Schriftenreihe Lasertechnik

Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann (Hrsg.) Band 5



André Goeke

Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

Technische Universität Hamburg-Harburg

Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik

Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

Vom Promotionsausschuss der Technischen Universität Hamburg-Harburg zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. André Goeke

aus

Geseke

2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2011 Zugl.: (TU)-Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2010

 $978 ext{-} 3 ext{-} 86955 ext{-} 618 ext{-} 5$

Gutachter:

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Hintze

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. K. Schulte

Tag der mündlichen Prüfung:

17.12.2010

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2011 Gedruckt auf säurefreiem Papier

 $978 ext{-} 3 ext{-} 86955 ext{-} 618 ext{-} 5$

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Meinem Erstbetreuer Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann möchte ich sehr herzlich danken, mir die Erstellung meiner Promotion ermöglicht zu haben sowie mir alle Freiräume und gleichzeitig Unterstützung bei der Bearbeitung dieses Themas zukommen zu lassen. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr.-Ing. W. Hintze für das stetige Interesse an dem Thema meiner Arbeit und für die Übernahme des 2. Gutachters sowie Prof. Dr.-Ing. K. Schulte für den Vorsitz des Promotionsverfahrens.

Meinen aktiven und ehemaligen Kollegen am Institut möchte ich für das offene und angenehme Arbeitsklima danken, ohne deren Unterstützung die erfolgreiche Erstellung dieser Arbeit sicher nicht möglich gewesen wäre. Mein besonderer Dank gilt hierbei Fr. A. Einfeldt und Fr. Dr.-Ing. M. Petersen sowie Hrn. J. Wittkamp für die unermüdliche Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden sowie auch während der täglichen Arbeit.

Danken möchte ich auch besonders meinen zahlreichen Studien- und Diplomarbeitern(innen) sowie studentischen Hilfskräften, ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir ein Studium ermöglicht haben und mich während der gesamten Zeit mit allen Höhen und Tiefen ohne Unterlass unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitung	1					
2	Star 2.1	nd der KenntnisseFaserverbundkunststoffe2.1.1Einführung2.1.2Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen	3 3 5					
		2.1.3 Aufbau von Faserverbundkunststoffen	7					
	2.2	Konturbearbeitung von Faserverbundkunststoffen	13					
		stoffen	13					
	2.3	2.2.2 Fertigungsverfahren zur Konturbearbeitung	$\frac{15}{21}$					
		2.3.1 Grundlagen der Laserstrahlerzeugung und Fokussierung2.3.2 Einteilung des Laserstrahltrennens in die Gruppe der Fertigungs-	21					
		verfahren	25 27					
		2.3.4 Zersetzungsprozess beim Laserstrahltrennen von Faserverbund-	20					
	2.4	Analyse der Prozessfähigkeit von Laserfertigungsprozessen	$\frac{28}{32}$					
3	Auf	gabenstellung und Zielsetzung dieser Arbeit	35					
	$3.1 \\ 3.2$	Aufgabenstellung und Zielsetzung	$\frac{35}{37}$					
4	Pro	Prozessbeschreibung und Modellbildung						
	4.1	Allgemeine Prozessbeschreibung	39					
	4.2	Prozessergebnis- und Qualitätsgrößen	40					
		4.2.1 Grob- und Feingestaltabweichung der Schnittkante	40					
		4.2.2 Thermisch induzierte Beeinflussung des Werkstoffes	42					
	4.9	4.2.3 Zielgroßen hinsichtlich der Qualität des Bearbeitungsprozesses	44					
	4.3	fussung der Messmethoden zur Erlassung der thermischen Beein-	16					
	44	Prozesseingangs- und Einflussgrößen	40 54					
	4.5	Prozesskenngrößen beim Laserstrahltrennen	57					
5	Ein	flussanalyse der Technologieparameter auf die Qualität	59					
5	Ein : 5.1	flussanalyse der Technologieparameter auf die Qualität Vorgehensweise zur Einflussanalyse der Technologieparameter auf die	59					

	5.3	Allgemeine Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses von Faserver-	
		bundkunststoffen	7
		5.3.1 Vorgehensweise zur Modellbildung	7
		5.3.2 Beschreibung der Energieeinkopplung in den Werkstoff 6	8
		5.3.3 Darstellung der Mechanismen der Wärmeübertragung im Faser-	
		verbundwerkstoff	3
		beim Laserstrahltrennen	'4
	5.4	Berechnung der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone	5
		5.4.1 Vorgehensweise zur Lösung des Prozessmodells	5
		5.4.2 Analytische Lösung des Modells	6
		5.4.3 Numerische Lösung des Modells	5
	5.5	Bewertung der Modell- und Ergebnisgüte	1
6	Ind	ustrielle Anwendung des Laserstrahltrennens von Faserverbund-	0
	Kun	IU	9
	0.1	Vorgenensweise zur Analyse der industriellen Umsetzung	9
	0.2	Analyse der industriellen Umsetzung für eine einfache Bearbeitungsgeo-	0
		$\begin{array}{c} \text{metrie} & \dots & $	9
		0.2.1 Analyse der Prozessianigkeit des Laserstränitrennens von Faser-	0
		Verbundkunststonen	U
		0.2.2 Ennuss der verwendung eines Prozessgases auf die Quantat der Schnittfläche	ი
	63	Analyse der industriellen Umsetzung für eine kompleve Bearbeitungs	4
	0.0	reometrie	5
			0
7	Zus	ammenfassung und Ausblick 12	3
8	Anł	hang 12	5
-	8.1	Erläuterung zum Epoxyd- und Aminäquivalent	5
	8.2	Molekülaufbau eines Epoxidharzes	7
	8.3	Molekülaufbau und Bindungsformen bei polymeren Werkstoffen 12	8
	8.4	Herstellung von Kohlenstofffasern	1
	8.5	Kenndaten der Verwendeten Anlagentechnik	5
		8.5.1 Technische Daten der verwendeten CO ₂ -Laserstrahlquelle 13	5
		8.5.2 Technische Daten der verwendeten Scheibenlaserstrahlquelle 13	6
		8.5.3 Technische Daten der verwendeten Faserlaserstrahlquelle 13	7
		8.5.4 Berechnung des Maschinenstundensatzes für die verwendete An-	
		lagentechnik	8
c			~
9	Abl	kürzungen und Formelzeichen 13	9
	9.1	Abkürzungen	9
	9.2	Latemische Formelzeichen	:1

9.3	Griechische Formelzeichen
9.4	Konstanten

Literaturverzeichnis

1 Einleitung

Zur Erhöhung der Energieeffizienz von Fahrzeugen oder technischen Anlagen wird der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, wie z. B. Titan oder Aluminium, immer weiter ausgebreitet. Faserverbundkunststoffe (FVK) stehen immer häufiger in Konkurrenz zu herkömmlichen Leichtbauwerkstoffen. Insbesondere die für den Leichtbaueinsatz relevanten Eigenschaften, z. B. hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte, führen zu erweitertem Einsatz von FVK in der industriellen Anwendung. Sie verfügen über eine hohe Korrosionsbeständigkeit, ein gutes Dämpfungsvermögen und erlauben die sogenannte Integralbauweise [DGF07, Ehr06].

FVK werden industriell in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten eingesetzt. Sie finden Verwendung in den Bereichen Luft- und Raumfahrt (z. B. Leitwerke oder Rumpfstrukturen), im Fahrzeugbau (z. B. Fronthauben oder Monocoques), im Bootsbzw. Schiffbau (z. B. Rümpfe oder Maste), im Bauwesen (z. B. Säulen und Pfeiler) sowie auch zur Herstellung von hochwertigen Sportgeräten (z. B. Skier, Tennis- oder Golfschläger).

Der wachsenden Nachfrage nach FVK steht der Bedarf der Industrie nach geeigneten Verfahren zur Konturbearbeitung für FVK gegenüber, da die formgebenden Fertigungsverfahren typischerweise eine Endbearbeitung erfordern [Tra92]. Unabhängig von dem zur Herstellung eines FVK-Laminates verwendeten Fertigungsverfahren, z. B. im Handlaminierverfahren oder durch automatisierte Fertigung, wird die Endkontur erst durch eine abschließende Endbearbeitung realisiert [Ehr06]. Die bisher industriell verwendeten Verfahren für eine derartige Konturbearbeitung sind Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide (z. B. Fräsen oder Sägen) sowie Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide (z. B. Wasserstrahlschneiden). Bei den Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide unterliegen die verwendeten Werkzeuge einem hohen abrasiven Verschleiß. Dieser hohe Verschleiß führt zu einer reduzierten Genauigkeit sowie hohen Kosten für den Bearbeitungsprozess. Darüber hinaus bereiten die auftretenden Zerspankräfte bei der mechanischen Bearbeitung von dünnwandigen Bauteilen Probleme, niedrige Produktivität und Genauigkeit sind die Folge.

In verschiedenen Untersuchungen wurde die Konturbearbeitung mittels Laserstrahlung als alternatives Verfahren betrachtet [Haa06, Hil06]. Dieses Fertigungsverfahren ist nahezu frei von mechanischen Kräften und abrasivem Verschleiß [Tra92]. Die Fokussierung des Laserstrahls auf einem Punkt mit geringem Durchmesser erlaubt die Bearbeitung von rohrförmigen Bauteilen, was z. B. beim Wasserstrahlschneiden nahezu nicht zu realisieren ist.

1 Einleitung

In einer Reihe von Untersuchungen sind bereits Ergebnisse über die grundlegenden Zusammenhänge beim Laserstrahltrennen von FVK mit CO_2 -Laserstrahlquellen dargestellt worden [Lie98, MGRN98, Mül91, Tra92]. Die in der Literatur dokumentierten experimentellen Untersuchungen zum Laserstrahltrennen von FVK mittels Festkörperlaserstrahlquellen sind bereits mehr als 10 Jahre alt. Untersuchungen zum Laserstrahltrennen von FVK mittels Hochleistungs-Faserlaserstrahlquellen sind noch gar nicht dokumentiert. Da diese Bauformen von Laserstrahlquellen heute in zahlreichen Anwendungen verwendet werden und gleichzeitig der Anteil der verwendeten CO_2 -Laserstrahlquellen abnimmt, besteht die Notwendigkeit, das Laserstrahltrennen von FVK mittels Festkörper- und Faserlaserstrahlquellen zu untersuchen.

2.1 Faserverbundkunststoffe

2.1.1 Einführung

Verbundwerkstoffe sind mehrkomponentige Werkstoffsysteme, die aus mindestens zwei Komponenten zusammengesetzt sind [FR03, SF03, VDI91]. Dabei werden die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes massgeblich durch die Eigenschaften der Einzelkomponenten, wie z. B. mechanische oder thermische Kennwerte, bestimmt. Eine bedeutende und etablierte Entwicklung von Verbundwerkstoffen sind die so genannten Faserverbundkunststoffe $(FVK)^1$. Diese Werkstoffgruppe besteht im Allgemeinen aus einem faserförmigen Werkstoff, der in eine polymere Matrix eingebettet wird [FZR95, FR03, SF03]. Bereits im Jahr 1916 wurde R. Kemp in den USA ein Patent zur Herstellung eines Flugzeuges aus FVK erteilt [Ehr06]. Die Entwicklung von Flugzeugbauteilen aus FVK ist auch heute noch Inhalt von wissenschaftlichen und industriellen Untersuchungen [Fun01, NB97]. Seit den frühen 1950er und 1960er Jahren [SF03, Sch05] werden FVK z. B. in zahlreichen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [BN98, Kra05], der Medizintechnik [Bon94], dem Fahrzeug-[DWSB08, EDR07, Fra04, Hoe00, Len04, Mic09, SP07], dem Maschinen- und Apperatebau [Hoe00] sowie dem Bauwesen verwendet [Ber03, Kol08, Noi96]. Weitere relevante Anwendungen von FVK sind hochwertige Sport- und Freizeitartikel [DWSB08] sowie Bauteile für Windkraftanlagen [Len04]. Die Abbildung 2.1 zeigt die Marktentwicklung von FVK in den USA seit 1960. Insbesondere seit den 1980er Jahren ist ein starkes Marktwachstum zu verzeichnen, da zu diesem Zeitpunkt die so genannten Hochleistungs-FVK, wie z. B. kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oder glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)² entwickelt wurden [NB97].

Seitdem werden FVK insbesondere im Bereich der Luft- und Raumfahrt sowie dem Fahrzeugbau in großem Umfang eingesetzt [BN98, Rob07]. So betrug der Massenanteil von CFK am Strukturgewicht von Verkehrsflugzeugtypen 1970 ca. 5 % und erreichte 1990 ca. 10 % [Bre05, Ehr06]. Bei modernen Flugzeugtypen wie dem A380 oder dem A400M (beide Typen entstammen dem Flugzeughersteller Airbus) beträgt der Mas-

¹Synonym werden für Faserverbundkunststoffe die Bezeichnungen Faser-Kunststoff-Verbunde oder faserverstärkte Kunststoffe verwendet [Ehr06, Ene98, NB97, Sch91]. In der englischen Fachliteratur ist für FVK die Bezeichnung "fibre-reinforced composites" üblich [Ehr01, SF03].

²Glasfaserverstärkter Kunststoff wird insbesondere im Bereich der Sport- und Freizeitartikel auch als "Fiberglas" bezeichnet. Dieser Anglizismus ist von "fibreglass" (BE) bzw. "fiberglass" (AE) abgeleitet.



Abbildung 2.1: Marktentwicklung der Faserverbundkunststoffe in den USA [Ehr06]

senanteil bereits über 20 % und soll bei den zurzeit in der Entwicklung befindlichen Verkehrflugzeugtypen B787 (Boeing) und A350 (Airbus) auf über 35 % anwachsen [Bre05]. Diese Zunahme des Massenanteils von CFK am Strukturgewicht ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Der weltweite Verbrauch von Kohlenstofffasern betrug im Jahr 2006 26.000 Tonnen, wobei im Jahr 2010 mit einem Absatz von 38.000 Tonnen gerechnet wird [Ehr06, Zie07]. Zum Vergleich wurden im Geschäftsjahr 2006 ca. 2,4 Mio. Tonnen Glasfasern verbraucht [Zie07].

Die Abbildung 2.1 zeigt den Anteil der Hauptanwendungsgebiete im Transport- und Bauwesen, Konsum- und Freizeitartikel sowie der Luft- und Raumfahrt im Vergleich. Der Anteil von Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ist trotz bedeutender Forschungsaktivitäten und -investitionen nur von geringer Bedeutung [BN98, Kra05]. Seit den 1970er Jahren stieg der Absatz an FVK zur Herstellung von hochwertigen Konsum- und Freizeitartikeln um nahezu 1.000 %. Dieser Anstieg ist zum einen auf die guten Leichtbau- und Festigkeitseigenschaften und zum anderen auf Marketingaspekte zurückzuführen. In dieser Branche werden heutzutage große Umsätze und Gewinne realisiert, wobei die Fertigung der Produkte in manuellen Fertigungsprozessen den Stand der Technik repräsentiert. Von den Herstellern von Konsum- und Freizeitartikeln aus FVK werden weiterhin Produktionszuwächse von mehr als 10 % erwartet, sodass die Bedeutung dieses Marktes sowie der Anteil am gesamten FVK-Markt weiter zunehmen wird [DWSB08].



Abbildung 2.2: Einsatz von CFK-Strukturen im Flugzeugbau [Bre05, Ehr06]

2.1.2 Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen

 ${\rm FVK}$ sind heute aus einer Reihe von Gründen etabliert, dazu zählen [Ehr
06, FR03, NMB04]

- die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit,
- gute Dämpfungseigenschaften,
- die Möglichkeit zur belastungsorientierten Bauteilgestaltung durch die gezielte Orientierung der Verstärkungsfasern,
- die gezielte Einstellbarkeit der thermischen Ausdehnung und elektrischen Leitfähigkeit sowie
- eine gute dynamische Beständigkeit .

In Abbildung 2.3 ist der qualitative Vergleich technisch relevanter Eigenschaften von CFK, Stahl und Aluminium dargestellt [Sch91]. Trotz der geringeren Dichte des CFKs im Vergleich zu Stahl und Aluminium sind sowohl der E-Modul als auch die Zugfestigkeit deutlich höher [FR03, Sch91].

CFK zeigt die Eigenschaft eines negativen thermischen Ausdehungskoeffizienten, d. h. es zieht sich unter Temperatureinfluss zusammen. Die metallischen Werkstoffe zeigen dagegen die typische Ausdehnung mit steigender Temperatur [BS94, Hor02, Roh96].



Abbildung 2.3: Qualitativer Vergleich verschiedener Eigenschaften von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Stahl und Aluminium nach Schulte [Sch91]

In Tabelle 2.2 ist der Vergleich der Kennwerte einiger organischer, metallischer und mehrkomponentiger Werkstoffe dargestellt. Die hohe spezifische Festigkeit bzw. der hohe spezifische E-Modul sind der Grund für die etablierte Anwendung von FVK. Diese beiden Kennwerte berechnen sich aus dem Quotienten von Streckgrenze und Dichte bzw. E-Modul und Dichte [Sch91].



Abbildung 2.4: Einteilung der Matrixwerkstoffe

2.1.3 Aufbau von Faserverbundkunststoffen

Ein so genanntes FVK-Laminat besteht im Wesentlichen aus den Komponenten [DIN87, Ehr06, Sch91, SF03]

- eines polymeren Matrixwerkstoffes und
- den eingebetteten Verstärkungsfasern .

Dabei hat der polymere Matrixwerkstoff die Aufgaben [Ehr06, FR03]

- die Kräften in die Fasern einzuleiten,
- diese Kräfte von Faser zu Faser zu übertragen,
- sowie die geometrische Lage der Fasern zueinander und
- den Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen sicherzustellen .

Polymere Matrixsysteme

Als Matrixwerkstoffe werden zurzeit sowohl Thermoplaste als auch Duroplaste verwendet, siehe Abbildung 2.4. Duroplastische Matrixsysteme werden heutzutage aufgrund der besseren mechanischen Kennwerte in der Mehrzahl der Anwendungen verwendet [Che90, Sch91, NMB04].

Dabei sind *Duroplastische Matrixsysteme*³ chemisch aushärtende Verbindungen, die nach der Aushärtung nicht erneut umgeformt werden können [Ehr06, FR03, Gar00, NMB04, Sch91]. Die Aushärtung dieser Polymere erfolgt typisch durch Polykondensation oder -addition. Beispiele für duroplastische Matrixsysteme sind Epoxid- (EP), ungesättigte Polyester- (UP), Vinylester- (VE) und Phenolharze (PI) [Ehr06, Sch91].

Thermoplastische Matrixsysteme sind im Gegensatz zu Duroplasten unter Temperatureinfluss wiederholt plastisch verformbar. Dadurch ist sowohl das Warmumformen

³Nach Bargel u. a. [BS94, Hor02] werden die Begriffe Duroplast und Duromere synonym verwendet.

von Halbzeugen als auch die Rückführung von Produktionsabfällen in einen erneuten Fertigungsablauf möglich [BS94, Ehr06, Sch91, Sch95, Wög03]. Einige Beispiele für thermoplastische Matrixsysteme sind Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polysulfon (PSU), Polyetherketon (PEK) und Polyetheretherketone (PEEK) [FR03, Sch91].

Industriell relevante duroplastische Matrixsysteme sind Epoxid- oder Polyesterharze, während bei den thermoplastischen Matrixsystemen Polyamid (PA) in zahlreichen Anwendungen verwendet wird [DIN89d, HKN⁺02, Hoh92]. Diese Matrixsysteme werden im Folgenden erläutert

- *Epoxidharze (EP)* härten durch eine so genannte Polyadditionsreaktion aus. Aufgrund ihrer hohen statischen und dynamischen Festigkeit werden typischerweise EP-Harze zur Herstellung von Hochleistungs-FVK verwendet [Car95, Ehr06, Loh88, Rit95, Sch05, SSSH02, Ste97]. Bei der Verarbeitung von EP-Harzen ist ein exaktes Mischungsverhältnis von Harz und Härter zu beachten, um die mechanischen und thermischen Eigenschaften nicht negativ zu beeinträchtigen [Ehr06, Fun01], siehe Anhang 8.1. In Anhang 8.2 ist der typische molekulare Aufbau eines EPs dargestellt.
- Ungesättigte Polyesterharze (UP) härten durch eine Polymerisationsreaktion aus. Sie sind preiswert und unempfindlich gegenüber Mischungsfehlern bei der Verarbeitung. Daher werden UP-Harze heutzutage in zahlreichen Anwendungen eingesetzt [Car95, Loh88, SSSH02, SE88]. Die mechanische Festigkeit und Steifigkeit ist im Allgemeinen geringer als bei EP-Harzen, siehe Tabelle 2.1 [Ehr01, Loh88, SE88].
- Polyamide (PA) härten typischerweise durch eine Polykondensationsreaktion aus. Bereits seit 1937 werden PA großtechnisch hergestellt und in zahlreichen Anwendungen verwendet [NMH94, SSSH02]⁴. Die mechanischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften der PA werden wesentlich durch die Aufnahme von Wasser bestimmt. PA zeichnen sich durch hohe Schlagzähigkeit und hohe Abriebsfestigkeit aus. Trotz hoher Ermüdungsfestigkeit bei Langzeitbeanspruchungen nimmt die Festigkeit bei langer Beanspruchung ab [SSSH02]. Dieses für PA typische Werkstoffverhalten wird als nicht-isochron⁵ bezeichnet.

In Tabelle 2.1 sind die Eigenschaften polymerer Matrixwerkstoffe gegenübergestellt. Weitere Informationen zur molekularen Struktur sowie den relevanten Bindungsformen von polymeren Werkstoffen sind in Anhang 8.3 sowie in der entsprechenden Fachliteratur ausführlich dargestellt und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt [BS94, Ehr06, GF91, Hor02, SSSH02].

⁴Polyamide sind insbesondere unter den Handelsnamen Nylon (Firma DuPont) oder Perlon (Firma IG Farben) bekannt [SSSH02].

 $^{^{5}}$ von griech. isos = gleich und chronos = Zeit [BS94, SSSH02]



Abbildung 2.5: Einteilung der Faserarten

Verstärkungsfasersysteme

Die sogenannten Verstärkungsfasern bestimmen wesentlich die mechanischen und thermischen Eigenschaften der FVK. Heutzutage werden

- Naturfasertypen, z. B. Jute- oder Sisalfasern,
- metallische Fasertypen, z. B. Stahl- oder Aluminiumfasern,
- organische Fasertypen, z. B. Aramid- oder Kohlenstofffasern, sowie
- anorganische Fasertypen, z. B. Glasfasern,

verwendet [Ehr06, Sch91, SF03, Sch05]. Von industrieller Bedeutung sind zurzeit die organischen und anorganischen Fasertypen. Insbesondere Aramid-, Glas- und Kohlenstofffasern werden in großem Umfang eingesetzt, siehe Abbildung 2.5.

• Aramidfasern⁶ bestehen aus stäbchenförmigen und steifen Polymerketten, deren Kettenmoleküle über kovalente Bindungen verbunden sind, während Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Polymerketten wirken. Diese steife Kettenstruktur erlaubt eine hohe eindimensionale Orientierung in Faserlängsrichtung sowie ein hohes Maß an Kristallinität. Das führt zu hohen Festigkeitswerten, welche auch bei höheren Temperaturen erhalten bleiben [Zie07]. Bei mechanischer Überbelastung setzt aufgrund der schwächeren Wasserstoffbrückenbindungen ein Gleiten der Ketten und ein Aufspleißen in Faserlängsrichtung ein [Hoh87]. Dies resultiert in einer hohen Zähigkeit der Aramidfasern. In Folge der eindimensionalen Orientierung können aramidfaserverstärkte Kunststoffe einerseits hohe Zugbeanspruchungen aufnehmen, versagen andererseits bei Druckbeanspruchung frühzeitig durch Ausknicken der fibrillaren Struktur [Zie07]. Weitere Eigenschaf-

⁶Aramidwerkstoffe sind insbesondere unter dem Markennamen Kevlar (Firma Du Pont) bekannt.

ten der Aramidfasern sind die hohe Verschleißfestigkeit, ein negativer Wärmeausdehnungskoeffizient und eine geringe Dichte [Sch05, Fun01].

- Glasfasern besitzen eine isotrope Struktur, bei der die Moleküle dreidimensional über kovalente Bindungen vernetzt sind [HK93, Joh94, Kle81]. Aufgrund dieser Vernetzung kann keine Orientierung in der Faserachse erfolgen, wodurch sich begrenzte Festigkeits- und Steifigkeitswerte ergeben [Ehr81]. Im Vergleich zu Kohlenstofffasern sind der E-Modul geringer und die Dichte höher, sodass GFK-Werkstoffe typischerweise nicht für hochbelastete Strukturen, mit im Allgemeinen hohen Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen, verwendet werden [DIN89b, Fra04, Zie07]. Der Vorteil von Glasfasern ist der geringe Preis von zurzeit weniger als 2 €/Kg, der zu einer hohen Verbreitung dieses Verstärkungsfaserwerkstoffes führt [Ehr06, RG 03]. Bedingt durch die starre Struktur ergibt sich eine spröde Bruchdehnungscharakteristik.
- Kohlenstofffasern sind technische Verstärkungsfasern mit hoher Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Bruchdehnung, verglichen mit metallischen Werkstoffen [Ehr06, FZR95, Len04, MS94, Pee95, Sch91, Sin94, Ste97]. Längs zur Faserrichtung weisen Kohlenstofffasern einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf [Ehr01, Roh96]. Innerhalb der Schichten ist der Kohlenstoff zweidimensional über kovalente Bindungen verbunden, während Van-der-Waals-Kräfte die einzelnen Schichten zusammenhalten. Einer hoher Orientierungsgrad der Schichten bewirkt eine negative Anisotropie mit Vorzugsrichtung in Faserlängsachse.

Aufgrund der großen industriellen Bedeutung von Kohlenstofffasern in zahlreichen Anwendungen, z. B. Boots-, Fahrzeug- oder Flugzeugbau, werden im Rahmen dieser Arbeit im Wesentlichen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit duroplastischer Matrix betrachtet. Daher ist die industrielle Herstellung von Kohlenstofffasern im Anhang 8.4 als ergänzende Information dargestellt.

		고 되		Ч	PA 6	É-Glas	Aramid	H C-F	aser T	C-Faser HM
Zugfestigkeit	[MPa]	5 - 02	09 06	- 80	65 -90	3.400	2.900	3.950 -	- 4.300	4.560
Druckfestigkeit	[MPa]	10 -2	- 06 00	- 300	110	I	I	I		I
E-Modul	[GPa]	2,8 -	3,6 4	8,	2,0 - 3,0	73	100	25	38	395
Bruchdehnung	[%]	2 - 1	0	3	70 - 300	3,5 - 4	2,8	Ţ,	5	1,1
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,27	~ 0	30	0,23	0,80	0,04	-	4	115
Zersetzungstemp.	[K]	573		I	573	I	, I	I		ı
therm. Ausdehnung	$[10^{-6}]$	60-7	0 1	00	80	ю	-3,5	0-	,1	-0.5
Faserdurchmesser	[mm]	I		I	ı	3-13	12	[-	2	2
	Einh	eit	Holz	Alu	Titan	Stah	l GFK	CFK	CFK	
			Kiefer)		(Ti6Al4V)	()		HT	HM	
Zugfestigkei	t [MP	[a]	100	350	1.000	1.100) 720	000	720	
E-Modul	GP	a	12	20	110	210	30	88	120	
Dichte	[g/cr]	n ³]	0,5	2,8	4,5	7,8	2,1	1,5	1, 6	
spez.	[kNm	[/g]	20	13	22	14	34	00	45	
Festigkeit										
spez.	$[Nm^2]$	[g]	2,4	2,7	2,4	2,7	1,4	5,9	7,5	
E-Modul	* 1(
Bruchdehnu	ng [%]				15 - 30	18-2(.0	ı	0, 4-0, 9	
Wärmeleitf.	[W/n]	nK = 0	,06-0,17	204	15,5	40-6(0,3	17	17	
therm. Ausc	$1. 10^{-1}$	[9]		23.8	10.8	12	0,2	-0,1	-0,1	

Tabelle 2.2: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von organischen, metallischen und mehrkomponentigen Werkstoffen[Car95, DIN89a, DIN89d, Sch91]

Laminataufbau

Ein Laminat⁷ bezeichnet das flächige Produkt aus einzelnen, unterschiedlichen Schichten, das durch den Verbund von Faser- und Matrixwerkstoffen entsteht [BS94, DGK⁺08, Ehr06, SF03]. In Abbildung 2.6 ist der Aufbau eines Laminates aus einzelnen Verstärkungsfaserschichten dargestellt.



Abbildung 2.6: Beispiele für unterschiedliche Faseranordnung im Laminat nach Schulte [Sch91]

Durch diesen schichtweisen Aufbau zeigen FVK typischerweise eine anisotrope⁸ Ausprägung der mechanischen und thermischen Materialeigenschaften. Dardurch ist es möglich, Bauteile aus FVK beanspruchungsgerecht zu dimensionieren und auch herzustellen. Beispielsweise wird bei einem Zugstab, der nur in einer Achse belastet wird, das Laminat typischerweise unter einem Laminatwinkel von $\theta = 0$ Grad aufgebaut, d. h. die Verstärkungsfasern werden ausschließlich in Belastungsrichtung angeordnet, siehe unidirektionales Laminat in Abbildung 2.6. Das FVK-Laminat kann hohe Kräfte in Faserlängsrichtung aufnehmen aber nur geringe quer zu den Fasern. Dieses Werkstoffverhalten wird als anisotrop bezeichnet [DGK⁺08, Ehr06, Sch91, SF03, TKH01]. Werkstoffsysteme, die in allen Raumrichtungen im Wesentlichen identische Materialeigenschaften aufweisen, werden als isotrope⁹ Werkstoffe bezeichnet [Ehr02, SF03]. Typische isotrope Werkstoffsysteme sind metallische Werkstoffe wie Stahl oder Aluminium. Die mechanischen Eigenschaften anisotroper FVK-Laminate werden durch die sogenannten konservativen Mischungsregeln unter Berücksichtigung der Volumenanteile der einzelnen Komponenten ermittelt, siehe auch [Ch094, Ehr06, SF03, Ste97, STGO07].

Verschiedene Ansätze zur Ermittlung der effektiven thermischen Eigenschaften von mehrkomponentigen Werkstoffen, wie z. B. FVK, wurden bereits betrachtet, sind zurzeit aber im Allgemeinen mit großen Unsicherheiten behaftet [BZ92, MK07, PH00, TDIV85]. Daher ist es Stand der Technik, die thermophysikalischen Eigeschaften für jedes FVK einzeln durch experimentelle Untersuchungen zu bestimmen.

⁷von lat. lamina = die Schicht [BS94, DIN87, Ehr06]

⁸von griech. an(ti) = gegen/nicht, griech. isos = gleich und griech. tropos = Richtung [Hor02, Jac05] ⁹von griech. isos = gleich und griech. tropos = Richtung [Hor02, Jac05, Roh96]

2.2 Konturbearbeitung von Faserverbundkunststoffen

2.2.1 Einführung in die Konturbearbeitung von Faserverbundkunststoffen

Bauteile aus FVK werden endkonturnah durch Formverfahren, wie z. B. Pressen, Wickeln oder Handlaminieren, hergestellt. Eine direkte Herstellung ohne anschließende Bearbeitung des Bauteiles erfordert einen großen Aufwand bei der Herstellung des Laminates sowie die Verwendung formgebender Werkzeugformen [Hoh92, RS87]. Aus wirtschaftlichen Gründen werden daher Fertigungsverfahren mit nachfolgender Konturbearbeitung verwendet. Die Konturbearbeitung beschränkt sich dabei im Allgemeinen auf das Entfernen eines Pressgrates, das Besäumen von Prepregbauteilen¹⁰ und das Erzeugen von funktionalen Konturen mit hoher Maß- und Formgenauigkeit [Hoh92, Kin10, Rei91].

In Abbildung 2.7 ist ein Demonstratorbauteil im unbearbeiteten und bearbeiteten Zustand dargestellt, dieses Anwendungsbeispiel wird in Kapitel 6.3 erneut betrachtet. Bei diesem Bauteil werden sowohl die Endkontur als auch Ausbrüche im Anschluss an die Aushärtung eingebracht. Zur Konturbearbeitung wurden vom Bauteilhersteller verschiedene Bearbeitungsverfahren untersucht. Das verwendete Bearbeitungsverfahren muss den Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit (Bearbeitungsgeschwindigkeit, Bearbeitungskosten, Werkzeugverschleiß), Qualität des Bearbeitungsergebnisses (Beeinflussung der Schnittkante, Schnittflächenqualität) und Flexibilität erfüllen [Kri94, KME⁺89].



Abbildung 2.7: Vergleich eines unbearbeiteten und bearbeiteten Bauteils

¹⁰Für vorimprägnierte Halbzeuge mit thermoplastischer oder duroplastischer Matrix, die erst in einem nächsten Schritt zum Fertigteil weiterverarbeitet werden, ist die Bezeichnung "Prepreg" (von engl. pre impregnated = vorimprägniert) üblich [DIN91a, DIN93, DIN89c, Ehr06, NMB04, Wög03].



Abbildung 2.8: Einordnung der Verfahren zur Konturbearbeitung nach DIN-8580 [DIN03a]

Zur Kontur- und Umrissbearbeitung werden im Wesentlichen die Verfahrensvarianten

- Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide durch das Fräsen oder das Bohren,
- Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide durch das Wasserstrahlschneiden sowie
- thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl

industriell verwendet [Hoh92, MKM⁺90]. Die Abbildung 2.8 zeigt die Einordnung dieser Verfahren entsprechend DIN 8580 [DIN03a].

Den oben genannten Verfahren ist gemeinsam, dass sich die Bearbeitung der mehrkomponentigen und anisotropen Faserverbundkunststoffe signifikant von der Bearbeitung einkomponentiger und isotroper metallischer Werkstoffe unterscheidet. Daher besteht die Notwendigkeit, den Fertigungsprozess der Verarbeitung und Endbearbeitung an den jeweiligen mehrkomponentigen Werkstoff anzupassen [Hoh87, Hoh92].

2.2.2 Fertigungsverfahren zur Konturbearbeitung

a.) Konturbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide durch Fräsen

Die Konturbearbeitung von mehrkomponentigen FVK durch Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wurde seit den 1980er Jahren in zahlreichen Projekten untersucht und zählt heute zum Stand der Technik in vielen industriellen Anwendungen [Gra88, HGM⁺04, Rei91, Rum96]. Bisher sind insbesondere die Fertigungsverfahren Bohren und Fräsen industriell relevant [DIN03a, HCH⁺07, HHS07, Jan03, Kin10, KK08, WW06].

Vorteile der spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide sind die hohe Maß- und Formtoleranz von bis zu 8,0 μ m sowie die realisierbare Oberflächengüte von $R_z \leq 30 \ \mu$ m. Darüber hinaus ist die thermische Beanspruchung des zu bearbeitenden Werkstoffes mit Temperaturen von im Allgemeinen weniger als 200°C gering [HGM⁺04].

Von Nachteil sind die hohen mechanischen Prozesskräfte, die bei der spanenden Bearbeitung von FVK auftreten. Deshalb ist bei der Zerspanung eine aufwändige Spanntechnik erforderlich, um Delamination, freie Faserenden sowie Schädigungen der Decklage zu vermeiden [HCH⁺07]. Insbesondere bei der spanenden Bearbeitung von FVK mit hoher Festigkeit oder Zähigkeit, wie z. B. bei AFK oder CFK, tritt hoher abrasiver Verschleiß an den Zerspanwerkzeugen auf. Daher besteht die Notwendigkeit, hochharte Schneidwerkstoffe, wie z. B. kubisches Bornitrid (CBN) oder polykristalliner Diamant (PKD), zu verwenden [KK08, Wei07]. Dennoch sind sowohl die Standzeiten der Zerspanwerkzeuge sowie die maximalen Vorschubgeschwindigkeiten gering und daher Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [HHS07, HCH⁺07]. Typische Vorschubgeschwindigkeiten beim Fräsen von CFK betragen heute weniger als 2,0 m/min [HCH⁺07, KWGW85].

b.) Konturbear beitung mit geometrisch unbestimmter Schneide durch Wasserstrahlschneiden

Von den nach DIN 8580 [DIN03a] der Gruppe 3.3 des Spanens mit geometrsich unbestimmter Schneide zugeordneten Verfahren ist zurzeit lediglich das Strahlspanen mit dem Wasserstrahl für FVK industriell relevant [Mür90, Moe07]. Seit der Entwicklung des Wasserstrahlschneidens (WSS) mit Abrasivmitteln im Jahr 1969 wird dieses Verfahren seit den 1980er Jahren industriell eingesetzt [HJ93, Moe07, Pön85]. Von diesem Zeitpunkt an hat insbesondere das Wasserstrahlschneiden mit Abrasivmitteln, wie z. B. Granat oder Korund [Kna08], seine Eignung zur trennenden Bearbeitung von mehrkomponentigen FVK in verschiedenen Untersuchungen sowie industriellen Anwendungen demonstriert [Rad03, Sch94]. Das physikalische Prinzip dieses Konturbearbeitungsverfahrens besteht darin, einem Wirkmedium eine hohe potenzielle Energie (Hochdruckenergie) zu verleihen und diese in einem Abstand von ca. 10

bis 20 mm über dem Werkstück in kinetische Energie umzuwandeln [Sch94]. Durch den Impulsaustausch des Wirkmediums mit der Werkstückoberfläche wird lokal die Festigkeit des Werkstückes überschritten und ein abrasiver Abtrag von Werkstoffpartikeln bewirkt. Typische Prozessgasdrücke betragen zurzeit 4.000 bis 6.000 bar [Kna08, Küb07a, Sau08].

Die minimale Schnittspaltbreite beträgt beim WSS mit Abrasivmitteln ca. 1,5 mm, während bei der Konturbearbeitung Toleranzen von weniger als 0,1 mm realisiert wurden. Vorteile dieses Verfahrens zur Konturbearbeitung von FVK sind zum einen die geringe mechanische Beanspruchung und zum anderen die nicht vorhandene thermische Belastung des Werkstückes. Hohe trennbare Werkstückdicken sowie weitgehend emissionsfreie Bearbeitung und geringer Werkzeugverschleiß sind weitere Vorteile dieses Verfahrens [Kna08, Küb07a].

Von Nachteil sind die Konizität der Schnittspalte sowie Riefenbildung, Mikrobrüche und Delamination auf der Schnittfläche [Kna08, Küb07a]. Die Bearbeitung von dreidimensionalen Bauteilen ist zurzeit nur eingeschränkt möglich. Niedrige Vorschubgeschwindigkeiten von im Allgemeinen weniger als 1,5 m/min führen zu einer geringen Produktivität dieses Verfahrens [Rad03, Sau08].

c.) Konturbearbeitung mit Laserstrahlung

Die Lasermaterialbearbeitung von FVK wurde bereits zum Ende der 1980er und zu Anfang der 1990er Jahre analysiert. Typischerweise wurde dabei das Laserstrahltrennen von

- aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK),
- glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und
- kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

untersucht.

Das Laserstrahltrennen von AFK wurde in einer Reihe von Untersuchungen analysiert [Büt91, CM01, Lie98, Tra92, TC87]. Dabei wurden im Wesentlichen Excimerund CO₂-Laserstrahlquellen verwendet. Wie in Tabelle 2.3 dargestellt, wurden dabei Laminatdicken von 1,0 bis größer 5,0 mm betrachtet. Als Matrixwerstoff wurde typischwerweise EP-Harz verwendet.

Dabei wurden Vorschubgeschwindigkeiten von weniger als 200 mm/min bei Excimerlaserstrahlquellen [Büt91] bzw. 4,0 bis 15,0 m/min bei der Verwendung von CO_2 -Laserstrahlquellen realisiert. Die thermische Beeinflussung im Bereich der Schnittkante wies eine Ausdehnung von 0,1 bis 0,4 mm auf [Büt91, Tra92, TD89]. Diese hohe Qualität der Schnittkante wurde durch eine geringe Differenz der Zersetzungstempera-

Laminat-	Faser	Matrix-	Laser-	max. Laser-	max. Vorschub	Quelle
dicke	werkstoff	werkstoff	quelle	leistung $[kW]$	[m/min]	
${\leq}1{,}0~{\rm mm}$	Aramid	EP	Excimer	$\leq 0,30$	$\leq 0,2$	[Büt91]
	Aramid	EP	CO_2	0,50	5,0	[Büt91]
${\leq}2{,}0~\mathrm{mm}$	Aramid	PP	$\rm CO_2$	1,50	15,0	[Lie98]
${\leq}3{,}5~\mathrm{mm}$	Aramid	EP	$\rm CO_2$	0,50	5,0	[Tra92]
	Aramid	PP	$\rm CO_2$	1,50	15,0	[Lie98]
\leq 5,0 mm	Aramid	PP	CO_2	1,50	13,0	[Lie98]
	Aramid	EP	$\rm CO_2$	0,50	5,0	[Tra92]
$\geq\!5{,}0~\mathrm{mm}$	Aramid	EP	$\rm CO_2$	1,00	4,5	[Tra92]

 Tabelle 2.3:
 Untersuchungen zum Laserstrahltrennen von AFK

turen der verwendeten Matrix
systeme (z. B. $T_{Epoxid}=250~^\circ\rm C)$ und der Aramidfaser
n $(T_{Aramid}=550~^\circ\rm C)$) erklärt.

Das Laserstrahltrennen von GFK wurde seit Ende der 1980er Jahre in verschiedenen Untersuchungen analysiert [Büt91, Emm90, Hoh92, Lie98, Tra92, Mül91]. Dabei wurden sowohl Excimer- als auch CO_2 -Laserstrahlquellen verwendet. Gegenstand dieser Untersuchungen waren FVK-Laminate mit einer Stärke von 2,0 bis über 5,0 mm, siehe Tabelle 2.4.

Laminat-	Faser	Matrix-	Laser-	max. Laser-	max. Vorschub	Quelle
dicke	werkstoff	werkstoff	quelle	leistung [kW]	[m/min]	
\leq 2,0 mm	Glas	PP	CO_2	1,50	9,0	[Emm90
						Lie98]
	Glas	EP	Excimer	$\leq 0,30$	$\leq 0,2$	[Hoh92]
${\leq}3{,}5~\mathrm{mm}$	Glas	EP	$\rm CO_2$	1,25	6,0	[Hoh92,
						Tra92]
	Glas	PP	$\rm CO_2$	1,50	8,0	[Lie98]
\leq 5,0 mm	Glas	PP	CO_2	1,50	5,0	[Lie98]
	Glas	EP	$\rm CO_2$	$1,\!25$	$1,\!8$	[Hoh92,
						Tra92]
	Glas	PUR	$\rm CO_2$	$1,\!00$	10,0	[Mül91]
${>}5{,}0~\mathrm{mm}$	Glas	EP	$\rm CO_2$	$0,\!50$	1,0	[Hoh92]

 Tabelle 2.4:
 Untersuchungen zum Laserstrahltrennen von GFK

Seit Anfang der 1990er Jahre wurde das Laserstrahltrennen von CFK in verschiedenen Untersuchungen analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass das Trennen von CFK mittels Laserstrahlung, insbesondere bei Verwendung von Excimerlasern, möglich ist. Die zu diesem Zeitpunkt verfügbaren CO_2 -Laserstrahlquellen und die mit diesen erzielten Vorschubgeschwindigkeiten ermöglichten keinen Trennprozess mit hoher Qualität [Hoh92, Kri94, Tra92].

Laminat-	Faser	Matrix-	Laser-	max. Laser-	max. Vorschub	Quelle
dicke	werkstoff	werkstoff	quelle	leistung $[kW]$	[m/min]	
\leq 2,0 mm	Kohlen -stoff	EP	Excimer	$\leq 0,30$	$\leq 0,2$	[Hoh92]
	Kohlen	EP	CO_2	1,00	2,5	[BLK ⁺ 09, Tra92]
	-stoff Kohlen -stoff	EP	Yb-Faser	0,30	0,6	[FNCS09]
\leq 3,5 mm	Kohlen -stoff	EP	Nd:YAG	4,40	1,5	[GVA+04]
\leq 5,0 mm	Kohlen -stoff	EP	Excimer	$\leq 0,30$	$\leq 0,2$	[Hes95]

 Tabelle 2.5:
 Untersuchungen zum Laserstrahltrennen von CFK

Mit Excimerlasern konnten Schnittkanten hoher Qualität erzeugt werden, die Produktivität dieser Versuche lag mit Schnittgeschwindigkeiten im Bereich weniger mm/min allerdings auf einem niedrigen Niveau. Die Ausdehnung der thermisch beeinflussten Zone betrug zwischen 0,1 und 0,4 mm bei Excimerlasern und im Bereich von 1,5 bis 2,5 mm bei CO_2 -Lasern. In Tabelle 2.5 sind beispielhaft einige Versuchsparameter dargestellt.

Die Ergebnisse der zum Stand der Kenntnisse gehörenden experimentellen Untersuchungen sind im Wesentlichen zwischen 5 und 15 Jahre alt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden, wie in den o. g. Tabellen dargestellt, nahezu ausschließlich CO₂- oder Nd:YAG-Laserstrahlquellen verwendet. Die zum Zeitpunkt der o. g. Untersuchungen verfügbaren Laserstrahlquellen wiesen, verglichen mit den heute verfügbaren Laserstrahlquellen, nur niedrige Strahlqualitäten und niedrige Intensitäten auf. Daher wurden nur Schnittflächen geringer Qualität realisiert, wobei hinsichtlich der Produktivität bereits das Potenzial dieser Laserfertigungsprozesse aufgezeigt werden konnte. Darüber hinaus ist die Verwendung gepulster Nd:YAG- und Excimer-Laserstrahlquellen in großem Umfang untersucht worden. Dabei wurden insbesondere mit Excimer-Laserstahlquellen Schnittflächen hoher Qualität realisiert. Vom Nachteil war hierbei die geringe Vorschubgeschwindigkeit von weniger als 0,2 m/min, die zu einer sehr geringen Produktivität dieser Fertigungsprozesse führte. Außerdem war die Wirtschaftlichkeit dieser Prozesse nicht gewährleistet, da die Investitionskosten für die verwendeten Laserstrahlquellen sehr hoch waren.

Daher gehört es zum Stand der Kenntnisse, dass das Laserstrahltrennen nicht zur Bearbeitung von FVK geeignet ist, da nur entweder eine hohe Qualität der Schnittfläche oder eine hohe Wirtschaftlichkeit gewährleistet werden konnte. Im Rahmen der o. g. experimentellen Untersuchungen sind Festkörperlaserstrahlquellen mit hoher Brillanz, z. B. Yb:YAG-Scheibenlaserstrahlquellen, nahezu nicht betrachtet worden. Die Ver-

wendung von Hochleistungs-Faserlaserstrahlquellen mit kontinuierlicher Laserlichtauskopplung, dem sog. continuous-wave (cw)-Betrieb, wurde nahezu noch gar nicht untersucht, obwohl diese heute bereits in großem Umfang zur Bearbeitung metallischer Werkstoffe zur Anwendung kommen. Diese Laserstrahlquellen bieten ein großes Potenzial hinsichtlich einer hohen Produktivität des Bearbeitungsprozesses bei einer gleichzeitig hohen Qualität der Bearbeitung, da diese mit hohen Laserstrahlleistungen bei gleichzeitig hohen Strahlqualitäten verfügbar sind [EG08, EG09, FNCS09, KTB⁺09, Ric09, Rüt09, ROF09b]. Die im Vergleich zu Festkörperlasern geringen Investitionskosten sowie hohe Wirkungsgrade von mehr als 25~% bieten das Potenzial zu einer hohen Wirtschaftlichkeit bei der Lasermaterialbearbeitung von FVK. Damit besteht für die Industrieunternehmen ein bedeutendes Interesse an der Analyse der Anwendbarkeit von Laserfertigungsverfahren zur Bearbeitung von FVK, insbesondere die Anwendung der Hochleistungs-Faserlaser ist bisher nahezu nicht betrachtet worden. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Trennen von FVK mit Hochleistungs-Faserlasern analysiert. Es wird geprüft, ob die Bearbeitung von FVK mit hoher Qualität der Schnittfläche realisiert werden kann. Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen werden in Kapitel 5 dargestellt.

d.) Vergleich und Herausforderungen von Fertigungsverfahren zur Konturbearbeitung von FVK

In Abbildung 2.9 sind verfahrensspezifische Vor- und Nachteile der vorgestellten Fertigungsverfahren zur Konturbearbeitung zusammengefaßt dargestellt.

Vorteile der Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide durch Bohren oder Fräsen sind die hohe Bearbeitungsqualität sowie das hohe Zeitspanvolumen. Vom Nachteil sind der hohe Werkzeugverschleiß und der daher notwendige Werkzeugwechsel. Die auftretenden Zerspankräfte führen zu einer reduzierten Bearbeitungsqualität.



Abbildung 2.9: Vergleich der verfahrensspezifischen Vor- und Nachteile

Durch Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, wie z. B. dem Wasserstrahlschneiden, können große Laminatdicken mit hoher Bearbeitungsqualität bearbeitet werden. Gleichzeitig tritt nahezu kein Werkzeugverschleiß auf. Das Wasserstrahlschneiden erlaubt nur eine eingeschränkte 3D-Bearbeitung und damit eine geringe Geometrieflexibilität. Darüber hinaus ist die Geräuschentwicklung sehr hoch, sodass das Bedienpersonal geeignete Schutzausrüstung verwenden muss.

Wie dargestellt, wurden bereits zahlreiche Untersuchungen zum Laserstrahltrennen durchgeführt. Von Vorteil sind die hohe Geometrieflexibilität sowie der nahezu nicht auftretende Werkzeugverschleiß. Bei der Bearbeitung treten keine mechanischen Bearbeitungskräfte auf. Im Rahmen dieser Untersuchungen zeigte sich jedoch eine große thermische Werkstoffbeeinflussung im Bereich der Trennkante, die zu Delamination und freistehenden Faserenden führt. Darüber hinaus treten bei der Lasermaterialbearbeitung von FVK hohe, krebserregende (kanzerogene) Prozessemissionen auf [Tra92].

Der Stand der Kenntnisse zum Laserstrahltrennen von FVK mit Dicken über 2,0 mm ist im Wesentlichen älter als 10 Jahre [Hoh87, Hoh92, Lie98, TC87, Tra92]. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Trennergebnisse hoher Qualität nur bei Verwendung von CO_2 -Laserstrahlquellen realisiert. Neuere Untersuchungen zur lasergestützten Konturbearbeitung verwenden typischerweise ebenfalls CO_2 -Laser [BLK⁺09, HJMH08, FNCS09, RQL⁺09] zum Trennen von FVK mit Dicken größer als 3,0 mm.

Die Verwendung von Festkörperlasern, z. B. Nd:YAG- oder Yb:YAG-Lasern, wurde in jüngster Zeit untersucht [HJMH08], die Schnittergebnisse waren jedoch von geringerer Qualität im Vergleich zur Bearbeitung mit CO_2 -Laserstrahlquellen. Der Einsatz von Yb-dotierten Faserlasern als Laserstrahlquelle zum Trennen von FVK ist ebenfalls Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [BLK⁺09, FNCS09]. Dabei wurden nur bei FVK-Laminaten mit Dicken kleiner als 1,0 mm Schnittflächen hoher Qualität erzielt. Durch die Verwendung gepulster Faserlaser konnten bei Laminaten mit einer Dicke von ca. 0,3 mm im Vergleich zum CO_2 -Laserstrahlquellen identische Schnittflächen-qualitäten realisiert werden.

Zurzeit werden insbesondere Faserlaserstrahlquellen in immer größerem Umfang eingesetzt, z. B. zur Laserstrahltrennbearbeitung in 2D- oder 3D-Schneidanlagen [HG08, Jac08]. Es besteht dabei seitens der Anwender, sowohl in der wissenschaftlichen als auch industriellen Anwendung, ein großer Bedarf nach Untersuchungen zum Einsatz der Faserlaserstrahlquellen zum Laserstrahltrennen, z. B. von metallischen Werkstoffen oder FVK. Da die Bearbeitung von 3D-Bauteilen aus FVK mit CO₂-Laserstrahlquellen eine aufwändige Strahlführung erfordert, bieten für diesen Anwendungsfall Festkörperund Faserlaserstrahlquellen ein hohes Anwendungspotential.

Heute sind vollautomatisierte Fertigungsprozesse zur Konturbearbeitung nahezu ausschließlich für 2D-Bauteilgeometrien und Bearbeitungskonturen realisiert. Dabei werden typischerweise Laminatdicken über 2,0 mm bearbeitet. Die automatisierte Bearbeitung rohrförmiger oder hohler Bauteile gehört heute nicht zum Stand der Technik.

3D-Bauteile mit Laminatdicken kleiner als 2,0 mm werden heute im Allgemeinen manuell bearbeitet, die automatisierte Bearbeitung durch Fräsen oder Wasserstrahlschneiden ist nahezu nicht möglich. Für die o. g. Anwendungsfälle bietet das Laserstrahltrennen mit Festkörper- und Faserlaserstrahlquellen großes Anwendungspotenzial, gehört heute jedoch nicht zum Stand der Technik. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit die 3D-Konturbearbeitung dünnwandiger, rohrförmiger FVK-Bauteile am Beispiel eines geeigneten Demonstrators, siehe Abbildung 6.5, analysiert werden.

2.3 Prozessbeschreibung des Laserstrahltrennens

2.3.1 Grundlagen der Laserstrahlerzeugung und Fokussierung

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Laserstrahlerzeugung am Beispiel des Festkörperlasers erläutert. Darüber hinaus werden wesentliche Kenngrößen der Laserstrahlung und Fokussierung dargestellt. Den industriell relevanten Laserstrahlquellen liegt im Wesentlichen das in Abbildung 2.10 dargestellte Prinzip zugrunde. Ein laseraktives Medium wird energetisch, z. B. durch Licht, angeregt. Dabei gehen die Elektronen des laseraktiven Mediums in einen höheren Energiezustand über, der

als Pumpniveau bezeichnet wird. Unter Abstrahlung von Energie "fallen" diese nach einer kurzen Verweildauer auf das Laserausgangsniveau zurück, wo sie etwa 1 ms verbleiben, bevor sie unter Freisetzung von Photonenstrahlung (Licht) zunächst auf das Laserendniveau und danach unter Abstrahlung von Energie auf den Grundzustand zurück fallen. Aufgrund der vergleichsweise langen Verweildauer im Laserausgangsniveau wird dieses auch als metastabil bezeichnet. Um die Photonenstrahlung zu verstärken, werden die Photoemissionen durch Lichtanregung gleicher bzw. nahezu gleicher Wellenlänge in einem Resonator stimuliert. Dieser wird im Wesentlichen durch zwei Spiegel begrenzt, deren Abstand zueinander einem Vielfachen der Wellenlänge des jeweiligen Laserlichts entspricht, sodass sich eine stehende Welle zwischen den beiden Resonatorspiegeln ausbildet. Der Endspiegel reflektiert das Licht vollständig (R = 100 %), während der Austrittsspiegel einen Teil der Laserstrahlung transmittiert (R < 100%). Diese erzeugte Laserstrahlung wird anschließend über optische Bauelemente, z. B. Umlenkspiegel oder Lichtleitfasern, zur Bearbeitungsoptik geleitet. Mittels der Bearbeitungsoptik wird die Laserstrahlung auf dem zu bearbeitenden Werkstoff fokussiert und dort absorbiert.



Abbildung 2.10: Erzeugung von Laserstrahlung beim Festkörperlaser im Resonator [EL02]

Das bei der Laserstrahlerzeugung entstehende Laserlicht ist

- kohärent, d. h. die elektromagnetischen Wellen schwingen in einer Phase,
- monochromnatisch, d. h. einfarbig mit einer identischen Wellenlänge, und
- von geringer Divergenz, d. h. nahezu parallel.

Dabei bestimmen Art und Aufbau des laseraktven Mediums, der Anregung sowie des Resonators über die Wellenlänge, Leistung, das zeitliche Betriebsverhalten, die Strahlpropagation (Strahlausbreitung) und die Strahlqualität.



Abbildung 2.11: Charakterisierung der Ausbreitung eines rotationssymmetrischen Laserstrahls [EL02]

Für kleine Divergenzwinkel lässt sich die Strahlausbreitung gemäß Abbildung 2.11 mit dem mathematischen Zusammenhang

$$w^{2}(z) = w_{0}^{2} + (z - z_{0})^{2} \cdot \Theta_{0}^{2}$$
(2.1)

beschreiben, mit dem Radius der Strahltaillie w_0 , der Lage der Strahltailie z_0 sowie dem Divergenzwinkel im Fernfeld Θ_0 . Die Strahlqualität wird insbesondere bei Festkörperlasern durch das Strahlparameterprodukt $w_0\Theta_0 \approx 0,1$ bis 1.000 mm · mrad charakterisiert, das bei der Verwendung von idealen optischen Elementen als konstant angenommen wird, siehe Abbildung 2.12.



Abbildung 2.12: Konstanz des Strahlparameterproduktes [EL02]

Zu Charakterisierung der Strahlqualität von Gaslasern, z. B. CO_2 -Lasern, wird im Allgemeinen im deutschen Sprachraum die so genannte Strahlkennzahl K bzw. im englischen Sprachraum der sog. Modenfaktor M^2 verwendet. Der mathematische Zusammenhang zwischen dem Strahlparameterprodukt, der Strahlkennzahl und dem Modenfaktor wird durch

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{w_0 \Theta_0} \le 1,0$$
(2.2)

beschrieben [DIN05, EL02]. Um die für die Materialbearbeitung erforderliche Intensität zu erzielen, wird die Laserstrahlung auf einen Fokusdurchmesser von typischerweise 50 bis 200 μ m fokussiert. Bei der Bearbeitung wird typischerweise die Positionierung des Laserstrahls innerhalb der sog. Rayleigh-Länge z_R angestrebt, siehe Abbildung 2.13. Diese ist definiert als Abstand zwischen dem minimalen Fokusdurchmesser und der Position entlang der z-Achse, an dem sich die Fokusfläche infolge der Divergenz verdoppelt hat. Trägt man die Rayleigh-Länge beiderseits der Brennebene ab, so ergibt sich der Bereich der sog. Schärfentiefe, siehe Abbildung 2.13.



Abbildung 2.13: Definition der Rayleighlänge und Schärfentiefe [EL02]



Abbildung 2.14: Schematische Darstellung des Laserstrahltrennprozesses [EL02]

2.3.2 Einteilung des Laserstrahltrennens in die Gruppe der Fertigungsverfahren

Nach DIN 8580 [DIN03a] gehört das Laserstrahltrennen zur Gruppe 3.4.1 *Thermisches Abtragen*, welche in DIN 8580 weiter untergliedert wird in *Thermisches Abtragen durch Strahl*, siehe Abbildung 2.8. Beim Laserstrahltrennen wird Energie durch einen auf einen Punkt fokussierten Strahl kohärenten Lichts an der zu trennenden Stelle in das Bauteil eingekoppelt, wodurch die physikalische Struktur des Werkstoffs lokal aufgebrochen wird.

Dabei werden beim Laserstrahltrennen die drei Verfahrensvarianten

- Laserstrahlbrennschneiden,
- Laserstrahlschmelzschneiden und
- Laserstrahlsublimierschneiden

unterschieden [Emm92, EL02, HL93, Pop05, Pow98].

Beim Laserstrahlschmelzschneiden wird der Werkstoff durch die eingekoppelte Energie des Laserstrahls aufgeschmolzen. An der Stelle, an der der Fokus positioniert wird, hat der Laserstrahl die höchste Intensität. Die entstehende Schmelze wird typischerweise mit einem koaxialen Schneidgasstrahl nach unten aus der Schnittfuge geblasen, siehe Abbildung 2.14. Die Schmelze strömt nahezu parallel zum Schneidgasstrom und zum Laserstrahl auf einer Schneidfront. Als Schneid- bzw. Prozessgas werden typischerweise inerte oder reaktionsträge Gase verwendet, die unter anderem zur Vermeidung von Oxidation im Bereich der Schneidkante dienen. Als Prozess- bzw. Schneidgase wer-

den z. B. Argon oder Helium, als reaktionsträge Gase Stickstoff und als so genannte reaktionsvermindernde Druckluft- oder Sauerstoff-Inertgas-Gemische verwendet.

Beim Laserstrahlbrennschneiden wird der Fokus typischerweise auf die Werkstückoberfläche eingestellt. Als aktives Prozess- bzw. Schneidgas wird Sauerstoff anstelle eines inerten Gases verwendet. Der Sauerstoff dient dabei sowohl dem Austrieb der Schmelze aus dem Bereich der Schnittfuge als auch zur Erzeugung einer zusätzlichen Oxidationsreaktion. Duch diese exotherme Oxidationsreaktion wird zusätzlich Energie für den Laserstrahltrennprozess zur Verfügung gestellt. Im Vergleich zum Sublimierschneiden wird nur etwa ein zwanzigstel der Laserstrahlenergie benötigt, allerdings kommt es zu einer Oxidation der Schnittkante [DG94, HL93, Kap02, Tra92].

Beim Laserstrahlsublimierschneiden wird der Werkstoff durch die Laserstrahleinwirkung direkt in den dampfförmigen Zustand sublimiert und anschließend durch den Prozess- bzw. Schneidgasstrahl aus der Schnittfuge geblasen. Dieses Laserstrahltrennverfahren wird im Allgemeinen bei Werkstoffen ohne signifikante schmelzflüssige Phase sowie mit geringer Verdampfungs- bzw. Zersetzungstemperatur angewandt. Da nahezu keine Schmelze entsteht, hat die Schnittkante typischerweise eine hohe Qualität. Im Vergleich zum Laserstrahlschmelzschneiden und -brennschneiden weist das Laserstrahlsublimierschneiden einen niedrigen Prozesswirkungsgrad auf, da hohe Laserstrahlleistungen verwendet werden müssen. Zum Laserstrahlsublimationsschneiden geeignete Werkstoffe sind z. B. Papier und Holz [Bar04, HL93, Tra92], duroplastische Kunststoffe [Kle90, Tra92] und Keramik [EG89, Emm92].

Da sowohl die Verstärkungsfasern als auch die verwendeten Matrixwerkstoffe keine ausgeprägte schmelzflüssige Phase aufweisen, ist es zulässig, den Zersetzungsprozess beim Laserstrahltrennen als ausschließlichen Laserstrahlsublimationsprozess zu betrachten [Bey93, ET91, EG08, Tra92]. Ein Prozessgasstrahl treibt dabei auftretende Prozessemissionen aus dem Bereich der Schnittfuge aus und dient darüber hinaus der Kühlung der Schnittkante [Pow98, Tra92]. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der Laserstrahltrennprozess als idealer Sublimationsprozess betrachtet, in dem ausschließlich der feste und der gasförmige Aggregatzustand betrachtet werden.
2.3.3 Anlagensystemtechnik beim Laserstrahltrennen

In Abbildung 2.15 ist der prinzipielle Aufbau einer Laserstrahltrennanlage mit den wesentlichen Baugruppen dargestellt. Diese Laser-Werkzeugmaschinen sind heute Stand der Technik und werden in großen Stückzahlen in der Industrie eingesetzt [OPT09].



Abbildung 2.15: Typischer Aufbau einer Laserstrahltrennanlage zur Bearbeitung von 2D - Halbzeugen

Die Anlagensystemtechnik zum Laserstrahltrennen wird in die vier Teil-Systeme

- Laserstrahlerzeugung,
- Laserstrahlführung,
- Laserstrahl- und Prozessformung sowie
- Laserstrahlbewegung

unterteilt.

Zur Laserstrahlerzeugung werden für industrielle Laserstrahltrennanwendungen überwiegend CO₂-, Nd:YAG- und Yb:YAG-Laser verwendet [Emm95, Hom95, KB07b]. In wenigen Anwendungen werden Excimerlaser verwendet, die jedoch typischerweise nur geringe Vorschubgeschwindigkeiten ermöglichen und daher nur eine geringe industrielle Verbreitung gefunden haben [MKKW01]. Seit einigen Jahren werden auch Yb-Faserlaser im Niedrig- und Hochleistungsbereich für Laserstrahltrennanwendungen eingesetzt [HG08, Kes07]. In der Tabelle 2.6 sind typische Kennwerte verschiedener Laserstrahlquellen für industrielle Anwendungen dargestellt.

Je nach verwendeter Laserstrahlquelle werden zur *Laserstrahlführung* entweder Spiegelsysteme mit Teleskoprohren bei CO₂-Lasern oder Lichtleitfasern bei Festkörperlasern verwendet. Da die Wellenlänge von $\lambda = 10.6 \ \mu m$ von CO₂-Lasern nicht über Lichtleitfasern geführt werden kann, müssen hierbei Spiegelsysteme verwendet werden. Vor-

2 Stand der Kenntnisse

	CO_2	Yb:YAG	Nd:YAG	Excimer	Yb-Faser
Wellenlänge (μm)	10,6	1,03	1,06	$0,\!19$	1,07
max. Leistung (kW)	20	12	4,4	$0,\!3$	≥ 20
Strahlqualität	4	8	25	—	4,5
$(mm \cdot mrad)$					
Wirkungsgrad (%)	≥ 10	≥ 20	≥ 2 - 10	≥ 1	≥ 30

Tabelle 2.6: Typische Kennwerte verschiedener Laserstrahlquellen [Buc06, EL02, HB09, KTB⁺09, MKKW01, OPT09, Rat09, ROF09a, Rüt09, TRU09]

teile der Lichtleitfaser gegenüber der Spiegelführung sind die wesentlich höhere Flexibilität sowie die niedrigeren Investitions- und Instandhaltungskosten [Eic06, MKKW01].

Zur Laserstrahl- und Prozessformung werden in Laserstrahltrennanwendungen sowohl konventionelle Laserstrahloptiken als auch Scanner-basierende Systeme verwendet. Der Großteil der hergestellten Laseranlagen verwendet konventionelle Optiken, bei denen die Optik zur Positionierung des Fokus bewegt wird. Je nach Aufbau der Anlage wird dabei die "fliegende" und die "halb-fliegende" Optik unterschieden, weiteres dazu kann der relevanten Literatur entnommen werden [Eico6, EL02, Kap02]. Seit kurzer Zeit werden in einigen Anwendungen Scanner-basierende Optiken zur Laserstrahlformung und Fokuspositionierung verwendet [Jac08, KTB⁺09]. Bei diesen Systemen wird der Fokus nur durch Bewegung einer Spiegeloptik auf dem Werkstück positioniert, während der Arbeitskopf ruht. Weiteres dazu ist in der entsprechenden Fachliteratur dargestellt [Eic06, EK08, Emm04, KTB⁺09].

Als Handhabungsgeräte zur *Laserstrahlbewegung* werden typischerweise Werkzeugmaschinen mit Linar- oder Kugelrollspindelantrieben sowie 6-Achs-Industrie-Roboter verwendet. Für 2D-Laserstrahltrennanwendungen werden insbesondere Lasermaschinen mit Linearantrieben oder Kugelrollspindeln verwendet, während für 3D-Anwendungen zunehmend 6-Achs-Industrie-Roboter an Bedeutung gewinnen [EK08, Kes07, Sei92].

2.3.4 Zersetzungsprozess beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

Trifft der fokussierte Laserstrahl auf das Werkstück, wird dieser teilweise reflektiert, transmittiert und absorbiert, wobei die Absorption je nach Wellenlänge und Werkstoff in einer unterschiedlichen Art und Tiefe erfolgen kann, siehe Abbildung 2.16. Bei ausreichend hoher Strahlintensität wird der Werkstoff zersetzt und durch das Schneidgas aus der Wirkzone getrieben. Findet eine Relativbewegung zwischen dem Schneidkopf und Werkstück statt, entsteht eine Schnittfuge. Im Folgenden wird daher zunächst auf die verschiedenen Absorptionsarten eingegangen, deren Kenntnis grundlegend für das Verständnis des Laserstrahltrennprozesses ist.



Abbildung 2.16: Prinzip der Einkopplung von Laserstrahlung in einen technischen Werkstoff (nach [Pet06])

Die Wellenlängen der zur Materialbearbeitung verwendeten Strahlquellen reichen vom UV-Bereich (beim Excimer-Laser) bis zum mittleren IR-Bereich (CO_2 -Laser). In diesem Spektrum treten bei polymeren Werkstoffen zwei Absorptionsmechanismen auf, welche durch eine elektronische Anregung sowie eine Vibrationsanregung gekennzeichnet sind [Kle90].

Bei der *elektronischen Anrequng* werden die Elektronen durch die elektromagnetische Strahlung aus dem Grundzustand in einen energetisch höheren Zustand versetzt. Jeder Elektronenzustand besitzt dabei eine eigene Potentialkurve der Bindungsenergie, wie in Abbildung 2.17 prinzipiell dargestellt ist. Ist die Photonenenergie der Strahlung größer als die Bindungsenergie der Moleküle, wird durch die Anregung die Dissoziationsenergie überschritten und das Molekül zerfällt, siehe Abbildung 2.17 Pfeil 1 [Hes95]. Dabei ist die Dissoziationsenergie die maximale Energie, die zwischen zwei Atomen eines Moleküls vorliegen kann. Wird dem Molekül diese Energie zugeführt, bricht die entsprechende Bindung. Dieser Prozess wird als photochemische Ablation bezeichnet und ist mit keiner nennenswerten Erwärmung des Materials verbunden [Emm90]. Ist die Photonenenergie geringer als die Bindungsenergie der Moleküle, wird ein angeregter Zustand unterhalb der Dissoziationsenergie eingestellt, siehe Abbildung 2.17 Pfeil 2. Einige dieser angeregten Moleküle gehen unter Abgabe der Anregungsenergie an die Umgebung (in Form von thermischer Schwingungsenergie) in den Grundzustand über. Die resultierende Temperaturerhöhung kann wiederum andere angeregte Moleküle über die Dissoziationsenergie anheben und damit die Bindungen auflösen, siehe Abbildung 2.17 Pfeil 3. Dieser Prozess wird *photothermische Ablation* genannt [Hes95].

Bei der *Vibrationsanregung* führen die atomaren Verbindungen der Moleküle Schwingungen aus, die sich aufgrund von Kopplungen zu Schwingungen ganzer Kettensegmente vereinigen. Diese Schwingungen sind durch eine Grundschwingung (Abbildung



Abbildung 2.17: Prinzipielle Potentialkurven zweiatomiger Verbindungen [Kle90]

2.17, v = 0) und mehreren Oberschwingungen gekennzeichnet, deren Frequenzen u.a. abhängig von der Anzahl der Kettenmoleküle sind [Kle90]. Da in polymeren Werkstoffen unterschiedlich lange Ketten vorliegen, ergeben sich Frequenzbereiche einzelner Schwingungszustände. Liegt die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung im Bereich der Differenzenergie zweier Schwingungszustände, kann die Strahlung absorbiert und in thermische Schwingungsenergie (d. h. Wärme) umgewandelt werden. Ein Übergang vom Grundzustand in den ersten Schwingungszustand (v = 1, sogenannte Grundschwingungsbande), siehe Abbildung 2.17 Pfeil 4, ist dabei wahrscheinlicher als ein Übergang in ein höheres Schwingungsniveau ($v \ge 1$, Oberschwingungsbanden). Je höher die Oberschwingung liegt, desto geringer ist die absorbierte Strahlungsintensität, siehe Abbildung 2.17 [BM93, Kle90].

Die gepulste, kurzwellige Strahlung des Excimer-Lasers wird sowohl von der polymeren Matrix als auch von den Fasern durch elektronische Anregung absorbiert [Hes95]. Dies ist mit einem geringen Wärmeeintrag in den Werkstoff verbunden, sodass sich qualitativ hochwertige Schnittflächen ergeben [Emm90]. Diese zeichnen sich durch eine scharfkantige Strahleintrittsseite und -austrittsseite, eine glatte Schnittfläche, geringe Riefentiefe und eine geringe, optisch nicht sichtbare, thermische Beeinflussung aus [Hes95, Tra92]. Weiter wird die Schnittqualität durch die kurze Einwirkzeit der Laserstrahlung hoher Energiedichte begünstigt. Aufgrund der niedrigen mittleren Strahlleistung des Excimerlasers lassen sich allerdings nur geringe Vorschubgeschwindigkeiten von wenigen mm/min erzielen, sodass ein wirtschaftlicher Einsatz auf die Mikrobearbeitung beschränkt ist [Tra92]. Die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers liegt im nahen infraroten Strahlungsbereich, der durch einen Übergang von elektronischer Anregung zur Vibrationsanregung gekennzeichnet ist, sodass beide Absorptionsmechanismen auftreten können [BM93, Kle90]. Allerdings wird nur ein geringer Anteil der Strahlung durch Vibrationsanregung absorbiert, da in diesem Wellenlängenbereich keine anregbaren Grundschwingungen bei Polymerwerkstoffen vorliegen. Es können lediglich kurzwellige Oberschwingungen angeregt werden, deren Intensität gering ist, siehe Abbdildung 2.17 [Kle90]. Für eine Absorption durch elektronische Anregung sind Bereiche mit ausgeprägter Bänderstruktur der Energieniveaus notwendig, welche bei polymeren Werkstoffen nur als Bereiche hoher Kristallinität statistisch verteilt vorliegen. Beides führt zu einer insgesamt geringen Absorption und einer hohen Eindringtiefe der Strahlung bis in den mm-Bereich [Kle90]. Die daraus resultierende Strahlungsabsorption im Werkstückinneren führt zu einer Werkstofferwärmung und -zersetzung, die durch keinen unmittelbaren Werkstoffaustrieb begleitet ist [BM93, Büt91, Emm90]. Die Folge ist eine hohe thermische Beeinflussung der Schnittkante sowie eine geringe Abtragsrate.

Die emittierte Strahlung des CO₂-Lasers kann von zahlreichen Bindungen der Polymerwerkstoffe (u.a. C-C, C=C, C-N₂, C-O) durch Vibrationsanregung absorbiert und in Wärme umgewandelt werden [Kri94, Mül91, Lie98]. Die Wellenlänge liegt dabei im Bereich der Grundschwingungsbande oder der ersten Oberschwingungsbanden, sodass die absorbierte Strahlungsintensität hoch ist. Durch die hohe Intensität im Fokus von $I \ge 10^6$ W/cm², in Kombination mit der geringen Wärmeleitfähigkeit der Polymerwerkstoffe findet ein schnelles Aufheizen des Werkstoffes in der Wirkzone bis zur Zersetzungstemperatur statt. Dadurch sind hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten mit dem CO₂-Laser möglich. Aufgrund des hohen Absorptionsvermögens liegt die Eindringtiefe der Strahlung unterhalb 100 μ m. Zwar wird im Vergleich zu Metallen, bei denen die Eindringtiefe im sub- μ m-Bereich liegt, häufig von Volumenabsorption [Kri94] gesprochen, diese ist aber gegenüber der Strahlung des Nd:YAG-Lasers als gering anzusehen, sodass Müller und Klein [Kle90, Mül91] diese als Oberflächenabsorption bezeichnen.

Aufgrund der unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften der Faser- und Matrixwerkstoffe kommt es neben dem eigentlichen Schneidprozess zu thermischen Schädigungen an der Schnittkante [Tra92]. Dabei haben die Zersetzungstemperaturen, Wärmeleitfähigkeiten und thermischen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Werkstoffe des Verbundes einen entscheidenden Einfluss [Lie98, Tra92]. Die Schädigungen treten innerhalb einer Wärmeeinflusszone (WEZ) zu beiden Seiten der Schnittkante auf und äußern sich in einer verkohlten Schnittfläche, Delamination, Rissbildung, Auskolkung sowie aus der Schnittfläche herausstehende Fasern. Diese beschriebenen Beeinflussungen des Werkstoffs im Bereich der Schnittfläche haben einen signifikanten Einfluss auf die Nutzungseigenschaften des Bauteils, siehe Kapitel 4.4, und werden daher im Rahmen dieser Arbeit detailiert betrachtet.

2.4 Analyse der Prozessfähigkeit von Laserfertigungsprozessen

Statistische Methoden zum Monitoring und zur Steuerung von Prozessen gehören in industriellen Fertigungsprozessen heute zum Stand der Technik. Dabei sind sog. "stabile Prozesse" die wesentliche Voraussetzung für eine betriebssichere und stetige Fertigung. Die Methoden der statistischen Prozesslenkung dienen dazu, den Ist- und Sollzustand eines Fertigungsprozesses mittels zuvor definierter statistischer Eintrittwahrscheinlichkeiten zu überwachen und gegebenenfalls zu korrigieren. Diese Art der statistischen Prozesslenkung wird als Statistical Process Controll (SPC) bezeichnet [Mas99, Pfe01]. Dabei wird die Prozessfähigkeit definiert als das Verhältnis zwischen der statistischen Verteilung eines messbaren Qualitätsmerkmals, z. B. der Rauheit der Schnittfläche, und der für dieses Merkmal vorgesehenen und zulässigen Toleranzen.



Abbildung 2.18: Beispiele für Normalverteilungen zur Ermittlung der Stabilität und Fähigkeit von Prozessen [Pfe01]

In Abbildung 2.18 sind beispielhaft stabile und nicht-stabile Prozesse dargestellt. Ein Beispiel für einen nicht-stabilen Prozess ist in Abbildung 2.18a dargestellt. Das Verhalten dieses Prozesses ändert sich über die Zeit und ist daher nicht-stabil. Im Gegensatz dazu zeigt der in Abbildung 2.18b dargestellte Prozess ein über die Zeit konstantes Verhalten auf und ist somit stabil. Für diesen Prozess werden die auftretenden Toleranzen mit der oberen und unteren Toleranzgrenze verglichen, diese Grenzen werden im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen festgelegt. Für diese Toleranzgrenzen werden typischerweise die englischen Bezeichnungen "upper and lower tolerance" verwendet. Sobald die Streuung geringer oder gleich der zulässigen Toleranzbreite ist, siehe Abbildung 2.18d, wird der Prozess als fähig bezeichnet, andernfalls als nicht-fähig, siehe Abbildung 2.18c [Mas99, Pfe01]. Die Beurteilung der Prozessfähigkeit erfolgt anhand der Kenngrößen \mathbf{c}_p und $\mathbf{c}_{pk}.$ Diese Kenngrößen werden gemäß Abbildung 2.19 sowie gemäß der Berechnungsvorschriften

$$c_p = \frac{Toleranz}{Prozessstreubreite} \quad und \tag{2.3}$$

$$c_{pk} = Min\left\{\frac{OSG - \hat{\mu}}{99,865\% - \hat{\mu}}; \frac{\hat{\mu} - USG}{\hat{\mu} - 0,135\%}\right\}$$
(2.4)

bestimmt [Pfe01]. Dabei wird die sog. Prozessleistung mit c_p und die Prozessfähigkeit mit c_{pk} sowie der Mittelwert mit $\hat{\mu}$ bezeichnet.



Abbildung 2.19: Definition der Prozessfähigkeit [Mas99]

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde als Streubreite die sog. Normalverteilung verwendet. Das bedeutet, dass die experimentell ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen innerhalb einer Streubreite von 99,73 % erzielt werden bzw. dass 99,73 % innerhalb des im Vorfeld der Untersuchungen festgelegten Toleranzfeldes liegen. Die so ermittelten Kennwerte werden mit den in Tabelle 2.7 dargestellten Kennwerten verglichen und so die Prozessfähigkeit bzw. -leistung ermittelt.

\mathbf{c}_p bzw. \mathbf{c}_{pk}	Ergebnis für Prozess
$\geq 1,33$	Prozess ist fähig
1 bis 1,33	Prozess ist nicht fähig, aber realisierbar
$\le 1,00$	Prozess ist nicht fähig bzw. nicht realisierbar

Tabelle 2.7: Kennzahlen zur Beurteilung der Prozessfähigkeit und -leistung [Mas99]

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung dieser Arbeit

3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die automatisierte Konturbearbeitung von 2D-Bauteilen aus FVK durch Fräsen oder Wasserstrahlschneiden gehört heute zum Stand der Technik. Die 3D-Bearbeitung komplexer Bauteilgeometrien ist mit den o. g. Fertigungsverfahren nur eingeschränkt möglich, siehe Kapitel 2.2.2. Für die 3D-Bearbeitung bietet das Laserstrahltrennen mit Festkörperlasern ein großes Anwendungspotential. In einer Reihe von Untersuchungen sind bereits Ergebnisse über die grundlegenden Zusammenhänge beim Laserstrahltrennen von FVK mittels CO₂-Laserstrahlquellen dargestellt worden, wie in Kapitel 2.2.2 zusammenfassend dargestellt [Lie98, MGRN98, Mül91, Tra92]. Bisher wurden mit Festkörper- und Faserlaserstrahlquellen keine Schnittflächen hoher Qualität realisiert. In der Literatur fehlt darüber hinaus eine allgemeingültige Methode zur Quantifizierung der Qualität beim Laserstrahltrennen von FVK.

Zur Reduktion der Anzahl der erforderlichen experimentellen Untersuchungen, die typischerweise im Rahmen der Planung lasergestützter Fertigungsprozesse erforderlich sind, werden in der Regel Simulations- und Planungstools verwendet. Die Fraunhofer Gesellschaft hat zur Simulation der Bearbeitung von metallischen Werkstoffen das Softwaretool CALCut entwickelt [Pet95, Pet09]. Darüber hinaus wurden verschiedene mathematische Prozessmodelle zur Berechnung des Einflusses von Prozessparametern auf die Qualität der Schnittfläche erstellt [BM09, PAMKV09, ZMSO09]. Für FVK fehlt bislang diese mathematische Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses.



Abbildung 3.1: Vorgehensweise in dieser Arbeit

Daher wird im Rahmen dieser Arbeit mit der Quantifizierung der Qualität, siehe Abbildung 3.1, und der Definition von Qualitätsgrößen beim Laserstrahltrennen begonnen. Ziel dabei ist, relevante Qualitätsgrößen, z. B. die WEZ, objektiv messen zu können. Im Anschluss daran werden geeignete Messmethoden hinsichtlich ihrer Eignung zur messtechnischen Erfassung der Ausdehnung der WEZ miteinander verglichen und eine geeignete Methode validiert. Darauf aufbauend wird der Einfluss von Technologieparametern, z. B. der Wellenlänge oder der Laserstrahlleistung, auf die Qualität der Schnittfläche analysiert. Eine allgemeine Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses von FVK wird aufbauend auf diesen Ergebnissen formuliert. Mit diesem Prozessmodell soll die Möglichkeit eröffnet werden, die Ausdehnung der WEZ beim Laserstrahltrennen eines beliebigen FVK auf einer gegebenen Anlagentechnik im Vorfeld der Bearbeitung bestimmen zu können. Die berechnete Ausdehnung der WEZ wird im Anschluss daran mittels experimenteller Untersuchungen validiert. Aufgrund der großen Vielfalt an industriell verfügbaren FVK wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich CFK betrachtet, siehe Kapitel 3.2. Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Betrachtung der industriellen Umsetzung der Konturbearbeitung von Bauteilen aus CFK mittels Laserstrahlung. Ein Bauteil aus dem Konsum- und Sportgerätebereich wurde aufgrund der Tatsache gewählt, dass Bauteile mit komplexer 3D-Kontur im Wesentlichen in diesem Bereich zur Anwendungen kommen, während im Maschinen- und Flugzeugbau typischerweise Bauteile mit geringer Geometriekomplexität, z. B. Platten oder Balken, verwendet werden. Anhand dieses Demonstrators, siehe Abbildung 6.5, wird die Wirtschaftlichkeit und Prozessfähigkeit der lasergestützten Konturbearbeitung analysiert.

Mittels der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensweise zur Quantifizierung der Qualität sowie zur Berechnung der Ausdehnung der WEZ besteht für industrielle und wissenschaftliche Anwender die Möglichkeit, die Qualität der Schnittfläche beim Laserstrahltrennen von FVK objektiv zu beurteilen und im Rahmen der Planung des Bearbeitungsprozesses im Rahmen der Modellgenauigkeit zu bestimmen.

3.2 Randbedingungen dieser Arbeit

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen sowie der Modellbildung werden die in Tabelle 3.1 dargestellten Werkstoffkennwerte für ein CFK-Laminat mit Epoxidmatrix verwendet. Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein CFK-Laminat bestehend aus einem C-Fasergewebe mit G = 204 $\frac{g}{m^2}$ und einem kaltaushärtenden Epoxidharz vom Typ EP LS 20/55 verwendet. Als Laminataufbau wurde dabei der quasi-isotrope Aufbau $[0^{\circ}/90^{\circ}, \pm 45^{\circ}]_s$ gewählt, siehe Abbildung 2.6. Sowohl der verwendete Faser- als auch Matrixwerkstoff sind für Anwendungen im Bereich des Maschinenund Flugzeugbaus qualifiziert, werden aber insbesondere für Anwendungen in Radrennund Motorsport verwendet.

		Werkstoff			
Kennwert	Einheit	C - Faser	EP - Harz		
φ	%	4	40		
ho	$\frac{kg}{m^3}$	1.780	1.200		
c_p	$\frac{J}{ka \cdot K}$	710	1.200		
k	$\frac{W}{m \cdot K}$	50	0,2		
h_z	$\frac{J}{a}$	43.000	1.100		

Tabelle 3.1: Im Rahmen dieser Arbeit verwendete Werkstoffkennwerte für das CFK-Standardlaminat mit Epoxidmatrix [PH97, PH00]

4 Prozessbeschreibung und Modellbildung

4.1 Allgemeine Prozessbeschreibung

Allgemein lässt sich der Prozess des Laserstrahltrennens gemäß Abbildung 4.1 darstellen [Kai99, Kle08, MDB04].



Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Laserstrahltrennprozesses [Kle08]

Zur systematischen Planung von Untersuchungen von technischen Fertigungsprozessen werden im Allgemeinen die Methoden der statistischen Versuchsplanung¹ verwendet, um zum einen die Anzahl der benötigten Versuche zu reduzieren und zum anderen eine hohe Relevanz der Ergebnisse der Untersuchungen sicherzustellen [Kle08]. Dabei wird im Rahmen der statistischen Versuchsplanung eine Unterteilung vorgenommen in

- Prozessergebnisgrößen,
- Prozesseingangsgrößen sowie
- Prozesskenngrößen .

Prozessergebnisgrößen beschreiben das Ergebnis der Bearbeitung sowie den Bearbeitungsprozess an sich und werden hinsichtlich der Erfüllung definierter Zielgrößen betrachtet. Im Sinne der Six Sigma Methodik werden in diesem Schritt die Anforderungen an den zu verbessernden Prozess sowie die hergestellten Produkte definiert [TK08]. Anhand dieser Anforderungsliste wird das Ergebnis des Gesamtprozesses abschließend bewertet.

¹Die Ausdrücke *statistische Versuchsplanung* und *Design of Experiments (DoE)* werden im Allgemeinen synonym verwendet [Kle08]

Unter dem Begriff *Prozesseingangsgrößen* werden sowohl die Prozesssteuergrößen, wie z. B. die Technologieparameter wie die Vorschubgeschwindigkeit und Laserstrahlleistung, als auch die statistisch auftretenden Prozessstörgrößen zusammengefasst. Durch sorgfältige Analyse und Auswahl kann der Aufwand bei der Durchführung von experimentellen Untersuchungen signifikant reduziert werden, ohne relevante Prozesseingangsgrößen zu vernachlässigen [Ahm09, MDB04, Pfe01, TK08].

Bei den *Prozesskenngrößen* handelt es sich um von den Prozesseingangsgrößen abhängige Stellgrößen, wie z. B. Technologieparameter. Die Prozesskenngrößen werden im Rahmen der Prozessentwicklung gezielt gewählt, um die gewünschte Prozessergebnisgröße zu realisieren. Die Störgrößen wirken als unwillkürliche Einflussgrößen und verfälschen das Prozessergebnis. Darüber hinaus sind zwischen den Prozessstellgrößen Wechselwirkungen zu beachten, die das Ergebnis von experimentellen Untersuchungen beeinflussen [Kle08, Pet06, Pfe01].

4.2 Prozessergebnis- und Qualitätsgrößen

Die Prozessergebnis- und Qualitätsgrößen für das Laserstrahltrennen von mehrkomponentigen FVK werden unterteilt in Grob- bzw. Feingestaltabweichung von der idealen Soll-Kontur der Schnittfläche sowie in die thermisch induzierte Beeinflussung des Werkstoffes [Bey93]. Diese Unterscheidung wird deshalb vorgenommen, da die Grobund Feingestaltabweichungen der allgemeinen Tolerierung von Bauteilen für nahezu alle relevanten Fertigungsverfahren, z. B. spanende Verfahren, identisch sind. Während andererseits die Betrachtung der thermischen Beeinflussung des Werkstoffs bei der Verwendung von Strahlverfahren, wie z. B. dem Laserstrahl- oder Plasmatrennen, relevant ist. Insbesondere für die industrielle Anwendung der laserstrahlgestützten Fertigungsverfahren ist die genaue Kenntnis über die Ausdehnung und Beeinflussung des Werkstoffs in der thermisch beeinflussten Zone von großer Bedeutung, um eine hohe Qualität der Schnittfläche sicherzustellen [Bey93, Bre05]. Diese Kriterien zur quantitativen Beschreibung der Beschaffenheit der Schnittfläche beim Laserstrahltrennen von FVK sind z. T. noch nicht verbindlich definiert und werden daher im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

4.2.1 Grob- und Feingestaltabweichung der Schnittkante

Unter Grobgestaltabweichungen werden alle Abweichungen der Ist-Kontur der Schnittfläche von der gewünschten Soll-Kontur zusammengefasst. Die Feingestaltabweichungen beschreiben dabei die Abweichung der Schnittfläche von der geometrisch idealen Oberfläche.



Abbildung 4.2: WEZ als Grobgestaltabweichungen in der Draufsicht (links) und in der Schnittansicht (rechts) (nach [DIN03b])



Abbildung 4.3: Rauheit als Feingestaltabweichungen nach DIN-9013 [DIN03b]

Der Begriff der Grobgestaltabweichung, siehe Abbildung 4.2, beschreibt nach DIN 7186 und 9013 [DIN91b, DIN03b] sowohl die Toleranzen als auch die Geometrie der Schnittfläche. Dabei werden die Toleranzen typischerweise unterteilt in Maß-, Formund Lagetoleranzen, z. B. Rechtwinkligkeits-, Neigungs- oder Parallelitätsabweichungen [DGF07]. Im Rahmen der Beschreibung der Geometrie der Schnittfläche werden die Schnittspaltweite (w_{so} , w_{su}), Rechtwinkligkeits- und Neigungsabweichungen (u), der Schnittflänkenwinkel (β), der Anschmelzradius sowie die Bartgeometrie unterschieden. Die Bildung eines sogenannten Bartes tritt insbesondere beim Laserstrahltrennen von Metallen auf, bei FVK tritt dagegen typischerweise keine Bartbildung auf [Car04, Kal95, PAMKV09]. Die messtechnische Erfassung von Grobgestaltabweichungen erfolgt im Allgemeinen berührend durch Koordinaten- bzw. Konturmessgeräte [Hie08, KD08]. Feingestaltabweichungen beschreiben nach DIN 1302, DIN 4287 und DIN 4760 [DIN02, DIN98, DIN82] die Abweichung der Schnittfläche von der idealen Oberfläche, siehe Abbildung 4.3. Dabei werden die gemittelte Rautiefe R_z , die größte Einzelrauhtiefe R_{max} , der Mittenrauhwert R_a , die Rillentiefe und der Rillennachlauf unterschieden. Die messtechnische Erfassung der Feingestaltabweichungen kann berührend mittels Tastschnittgerät oder optisch mittels Messung der Oberflächentopographie sowie Konvokalmikroskopie erfolgen [Hie08, KD08].

4.2.2 Thermisch induzierte Beeinflussung des Werkstoffes

Der Unterschied der Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen von Matrix- und Verstärkungsfaserwerkstoff führt zu einer Beeinflussung der Werkstoffes im Bereich der Schnittkante [Ahm09, Bey93, Lie98]. Die Ausdehnung w_{tho} bzw. w_{thu} der Wärmeeinflusszone (WEZ), siehe Abbildung 4.2, ist ein bedeutendes Qualitätskriterium bei der Beurteilung des Laserstrahltrennens von FVK. Weitere relevante Qualitätskriterien sind Gefügeveränderungen im Bereich der Schnittkante, Materialablagerungen sowie Delamination [Bey93, Ehr06]. Diese sind gemäß Beyer und Tagliaferri aber nur von geringer Bedeutung und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet [Bey93, TVD87].

Im Bereich der WEZ wird der Matrixwerkstoff im Allgemeinen teilweise bis vollständig zersetzt, siehe Abbildung 4.5. Das führt zu einer signifikanten Reduktion der mechanischen Eigenschaften des FVK-Laminates, z. B. der Zugfestigkeit [Ehr06, Kna89]. Darüber hinaus kann der Bereich der WEZ eine Kerbwirkung verursachen, die bei Beanspruchung durch statische oder dynamische Lasten zu einem Versagen des Bauteils führt. Daher wird bei der Konturbearbeitung von FVK-Laminaten eine minimale Ausdehnung der WEZ angestrebt.

In Abbildung 4.4 ist die WEZ in einer lichtmikroskopischen Aufnahme als hell verfärbter Randbereich entlang der Schnittkante deutlich zu erkennen. Die messtechnische Erfassung anhand der Auswertung der lichtmikroskopischen Messungen ist ebenfalls dargestellt, die Validierung einer geeigneten Messmethode ist in Kapitel 4.3 beschrieben.

Zur Ermittlung der Auswirkung der WEZ auf die Eigenschaften des Werkstoffes wurde an einem industriell relevanten Epoxidharz, siehe Kapitel 3.2, eine Thermogravimetrische Analyse (TGA) durchgeführt, siehe Abbildung 4.5. Bei einer TGA wird die relative Massenabnahme bei steigender Temperatur ermittelt [Car92, Ehr02, EG09]. Diese Messung wurde sowohl unter einer Luftatmosphäre als auch unter einer Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Durch diese Messmethode kann experimentell ermittelt werden, um welchen temperaturabhängigen Anteil der Matrixwerkstoff im Bereich der WEZ zersetzt worden ist und damit die Festigkeit des FVK-Laminates beeinträchtigt wird. Hierdurch kann z. B. die Zugfestigkeit des Laminates reduziert werden,



Abbildung 4.4: Veranschaulichung der messtechnischen Erfassung der Ausdehnug der WEZ anhand einer lichtmikroskopischen Aufnahme für eine laserstrahlgetrennte CFK-Probe (Yb:YAG Laser mit $P_L = 1,0$ kW, $v_f = 5,0$ m/min sowie CFK-Laminat mit $\varphi = 40$ % und EP-Matrix)

was zum Bauteilversagen im Beanspruchsfall oder einer reduzierten Dauerfestigkeit führt. Vergleichbare Messungen wurden bereits von Pan und Hocheng [PH95, PH00] durchgeführt. Diese Analysen konnten zeigen, dass ein ausgehärtetes CFK-Laminat mit EP-Matrix bei einer Temperatur von $T_3 = 360 \text{ °C}$ (T = 633 K) eine Massenreduktion von ca. 10 % aufweist und somit thermisch beeinflusst ist². Bei der Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide, z. B. beim Fräsen, wird in der Industrie typischerweise mit einer maximalen Temperatur von $T_2 = 120$ °C (T = 393 K) kalkuliert [HGM+04, HCH+07]. Diese Temperaturgrenzen wurden in der Abbildung 4.5 dargestellt. Bei einer Temperatur von $T_2 = 120$ °C (T = 393 K) ist bei Luftatmosphäre nahezu keine Zersetzung der Matrix zu erkennen, während bei einer Stickstoffatmosphäre bereits ca. 2 % der Matrix zersetzt wurden. Wird eine Temperatur von $T_3 = 360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_3 = 633 \text{ K}$) erreicht, sind ca. 15 % der Masse der Matrix zersetzt. Bei einer Reduktion der Masse der Matrix in dieser Größenordnung werden die mechanischen Eigenschaften des Laminates im Bereich der Schnittkante beeinflusst. Daher ist eine Kenntnis über die bei der Bearbeitung auftretenden maximalen Temperaturen sowie die genaue Kenntnis über die Ausdehnung der WEZ für die Auslegung von Bauteilen aus FVK von entscheidener Bedeutung. Aus der Kenntnis über die Ausdehnung der WEZ sowie die Beschaffenheit des Werkstoffs in der WEZ kann die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften sowie der Gebrauchseigenschaften der hergestellten Bauteile abgeleitet werden.

²Bei der Simulation und Messung der Temperaturfelder auf der FVK-Probe wird von einer Bezugtemperatur von $T_1 = T_{UB} = 20$ °C = 293 K ausgegangen.



Abbildung 4.5: Thermogravimetrische Analyse eines industriell relevanten EP-Harzes sowie Darstellung der relevanten Temperaturen (m_{Probe} = 23,54 mg, $t_{Messung} = 109$ min, Temperaturerhöhung 6 °C / min)

4.2.3 Zielgrößen hinsichtlich der Qualität des Bearbeitungsprozesses

Die einzuhaltenden Fertigungstoleranzen bei der Konturbearbeitung mittels der in Kapitel 2.2.2 dargestellten Fertigungsverfahren von FVK sind je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich und auch in der Industrie keinesfalls eindeutig. Für die Ausdehnung der WEZ existieren für FVK keine einheitlichen Angaben, da diese Art der Beeinflussung z. B. beim Wasserstrahlschneiden gar nicht und z. B. beim Bohren oder Fräsen nur in geringem Maße, insbesondere bei beschädigten oder verschlissenen Zerspanungswerkzeugen, auftritt [HGM+04, HHS07, Kin10, Lie98].

In DIN 9013 [DIN03b] werden Toleranzklassen definiert, die in Abhängigkeit von der Laminatdicke und -breite die maximale Grobgestaltabweichung definieren. Diese Grenztoleranzen sind in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 dargestellt. In industriellen Fertigungsprozessen werden im Allgemeinen die dargestellten Toleranzen im Rahmen der Prozessplanung verwendet und gegebenenfalls an betriebsspezifische Rahmenbedingungen und Anforderungen angepasst. Je nach Anwendung der herzustellen Bauteile werden die Fertigungstoleranzen entsprechend der genannten Toleranzklassen 1 und 2 verwendet. Für Anwendungen im Flugzeug- oder Kraftfahrzeugbau werden typischerweise die Toleranzen entsprechend Klasse 1, für Anwendungen im Bau- oder Sportgerätebereich die Toleranzen entsprechend Klasse 2 verwendet. Diese gelten für die industriell relevanten Fertigungsverfahren. Für die Ausdehnung der WEZ, die z. B. beim Laserstrahltrennen oder mechanischen Bohren von FVK auftritt, sind zurzeit keine allgemeinen Toleranzen verfügbar.

	Nennmaße (in mm)							
Laminat-	≤ 3	≤ 10	≤ 35	≤ 125	≤ 315	≤ 1.000	≤ 2.000	≤ 4.000
dicke (mm)								
	Grenzabmaße (in mm)							
$\leq 1,00$	± 0.04	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
$\leq 3,\!15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,2$	\pm 0,2	\pm 0,3	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$
$\leq 6,13$	\pm 0,30	\pm 0,3	\pm 0,4	\pm 0,4	\pm 0,5	\pm 0,5	\pm 0,5	\pm 0,6

Tabelle 4.1: Grobgestaltabweichung nach Toleranzklasse 1 [DIN03b]

	Nennmaße (in mm)							
Laminat-	≤ 3	≤ 10	≤ 35	≤ 125	≤ 315	≤ 1.000	≤ 2.000	≤ 4.000
dicke (mm)								
	Grenzabmaße (in mm)							
$\leq 1,00$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	\pm 0,5	$\pm 0,7$	± 0.8	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$
$\leq 3,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	\pm 0,5	\pm 0,7	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	\pm 1,0	\pm 1,1
$\leq 6,13$	$\pm 0,5$	\pm 0,7	\pm 0,8	\pm 0,9	\pm 1,1	\pm 1,2	\pm 1,3	\pm 1,3

Tabelle 4.2: Grobgestaltabweichung nach Toleranzklasse 2 [DIN03b]

4.3 Validierung der Messmethoden zur Erfassung der thermischen Beeinflussung

Zur Analyse der Beschaffenheit der Schnittkante und der WEZ sind grundsätzlich die Verfahren

- Lichtmikroskopie,
- Rasterelektronenmikroskopie sowie
- Röntgenuntersuchungen

geeignet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung mittels dieser Verfahren dargestellt.

a.) Auswertung mittels Lichtmikroskopie

Die mittels Laserstrahlung getrennten CFK-Proben wurden hinsichtlich der Qualität im Bereich der Schnittkante sowie der thermischen Beeinflussung analysiert. Dazu wurden Schliffe erstellt und mittels lichtmikroskopischer Aufnahmen ausgewertet. Für diese Untersuchungen werden geeignete Proben aus dem Bereich der Wärmeeinflusszone entnommen, anschließend gereinigt und mit einem geeigneten Einbettmittel präpariert.

In der Abbildung 4.6 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der WEZ für 20-fache (a.), 50-fache (b.), 100-fache (c.) und 500-fache (d.) Vergrößerung dargestellt. Der dunkle Bereich um die Probe ist das Einbettmittel. In Abbildung 4.6a. ist die thermische Beeinflussung mit einer Tiefe von bis zu 500 μ m, gemessen von der Schnittkante, sichtbar. Bei einer 50-fachen Vergrößerung sind Mikrorisse in der EP - Matrix bis zu einer Tiefe von 300 μ m zu erkennen. Die Länge dieser Mikrorisse beträgt zwischen 20 μ m und 120 μ m. Darüber hinaus treten diese Risse auch in Abständen mehr als 1,0 mm von der Schnittkante auf. Diese können jedoch durch die Aushärtereaktion des EP-Harzes, der durch eine Polyadditionsreaktion aushärtet, und den damit verbundenen Härtungsschwund von 2 bis 5 % entstehen [Ehr06], siehe Kapitel 2.1.3. Daher werden Mikrorisse ab einer Tiefe von mehr als 400 μ m, gemessen von der Schnittkante, nicht als Folge des Laserstrahltrennes bewertet, siehe Kapitel 4.2 und Kapitel 5.4.

In der 0° - Einzellage ist die teilweise Zersetzung der Matrix in einer maximalen Tiefe von 200 μ m bzw. in der 90°-Einzellage von 400 μ m zu erkennen, siehe Abbildung 4.6b. Die Zersetzung der Matrix in dem genannten Abstand von der Schneidkante ist die Folge der Einbringung von thermischer Energie durch den Laserstrahl. Durch den Austritt der Pyrolysegase aus der Trennfuge kommt es zu einer Ausfaserung an der Kante, siehe Abbildung 4.6c. Diese Ausfaserung stellt sich an der Oberflä-

che als geringe Schnittqualität dar. Bei einer Vergrößerung um den Faktor 500, siehe Abbildung 4.6d., sind deutlich Fasern mit vergrößertem Durchmesser von mehr als 12 μ m, im Gegensatz zu dem normalen Faserdurchmesser von ca. 7,0 μ m, zu erkennen. Dieses so genannte Faserquellen resultiert aus der Einbringung von thermischer Energie durch den Laserstrahl und wurde bereits von Herzog et. al. [HJMH08] beobachtet.



- 500 x Vergrößerung
- **Abbildung 4.6:** Lichtmikroskopische Aufnahmen der Wärmeeinflusszone im Bereich der Schneidkante einer laserstrahlgetrennten CFK-Probe mit EP-Matrix (für Yb:YAG-Scheibenlaser, $P_L = 1,0$ kW, $I_0 = 1,27 * 10^{-6}$ W/cm², $v_f = 5,0$ m/min und $\varphi = 40$ %)

b.) Auswertung mittels Rasterelektronenmikroskopie

Ausgewählte Proben wurden mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) vom Typ Zeiss 1530³ untersucht. Für die REM - Untersuchungen werden Proben aus dem Bereich der Schnittkante entnommen. Die Trocknung der Proben inklusive der Probenhalterungen erfolgte in einem Vakuumofen, um ein Ausgasen von Feuchtigkeit oder flüchtigen Bestandteilen im REM zu vermeiden. Vor den Untersuchungen werden die Proben mit Gold bedampft, um die elektrische Leitfähigkeit der Probenoberfläche zu erhöhen.



Abbildung 4.7: Analyse der Wärmeeinflusszone im Rasterelektronenmikroskop für ein laserstrahlgetrenntes CFK-Laminat mit EP-Matrix (für Yb:YAG-Scheibenlaser, $P_L = 1,0 \text{ kW}, I_0 = 1,27 * 10^{-6} \text{ W/cm}^2, v_f = 5,0 \text{ m/min}$)

In Abbildung 4.7 ist die REM-Aufnahme im Bereich der WEZ dargestellt. Es sind deutlich die Bereiche mit

- vollständig zersetzter Matrix,
- vollständig intakter Matrix und
- dem Übergangsbereich mit teilweise zersetzter Matrix, dem so genannten Pyrolysekoks,

zu erkennen. Es wird deutlich, dass die Zersetzung des Matrixwerkstoffes in einem definierten Abstand zur Schnittkante nicht homogen ist und zum Teil erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Dichte der Matrix bestehen. Insbesondere im Übergangsbereich zwischen vollständig zersetzter und vollständig intakter Matrix ist so genannter

³Hersteller Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen

Pyrolysekoks zu erkennen. Pyrolysekoks ist ein stark kohlenstoffhaltiges Pyrolyseprodukt mit hoher spezifischer Oberfläche, das während des Laserstrahltrennprozesses unter Sauerstoffabschluss bei hohen Temperaturen entsteht. Dieser hat eine deutliche poröse Struktur, die entsteht, wenn der Matrixwerkstoff sich teilweise zu zersetzen beginnt, während der übrige Matrixwerkstoff durch Überschreiten der Glasübergangstemperatur erweicht.



Abbildung 4.8: REM-Aufnahme der Depositbildung an der Probenoberseite für 200- und 2.000-fache Vergrößerung (für Yb:YAG-Scheibenlaser, $P_L = 1,0$ kW, $I_0 = 1,27 * 10^{-6}$ W/cm², $v_f = 5,0$ m/min und $\varphi = 40$ %)

In Abbildung 4.8 sind die REM-Aufnahmen eines mittels Laserstrahlung getrennten CFK-Laminates bei 200- und 2.000-facher Vergrößerung dargestellt. Deutlich ist die Bildung einer Depositschicht zu erkennen. Diese Depositschicht wurde bereits von Herzog et. al. [HJMH08] beobachtet. Sie besteht im Wesentlichen aus "kondensiertem" Kohlenstoff, der sich in einer lamellaren, graphit-ähnlichen Struktur auf der Oberfläche ablagert. Diese Schicht kann im Extremfall die gesamte Schnittoberfläche bedecken, wobei die unterliegende Struktur des FVK abgebildet wird, d. h. bedeckte Faserenden sind durch die Deckschicht zu erkennen. Das führt zu einer Welligkeit und erhöhten Rauheit der Oberfläche.



Abbildung 4.9: Modell der Bildung der Kohlenstoff-Depositschicht sowie des Faserquellens beim Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats

In den Aufnahmen, die mittels REM erstellt wurden, sind Vergrößerungen des Faserdurchmessers im Randbereich an der Schnittebene sowie eine Ablagerungs- bzw. Depositschicht auf der Schnittkante zu erkennen. Die Aufnahmen im REM, siehe Abbildung 4.8, zeigen, dass die Depositschicht eine lamellare Struktur aufweist, sodass der Schluss zulässig ist, dass es sich hierbei um Graphit handelt. Eine Erklärung für dieses Phänomen ist die Bildung eines kohlenstoffhaltigen Plasmas unter Einwirkung der Pyrolysegase bei hoher Temperatur in der Schnittfuge. Dieser Effekt tritt dann auf, wenn durch die Laserstrahlung den Pyrolyseprodukten ausreichend thermische Energie zugeführt wird, um die kovalenten Bindungen in den so genannten aromatischen Verbindungen der Matrix aufzubrechen.

Da der Wärmetransport in den Werkstoff hinein maßgeblich durch die Wärmeleitfähigkeit der Faser stattfindet, können sich C-Atome aus dem Plasma an die Fasern bzw. an die Schnittoberfläche anlagern bzw. desublimieren, siehe Abbildung 4.9.



Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der Temperaturverteilung und des Pyrolysegasstromes beim Laserstrahltrennen

Ein weiterer Erklärungsansatz für die Depositbildung lässt sich aus der Temperaturverteilung während des Laserstrahltrennens ableiten, siehe Abbildung 4.10. Beim Austritt der Pyrolysegase aus dem Bereich der Schneidfuge passieren diese Bereiche, die bereits wieder abgekühlt sind. An diesen Bereichen desublimieren die Pyrolysegase und fördern so den Mechanismus der Bildung von Pyrolysekoks.

c.) Auswertung mittels Röntgenuntersuchung

Zur Analyse der thermischen Beeinflussung im Bereich der Schnittkante wurden als drittes Analyseverfahren Röntgenuntersuchungen an den hergestellten Proben durchgeführt.



Abbildung 4.11: Röntgenaufnahmen der Versuchsproben vor der Bearbeitung mit deutlich sichtbaren Porenfeldern in der Probenmitte (für eine Belichtungsdauer von 6 min, einen Anodenstrom von 2,0 mA und die Beschleunigungsspannung 20 kV)

In Abbildung 4.11 sind beispielhaft die Röntgenaufnahmen von zwei Versuchsproben, die für die praktischen Untersuchungen verwendet wurden, dargestellt. Deutlich sind Porenfelder im CFK-Laminat zu erkennen. Diese Porenfelder, die bei ca. 20 % der Proben auftreten, haben einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Bearbeitung sowie die Gebrauchseigenschaften des Laminats.



Abbildung 4.12: Röntgenaufnahme der Wärmeeinflusszone entlang der Schnittkante (für eine Belichtungsdauer von 6 min, einen Anodenstrom von 2,0 mA und die Beschleunigungsspannung 20 kV)

Zur Analyse der Ausdehnung der WEZ wurden die mittels Laserstrahlung getrennten Proben durch Röntgen untersucht. In Abbildung 4.12 ist entlang der Schnittkante eine Ausdehnung der WEZ von 350 μ m bis 500 μ m zu beobachten. Diese WEZ ist deutlich als dunkler Bereich mit geringerer Dichte zu erkennen. Durch den Temperatureinfluss wird ein Teil des Matrixwerkstoffes zersetzt, sodass die Dichte abnimmt, siehe Kapitel 4.2.2.



Abbildung 4.13: Röntgenaufnahme der Wärmeeinflusszone beim Durchtrennen eines Porenfeldes mittels Laserstrahlung (für eine Belichtungsdauer von 6 min, einen Anodenstrom von 2,0 mA und die Beschleunigungsspannung 20 kV)

In Abbildung 4.13 ist die signifikant größere Ausdehnung der WEZ beim Durchtrennen eines Porenfeldes mittels Laserstrahlung dargestellt. Durch die Kapillar- bzw. Kanalwirkung der Porenfelder werden die beim Laserstrahltrennprozess auftretenden Pyrolysegase, siehe Abbildung 4.9, mit hoher Temperatur durch die Pore bis weit in den Werkstoff geleitet. Dieser Prozess führt zu einer deutlichen Ausdehnung der WEZ. Eine Beeinträchtigung der Qualität durch diesen Effekt kann durch Reduktion der fertigungsbedingten Poren im CFK-Laminat vermieden werden. Im Rahmen von Vergleichsmessungen konnte gezeigt werden, dass die Wahl der Technologieparameter für den Laserstrahltrennprozess nahezu keinen Einfluss auf die Ausdehnung der WEZ beim Durchtrennen eines Porenfeldes hat.

d.) Ergebnis der Validierung der Messmethoden

Zur Validierung der Messmethoden sind die Verfahren Licht- und REM-Mikroskopie sowie das Röntgen untersucht worden. Dabei wurde deutlich, dass die o. g. Verfahren zur Quantifizierung der Ausdehnung der WEZ geeignet sind. Da mit allen drei verwendeten Messverfahren nahezu identische Ergebnisse erzielt werden konnten, ist bei der Ermittlung der Ausdehnung der WEZ eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den Methoden gegeben. Die beiden Messverfahren Lichtmikroskopie und Röntgen sind aufgrund ihres Messprinzips für die zerstörungsfreie Messung⁴ der Ausdehnung der WEZ geeignet. Zur Durchführung von REM-Untersuchungen besteht dagegen die Notwendigkeit, Proben geringer Größe aus dem Bereich der Schittkante zu entnehmen, um diese anschließend in der Vakuumkammer des REM zu untersuchen. Dabei werden die Proben sowie ggf. die Bauteile beschädigt.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Ausdehnung der WEZ mittels des Verfahrens Lichtmikroskopie erfasst, da dieses Verfahren sowohl zeit- als auch kosteneffizient realisiert werden kann und darüber hinaus identische quantitative Ergebnisse wie bei den beiden anderen Verfahren erzielt werden können.

⁴Die zerstörungsfreien Prüfverfahren werden häufig als NDT-Verfahren, für engl. non-destructive testing, bezeichnet.

4.4 Prozesseingangs- und Einflussgrößen

Der Laserstrahltrennprozess wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen beeinflusst. Dabei werden willkürlich beeinflussbare Steuergrößen, z. B. Technologieparameter, und statistisch auftretende Störgrößen unterschieden [Kle08]. In Abbildung 4.14 ist das Ursache-Wirkungs-Diagramm⁵ für das Laserstrahltrennen von mehrkomponentigen FVK dargestellt. Im Sinne des Ursache-Wirkungs-Diagramms stellt die *Qualität der Schnittkante*, siehe Abschnitt 4.2, die "Wirkung" und das Ziel des gesamten Prozesses dar. Die wesentlichen Steuergrößen sind

- das Material,
- die Maschine und
- der Prozess .

Das *Material* fasst sämtliche durch die Wahl des Matrix- oder Verstärkungsfaserwerkstoffs verursachten Einflüsse zusammen. Die mechanischen Eigenschaften, wie z. B. Dichte, Zug- und Druckspannungen sowie der E-Modul, werden dadurch ebenso bestimmt wie die thermischen Eigenschaften, wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit, der Wärmeausdehnungskoeffizient sowie die Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur. Optische Eigenschaften, die Reflexion, die Absorption und die Transmission, werden wesentlich durch die Wahl des Matrixwerkstoffes bestimmt [Kle90].

Aspekte der Strahlquelle, -führung und -formung sind bestimmend für die *Maschine* hinsichtlich der Qualität der Schnittkante. Die Strahlformung wird u. a. bestimmt durch die Fokuslage, die Brennweite, die Kollimation sowie den Fokusdurchmesser. Die Wellenlänge der Strahlquelle beeinflusst entscheidend die Absorption der Laserstrahlung im FVK. Dabei stellen die Laserstrahlleistung und das Strahlparameterprodukt wesentliche Einflussgrößen auf die Qualität bei der Beurteilung der Qualität der Schnittfläche dar.

Parameter des *Prozesses*, wie z. B. Strahlbewegung, Prozessgas, Bauteilgeometrie und der Laserbetrieb, haben ebenfalls Einfluss auf die Qualität. Unter dem Aspekt der Strahlbewegung werden die Handhabungsgeräte sowie deren Genauigkeit betrachtet. Die Bauteilgeometrie bestimmt zum einen die Bauteilfixierung und zum anderen die Wahl eines geeigneten Handhabungsgerätes, z. B. ist eine 3D-Strahlbewegung erforderlich oder ist die 2D-Strahlbewegung ausreichend. Mit der Wahl des Prozessgases werden sowohl die Prozesskosten als auch die Qualität der Schnittkante, z. B. hinsichtlich des Auftretens von Oxidation oder Delamination, entscheidend beeinflusst.

⁵Das Ursache-Wirkungs-Diagramm wird auch als Fischgräten-Diagramm bzw. Ishikawa-Diagramm bezeichnet [Kle08, Pfe01].

Wesentliche Störgrößen, die auf den Laserstrahltrennprozess einwirken, ohne direkt beeinflusst werden zu können, sind

- der Mensch,
- die Umgebung und
- die Sicherheit .

Der *Mensch* wird durch Faktoren wie Motivation, Ausbildung oder Tagesform bestimmt. Die Auswirkung der Mitarbeitermotivation auf die Qualität des Arbeitsergebnisses wurde in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht [Frö97, Mar08]. Es wurde deutlich, dass nur motivierte Mitarbeiter qualitativ hochwertige Arbeitsergebnisse erzielen. Die Ausbildung der Mitarbeiter ist ebenfalls entscheidend, da diese sowohl den korrekten Betrieb der verwendeten Anlagentechnik sicherstellt als auch die Prüfung der Qualität des Prozesses während dessen Ausführung ermöglicht.

Einflüsse der *Umgebung*, wie z. B. die Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit oder durch benachbarte Anlagen verursachte Störschwingungen, beeinflussen ebenso die Genauigkeit einer Laserbearbeitungsmaschine. Anhand der Kenntnis der Umgebungsbedingungen können die Technologieparameter korrekt gewählt werden, sodass der Laserstrahltrennprozess mit hoher Qualität realisierbar ist.

Die Bestimmungen der Arbeits-*Sicherheit* haben einen direkten Einfluss auf den Aufbau der Anlagentechnik sowie die Prozessführung. Darüber hinaus wird das Mitwirken des Menschen als Bediener der Anlagentechnik am Bearbeitungsprozess hierdurch geregelt [Frö97].

Da die genannten Störgrößen keinen signifikanten Einfluss auf die Modellbildung und Simulation des Laserstrahltrennens von FVK haben sowie keiner willkürlichen Beeinflussung unterliegen, werden diese im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Zur industriellen Umsetzung der laserstrahlgestützten Konturbearbeitung von FVK sind diese jedoch zu berücksichtigen, um eine hohe Bearbeitungsqualität sicherstellen zu können.



Abbildung 4.14: Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

4.5 Prozesskenngrößen beim Laserstrahltrennen

Um das Zusammenwirken mehrerer Prozesseingangsgrößen zu beschreiben, werden typischerweise zusammengesetzte Prozessgrößen verwendet. Dadurch wird eine Beschreibung des komplexen Laserstrahltrennprozesses mit einigen wenigen Kenndaten möglich. Wesentliche Kenngrößen des Laserstrahltrennprozesses sind die Laserstrahleistung P_L , der Fokusdurchmesser d_f und Vorschubgeschwindigkeit v_f [TVD87], siehe dazu Kapitel 4.4. Anhand dieser Kenngrößen können die maximale Intensität I₀ gemäß Formel 4.1 sowie die Streckenenergie E_S gemäß Formel 4.2 bestimmt werden

$$I_0 = \frac{P_L}{A_f} = \frac{P_L}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_f^2} = \frac{4 \cdot P_L}{\pi \cdot d_f^2} \quad , \tag{4.1}$$

$$E_S = \frac{E}{l_x} = \frac{P_L}{v_f} \quad . \tag{4.2}$$

Zum Laserstrahltrennen von metallischen Werkstoffen, wie z. B. Stahl, ist typischerweise eine Intensität von $I_{min,Stahl} = 10^6$ bis 10^7 W/cm² erforderlich [Bey93, Car04, Emm02]. In der Abbildung 4.15 sind typische Intensitäten I und Einwirkzeiten t_E für Lasermaterialbearbeitungsprozesse von Stahlwerkstoffen dargestellt. Beim Laserstrahltrennen von FVK werden vergleichbar hohe Intensitäten von mindestens $I_{min,FVK} \geq 10^6$ W/cm² wie bei Stahlwerkstoffen verwendet [Bey93, Lie98, Ste03].



Abbildung 4.15: Typische Intensitäten und Einwirkzeiten zur Lasermaterialbearbeitung von Stahlwerkstoffen [EL02]

Weitere charakteristische Kenngrößen sind die Strahlqualität, z. B. das Strahlparameterprodukt bei Festkörperlasern oder der K-Faktor bei CO₂-Lasern, sowie die Brenn-

4 Prozessbeschreibung und Modellbildung

weite der Optik. Diese Größen bestimmen maßgeblich die maximale Fokussierbarkeit, also den minimalen Fokusdurchmesser, sowie die Rayleigh-Länge. Diese Größen haben typischerweise einen entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Stabilität des Prozesses.

Insgesamt konnte in diesem Kapitel dargestellt werden, dass auf den Laserstrahltrennprozess zahlreiche Einflussgrößen einwirken. Darüber hinaus wurde aufgezeigt, dass die Qualität der Schnittfläche beim Laserstrahltrennen von CFK anhand objektiver Messgrößen, z. B. der Rauheit oder der WEZ, beurteilt werden kann. Aufbauend auf den in diesem Kapitel 4 erarbeiteten Erkenntnissen wird im folgenden Kapitel 5.3 ein Modell zur Beschreibung der Energieeinkopplung und Wärmeleitung im FVK-Laminat entwickelt. Die Qualität der Schnittfläche anhand des Kriteriums WEZ wird berechnet und mittels experimenteller Untersuchungen analysiert.

5 Einflussanalyse der Technologieparameter auf die Qualität

5.1 Vorgehensweise zur Einflussanalyse der Technologieparameter auf die Qualität

In Kapitel 4.4 wurde dargestellt, dass der Laserstrahltrennprozess von FVK von einer Vielzahl an Einflussgrößen bestimmt wird, siehe Abbildung 4.14. Dabei sind insbesondere die Parameter Laserstrahlleistung und Vorschubgeschwindigkeit sowie die Wellenlänge der Laserstrahlung, die maßgeblich die Absorption bestimmt siehe Kapitel 2.3.4, von Bedeutung. Der Einfluss dieser Parameter auf die Ausdehnung der WEZ wurde anhand zahlreicher experimenteller Untersuchungen zum Laserstrahltrennen des definierten CFK-Laminates untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse werden im Kapitel 5.2 dargestellt und diskutiert. Darauf aufbauend wird im Kapitel 5.3 die allgemeine Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses dargestellt. Mithilfe des entwickelten Modells wird der Einfluss der genannten Technologieparameter auf die Qualität analytisch und numerisch berechnet sowie im Anschluss daran validiert.

5.2 Einfluss der Technologieparameter auf die Qualität der Schnittfläche

a.) Qualität der Schnittfläche beim Laserstrahltrennen mit einem Faserlaser

Die Eignung von Festkörperlaserstrahlquellen, z. B. Faser- oder Scheibenlasern, mit einer Wellenlänge von ca. 1,0 μ m zum Laserstrahltrennen von CFK wurde anhand experimenteller Untersuchungen analysiert. Dazu wurden an dem definierten CFK-Laminat, siehe Kapitel 3.2, experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahltrennen unter Verwendung einer Faserlaserstrahlquelle durchgeführt, die entsprechende Anlagentechnik ist im Anhang 8.5.3 dargestellt.

Die Ausdehnung der WEZ sowie die Schnittfugenbreite wurden messtechnisch erfasst, die gemessenen Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Es wird deutlich, dass mit steigender Vorschubgeschwindigkeit sowohl die WEZ als auch die Schnittfugenbreite



Abbildung 5.1: Vergleich der Ausdehnung von Schnittfugenbreite und Wärmeeinflusszone bei steigender Vorschubgeschwindigkeit beim Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats mit EP-Matrix (Yb-Faserlaser mit $P_L = 1,5$ kW, CFK-Standardlaminat mit t = 1,0 mm)

signifikant abnehmen. Die minimale Schnittspaltbreite entspricht dabei typischerweise dem Fokusdurchmesser und beträgt 98 μ m, siehe Anhang 8.5. Die im betrachteten Intervall erfasste, reale Schnittfugenbreite beträgt jedoch zwischen 140 und 190 μ m. Dabei ist die Differenz zwischen dem Fokusdurchmesser und der tatsächlich realisierten Schnittfugenbreite dadurch zu erklären, dass die thermische Laser-Material-Wechselwirkung zur Ausbildung einer Schnittfuge führt, die etwas breiter ist als der Fokusdurchmesser.

Im betrachteten Intervall beträgt die WEZ 400 bis 560 μ m und liegt damit auf einem niedrigen Niveau im Vergleich zu früheren Untersuchungen sowie zu konventionellen Fertigungsverfahren. Insbesondere im Vergleich zu den in der Vergangenheit realisierten Ergebnissen von 1,0 bis 2,0 mm, wurde bei identischer Laminatstärke eine deutliche Reduktion der WEZ erreicht, vergleiche [Lie98, Tra92]. Bei der Verwendung von CO₂-Laserstrahlquellen betrug die Ausdehnung der WEZ bei vergleichenden experimentellen Untersuchungen ca. 300 bis 350 μ m. Dabei wurden diese Ergebnisse auch bei höheren maximalen Vorschubgeschwindigkeiten von 10 m/min und darüber hinaus erreicht [EG08, EG09].

Insgesamt ist festzuhalten, dass sowohl die Ausdehnung der WEZ als auch die Schnittfugenbreite mit sinkender Streckenenergie, d. h. bei konstanter Laserstrahlleistung und steigender Vorschubgeschwindigkeit, abnehmen. Dieses Ergebnis wird auch im Rahmen der theoretischen Betrachtungen, siehe Kapitel 5.4, bestätigt.



Abbildung 5.2: Rauheitskennwerte der Schnittfläche bei steigender Vorschubgeschwindigkeit beim Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats mit EP-Matrix (Yb-Faserlaser mit $P_L = 1,5$ kW, CFK-Standardlaminat mit t = 1,0 mm)

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Rauheitskennwerte R_a , R_z und R_{max} analysiert. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Insgesamt wird deutlich, dass die Rauheitskennwerte im Bereich der Vorschubgeschwindigkeit von ca. 4,5 m/min ein Minimum annehmen. Bei einer Erhöhung des Vorschubes über 4,75 m/min hinaus steigt die Rauheit der Schnittfläche wieder an. Damit liegen die Rauheitskennwerte mit $R_z \leq 50 \ \mu m$ und $R_{max} \leq 100 \ \mu m$ auf einem niedrigen Niveau auchim Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren. Insbesondere hinsichtlich des Mittenrauhwerts R_a von $\leq 20 \ \mu m$ werden hohe Oberflächenqualitäten der Schnittflächen erreicht.

Die Zunahme der Rauheitskennwerte der Schnittfläche mit steigender Vorschubgeschwindigkeit ist durch die Zunahme des zu zersetzenden Werkstoffvolumens zu erklären. Ein vergleichbares Verhalten wurde bereits im Rahmen experimenteller Untersuchungen bei Verwendung von CO₂-Laserstrahlquellen in den 1980er Jahren festgestellt [TC87]. Beim Laserstrahltrennen unter Verwendung von CO₂-Laserstrahlquellen der heutigen Generation war diese Zunahme mit steigender Vorschubgeschwindigkeit nicht zu beobachten [EG08, EG09]. Hinsichtlich der Rauheitswerte ist daher ein deutlicher Einfluss der Wellenlänge des Laserlichts von $\lambda_{CO_2} = 10,6 \ \mu m$ und $\lambda_{Faserlaser} = 1,07 \ \mu m$ und der von dieser abhängigen Absorption in polymeren Werkstoffen, siehe Kapitel 2.3.4, festzustellen. Dennoch sind die realisierbaren Oberflächenqualitäten bei der Verwendung eines Faserlasers anstelle eines CO₂-Lasers auf einem vergleichbaren Niveau. Damit sind auch beim Laserstrahltrennen von CFK mit einem Faserlaser Oberflächenqualitäten zu erzielen, die auf einem vergleichbaren Niveau wie beim Fräsen liegen, siehe Kapitel 2.2.

b.) Einfluss der Wellenlänge des verwendeten Laserstrahls auf die Qualität der Schnittfläche

Es gehört zum Stand der Kenntnisse, dass die Absorption von Laserstrahlung in technischen Werkstoffen insbesondere abhängig von der Wellenlänge ist. Daher wurde anhand der Kriterien Schnittfugenbreite, Ausdehnung der WEZ sowie der maximal trennbaren Laminatdicke der Einfluss der Wellenlänge der Laserstrahlung beim Laserstrahltrennen des definierten CFK-Standardlaminats aufgezeigt.

Da der minimal realisierbare Fokusdurchmesser, der auf dem Werkstück realisierbar ist, insbesondere abhängig von der verwendeten Anlagensystemtechnik, z. B. Laserstrahlerzeugung, -führung und -fokussierung, ist, können die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen realisierten Schnittfugenbreiten nicht absolut miteinander verglichen werden. Es besteht daher die Notwendigkeit, die theoretische minimale Breite zu bestimmen, die mit der jeweiligen Anlagentechnik erzielt werden kann. Diese ist im Wesentlichen anhängig vom minimalen Fokusdurchmesser, siehe Kapitel 2.3.1. Daher wird die relative, prozentuale Schnittfugenbreite gemäß der Gleichung

$$relative \ Schnittfugenbreite = \frac{realeSchnittfugenbreite}{Fokusdurchmesser}$$
(5.1)

bestimmt. Bei einer idealen Schnittfuge, bei der die Breite der Schnittfuge dem Fokusdurchmesser entspricht, nimmt die relative Schnittfugenbreite den Wert 1 bzw. 100 %, an. Die reale Schnittfugenbreite ist typischerweise größer als die ideale, sodass dann Werte größer als 1 bzw. größer 100 % erreicht werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Wellenlänge auf die gemessene, reale Schnittfugenbreite wurden an dem definierten CFK-Laminat, siehe Kapitel 3.2, der Dicken 1,0 und 2,0 mm experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahltrennen durchgeführt und die Breite der Schnittfuge messtechnisch erfasst. Die dabei verwendete Anlagentechnik ist im Anhang 8.5 dargestellt.

Die experimentell ermittelte Breite der Schnittfuge für das Laserstrahltrennen des CFK-Laminats bei steigender Vorschubgeschwindigkeit bei Verwendung eines Faserlasers ist in Abbildung 5.1 dargestellt und für einen CO₂-Laser in Abbildung 5.3. Der konstante, jeweilige Fokusdurchmesser von 98 μ m für die Faser- und 136 μ m für die CO₂-Laserstrahlquelle ist zum Vergleich ebenfalls eingetragen. Bei Verwendung einer Faserlaserstrahlquelle nimmt die auftretende Schnittfugenbreite kontinuierlich ab, bis keine vollständige Trennung des CFK-Laminats mehr erfolgt. Die Verwendung einer CO₂-Laserstrahlquelle führt zu einer Zunahme der Schnittfugenbreite mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit.


Abbildung 5.3: Vergleich der Ausdehnung der Schnittfugenbreite und des Fokusdurchmessers bei steigender Vorschubgeschwindigkeit (CO₂-Laserstrahlquelle, $P_L = 1.5$ kW, CFK-Standardlaminat mit t = 1,0 mm)

In Abbildung 5.4 ist der Vergleich der relativen Schnittfugenbreite für das Laserstrahltrennen mit einer CO₂- und Faserlaserstrahlquelle dargestellt. Dabei wird die Differenz zwischen dem verwendeten Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1,07 μ m und einem CO₂-Laser mit 10,6 μ m deutlich. Die relative Schnittfugenbreite eines Faserlasers ist hierbei mehr als 240 % größer als der Fokusdurchmesser, sowohl beim Laserstrahltrennen eines 1,0 mm als auch eines 2,0 mm dicken Laminats. Bei der Verwendung einer CO₂-Laserstrahlquelle beträgt die relative Schnittfugenbreite weniger als 120 %. Im Rahmen dieser Untersuchungen kann ein Einfluss der Wellenlänge auf die Breite der Schnittfuge festgestellt werden. Für die industrielle Anwendung besteht daher die Notwendigkeit, diese breitere Schnittfuge, z. B. durch Einstellung eines Aufmaßes bei der Konturbearbeitung, zu berücksichtigen. Geeignete Prozessparameter sind dabei jedoch für jeden Anwendungsfall zu validieren, da an dieser Stelle dazu keine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann.

Wie bereits in Kapitel 4.2 dargestellt, ist die Ausdehnung der WEZ ein bedeutendes Qualitätskriterium beim Laserstrahltrennen von CFK-Laminaten. Daher wurde die Abhängigkeit der Ausdehnung der WEZ von der Wellenlänge ebenfalls untersucht. Zu diesem Zweck wurden wiederum an dem definierten CFK-Laminat der Dicke 1,0 und 2,0 mm experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahltrennen mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt. Dabei betrug der Vorschub $v_1 = 5,0$ m/min für das Laminat mit einer Dicke von 1,0 mm und $v_2 = 3,0$ m/min für eine Dicke von 2,0 mm. Die unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten wurden gewählt, um eine prozesssichere Trennung zu gewährleisten.



Abbildung 5.4: Mittlere relative Schnittfugenbreite im Verhältnis zum Fokusdurchmesser für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats mit EP-Matrix (mit $v_f = 5,0$ m/min und CFK-Standardlaminat)

Wie in Abbildung 5.5 dargestellt, ist für eine Laminatdicke von 1,0 mm nahezu kein Unterschied bezüglich der Ausdehnung der WEZ bei Verwendung einer CO₂- oder Faserlaserstrahlquelle zu beobachten. Die geringe Differenz von weniger als 10 μ m ist im Rahmen der Messungsgenauigkeit und der praktischen Anwendung des Laserstrahltrennens vernachlässigbar gering. Bei einer Laminatdicke von 2,0 mm beträgt die Differenz nahezu 200 μ m. Das bedeutet, dass mit steigender Dicke des Laminats der Einfluss der Wellenlänge und damit der Absorption auf die Ausdehnung der WEZ zunimmt. Somit bleibt festzuhalten, dass bei Verwendung von Festkörperlaserstrahlquellen insbesondere bei geringen Laminatdicken von weniger als 1,0 mm identische Qualitäten der Schnittfläche realisierbar sind.

Im Rahmen weiterer experimenteller Untersuchungen wurde die maximale Laminatdicke ermittelt, die bei einer vorgegebenen Laserstrahlleistung noch prozesssicher getrennt wird, siehe Abbildung 5.6. Der Einfluss der höheren Absorption bei Verwendung einer CO_2 - anstelle einer Faserlaserstrahlquelle ist dabei deutlich zu erkennen. Hierbei ist festzuhalten, dass bei einer identischen Laserstrahlleistung die Differenz der maximal zu trennenden Laminatdicke ca. 1,0 mm beträgt. Im Rahmen dieser experimentellen Untersuchen wurde darüber hinaus ersichtlich, dass sowohl höhere maximale Laminatdicken als auch Vorschubgeschwindigkeiten realisierbar sind.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die höhere Absorption von CO_2 -Laserstrahlung der Wellenlänge 10,6 μ m zu geringfügig höherer Qualität sowie Produktivität führt. Dennoch wird deutlich, dass das Laserstrahltrennen auch mit einer Wellenlänge von



Abbildung 5.5: Vergleich der Ausdehnung der WEZ für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminates (mit $v_1 = 5,0$ m/min, $v_2 = 3,0$ m/min und CFK-Standardlaminat)



Abbildung 5.6: Ermittlung der maximal trennbaren Laminatdicke bei einem CFK-Laminat mit EP-Matrix (für eine minimale Vorschubgeschwindigkeit von 4,0 m/min und das CFK-Standardlaminat)

ca. 1,0 μ m bzw. mit Festkörper- oder Faserlaserstrahlquellen zu Schnittflächen hoher Qualität führt. Bisher gehörte es zum Stand des Wissens, siehe Kapitel 2.2.2, dass Laserstrahlquellen mit einer Wellenlänge von 1,0 μ m nicht zur Bearbeitung von CFK geeignet sind. Anhand der experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit den neuartigen Laserstrahlquellen, mit hoher Leistung und hoher Brillianz, diese Erkenntnisse nicht mehr allgemeine Gültigkeit besitzen. Insbesondere für Laminatstärken von 2,0 mm oder weniger, wie sie z. B. im Automobilbau zur Anwendung kommen, stellt der Festkörper- oder Faserlaser heute eine flexible Alternative zum CO₂-Laser dar. Zur automatisierten Bearbeitung von Bauteilen mit komplexer 3D-Kontur sind hohe Anforderungen hinsichtlich Geometrieflexibilität des Handhabungsgerätes und der Laserstrahlführung zu erfüllen. Dazu ist die Möglichkeit der flexiblen Laserstrahlführung mittels Lichtleitfasern, die nur bei Festkörper- und Faserlasern und jedoch nicht bei CO₂-Laserstrahlquellen möglich ist, ideal geeignet. Für einfache 2D-Geometrien sowie Laminatstärken größer 3,0 mm sind heute mit dem CO₂-Laser noch höhere Qualitäten der Schnittfläche realisierbar. Durch zukünftige Weiterentwicklungen im Bereich der Laserstrahlleistung und -qualität von Festkörper- und Faserlasern ist zu erwarten, dass die maximal bearbeitbaren Laminatdicken zukünftig deutlich zunehmen werden, bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Qualität der Schnittfläche. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass gegenüber dem Stand der Technik eine deutliche Verbesserung der Qualität realisiert werden kann und auch der Festkörperund Faserlaser heute zur Bearbeitung von CFK geeignet ist.

5.3 Allgemeine Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses von Faserverbundkunststoffen

5.3.1 Vorgehensweise zur Modellbildung

Ziel der Modellbildung ist die Entwicklung einer umfassenden mathematischen Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses von FVK, siehe Abbildung 5.7, die es ermöglicht, die Ausdehnung der WEZ im Vorfeld der praktischen Untersuchung zu berechnen.



Abbildung 5.7: Vorgehensweise zur Modellierung des Laserstrahltrennprozesses von FVK

Dazu ist zunächst die Energieeinkopplung in den Werkstoff unter Berücksichtigung der Strahl-Werkstoff-Wechselwirkung mit Hilfe geeigneter mathematischer Beziehungen modellhaft abzubilden. Darüber hinaus sind die Werkstoffumwandlungsprozesse vom festen in den gasförmigen Materialzustand zu modellieren. Im Anschluss daran sind die Mechanismen der Wärmeübertragung im FVK zu beschreiben. Die thermophysikalischen Eigenschaften eines FVK-Laminats sind wesentlich von dem Faservolumenanteil und dem Laminataufbau abhängig. Daher sind geeignete mathematische Beschreibungen für diese Eigenschaften aufzustellen.

Das entwickelte Prozessmodell wird im Anschluss daran mittels analytischer und numerischer Methoden gelöst und damit die Ausdehnung der WEZ berechnet. Das Vorgehen zur Berechnung ist in Kapitel 5.4 dargestellt.

5.3.2 Beschreibung der Energieeinkopplung in den Werkstoff

Es ist typischerweise das Ziel einer Modellbildung, ein abstraktes Modell eines realen Prozesses oder Systems zu erstellen. Mit dem Erstellen eines Modells wird der Prozess in hohem Maße abstrahiert, da die Realität im Allgemeinen sehr komplex ist und häufig nicht alle Einflussgrößen vollständig bekannt sind. Dabei werden zur Reduktion der Komplexität des Modells häufig nur die wesentlichen Einflussfaktoren berücksichtigt. Diese Reduktion der Komplexität erlaubt es, mathematische Modelle zu entwickeln, die die realen Vorgänge eines komplexen Systems beschreiben. Mit Hilfe der Modellbildung und Simulation kann ermittelt werden, wie sich systematische Änderungen an den Einflussgrößen auf den realen Prozess auswirken.

Aufbauend auf der in Abschnitt 2.3 dargestellten Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses wird in diesem Abschnitt ein Modell der Wirkmechanismen aufgestellt. Hierzu werden die Energieeinkopplung der Laserstrahlung in den Werkstoff sowie die resultierende Ausdehnung der Wärmeeinflusszone durch Lösung des Modells mittels analytischer und numerischer Verfahren bestimmt.

Der Laserstrahltrennprozess wird im Wesentlichen durch die Laserstrahlleistung P_L , Strahlradius w, Strahlintensität I und Wellenlänge λ beschrieben. Für die Laserstrahlleistung in Abhängigkeit von der Intensität gilt [BM93, Dau95, JB93, Pet06, The08]

$$P_L = 2\pi \cdot \int_0^\infty I(r) \cdot r dr \quad . \tag{5.2}$$

Die Strahlintensität für beispielsweise einen CO_2 -Laser ergibt sich aufgrund eines angenäherten Gaußprofils ($TEM_{0,0}$) zu

$$I(r) = I_{max} \cdot e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \quad . \tag{5.3}$$

Dabei beschreibt w
 die Stelle entlang des Gaußstrahls, an der die Intensität auf
e^2=13,5 % gefallen ist. Aus der Kombination von Gleichung 5.2 und 5.3 ergibt sich

$$I_{max} = \frac{2 \cdot P_L}{\pi \cdot r^2} \quad . \tag{5.4}$$

Die Wellenlänge einen Laserstrahls wird durch die Art der Laserstrahlerzeugung bestimmt und ist durch die Anlagentechnik vorgegeben. Die Wellenlänge λ bestimmt als dominierende Größe die Absorption des Laserstrahls im Werkstück.



Abbildung 5.8: Absorptionsgrad unterschiedlicher Werkstoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge [Geb03]

a.) Absorption

Die Energie eines Laserstrahls wird beim Auftreffen auf ein Werkstück nicht vollständig in den Werkstoff eingekoppelt. Einerseits kommt es durch Reflexion des Laserlichts an der Materialoberfläche zur Reduktion der effektiven Laserstrahlleistung, siehe Abbildung 2.16. Andererseits kann bei dünnwandigen Werkstücken Laserstrahlung vollständig durch den Werkstoff transmittieren. Dabei gilt

$$A_G + R_G + T_G = 1 \quad , (5.5)$$

mit A_G : Absorptionsgrad, R_G : Reflexionsgrad und T_G : Transmissionsgrad [Dem08, Dem09, Str01].

Der absorbierte Anteil der Laserstrahlung wird im Werkstoff in Wärme umgewandelt und beeinflusst maßgeblich den Laserstrahltrennprozess. Der Absorptionsgrad A_G ist definiert als das Verhältnis von absorbierter Leistung zur eingefallen Leistung. Dieser Betrag ist im Wesentlichen abhängig von der Wellenlänge und Intensität des Laserstrahls sowie der Temperatur des Werkstoffs und der Beschaffenheit der Werkstückoberfläche [BM93, Geb03]

$$A_G = f(\lambda, I, T, R_z, R_a) \quad . \tag{5.6}$$

In Abbildung 5.8 ist der Absorptionsgrad verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Absorptionsgrad bei einer Wellenlänge von $\lambda = 10.6 \ \mu m$ für Kunststoffe, in Abbildung 5.8 als Isolatoren bezeichnet, ein Maximum einnimmt.

Grundsätzlich wird bei der Absorption von Laserstrahlung zwischen Oberflächen- und Volumenabsorption unterschieden [Tra92]. Bei metallischen Werkstoffen erfolgt die Absorption in einer dünnen Schicht, sodass von einer reinen Oberflächenabsorption ausgegangen werden kann. Bei Kunststoffen wird typischerweise von einer reinen Volumenabsorption ausgegangen, insbesondere bei dünnen Folien. Dabei liegt die optische Eindringtiefe in der Größenordnung der Materialstärke, siehe dazu Kapitel 2.3.4 [Kle90, JB93].

b.) Reflexion

Neben der Absorption führt die Reflexion zu einer Abnahme der Strahlungsintensität. Der Reflexionsgrad R_G ist definiert als das Verhältnis von reflektierter Leistung zur einfallenden Leistung. Der an der Oberfläche des Werkstückes reflektierte Anteil des Laserstrahls ist Teil der Verlustleistung und trägt nicht zur Erwärmung des Werkstoffes bei. Dabei ist der Reflexionsgrad im Wesentlichen abhängig von der Wellenlänge sowie der Temperatur und Rauheit der Werkstoffoberfläche

$$R_G = f(\lambda, T, R_z, R_a). \tag{5.7}$$

c.) Transmission

Verhält sich ein Werkstoff transparent für die einfallende Laserstrahlung, so wird die Strahlung in tiefere Schichten des Werkstoffes weitergeleitet und kann an der Probenunterseite austreten. Der Transmissionsgrad T_G ist definiert als das Verhältnis von transmittierter zur einfallenden Leistung. Der Transmissionsgrad ist nach Klein [Kle90] werkstoff- und wellenlängenabhängig.

Beim Laserstrahltrennen von FVK mit einer Werkstückdicke von mehreren Millimetern ist der Transmissionsgrad nach Trasser [Tra92] vernachlässigbar gering ($T_G \approx 0$), sodass sich die Gleichung 5.5 reduziert zu

$$A_G + R_G = 1$$

$$1 - R_G = A_G$$
(5.8)

mit $T_G \approx 0$.

d.) Absorptionsvorgang von Laserstrahlung in Faserverbundkunststoffen

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen kann der Absorptionsvorgang von infraroter Laserstrahlleistung in FVK nicht mit dem so genannten Drude-Modell beschrieben werden, da das Drude-Modell den Ladungstransport in Metallen beschreibt [GH06, SB67]. Die Energieabstände zwischen Valenz- und Ladungsband sind bei Nichtleitern bzw. Isolatoren so groß, dass eine Anregung der Elektronen auf Leitungsbandniveau nicht möglich ist. Vielmehr resultiert die Absorption in angeregten Gitterschwingungen der Molekülketten. Dieses geschieht aufgrund infraroter Strahlung und der durch diese verursachte Erwärmung des Werkstoffes [GH06, SB67, Tra92, The08].

Für Polymerwerkstoffe kann die Abschwächung der Laserstrahlintensität in Abhängigkeit von der Eindringtiefe mit dem Lambert-Beer´schen-Gesetz beschrieben werden. Unter Annahme konstanter Werkstoffeigenschaften gilt [Kle90]

$$I_1(z) = I_0 \cdot e^{-a \cdot z} , (5.9)$$

mit dem Absorptionskoeffizient a .

Der Absorptions- bzw. Extinktionskoeffizient a ist abhängig von der Wellenlänge und den optischen Werkstoffeigenschaften, siehe Gleichung 5.10. Der Kehrwert ist die optische Eindringtiefe d_p und gibt an, bei welcher Eindringtiefe die Intensität auf den e^{-1} -ten Teil, entspricht 37 %, abgefallen ist [Bec03]

$$a = \frac{1}{d_p} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \kappa_i}{\lambda} \quad , \tag{5.10}$$

mit dem Absorptionsindex κ_i .

In Abbildung 5.9 ist die Abnahme der Strahlungsintensität mit zunehmender Materialtiefe nach dem Lambert-Beer´schen Gesetz [Bec03] dargestellt.

Der Absorptionsindex berechnet sich nach Gleichung 5.11 [Kle90]

$$\kappa_i = \sqrt{\frac{N \cdot q^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot m \cdot \nu_0 \cdot \gamma}} \quad , \tag{5.11}$$

mit:

N: Anzahl der schwingungsfähigen Atome,

q: Ladung des Systems,

 ν_0 : Resonanz frequenz,

 γ : Dämpfungskonstante,



Abbildung 5.9: Abnahme der Strahlungsintensität mit zunehmender Materialtiefe nach dem Lambert-Beer 'schen-Gesetz [Bec03]

m: reduzierte Masse des Systems sowie ϵ_0 : Dielektrizitätskonstante .

Die vom Werkstoff absorbierte Laserstrahlleistung $P_{abs}(z)$ berechnet sich gemäß den Gleichungen 5.2, 5.8 und 5.9 nach Petring und Trasser zu [Pet95, Tra92]

$$(1 - R_G) \cdot P_L - P_{abs}(z) = (1 - R_G) \cdot P_L \cdot e^{-a \cdot z}$$
$$P_{abs}(z) = P_L \cdot (1 - R_G) \cdot (1 - e^{-a \cdot z}) \quad .$$
(5.12)

5.3.3 Darstellung der Mechanismen der Wärmeübertragung im Faserverbundwerkstoff

Grundsätzlich wird Wärme durch die drei Mechanismen Konvektion, Strahlung und Leitung transportiert [DHW93, Her00, Her06].

a.) Wärmeübertragung durch Konvektion

Konvektion bezeichnet dabei den Wärmetransport zwischen einem Körper und einem Fluid bzw. zwei Fluiden, die sich in Relativbewegung zueinander befinden. Wird die Fluidbewegung durch äußere Einflussnahme, z. B. durch eine Pumpe, verursacht, spricht man von erzwungener Konvektion. Freie bzw. natürlich Konvektion liegt vor, wenn die Fluidbewegung aufgrund der von Temperaturdifferenzen hervorgerufenen Dichteunterschiede zustande kommt [Lon99].

Die Strömungsgeschwindigkeit des Prozessgases ist beim Sublimierschneiden so gering, dass hier von einer freien Konvektion ausgegangen werden kann. Der Wärmestrom aufgrund freier Konvektion berechnet sich aus der Temperaturdifferenz und der Wärmeübertragungsfläche gemäß Gleichung 5.13

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Konvektion} = \alpha \cdot A \cdot \left(T_{Solid} - T_{Gas}\right) \quad , \tag{5.13}$$

mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α [Her00].

b.) Wärmeübertragung durch Strahlung

Wärmeübertragung erfolgt darüber hinaus durch Wärmestrahlung, d. h. aufgrund elektromagnetischer Wellen. Im Gegensatz zur Konvektion und Leitung ist kein Trägermedium erforderlich. Die quantitative Beschreibung ergibt sich aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz [Her00]

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Strahlung} = \epsilon_{1,2} \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad . \tag{5.14}$$

Mit Hilfe des Emissionsgrades $\epsilon_{1,2}$ wird die Abweichung der Wärmestrahlung zwischen einem idealen, sog. schwarzen, Körper und realen, sog. grauen, Körpern kompensiert. Dieser misst das Verhältnis aus der tatsächlich von einem Körper emittierten Strahlung zu der eines schwarzen Körpers mit gleicher Temperatur [DHW93, Str95].

c.) Wärmeübertragung durch Leitung

Unter Wärmeleitung versteht man den Energietransport infolge von atomarer und molekularer Wechselwirkung unter dem Einfluss unterschiedlicher Temperaturverteilung. Die allgemeine Beschreibung der Wärmeleitung nach Fourier [GS90] lautet

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Leitung} = A \cdot \nabla \cdot \left(-\lambda \cdot \nabla \cdot \vartheta\right) \quad . \tag{5.15}$$

Für die orts- und zeitabhängige Temperaturverteilung ergibt sich in allgemeiner Form nach Grigull [GS90]

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad . \tag{5.16}$$

5.3.4 Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der Energiebilanz beim Laserstrahltrennen

5.3.4.1 Energiebilanz beim Laserstrahltrennen

Zur Ermittlung der Temperaturverteilung des Laserstrahltrennprozesses wird die Energiebilanz bestimmt zu

$$P_{Laser} = P_{Sublimation} + P_{Verlust}.$$
(5.17)

Der Leistungsbedarf, der zur Sublimation des Werkstoffes in der Schnittfuge aufgebracht werden muss, berechnet sich nach Poprawe [Pop05]

$$P_{Sublimation} = b_c \cdot t \cdot v_f \cdot \rho_{eff} \cdot (c_{p,eff} \cdot (T_z - T_{UB}) + h_{z,eff}) \quad , \tag{5.18}$$

mit der b_c : Schnittfugenbreite, t : Laminatdicke, v_f : Vorschubgeschwindigkeit, ρ_{eff} : effektive Werkstoffdichte, $c_{p,eff}$: effektive, spezifische Wärmekapazität, $h_{z,eff}$: effektive, spezifische Zersetzungsenthalpie, $\mathbf{T}_z:$ Zersetzungstemperatur sowie

 \mathbf{T}_{UB} : Umgebungstemperatur .

In das in Gleichung 5.18 dargestellte mathematische Modell zur Berechnung des Leistungsbedarfs zum Laserstrahlsublimieren nach Poprawe gehen die effektiven Stoffwerte für die Werkstoffdichte ρ_{eff} , die effektive, spezifische Wärmekapazität $c_{p,eff}$ sowie die effektive, spezifische Zersetzungsenthalpie $h_{z,eff}$ als Parameter ein. Da diese Stoffwerte für mehrkomponentige FVK im Allgemeinen nicht bekannt sind, wird im Folgenden ein Modell zu deren Berechnung erstellt. Diese Stoffwerte sind im Wesentlichen abhängig von dem Volumen- bzw. Masseanteil der Fasern im Laminat, sodass deren Werte jeweils in Abhängigkeit von diesen Anteilen bestimmt werden.

Die durch die Mechanismen Konvektion, Strahlung und Leitung transportierten Wärmeströme stehen dem Zersetzungsprozess nicht als Energie zur Verfügung und werden daher als Verlustleistung $P_{Verlust}$ bezeichnet. Die Verlustleistung wird, wie in Gleichung 5.19 dargestellt, durch Addition der Gleichungen 5.13, 5.14 und 5.15 bestimmt zu

$$P_{Verlust} = \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Verlust} = \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Konvektion} + \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Strahlung} + \left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Leitung} \quad . \quad (5.19)$$

5.3.4.2 Zusammenhang zwischen Volumen- und Massenanteil bei Faserverbundkunststoffen

Ein mehrkomponentiger FVK kann nicht ausschließlich durch die Eigenschaften einer Komponente des Verbundes beschrieben werden. Typischerweise besteht ein FVK aus zwei Komponenten, aus der Verstärkungsfaser und einer die Fasern umgebenden Matrix. Beide Komponenten sind bei der Bestimmung der Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Der FVK wird im Allgemeinen durch den Fasergehalt bzw. Faseranteil charakterisiert. Dieser wird in der Regel in Volumenprozent angegeben [Ehr06]. Dabei gilt

$$\varphi = \frac{V_{Faser}}{V_{FVK}} = \frac{V_{Faser}}{V_{Faser} + V_{Matrix}} \quad . \tag{5.20}$$

Der Fasergehalt in Massenprozent berechnet sich gemäß folgender Gleichung [Ehr06]

$$\psi = \frac{m_{Faser}}{m_{FVK}} \quad . \tag{5.21}$$

Die Beziehung zwischen dem Volumen- und Massenanteil unter Berücksichtigung der Dichte der Komponenten, vergleiche Kapitel 3.2, beschreibt die Gleichung

$$\psi = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \cdot \frac{\rho_{Matrix}}{\rho_{Faser}}} \quad . \tag{5.22}$$

Nach Ehrenstein u. a. [Ehr06, Sch91] sind typische Fasergehalte für industriell relevante FVK ca. 45 bis 65 %. Im Rahmen dieser Arbeit werden im Wesentlichen CFK-Werkstoffe betrachtet. Daher wird der jeweilige mathematische Zusammenhang zur Bestimmung der effektiven Stoffwerte zuerst für den allgemeinen Anwendungsfall hergeleitet und anschließend für den definierten Versuchswerkstoff, siehe Kapitel 3.2 beispielhaft berechnet und dargestellt.

5.3.4.3 Berechnung der effektiven Dichte

Die Dichte eines Stoffes gibt dessen auf sein Volumen bezogenes Gewicht an

$$\rho = \frac{m}{V}.\tag{5.23}$$

Für einen aus mindestens zwei Komponenten zusammengesetzten Werkstoff kann bei Kenntnis der Dichte der einzelnen Komponenten und deren Volumenanteile die effektive Dichte berechnet werden

$$\rho_{eff} = \frac{m_{FVK}}{V_{FVK}}
= \frac{\rho_{Faser} \cdot V_{Faser} + \rho_{Matrix} \cdot V_{Matrix}}{V_{FVK}}
= \frac{\rho_{Faser} \cdot V_{Faser}}{V_{FVK}} + \frac{\rho_{Matrix} \cdot V_{Matrix}}{V_{FVK}}
= \varphi \cdot \rho_{Faser} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{Matrix},$$
(5.24)

mit $m_{FVK} = \rho_{Faser} \cdot V_{Faser} + \rho_{Matrix} \cdot V_{Matrix}$.

In Abbildung 5.10 ist die Zunahme der Dichte eines CFK für ansteigende Faservolumenanteile dargestellt. Aufgrund der vergleichbaren Dichten von Faser- und Matrixwerkstoffen ist für die effektive Dichte eine nahezu lineare Zunahme mit steigendem Faservolumenanteil festzustellen.



Abbildung 5.10: Berechnete effektive Dichte für ein CFK-Laminat (mit $\rho_{Matrix} = 1.200 \text{ kg/m}^3 \text{ und } \rho_{Faser} = 1.780 \text{ kg/m}^3$)

5.3.4.4 Berechnung der effektiven spezifischen Wärmeleitfähigkeit

Zur Modellierung des Laserstrahltrennprozesses ist es erforderlich, die thermischen Eigenschaften des zu trennenden Werkstoffes zu kennen. Beim Sublimierschneiden eines FVKs mittels Laserstrahlstrahlung sind die thermischen Eigenschaften in Abhängigkeit von dem Faser- und Matrixwerkstoff sowie deren Anordnung zu bestimmen. In Tabelle 5.1 sind die relevanten Stoffwerte von Glas- und Kohlenstofffasern im Vergleich zu Epoxidharz dargestellt.

Werkstoff	Diche ρ	Wärmeleitfähigkeit k	spez. Wärmekapazität c_p
	(kg/m^3)	$(W/(m \cdot K))$	$(J/(kg \cdot K))$
Epoxidharz	1.200	0,2	1.200
Glasfaser	2.500	1,0	840
Kohlefaser	1.780	50,0	710

Tabelle 5.1: Vergleich der Stoffwerte von Glas-, Kohelstofffasern und Epoxidharz [HK93, Hoe00, PH00]

Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, den Laminataufbau des FVKs zu berücksichtigen. Bei FVK mit unidirektionalem Faserverlauf verursacht die anisotrope Beschaffenheit unterschiedliche Temperaturgradienten mit unterschiedlicher Orientierung im Laminat [TDIV85, TD89]. Dieses hat eine uneinheitliche Temperaturverteilung und damit eine uneinheitliche WEZ im Bereich der Schnittkante zur Folge.

Im speziellen Fall des unidirektionalen (UD) Faserverlaufs lassen sich grundlegende Beziehungen für richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeiten beschreiben. In Abbildung 5.11 ist der Schnittfugenverlauf parallel und senkrecht zum Faserverlauf dargestellt [PH00].



Abbildung 5.11: Schnittfuge parallel (a) und senkrecht (b) zum Faserverlauf [PH00]

Die mathematische Beziehung für die gerichtete Wärmeleitfähigkeit k
 für einen unidirektionalen FVK in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Faser
k_{Faser}, dem Faseranteil φ sowie der Wärmeleitfähigkeit der Matrix
 k_{Matrix} lautet [PH00]

$$k_1 = \varphi \cdot k_{Faser} + (1 - \varphi) \cdot k_{Matrix} \tag{5.25}$$

$$\frac{1}{k_2} = \frac{\varphi}{k_{Faser}} + \frac{(1-\varphi)}{k_{Matrix}} \quad , \tag{5.26}$$

mit den Indizes

1: parallel zur Faserrichtung und 2: senkrecht zur Faserrichtung.

Mit diesem Zusammenhang kann die Wärmeleitung mit einer Faseranordnung parallel oder senkrecht zur Schnittkante bestimmt werden. In Tabelle 5.2 sind beispielhaft die Wärmeleitfähigkeit für den senkrechten bzw. parallelen Faserverlauf für das definierte CFK-Laminat, siehe Kapitel 3.2, dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit in paralleler Richtung die der senkrechten Richtung um bis zu 500 % übersteigt.

Dichte ρ			1.432
(kg/m^3)			
Wärmeleitfähigkeit k	parallel	\mathbf{k}_1	4,5
$(W/m \cdot K)$	$\operatorname{senkrecht}$	\mathbf{k}_2	$0,\!67$
spez. Wärmekapazität c_p			1.004
$(J/kg \cdot K)$			

Tabelle 5.2: Wärmeleitfähigkeit und -kapazität nach Pan und Hocheng für ein CFK-Laminat mit EP-Matrix ($\varphi = 40 \%$)[PH00]

a.) Berechnung der Wärmeleitfähigkeit für multidirektionale Mehrschichtverbunde

Für multidirektionale Mehrschichtverbunde können die thermischen Eigenschaften in Analogie zur klassischen Laminattheorie betrachtet werden. Nach Stephan [Ste99] ist unter bestimmten Anordnungsvoraussetzungen der Laminatschichten das Wärmeausdehnungsverhalten isotrop. Die vorherrschende Anisotropie wird aufgehoben, wenn der Mehrschichtverbund Symmetrie aufweist, d. h. wenn zwei unidirektionale Schichten mit einer Ausrichtung von 90° zueinander liegen, die so genannte $[0/90, \pm 45/45]_s$ - Anordnung, oder wenn drei Schichten mit 60°, die so genannte $[60/60/60]_s$ - Anordnung, zueinander liegen, siehe Abbildung 2.6. Das bedeutet, dass die thermischen Eigenschaften eines Laminates im Rahmen der Modellgenauigkeit als isotrop betrachtet werden können. Diese Verhalten wird auch als quasi-isotrop bezeichnet. Da die Wärmeausdehnungskoeffizienten für FVK die gleiche Richtungsabhängigkeit aufweisen wie die Wärmeleitfähigkeit [Ste99], werden in weiteren Berechnungen die Erkenntnisse zum isotropen Verhalten bei symmetrsischen Mehrschichtverbunden auf die Wärmeleitfähigkeit übernommen. Dieses Vorgehen wurde auch von Pan und Hocheng gewählt und validiert [PH00]. Identische Erkenntnisse wurden von Uhlmann [USH⁺97] erzielt. Es wird gezeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit von 0/90 - Laminaten in x- und y-Richtung gleich und somit isotrop ist. Damit kann die Wärmeleitfähigkeit nach Uhlmann [USH⁺97] mit folgender Beziehung berechnet werden

$$k_{ges} = k_x = k_y = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad , \tag{5.27}$$

mit den Indizes:

1: parallel zur Faserrichtung und 2: senkrecht zur Faserrichtung.

b.) Berechnung der Wärmeleitfähigkeit für symmetrische Mehrschichtverbunde

Die Wärmeleitfähigkeit von symmetrischen Mehrschichtverbunden, die aus unterschiedlich zueinander ausgerichteten Mehrschichtverbunden aufgebaut sind, für sich gesehen aber auch einen symmetrischen Aufbau besitzen, kann über die Gleichung 5.28 nach Grigull [GS90] beschrieben werden. In diesem Modell wird ein zu den Laminatschichten parallel verlaufender Wärmestrom angenommen

$$k_{eff} = k_{ges} = \frac{k_1 \cdot d_1 + \dots + k_m \cdot d_m}{d_1 + \dots + d_m} = \frac{1}{d_{ges}} \cdot \sum_{j=1}^m k_j \cdot d_j \quad .$$
(5.28)

5.3.4.5 Berechnung der effektiven spezifischen Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c_p gibt an, welche Wärmemenge einem Stoff mit bestimmter Masse zugeführt werden muss, um seine Temperatur um ein Kelvin zu erhöhen. Der Zusammenhang wird dabei durch folgende Gleichung beschrieben [Str95]

$$c_p = \frac{E}{m \cdot \Delta T} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \quad . \tag{5.29}$$

Für einen aus zwei Komponenten zusammengesetzten Werkstoff kann bei Kenntnis der spezifischen Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten und deren Massenanteil eine gemeinsame Wärmekapazität des FVK ermittelt werden. Für die Energiebetrachtung bei der Erwärmung des FVK gilt

5.3 Allgemeine Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses von Faserverbundkunststoffen

$$E_{FVK} = E_{Faser} + E_{Matrix}$$

= $c_p^{Faser} \cdot m_{Faser} \cdot \Delta T + c_p^{Matrix} \cdot m_{Matrix} \cdot \Delta T$. (5.30)

Aus Kombination der Gleichungen 5.29 und 5.30 erhält man

$$c_{p,eff} = \frac{E_{FVK}}{m_{FVK} \cdot \Delta T}$$

$$= \frac{c_p^{Faser} \cdot m_{Faser} \cdot \Delta T + c_p^{Matrix} \cdot m_{Matrix} \cdot \Delta T}{m_{FVK} \cdot \Delta T}$$

$$= \frac{c_p^{Faser} \cdot m_{Faser}}{m_{FVK}} + \frac{c_p^{Matrix} \cdot m_{Matrix}}{m_{FVK}}$$

$$= c_p^{Faser} \cdot \psi + c_p^{Matrix} \cdot (1 - \psi) \quad . \tag{5.31}$$

Die spezifische Wärmekapazität für einen FVK in Abhängigkeit des Faservolumenanteils ergibt sich damit zu

$$c_{p,eff} = c_p^{Faser} \cdot \psi + c_p^{Matrix} \cdot (1 - \psi)$$

$$= c_p^{Faser} \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \cdot \frac{\rho_{Matrix}}{\rho_{Faser}}} \right)$$

$$+ c_p^{Matrix} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varphi} - 1\right) \cdot \frac{\rho_{Matrix}}{\rho_{Faser}}} \right) \quad . \tag{5.32}$$

Mit Hilfe dieser mathematischen Zusammenhänge kann die effektive spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil berechnet werden. In Abbildung 5.12 ist die Abnahme der Wärmekapazität eines CFK-Laminates mit zunehmenden Faservolumenanteilen dargestellt. Diese Abnahme ist durch die geringere Wärmekapazität des Verstärkungsfaserwerkstoffes im Vergleich zum Matrixwerkstoff, $c_p^{Matrix} = 1.100 \frac{J}{kg \cdot K}$ bzw. $c_p^{Faser} = 710 \frac{J}{kg \cdot K}$, zu erklären.

Lufteinschlüsse im Laminat werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Bei einem hohen Anteil an Luftanschlüssen besteht daher die Notwendigkeit, die Wärmekapazität mittels kalorimetrischer Messungen zu ermitteln bzw. die Luft als dritte Phase bei der Modelllierung und Simulation zu berücksichtigen. Da der Volumenanteil an



Abbildung 5.12: Berechnete effektive Wärmekapazität für CFK-Laminat (mit $\rho_{Matrix} = 1.200 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Faser} = 1.780 \text{ kg/m}^3$, $c_p^{Matrix} = 1.100 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ und $c_p^{Faser} = 710 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$)

Lufteinschlüssen im Laminat typischerweise gering ist, kann die Luft im Rahmen der Modellierung vernachlässigt werden.

In diesem Modell ist die Wärmekapazität für einen bestimmten Werkstoff jeweils konstant. In der Realität zeigt sich aber eine Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität. Insbesondere gilt dieses für Festkörper bei niedrigen Temperaturen [Her00, Stu08]. Dabei ist es zulässig, die thermophysikalischen Eigenschaften im Rahmen der hier vorgestellten Berechnungen als konstant anzunehmen, da der dadurch auftretende Fehler im Allgemeinen gering im Vergleich zur Modellungenauigkeit ist [USH⁺97, Lie98]. Darüber hinaus wird die Abschätzung der Modellungenauigkeit im weiteren Verlauf der Arbeit vorgenommen, siehe Kapitel 5.5.

5.3.4.6 Berechnung der effektiven spezifischen Zersetzungsenthalpie

Die Enthalpie ist das Maß für die Energie eines thermodynamischen Systems. Sie setzt sich zusammen aus innerer Energie U und der Volumenarbeit p \cdot V [Her06]

$$H = U + p \cdot V \quad . \tag{5.33}$$

Die Zersetzungs- bzw. Sublimationsenthalpie H_z ist die Energie, die aufgebracht werden muss, um eine bestimmte Masse einer Substanz isotherm und isobar vom festen

Aggregatzustand direkt in den gasförmigen Aggregatzustand zu überführen. Bezieht man die Enthalpie auf die Masse, erhält man die spezifische Enthalpie h_z

$$h_z = \frac{H_z}{m} = \frac{U_z}{m} \tag{5.34}$$

Analog zur Vorgehensweise bei der spezifischen Wärmekapazität setzt sich die Zersetzungsenergie eines FVK aus den Zersetzungsenergien der Komponenten Faser und Matrix zusammen

$$U_z^{FVK} = U_z^{Faser} + U_z^{Matrix}$$

= $h_z^{Faser} \cdot m_{Faser} + h_z^{Matrix} \cdot m_{Matrix}$ (5.35)

Für die effektive, spezifische Zersetzungsenthalpie für FVK gilt somit

$$h_{z,eff} = \frac{U_z^{Faser}}{m_{FVK}}$$

$$= \frac{h_z^{Faser} \cdot m_{Faser} + h_z^{Matrix} \cdot m_{Matrix}}{m_{FVK}}$$

$$= \frac{h_z^{Faser} \cdot m_{Faser}}{m_{FVK}} + \frac{h_z^{Matrix} \cdot m_{Matrix}}{m_{FVK}}$$

$$= h_z^{Faser} \cdot \psi + h_z^{Matrix} \cdot (1 - \psi)$$

$$= h_z^{Faser} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{1}{\varphi} - 1) \cdot \frac{\rho_{Matrix}}{\rho_{Faser}}}$$

$$+ h_z^{Matrix} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + (\frac{1}{\varphi} - 1) \cdot \frac{\rho_{Matrix}}{\rho_{Faser}}}\right) \quad . \tag{5.36}$$

Mittels des dargestellten mathematischen Zusammenhangs kann die effektive spezifische Zersetzungsenthalpie in Abhängigkeit des Faseranteils ermittelt werden. In Abbildung 5.13 ist die berechnete Zersetzungsenthalpie für ein CFK-Laminat mit steigendem Faservolumenanteil aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die spezifische Zersetzungsenthalpie mit zunehmendem Faseranteil stark ansteigt. Die signifikante Zunahme der effektiven, spezifischen Zersetzungsenthalpie mit zunehmendem Faservolumenanteil ist durch die deutlich höhere Zersetzungsenthalpie der Verstärkungsfasern zu erklären. Die Zersetzungsenthalpie der Faser ist um den Faktor 39 größer als die der Matrix, $h_z^{Matrix} = 1.100 \ \frac{J}{g}$ im Vergleich zu $h_z^{Faser} = 43.000 \ \frac{J}{g}$. Daher hat die Zunahme des Fa-



Abbildung 5.13: Berechnete effektive Zersetzungsenthalpie für ein CFK-Laminat (mit $\rho_{Matrix} = 1.200 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Faser} = 1.780 \text{ kg/m}^3$, $h_z^{Matrix} = 1.100 \text{ J/g}$ und $h_z^{Faser} = 43.000 \text{ J/g}$)

servolumenanteils auch eine Zunahme der effektiven, spezifischen Zersetzungsenthalpie zu Folge.

Die spezifische Zersetzungsenthalpie wird für die im Lasertrennprozess vorherrschenden Bedingungen als konstant angenommen. Die in diesem Abschnitt als konstant angenommenen Stoffwerte können durch thermische Analyseverfahren, wie z. B. die Dynamische Differenzkalorimetrie (engl. Differential Scanning Calorimetry, DSC), bestimmt werden.

5.4 Berechnung der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone

5.4.1 Vorgehensweise zur Lösung des Prozessmodells

Zur Berechnung der Ausdehnung der WEZ mittels des entwickelten Prozessmodells besteht die Notwendigkeit, das Prozessmodell durch mathematische Methoden zu lösen. Dazu sind sowohl analytische als auch numerische Lösungsverfahren, z. B. mittels der Finiten-Element-Methode (FEM), geeignet.



Abbildung 5.14: Vorgehensweise zur analytischen und numerischen Lösung des Prozessmodells

Die Vorteile der analytischen Lösung sind die hohe Berechnungsgeschwindigkeit bei der Lösung des Prozessmodells sowie die nahezu beliebig hohe örtliche Auflösung. Die Auflösung und Darstellung der zeitabhängigen Wärmeströme ist mit der analytischen Lösung jedoch nicht möglich. Dazu ist die numerische Lösung mittels der FEM geeignet. Diese Methode wird in zahlreichen Anwendungen zur Simulation mechanischer Beanspruchungen und Wärmeströme verwendet, siehe Kapitel 5.4.3. Von Nachteil ist dabei jedoch die geringe Berechnungsgeschwindigkeit, die je nach angestrebter Auflösung mehrere Stunden oder Tage betragen kann. Darüber hinaus können Instabilitäten des Lösungsalgorithmus und damit der verwendeten Softwaretools bei der Simulation auftreten. Diese sind die Folge hoher Temperaturgradienten, die bei der numerischen Modelllösung entstehen können, vergleiche Abbildung 5.22.

Unter Berücksichtigung der o. g. Ausführungen wird die Lösung des Modells und damit die Berechnung der Ausdehnung der WEZ sowohl mittels analytischer als auch numerischer Methoden erfolgen. Wie in Abbildung 5.14 dargestellt, wird bei der analytischen Lösung mit der Reduktion der Modellkomplexität begonnen. Das bedeutet, die Anzahl der zu betrachtenden Wärmetransportmechanismen, Wärmestrahlung, konvektion und -leitung, wird reduziert. Im Anschluss daran werden geeigente Randbedingungen definiert, die die Lösung des Modells ermöglichen. Diese definierten Randbedingungen werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Ergebnisgüte im weiteren Verlauf betrachtet, siehe Kapitel 5.5. Mit diesen Randbedingungen wird anschließend der Einfluss ausgewählter Technologieparameter auf die Ausdehnung der WEZ untersucht. Die berechneten Werte werden mittels der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen validiert.

Im Rahmen der numerischen Lösung des Modells mittels der FEM wird analog zu der analytischen Modelllösung vorgegangen. Zuerst werden die erforderlichen Randbedingungen, z. B. minimale Elementgröße oder Anzahl Finiter Elemente, definiert und im Anschluss daran die Ausdehnung der Temperaturfelder entlang der Schnittkante berechnet und analysiert. Da zeitabhängige Effekte der Wärmeleitung ausschließlich mit der numerischen Lösung betrachtet werden können, werden diese Effekte an dieser Stelle ebenfalls betrachtet. Die erzielten Ergebnisse werden im Anschluss daran kritisch betrachtet sowie die Modell- und Ergebnisgüte bewertet. Dazu werden die berechneten Ergebnisse anhand experimentellen Untersuchungen validiert sowie eine geeignete Fehlerbetrachtung und -abschätzung durchgeführt. Bei der Bewertung der Modell- und Ergebnissgüte wird der Schwerpunkt auf der analytischen Berechnung und Simulation liegen.

5.4.2 Analytische Lösung des Modells

a.) Reduktion der Komplexität des Modells

Wie in den Gleichungen 5.17 und 5.19 dargestellt, ist die erforderliche Laserstrahlleistung P_L die Summe aus Sublimationsleistung $P_{Sublimation}$ und Wärmeverlustleistung $P_{Verluste}$. Die Wärmeverlustleistung besteht im Wesentlichen aus den drei Komponenten Konvektion, Strahlung und Leitung. Zur Identifikation der relevanten Wärmeübertragungsmechanismen, werden die Maximalwerte der Wärmeströme für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminates berechnet. Die maximale Wärmestrahlung berechnet sich gemäß Gleichung 5.4.2

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)_{Strahlung} = \epsilon_{1,2} \cdot A_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4).$$

Die Oberfläche des CFK-Laminates kann maximal die Zersetzungstemperatur des Matrixwerkstoffes annehmen. Da die Stoffwerte von Verstärkungsfaser und Matrixwerkstoff erheblich voneinander abweichen, siehe Tabelle 5.2, wird zur Bestimmung der maximalen Wärmeströme daher als maximale Prozesstemperatur die Zersetzungstemperatur der Kohlenstofffaser $T_z = 3.573$ K verwendet. Die Umgebungstemperatur wird mit $T_{UB} = 293$ K (= 20 °C) angenommen. Mit einem Emissionsgrad von $\epsilon = 1$ wird bewußt der Wert eines idealen Strahlers gewählt. Der reale Emissionsgrad beträgt $\epsilon_{real} \leq 1$ [Str95].

Die natürliche Konvektion über der Werkstückoberfläche wird ebenfalls approximiert. Der Wärmeübergangskoeffizient für unterschiedliche Polymerwerkstoffe beträgt bei natürlicher Konvektion $\alpha = 5,0 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ [DHW93, LFC⁺09, Kle90]. Die Approximation der maximalen Wärmeverluste durch Konvektion ergibt sich zu

$$\dot{q}_{Konvektion,max} = \alpha \cdot (T_z - T_{UB})$$

$$= 5 \cdot (3.573K - 293K) \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$$

$$= 16, 4 \cdot 10^3 \frac{W}{m^2} \quad .$$
(5.37)

Der maximale Wärmestrom, der dem Prozes zur Verfügung steht, ist die Energie des Laserstrahls und beträgt beispielweise mit $P_L = 1,0$ KW und $d_f = 400 \ \mu m$ ca. $80 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$, vergleiche Petersen [Pet06].

In Tabelle 5.3 sind die Anteile der Wärmeverluste der maximalen Energie des Laserstrahls gegenübergestellt. Es ist deutlich, dass die Verlustanteile durch Strahlung und Konvektion vernachlässigbar gering im Vergleich zu der durch den Laserstrahl eingebrachten Energie sind.

	\dot{q}	%
	(W/m^2)	
Laserstrahlquelle	$80 \cdot 10^{8}$	100
Verlust durch Strahlung	$6,72 \cdot 10^{6}$	0,0845
Verlust durch Konvektion	$16,4 \cdot 10^{3}$	0,0002

Tabelle 5.3: Approximation der Wärmeströme nach Petersen [Pet06]

Der maximale Energieverlust durch Strahlung ergibt sich damit zu

$$\dot{q}_{Strahlung,max} = \epsilon_{CFK,Luft} \cdot \sigma \cdot (T_z^4 - T_{UB}^4)$$

$$= 1 \cdot 5,6703 \cdot 10^{-8} \cdot ((3.573K)^4 - (293K)^4)$$

$$= 6,72 \cdot 10^6 \frac{W}{m^2},$$
(5.38)

mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

Es ist daher zulässig, die Verluste durch Strahlung und Konvektion zu vernachlässigen, da diese Wärmeströme gering im Vergleich zu der durch die Laserstrahlquelle bereitgestellten Energie sind. Damit reduziert sich das Problem der Wärmeübertragung auf die Wärmeleitung beschrieben durch die Wärmeleitung nach Fourier, siehe Gleichung 5.15. Es handelt sich dabei um eine dreidimensionale partielle Differentialgleichung. Durch die Definition von Anfangs- und Randbedingungen lässt sich die Komplexität des Prozessmodells reduzieren, sodass eine analytische Berechnung möglich ist. Im folgenden Abschnitt ist die angewandte, analytische Lösung dargestellt.

b.) Analytische Lösung des Modells mit definierten Randbedingungen

Bei der Berechnung werden konstante thermophysikalische Koeffizienten für die Dichte ρ_{eff} , die Wärmekapazität $c_{p,eff}$, die Wärmeleitfähigkeit k_{eff} und eine konstante Vorschubgeschwindigkeit v_f angenommen. Aus der Kombination der Gleichungen 5.15 und 5.16 folgt dann [Pop05]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \cdot \Delta T - \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T + \frac{\omega}{\rho_{eff} \cdot c_{p,eff}} = \frac{k}{\rho_{eff} \cdot c_{eff}} , \qquad (5.39)$$

mit der Temperaturleitfähigkeit κ .

Die Methode der Green 'schen Funktion erlaubt eine Lösung der Gleichung 5.39 unter Annahme einer von der Zeit und dem Ort abhängigen Quelle. Die Theorie der Green 'schen Funktion ist bei Poprawe und Stoffel [LFC⁺09, Pop05, Sto92] dargestellt. Die Green 'sche Funktion für den zeitunabhängigen Fall lautet

$$G(\vec{r}, \acute{\vec{r}}) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \kappa} \cdot \frac{1}{\vec{r} - \acute{\vec{r}}} \cdot \exp\left(\frac{\vec{v} \cdot |\vec{r} - \acute{\vec{r}}|}{2 \cdot \kappa}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|\vec{v}| \cdot |\vec{r} - \acute{\vec{r}}|}{2 \cdot \kappa}\right) \quad . \tag{5.40}$$

Die allgemeine Lösung lautet

$$T(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\vec{r}, \dot{\vec{r}}) \cdot \frac{\omega(\dot{\vec{r}})}{\rho_{eff} \cdot c_{eff}} \cdot d^3 \cdot \dot{r} \quad .$$
(5.41)

In den Gleichungen 5.40 und 5.41 wird über den gesamten Raum integriert. In der Praxis werden aber im Allgemeinen nur endliche Werkstücke betrachtet.

Folgende Randbedingungen werden für die analytische Lösung der Green´schen Gleichung der Wärmeleitung angenommen [Pop05, Kap02]:

- Das Material wird als halbseitig adiabat und halb-unendlich ausgedehnt angesehen.
- Die thermophysikalischen Eigenschaften sind über den betrachteten Temperaturbereich konstant.
- Die Intensität des Laserstrahls ist über die Einwirkdauer konstant.
- Es erfolgt keine Wärmeleitung in z-Richtung entlang der z-Achse des Laserstrahls.
- Die Intensität der Laserstrahlung wird nicht durch das zersetzte Material beeinflusst.

Die Energieeinkopplung kann mit Hilfe der Randbedingungen durch Vorgabe eines Wärmestroms an der Oberfläche (Oberflächenquelle) oder mit Hilfe einer Volumenquelle beschrieben werden. Beim Laserstrahltrennen wird die Laserenergie nicht an der Werkstoffoberfläche absorbiert, sondern entlang einer Schneidfront [Pop05]. Da angenommen werden kann, dass keine Temperaturgradienten in Richtung der z-Achse des Laserstrahls auftreten, sondern lediglich senkrecht dazu, wird das Wärmeleitungsproblem als räumlich zweidimensional betrachtet. Der Laserstrahl wird so zur Linie idealisiert, das so genannte Modell der Linienquelle beschreibt den zeitabhängigen (transienten) Wärmeleitungsprozess somit nach Poprawe [Pop05] zu

$$T(x,y) - T_{UB} = \int_{0}^{t} \frac{E_s(t)}{\rho_{eff} \cdot c_{p,eff}} \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \kappa \cdot (t-\hat{t})} \cdot \exp\left(-\frac{(x-v\cdot(t-\hat{t})^2+y^2)}{4 \cdot \kappa \cdot (t-\hat{t})}\right),$$
(5.42)

mit der Streckenenergie $E_s = \frac{P_l}{s}$ in W/m

Unter der Vorraussetzung einer zeitunabhängigen (stationären) Wärmeleitung kann Gleichung 5.42 für eine bewegte, linienförmige Wärmequelle analytisch gelöst werden [Pop05]

$$T(x,y) - T_{UB} = \frac{E_s}{\rho_{eff} \cdot c_{p,eff}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \kappa} \cdot K_o \cdot \left(\frac{|v| \cdot r}{2 \cdot \kappa}\right) \cdot \exp\left(\frac{v \cdot \chi}{2 \cdot \kappa}\right), \quad (5.43)$$

 K_0 beschreibt die modifizierte Bessel-Funktion¹ zweiter Art.

Hieraus ergeben sich die Isothermen als konzentrische Kreise um den Mittelpunkt des Laserstrahls (x = 0, y = 0). Die Bessel-Funktion konvergiert bei r = 0, d. h. die Temperatur wird bei r = 0 unendlich.

c.) Analytische Berechnung der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone

Die Ausdehnung der WEZ entlang der Schnittkante beim Laserstrahltrennen von FVK wurde mittels des in Gleichung 5.43 dargestellten Modells und des Programms MAT-LAB² berechnet. Dazu wurde der Temperaturverlauf in der y-Achse für verschiedene Technologie- und Werkstoffparameter, z. B. Laserstrahlleistung, Vorschubgeschwindigkeit oder Faservolumenanteil, ermittelt, siehe Berechnungsbeispiel in Abbildung 5.15.

In der Abbildung 5.15 ist der Temperaturverlauf entlang der y-Achse für eine Laserstrahlleistung von $P_L = 1,0$ kW und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 8,0m/min$ abgebildet. Für die kritischen Temperaturen von $T_1 = 293$ K, $T_2 = 393$ K und $T_3 = 633$ K, siehe Kapitel 4.2.2, wurden jeweils die Isothermen als Parallelen zur x-Achse dargestellt. An den Schnittpunkten der Isothermen mit dem berechneten Temperaturverlauf wurde die Ausdehnung der WEZ w_{th} für die o. g. Temperaturen ermittelt, siehe Abbildung 5.15.

In Abbildung 5.16 ist der Unterschied der Ausdehnung der WEZ für die Temperaturen $T_1 = 293$ K, $T_2 = 393$ K und $T_3 = 633$ K dargestellt. Zu diesem Zweck wurde die WEZ für eine ansteigende Vorschubgeschwindigkeit für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminates berechnet, dabei waren die Laserstrahlleistung und der Faservolumenanteil konstant. Wie zu erwarten war, ist die Ausdehnung der WEZ $w_{th}(293 \text{ K})$ für eine Temperatur von $T_1 = 293$ K deutlich größer als die Ausdehnung $w_{th}(393 \text{ K})$ für $T_2 = 393$ K bzw. $w_{th}(633 \text{ K})$ für $T_3 = 633$ K. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit nimmt die Ausdehnung der betrachteten WEZ deutlich ab, siehe Abbildung 5.16. Dieses Verhalten ist durch die signifikante Abnahme der Streckenenergie mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zu erklären, da auch die in das CFK-Laminat eingekoppelte Energie signifikant abnimmt. Darüber hinaus wird die Einwirkzeit t_E der Laserstrahl-

¹Als Bessel Funktionen werden die Lösung der Differentialgleichung der Form $\chi^2 \cdot \frac{dy^2}{dx^2} + \chi \frac{dy}{dx} + (\chi^2 - n^2) \cdot y = 0$ bezeichnet [Bar97].

²MATLAB 7.0 (R14) des Herstellers *The MathWorks Inc.*, Massachusetts (USA)



Abbildung 5.15: Analytische Berechnung der Ausdehnug der Wärmeeinflusszone nach Gleichung 5.43 für einen laserstrahlgetrenntes CFK-Laminat mit EP-Matrix (für einen Yb:YAG-Laser mit $P_L = 1,0$ kW, $v_f = 8,0$ m/min)

energie auf den Werkstoff reduziert, sodass die durch die zeitabhängige Wärmeleitung verursachte Ausdehnung der WEZ reduziert wird.

Entsprechend der Auswertung in Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 wurde der Einfluss von Technologie- und Werkstoffparametern auf die Ausdehnung der WEZ beim Laserstrahltrennen von CFK-Laminaten mit EP-Matrix für unterschiedliche Faservolumenanteile analysiert. In Abbildung 5.17 ist die Ausdehnung der WEZ für CFK-Laminate mit Faservolumenanteilen von $\varphi_1 = 40 \%$, $\varphi_2 = 50 \%$ und $\varphi_3 = 60 \%$ dargestellt. Dabei wurde jeweils die Ausdehnung der WEZ bei einer Temperatur von 293 K betrachtet, um die maximale Beeinflussung des Werkstoffes zu ermitteln. Daher ist jede Erwärmung über die Umgebungstemperatur von T_{UB} = 293 K als thermische Beeinflussung zu betrachten. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ist eine signifikante Reduktion der Ausdehnung der WEZ zu betrachten, von mehr als 390 μm bei 4,0 m/min auf weniger als 270 μm bei 7,0 m/min. Diese Reduktion ist durch die signifikante Abnahme der Streckenenergie bei steigender Vorschubgeschwindigkeit zu erklären. Wie in Abbildung 5.17 dargestellt, konnte kein signifikanter Einfluss des Faservolumenanteiles auf die Ausdehnung der WEZ festgestellt werden.

Der Einfluss der Laserstrahlleistung auf die Ausdehnung der WEZ ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Dazu wurde der Einfluss steigender Laserstrahlleistung für eine konstante Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 7,0$ m/min auf die Ausdehnung der Wärmeeinflusszonen der o. g. kritischen Temperaturen berechnet. Insgesamt betrachtet steigen $w_{th}(293 \text{ K})$, $w_{th}(393 \text{ K})$ und $w_{th}(633 \text{ K})$ an, dieses ist durch die Erhöhung der



Abbildung 5.16: Berechnete Ausdehnung der Wärmeeinflusszone für unterschiedliche Temperaturen bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit für ein CFK-Laminat mit EP-Matrix (für eine Faserlaserstrahlquelle mit $P_L = 1,0$ KW, $\varphi = 40$ %)



Abbildung 5.17: Ausdehnung der Wärmeeinflusszone beim Laserstrahltrennen eines CFK-Laminates bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit für verschiedene Faservolumenanteile im Vergleich (für eine Faserlaserstrahlquelle mit $P_L = 1,0 \text{ kW}$ und $v_f = 7,0 \text{ m/min}$)



Abbildung 5.18: Ausdehnung der Wärmeeinflusszone für die kritischen Temperaturen bei zunehmender Laserstrahlleistung für ein CFK-Laminat mit EP-Matrix (für einen Yb-Faserlaser, $v_f = 7,0$ m/min und das CFK-Standardlaminat)

Streckenenergie und damit der eingebrachten thermischen Energie in den Werkstoff zu erklären. Es ist jedoch eine unterschiedliche Zunahme von $w_{th}(293 \text{ K})$, $w_{th}(393 \text{ K})$ und $w_{th}(633 \text{ K})$ festzustellen. So nimmt die Wärmeeinflusszone bis zu einer Temperatur von $T_1 = 293 \text{ K}$ von 270 μ m bei 1,0 kW lediglich um 10 μ m auf 280 μ m zu, wenn die Laserstrahlleistung auf 2,0 kW verdoppelt wird. Bezüglich der kritischen Temperatur von $T_2 = 393 \text{ K}$ ist eine Zunahme von 180 μ m auf 195 μ m zu beobachten. Die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone bei einer Temperatur von $T_3 = 633 \text{ K}$, also bis zu der Temperatur bei der die Matrix geschädigt wird, nimmt deutlich von 120 μ m auf mehr als 155 μ m zu. Das bedeutet, dass eine Erhöhung der Laserstrahlleistung sich insbesondere auf die Randbereiche entlang der Trennkante auswirkt, während auf die maximale Ausdehnung der Wärmeeinflusszone nahezu kein Einfluss festgestellt werden kann.

Zur Validierung des Modells wurden die Ergebnisse der Simulation der Wärmeeinflusszone mit den Ergebnissen praktischer Untersuchungen verglichen. Der Vergleich der Messwerte sowie die simulierten Verläufe sind in Abbildung 5.19 dargestellt. Zu diesem Zweck wurden praktische Untersuchungen unter Verwendung eines Yb-Faserlasers durchgeführt und entsprechend des in Abbildung 4.4 dargestellten Schemas ausgewertet. Die technischen Daten der verwendeten Anlagentechnik sind in Anhang 8.5 dargestellt.

In Abbildung 5.19 ist zu erkennen, dass die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone $w_{th}(293K)$ mit dem erstellten Prozessmodell mit hoher Genauigkeit simuliert werden kann. Die Differenz zwischen simuliertem und gemessenen Wert beträgt zwischen

5 Einflussanalyse der Technologieparameter auf die Qualität



Abbildung 5.19: Vergleich der simulierten Ausdehnung der Wärmeeinflusszone mit den Ergebnissen praktischer Untersuchungen für die kritischen Temperaturen bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit für ein CFK-Laminat mit EP-Matrix (für Yb-Faserlaser mit $P_L = 1,25$ KW und das CFK-Standardlaminat)

20 und 90 μ m. Diese Abweichung liegt im Rahmen der Messtoleranz und der werkstoffbedingten Toleranzen. Das bedeutet, dass das entwickelte Modell geeignet ist, die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone für die betrachtete kritische Temperatur von 293 K für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminates mit EP-Matrix mit einer Genauigkeit von bis zu ± 30 μ m zu simulieren.

5.4.3 Numerische Lösung des Modells

a.) Einführung zur FEM - Simulation

In Ergänzung zu der in Kapitel 5.4.2 dargestellten analytischen Berechnung der Ausdehnung der WEZ wird diese zusätzlich mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet. Die FEM ist ein numerisches Verfahren, mit dem partielle Differentialgleichungen, die beispielsweise physikalische Effekte beschreiben, unter Randbedingungen gelöst werden können [HU94, Pet06, HR09, Sto92, Stu08].

Bei diesem Verfahren wird das betrachtete Gebiet in eine endliche Anzahl von Elementen³ unterteilt. Für jedes Element wird eine Ansatzfunktion definiert, die unter gegebenen Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen mittels numerischer Methoden gelöst wird [Pet06, Sto92, Stu08]. Die FEM hat in der ingenieurwissenschaftlichen Anwendung, z. B. im Bereich der Bau- und Strukturmechanik [Bra07, Hel09] und dem Fahrzeugbau [Buc08, Bur09, Kas09, Kom08, Rad08], eine große Verbreitung gefunden.

b.) Anforderungen und Randbedingungen an FEM - Modellierung

An ein FEM - Modell zur Simulation der Wärmeeinbringung und der Ausdehnung der WEZ beim Laserstrahltrennen von FVK bestehen die Anforderungen, dass

- die Größe eines einzelnen Elements kleiner als der Fokusdurchmesser des Laserstrahls sein muss,
- ein Diskretisierungsnetz mit variabler Elementgröße verwendet wird sowie
- die Wärmeleitung eines FVK Laminats sehr gering, im Vergleich zu metallischen Werkstoffen, ist.



Abbildung 5.20: Zusammenhang zwischen dem Fokusdurchmesser und der minimalen Elementgröße

 3 von lat. finite = endlich, begrenzt

5 Einflussanalyse der Technologieparameter auf die Qualität

Beim Laserstrahltrennen werden typischerweise Fokusdurchmesser von 100 μ m bis 400 μ m verwendet. Das bedeutet, dass die Größe bzw. Fläche eines FEM - Elements kleiner als 100 μ m gewählt werden muss, sodass der durch den Laserstrahl eingebrachte Wärmestrom auf mehrere Elemente des Modells wirkt, siehe Abbildung 5.20. Das führt jedoch dazu, dass zur Modellierung des Laserstrahltrennprozesses mit bewegter Wärmequelle eine sehr große Anzahl an Elementen betrachtet werden muss. Bei einem Fokusdurchmesser von d_f = 100 μ m und einer betrachteten Fläche von 100 mm · 100 mm besteht das FEM-Netz aus mindestens 1,26 · 10⁶ Elementen. Diese Anzahl an Elementen führt typischerweise zu einer hohen Berechnungszeit. Zur Reduktion der Elementanzahl werden im Allgemeinen zwei Schritte durchgeführt. Zum einen wird die Fläche der Betrachtungseinheit iterativ reduziert, zum anderen wird eine variable Elementgröße und -dichte verwendet. In Abbildung 5.21 ist die deutlich feinere Diskretisierung entlang der Schnittkante dargestellt.



Abbildung 5.21: Feinere Diskretisierung entlang der Schnittkante im FEM-Softwaretool COMSOL Multiphysics 3.5

Dadurch ist es möglich, eine hohe Auflösung im für die Ausdehnung der WEZ relevanten Bereich entlang der Trennkannte zu realisieren und gleichzeitig eine hohe Berechnungsgeschwindigkeit zu erzielen. Ein vergleichbarer Ansatz wurde auch von Stupl und Helldörfer verwendet [Stu08, Hel09]. Eine weitere Anforderung an das FEM-Modell resultiert aus der im Vergleich zu metallischen Werkstoffen geringen Wärmeleitfähigkeit von CFK.

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit (W / $m \cdot K$)
CFK	15 - 25
Stahl	60
Aluminium	235
Kupfer	401

Tabelle 5.4: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von technischen Werkstoffen

In Tabelle 5.4 ist der Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von technisch relevanten Werkstoffen, wie z. B. Stahl, Aluminium oder Kupfer, mit der von CFK dargestellt. Es wird deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit von CFK um den Faktor drei kleiner ist als die von Stahl bzw. um den Faktor 10 bis 30 im Vergleich zu Aluminium und Kupfer. Das bedeutet, dass Wärmeenergie nur in geringem Maß in den Werkstoff geleitet wird und die WEZ nur eine geringe Ausdehnung aufweist. Die geringe Wärmeleitung im FVK-Laminat führt zu dem in Abbildung 5.22 skizzierten Effekt, dass nur entlang der Einwirkstelle des Laserstrahls hohe Temperaturen erreicht werden, in benachbarten Elementen gleichzeitig deutlich geringere Temperaturen vorliegen. Das führt zu zum Teil hohen Temperaturgradienten von mehr als 300 K zwischen zwei benachbarten Elementen. Diese hohen Temperaturgradienten führen zu mathematischen Instabilitäten bei der numerischen Lösung des Modells und damit zu fehlerhaften Simulationsergebnissen.



Abbildung 5.22: Prinzipielle Darstellung hoher Temperaturgradienten zwischen den einzelnen Elementen des Modells

Darüber hinaus führt ein numerisches Modell zur Wärmeleitung im Festkörper im Bereich der Zersetzungstemperaturen, also beim Übergang vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand, zu Abweichungen und Modellungenauigkeiten [GM98, Stu08]. Diese Abweichungen sind jedoch bei einer numerischen Näherungsmethode nicht zu vermeiden [GS90].

Daher besteht die Notwendigkeit, die Parameter und Randbedingungen des FEM-Modells sorgfältig zu wählen und anhand experimenteller Untersuchungen zu validieren. Entsprechend der o.g. Anforderungen wurde mittels des FEM-Programms COM-SOL 3.5^4 ein Quaderkörper mit den Abmaßen $L \cdot B \cdot H$ von 10 mm \cdot 5 mm \cdot 2 mm erstellt und durch 430.000 Elemente diskretisiert, siehe Abbildung 5.23. Als Stoffwerte wurden die berechneten Stoffwerte für die effektive Dichte, effektive spezifische Wärmeleitfähigkeit, effektive Zersetzungsenthalphie und effektive Wärmeleitfähigkeit verwendet, siehe dazu auch Kapitel 5.3.4.



Abbildung 5.23: Darstellung des mittels COMSOL 3.5 erstellten und diskretisierten FEM-Modells

c.) Berechnung der Temperaturverteilung in der Wärmeeinflusszone

Die Ausdehnung der WEZ sowie der Temperaturverteilung entlang der Schnittkante beim Laserstrahltrennen wurde mittels der FEM-Software COMSOL berechnet und entsprechend des in Abbildung 5.24 dargestellten Schemas ausgewertet. Hierbei wurden, entsprechend der analytischen Simulation siehe Kapitel 5.4.2 die kritischen Temperaturen T₁ = 293 K, T₂ = 393 K und T₃ = 633 K betrachtet. Die maximale Temperatur, die im Rahmen der FEM-Berechnung betrachtet wurde, beträgt T_{max} = 650 K, da ab einer Temperatur von mehr als 633 K die Matrix als geschädigt gilt.

In der Abbildung 5.24 ist das Ergebnis der FEM-Berechnung der Ausdehnung der WEZ entlang der y-Achse gezeigt, analog zur Auswertung der analytischen Simula-

⁴COMSOL Multiphysics 3.5 des Anbieters COMSOL AB, Stockholm (Schweden)
tion, siehe Kapitel 5.4.2. Für eine Laserstrahlleistung von $P_L = 1,0$ KW und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 7,0$ m/min wurde die Ausdehnung der Isothermen w_{th} berechnet. Die Ausdehnung der Isothermen der kritischen Temperaturen wurde messtechnisch erfasst, siehe Abbildung 5.24. Die Ausdehnung der Isotherme zu der Temperatur $T_1 = 293$ K ist deutlich höher als bei der analytischen Simulation, siehe Kapitel 5.4.2. Dieses ist auf die Berücksichtigung zeitabhängiger Wärmeleitungsvorgänge zurückzuführen. Durch die bewegete Wärmequelle entlang der x-Achse ist die Ausdehnung der WEZ in der x-Richtung größer als in der y-Richtung. Dieser Effekt wurde auch bei der FEM-Simulation von Laserstrahlschweißprozessen beobachtet und ist in der entsprechenden Fachliteratur dokumentiert [LFC+09]. Bedingt durch die zeitabhängige Wärmeleitung tritt in diesem Modell eine höhere WEZ auf. Dabei sind aber nur geringe Temperaturerhöhungen auf 293 K bis 320 K in einem Großteil der WEZ und nur eine kurzzeitige Temperaturerhöhung im Bereich der WEZ zu beobachten.



Abbildung 5.24: Ergebniss der FEM-Berechnung sowie Ermittlung der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone (für eine Faserlaserstrahlquelle mit $P_L = 1,0 \text{ kW}, v_f = 7,0 \text{ m/min}$ und das CFK-Standardlaminat)

Im betrachteten Beispiel, mit einer Länge des diskretisierten Körpers von 10 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 7,0 m/min, ergibt sich gemäß des Zusammenhangs

$$t_B = \frac{Laenge}{Vorschubgeschwindigkeit}$$
(5.44)

eine gesamte Belichtungszeit von $t_B \approx 0.08$ sec. Das bedeutet, dass die gesamte Energieeinbringung in einem kurzen Zeitraum abläuft und so die maximale Temperatur von mehr als 633 K nur in einem begrenzten Gebiet auftritt. Die Wärmeleitung im CFK-Laminat, die zur Ausbildung einer WEZ führt, läuft daher ebenfalls in einem kurzen Zeitraum ab. Hinzu kommt die geringe Wärmeleitfähigkeit des CFK-Laminats, die um den Faktor 3 geringer ist als bei Stahl und dazu führt, dass nur ein geringer Wärmestrom überhaupt geleitet wird. Der gesamte Erwärmungs- und Abkühlungsprozess des betrachteten Gebiets erfolgt daher in einem Zeitraum von ca. 1,0 sec. Dadurch ist die Ausdehnung der WEZ im betrachteten Modell für die kritischen Temperaturen $T_2 = 393$ K und $T_3 = 633$ K gering. Darüber hinaus werden diese beiden Temperaturen lediglich in einem Zeitraum von weniger als 0,5 sec erreicht. Eine Temperaturerhöhung über die Raumtemperatur $T_{UB} = T_1 = 293$ K hinaus erfolgt für einen Zeitraum von 0.5 bis 1,0 sec. Bei der numerischen Berechnung der Ausdehnung der WEZ für diese Temperatur ist eine größere Ausdehnung der WEZ im Vergleich zur analytischen Lösung festzustellen. Dieses ist, wie bereits dargestellt, auf die Berücksichtigung der zeitabhängigen Wärmeleiteffekte zurückzuführen.

Insgesamt konnte dargestellt werden, dass die Berechnung der Ausdehnung der WEZ mittels numerischer Methoden möglich ist. Die Berücksichtigung zeitabhängiger Effekte der Wärmeleitung führt zu einer größeren Ausdehnung der WEZ für die Temperatur $T_1 = 293$ K. Dabei ist die Ausdehnung der WEZ für die höheren Temperaturen $T_2 = 393$ K und $T_3 = 633$ K jedoch vergleichbar mit der analytischen Lösung. Damit konnte dargestellt werden, dass die analytische und numerische Berechnung der Ausdehnung der WEZ zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Die Validierung der berechneten Ausdehnung der WEZ mit der im Rahmen experimenteller Untersuchungen erfassten Ausdehnung ist im Kapitel 5.5 dargestellt.

5.5 Bewertung der Modell- und Ergebnisgüte

a.) Vorgehensweise zur Bewertung der Modell- und Ergebnisgüte

In dem vorangegangenen Kapitel 5 ist der Einfluss der Technologieparameter Wellenlänge, Laserstrahlleistung und Vorschubgeschwindigkeit auf die Ausdehung der WEZ sowohl anhand experimenteller Untersuchungen analytisch als auch allgemein beschrieben worden. Die Betrachtung der Gültigkeit dieser allgemeinen Beschreibung wird anhand theoretischer Berechnungen sowie experimenteller Untersuchungen durchgeführt. In Kapitel 5.3 wurde dargestellt, dass die thermophysikalischen Eigenschaften insbesondere vom Faservolumenanteil des betrachteten Laminats abhängig sind. Daher wurde mittels des entwickelten Modells die Ausdehung der WEZ für verschiedene Faservolumenanteile berechnet und das Ergebnis kritisch betrachtet.

Darauf aufbauend wurde der Berechnungsfehler ermittelt, der auftritt, wenn die thermophysikalischen Eigenschaften nicht wie angenommen konstant über den gesamten betrachteten Temperaturbereich sind. Mit diesem theoretischen Fehler wurde eine Abschätzung des gesamten Fehlers bei der theoretischen Berechnung der Ausdehnung der WEZ vorgenommen und anhand experimenteller Untersuchungen überprüft. Zuletzt wurde der Einfluss der Faserorientierung zur Vorschubrichtung des Laserstrahltrennprozesses analysiert, um die Gültigkeit der Annahme quasi-isotroper Werkstoffeigenschaften zu prüfen.

b.) Gültigkeit des Modells für beliebige Faservolumenanteile

Entsprechend der definierten Randbedingungen für die Modellbildung und Simulation, siehe Kapitel 3.2 und Tabelle 3.1, wurde bisher ein konstanter Faservolumenanteil von 40 % betrachtet. In Kapitel 5.3.4 wurde bereits gezeigt, dass die thermophysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil zu bestimmen sind. Daher wurde die Gültigkeit und Stabilität des Prozessmodells für einen Faservolumenanteil von 0 bis 100 % betrachtet. Dazu wurden die Ausdehnungen der Isothermen für die kritischen Temperaturen für eine konstante Laserstrahlleistung von 1,0 kW und eine Vorschubgeschwindigkeit von 7,0 m/min berechnet, die Ergebnisse sind in Abbildung 5.25 dargestellt.

Die Zunahme der Ausdehnung der WEZ für einen ansteigenden Faservolumenanteil ist deutlich zu erkennen. Für ein FVK-Laminat mit einem Faservolumenanteil von 0 %, also reinem Harz, ist die WEZ nahezu Null und steigt von da stetig auf ein Maximum bei 100 %, also reine C-Faser, an. Dieses Verhalten ist aufgrund der signifikant höheren Wärmeleitung der Verstärkungsfasern im Vergleich zum Matrixwerkstoff zu erklären, siehe Tabelle 5.4. Im für technische Anwendungen besonders relevanten Bereich, der typischerweise zwischen 45 und 65 % Faservolumenanteil liegt, nimmt die Ausdehnung der WEZ nahezu linear zu. Dieses Ergebnis konnte auch mittels des Vergleichs der



Abbildung 5.25: Ergebnis der analytischen Berechnung der Ausdehnung der Isothermen für steigende Faservolumenanteile im Vergleich (Faserlaserstrahlquelle mit $P_L = 1,0$ kW und $v_f = 7,0$ m/min)

berechneten Ausdehnung der WEZ und den Ergebnissen praktischer Untersuchungen validiert werden, siehe Abbildung 5.19.

Damit konnte gezeigt werden, dass das Modell für beliebige Faservolumenanteile mathematisch stabil ist und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können. Insgesamt konnte damit gezeigt werden, dass die Gültigkeit des Modells auch für steigende Faservolumenanteile gewährleistet ist.

c.) Betrachtung der Ergebnisgüte für temperaturabhängige thermophysikalische Werkstoffeigenschaften

Im Rahmen der analytischen und numerischen Modelllösung wurden die thermophysikalischen Eigenschaften als temperaturunabhängig und konstant angenommen. Jedoch sind die thermophysikalischen Eigenschaften technischer Werkstoffe nicht konstant, sodass bei der Modelllösung und der Berechnung der WEZ ein Fehler auftritt [PRR57, Stu08, VDI06]. Gemäß DIN 16.949 [DIN89a, DIN89d] treten im betrachteten Temperaturbereich von 273 K bis 650 K bei polymeren Werkstoffen Differenzen der Werkstoffeigenschaften von bis zu ± 25 % auf. In Tabelle 5.5 sind daher die Werte für den definierten Versuchswerkstoff bei einer konstanten Umgebungstemperatur von T_{UB} = 293 K sowie die obere und untere Grenze dargestellt.

Mit den in Tabelle 5.5 dargestellten Werten, für konstante thermophysikalische Eigenschaften sowie die obere und untere Grenze, wurde für eine konstante Laserstrahlleis-

		konstante	obere Grenze	untere Grenze
		Eigenschaften		
		100 %	125~%	75~%
Dichte	$\rm kg/m^3$	1.432	1.790	1.074
Wärmekapazität	J/kg * k	1.004	1.255	753
Wärmeleitfähigkeit	W/m * K	20,12	$25,\!15$	15,09
Zersetzungsenthalphie	J/g	17.860	22.325	13.395

 Tabelle 5.5:
 Verwendete thermophysikalische Eigenschaften sowie obere und und untere Grenze beim definierten Versuchswerkstoff



Abbildung 5.26: Ergebnis der analytischen Berechnung der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone für konstante thermophysikalische Eigenschaften sowie die mittlere Abweichung (Faserlaserstrahlquelle mit $P_L = 1,0$ kW und das CFK-Standardlaminat)

tung von 1,0 kW und eine ansteigende Vorschubgeschwindigkeit die Ausdehnung der WEZ w_{th}(293 K) bestimmt.

In Abbildung 5.26 ist der Vergleich der Ausdehnung der WEZ für konstante thermophysikalische Eigenschaften, die obere und untere Grenze sowie die mittlere Abweichung dargestellt. Es wird deutlich, dass bei der Simulation mit konstanten thermophysikalischen Eigenschaften ein Fehler auftritt. Der Mittelwert aus oberer und unterer Abweichung wird als mittlere Abweichung bezeichnet und ist zum Vergleich in Abbildung 5.26 dargestellt. Die mittlere Abweichung ist dabei für die betrachteten Werkstoffeigenschaften nahezu konstant und beträgt in der Berechnung 128 μ m \pm 17 μ m. Damit konnte gezeigt werden, dass die Annahme konstanter thermophysikalischer Eigenschaften im Rahmen der Modellgenauigkeit zulässig ist. Sogar für eine große Abweichung von ± 25 % vom konstanten Wert für die Umgebungstemperatur ist die mittlere Abweichung der berechneten Ausdehnung der WEZ nahezu konstant und kann im Rahmen der Ermittlung der Modellgenauigkeit berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung dieser konstanten und bekannten Abweichung kann die Ausdehnung der WEZ berechnet werden. Die Validierung sowie Approximation des gesamten Fehlers ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

d.) Betrachtung der Ergebnisgüte für ein- und mehrdimensionale Wärmeleitung

Bei der Erstellung des Prozessmodells wurde der laminare Aufbau eines FVKs als Festkörper mit quasi-isotropen Werkstoffeigenschaften modelliert. Bedingt durch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Verstärkungsfaser- und Matrixwerkstoffes ist die Wärmeleitfähigkeit des Laminates jedoch abhängig von der Aufbaurichtung der Verstärkungsfasern, siehe Kapitel 5.3.4. In Richtung der Fasern ist die Wärmeleitfähigkeit um den Faktor sieben höher als senkrecht dazu. Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Ausdehnung der WEZ sowie der auftretende Fehler aufgrund der Annahme quasi-isotroper Werkstoffeigenschaften wurden daher ermittelt. Dazu wurde die Ausdehnung der WEZ jeweils für das in Kapitel 3.2 definierte CFK-Laminat, für reinen EP-Harz sowie für reine Kohlenstofffasern simuliert und die Ergebnisse analysiert.



Abbildung 5.27: Vergleich der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich (mit $P_L = 1,0 \text{ kW}$)

In Abbildung 5.27 ist der Vergleich der Ausdehnung der WEZ w_{th}(293 K) für eine ansteigende Vorschubgeschwindigkeit und konstante Laserstrahlleistung von 1,0 kW dargestellt. Der signifikante Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Ausdehnung der WEZ ist deutlich zu erkennen. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit und damit sinkender Streckenenergie ist für einen reinen EP-Harz nahezu keine WEZ zu ermitteln. Der EP-Harz wird beim Laserstrahltrennen vollständig zersetzt, eine Leitung von Wärmeenergie in das umgebende Material tritt nahezu nicht auf. Für eine hohe Streckenenergie, bei niedriger Vorschubgeschwindigkeit, wird entlang der Längsachse einer reinen C-Faser eine hohe Wärmeenergiemenge eingeleitet. Dieses führt zu einer großen Ausdehnung der WEZ.



Abbildung 5.28: Gegenüberstellung der Ausdehnung der Wärmeeinflusszone und berechneten Wärmeleitfähigkeiten in Orientierung zur Schnittrichtung (Faserlaserstrahlquelle mit $P_L = 1,0$ kW, CFK-Standardlaminat mit t = 2,0 mm)

In Abbildung 5.28 sind die Ausdehnung der WEZ und die Wärmeleitfähigkeiten in Orientierung zur Schnittrichtung nach Pan und Hocheng [PH00] gegenüber gestellt. Der proportionale Zusammenhang von effektiver Wärmeleitfähigkeit und Ausdehnung der WEZ beim Laserstrahltrennen eines realen, nicht quasi-isotropen FVK - Laminats ist dargestellt. Der Einfluss der höheren Wärmeleitfähigkeit längs der Faserachse im Vergleich zur geringeren quer der Längsachse ist zu erkennen. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt von 0° zu 90° um 700 % zu, während die Ausdehnung der WEZ um 300 % zunimmt. D. h. der Effekt der Faserorientierung ist zwar messtechnisch zu erfassen, jedoch nicht proportional zur Zunahme der Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus ist die Vorschubrichtung zur Orientierung der Fasern im Rahmen der industriellen Anwendung aus technischen und funktionalen Gesichtspunkten bestimmt. Das führt dazu, dass eine vergrößerte Ausdehnung der WEZ in industriellen Anwendungen nicht zu vermeiden ist, aber im Rahmen der theoretischen Prozessauslegung approximiert werden kann.

Mit diesem Prozessmodell kann sowohl der Einfluss ein-dimensionaler, anisotroper als auch mehr-dimensionaler, (quasi-) isotroper Wärmeleitfähigkeit auf die Ausdehnung der WEZ abgebildet werden. Mittels experimenteller Untersuchungen sowie theoretischer Betrachtungen konnte gezeigt werden, dass die Annahme quasi-isotroper Wärmeleitung im Rahmen der Modellgenauigkeit Gültigkeit besitzt, siehe Kapitel 5.4.2 und Abbildung 5.19.

e.) Abschätzung des gesamten Fehlers

Es wurde im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, dass für eine Variation der thermophysikalischen Eigenschaften von 25 % eine maximale Abweichung von 128 ± 17 µm auftritt. Daher ist zu untersuchen, ob die Ergebnisse der Berechnungen sowie die Messwerte im Rahmen der oben genannten. Abweichung von 128 µm liegen. In Abbildung 5.29 ist das Ergebniss der Berechnung für eine Laserstrahlleistung von 1,25 kW und eine ansteigende Vorschubgeschwindigkeit dargestellt. Die obere und untere Grenze bei einer Abweichung von 128 µm ist ebenfalls dargestellt. Das Ergebnis der Berechnung wurde mittels experimenteller Untersuchungen validiert.



Abbildung 5.29: Vergleich der berechneten Ergebnisse, der Messwerte sowie der oberen und unteren Grenze (Faserlaserstrahlquelle mit 1,5 kW, CFK-Standardlaminat mit t = 1,0 mm)

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden mit einem Faserlaser, siehe Anhang 8.5, Schnittversuche an dem definierten CFK-Laminat, siehe Kapitel 3.2, durchgeführt. Es konnte dargestellt werden, dass die ermittelte Ausdehnung der WEZ im Rahmen der oberen und unteren Grenze liegt und um den simulierten Mittelwert stochastisch schwankt.

Damit konnte gezeigt werden, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell Gültigkeit besitzt. Die Ausdehnung der WEZ kann demnach mit einer Genauigkeit weniger als 128 μ m analytisch berechnet werden. Eine Abweichung in dieser Größenordnung ist im Rahmen der Modellgenauigkeit zulässig. Demnach ist das entwickelte Prozessmodell geeignet, die Ausdehnung der WEZ im Rahmen der Planung des Fertigungsprozesses zu berechnen und somit die Anzahl der erforderlichen Vorversuche

signifikant zu reduzieren oder diese sogar zu ersetzen. Die Genuigkeit von weniger als 128 μm ist für diesen Anwendungsfall hinreichend.

6 Industrielle Anwendung des Laserstrahltrennens von Faserverbundkunststoffen

6.1 Vorgehensweise zur Analyse der industriellen Umsetzung

Im vorangegangenen Kapitel 5 ist die experimentelle und theoretische Analyse des Einflusses der Technologieparameter, z. B. Laserstrahlleistung, Vorschub oder Wellenlänge, auf die Qualität der Schnittfläche dargestellt worden. Gegenüber dem bisherigen Stand der Kenntnisse wurde eine signifikante Verbesserung der Qualität der Schnittfläche beim Laserstrahltrennen von CFK unter Verwendung von Laserstrahlquellen mit einer Wellenlänge von 1,0 μ m realisiert. Die modernen Festkörper- und Faserlaserstrahlquellen sind potenziell für die industrielle Anwendung des Laserstrahltrennens von FVK geeignet. Daher wird im Folgenden die Analyse der industriellen Umsetzung für eine

- einfache Bearbeitungsgeometrie sowie
- komplexe Bearbeitungsgeometrie

dargestellt. Dazu wird zunächst die Prozessfähigkeit des Laserstrahltrennens von CFK sowie der Einfluss der Verwendung eines Prozessgases auf die Qualität der Schnittfläche anhand einer 1-dimensionalen Bearbeitung untersucht. Im Anschluss daran wird beispielhaft für ein Bauteil mit komplexer 3D-Geometrie die Anwendung des Laserstrahltrennens unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten betrachtet.

6.2 Analyse der industriellen Umsetzung für eine einfache Bearbeitungsgeometrie

Zur Analyse der Umsetzung für eine einfache Bearbeitungsgeometrie wurden experimentelle Untersuchungen zum 1-dimensionalen Laserstrahltrennen an plattenförmigen CFK-Laminaten durchgeführt und die Qualität der Schnittfläche analysiert, siehe dazu Abbildung 6.1. Im Anschluss an die Analyse der Prozessfähigkeit wird der Einfluss der Verwendung eines Prozessgases auf die Qualität der Schnittfläche betrachtet. Zum einen stellt die Verwendung eines Prozessgases einen erheblichen Kostenfaktor bei der industriellen Lasermaterialbearbeitung dar. Zum anderen ermöglicht der Verzicht auf ein Prozessgas die Anwendung des Laserstrahl-Remote-Schneidens. Durch dieses Fertigungsverfahren sind potenziell deutliche Produktivitätssteigerungen bei der Konturbearbeitung realisierbar. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Kapitel 6.2.2 dargestellt.



Abbildung 6.1: 1-dimensionale, experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahltrennen an dem CFK-Standardlaminat (für einen Faserlaser mit $P_L = 1,5$ kW, CFK-Standardlaminat mit t = 1,0 mm)

6.2.1 Analyse der Prozessfähigkeit des Laserstrahltrennens von Faserverbundkunststoffen

Zur industiellen Anwendung des Laserstrahltrennens von FVK besteht die Notwendigkeit, betriebssichere und stabile Fertigungsprozesse zu realisieren, siehe Kapitel 2.4. Daher wird im Rahmen des Kapitels 6.2.1 die Analyse der Prozessfähigkeit sowie das Analyseergebnis dargestellt. In Abbildung 6.2 ist die Analyse der Prozessfähigkeit des Laserstrahltrennens von CFK mittels einer Faserlaserstrahlquelle dargestellt. Verwendet wurde ein Yb-Faserlaser vom Typ IPG YLR-5000, siehe Anhang 8.5. Die experimentellen Untersuchungen wurden an dem definierten CFK-Laminat, siehe Kapitel 3.2, mit einer konstanten Laserstrahlleistung von 1,5 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit von 4,5 m/min durchgeführt. Dabei wurden eine Prozessleistung von $c_p=2,63$ sowie eine Prozessfähigkeit von $c_{pk}=2,60$ ermittelt.

Da sowohl für $c_p=2,63\geq 1,33$ als auch $c_{pk}=2,60\geq 1,33$ realisiert werden, gilt der Nachweis als erbracht, dass das Laserstrahltrennen hinsichtlich der Rauheit prozessfähig ist. Bei der Untersuchung der Prozessfähigkeit in Bezug auf die WEZ wurden ein c_p von 6,1 und ein c_{pk} von 1,86 realisiert sowie hinsichtlich der Schnittfugenbreite ein c_p von 6,0 und ein c_{pk} von 1,74. Damit sind auch für diese Qualitätskriterien die Anforderungen $c_p\geq 1,33$ und $c_{pk}\geq 1,33$ erfüllt, somit gilt der Prozess für die Parameter im Sinne der statistischen Prozesslenkung als prozessfähig. Mittels zahlreicher weiterer experimenteller Untersuchungen konnte der Nachweis für eine erfüllte Prozessfähigkeit und



---- Innerhalb der Toleranzgrenze

Abbildung 6.2: Analyse der Prozessfähigkeit hinsichtlich des Kriteriums Rauheit für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats mit EP-Matrix (Faserlaser mit $P_L = 1,5$ kW, $v_f = 4,5$ m/min, CFK-Standardlaminat mit t = 1,0 mm)

-leistung auch für weitere Kombinationen von Technologieparametern erbracht werden. Im Rahmen dieser Analysen konnte anhand der ausgewählten Kriterien Rauheit, Schnittfugenbreite und WEZ gezeigt werden, dass sowohl die Prozessleistung als auch die Prozessfähigkeit beim Laserstrahltrennen von CFK-Laminaten mittels Faserlaserstrahlquellen gewährleistet sind.

Im Kapitel 5.2 ist bereits dargestellt worden, dass die trennende Bearbeitung von CFK mittels Festkörperlasern mit einer Wellenlänge von ca. 1,0 μ m zu Schnittflächen hoher Qualität führt. Darauf aufbauend ist in diesem Kapitel erläutert worden, dass sowohl die Prozessfähigkeit als auch die Prozessleistung gewährleistet sind. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird im Kapitel 6.3 ein industrielles Anwendungsbeispiel für die automatisierte Konturbearbeitung eines CFK-Bauteils mittels einer Festkörperlaserstrahlquelle dargestellt.

6.2.2 Einfluss der Verwendung eines Prozessgases auf die Qualität der Schnittfläche

Die Verwendung eines Prozessgases, z. B. Argon oder Stickstoff, in industriellen Fertigungsprozessen führt zu hohen Kosten für die Beschaffung und Bereitstellung der Prozessgase. Daher bietet der Verzicht auf ein Prozessgas ein erhebliches wirtschaftliches Einsparungspotenzial. Zurzeit wird das Laserstrahl-Remote-Trennen von metallischen und nicht-metallischen Werkstoffen in zahlreichen wissenschaftlichen und industriellen Untersuchungen analysiert [BLK+09, KTB+09, Rüt09]. Dabei werden typischerweise Festkörper- oder Faserlaserstrahlquellen verwendet. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass zum Laserstrahltrennen von CFK nur geringe Prozessgasdrücke von weniger als 2,0 bar erforderlich sind. Bei Stahlwerkstoffen werden zum Vergleich Prozessgasdrücke von 10 bis 20 bar verwendet, da die Metallschmelze mittels des Prozessgases aus dem Bereich der Schnittfuge ausgetrieben wird [EL02].



Abbildung 6.3: Vergleich des qualitativen Verlaufs der Rauheit beim Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats mit EP-Matrix ohne (d. h. 0 bar) und mit (d. h. 1,0 bar) Prozessgas (für einen Yb:YAG-Laser mit $P_L = 1,5$ kW und das CFK-Standardlaminat)

Es ist daher zu analysieren, ob das Laserstrahltrennen von CFK mittels Festkörperlasern auch ohne die Verwendung von Prozessgasen zu Schnittflächen hoher Qualität führt. Zu diesem Zweck wurden mit einer konstanten Laserstrahlleistung von 1,5 kW, unter Verwendung eines Scheibenlasers experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahltrennen an dem definierten CFK-Laminat mit und ohne die Verwendung von Argon als Prozess- bzw. Schneidgas durchgeführt und die Qualität der Schnittfläche analysiert. Als Laserstrahlquelle wurde ein Yb:YAG-Scheibenlaser, siehe Anhang 8.5, verwendet. In Abbildung 6.3 ist beispielhaft der qualitative Verlauf der Rauheit R_z bei steigender Vorschubgeschwindigkeit für die Bearbeitung mit einem Prozessgasdruck von 1,0 bar bzw. ohne Prozessgas für 0 bar dargestellt. Bei der Bearbeitung von CFK ohne Prozessgas, insbesondere ohne die Verwendung eines koaxialen Schneidgasstrahls, ist eine Zunahme der Rauheit R_z mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zu beobachten. Im betrachteten Intervall der Vorschubgeschwindigkeit beträgt die Zunahme ca. 5 bis 10 μ m und liegt damit auf einem geringen Niveau.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der Verwendung von Prozessgas auf die Ausdehnung der WEZ untersucht. In Abbildung 6.4 ist beispielhaft die Verteilung der Ausdehnung der WEZ für eine konstante Laserstrahlleistung von 1,5 kW und eine konstante Vorschubgeschwindigkeit von 4,5 m/min im Vergleich dargestellt. Insgesamt ist beim Laserstrahltrennen des betrachteten CFK-Laminats sogar eine geringe Abnahme der Ausdehnung der WEZ zu beobachten, diese Abnahme ist jedoch nicht signifikant.



Abbildung 6.4: Vergleich der Normalverteilung der Ausdehnung der WEZ für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminats mit EP-Matrix mit und ohne Prozessgas (für einen Yb:YAG-Laser mit $P_L = 1,5$ kW und $\varphi = 40$ %)

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass das Laserstrahltrennen von CFK ohne die Verwendung eines Prozessgases zu Schnittflächen hoher Qualität führt. Die geringe Zunahme der Rauheit der Schnittfläche ist durch die beim Laserstrahltrennprozess entstehenden Pyrolysegase und -produkte, siehe Kapitel 4.3, zu erklären. Durch die Verwendung eines Prozessgases werden diese Pyrolyseprodukte, z. B. Kohlenstoff-Partikel, in kurzer Zeit aus dem Bereich der Schnittflüge entfernt, sodass die mechanischen und thermischen Wechselwirkungen dieser Partikel mit der Schnittfläche signifikant reduziert werden. Die nahezu konstante Ausdehnung der WEZ zeigt, dass durch das Prozessgas keine "kühlende Wirkung" auf die Schnittfläche realisiert wird.

Anhand dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Bearbeitung von FVK ohne die Verwendung eines Prozessgases technisch realisierbar ist und Schnittflächen hoher Qualität realisiert werden können. Insbesondere bei dünnen Laminaten sowie noch nicht mit Harz getränkten Fasergelegen und -geweben sind qualitativ identische Qualitäten der Schnittfläche bei der Bearbeitung mit und ohne Prozessgas realisierbar. Im Rahmen weiterer experimenteller Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei Laminaten mit Dicken größer als 3,0 mm die Qualität der Schnittfläche ohne die Verwendung eines koaxialen Prozessgasstrahls deutlich abnimmt. Durch Laserstrahlquellen höherer Leistung, im Rahmen dieser Untersuchungen wurde lediglich eine 1,5 kW Laserstrahlquelle verwendet, sowie höher Strahlqualität und Brillianz ist zu erwarten, dass auch bei steigenden Laminatdicken Schnittflächen hoher Qualität realisierbar sind. Damit ist auch das Laserstrahl-Remote-Schneiden von FVK innerhalb der genannten Grenzen und Randbedingungen technisch umsetzbar.

6.3 Analyse der industriellen Umsetzung für eine komplexe Bearbeitungsgeometrie

a.) Definition eines geeigneten Demonstratorbauteils sowie Beschreibung der Arbeitsaufgabe

Die industrielle Anwendung der laserstrahlgestützten Konturbearbeitung von Bauteilen aus CFK wurde anhand einer ausgewählten Bauteilgeometrie analysiert. Als Demonstratorbauteil wurde ein Bauteil aus dem Produktportfolio der Firma ikarus solutions GmbH^1 gewählt.



Abbildung 6.5: Ansicht des Demonstratorbauteils im unbearbeiteten (a.) und bearbeiteten (b.) Zustand

Bei dem Bauteil handelt es sich um einen so genannten Trinkflaschenhalter für den professionellen bzw. semi-professionellen Anwender im Radrennsportbereich. Das in Abbildung 6.5 im unbearbeiteten und mittels Laserstrahlung bearbeiteten Zustand dargestellte Bauteil ist aus einem Kohlenstofffaser-Epoxidharz-Laminat aufgebaut, die Laminatstärke beträgt dabei t = 0.9 ± 0.1 mm. Die hohe geometrische Komplexität des Bauteils sowie die geringe Laminatstärke führen dazu, dass die automatische Bearbeitung durch Verfahren mit geometrisch bestimmter bzw. geometrisch unbestimmter Schneide bisher nicht realisiert werden konnte. Wesentliche Anforderungen an einen automatisierten Bearbeitungsprozess sowie die Qualität des Endprodukts werden in Tabelle 6.1 zusammengefasst dargestellt.

Der bestehende manuelle Prozess zur Konturbearbeitung soll durch einen automatisierten Fertigungsprozess ersetzt werden. Gleichzeitig bestehen die Anforderungen, sowohl den personellen Aufwand als auch die Durchlaufzeit signifikant zu reduzieren.

Daher ist ein entsprechender, automatisierter Bearbeitungsprozess zu entwickeln und der erforderliche Personalbedarf sowie die Durchlaufzeit zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird im Rahmen einer theoretischen Prozessplanung mittels des entwickelten Prozessmodells die generelle Eignung des Laserstrahltrennens zur Konturbearbeitung

¹Hersteller *ikarus solutions GmbH*, *Hamburg (www.ikarus – solutions.de)*

6 Industrielle Anwendung des Laserstrahltrennens von Faserverbundkunststoffen

Faserwerkstoff	C - Faser	$G = 204 \text{ g/m}^2$
Matrixwerkstoff	Epoxidharz	LS $20/55$
Laminatdicke	t	$0,9$ \pm 0,1 mm
Oberflächenqualität	R_a	\leq 2,0 $\mu {\rm m}$
	R_z	\leq 10,0 $\mu {\rm m}$
Ausdehnung der WEZ	W_{th}	$\leq 500 \ \mu {\rm m}$

Tabelle 6.1: Anforderungen und Eigenschaften des Demonstrator-Bauteils

des Demonstratorbauteils analysiert. Anschließend werden experimentelle Untersuchungen zum Bearbeitungsprozess durchgeführt sowie die Wirtschaftlichkeit des Bearbeitungsprozesses im Vergleich zur konventionellen, manuellen Bearbeitung betrachtet.

b.) Analyse des bestehenden Fertigungsprozesses zur Konturbearbeitung

Das in Abbildung 6.5 dargestelle Bauteil wird mit einer jährlichen Stückzahl von 300 Stück in einer Losgröße von 50 gefertigt. Die Konturbearbeitung erfolgt in einem manuellen Fertigungsprozess mit druckluftbetriebenen Werkzeugen. In Abbildung 6.6 ist das Flussdiagramm zur Konturbearbeitung des Demonstrators dargestellt.

Der Fertigungsprozess beginnt mit der so genannten "Schruppbearbeitung" der Kontur des Werkstücks. Dabei werden sowohl nicht benötigte EP-Harzzonen und C-Fasern entfernt als auch die Ausbrüche hergestellt. Mit einem weiteren Werkzeug wird die Kontur nachgearbeitet, bis die geforderte Endkontur erreicht ist. An der Außenseite des Bauteils wird im Anschluss daran durch Schleifen, d. h. Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide, die Soll-Kontur hergestellt. Dieser Prozessschritt aus Bearbeitung und Ermittlung der Ist-Kontur wird solange iterativ wiederholt, bis die Soll-Kontur erreicht ist. Anschließend werden alle Flächen und Konturen einer abschließenden Feinbearbeitung unterzogen bis die erforderliche Bauteilgeometrie und Oberflächenrauheit erreicht wird. Den Abschluss des konventionellen, manuellen Fertigungsprozess bildet das Einbringen der Befestigungsbohrungen.

Für diesen Prozess zur manuellen Konturbearbeitung wird die Durchlaufzeit von insgesamt 45 min benötigt. Bei der manuellen Bearbeitung treten zum Teil erhebliche Prozessemissionen auf, die nur in geringem Maße durch Absaugungssysteme entfernt werden können. Diese Emissionen sind krebseregend (kanzerogen) sowie lungengängig, durch zum Teil geringe Partikelgrößen bedingt [Hoh92, Tra92].



Abbildung 6.6: Flussdiagramm der IST-Situation der Konturbearbeitung des Trinkenflaschenhalters

c.) Theoretische Prozessauslegung und -planung mittels des entwickelten Prozessmodells

Mittels des entwickelten Prozessmodells, siehe Kapitel 5, für das Laserstrahltrennen eines CFK-Laminates wurde die generelle Eignung und Realisierbarkeit der dargestellten Arbeitsaufgabe betrachtet. Dazu wurde für dieses CFK-Laminat mit EP-Matrix die Ausdehnung der WEZ bei steigender Vorschubgeschwindigkeit berechnet.



Abbildung 6.7: Ergebnis der analytischen Berechnung der Ausdehnung der WEZ für das gegebene CFK-Laminat mit EP-Matrix (für einen Yb-Faserlaser mit $P_L = 1,0$ kW, CFK-Standardlaminat mit t = 0,9 mm)

Wie in Abbildung 6.7 dargestellt, nimmt die Ausdehnung der WEZ mit steigender Vorschubgeschwindigkeit und damit sinkender Streckenenergie kontinuierlich von ca. 400 μ m bei 1,0 m/min auf 250 μ m bei 4,5 m/min ab. Höhere Vorschubgeschwindigkeiten wurden nicht betrachtet, da aus den experimentellen Voruntersuchungen bekannt war, dass bei einer 3D-Bewegung des Fokus mit dieser Geschwindigkeit bereits Verfahrgeschwindigkeiten der CNC-Achsen von mehr als 60 m/min erforderlich sind. Aus sicherheitstechnischen Aspekten war die maximale Geschwindigkeit der CNC-Achsen der verwendeten Anlagentechnik auf 40 m/min begrenzt. Daher wurde auch im Rahmen der theoretischen Prozessauslegung darauf verzichtet, die Qualität der Schnittfläche bei höherer Vorschubgeschwindigkeit zu betrachten. Aus den theoretischen Betrachtungen, siehe Kapitel 5.4, sowie den experimentellen Untersuchungen, siehe Kapitel 5.2, ist bekannt, dass mit weiter ansteigender Vorschubgeschwindigkeit die Ausdehung der WEZ weiter abnimmt. Daher sollte zur Minimierung der WEZ stets die maximal realisierbare Vorschubgeschwindigkeit betrachtet werden. Darüber hinaus steigt die Produktivität des Bearbeitungsprozesses im Allgemeinen nahezu proportional zur Vorschubgeschwindigkeit, sodass auch unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit eine Maximierung des Vorschubes anzustreben ist.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Bearbeitung des Demonstratorbauteils technisch realisierbar ist. Die Anforderung der maximalen Ausdehnung der WEZ von weniger als 500 μ m, siehe Tabelle 6.1, wird mit einer maximalen Ausdehnung von 400 μ m erfüllt. Daher wird im Rahmen experimenteller Untersuchungen als nächster Schritt die praktische Umsetzbarkeit des automatisierten Prozesses zur Konturbearbeitung validiert.

d.) Validierung des Prozesses zur Konturbearbeitung mittels experimenteller Untersuchungen

Nachdem im vorrangegangenen Abschnitt die theoretische Prozessauslegung dargestellt worden ist, wird im folgenden Abschnitt die praktische Validierung der Konturbearbeitung erläutert. Dazu wurde zur Bearbeitung der komplexen Bearbeitungskontur des Demonstratorbauteils ein CNC-Programm erstellt und die Bearbeitung auf einer 5-Achs-Werkzeugmaschine durchgeführt. Dabei wurde die Konturbearbeitung an zahlreichen Bauteilen durchgeführt sowie der Einfluss relevanter Technologieparameter, z. B. die Vorschubgeschwindigkeit, untersucht. Es wurde deutlich, dass zur automatisierten Bearbeitung eine hohe Maßhaltigkeit der Rohbauteile erforderlich ist. Die zur Verfügung stehenden Demonstratorbauteile wiesen zum Teil erhebliche Abweichungen von der tolerierten Soll-Laminatdicke von 0.9 ± 0.2 mm auf. In Abbildung 6.8 ist die messtechnisch erfasste Laminatdicke im Vergleich zum vorgegebenen Toleranzbereich von der unteren Grenze von 0.7 mm bis zur oberen Grenze von 1.1 mm dargestellt.

Die Abweichung der realen Laminatdicke von der zulässigen Dicke ist deutlich zu erkennen. Zum Teil werden Laminatdicken von mehr als 2,5 mm erreicht, toleriert sind nur 1,1 mm. Diese erheblichen Abweichungen stellen neben der komplexen Geometrie eine zusätzliche Herausforderung bei der Bearbeitung dar, sind jedoch bei der Bauteilherstellung im Handlaminierverfahren nahezu nicht zu vermeiden. Daher wurde bei der Bearbeitung lediglich eine mittlere Vorschubgeschwindigkeit von 1,5 m/min erreicht. Damit ergibt sich für das gegebene Bauteil eine gesamte Bearbeitungszeit von ca. 3,0 min. Bei der Bearbeitung des Demonstratorbauteils wurden Rauheiten von R_a weniger als 3,0 μ m und R_z weniger als 10 μ m erzielt, sodass die entsprechenden Anforderungen an das Bauteil hinsichtlich der Rauheit ebenfalls erfüllt werden. Die Ausdehnung der WEZ ist, wie bereits im Rahmen der theoretischen Betrachtung dargestellt wurde, ebenfalls geringer als 500 μ m. Aufgrund der Verwendung des Demonstratorbauteils im Konsumgüter- bzw. Sportgerätebereich besteht die Notwendigkeit, das Bauteil einer Nachbearbeitung durch Lackieren und Polieren zu unterziehen. Dieser zusätzliche personelle Aufwand wurde im Rahmen der Analyse der Wirtschaftlichkeit ebenfalls betrachtet.



Abbildung 6.8: Vergleich der realen Laminatdicke im Vergleich zum zulässigen Toleranzbereich für die gewählten Demonstratorbauteile

e.) Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Konturbearbeitung mittels Laserstrahlung

Die Konturbearbeitung des CFK-Demonstratorbauteils wird derzeitig manuell durchgeführt. Dabei bearbeitet ein Werker die Bauteile mit Druckluft-Werkzeugen, durch z. B. Fräsen oder Schleifen, und versieht das Bauteil anschließend mit einem Schutzlack. Zur Bearbeitung und Lackierung werden derzeitig 45 min pro Bauteil benötigt. Wie bereits dargestellt, beträgt die Prozesszeit bei automatisierter Bearbeitung ca. 3,0 min. Hinzu kommen die erforderliche Bearbeitungszeit für das abschließende manuelle Lackieren sowie für das Einspannen des Bauteils in die Werkzeugmaschine und das Handhaben des Bauteils. Für diese Arbeitschritte werden 9 min kalkuliert, damit ergibt sich eine gesamte Bearbeitungszeit von 12 min. Die an den automatisierten Bearbeitungsprozess gestellte Anforderung einer Bearbeitungszeit von weniger als 15 min wird somit erfüllt, siehe Abbildung 6.9.



Abbildung 6.9: Vergleich der manuellen und automatisierten Konturbearbeitung für das gewählte Demonstratorbauteil aus CFK (für einen Yb:YAG-Laser mit $P_L = 1.5 \text{ kW}$ und $v_f = 1.5 \text{ m/min}$)

Es wird deutlich, dass auch bei der lasergestützten Konturbearbeitung die manuelle Bearbeitungszeit für das Lackieren und Polieren die Gesamtzeit maßgeblich beeinflusst. Dennoch konnte die gesamte Bearbeitungszeit in diesem Anwendungsbeispiel um mehr als 65 %reduziert werden.

Zum Abschluss der Analyse dieses Anwendungsbeispiels wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Im Rahmen dieser qualitativen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde von einem Personalkostensatz von 35 €/h sowie einem Maschinenstundensatz für die verwendete Anlagentechnik von 88 €/h ausgegangen. Die Ermitt-

lung des Maschinenstundensatzes für die verwendete Anlagentechnik ist in Anhang 8.5.4 dargestellt. Damit belaufen sich die Kosten für die rein manuelle Konturbearbeitung des Demonstrators auf

 $0,75 h \cdot 35 \in /h = 26,25 \in.$

Unter Berücksichtigung von pauschalen Kosten in Höhe von $5 \in$ pro Bauteil für den Schutzlack sowie die benötigten Verbrauchsmaterialien betragen damit die Bearbeitungskosten pro Bauteil ca. 31,25 \in . Für den automatisierten Bearbeitungsprozess berechnen sich die Bearbeitungskosten zu

 $(3/60 \text{ h} \cdot 88 \in /\text{h}) + (9/60 \text{ h} \cdot 35 \in) = 9,65 \in .$

Bei Berücksichtigung der genannten pauschalen Kosten ergeben sich somit Bearbeitungskosten in Höhe von $14,65 \in$ pro Bauteil.



Abbildung 6.10: Qualitativer Vergleich der Bearbeitungskosten für das gewählte Demonstratorbauteil

In Abbildung 6.10 ist der qualitative Vergleich der Bearbeitungskosten für das gewählte Demonstratorbauteil dargestellt. Es wird deutlich, dass durch die automatisierte, lasergestützte Konturbearbeitung des gewählten Demonstrators eine signifikante Kostenreduktion von etwa 50 % realisierbar ist. Dazu besteht jedoch die Notwendigkeit, die entsprechende Anlagentechnik zu beschaffen bzw. die Bearbeitung als Lohnfertigung zuzukaufen. Damit konnte gezeigt werden, dass die wirtschaftliche Konturbearbeitung des Demonstratorbauteils mit hoher Qualität realisierbar ist. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, eine vergleichbare Betrachtung für weitere Bauteile sowie geänderte Randbedingungen durchzuführen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Laserstrahltrennen von FVK wird seit den späten 1980er Jahren untersucht. Bisher gehörte es zum Stand der Kenntnisse, dass Festkörperlaserstrahlquellen und die seit einigen Jahren verfügbaren Faserlaserstrahlquellen nicht zum Laserstrahltrennen von FVK und insbesondere nicht von CFK geeignet sind. Aufgrund der deutlichen Weiterentwicklung genannten Laserstrahlquellen war es erforderlich, deren Eignung für die Bearbeitung von FVK erneut wissenschaftlich zu untersuchen. Darüber hinaus fehlte bisher in der Literatur eine allgemeingültige Methode zur Analyse der Qualität beim Laserstrahltrennen von FVK.

Dazu wurden im ersten Abschnitt dieser Arbeit zunächst relevante, objektive Qualitätskriterein, z. B. die Ausdehnung der WEZ und die Rauheit der Schnittfläche, erarbeitet. Darauf aufbauend wurden die Messmethoden Licht- und Rasterelektronen-Mikroskopie sowie das Röntgen auf Ihre Eignung zur Quantifizierung der genannten Qualitätskriterien validiert. Im Anschluss daran wurden die Prozesseingangs- und Prozesseinflussgrößen ermittelt und strukturiert dargestellt. Der Einfluss relevanter Technologieparameter, wie z. B. die Laserstrahlleistung, die Vorschubgeschwindigkeit oder die Wellenlänge der Laserstrahlung, auf die Qualität der Schnittfläche wurden zuerst im Rahmen von umfangreichen experimentellen Untersuchungen analysiert. Hierbei wurde insbesondere der Einfluss der Wellenlänge betrachtet, die maßgeblich die Absorption der Laserstrahlung im Werkstoff bestimmt. Heute gehört es zum Stand der Technik, eine CO₂-Laserstrahlquelle zur Lasermaterialbeabreitung von FVK zu verwenden. Daher wurden CO₂- sowie Festkörper- und Faserlaserstrahlquellen hinsichtlich der mit diesen zur realisierenden Qualität der Schnittfläche verglichen. Im Rahmen dieser Versuchsreihen zum Laserstrahltrennen von CFK konnte dargestellt werden, dass Festkörper- und Faserlaserstrahlquellen heute zur Bearbeitung von CFK, insbesondere bis zu einer Laminatdicke von 2,0 mm, mit hoher Qualität geeignet sind. Mit der zum Stand der Technik gehörenden Anlagentechnik ist heute eine Ausdehnung der WEZ von weniger als 300 μm realisierbar. Das entspricht einer Reduktion um den Faktor 10 gegenüber den in der Literatur dokumentierten experimentellen Untersuchungen.

Um den Einfluss der o. g. Technologieparameter auf die Ausdehnung der WEZ zukünftig im Vorfeld experimenteller Untersuchungen vorausberechnen zu können, wurde eine allgemeine, theoretische Beschreibung des Laserstrahltrennprozesses von FVK entwickelt. Mithilfe analytischer und numerischer Methoden wurde dieses Modell verwendet, um die Ausdehnung der WEZ für gegebene Technologie- und Prozessparameter zu bestimmen. Diese Berechnungsergebnisse wurden anschließend anhand experimenteller Untersuchungen validiert und bestätigt. Dabei zeigte sich, dass die Ausdehnung der WEZ mit einer Abweichung von weniger als 130 μ m berechnet werden kann. Zur ersten

7 Zusammenfassung und Ausblick

überschlägigen Berechnung der Ausdehnung der WEZ im Vorfeld der Bearbeitung ist diese Genauigkeit hinreichend genau.

Die industrielle Umsetzung der Ergebnisse wurde beispielhaft betrachtet. Dazu wurde zunächst die Prozessführung zur automatisierten Lasermaterialbearbeitung von FVK entwickelt. Im Anschluss daran wurde der Nachweis der Prozessfähigkeit erbracht. Den Abschluss dazu bildete die Betrachtung eines geeigneten industriellen Anwendungsbeispiels für ein Bauteil mit komplexer 3D-Kontur. Für dieses Anwendungsbeispiel wurde beispielhaft die technische Umsetzung und Berechnung der Qualität im Vorfeld des Bearbeitungsprozesses sowie die Wirtschaftlichkeit betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass die automatisierte, lasergestützte Konturbearbeitung im Vergleich zur manuellen Konturbearbeitung mit hoher Qualität und Wirtschaftlichkeit umgesetzt werden kann.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit sollte das Prozessmodell hinsichtlich der Darstellung von Absorptionsvorgängen der Laserstrahlung innerhalb der Schnittfuge weiterentwickelt werden. Um abtragende Prozesse der Lasermaterialbearbeitung mit der typischerweise kurzzeitigen Energieeinbringung abbilden zu können, besteht die Notwendigkeit, die zeitabhängige Wärmeleitung z. B. mittels numerischer Methoden weiter zu untersuchen.

8 Anhang

8.1 Erläuterung zum Epoxyd- und Aminäquivalent

Polymere Matrixsysteme wie z. B. das verwendete zwei komponentige EP-Harz EP LS 20/55 werden nach Flemming, Ziegmann und Roth [FZR95] anhand des Epoxyd- bzw-Aminäquivalentes und des Verarbeitungszeitraumes klassifiziert. Die beiden Komponenten sind EP-Harz und Härter. Die Kenndaten des verwendeten EP-Harz sind in Tabelle 8.1 nach Herstellerangaben dargestellt.

Eigenschaften	Einheit	LS	20/55
Viskosität bei 25 °C	mPa*s	700 ± 100	150 ± 30
Mischviskosität bei 25 °C	mPa*s		320
Epoxydäquivalent	g/Äquiv.	172 ± 4	
Aminäquivalent	g/Äquiv.		34 ± 2
Dichte bei 20 °C	g/cm^3	$1,15 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,02$

55

Bei diesem System gibt der erste Wert das Epoxydäquivalent in Gramm und der zweite Wert die Verarbeitungszeit in Minuten an:

EP LS $20/55 \equiv$ EP LS Epoxydäquivalent / Verarbeitungszeit

Das Epoxydäquivalent gibt an, welche Menge an Epoxydharz in Gramm genau 1 mol an Epoxydgruppen enthält. Analog bezeichnet das Aminäquivalent die Menge an Härter, die genau 1 mol an Aminogruppen enthält. Der EP-Harz härtet durch eine chemische Reaktion zwischen den Epoxydgruppen des Harzes und den Aminogruppen des Härters aus. Zur Bestimmung des korrekten Mischungsverhältnis von Harz und Härter werden die Kenngrößen Epoxyd- und Aminäquivalent benötigt. So sind bei dem verwendeten System EP LS 20/55 ca. 20 g des Härters erforderlich um 100 g des EP-Harzes zu binden (nach [FZR95]). Die Verarbeitungszeit des EP-Harzes beträgt von Beginn der Mischung von Harz und Härter bis zum vollständigen Aushärten des Harzes 55 min.

(Epoxidäquivalent/Aminäquivalent) = (100 g Harz)/(x g Härter)

8 Anhang

Daraus folgt für die benötigte Menge des Härters:

Härtermasse [g] = 100 g * (Aminäquivalent/Epoxydäquivalent) \approx 20 g

8.2 Molekülaufbau eines Epoxidharzes

In Abbildung 8.1 ist der prinzipielle Aufbau eines EP-Harz-Moleküls dargestellt. Nach Lohse u. a. [Loh88] werden zur Herstellung von Epoxiden im Wesentlichen die Synthesen

- direkte Überführung von Olefinen in 1,2-Epoxide sowie
- indirekte Methoden, ausgehend von Epoxiden mit funktionellen Gruppen,

verwendet. Durch die zahlreichen Strukturkombinationsmöglichkeiten können die Werkstoffeigenschaften, z. B. rheologisches Verhalten oder mechanische Eigenschaften, gezielt den technischen Anforderungen angepasst werden. EP-Harze härten durch eine so genannte Polyadditionsreaktion aus. Der dabei autretende geringe Härtungsschwund von typischerweise zwei bis fünf Prozent führt zu geringen Eigenspannungen und dadurch zu hoher mechanischer Festigkeit und Steifigkeit [Sch05, SSSH02].



Abbildung 8.1: Molekülaufbau eines Epoxidharzes [Loh88]



Abbildung 8.2: Schematischer Molekülaufbau von Thermoplasten und Duroplasten

8.3 Molekülaufbau und Bindungsformen bei polymeren Werkstoffen

In Abbildung 8.2 ist der schematische Molekülaufbau von Thermo- und Duroplasten im Vergleich dargestellt. Thermoplaste sind aus gering oder unverzweigten Kohlenstoffketten aufgebaut, die nur durch schwache Bindungen untereinander verbunden sind. Die mechanischen Eigenschaften nehmen mit steigendem Kristallinitätsgrad zu. In Bereichen mit hoher Kristallinität sind die Kohlenstoffketten mit hoher Parallelität ausgerichtet, sodass zwischen diesen hohe Bindungskräfe wirken können. Bereiche mit ungeordnet vorliegenden Molekülketten werden als amorph bezeichnet, siehe Abbildung 8.2.

Duroplaste sind Polymerwerkstoffe, bei denen die Ketten über chemische Hauptvalenzbindungen dreidimensional miteinander vernetzt sind. Das führt zu hohen mechanischen Festigkeiten und einer guten chemischen Beständigkeit.

Bei polymeren Werkstoffen werden die Bindungen allgemein in

- primäre Bindungen, z. B. kovalente Bindungen, und
- sekundäre Bindungen, z. B. Nebenvalenzbindungen,

unterteilt. In Abbildung 8.3 sind die relevanten Bindungsformen für technische Werkstoffe dargestellt.

8.3 Molekülaufbau und Bindungsformen bei polymeren Werkstoffen



Abbildung 8.3: Relevante Bindungsformen technischer Werkstoffe [FZR95]

Die Bindungsformen Ionenbindung und metallische Bindung sind insbesondere für metallische Werkstoffe relevant. Bei polymeren Werkstoffen liegen im Wesentlichen

- kovalente Bindungen,
- Van-der-Waals-Bindungen und
- Wasserstoffbrücken Bindungen

vor. Bei der kovalenten Bindung¹ ist die Wechselwirkung der Valenzelektronen der Elektronenhülle für die Bindung verantwortlich. Es bildet sich mindestens ein gemeinsames Elektronenpaar aus, das die beiden Atome zusammenhält. Dieses Elektronenpaar wird als bindendes Elektronenpaar bezeichnet. Zusätzlich zu diesem Paar können sich weitere Paare ausbilden, die entsprechend ihrer Anzahl als Doppel-, Dreifach- oder Vierfachbindungen bezeichnet werden.

Darüber hinaus wirken zwischen den Atomen und Molekülen die vergleichsweise schwachen Van-der-Waals-Bindungen. Diese beschreiben die nicht kovalenten Wechselwirkungen zwsichen den Atomen und Molekülen. Diese Bindungsform resultiert im Wesentlichen aus den so genannten Dipolmomenten. Die Van-der-Waals-Bindungen sind im Vergleich zur kovalenten oder Ionen-Bindung nur schwache Bindungskräfte [Bon09, Fri09].

¹Die Begriffe kovalente Bindung, Atom- und Elektronenpaarbindung werden synonym verwendet [Bon09, Fri09].

8 Anhang

Die dritte relevante Bindungsform in polymeren Werkstoffen ist die Wasserstoffbrückenbindung². Diese sind eine Form der Nebenvalenzbindung und typischerweise sind deren Bindungskräfte deutlich geringer als bei der kovalenten oder Ionen-Bindung. Die Wasserstoffbrückenbindung resultiert aus der elektrischen Anziehungskraft zweier benachbarter Moleküle, die aus einer unsymmetrischen Ladungsverteilung innerhalb eines Moleküls resultiert [Bon09, Fri09, Jef97].

Die genannten Bindungen werden durch die Energiezufuhr mittels eines Laserstrahls durch elektronische Anregung oder Vibrationsanregung aufgelöst, siehe Kapitel 2.3.4.

²Die Bezeichnungen Wasserstoffbrückenbindung, Wasserstoffbrücken oder H - Brücken werden synonym verwendet [Bon09, Jef97].

8.4 Herstellung von Kohlenstofffasern

Nach Ehrenstein, Flemming, Schulte und anderen [Ehr06, FR03, SF03] sind Kohlenstofffasern technische Fasern mit sehr hoher Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Bruchdehnung im Vergleich zu z. B. metallischen Werkstoffen. Für Kohlenstofffasern werden die englische Bezeichnung "graphite fibre" sowie die deutsche Bezeichnung "Kohlefaser" in der Literatur sowie Fachartikeln verwendet, sind aber nicht korrekt, da Kohlenstofffasern keine reine Graphitstruktur aufweisen, siehe dazu auch Abbildung 8.4, und sich in ihrer chemischen Zusammensetzung von Kohle unterscheiden, siehe dazu Tabelle 8.2.



Abbildung 8.4: Ideale Struktur einer Kohlenstofffaser und thoeretische Steifigkeit [Ehr06]

Bestandteil	Kohle	Kohlenstoff-
		Faser
Kohlenstoff	65~% - $92~%$	$\geq 90\%$
Wasserstoff	4~% - $8~%$	\geq 0,3 %
Sauerstoff	5 % - 8 %	$\geq 1 \%$
Stickstoff	1~% - 1,2 $%$	$\geq 7~\%$
Schwefel	0,5~% - $3~%$	—

Tabelle 8.2: Chemische Zusammensetzung von Kohle und Kohlenstofffasern im Vergleich (nach [Ehr06, FR03])

8 Anhang

Zur Herstellung von Kohlenstofffasern haben sich, je nach verwendeten Ausgangswerkstoff, die folgenden beiden Verfahren industriell etabliert [Ehr06, FR03]

- Herstellung aus PAN: In einer ersten Stufe, siehe dazu Abbildung 8.5, wird das Polyacrylnitril (PAN) bei Temperaturen von 220 °C und 300 °C an der Luft stabilisiert. Dabei dehydriert das PAN bei gleichzeitiger Zyklisierung der Nitrilgruppen und es entsteht ein Leiterpolymer. Dieses wird bei ca. 1.600 °C unter Zufuhr eines inertes Prozessgases zu graphitischen Schichten umgelagert. Dabei richten sich die Kohlenstoffstrukturen parallel zur Faserrichtung aus, dieses ermöglicht Festigkeiten größer als 5.000 MPa. In einer (optionalen) dritten Stufe können durch Wärmebehandlung bei 2.500 °C Kohlenstofffasern mit E-Modul-Werten von bis zu 400.000 MPa hergestellt werden, ohne diese Wärmebehandlung liegt der E-Modul bei ca. 230.000 MPa. Bei diesem Prozess wird die maximale Festigkeit reduziert.
- Herstellung aus Steinkohlenteer oder Erdölpech: Bei ca. 350 °C findet in der ersten Stufe eine Umwandlung des Ausgangsstoffes in hoch anisotropes Mesophasenpech mit hohem flüssigkristallinem Anteil statt. Beim anschließenden Schmelzspinnen entstehen Fasern mit hohem Orientierungsgrad in axialer Richtung. Die zweite Stufe dient der Stabilisierung und Verkokung bei etwa 2.000 °C, dabei bildet sich Kohlenstoff und die Orientierung der Struktur verbessert sich. Dies ermöglicht E-Moduli bis 700.000 MPa bei Festigkeiten von ca. 2.000 MPa. Die Festigkeit der Standard Kohlenstofffaser beträgt zum Vergleich 3.500 MPa. Eine anschließende Glühbehandlung bei um 3.000 °C stellt die dritte Prozessstufe dar. In dieser Prozessstufe laufen rekristallisationsähnliche Vorgänge sowie eine gleichzeitige Faserstreckung ab.

Beide Verfahren zur Herstellung von Kohlenstofffasern benötigen wie erläutert hohe Temperaturen und sind daher energieintensiv. Dieses führt zu hohen Kosten für den hergestellten Werkstoff. Die Kohlenstofffasern werden nach Ehrenstein, Flemming, Neitzel und anderen [Ehr06, FR03, NB97] anhand der E-Moduli und der Festigkeit in die acht Fasertypen

- HT high tenacity (Standardfaser),
- HM high modulus (Faser mit hoher Steifigkeit),
- LM low modulus (Fasern mit geringer Steifigkeit),
- HS hight strength (Fasern mit hoher Festigkeit),
- HMS high modulus / strength (Fasern mit sowohl hoher Steifigkeit als auch hoher Festigkeit),
- UHM ultra high modulus (Faser mit extrem hoher Steifigkeit),



Abbildung 8.5: Herstellung von Kohlenstofffasern aus PAN [Ehr06]

- IM intermediate modulus (Faser mit mittlerer Steifigkeit) und
- HE high energy (Fasern mit extrem hoher Steifigkeit)

unterteilt. Der Vergleich der Fasertypen hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit und ihres E-Moduls ist in Abbildung 8.6 dargestellt.



Abbildung 8.6: Fasertypen im Vergleich (nach [Ehr06, FR03])
8.5 Kenndaten der Verwendeten Anlagentechnik

8.5.1 Technische Daten der verwendeten CO_2 -Laserstrahlquelle

Verwendet wurde ein diffusionsgekühlter CO₂-Slab-Laser mit der Bezeichnung "RO-FIN DC 035" der Firma ROFIN SINAR Laser GmbH, dessen technische Daten in Tabelle 8.3 und die für die Laserstrahltrennbearbeitung verwendeten Parameter in Tabelle 8.4 dargestellt sind. Anstelle der üblichen Schneiddüse, mit koaxialer Prozessgaszuführung, wurde ein CrossJet verwendet, der für eine seitliche Anströmung der Linse sorgt und zu deren Reinigung sowie zur Vermeidung von Ablagerungen dient. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 8.7 dargestellt.



Abbildung 8.7: Versuchsanordnung von Laserstrahlschneidanlage und Probenwerkstück

Technische Daten	
Eigenschaft	
Strahlanregung	HF
Ausgangsleistung	$3.500 \mathrm{W}$
Leistungsbereich	350 W - 3.500 W
Strahlkennzahl	$K \ge 0.9$
Mode	TEM_{00}
Pulsfrequenz	2 HZ - 5.000 HZ
Wellenlänge	$\lambda_{CO_2} = 10.6 \ \mu \mathrm{m}$

Tabelle 8.3: Technische Daten des ROFIN DC 035 CO_2 -Slab-Lasers

Einstellungen	
Steuergröße	
Rohstrahldurchmesser	$D_{Ein} = 27 \text{ mm}$
Arbeitsabstand	$8,0 \mathrm{mm}$
Fokussieroptikdurchmesser	5,0 Zoll
Spanntechnik	Schlitzplatte
Betriebsart	continuos wave (cw)
Brennweite	f = 127 mm
Fokusdurchmesser	$d_f = 0,136 \text{ mm}$
Düsendurchmesser	d = 12 mm
Düsenabstand zum Werkstück	$25 \mathrm{~mm}$

Tabelle 8.4: Einstellungen des ROFIN DC 035 CO₂-Slab-Lasers

8.5.2 Technische Daten der verwendeten Scheibenlaserstrahlquelle

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde als weitere Laserstrahlquelle ein Yb:YAG-Scheibenlaser vom Typ ROFIN DS 015 HQ verwendet, die technischen Daten sind in Tabelle 8.5 dargestellt. Zur Laserstrahlführung von der Laserstrahlquelle zur Bearbeitungsoptik wurde eine Lichtleitfaser der Firma Optoskand mit einem Durchmesser von 150 μ m verwendet. Die Bearbeitung der Proben erfolgte mittels einer Standard Laserstrahlschneidoptik mit einem Abbildungsverhältnis von 1:1, sodass der minimale Fokusdurchmesser ebenfalls 150 μ m betrug. Dabei wurde ein koaxial zum Laserstrahl austretender Prozessgasstrahl mit Stickstoff als Prozessgas verwendet. Die Werkzeugbewegung erfolgte sowohl beim Scheiben- als auch beim Faserlaser, siehe Kapitel 8.5.3, mittels einer 5-Achs-Bearbeitungsmaschine.

Technische Daten	
Eigenschaft	
Strahlanregung	Dioden
Ausgangsleistung	$1.500 \mathrm{W}$
Leistungsbereich	150 W - 1.500 W
Strahlparameter produkt	$\geq 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
Anzahl der Scheiben	1
Lichtleitfaserdurchmesser	$150~\mu{ m m}$
Wellenlänge	$\lambda_{Yb:YAG} = 1.03 \ \mu \mathrm{m}$

Tabelle 8.5: Technische Daten des ROFIN DS 015 HQ Yb:YAG - Scheibenlasers

8.5.3 Technische Daten der verwendeten Faserlaserstrahlquelle

Als dritte Laserstrahlquelle mit einer Wellenlänge im Bereich von $\lambda \approx 1.0 \ \mu m$ wurde eine Yb-dottierte Faserlaserstrahlquelle vom Typ IPG YLS-5.000 verwendet. Zur Laserstrahlführung diente in diesem Fall die sog. Feeding-Faser mit einem Durchmesser von 50 μm . Die zum Laserstrahltrennen eingesetzte Bearbeitungsoptik hat ein Abbildungsverhältnis von 1,96:1, sodass der minimale Fokusdurchmesser 98 μm betrug. Wenn nicht anders angegeben, wurde eine Standard Laserstrahlschneidoptik verwendet sowie Stickstoff als Prozessgas. Zur Werkzeugführung wurde eine 5-Achs-Bearbeitungsmaschine verwendet.

Technische Daten	
Eigenschaft	
Strahlanregung	Dioden
Ausgangsleistung	$5.000 \mathrm{W}$
Leistungsbereich	100 W - 5.000 W
Strahlparameterprodukt (Feeding-Faser)	$\geq 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
Strahlparameterprodukt (Prozess-Faser)	$\geq 6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
Lichtleitfaserdurchmesser (Feeding-Faser)	$50 \ \mu m$
Lichtleitfaserdurchmesser (Prozess-Faser)	150 μm
Wellenlänge	$\lambda_{Yb-Faser} = 1,07 \ \mu \mathrm{m}$

Tabelle 8.6: Technische Daten des IPG YLS - 5.000

8.5.4 Berechnung des Maschinenstundensatzes für die verwendete Anlagentechnik

Diodenkosten	3,83 EUR/h
Energiekosten Lasersystem bei 50 % Einschaltdauer	$1,66 \ \mathrm{EUR/h}$
Energiekosten Kühlung bei 50 % Einschaltdauer	0,76 EUR/h
Betriebskosten pro Stunde	$6,25 \ \mathrm{EUR/h}$

 Tabelle 8.7: Berechnung der Betriebskosten für die verwendete Scheibenlaserstrahlquelle

Investitionskosten für das 3D-Laserstrahlschneidsystem	428.000 EUR
Abschreibungszeitraum	10 Jahre
kalkulatorische Abschreibung	42.800 EUR/Jahr
kalkulatorische Zinsen (Zinssatz 8 %)	$12.840 \ \mathrm{EUR}/\mathrm{Jahr}$
fixe Instandhaltungskosten (5 $\%$ der Investitionskosten)	21.400 EUR/Jahr
kalkulatorische Raumkosten	4.000 EUR/Jahr
fixe Maschinenkosten pro Jahr	81.040 EUR/Jahr
Nutzungszeit im Einschichtbetrieb pro Jahr	1.760 Std./Jahr
fixer Maschinenstundensatz	$46,05~\mathrm{EUR/h}$
Betriebskosten	$6,25 \ \mathrm{EUR/h}$
Lohnkosten	35 EUR/h
Maschinenstundensatz ohne Lohnkosten	$52,29 \mathrm{EUR/h}$
Maschinenstundensatz inkl. Lohnkosten	$87,30 \ \mathrm{EUR/h}$

 Tabelle 8.8:
 Berechnung des Maschinenstundensatzes f
ür die verwendete Scheibenlaserstrahlquelle

9 Abkürzungen und Formelzeichen

9.1 Abkürzungen

AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
Al	Aluminium
CBN	Kubisches Bornitrid
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CFK-HM	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff mit hoher Steifigkeit (HM = High Modulus)
CFK-HT	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff mit hoher Festig- keit (HT = High Tenacity)
EP	Epoxidharz
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
IR	Infrarot
PA	Polyamid
PEK	Polyetherketon
PEEK	Polyetheretherketone
PI	Phenolharz
PKD	Polykristalliner Diamant
PP	Polypropylen

9 Abkürzungen und Formelzeichen

Prepreg	Preimpregnated fibres d. h. mit Harz vorimprägnierte Fasern
PSU	Polysulfon
R_a	Mittenrauwert in μm
\mathbf{R}_{z}	Rautiefe in μm
Ti	Titan
UP	Ungesättigte Polyesterharz
UV	Ultraviolett
VE	Venylesterharze
WEZ	Wärmeeinflusszone
WSS	Wasserstrahlschneiden

9.2 Lateinische Formelzeichen

А	Fläche
A_f	Fläche des Fokus
A_G	Absorptionsgrad
\mathbf{E}_s	Streckenenergie
a	Absorptionskoeffizient
b	Rillenbreite
\mathbf{b}_c	Schnittfugenbreite
c_p	spezifische Wärmekapazität
$c_{p,eff}$	effektive, spezifische Wärmekapazität
d_f	Fokusdurchmesser
d_p	optische Eindringtiefe
G	Green´sche Funktion der Wärmeleitung
h_z	spezifische Zersetzungsenthalpie
$h_{z,eff}$	effektive, spezifische Zersetzungsenthalpie
Ι	Intensität
I_{max}	maximale Intensität
I_0	Intensität im Fokus
K ₀	Bessel-Funktion zweiter Art
k	Wärmeleitfähigkeit
k_{eff}	effektive Wärmeleitfähigkeit
m	reduzierte Masse des Systems

9 Abkürzungen und Formelzeichen

m_{Faser}	Masse der Fasern
m_{FVK}	Masse des Laminates
m_{Matrix}	Masse der Matrix
n	Rillennachlauf
\mathbf{P}_L	Laserstrahlleistung
\mathbf{P}_{abs}	absorbierte Laserstrahlleistung
q	Ladung des Systems
\mathbf{R}_M	Zugfestigkeit
\mathbf{R}_{G}	Reflexionsgrad
r	Laserstrahlradius (Laufvariable)
Т	Temperatur
t	Laminatdicke
t_E	Einwirkzeit
T_{UB}	Umgebungstemperatur
T_G	Transmissionsgrad
T_z	Zersetzungstemperatur
U	innere Energie
u	Neigungsabweichung
V	Volumen
\mathbf{V}_{f}	Vorschubgeschwindigkeit
W	Watt
W	Laserstrahlradius

- \mathbf{w}_{so} Schnittspaltbreite an der Probenoberseite
- w_{su} Schnittspaltbreite an der Probenunterseite
- \mathbf{w}_{tho} Breite der Wärmeeinflusszone an der Probenoberseite
- w_{thu} Breite der Wärmeeinflusszone an der Probenunterseite
- z Materialtiefe

9.3 Griechische Formelzeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient
----------	---------------------------

- β Schnittflankenwinkel
- ϵ_0 Dielektrizitätskonstante
- ϵ_{real} Emissionsgrad eines realen Körpers
- φ Faservolumenanteil in Prozent
- γ Dämpfungskonstante
- κ_i Absorptionsindex
- λ Wellenlänge des Lichts
- ∇ Nabla
- ρ Dichte
- ρ_{eff} effektive Dichte
- ρ_{Faser} Dichte der Faser
- ρ_{Matrix} Dichte der Matrix
 - σ Stefan-Boltzmann-Konstante
 - ϑ absolute Temperatur in Kelvin
 - θ Laminatwinkel
 - ν_0 Resonanzfrequenz
 - ψ Fasermassenanteil in Prozent

9.4 Konstanten

$$c_p^{Matrix} = 1.100 \frac{J}{Kg \cdot K}$$

$$c_p^{Faser} = 710 \frac{J}{Kg \cdot K}$$

$$h_z^{Matrix} = 1.100 \frac{J}{g}$$

$$h_z^{Faser} = 43.000 \frac{J}{g}$$

$$T_{UB} = 20 \ ^\circ C = 293 \ \mathrm{K}$$

$$\alpha = 5.0 \frac{E}{m^2 \cdot K}$$

$$\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

$$\rho_{Matrix} = 1.200 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_{Faser} = 1.780 \frac{Kg}{m^3}$$

Literaturverzeichnis

- [Ahm09] AHMAD, J.: Machining of Polymer Composites. Springer Verlag US, Boston, USA, 2009
- [Bar97] BARTSCH, H.-J.: Taschenbuch mathematischer Formeln. Fachbuchverlag, Leipzig, 1997
- [Bar04] BARCIKOWSKI, S.: Laserstrahltrennen von Werkstoffen aus Holz, Universität Hannover, Diss., 2004
- [Bec03] BECKER, F.: Einsatz des Laserdurchstrahlschweißens von Thermoplasten, Universität Paderborn, Diss., 2003
- [Ber03] BERGMEISTER, K.: Kohlenstofffasern im konstruktiven Ingenieurbau. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2003 (Bauingenieur-Praxis)
- [Bey93] BEYER, E.: Schneiden mit CO₂-Lasern. Technologiezentrum Physikalische Technologien, VDI-Verlag, 1993 (Handbuchreihe Laser in der Materialbearbeitung; 1)
- [BLK⁺09] BEYER, E. ; LÜTKE, M. ; KLOTZBACH, A. ; HIMMER, T. ; WETZIG, A.: Remote - Cutting - One Technology Fits for Various Materials. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München, Juni (2009)
- [BM93] BREUER, J. ; METEV, S. ; GEIGER, M. (Hrsg.) ; HOLLMANN, F. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung - Einfluss der UV-Laserbestrahlung auf funktionelle Gruppen in Polymerwerkstoffen. Bericht zum DFG Schwerpunktprogramm Strahl-Stoff-Wechselwirkung, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1993
- [BM09] BEYER, E. ; MAHRLE, A.: Theoretical estimation of achievable travel rates in inert-gas fusion cutting with fibre and CO₂ lasers. In: *Proceedings* of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München, Juni (2009)
- [BN98] BECKER, H. ; NEISE, E.: CFK beflügelt den Flugzeugbau Neue Bauweise, Werkstoffauswahl und Verarbeitungsverfahren. In: *Kunststoffe 4* (1998)

- [Bon94] BONFIELD, W. ; KELLY, A. (Hrsg.): Artificial Bone. Elsevier Science Ltd., 1994
- [Bon09] BONNET, M.: Kunststoffe in der Ingenieuranwendung : verstehen und zuverlässig auswählen. Vieweg Verlag, Braunschweig, 2009
- [Bra07] BRAESS, D.: Finite Elemente : Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [Bre05] BREUER, U. P.: Herausforderungen an die CFK-Forschung aus Sicht der Verkehrsflugzeug-Entwicklung und -Fertigung. In: 10. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V., Berlin, 2005
- [BS94] BARGEL, H.-J. ; SCHULZE, G.: Werkstoffkunde. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994
- [Büt91] BÜTJE, R.: Möglichkeiten und Grenzen beim Laserschneiden von Kunststoffen. In: *Werkstoff und Innovation 2* (1991)
- [Buc06] BUCHFINK, G. ; LEIBINGER-KAMMÜLLER, N. (Hrsg.): Werkzeug Laser: Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2006
- [Buc08] BUCK, A.: Simulation von Bremsenquietschen, TU München, Diss., 2008
- [Bur09] BURKHARDT, L.: Eine Methodik zur virtuellen Beherrschung thermomechanischer Produktionsprozesse bei der Karosserieherstellung, ETH Zürich, Diss., 2009
- [BZ92] BRADNA, P. ; ZIMA, J.: Compositional Analysis of Epoxy Matrices of Carbon-Fibre Composites by Pyrolysis - Gas Chromotography / Mass Spectrometry. In: Journal of Analytical an Applied Pyrolysis (1992)
- [Car92] CARLOWITZ, B.: Tabellarische Übersicht über die Prüfung von Kunststoffen. Giesel-Verlag, Isernhagen, 1992
- [Car95] CARLOWITZ, B.: *Kunststoff Tabellen, 4. Auflage.* Carl Hanser Verlag München, 1995
- [Car04] CARISTAN, C. L.: Laser cutting : guide for manufacturing. Society of Manufacturing Engineers (SME), 2004
- [Che90] CHEREMISINOFF, N. P.: Handbook of ceramics and composites. Dekker-Verlag, New York, 1990
- [Cho94] CHOU, T.-W.; KELLY, A. (Hrsg.): Laminates: Elastic Properties. Elsevier Science Ltd., London, 1994

- [CM01] CENNA, A. A. ; MATHEW, P.: Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced (FRP) composite materials. In: *Machine Tools and Manufacturing* (2001)
- [Dau95] DAUSINGER, F.: Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität, Habilitationsschrift, Universität Stuttgart, Diss., 1995
- [Dem08] DEMTRÖDER, W.: Laser spectroscopy. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- [Dem09] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2 : Elektrizität und Optik.* Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, 2009
- [DG94] DILTHEY, U.; GRAVE, M.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren -Band 1 Schweiß- und Schneidtechnologien. VDI Verlag, 1994
- [DGF07] DUBBEL, H.; GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J.: *Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [DGK⁺08] DILLENZ, A. ; GERHARD, H. ; KROHN, N. ; PFLEIDERER, K. ; STO-ESSEL, R. ; TWESCHPER, Th. ; BUSSE, G.: Zerstörungsfreie Prüfung nichtmetallischer Werkstoffe: neue Entwicklungen. In: DGZfP Jahrestagung (2008)
- [DHW93] DECKER, I. ; HILLEBRAND, A. ; WOHLFAHRT, H. ; GEIGER, M (Hrsg.) ; HOLLMANN, F. (Hrsg.): Numerische Simulation der Werkstoffbeeinflussung beim Laserstrahlschweißen mit zeitlich veränderter Energieeinbringung. Bericht zum DFG Schwerpunktprogramm Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1993
- [DIN82] DIN-4760: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem. 06 1982
- [DIN87] DIN-29505: Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen. 1987
- [DIN89a] DIN 16949 TEIL1: Gießharzformstoffe Prüfverfahren für Reaktionsharzformstoffe. 03 1989
- [DIN89b] DIN-2377: Glasfaserverstärkte Kunststoffe: Prüfverfahren zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit. 1989
- [DIN89c] DIN-65142: Vorimprägnierte Fasergelege (Prepreg). 1989
- [DIN89d] DIN16946-TEIL2: Gießharzformstoffe Typen Reaktionsharzformstoffe. 03 1989
- [DIN91a] DIN-29971: Unidirektionalgelege-Prepreg aus Kohlenstofffasern und Epoxidharz - Technische Lieferbedingungen. 1991

- [DIN91b] DIN-7168: Allgemeintoleranzen; Längen- und Winkelmaße, Form und Lage; Nicht für Neukonstruktionen. 1991
- [DIN93] DIN-65071: Faserverstärkte Formstoffe Herstellen von Kernverbung-Prüfplatten aus Waben und Prepregs. 1993
- [DIN98] DIN-4287: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998. 10 1998
- [DIN02] DIN-1302: Geometrische Produktspezifikation (GPS) Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation (ISO 1302:2002); Deutsche Fassung EN ISO 1302:2002. 06 2002
- [DIN03a] DIN-8580: Fertigungsverfahren und Begriffe. 2003
- [DIN03b] DIN-9013: Thermisches Schneiden Einteilung thermischer Schnitte -Geometrische Produktspezifikation und Qualität (ISO 9013:2002); Deutsche Fassung EN ISO 9013:2002. 2003
- [DIN05] DIN-11146: Laser und Laseranlagen Prüfverfahren für Laserstrahlabmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen - Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen. 04 2005
- [DWSB08] DEINZER, G.; WETTER, H.; SCHMID, G.; BANGEL, M.: Fügetechnologie zur Intergration von FVK-Bauteilen in metallische Karrosseriestrukturen. (2008)
- [EDR07] ENZ, J.; DRESSLER, G.; REIM, H.: Economic RTM Manufacture Taking the RTM / CFRP Hatch of a Lamborghini Gallardo Spyder as an Example. In: Proceeding 2nd International CFK-Convention 2007, Stade, 2007
- [EG89] EMMELMANN, C. ; GEDRAT, O.: Rissbeschädigung beim Lasertrennen von Keramik. In: Laser Magazin Nr. 6 (1989)
- [EG08] EMMELMANN, C. ; GOEKE, A.: New Development in Laser Processing of Carbon Fibre Reinforced Plastics. In: *Proceeding 2nd International CFK-Convention 2008, Stade* (2008)
- [EG09] EMMELMANN, C. ; GOEKE, A.: Laser Material Processing of FRP. In: THIELECKE, F. (Hrsg.) ; ESTORFF, O. v. (Hrsg.): 2nd International Workshop on Aircraft System Technologies, Hamburg, 2009
- [Ehr81] EHRENSTEIN, G. W.; BARTZ, J. (Hrsg.); EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): Glasfaserverstärkte Kunststoffe: Mechanische und thermische Eigenschaften von GFK. Expert Verlag, Grafenau, 1981

[Ehr01]	EHRENSTEIN, G. W.: <i>Polymeric Materials</i> . Carl Hanser Verlag München, 2001
[Ehr02]	EHRENSTEIN, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren : eine Einführung ; mit 33 Tabellen. Carl Hanser Verlag München, 2002
[Ehr06]	EHRENSTEIN, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe : Werkstoffe, Verarbei- tung, Eigenschaften. Carl Hanser Verlag, München, 2006
[Eic06]	EICHLER, J. ; EICHLER, HJ. (Hrsg.): Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
[EK08]	EMMELMANN, C. ; KIRCHHOFF, M.: Mit dem Zweiten sieht man besser - Laser-Remote-Bearbeitung mit integrierter Bildverarbeitung. In: <i>WLT Summerschool 2008, Stuttgart</i> (2008)
[EL02]	EMMELMANN, C. ; LUNDING, S.: Einführung in die industrielle Laserma- terialbearbeitung. In: Sonderdruck anlässlich der Nortec Hamburg Messe 2325.01.2002 (2002)
[Emm90]	EMMELMANN, C.: Neue Anwendungen der Lasermaterialbearbeitung. In: VDI Berichte, Nr. 863 (1990)
[Emm92]	EMMELMANN, C.: Trennen von Keramik mit Laserstrahlung, Universität Hannover, Diss., 1992
[Emm95]	EMMELMANN, C.: Laser cutting - The practical application of 3D cutting with Nd:YAG lasers and Robots. In: Welding Technology of Australia,, Milan Brandt 05/95 (1995)
[Emm02]	EMMELMANN, C.: Laser in der industriellen Anwendung – Status quo und wie KMU davon profitieren können. In: Fachtagung Produktion, Stuttgart, 14./15. November 2002 (2002)
[Emm04]	EMMELMANN, C.: Remote-Schweißgerechte Konstruktion und 6- Sigma-Analyse. In: BMBF Abschlussbericht "Prozesssicheres Remote- Schweißen für flexible Fertigungskonzepte", Laser Zentrum Hannover (2004)
[Ene98]	ENEWOLDSEN, P.: Einsatz von Industrierobotern für die flexible Fer- tigung von flächigen Bauteilen aus Faserverbundkunststoff, RWTH Aa- chen, Diss., 1998
[ET91]	EMMELMANN, C. ; TRASSER, F.J.: Trennen von Faserverbund- Kunststoffen durch Laserstrahlbearbeitung. In: <i>DIF-Seminar</i> , <i>Faserverbund-Kunststoffe 1112.11.1991</i> (1991)

Literaturverzeichnis

- [FNCS09] FRENCH, P. W. ; NAEEM, M. ; CLOWES, J. ; SHARP, M. C.: Fibre Laser Material Processing of Aerospace Composites. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München (2009)
- [Frö97] FRÖHNER, K.-D.: Sicherheit und Gesundheit im Betrieb: deutschdeutsche Transformation und europäischer Wandel. Leske und Budrich, Opladen, 1997
- [FR03] FLEMMING, M.; ROTH, S.: Faserverbundbauweisen : Eigenschaften ; mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte. Springer Verlag Berlin, 2003
- [Fra04] FRANKE, O.: Federlenker aus Glasfaser-Kunststoff-Verbund : Spannungs- und Festigkeitsanalyse zur Optimierung eines hochbelasteten Bauteils, TU Darmstadt, Diss., 2004
- [Fri09] FRITSCHE, C.: Fachkunde Kunststofftechnik : Lernfelder 1 bis 14 / erarb. von Lehrern an beruflichen Schulen. Verlag Europa-Lehrmittel Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 2009
- [Fun01] FUNKE, H.: Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbung-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges, Universität Paderborn, Diss., 2001
- [FZR95] FLEMMING, M ; ZIEGMANN, G. ; ROTH, S.: Faserverbundbauweisen -Fasern und Matrices. Springer Verlag Berlin, 1995
- [Gar00] GARDZIELLA, A.: Duroplastische Harze, Formmassen und Werkstoffe : Chemie, Eigenschaften, wirtschaftliche Bedeutung, aktuelle Anwendungen und Technologien ; mit 41 Tabellen und 206 Literaturstellen. expert-Verl., Renningen, 2000
- [Geb03] GEBHARDT, A.: Rapid prototyping. Carl Hanser Verlag München, 2003
- [GF91] GNAUCK, B. ; FRÜNDT, P.: *Einstieg in die Kunststoffchemie*. Carl Hanser Verlag München, 1991
- [GH06] GRAHN, H.T. ; HOFFMANN, D. ; DRUDE, P. (Hrsg.): Zur Elektronentheorie der Metalle. Schriftenreihe: Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Frankfurt a. M., 2006
- [GM98] GROTH, C. ; MÜLLER, G.: FEM für Praktiker Temperaturfelder : Basiswissen und Arbeitsbeispiele zur Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS 5.3: Temperaturfeldberechnungen ; mit 89 Tabellen und 32 Literaturstellen. Expert-Verl., Renningen, 1998

[Gra88]	GRASS, P. A.: Bohren faserverstärkter Duromere, RWTH Aachen, Diss., 1988
[GS90]	GRIGULL, U. ; SANDNER, H. ; GRIGULL, U (Hrsg.): Wärmeleitung - 2. Auflage. Springer Verlag, Berlin, 1990
[GVA ⁺ 04]	GARCIA, A. J.; VILLAR, M. P.; ARAUJO, D.; GARCIA-MOTOLINIA, J. F.; RIBERA, E.; DIEZ, C.; LOPEZ-GASCON, C.; ESTEOA, C.; PENA, J. L.; GARCIA, R.: Carbon Fiber Reinforced Polymers Nd:YAG Laser Machining. In: 23rd International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics 2004, Baltimore, USA, 2004
[Haa06]	HAAS, R.: Prozessgestaltung für die Konturbearbeitung von CFK - Bau- teilen mittels Laserstrahlung, TU Hamburg-Harburg, Diplomarbeit, 2006
[HB09]	HAVRILLA, D. ; BROCKMANN, R.: Third Generation of Disk Lasers - A new benchmark for industrial solid state lasers. In: Laser Technik Journal $05/2009$ (2009)
[HCH ⁺ 07]	HINTZE, W. ; CLAUSEN, R. ; HARTMANN, D. ; KINDLER, J. ; SANTOS, S. ; SCHWERDT, M. ; STOEVER, E.: Precision of Machined CFRP - The Challange of Dimensional Accuracy. (2007)
[Hel09]	HELLDÖRFER, B.: Ein randelement-basiertes 3D-Rissfortschrittsmodul für Finite Elemente Systeme, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2009
[Her00]	HERWIG, H.: Wärmeübertragung A - Z; Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte. Springer Verlag, Berlin, 2000
[Her06]	HERWIG, H: <i>Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen</i> . Springer Verlag, Berlin, 2006
[Hes95]	HESSE, D.: Abtragen und Schneiden von Kohlefaserverbundwerkstoffen mit Excimer-Laserstrahlung, Universität Hannover, Diss., 1995
[HG08]	HOULT, T. ; GABZDY, J.: Fiberlaser: Beam sources and applications. In: Laser Journal 2008 (2008)
[HGM ⁺ 04]	HINTZE, W. ; GOTSCH, F. ; MOELLER, C. ; PUESCHEL, A. ; SANTOS, S. ; STOEVER, E.: Thermische Wechselwirkungen beim Trockenbohren von Leichtbaustrukturen. In: <i>Maschinenmarkt 37/2004</i> (2004)
[HHS07]	HINTZE, W.; HARTMANN, D.; SCHWERDT, M.: Machining of CFRP. In: Proceeding 2nd International CFK-Convention 2007, Stade (2007)

[Hie08]	HIELSCHER, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozess- ketten: Vorgehensweise zur fehlerfreien Optimierung der gefertigten Bau- teilqualität, TU Kaiserslautern, Diss., 2008			
[Hil06]	HILDEBRANDT, F.: Laserstrahlschneiden von dünnwandigen CFK- Laminaten, FHTW Berlin, Diplomarbeit, 2006			
[HJ93]	HUNZIKER-JOST, U. W.: Ist der Wasserstrahl eine Konkurrenz zum Laser? In: Technische Rundschau (Schweiz), 24 / 1993 (1993)			
[HJMH08]	HERZOG, D. ; JAESCHKE, P. ; MEIER, O. ; HAFERKAMP, H.: Investiga- tion on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CRFP. In: <i>Machine Tools and Manufacturing</i> (2008)			
[HK93]	HÖRSTING, K. ; KALDENHOFF, R. ; WULFHORST, B. (Hrsg.): Einführung in die Werkstoff- und Verarbeitungseigenschaften von Glasfasern. Shaker Verlag, Aachen, 1993			
[HKN ⁺ 02]	HEINZLER, M. ; KILGUS, R. ; NÄHER, F. ; OESTERLE, S. ; PAETZOLD, H. ; RÖHRER, W. ; STEPHAN, A. ; WINKOW, R.: <i>Tabellenbuch Metall.</i> Europa-Lehrmittel Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 2002			
[HL93]	HERZINGER, G.; LOOSEN, P.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung - Grundlagen, Systeme, Verfahren. Carl Hanser Verlag München, 1993			
[Hoe00]	HOERSTING, K.: Faserverbundwerkstoffe global im Blick. In: KU Kunststoffe (2000)			
[Hoh87]	HOHENSEE, V.: Konturbearbeitung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen. In: Kunststoffberater, Heft $12/1987$ (1987)			
[Hoh92]	HOHENSEE, V.: Umrissbearbeitung faservestärkter Kunststoffe durch Fräsen und Laserschneiden, Universität Hannover, Diss., 1992			
[Hom95]	HOMBURG, A.: Laserstrahlschneiden mit Nd: YAG-Lasern unter Be- rücksichtigung des Einsatzes von Lichtleitfasern, Universität Hannover, Diss., 1995			
[Hor02]	HORNBOGEN, E.: Werkstoffe : Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen ; mit 102 Tabellen. Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2002			
[HR09]	HACKENSCHMIDT, R.; RIEG, F.; RIEG, F. (Hrsg.): <i>Finite Elemente</i> <i>Analyse für Ingenieure: eine leicht verständliche Einführung.</i> Carl Han- ser Verlag München, 2009			

- [HU94] HUANG, H.-C.; USMANI, A. S.: *Finite element analysis for heat transfer* : theory and software. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1994
- [Jac05] JACOBS, O.: Werkstoffkunde. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2005
- [Jac08] JACOB, A.: Automating Cutting of Composites. In: *Reinforced plastics* (June 2008) (2008)
- [Jan03] JANSSEN, R.: Bohren und Zirkularfräsen von Schichtverbunden aus Aluminium, CFK und Titanlegierungen. Shaker Verlag, Aachen, 2003
- [JB93] JASCHEK, R. ; BERGMANN, H. W. ; GEIGER, M (Hrsg.) ; HOLLMANN, F. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung
 - Untersuchungen zum Absorptionsverhalten von Kurzpulslaserstrahlung bei flächiger Bestrahlung von dünnen Oberflächenschichten. Bericht zum DFG Schwerpunktprogramm Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1993
- [Jef97] JEFFREY, G.A.: An Introduction to Hydrogen Bonding. Oxford University Press, 1997
- [Joh94] JOHNSON, A. F.; KELLY, A. (Hrsg.): Encyclopedia of Composite Materials: Glass-Reinforced Plastics. Pergamon Press Ltd., 1994
- [Kai99] KAIERLE, S.: Autonome Produktionszelle für das Schweißen mit Laserstrahlung, RWTH Aachen, Diss., 1999
- [Kal95] KALLIES, B.: Laserstrahlschneiden von Blechformteilen, TU Berlin, Diss., 1995
- [Kap02] KAPLAN, A. F. H.: *Theoretical analysis of laser beam cutting*. Shaker Verlag, Aachen, 2002
- [Kas09] KASEMSET, B.: *FEM simulation of coupled problems in microsystems technology*, TU Hamburg-Harburg, Diss., 2009
- [Küb07a] KÜBEL, C.: 6.000-bar-Wasserstrahltechnik senkt die Stückkosten bis zu 40 Prozent. In: *Maschinenmarkt 45/2007* (2007)
- [KB07b] KNITSCH, A.; BROCKMANN, R.: Der Trumpf Scheibenlaser und seine industriellen Anwendungen. In: Aachener Laserseminare 2007 / Firmenschrift (2007)
- [KD08] KEFERSTEIN, C. P. ; DUTSCHKE, W.: Fertigungsmesstechnik: praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2008

[Kes07]	KESSLER, B.: Potentiale und Herausforderungen in der Materialbearbei- tung mit Faserlasern. In: <i>Aachener Laserseminare 2007</i> (2007)				
[Kin10]	KINDLER, J. T.: Werkstückqualität und Standzeitoptimierung von Zer- spanwerkzeugen bei der Umrissbearbeitung von kohlenstofffaserverstärk- ten Kunststoffen, TU Hamburg-Harburg, Diss., 2010				
[KK08]	KLOCKE, F.; KÖNIG, W: Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Boh- ren. Springer Verlag, Berlin, 2008				
[Kle81]	KLEINHOLZ, R.; BARTZ, W. J. (Hrsg.); EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): Glasfaserverstärkte Kunststoffe: Textilglaserzeugnisse zum Verstärken von Kunststoffen. Expert Verlag, Grafenau, 1981				
[Kle90]	KLEIN, R. M.: Bearbeitung von Polymerwerkstoffen mit infraroter La- serstrahlung, Universität Hannover, Diss., 1990				
[Kle08]	KLEPPMANN, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. Carl Hanser Verlag München, 2008				
[KME ⁺ 89]	KÖNIG, W.; MICHAELI, W.; EFFING, M.; TRASSER, FJ.; MÖNIG, W.: Das Laserstrahlschneiden und seine Alternativen. In: <i>Plastverarbeiter</i> , 40. Jahrgang (1989)				
[Kna89]	KNAUST, U.: Zur Analyse und Optimierung von Faserverbund- Leichtbauteilen, Universität Kassel, Diss., 1989				
[Kna08]	KNAUPP, M.: 6.000 bar beim Wasserstrahlschneiden als neuer Industrie- standard. In: 4. Lasertage Weser-Ems 2008, 2008				
[Kol08]	KOLLAR, L. P.: Composites in the Infrastructure. In: Journal of Rein- forced Plastics and Composites (2008)				
[Kom08]	KOMPALKA, A.S.: Stochastische Subspace-Identifikation und Finite- Elemente-Modell-Updating zur Schädigungsdetektion, TU Braunschweig, Diss., 2008				
[Kra05]	KRAUS, J.: Leichtbau am Limit. In: Maschinenmarkt 12-2005 (2005)				
[Kri94]	KRISSMANN, U.: Laser- und Wasserstrahlschneiden endlosfaserverstärk- ter Thermoplaste, TU Berlin, Diss., 1994				
[KTB ⁺ 09]	KLOTZBACH, A. ; TECHEL, A. ; BARTELS, F. ; LÜTKE, M. ; HERWIG, P. ; WETZIG, A.: Laserstrahlschneiden mit höchster Dynamik - Remote-Prozesse verkürzen Fertigungszeiten. In: <i>Laser</i> + <i>Produktion</i> (2009)				
[KWGW85]	KÖNIG, W. ; WULF, Ch. ; GRASS, P. ; WILLERSCHEID, H.: Machining of fibre reinforced plastics. In: Annals of CIRP Vol. $34/2/1985$ (1985)				

- [Len04] LENZ, C. H.: Untersuchung des Langzeitverhaltens von kohlenstoffaserverstärkten Faser-Kunststoff-Verbunden unter betriebsnaher Belastung, TU Kaiserslautern, Diss., 2004
- [LFC^{+09]} LEGUEN, E. ; FABBRO, R. ; COSTE, F. ; CARIN, M. ; LEMASSON, P.: Analysis and modelling of hybrid laser Nd:YAG-MIG/MAG welding process. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München (2009)
- [Lie98] LIEBELT, S.: Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen, TU Berlin, Diss., 1998
- [Loh88] LOHSE, F.; WOEBCKEN, W. (Hrsg.); BECKER, G.W. (Hrsg.); BRAUN,
 D. (Hrsg.): Kunststoff Handbuch 10 Duroplaste, Epoxidharze. Carl
 Hanser Verlag München, 1988
- [Lon99] LONG, C.: Essential heat transfer. Longmann, Harlow, 1999
- [Mar08] MARTINI, A.: Intrinsische Motivation und das ökonomische Verhaltensmodell. Shaker Verlag, Aachen, 2008
- [Mas99] MASING, A. W.and S. W.and Schulze: Handbuch Qualitätsmanagement - Kapitel 20: Statistische Versuchsplanung. In: Carl Hanser Verlag, München (1999)
- [MDB04] MAGNUSSON, K. ; DAG, K. ; BERGMANN, B. ; MAGNUSSON, K. (Hrsg.): Six Sigma umsetzen - Die neue Qualitätsstrategie für Unternehmen. Carl Hanser Verlag München, 2004
- [MGRN98] METHEW, J. ; GOSWAMI, G. L. ; RAMAKRISHNAN, N. ; NAIK, N. K.: Parametic stuides on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites. In: Journal of materials processing technologies (1998)
- [Mic09] MICHAELI, W.: Hybride Leichtbaukonzepte für den Automobilbau. In: Composite Materials 03/2009 (2009)
- [MK07] MICHAELI, E.; KUESTERS, K.: Integrative Simulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste. In: Werkstoffe in der Fertigung 05-2007 (2007)
- [MKKW01] MAROWSKY, G.; KÖRBER, K.; KAHLERT, H.-J.; WEHNER, M.; BAS-TING, D. (Hrsg.): Excimer Laser Technology: laser sources, optics, systems and applications. Lambda Pysik AG, Göttingen, 2001
- [MKM⁺90] MICHAELI, W. ; KÖTTE, R. ; MITSCHERLING, J. ; MÜLLERFERLI, G. ; ROSENBAUM, U. ; SPECKER, O. ; STÖGER, M. ; STARKE, J. ; MAHL-KE, M.: Faserverbundwerkstoffe - Verfahrenstechnik, Meßmethoden und Prozesssimulation. In: GAK 8/1990 (1990)

- [Mül91] MÜLLER, R.: CO₂-Laserstrahlschneiden kurzglasverstärkter Verbundwerkstoffe, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 1991
- [Moe07] MOELLER, R.: Machining of composites with abrasive waterjets. In: Proceedings of the CFK-Valley Stade Convention 2007, Stade (2007)
- [Mür90] MÜRAU, H.: Hochdruckwasserstrahl als Schneidwerkzeug für dreidimensionale Bearbeitung. In: Werkstatttechnik 80/1990 (1990)
- [MS94] MILLS, P. J.; SMITH, P. A.; KELLY, A. (Hrsg.): Encyclopedia of Composite Materials: Carbon-Fiber-Reinforced Plastics. Pergamon Press Ltd., Oxford, 1994
- [NB97] NEITZEL, M. ; BREUER, U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. Carl Hanser Verlag München, 1997
- [NMB04] NEITZEL, M. ; MITSCHANG, P. ; BERESHEIM, G.: Handbuch Verbundwerkstoffe : Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser Verlag München, 2004
- [NMH94] NIELINGER, W. ; MATTHIES, P. ; HOFMANN, H. ; BOTTENBRUCH, L. (Hrsg.) ; BINSACK, R. (Hrsg.): Handbuch Kunststoffe Polyamide. Carl Hanser Verlag München, 1994
- [Noi96] NOISTERNIG, J. F.: Zum Tragverhalten von Verankerungssystemen für CFK-Litzen im Spannbetonbau, TU Kaiserlautern, Diss., 1996
- [OPT09] OPTECH CONSULTING: World Market for Laser Material Processing 2008 by Laser Type, März 2009
- [PAMKV09] POWELL, J.; AL-MASHIKHI, S.; KAPLAN, A.; VOISEY, K.: An explanation of striation free cutting of mild steel by fibre laser. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München (2009)
- [Pee95] PEEBLES, L. H.: Carbon fibers : formation, structure, and properties. CRC Press, 1995
- [Pet95] PETRING, D.: Anwendungsorientierte Modellierung des Laserstrahlschneidens zur rechnergestützten Prozessoptimierung, RWTH Aachen, Diss., 1995
- [Pet06] PETERSEN, M.: Lasergenerieren von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen, TU Hamburg-Harburg, Diss., 2006

- [Pet09] PETRING, D.: Calculable Laser Cutting. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München (2009)
- [Pfe01] PFEIFER, T.: Praxisbuch Qualitätsmanagement: Aufgaben, Lösungswege, Ergebnisse, mit 34 Tabellen. Carl Hanser Verlag München, 2001
- [PH95] PAN, C.T.; HOCHENG, H.: The anisotropic heat-affected zone in the laser grooving of fiber-reinforced composite material. In: *Journal of materials* processing technology (1995)
- [PH97] PAN, C. T.; HOCHENG, H.: Prediction of laser-induced thermal damage of fiber mat and fiber mat-ud reinforced polymers. In: National Tsing Hua University, Hinchu, Taiwan (1997)
- [PH00] PAN, C.T.; HOCHENG, H.: Evaluation of anisotropic thermal conductivity for unidirectional FRP in laser machining. In: *Composites Part A: applied science and manufacturing* (2000)
- [Pön85] PÖNITZSCH, W.: Wasserstrahlschneiden von Verbundwerkstoffen Möglichkeiten und Grenzen. In: *Kunststoffe 75* (1985)
- [Pop05] POPRAWE, R.: Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieurbau. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [Pow98] POWELL, J.: CO₂ laser cutting. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1998
- [PRR57] POWELL, R.L.; RODER, H.M.; ROGERS, W.L.: Low-Temperature Thermal Conductivity of Some Commercial Coppers. In: Journal of Applied Pysics 28 (1957)
- [Rad03] RAD, C. v.: Leistungssteigerung von Wasser- und Wasserabrasivstrahlen durch Polymerzusatz, Universität Hannover, Diss., 2003
- [Rad08] RADTKE, A.: Steifigkeitsberechnung von diskontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten auf der Basis von Faserorientierungs- und Faserlängenverteilungen, Universität Stuttgart, Diss., 2008
- [Rat09] RATH, W.: CO₂ Laser Workhorse of Industrial Manufacturing Flexible, reliable and well proven tool for a large variety of laser processing systems. In: Laser Technik Journal 05/2009 (2009)
- [Rei91] REIMANN, W.: Hochgeschwindigkeitsfräsen von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen. Carl Hanser Verlag, München, 1991

- [RG 03] RG FASERVERBUNDWERKSTOFFE GMBH: Handbuch Faserverbundwerkstoffe, 2003
- [Ric09] RICHTER, L.: Schädigungsarme Präzisionsbearbeitung von CFK-Bauteilen. In: LAFA 2009 - Lasermaterialbearbeitung von Faserverbundkunststoffen, Hannover, 2009
- [Rit95] RITTER, R.: Bruch- und werkstoffmechanisches Verhalten eines kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzes, TU Kaiserslautern, Diss., 1995
- [Rob07] ROBERTS, T.: Rapid growth forecast for fiber market. In: *reinforced* plastics (2007)
- [ROF09a] ROFIN-SINAR LASER GMBH: ROFIN DC-Serie Schneiden und Schweißen ohne Pause, Juni 2009
- [ROF09b] ROFIN-SINAR LASER GMBH: ROFIN FL-Serie Hochbrilliante Faserlaser - präzise, schnell und zuverlässig, Juni 2009
- [Roh96] ROHWEDER, K.: Modelle und Methoden zur Berechnung von Laminaten aus unidirektionalen Faserverbunden. Habil.; TU Stuttgart, 1996
- [RQL⁺09] RIVEIRO, A.; QUINTERO, F.; LUSQUINOS, F.; COMESANA, R.; BOU-TINGUIZA, M.; POU, J.: CO₂ Laser Cutting of Fibre Reinforced Plastic Composite. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München (2009)
- [RS87] REIMANN, W.; SCHULZ, H.: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe. In: *Industrieanzeiger, Ausgabe 48* (1987)
- [Rüt09] RÜTERING, M.: Das Angebot ist komplett Rofin führt eine neue Faserlaser-Serie hoher Leistung in den Markt ein. In: *Laser + Produktion* 2009 (2009)
- [Rum96] RUMMENHÖLLER, S.: Werkstofforientierte Prozessauslegung für das Fräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe, RWTH Aachen, Diss., 1996
- [Sau08] SAUTTER, G.: Verfahrensvergleich Laser Wasserstrahlschneiden. In: 4. Lasertage Weser-Ems (2008), 2008
- [SB67] SOMMERFELD, A.; BETHE, H.; SOMMERFELD, A. (Hrsg.): *Elektronentheorie der Metallen.* Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1967
- [Sch91] SCHULTE, K.: Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix Aufbau und mechanische Eigenschaften. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Köln, 1991

- [Sch94] SCHMELZER, M.: Mechanismen der Strahlerzeugung beim Wasser-Abrasivstrahlschneiden, RWTH Aachen, Diss., 1994
- [Sch95] SCHUSTER, J.: Das Ermüdungsverhalten und die zerstörungsfreie Prüfung von thermogeformten Hochleistungs-Thermoplasten mit diskontinuierlicher Kohlenstofffaserverstärkung, TU Kaiserslautern, Diss., 1995
- [Sch05] SCHÜRMANN, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2005
- [SE88] SCHIK, J.-P.; EXNER, H.-D.; WOEBCKEN, W. (Hrsg.); BECKER, G.W. (Hrsg.); BRAUN, D. (Hrsg.): Kunststoff Handbuch 10 - Duroplaste, Ungesättigte Polyesterharze. Carl Hanser Verlag München, 1988
- [Sei92] SEIDEL, M.: Schnelle, sensorgeführte Konturbearbeitung mit Industrierobotern, VDI-Verlag, Düsseldorf, Diss., 1992
- [SF03] SCHULTE, K.; FIEDLER, B.; SCHULTE, K. (Hrsg.): Structure and properties of composite materials. TUHH - Technologie GmbH, 2003
- [Sin94] SINGER, L. S.; KELLY, A. (Hrsg.): *Encyclopedia of Composite Materials: Carbon Fibers.* Pergamon Press Ltd., Oxford, 1994
- [SP07] SCHARR, G. ; POSPISCHI, L.: Verbundwerkstoffe Werkstoffe im Flugzeugbau, auch Werkstoff der Zukunnft für schnelle Schiffe. (2007)
- [SSSH02] SCHWARZ, O. ; SCHLÖR, N. ; SCHIRBER, H. ; HUBERTH, H. ; EBELING, F.-W. (Hrsg.): Kunststoffkunde. Vogel Verlag und Druck KG, Würzburg, 2002
- [Ste97] STEINMETZ, G.: Interlaminares Bruchverhalten von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen, Universität Stuttgart, Diss., 1997
- [Ste99] STEPHAN, A.: Thermische Verformungen von unsymmetrischen Mehrschichtverbundwerkstoffen, RWTH Aachen, Diss., 1999
- [Ste03] STEEN, W. M.: Laser material processing. Springer Verlag, London, 2003
- [STGO07] SCOTT, M. L.; THOMAS, R. S.; GUNNION, A. J.; ORIFICI, A. C.: Simulation of Defects and Damage: Towards a Virtual Testing Laboratory For Composite Aerospace Structures. In: *Proceedings of the CFK-Valley Stade Convention 2007* (2007)
- [Sto92] STOFFEL, A.: Finite Elemente und Wärmeleitung. Eine Einführung. VCH Verlag, Weinheim, 1992
- [Str95] STREHLOW, R.: *Grundzüge der Physik*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1995

- [Str01] STRUVE, B.: Laser: Grundlagen, Komponenten, Technik. Verlag Technik, Berlin, 2001
- [Stu08] STUPL, J. M.: Untersuchung der Wechselwirkung von Laserstrahlung mit Strukturelementen von Raumflugkörpern, Universität Hamburg, Diss., 2008
- [TC87] TAGLIAFERRI, V.; CAPRINO, G.: Maximum cutting speed in laser cutting of fibre reinforced plastics. In: *Machine Tools and Manufacturing* (1987)
- [TD89] TAGLIAFERRI, V. ; DILLIO, A.: Thermal damage in laser cutting of aramid/epoxy laminates. In: *Composites, März 89* (1989)
- [TDIV85] TAGLIAFERRI, V. ; DI ILLIO, A. ; VISCONTI, I.: Laser cutting of fibrereinforced polyesters. In: *Composites* 16 (1985)
- [The08] THEDEN, A.: Modellbildung und Modellvalidierung des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diplomarbeit, 2008
- [TK08] TOUTENBURG, H.; KNÖFEL, P.: Six Sigma : Methoden und Statistik für die Praxis. Springer-Verlag Berlin, 2008
- [TKH01] TRAPPE, V. ; KIOSSIRA, H. ; HARBICH, K.-W.: Zerstörungsfreie Charakterisierung des Schneidzustandes von CFK infolge interlaminarer Ermüdungserscheinung. In: DGZFP Jahrestagung 2001 (2001)
- [Tra92] TRASSER, F.-J.: Laserstrahlschneiden von Verbundkunststoffen : werkstofforientierte Prozessauslegung des Laserstrahlschneidens von aramidund glasfaserverstärkten Duroplasten, RWTH Aachen, Diss., 1992
- [TRU09] TRUMPF LASER- UND SYSTEMTECHNIK GMBH: Lasersysteme: Jeder Aufgabe gewachsen, Juni 2009
- [TVD87] TAGLIAFERRI, V.; VISCONTI, IC.; DILLO, A.: Machining of fiber reinforced material with laser beam: cut quality evaluation. In: *Proceedings* of the Sixt International Conference on Composite Material, 1987
- [USH⁺97] UHLMANN, E.; SPUR, G.; HOCHENG, H.; LIEBELT, S.; PAN, C. T. ; SPUR, G. (Hrsg.): The extend of laser induced thermal damage of UD and crossply composite laminates. TU Berlin, 1997
- [VDI91] VDI ; GRÄFEN, H. (Hrsg.): VDI Lexikon Werkstofftechnik. VDI Verlag, Düsseldorf, 1991

- [VDI06] VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI Wärmeatlas. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2006
- [Wei07] WEIGAND, M.: Diamantbeschichtete Werkzeuge erhöhen die Standzeit. In: Maschinenmarkt 10/2007 (2007)
- [Wög03] WÖGINGER, A.: Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge, TU Kaiserslautern, Diss., 2003
- [WW06] WESTKÄMPER, E. ; WARNECKE, H.-J.: *Einführung in die Fertigungstechnik.* Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006
- [Zie07] ZIEGMANN, G.: Mehr Leistung, geringeres Gewicht. In: Kunststoffe, Band 7 (2007)
- [ZMSO09] ZAEH, M. ; MUSIOL, J. ; SCHOBER, A. ; OFFELE, F.: Heat induced distortion during remote laser cutting. In: Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on "Lasers in Manufacturing" (LIM 2009), München (2009)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	André Goeke
Geboren	13.05.1982 in Geseke
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

Schulausbildung und Studium

07/1993 - 06/2001	Gymnasium Antonianum Geseke, Abschluss: Abitur
09/2001 - 10/2004	Maschinenbaustudium an der Universität Paderborn,
	Abschluss: Vordiplom
11/2004 - 03/2007	Maschinenbaustudium an der Technischen Universität
	Hamburg-Harburg, Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufliche Tätigkeiten

07/2001 - 03/2007	Praktika in verschi	edener	n Bereichen des M	Maschinenbaus
09/2006 - 03/2007	Diplomarbeit bei	der	ThyssenKrupp	Fahrtreppen
	GmbH in Hamburg	r 5		
04/2007 - heute	Wissenschaftlicher	Mitar	beiter am Insti	tut für Laser-
	und Anlagensystemtechnik der Technischen Universität			
	Hamburg-Harburg			

Hamburg, den 01.08.2010