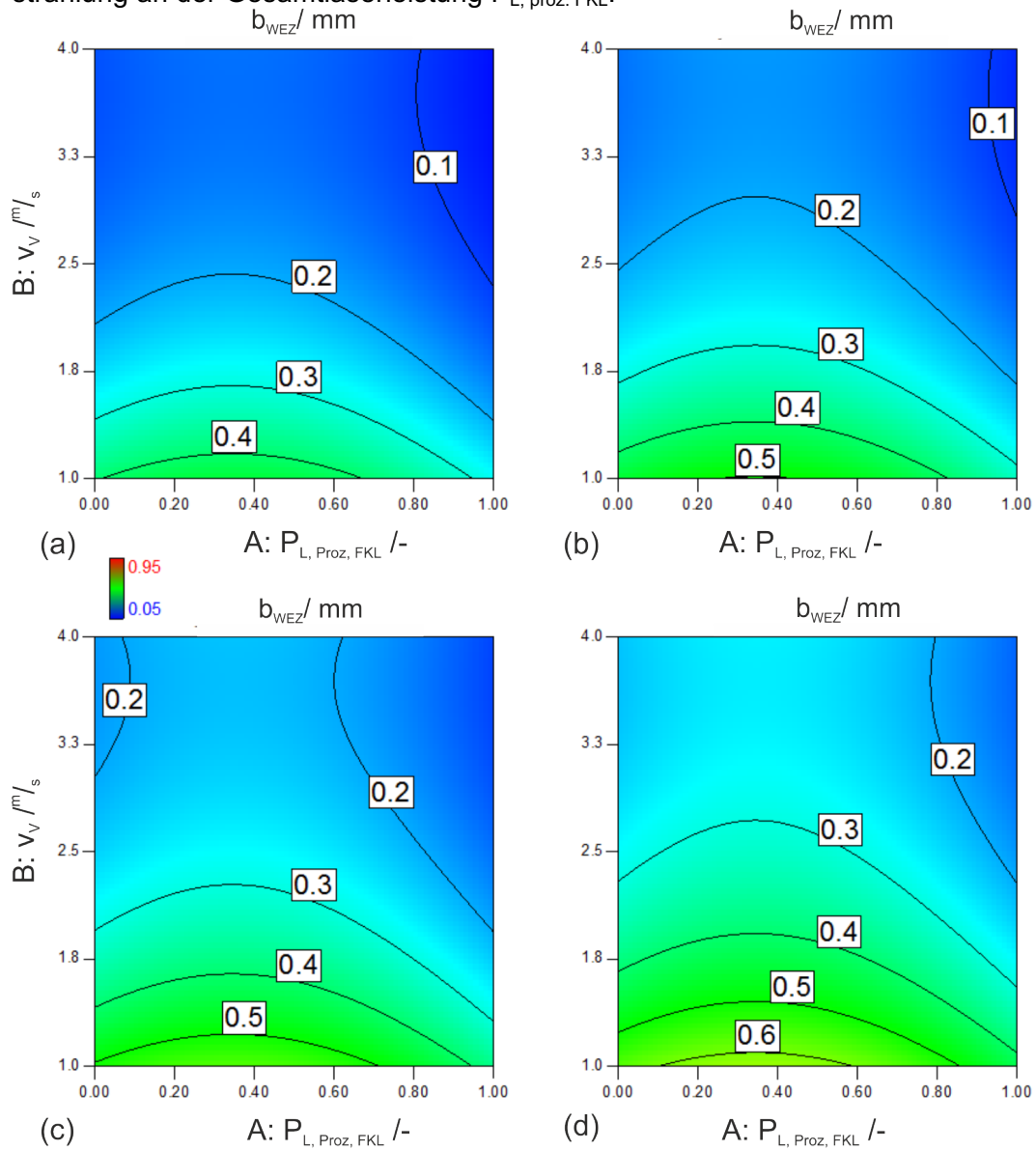


Abb. 74 Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_v und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d)

A 8.1.3 Kerbwinkel- CFEP

Abb. 75 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für den Kerbwinkel α als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

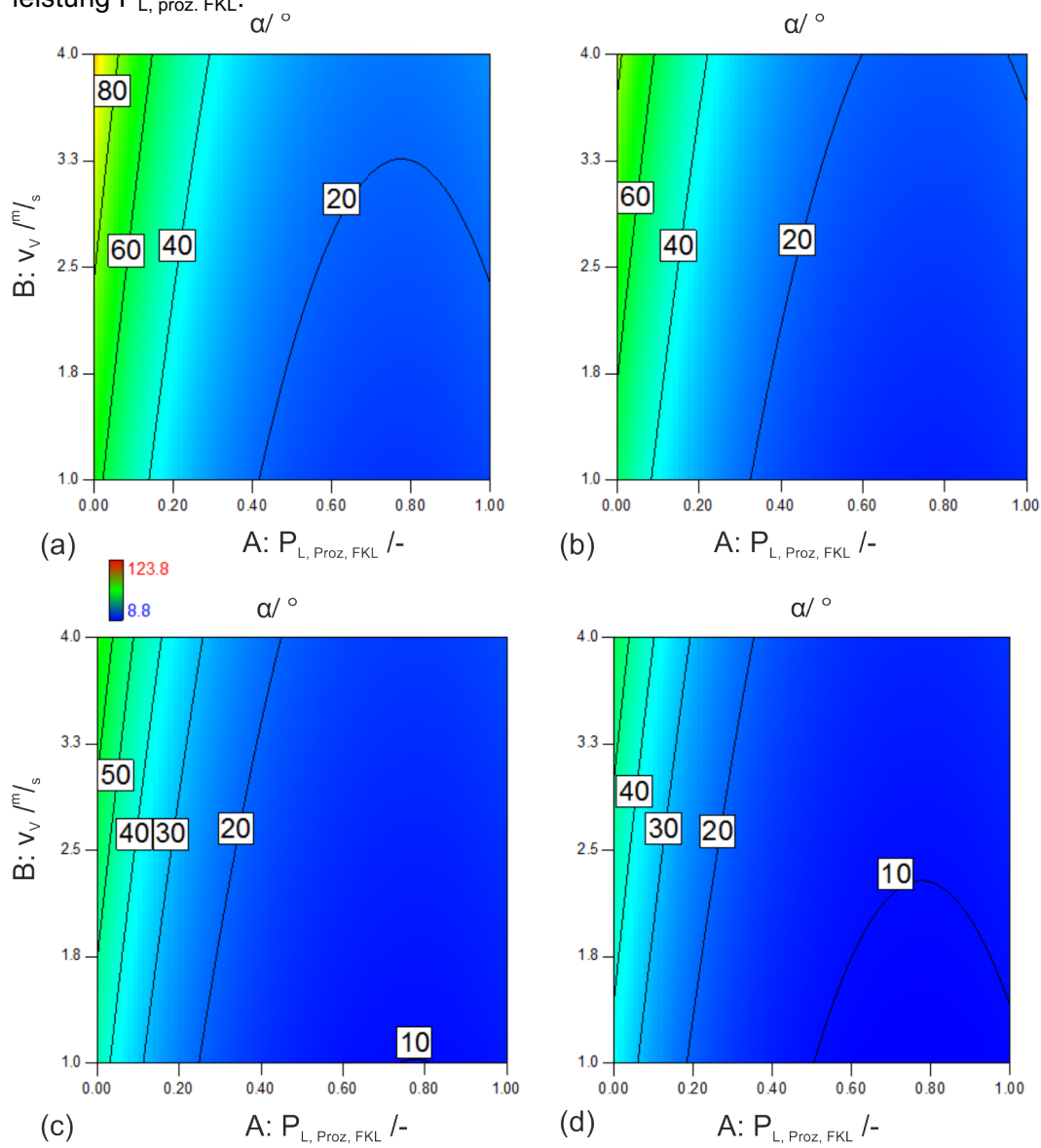


Abb. 75 Kerbwinkel α als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und des Anteiles der FK- Laserleistung $P_{L, \text{proz, FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d)

A 8.2 Glasfaser- Polypropylen- Verbund GFPP-S

Tabelle 23 Parameter und resultierende Ergebnisse GFPP-S

#	P _{L,proz,FKL} -	v _V in m/s	n -	v _{eff} in m/s	t _{sf} in mm	b _{sf} in mm	α in °	b _{WEZ} in mm	A _{SF} in mm ²
1	0,25	1,0	10	0,1	2,347	0,74	13	0,98	0,69
2	0,00	1,0	5	0,2	1,287	0,76	23,1	0,52	0,41
3	0,75	2,0	20	0,1	2,826	0,40	7,1	1,5	0,41
4	1,00	4,0	20	0,2	0,845	0,28	14,4	0,16	0,12
5	0,25	4,0	10	0,4	0,745	0,44	16,6	0,43	0,13
6	1,00	3,0	15	0,2	0,871	0,27	12,5	0,26	0,15
7	1,00	1,0	20	0,1	3,949	0,33	3,3	2,24	0,65
8	0,00	3,0	10	0,3	0,636	0,57	49,7	0,37	0,16
9	0,00	4,0	20	0,2	1,211	0,60	21,7	0,45	0,24
10	1,00	2,0	5	0,4	0,304	0,23	27,1	0,44	0,41
11	0,00	4,0	5	0,8	0,475	0,46	41,7	0,37	0,61
12	0,50	3,0	5	0,6	0,543	0,39	45	0,51	0,087
13	0,75	2,0	10	0,2	1,366	0,38	11,4	0,96	0,22
14	0,75	2,0	10	0,2	1,391	0,37	11	0,97	0,19
15	0,00	1,0	15	0,1	3,197	0,77	11,8	1,22	0,98
16	1,00	1,0	10	0,1	1,877	0,39	6,9	1,46	0,39
17	0,75	1,0	5	0,2	1,132	0,40	17,3	1	0,24
18	1,00	3,0	5	0,6	0,283	0,17	57	0,99	0,019
19	0,00	2,0	20	0,1	2,035	0,65	20,7	0,92	0,51

Tabelle 24 Fortführung Tabelle 23 Parameter und resultierende Ergebnisse GFPP-S

#	P _{L,proz,FKL} -	v _V in m/s	n -	v _{eff} in m/s	t _{sf} in mm	b _{sf} in mm	α in °	b _{WEZ} in mm	A _{SF} in mm ²
20	0,25	2,0	15	0,1	1,476	0,56	17,7	0,87	0,36
21	1,00	3,0	15	0,3	0,88	0,23	15,3	0,93	0,12
22	0,25	1,0	20	0,3	3,802	0,68	7,4	1,71	1,1
23	0,75	4,0	15	0,2	1,113	0,33	13,5	0,74	0,11
24	0,50	3,0	20	0,2	1,383	0,43	10,1	0,94	0,23
25	0,25	2,0	15	0,1	1,619	0,66	17,3	0,82	0,39
26	0,25	2,0	5	0,1	0,702	0,61	44,3	0,45	0,13
27	0,50	1,0	15	0,5	3,536	0,58	5,7	1,76	0,72
28	0,50	3,0	20	0,2	1,651	0,51	9,5	0,9	0,27
29	0,00	3,0	10	0,0	0,787	0,55	32	0,38	0,16
30	1,00	4,0	5	0,3	0,113	0,70	132,6	0	0,032

A 8.2.1 Abtragstiefe GFPP-S

Abb. 76 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für die Abtragstiefe als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

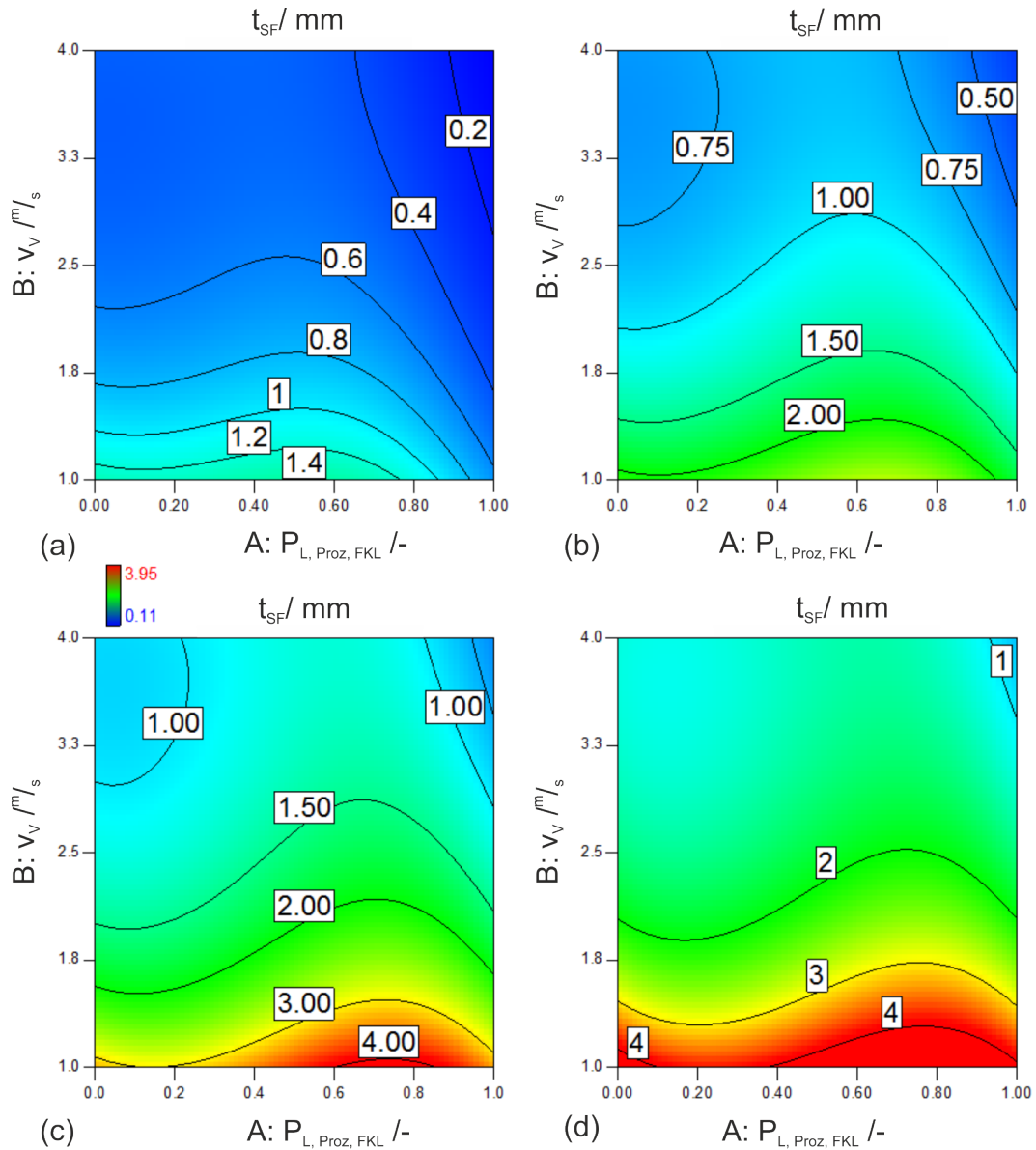


Abb. 76 Abtragstiefe t_{SF} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz, FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d), GFPP-S

A 8.2.2 Breite der wärmebeeinflussten Zone- GFPP-S

Abb. 77 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für die Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_v und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

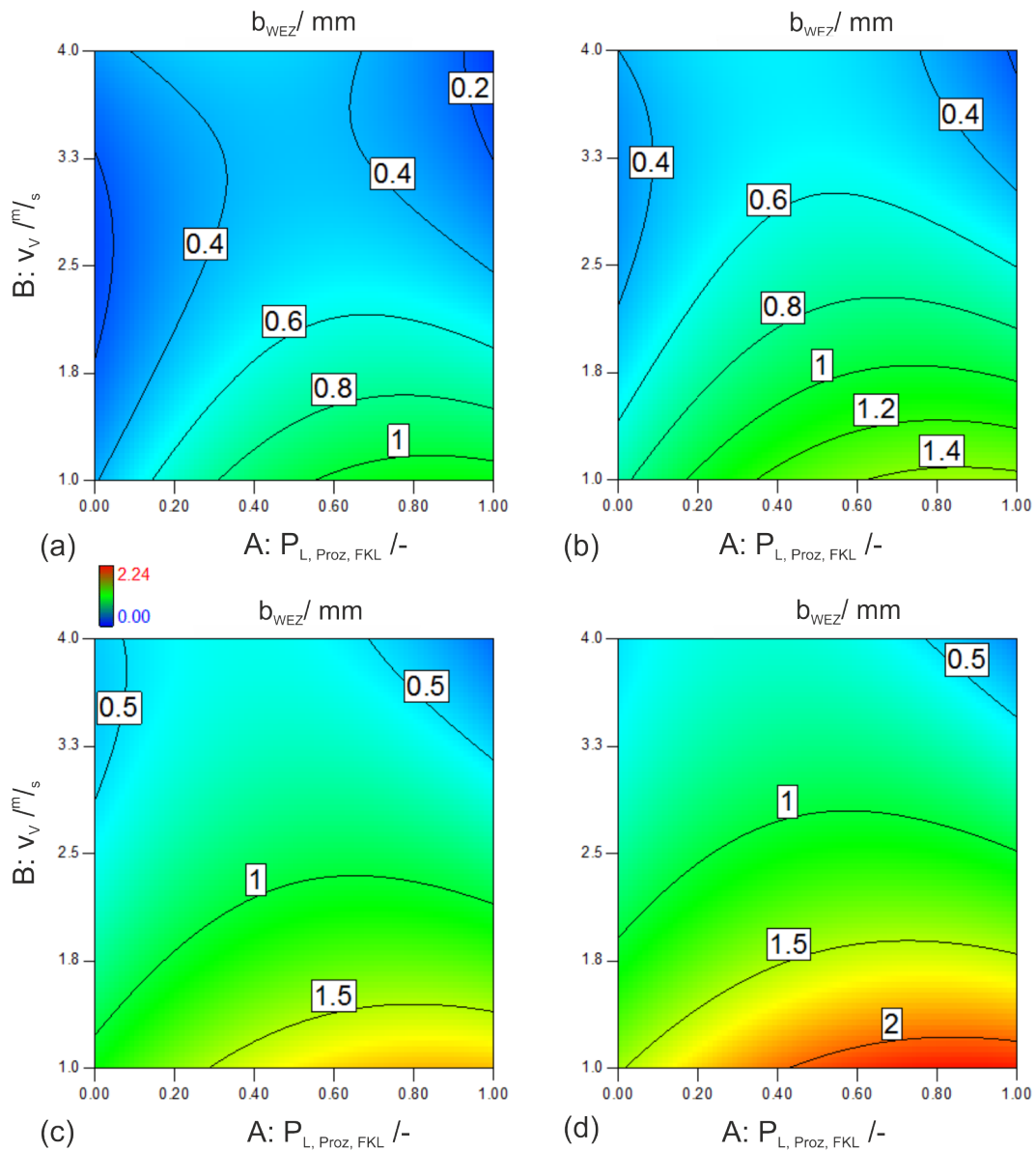


Abb. 77 Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_v und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d), GFPP-S

A 8.2.3 Kerbwinkel- GFPP-S

Abb. 78 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für den Kerbwinkel α als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

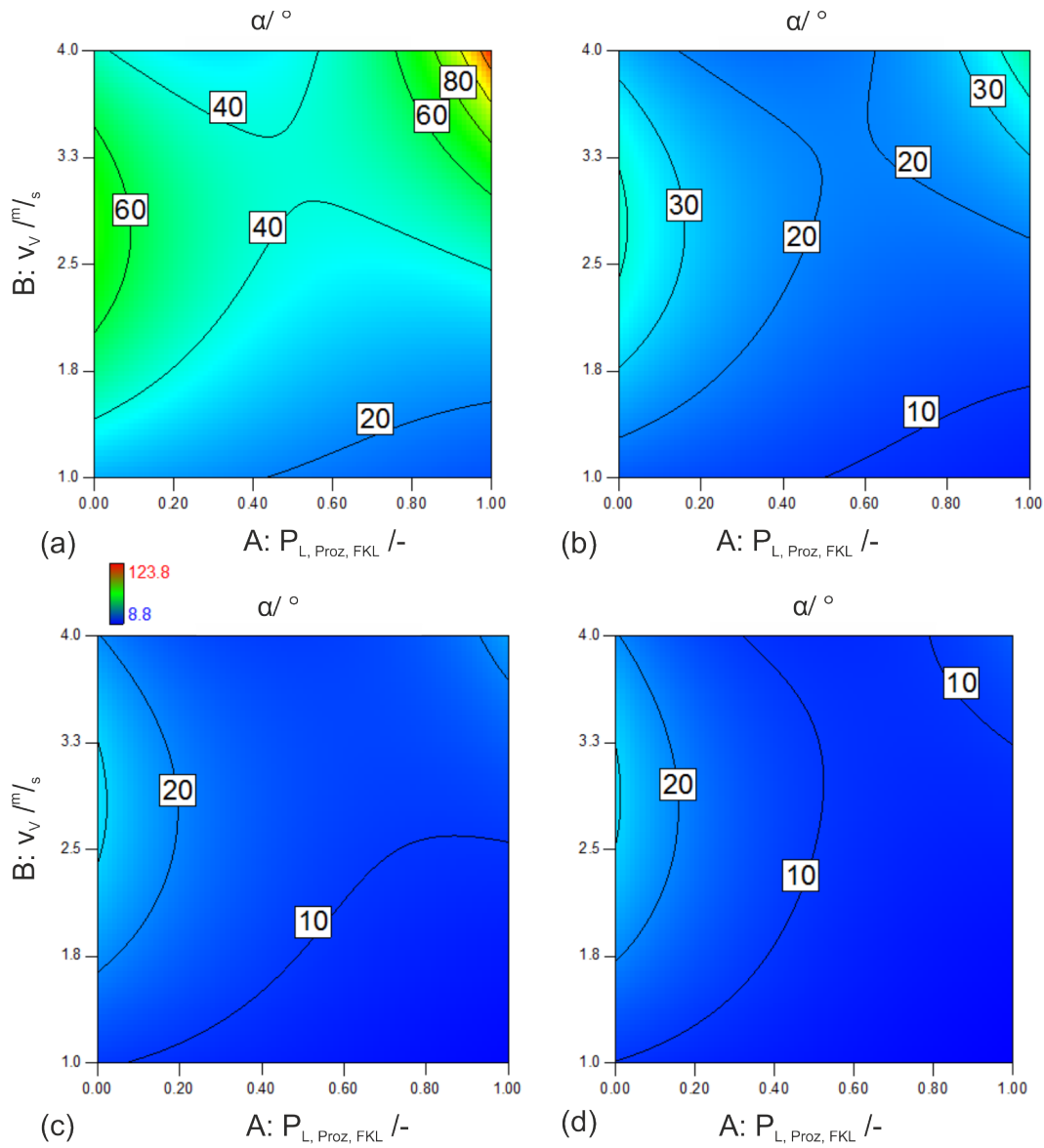


Abb. 78 Kerbwinkel α als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz, FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d), GFPP-S

A 8.3 Glasfaser- Polypropylen- Verbund GFPP-W

Tabelle 25 Parameter und resultierende Ergebnisse GFPP-W

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	b_{sf} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
1	0,25	1,0	10	0,1	1,595	0,86	21,7	0,82	0,41
2	0,00	1,0	5	0,2	0,962	0,79	38,3	0,3	0,32
3	0,75	2,0	20	0,1	1,079	0,59	18,9	1,16	0,2
4	1,00	4,0	20	0,2	0,469	0,19	25,1	0,71	0,023
5	0,25	4,0	10	0,4	0,652	0,44	38,7	0,48	0,11
6	1,00	3,0	15	0,2	0,459	0,24	20,5	0,58	0,039
7	1,00	1,0	20	0,1	1,152	0,35	14,3	3,37	0,27
8	0,00	3,0	10	0,3	0,737	0,62	41	0,39	0,19
9	0,00	4,0	20	0,2	0,696	0,75	49,8	0,38	0,24
10	1,00	2,0	5	0,4	0,154	0,20	51,1	0,25	0,024
11	0,00	4,0	5	0,8	0,308	0,54	74,8	0,38	0,068
12	0,50	3,0	5	0,6	0,329	0,47	84	0,36	0,05
13	0,75	2,0	10	0,2	0,882	0,59	28,2	0,75	0,13
14	0,75	2,0	10	0,2	0,411	0,46	26,6	0,77	0,13
15	0,00	1,0	15	0,1	2,295	0,81	17,3	0,85	0,73
16	1,00	1,0	10	0,1	0,758	0,43	14,8	1,44	0,11
17	0,75	1,0	5	0,2	0,763	0,52	25,6	0,84	0,16
18	1,00	3,0	5	0,6	0,175	0,14	50,7	0,28	0,014
19	0,00	2,0	20	0,1	2,003	0,70	21,9	0,7	0,49

Tabelle 26 Fortführung Tabelle 25 Parameter und resultierende Ergebnisse GFPP-W

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n -	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	b_{sf} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
20	0,25	2,0	15	0,1	1,184	0,74	23,1	0,78	0,37
21	1,00	3,0	15	0,3	0,267	0,23	40,8	0,54	0,025
22	0,25	1,0	20	0,3	2,476	0,77	12,9	1,61	0,74
23	0,75	4,0	15	0,2	0,69	0,32	14,2	0,49	0,062
24	0,50	3,0	20	0,2	1,105	0,56	18,2	0,67	0,19
25	0,25	2,0	15	0,1	1,309	0,76	23,4	0,67	0,35
26	0,25	2,0	5	0,1	0,579	0,58	44,6	0,41	0,13
27	0,50	1,0	15	0,5	2,081	0,67	15,8	1,67	0,49
28	0,50	3,0	20	0,2	0,947	0,63	22,9	0,54	0,18
29	0,00	3,0	10	0,0	0,649	0,64	52,4	0,48	0,16
30	1,00	4,0	5	0,3	0,076	0,15	133,4	0,02	0,0087

A 8.3.1 Abtragstiefe GFPP-W

Abb. 79 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für die Abtragstiefe als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und dem Anteil der FK-Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

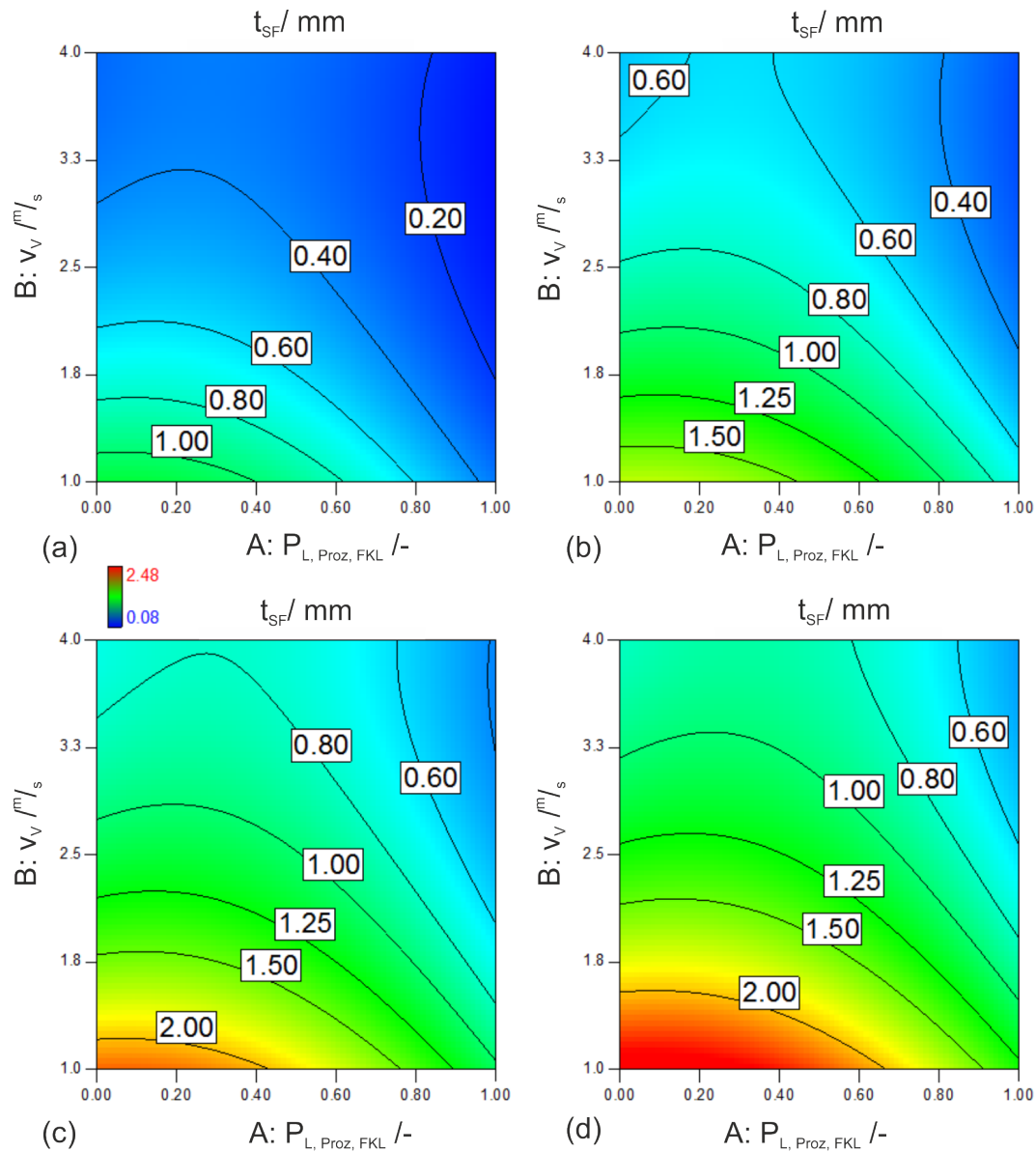


Abb. 79 Abtragstiefe t_{SF} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz, FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d), GFPP-W

A 8.3.2 Breite der wärmebeeinflussten Zone- GFPP-W

Abb. 80 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für die Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_v und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

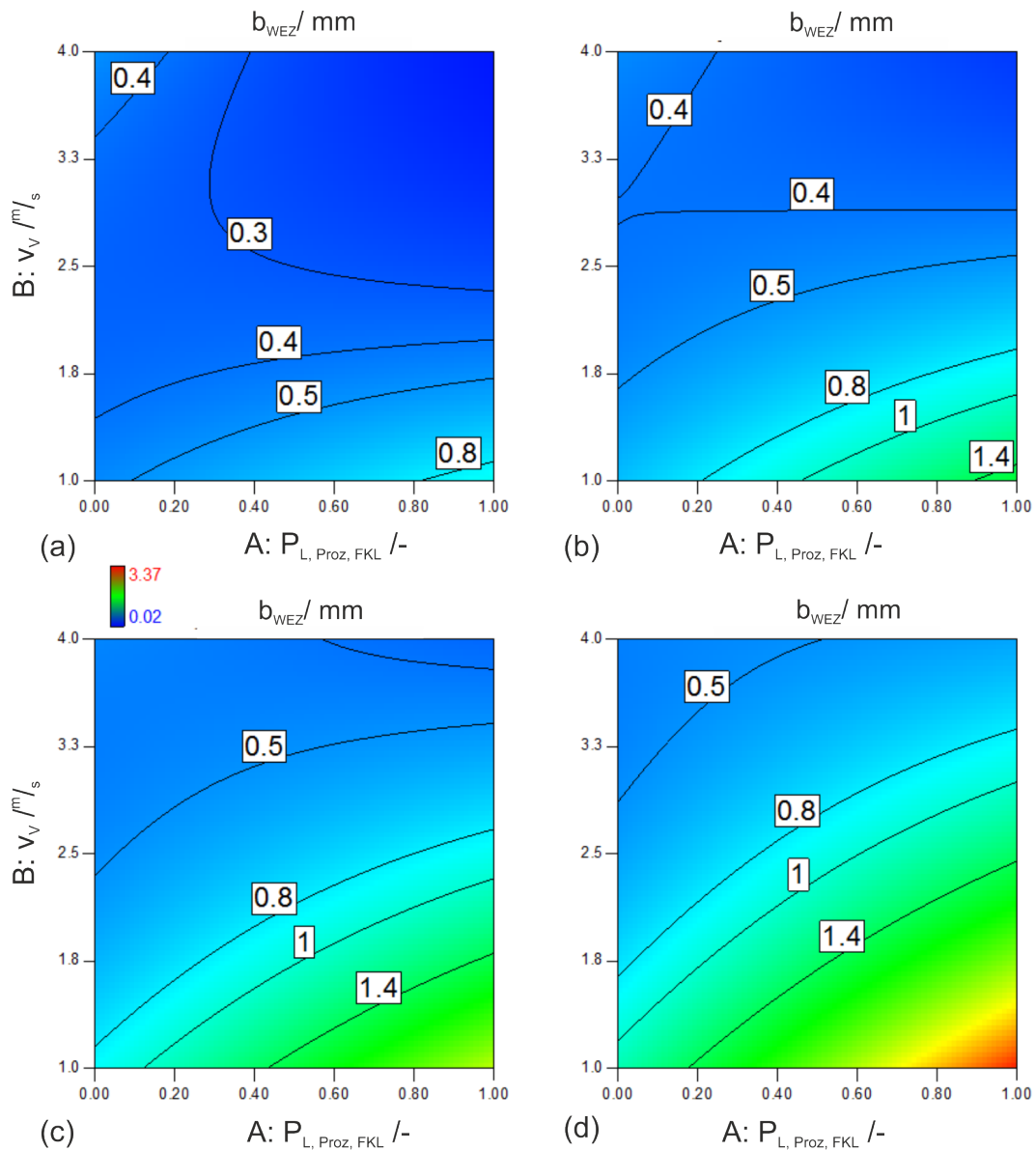


Abb. 80 Breite der wärmebeeinflussten Zone b_{WEZ} als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_v und des Anteiles der FK-Laserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d), GFPP-W

A 8.3.3 Kerbwinkel- GFPP-W

Abb. 81 zeigt die aus den Messdaten ermittelten Verläufe für den Kerbwinkel α als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und dem Anteil der FK- Laserstrahlung an der Gesamtlaserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$.

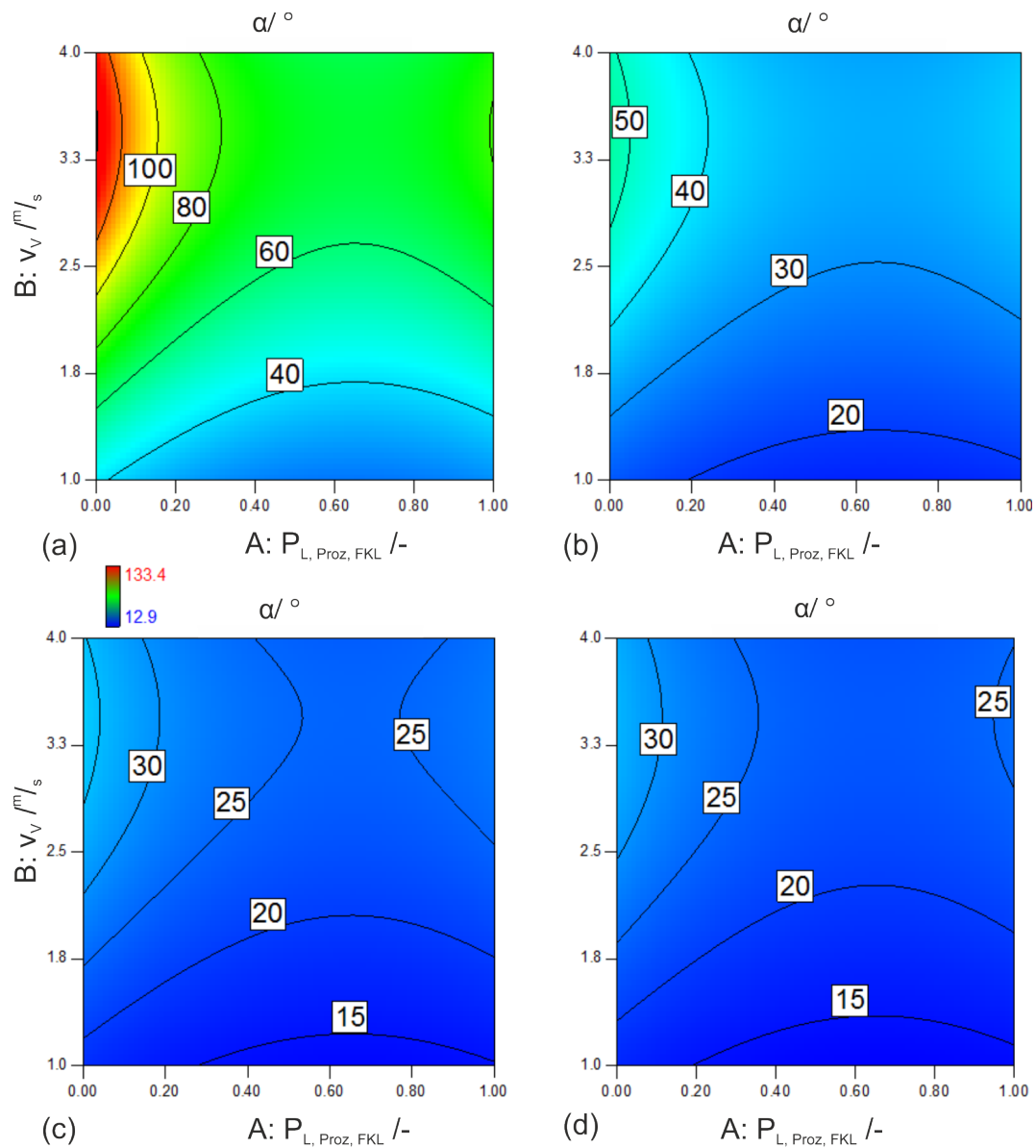


Abb. 81 Kerbwinkel α als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit v_V und des Anteiles der FK- Laserleistung $P_{L, \text{proz. FKL}}$, für $n = 5$ (a), $n = 10$ (b), $n = 15$ (c) und $n = 20$ (d), GFPP-W

A 9 Ergebnisse der Parameteroptimierung

A 9.1 KohlenstoffFaser-Kunststoff-Verbund CFEP

Tabelle 27 Optimierte Parameter CFEP

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n -	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
2.1	0,94	2	10	0,2	0,75	14	0,21	$6,9 \cdot 10^{-3}$
2.2	1	2	10	0,2	0,7	22	0,17	$6,4 \cdot 10^{-3}$
2.3	0	2	10	0,2	0,22	107	0,33	$6,7 \cdot 10^{-3}$
2.4	0,3	1	10	0,1	0,84	44	0,47	0,012
2.5	0,93	3	20	0,3	0,95	14	0,14	$5,4 \cdot 10^{-3}$
2.6	1	3	20	0,15	0,78	15	0,085	$6,7 \cdot 10^{-3}$
2.7	0	3	20	0,15	0,27	79	0,29	$6,3 \cdot 10^{-3}$
2.8	0	1	20	0,05	1,03	14	0,5	$1,6 \cdot 10^{-3}$

A 9.2 GlasFaser-Kunststoff-Verbund (rußgefüllte Matrix) GFPP- S

Tabelle 28 Optimierte Parameter GFPP- S

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n -	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
2.9	0,6	3	10	0,3	0,94	20	0,67	0,27
2.10	1	3	10	0,3	0,52	27	0,79	0,167
2.11	0	3	10	0,3	0,89	38	0,263	0,44
2.12	1	1,8	10	0,18	1,04	10	0,14	0,27
2.13	0,93	4	20	0,2	1,04	9	0,92	0,17
2.14	1	4	20	0,2	1,08	11	0,92	0,52
2.15	0	4	20	0,2	1,2	30	0,27	0,55
2.16	1	3,3	20	0,17	1,2	10	1,025	0,27

A 9.3 GlasFaser-Kunststoff-Verbund (ungefüllte Matrix) GFPP- W

Tabelle 29 Optimierte Parameter GFPP-W

#	$P_{L, \text{proz, FKL}}$ -	v_V in m/s	n -	v_{eff} in m/s	t_{sf} in mm	α in °	b_{WEZ} in mm	A_{SF} in mm ²
2.17	0,16	2	10	0,2	1,28	27	0,68	0,049
2.18	1	2	10	0,2	0,14	139	0,56	0,05
2.19	0	2	10	0,2	1,39	25	0,42	0,5
2.20	0,8	1	10	0,1	1,4	20	0,49	0,6
2.21	0,3	3,4	20	0,17	1,29	20	0,44	0,45
2.22	1	3,4	20	0,17	0,46	16	1,08	0,09
2.23	0	3,4	20	0,17	1,45	25	0,78	0,7
2.24	1	1,8	20	0,09	0,66	-	0,6	0,2