



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Deimantas Valeika

# **Parameterstudie zum Schäften von GFK mittels Vakuumsaugstrahlens**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Deimantas Valeika**

**Parameterstudie zum Schäften von GFK  
mittels Vakuumsaugstrahlens**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugtechnik  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Leander Brieskorn

in Zusammenarbeit mit:

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung  
Fügetechnologien

# **Zusammenfassung**

**Deimantas Valeika**

## **Thema der Bachelorarbeit**

Parameterstudie zum Schäften von GFK mittels Vakuumsaugstrahlens

## **Stichworte**

Roboter, Vakuumsaugstrahlen, GFK, VFK, Strahltechnik, Oberflächenbehandlung, Abrasives Strahlen, Endeffektor

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit untersucht die Anwendung des Vakuumsaugstrahlens (VSS) zur automatisierten Bearbeitung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Ziel der Arbeit ist es, geeignete Parameter für das Schäften von GFK zu identifizieren, um eine effiziente und präzise Materialentfernung zu gewährleisten. Verschiedene Parametereinstellungen und -kombinationen wurden verwendet, um deren Einflussfaktoren zu analysieren. Die Ergebnisse bieten wertvolle Einblicke in die Optimierung des Vakuumsaugstrahlverfahrens für die Reparatur und Oberflächenbehandlung von GFK in der Automobil- und Luftfahrtindustrie.

**Deimantas Valeika**

**Title of the paper**

Parametric Study on Scarfing of GFRP Using Vacuum Suction Blasting

**Keywords**

Kuka-Robot, Vacuum Suction Blasting, GFRP, FRP, Blasting Technology, Surface Treatment, Abrasive Blasting

**Abstract**

This bachelor thesis investigates the application of vacuum suction blasting (VSS) for the automated processing of glass fiber reinforced plastic (GFRP). The aim of the study is to identify suitable parameters for scarfing GFRP to ensure efficient and precise material removal. Various parameter settings and combinations were used to analyze their influencing factors. The findings provide valuable insights into optimizing the vacuum suction blasting process for the repair and surface treatment of GFRP in the automotive and aerospace industries.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Formelzeichenverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>III</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>IV</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Inhalt der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Reparatur von GFK .....	3
2.2	Vakuumsaugstrahlen bisher in der Industrie.....	6
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>6</b>
3.1	Verbundwerkstoffe .....	6
3.1.1	Faser .....	7
3.1.2	Matrix .....	8
3.1.3	Besonderheiten von GFK.....	8
3.2	Prinzip des Vakuumsaugstrahlen.....	9
3.3	Abrasion durch Schleifen und Abrasivstrahlen.....	10
3.3.1	Eigenschaften und Bezeichnung von Glasbruch und Edelmetall .....	12
3.4	Verwendete Messtechnik .....	13
3.4.1	2D-Laser-Profil-Scanner.....	13
3.4.2	Rauheitsmessgerät .....	14
3.4.3	Digitalmikroskop .....	15
3.5	Verwendete mathematische Formeln .....	15
3.5.1	Berechnung der volumetrischen Abtragrate.....	15
3.5.2	Bestimmtheitsmaß .....	17
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau .....</b>	<b>18</b>
4.1	Eigenschaften verwendeter Strahlmittel .....	19
4.2	Aufbau der Vakuumsaugstrahl-Anlage .....	19
4.3	Versuchsaufbau der Messtechnik.....	22
4.3.1	2D-Laser-Profil-Scanner.....	23
4.3.2	Rauheitsmessgerät .....	23
4.3.3	Lichtmikroskop .....	24
<b>5</b>	<b>Konzeptentwicklung und Versuchsdurchführung .....</b>	<b>25</b>
5.1	Anforderungsliste .....	25
5.2	Ermittlung der Profilmessdaten.....	26
5.3	Ermittlung der Abtragtiefen .....	27

5.4	Ermittlung der Abtragbreite .....	28
5.5	Ermittlung der Gleichmäßigkeit des Abtrags .....	29
5.6	Ermittlung der Oberflächenrauheit .....	29
5.7	Mikroskopierung der Abtragungen .....	29
5.8	Durchführung der statischen Versuche .....	29
5.9	Durchführung der dynamischen Versuche .....	31
<b>6</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>32</b>
6.1	Statische Versuche .....	32
6.1.1	Abtrag bei Variation des Unterdrucks .....	32
6.1.2	Abtrag bei Variation des Abstands der inneren Düse .....	33
6.1.3	Abtrag bei Verwendung verschiedener Strahlmittel .....	34
6.1.4	Abtrag bei Variation des Massenstroms des Strahlmittels .....	39
6.1.5	Abtrag bei Variation der Strahldauer .....	40
6.2	Zwischenfazit und Diskussion der statischen Versuche .....	42
6.3	Dynamische Versuche .....	43
6.3.1	Ermittlung der Vorschubgeschwindigkeit für den Abtrag einer Lage .....	43
6.3.2	Ermittlung des geeigneten Überlappungsabstands .....	47
6.4	Diskussion der dynamischen Versuche .....	48
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>48</b>
<b>V</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>50</b>
<b>VI</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>53</b>

## I Formelzeichenverzeichnis

$A$	Flächeninhalt [ $mm^2$ ]
$l$	Länge [mm]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß [%]
$R_A$	Radius zum Flächenschwerpunkt [mm]
$\pi$	Pi [-]
$t_{LA}$	Zeit für den Abtrag des Volumens einer LA [s]
$t_{PA}$	Strahldauer der Punktabtragung [s]
$v_{LA}$	Vorschubgeschwindigkeit [ $\frac{mm}{s}$ ]
$V_{LA}$	Volumen der Linienabtragung [ $mm^3$ ]
$V_{PA}$	Rationsvolumen der Punktabtragung [ $mm^3$ ]

## II      **Abkürzungsverzeichnis**

Ca.	Circa
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
EK	Edelkorund
FVK	Faserverbundkunststoff
GB	Glasbruch
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
i.d.R.	In der Regel
KRL	Kuka Robot Language
LA	Linienabtragung
LLT	Laserlinien-Triangulation
Max.	Maximale
Min.	Minimale
PA	Punktabtragung
UD	Unidirektional
VSS	Vakuumsaugstrahlen
z.B.	Zum Beispiel

### III      **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Schleifende Oberflächenbehandlung eines GFK-Bugschadens in Schutzausstattung [5]	4
Abbildung 2: (links) abgeschrägte, (rechts) abgestufte Schäftung eines FVK-Laminats [7]	5
Abbildung 3: Einkleben von Reparatur-Patches an einer gestuften Schäftung eines FVK [2]	5
Abbildung 4: (links) Entschichten von Metall-Nietköpfen; (rechts) Reinigen von Naturstein mittels Vakuumsaugstrahlens [11] .....	6
Abbildung 5: (a) Kontinuierliche Faseranordnungen und (b) Diskontinuierliche Faseranordnungen [13]	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Vakuumsaugstrahlens ..	9
Abbildung 7: Methoden zur VSS-Abtragung von GFK: PA (a) und LA (b) .....	10
Abbildung 8: Schematische Darstellung und Definition des Überlappungsabstands .....	10
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Schleifeffekts [16] .....	11
Abbildung 10: Vektorfeldgrafik der Strahlmittelpartikelgeschwindigkeiten und -verteilung beim Vakuumsaugstrahlen .....	12
Abbildung 11: Prinzip der Laserlinien-Triangulation eines Profilsensors [20] .....	14
Abbildung 12: Das in dieser Arbeit verwendete Rauheitsmessgerät "MarSurf PS 10" [24]	14
Abbildung 13: Ablauf der digitalen Bildwiedergabe eines Digitalmikroskops [25] .....	15
Abbildung 14: Anwendung der zweiten Regel von Pappus-Guldin anhand einer Beispielmessung 16	
Abbildung 15: In dieser Arbeit verwendete unbearbeitete GFK-Platte .....	18
Abbildung 16: Der in dieser Arbeit verwendete Roboter: KUKA KR 270 R2700 ultra [29]	20
Abbildung 17: Schnittbild der verwendeten Vakuumsaugstrahleinheit .....	21
Abbildung 18: Der in dieser Arbeit verwendete Industriesauger .....	21

Abbildung 19: Das in dieser Arbeit verwendete Strahlmitteldosiersystem .....	22
Abbildung 20: Versuchsaufbau des in dieser Arbeit genutzten 2D-Laser-Profil-Scanners	23
Abbildung 21: Positionierung des Rauheitsmessgeräts bei der Ausmessung einer Linienabtragung.....	24
Abbildung 22: Positionierung der GFK-Platte und Versuchsaufbau des Lichtmikroskops	24
Abbildung 23: Messpunkte bei einer PA (a) und LA (b) .....	27
Abbildung 24: Beispiel einer Auswahl der Grenzen des tiefsten Bereichs und der damit ermittelten durchschnittlichen Abtragtiefe .....	28
Abbildung 25: Ermittlung der Breiten anhand einer Beispielmessung .....	28
Abbildung 26: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragate (c) in Abhängigkeit vom Unterdruck bei einer Punktabtragung auf GFK .....	33
Abbildung 27: Profilformen bei einem Druck von 16 kPa (a), 23 kPa (b) und 30 kPa (c) ..	33
Abbildung 28: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragate (c) in Abhängigkeit des inneren Düsenabstands.....	34
Abbildung 29: Profilformen bei einem inneren Düsenabstand von 2 mm (a), 7 mm (b) und 12 mm (c)	34
Abbildung 30: Durchschnittliche Abtragtiefe (a), Tiefstwert der Abtragtiefe (b), Abtragbreite (c), Abtragbreite im tiefsten Bereich (d) und Abtragate (e) in Abhängigkeit der Strahlmittelart und max. Korngröße bei PA auf GFK .....	35
Abbildung 31: Profilformen bei Nutzung von GB mit maximalen Partikeldurchmessern von 150 $\mu\text{m}$ (a), 180 $\mu\text{m}$ (b), 315 $\mu\text{m}$ (c), 500 $\mu\text{m}$ (d) und 1000 $\mu\text{m}$ (e) bei PA auf GFK .....	36
Abbildung 32: Fotos der GFK-Oberfläche: GB150 (a), GB180 (b), GB315 (c), GB500 (d) und GB1000 (e) nach einer Behandlungszeit von 10 s .....	36
Abbildung 33: Profilformen bei Nutzung von EK mit maximalen Partikeldurchmessern von 90 $\mu\text{m}$ (a), 150 $\mu\text{m}$ (b) und 350 $\mu\text{m}$ (c) bei PA auf GFK .....	37

Abbildung 34: Fotos der GFK-Oberfläche: EK F180 (a), F100 (b) und F54 (c) nach einer Behandlungszeit von 10 s .....	37
Abbildung 35: Lichtmikroskopaufnahmen der behandelten GFK-Oberfläche mit einer Vergrößerung von x100: GB150 (a), GB180 (b), GB315 (c), GB500 (d) und GB1000 (e) 38	
Abbildung 36: Mikroskopaufnahmen der behandelten GFK-Oberfläche mit hundertfacher Vergrößerung: EK F180 (a), F100 (b) und F54 (c) .....	38
Abbildung 37: Mittenrauwert Ra in Abhängigkeit der Strahlmittelart und max. Korngröße bei PA auf GFK.....	39
Abbildung 38: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragrate (c) in Abhängigkeit vom Massenstrom des Strahlmittels bei PA auf GFK .....	40
Abbildung 39: Profilformen bei einem Strahlmittelmassenstrom von 0,67 g/s (a), 1,33 g/s (b) und 2 g/s (c) .....	40
Abbildung 40: Fotos der GFK-Oberfläche nach einer Strahldauer von 2 s (a), 10 s (b), 30 s (c), 65 s (d) und 70 s (e) .....	41
Abbildung 41: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragrate (c) in Abhängigkeit von der Strahldauer bei PA von GFK.....	41
Abbildung 42: Profilformen nach einer Strahldauer von 2 s (a), 10 s (b), 30 s (c), 65 s (d) und 70 s (e)	41
Abbildung 43: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Abtragtiefen bei einer Linienabtragung auf GFK.....	43
Abbildung 44: Potenz-Ersatzfunktion für den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die durchschnittliche Abtragtiefe für eine Linienabtragung auf GFK.....	44
Abbildung 45: Durchschnittliche Abtragtiefe bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s für 9 Messpunkte .....	45
Abbildung 46: Mittenrauwert Ra der LA bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s für 9 Messpunkte .....	46

Abbildung 47: Profilform einer LA mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s.....	46
Abbildung 48: Foto der LA mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s .....	47
Abbildung 49: Profilformen bei Überlappungsabständen von 11 mm (a), 11,5 mm (b), 12 mm (c), 12,5 mm (d) und 13 mm (e) .....	47
Abbildung 50: Foto einer Überlappung zweier Bahnen mit einem Überlappungsabstand von 12 mm	48

#### **IV Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Bezeichnungen und Korngrößenverteilung der in dieser Arbeit verwendeten Strahlmittels.....	19
Tabelle 2: Anforderungsliste .....	25
Tabelle 3: Einstellungen der Parameter für die größte Abtragsrate bei Punktabtragungen an CFK 30	
Tabelle 4: Variationen aller in dieser Arbeit erforschten Parameter .....	30
Tabelle 5: Ergebnisse der Bildung einer Ersatzfunktion für die durchschnittliche Abtragtiefe bei einer Linearabtragung auf GFK für Geschwindigkeiten im Bereich von 1 bis 7 mm/s44	
Tabelle 6: Messwerte der Strahldauer bei PA auf GFK.....	53
Tabelle 7: Python-Code zur Ermittlung der Messwerte anhand der Profilmessdaten.....	53
Tabelle 8: Python-Code für den Curve-Fit und Bestimmtheitsmaß .....	61

# **1 Einleitung**

Verbundwerkstoffe wie kohlenstofffaserverstärkter und glasfaserverstärkter Kunststoff (CFK und GFK) gewinnen aufgrund ihrer hohen Festigkeit und geringem Gewicht zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz von GFK in Branchen wie der Flugzeug-, Fahrzeug- und Windkraftindustrie ist weit verbreitet und die manuelle Reparatur zeit- und kostenintensiv, was den Bedarf an Automatisierung in diesem Bereich unterstreicht. Das Vakuumsaugstrahlen (VSS) bietet eine vielversprechende Lösung, die gegenüber anderen Bearbeitungsverfahren entscheidende Vorteile aufweist. In dieser Arbeit wird untersucht, wie dies als automatisiertes Verfahren zur Oberflächenbehandlung von GFK eingesetzt werden kann und welche Parameter dafür von Bedeutung sind.

## **1.1 Motivation**

Das VSS ist eine Strahltechnik, die mit Hilfe von abrasivem Strahlmittel zur Reinigung und Abtragung von Material an Oberflächen genutzt wird. Im Gegensatz zu herkömmlichen Strahltechniken werden die Strahlmittelpartikel durch die Erzeugung eines Unterdrucks im Vakuumsaugstrahlkopf zur zu bearbeitenden Oberfläche gefördert und samt abgetragenem Material direkt wieder abgesaugt. Dadurch, dass der Prozess keinen Umgebungsstaub generiert, ist er aus gesundheitlicher Sicht sehr benutzerfreundlich. Da das Strahlmittel nach dem Aufsaugen wieder aufgefangen wird, ergibt sich ebenfalls die Möglichkeit, es erneut zu verwenden und damit Kosten zu sparen und die Umwelt zu schonen. An der Außenstelle Automatisierung und Produktionstechnik des „Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM“ wird das automatisierte Bearbeiten von Oberflächen durch die Nutzung von sieben-achsigen Roboterarmen mit Vakuumsaugstrahl-Endeffektoren erforscht. Besonderes Augenmerk liegt hier auf dem Schäften von Faserverbundkunststoffen (FVK) zu Reparaturzwecken. So wurde bisher beschädigtes Matrixmaterial samt Fasern von CFK schichtweise abgetragen, um an dessen Stelle Reparaturpatches einkleben zu können. Dieser Prozess ist besonders für die Luftfahrtindustrie von Relevanz. Die Übertragbarkeit des Vakuumsaugstrahlens auf andere Faserverbundkunststoffe wie GFK für den Einsatz in anderen Branchen muss erprobt werden.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Das Ziel dieser Bachelorarbeit besteht in der systematischen Untersuchung und Festlegung geeigneter Bearbeitungsparameter für GFK mittels Vakuumsaugstrahlens. In diesem Rahmen soll insbesondere erforscht werden, welche spezifischen Parameter für die effektive Materialbearbeitung von GFK erforderlich sind, um anschließend eine Schäftung zu erzeugen. Bei der Schäftung handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die Oberfläche um den Schaden herum schichtweise entfernt wird, um anschließend den Reparaturpatch aufzubringen. In dieser Arbeit werden dafür zwei Bahnen überlappt, um dabei eine Lage der GFK-Platte gezielt abzutragen. Dieses Vorgehen erfordert eine präzise Einstellung der VSS-Bearbeitungsparameter, um ein Ergebnis zu liefern, das innerhalb einer spezifizierten Toleranz liegt. Diese Arbeit strebt an, durch experimentelle Untersuchungen eine Grundlage für die zukünftige großflächige Schäftung von GFK mittels VSS zu ermöglichen.

## **1.3 Inhalt der Arbeit**

Im zweiten Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik in den Bereichen der GFK-Reparatur sowie der bisherigen Anwendung des Vakuumsaugstrahlens in der Industrie dargestellt. Es werden verschiedene Verfahren zur Schadensbewertung und -entfernung bei GFK-Laminaten erläutert, wobei der Fokus auf der Anwendung des Schäftens und den damit verbundenen Reparaturtechniken liegt. Ziel dieses Kapitels ist es, ein grundlegendes Verständnis dieser Technologien zu vermitteln, welche als Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen dient. Das dritte Kapitel widmet sich den theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der in dieser Arbeit behandelten Themen notwendig sind. Zunächst wird der Aufbau von Verbundwerkstoffen detailliert erläutert, gefolgt von einer Einführung in das Prinzip der Abrasion durch Schleifen und Abrasivstrahlen. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Prinzip des Vakuumsaugstrahlens gewidmet. Um das Verständnis der eingesetzten Messtechnik zu vertiefen, werden zudem die Prinzipien und der Aufbau der verwendeten Messsysteme erklärt. Schließlich werden die wichtigen mathematischen Grundlagen, wie die Berechnung der volumetrischen Abtragrate, sowie weitere relevante Formeln erläutert, um die nachfolgenden experimentellen und theoretischen Analysen zu unterstützen. Im vierten Kapitel wird der Versuchsaufbau umfassend beschrieben. Dies beinhaltet detaillierte Informationen zu den Eigenschaften der verwendeten Strahlmittel, die für den Erfolg der Versuche von entscheidender Bedeutung sind. Des Weiteren wird der Aufbau der genutzten Messtechnik beschrieben, wobei der Fokus dieses Kapitels beim Aufbau der Vakuumsaugstrahlanlage und deren Einzelsystemen liegt. Kapitel 5 erläutert die Entwicklung des Konzepts und die Durchführung der Versuche im

Detail. Zunächst werden die in dieser Arbeit relevanten Parameter definiert, deren Erfassung und Verarbeitung im Anschluss beschrieben wird. Ebenfalls wird auf das Vorgehen bei der Programmierung des Roboterarms eingegangen sowie auf weitere wichtige Parameter wie die Vorlauf- und Absaugzeit. Das sechste Kapitel präsentiert die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie. Hier werden die Profilmessdaten verschiedener Abträge dargestellt, unterstützt durch Diagramme und Abbildungen der Punkt- und Linienabtragungen. Die Ergebnisse werden anschließend diskutiert, um deren Bedeutung für die Weiterentwicklung des Vakuumsaugstrahlens darzulegen und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Das abschließende Kapitel 7 fasst die Bachelorarbeit zusammen, wobei die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse nochmals hervorgehoben werden. Es werden Vorschläge für die Fortführung der Arbeit gemacht, insbesondere in Bezug auf potenzielle Verbesserungen oder Erweiterungen der bestehenden Methode. Zukünftige Forschungsschwerpunkte werden dargelegt, um den Weg für weiterführende Untersuchungen zu ebnen.

## **2 Stand der Technik**

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik in den Bereichen GFK-Reparatur und dem bisherigen Einsatz des Vakuumsaugstrahlens in der Industrie dargelegt.

### **2.1 Reparatur von GFK**

Eine Schadensbeurteilung bei FVK kann sich im Gegensatz zu metallischen Bauteilen aufwändiger gestalten, da ein Schaden oft nicht mit dem bloßen Auge erkennbar ist und in den tieferen Lagen des Laminats liegen kann. Hier kommen verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Ultraschall, Radio- und Thermographie zum Einsatz. [1] Die Entfernung des Schadens am GFK kann je nach Industriebereich variieren. Je nach Tiefe der Beschädigung kommen unterschiedliche Methoden zur Reparaturvorbereitung zum Einsatz. Oberflächliche Schäden können durch Schleifen abgetragen und mit Epoxidharz wieder aufgefüllt werden (siehe Abbildung 1). Bei tieferliegenden Schäden wird die Oberfläche geschäftet, um das Einkleben von Reparatur-Patches zu ermöglichen. [2] Schäftungen können mittels verschiedenster Techniken erzeugt werden, welche je nach Werkstoff mehr oder weniger geeignet sind. [3, 4] Eine häufig genutzte Technik ist hier das Spanen. Hierzu gehören das vorher genannte Schleifen und das Fräsen. Fräsverfahren basieren auf einem rotierenden Fräswerkzeug, welches eine Schnittbewegung ausführt. Sie unterscheiden sich je nach Werkzeugdrehrichtung und Vorschubrichtung, wobei bei FVK das Gegenlaufräsen bevorzugt gewählt wird. In Abhängigkeit

des Werkstoffs können unterschiedliche Fräswerkzeuge gewählt werden, um einen bestmöglichen Abtrag zu gewährleisten. Nachteile dieses Verfahrens liegen in möglichen Faserüberhängen oder Delamination. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Fasern und des Harzes machen so einen gleichmäßigen Abtrag schwierig. Besonders mit zunehmender Länge der Fasern steigt die Wahrscheinlichkeit für Bearbeitungsfehler durch das Fräsen. Gleichzeitig kommt es zu einem schnellen Verschleiß des Werkzeuges durch die stabilen Fasern. Beim Fräsen von CFK besteht zusätzlich das Risiko von Schäden an elektrischen Geräten durch die elektrische Leitfähigkeit des Kohlenstoffs. [3]



Abbildung 1: Schleifende Oberflächenbehandlung eines GFK-Bugschadens in Schutzausstattung [5]

Eine weniger verbreitete Methode zur Schärfung ist die Laserstrahlbearbeitung. Für diese Existieren zwei Methoden, welche auf unterschiedlichen Wirkungsprinzipien basieren. Mittels Ultrakurzpulslaser kann eine Reaktion des Materials auf atomarer Ebene hervorgerufen werden und es können Kavitäten auf der Oberfläche erschaffen werden. Anders dazu funktioniert die Oberflächenabtragung mittels Dauerstrichbetrieb bzw. gepulsten Betrieb mit mittlerer und kurzer Pulsdauer. Hier absorbiert der Werkstoff die Energie des Lasers und erhitzt sich. Es kommt so zur Zersetzung des Werkstoffes durch Schmelzen, Sublimieren oder Verdampfen. Der Grund für die geringe Verwendung des Laserverfahrens findet sich in einer Vielzahl an Voraussetzungen, welche erfüllt werden müssen, damit der Abtrag gelingt. [4] Besonders ausschlaggebend ist hier, dass das Harz und die Fasern die Energie des Laserstrahls ausreichend absorbieren müssen, damit ein Abtrag gelingt. Hierbei ist es auch wichtig, dass beide Komponenten ungefähr gleich viel vom Laser aufnehmen, um einen gleichmäßigen Abtrag zu gewährleisten. [4, 6] Weiter verbreitet als die Laserstrahlbearbeitung sind die Abrasivwasserstrahltechnologien. Hier wird unterschieden zwischen dem Injektorprinzip und dem Suspensionsprinzip. Bei dem

Injektorprinzip wird ein fokussierter Gemischstrahl aus Wasser, Abrasivmedium und Luft auf den Werkstoff gegeben. Bei dem Suspensionsprinzip wird mit größeren Wasser- und Abrasivströmen gearbeitet. Hauptsächlich dienen diese Technologien zum Schneiden von FVK. Um für Reparaturen Schäftungen vorzunehmen, wird bei dem Abrasivwasserstrahltechnologien mit geringerem Druck gearbeitet. Das Abtragen der Oberfläche kann hier jedoch ebenfalls durch das Vakuumsaugstrahlen umgesetzt werden, bei welchem kein Wasser, sondern Luft zum Aufbringen des Strahlmittels verwendet wird. [4] Im Zuge dieser Bearbeitungen werden Schäftungen erzeugt, die das Einkleben von Reparatur-Patches erlauben. Die Schäftung kann abgeschrägt oder abgestuft erfolgen (siehe Abbildung 2).

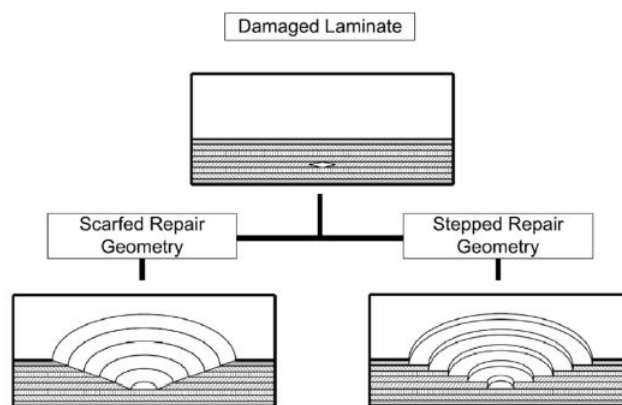


Abbildung 2: (links) abgeschrägte, (rechts) abgestufte Schäftung eines FVK-Laminats [7]

Reparatur-Patches werden entweder in Form von vorimprägnierten Prepregs oder mittels Nasslaminierung aufgebracht. Sobald der Schaden so groß ist, dass alle Lagen des Laminats entfernt werden müssen, wird auf der entgegengesetzten Seite der Schäftung ein zusätzlicher Reparatur-Patch zur Unterstützung angebracht (siehe Abbildung 3). Vor dem Einkleben des Patches ist darauf zu achten, dass die Oberfläche aufgeraut und frei von Kontaminationen ist, so dass eine langwierige Klebverbindung mit bestmöglicher Kraftübertragung entstehen kann. [2]

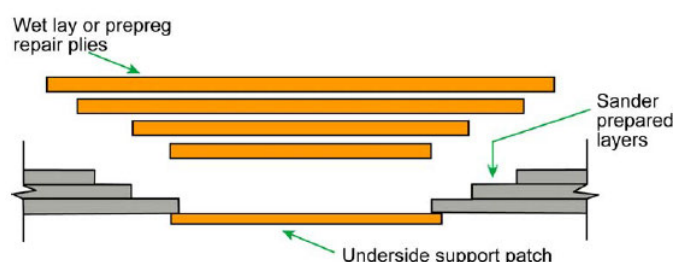


Abbildung 3: Einkleben von Reparatur-Patches an einer gestuften Schäftung eines FVK [2]

## 2.2 Vakuumsaugstrahlen bisher in der Industrie

Das Vakuumsaugstrahlen ist ein abrasives Strahlverfahren, bei dem das Strahlmittel durch einen im Strahlkopf anliegenden Unterdruck auf die zu behandelnde Oberfläche beschleunigt wird. Dabei wird das Strahlmittel samt abgetragener Partikel direkt nach der Behandlung wieder abgesaugt und gilt somit als emissionsfreier Strahlprozess. Bisherige industrielle Anwendungsbeispiele seien das Entschichten von Metall-Nietköpfen auf Flugzeugschalen, Entgraten sowie Entrosten metallischer Bauteile und die Reinigung von Natursteinfassaden und Entfernung von Bodenmarkierungen. (siehe Abbildung 4). [8–10]



Abbildung 4: (links) Entschichten von Metall-Nietköpfen; (rechts) Reinigen von Naturstein mittels Vakuumsaugstrahlens [11]

## 3 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die wesentlichen Prinzipien für das Verständnis von Verbundwerkstoffen, Abrasion durch Schleifen und Abrasivstrahlen, Vakuumsaugstrahlen sowie der verwendeten Messtechnik und mathematischen Formeln vor.

### 3.1 Verbundwerkstoffe

Ein Verbundwerkstoff entsteht, sobald mehrere Werkstoffkomponenten miteinander kombiniert werden. Faserverbundkunststoffe bilden hierbei eine Untergruppe der Verbundwerkstoffe. Sie sind eine Kombination aus Faser und Kunststoff-Matrix, wobei die Matrix das Grundmaterial bildet, in dem die Verstärkungsfasern eingebettet sind. Im Zusammenspiel ergänzen sich die Eigenschaften beider Komponenten zu einem mechanisch höher belastbaren Bauteil. [12]

### 3.1.1 Faser

Verstärkungsfasern wie Glas-, Kohlenstoff-, Aramid und Naturfasern zeichnen sich durch ihre geringe Dichte aus und verleihen Kunststoffen hohe Festigkeit und Steifigkeit, wodurch diese ein hohes Leistungsniveau bei geringem Gewicht erreichen. Fasern eignen sich hervorragend für die Kraftübertragung von Zugkräften, sind jedoch für Biegungs- oder Druckbeanspruchungen ungeeignet. [12] Fasern besitzen i.d.R. eine deutlich größere Länge als Durchmesser. Das Verhältnis dieser beiden Eigenschaften wird „Aspektverhältnis“ genannt und kann so stark variieren, dass sich zwei übergeordnete Arten der Faseranordnungen ergeben. Kontinuierliche Fasern besitzen aufgrund ihrer hohen Länge ein hohes Aspektverhältnis sowie eine bevorzugte Ausrichtung, während diskontinuierliche Fasern ein niedriges Aspektverhältnis aufweisen und aufgrund dessen eine zufällige Ausrichtung besitzen. Typische kontinuierliche Faseranordnungen sind hierbei unidirektional (UD), als Gewebe oder als Roving (Abbildung 5 (a)). Kontinuierliche FVK werden häufig zu Laminaten verarbeitet, indem einzelne Schichten kontinuierlicher Fasern in unterschiedlichen Ausrichtungen übereinandergestapelt werden. Eine typische Anordnung bei einer UD-Verstärkung wäre eine Schichtung in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Ausrichtung. Beispiele für diskontinuierliche Faserverstärkungen sind geschnittene Fasern mit jeweils immer geringen Abständen zueinander sowie Fasermatten (Abbildung 5 (b)). [13]

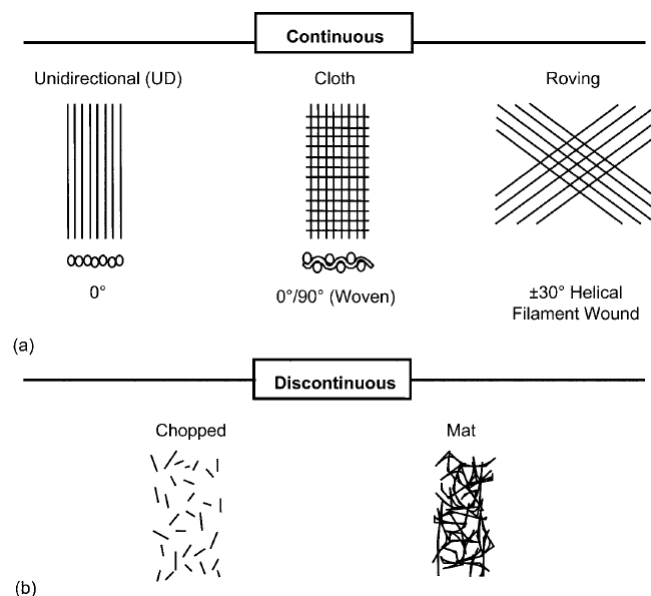


Abbildung 5: (a) Kontinuierliche Faseranordnungen und (b) Diskontinuierliche Faseranordnungen [13]

### **3.1.2 Matrix**

Die Matrix bindet die Fasern zu einer geordneten Struktur zusammen und schützt diese vor Umwelteinflüssen. Sie spielt eine entscheidende Rolle bei der Kraftübertragung, da sie die aufs Laminat aufgebrachten Lasten auf die eingebetteten Fasern überträgt. Neben der Formgebung, Festigkeit und Schadens- und Abriebtoleranz bestimmt die Matrix außerdem auch Eigenschaften wie die maximal zulässige Betriebstemperatur sowie die Resistenz gegenüber Flüssigkeiten, Feuchtigkeit und Oxidation. Das Matrixmaterial für FVK wird in zwei Hauptkategorien, dem Duroplast und Thermoplast, unterteilt. Diese unterscheiden sich nicht nur in der Herstellung, sondern auch in den thermischen und mechanischen Eigenschaften. Der Hauptunterschied liegt jedoch darin, dass Thermoplaste durch Erwärmen erneut geformt oder verschweißt werden können, während Duroplaste nach ihrer Aushärtung nicht mehr aufgeschmolzen werden können und eine besonders hohe Temperaturbeständigkeit bieten. Die in dieser Arbeit verwendeten GFK-Platten bestehen aus Epoxidharz, welches eines der gängigsten duroplastischen Matrixmaterialien in der Herstellung von FVK ist. [13]

### **3.1.3 Besonderheiten von GFK**

GFK ist ein durch Glasfasern verstärkter Kunststoff welcher aufgrund seiner mechanischen und chemischen Eigenschaften zunehmend Verwendung in einer Vielzahl von Industrien findet. Insbesondere als Alternative zum CFK hat GFK an Bedeutung im Automobil-, Schiffs- und Flugzeugbau. Beide FVK bieten eine hohe Zugfestigkeit, Steifigkeit, Beständigkeit, Crashverhalten und Elastizitätsmodul. [6] Gleichzeitig haben sie eine geringe Dichte und sind deswegen essenziell für den Leichtbau. [14] Darüber hinaus bieten sie eine hohe Gestaltungsfreiheit gegenüber Stahl und Aluminium. [3] Trotz ihrer geringen Dichte können FVK je nach Faseranordnung ähnliche Zugfestigkeiten und Steifigkeiten wie Stahl erreichen. [14, 3] Im Vergleich aller FVK zeichnet sich CFK durch das beste Eigenschaftsprofil aus. Die meisten CFK bestehen aus langen kontinuierlichen Fasern, welche maßgebend für ihre Stabilität sind. Jedoch ist gerade die Produktion dieser langen Kohlenstofffasern besonders aufwändig und führt so zu enormen Kosten. [14, 4] Aus diesem Grund werden CFK-Bauteile aktuell lediglich in Fahrzeugen aus dem Hochpreissegment verbaut. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften unterliegt GFK zwar denen von CFK, durch die hohe Korrosionsbeständigkeit und die geringeren Produktionskosten zeigt sich GFK jedoch als geeignete Alternative für viele Verwendungszwecke. [6] Da die meisten GFK diskontinuierliche und somit kürzere Fasern verwenden, können sie einfacher und günstiger hergestellt und nachträglich bearbeitet werden. [3, 14] Besonders in Kombination mit Aluminium in Faser-Metall-Laminaten zeigt sich GFK als

zukunftsweisende Möglichkeit im Leichtbau. Aktuell eingesetzt wird dieses System in ermüdungsbelasteten Bereichen des A380 und zeichnet sich durch hohe Impactbeständigkeit und eingeschränkten Rissfortschritt aus. Für die Entwicklung von Kurzstreckenflugzeugen kann der Einsatz von GFK so eine Einsparung von 400 kg bedeuten. [15, 6]

### 3.2 Prinzip des Vakuumsaugstrahlen

Das Vakuumsaugstrahlen ermöglicht das Bearbeiten von Bauteilen bei gleichzeitigem Erhalten einer sauberen Fertigungsumgebung. Das Außenrohr des Gehäuses wird mit einem Abstand von bis zu einem Millimeter zur Probenoberfläche ausgerichtet, damit beim Verfahren des Endeffektors ein Zusammenstoßen mit der Probenoberfläche vermieden wird. Eine flexible Kunststoffhaube, welche in Kontakt mit der Probe steht, umgibt hierbei das Außenrohr und dichtet dieses ab. An der Absaugung (Abbildung 6) wird ein Industriesauger angeschlossen, der einen Unterdruck im Gehäuse erzeugt. Die in das System einfließende Luft erzeugt eine Saugströmung, welche das Strahlmittel von der Strahlmittelzufuhr über die innere Düse auf die Probenoberfläche beschleunigt. Es wird ein abrasiver Effekt durch das Strahlmittel erzeugt und anschließend die abgetragenen Probenpartikel inklusive der Strahlmittelreste und anderer Kontaminationen durch den Austritt des Gehäuses abgesaugt. Durch diese Funktionsweise des Vakuumsaugstrahlens wird die Emission von Partikeln auf der Substratoberfläche und Umgebung vermieden. [6]

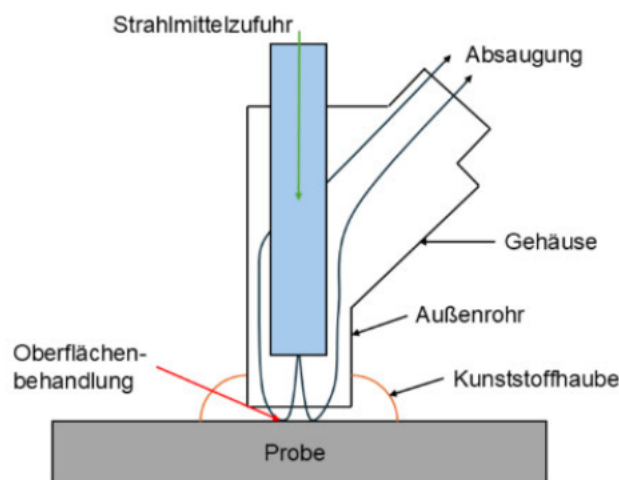


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Vakuumsaugstrahlens

In dieser Arbeit werden zwei Methoden der Abtragung von GFK differenziert. Einerseits die Punktabtragung (PA), welche durch eine statische Bestrahlung der Oberfläche an einem festgelegten Punkt realisiert wird. Die zweite Methode sei die Linienabtragung (LA), die durch

eine dynamische Bestrahlung mittels Verfahrens des Endeffektors entlang einer definierten Linie entsteht. Abbildung 7 zeigt beide Abtragungsarten auf einer behandelten GFK-Platte.

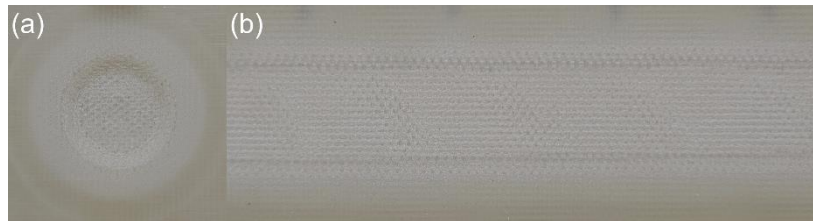


Abbildung 7: Methoden zur VSS-Abtragung von GFK: PA (a) und LA (b)

Für einen großflächigeren Abtrag müssen mehrere LA überlappt werden. Um hierbei einen gleichmäßigen Abtrag zu erreichen ist der Überlappungsabstand (siehe Abbildung 8), mit dem die Bahnen überschritten werden, entscheidend. Wird dieser zu klein gewählt, erfolgt ein Mehrabtrag im Überlappungsbereich wohingegen bei zu großem Abstand zu wenig Material abgetragen wird.



Abbildung 8: Schematische Darstellung und Definition des Überlappungsabstands

### 3.3 Abrasion durch Schleifen und Abrasivstrahlen

Abrasion, ein Verfahren zur Oberflächenbearbeitung, umfasst verschiedene Techniken, die durch Abtragung von Material eine neue Oberfläche schaffen. Das Strahlen von Oberflächen stellt eine weit verbreitete Methode zur mechanischen Oberflächenbearbeitung dar. Der Effekt wird durch das pneumatische oder hydraulische Beschleunigen von gekörnten Feststoffen erreicht, welche mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche auftreffen. Diese Feststoffe werden als Strahlmittel bezeichnet und können je nach Anwendung organischer, metallischer oder mineralischer Natur sein. Die Funktionsweise des Strahlens ist in einigen Punkten mit der des Schleifens vergleichbar. Beide Verfahren unterliegen der Kategorie des Spanens mit geometrisch unbestimmter Schneide. Der Abtrag von einer Oberfläche setzt sich beim Strahlen aus den plastischen

Verformungen und dem Schleifeffekt zusammen, welche ein Aufrauen oder Einebnen der Oberfläche zur Folge haben. Wird ein scharfkantiges Strahlmittel benutzt, trifft dieses mit der Schneide des Schleifkorns auf der Oberfläche auf. Durch die Relativbewegung zwischen Schleifkorn und Oberfläche entstehen ein Span sowie eine Schleifriefe, was den Schleifeffekt darstellt (siehe Abbildung 9). Die plastischen Verformungen kommen zum einen Teil durch die Auftreffenergie des Strahlkorns zustande und zum anderen durch die Druckspannungen, welche beim Kornauftreffen in der Oberfläche erzeugt werden. [16]

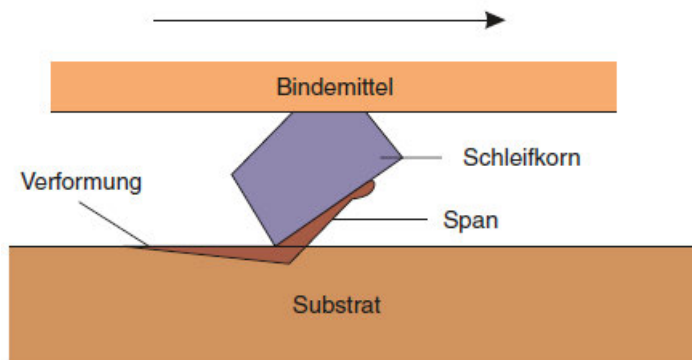


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Schleifeffekts [16]

Die Geschwindigkeit und damit verbundene Auftreffenergie lassen sich insbesondere durch den Düsenabstand zur Oberfläche beeinflussen. Abbildung 10 zeigt eine Vektorfeldgrafik, in der die Geschwindigkeit und Verteilung der Strahlmittelpartikel beim Vakuumsaugstrahlen dargestellt wird. Es ist zu erkennen, dass die Partikel beim unmittelbaren Austreten aus der Düse (rechts im Bild) eine hohe Geschwindigkeit besitzen, welche mit zurückgelegter Strecke weiter abnimmt. Durch die anliegende Saugströmung werden die Partikel anschließend an der Düse vorbei abgesaugt. Dadurch treffen die Partikel im mittleren Bereich der Strömung nahezu orthogonal auf die zu behandelnde Oberfläche, wodurch es Überwiegend zu einer Hämmerwirkung kommt. Weiter außen treffen die Partikel mit einer Schräglage auf, was eine verstärkt schleifende Wirkung verursacht. Dadurch kann es weiter außen zu einem stärkeren Abtrag kommen. [16]

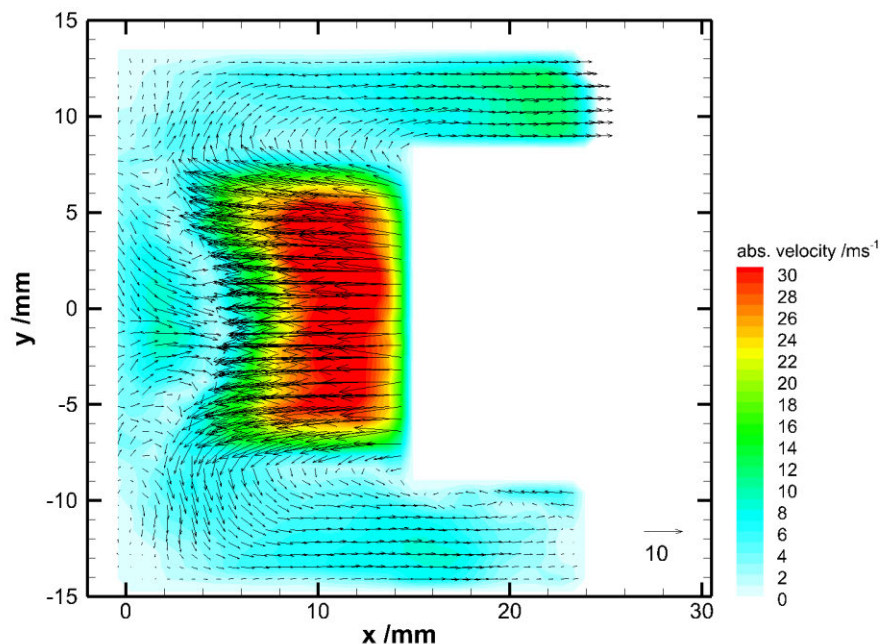


Abbildung 10: Vektorfeldgrafik der Strahlmittelpartikelgeschwindigkeiten und -verteilung beim Vakuumsaugstrahlen

### 3.3.1 Eigenschaften und Bezeichnung von Glasbruch und Edeldorund

Die Wahl des Strahlmittels ist für den Erfolg der Oberflächenbehandlung entscheidend. Nicht jedes Strahlmittel eignet sich für alle Strahlverfahren und Oberflächen und ist mit dem Ziel der Bearbeitung abzustimmen. [16] Strahlmittel unterscheiden sich in der chemischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften wie z.B. der Härte, Kornform und spezifischen Gewicht. Am IFAM haben sich bisher Glasbruch (GB) sowie Edeldorund (EK) bei der Bearbeitung von CFK als gut erwiesen, da sie einen gleichmäßigen und schnellen Abtrag gewährleisten, und werden deshalb in dieser Arbeit ebenfalls in verschiedenen Korngrößen an GFK-Oberflächen erprobt. Die Bezeichnung und damit verbundene Korngrößenverteilung von Edeldorund wird durch die Norm „ISO 8486-1“ bestimmt. Sie definiert den zulässigen Hauptkornbereich und ordnet jedem Korn eine spezifische Bezeichnung zu, die auf der Siebanalyse basiert. Glasbruch wird von vielen Herstellern mit der Bezeichnung „GB“ folgend von der maximalen Korngröße abgekürzt. So ergibt sich z.B. für Glasbruch mit einer maximalen Korngröße von 315 µm eine Bezeichnung von „GB315“. Glasbruch ist ein eisenfreies mineralisches Mehrwegstrahlmittel mit einer kantigen Kornform, welche eine abschleifende Wirkung ermöglicht. [17] Es wird aus gereinigtem Behälterglas hergestellt und enthält wechselnde

Anteile von Grün-, Braun- und Weiß-Glas. [18] Edelmetall hingegen ist ein hochreines Aluminiumoxid, welches ebenfalls als eisenfreies mineralisches Mehrwegstrahlmittel gilt. Im Vergleich zu Glasbruch zeichnet sich Edelmetall durch eine höhere Härte und ein größeres spezifisches Gewicht aus. Aufgrund dieser ausgeprägteren Eigenschaften wird es als ein aggressiveres Strahlmittel betrachtet und findet insbesondere bei der Bearbeitung von Werkstücken mit hoher Härte Anwendung. [19]

### **3.4 Verwendete Messtechnik**

Im folgenden Kapitel werden die drei wesentlichen, in dieser Arbeit verwendeten, Messgeräte vorgestellt und hinsichtlich ihres Aufbaus und Funktionsweise beschrieben.

#### **3.4.1 2D-Laser-Profil-Scanner**

Für die Bestimmung von Daten wie der Abtragtiefe, -form und -rate muss das Abtragprofil vermessen werden. Hierfür wird ein 2D-Laser-Profil-Scanner benutzt, welcher auch als Profilsensor bekannt ist (Abbildung 11). Diese Art von Sensor funktioniert auf Basis der Laserlinien-Triangulation (LLT). [20] Anhand der LLT wird eine Abstandsmessung durch eine trigonometrische Winkelberechnung vorgenommen. [21] Der Sensor weitet mithilfe einer Spezialoptik einen Laserstrahl zu einer statischen Laserlinie auf, welche auf das Messobjekt projiziert wird. Die Oberfläche des Messobjektes reflektiert das Licht, welches in einem bestimmten Winkel auf eine hochempfindliche Sensormatrix trifft. Mithilfe des Matrixbilds wird so der Abstand (z-Achse) sowie auch die Position entlang der Laserlinie (x-Achse) durch den Controller berechnet. Die Profil-Messdaten werden anschließend in einer Software in einem zweidimensionalen Koordinatensystem ausgegeben und können als Excel-Datei gespeichert werden. [20]

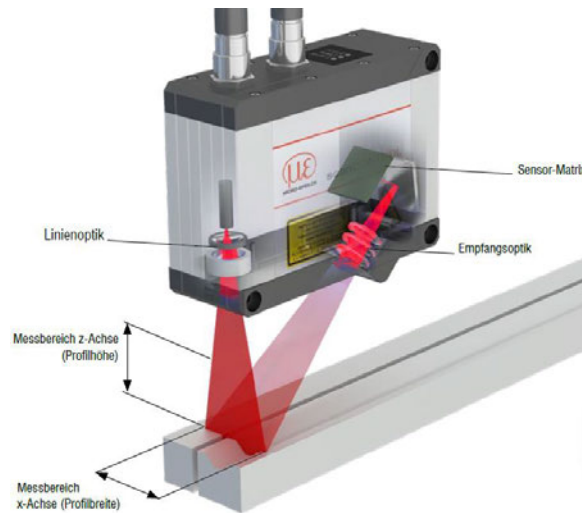


Abbildung 11: Prinzip der Laserlinien-Triangulation eines Profilsensors [20]

### 3.4.2 Rauheitsmessgerät

Zur Messung der Oberflächenrauheit wird in dieser Arbeit das Rauheitsmessgerät „Mar Surf PS 10“ des Herstellers Mahr verwendet (Abbildung 12). Dieses funktioniert nach dem Tastschnittverfahren und kann eine Taststrecke von bis zu 17,5 mm in einem Messbereich von -200 bis +150  $\mu\text{m}$  prüfen. Beim Tastschnittverfahren wird die zu prüfende Werkstückoberfläche mit einer Nadel abgetastet und so das Rauheitsprofil erstellt. Vor der Messung wird das Gerät anhand eines Normals eingemessen. [22] Die Messung der Oberfläche ist vorzugsweise in Richtung der größeren Oberflächenrauheit durchzuführen. [23]



Abbildung 12: Das in dieser Arbeit verwendete Rauheitsmessgerät "MarSurf PS 10" [24]

### 3.4.3 Digitalmikroskop

Ein Digitalmikroskop zeigt die zu mikroskopierende Probe mithilfe eines Bildsensors und eines Zoomobjektivs vergrößert auf einem Monitor an. Dadurch können Rückschlüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit der bestrahlten Proben gezogen werden. Beim Bildsensor handelt es sich um einen „CMOS-Bildsensor“ (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Das CMOS ist eine Halbleiterkomponente, welche auftreffendes Licht in digitale Daten umwandelt, welche anschließend als digitales Bild ausgegeben werden können (siehe Abbildung 13). [25]

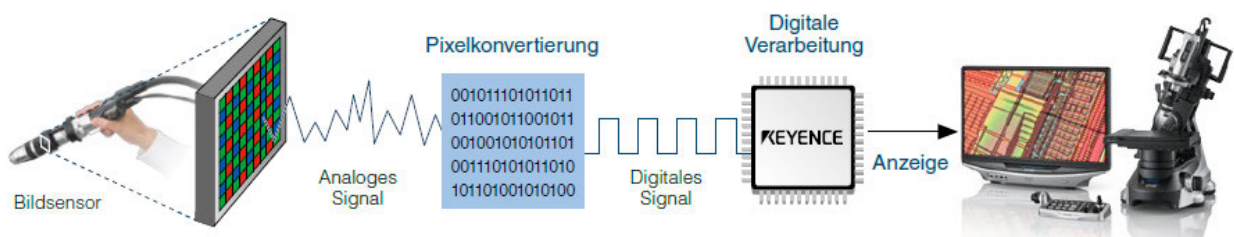


Abbildung 13: Ablauf der digitalen Bildwiedergabe eines Digitalmikroskops [25]

Ein Zoomobjektiv ist hierbei für die Bildvergrößerung verantwortlich. Je nach Abstand der mittleren Linse zu den anderen Linsen, kann die Brennweite so eingestellt werden, dass ein Bild im Weitwinkel oder mit starker Vergrößerung dargestellt wird. [25] Je nach Probe, kann es wichtig sein, bestimmte Details im Bild hervorzuheben. Hier ist die passende Beleuchtungsart der Probe ausschlaggebend. Lichtmikroskope bieten i.d.R. verschiedene Beleuchtungsarten, von denen jedoch nur die Ringbeleuchtung für diese Arbeit relevant ist. Wird eine Ringbeleuchtung nur teilbeleuchtet, ergibt sich ein Schattenwurf, welcher sich besonders gut zur Hervorhebung der Vertiefungen und Erhebungen einer Oberfläche eignet. [26]

## 3.5 Verwendete mathematische Formeln

Dieses Kapitel geht auf die verwendeten mathematischen Formeln ein und erläutert deren Grundlagen sowie die Anwendung in der Berechnung bestimmter Daten.

### 3.5.1 Berechnung der volumetrischen Abtragrate

Die Messung mit dem Profilsensor ergibt ein Schnittbild der Abtragung. Wird angenommen, dass die Abtragung spiegelsymmetrisch ist, kann die eine Hälfte der Schnittfläche genutzt werden, um einen Rotationskörper zu bilden und so das Volumen der Punktabtragung  $V_{PA}$  näherungsweise

zu bestimmen. Die Schnittfläche  $A$  wird anhand der Profilmessdaten durch eine Integration bestimmt und anschließend die x-Koordinate des Schwerpunkts dieser Fläche ( $R_A$ ) berechnet. Die zweite Regel von Pappus-Guldin besagt, dass das Volumen eines rotationssymmetrischen Körpers gleich dem Produkt der erzeugenden Mantelfläche und dem Weg ihres Flächenschwerpunktes bei einer vollen Umdrehung ist (siehe Formel (1)). [27] Abbildung 14 verdeutlicht die Anwendung der Regel an einer Beispielmessung. Die Mitte des Abtragprofils fällt hierbei nicht immer mit dem Ursprung der Breite auf der Abszisse zusammen, da eine exakte manuelle Zentrierung des Messobjekts unter dem Profilsensor erforderlich gewesen wäre, was jedoch nicht in allen Fällen gelang. Dies wirkt sich jedoch nicht auf die Ergebnisse aus.

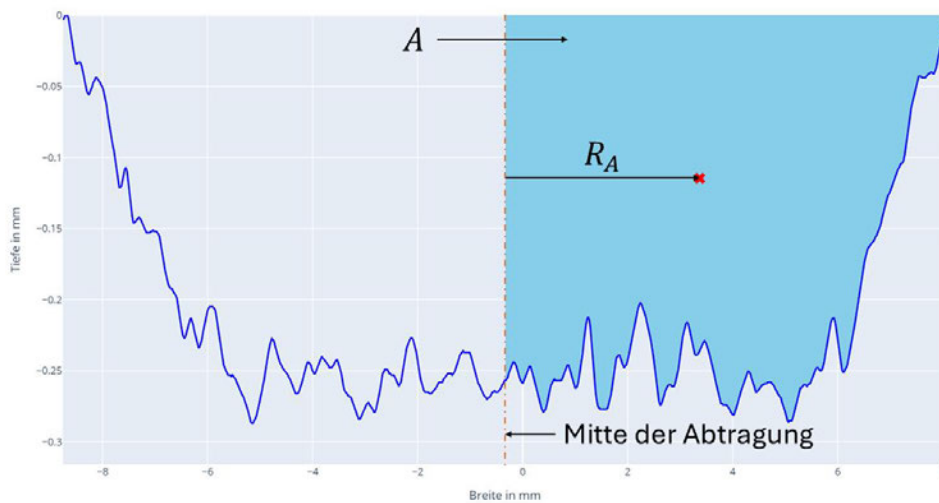


Abbildung 14: Anwendung der zweiten Regel von Pappus-Guldin anhand einer Beispielmessung

$$V_{PA} = 2 * \pi * R_A * A \quad (1)$$

Wird das Volumen anschließend durch die Strahldauer  $t_{PA}$  dividiert, ergibt dies die volumetrische Abtragrate einer Punktabtragung  $Q_{PA}$  in der Einheit  $\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  (Formel (2)).

$$Q_{PA} = \frac{V_{PA}}{t_{PA}} = \frac{2 * \pi * R_A * A}{t_{PA}} \quad (2)$$

Die Abtragrate einer LA muss jedoch auf andere Art bestimmt werden, da diese nicht als Rotationskörper dargestellt werden kann. Durch die Messpunkte auf der LA kann diese in jeweils immer gleichlange Segmente unterteilt werden. Für jedes Segment wird anhand der dazugehörigen Profilmessdaten die Schnittfläche durch Integration bestimmt. Anschließend wird

die Annahme getroffen, dass diese Schnittfläche entlang jeden Segments konstant ist und somit durch Multiplikation mit der jeweiligen Segmentlänge das Abtragsvolumen  $V_{LA}$  bestimmt werden kann. Für zwei Segmente lautet die Formel somit:

$$V_{LA} = l_{segment} * (A_{segment,1} + A_{segment,2}) \quad (3)$$

Dadurch, dass die Vorschubgeschwindigkeit  $v_{LA}$  und Gesamtlänge der zurückgelegten Strecke  $l_{gesamt}$  bekannt sind, kann die Zeit  $t_{LA}$ , die für den Abtrag des Volumens benötigt wird, mit Formel (4) berechnet werden.

$$t_{LA} = \frac{l_{gesamt}}{v_{LA}} \quad (4)$$

Die volumetrische Abtrate einer Linienabtragung  $Q_{LA}$  ergibt sich somit aus dem Volumen des Abtrags dividiert durch die für dessen Abtrag benötigte Zeit  $t_{LA}$ . Die spezifische Formel für die in Kapitel 6.3.1 zu berechnende Abtrate einer LA mit zwei Segmenten lautet somit:

$$Q_{LA} = \frac{V_{LA}}{t_{LA}} = \frac{l_{segment} * v_{LA} * (A_{segment,1} + A_{segment,2})}{l_{gesamt}} \quad (5)$$

### 3.5.2 Bestimmtheitsmaß

Bei dem Bestimmtheitsmaß handelt es sich um eine lineare Regression mit Fit des Achsenabschnittes. Diese berechnet, inwieweit die tatsächlichen Messwerte auf einer eingezeichneten Funktion liegen, und wird in dieser Arbeit genutzt, um die Vorschubgeschwindigkeit in Relation zur durchschnittlichen Abtragtiefe graphisch auszudrücken. Die Abweichung der tatsächlichen Messpunkte von der gezeichneten Funktion wird als  $R^2$  angegeben.  $R^2$  ist der Quotient aus der Residuenquadratsumme  $SQR$  und der totalen Quadratsumme  $SQT$ .

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (6)$$

Die Quadratsumme ist die Summe der Differenzen aller tatsächlich gemessenen Werte  $y_i$  und dem Gesamtmittelwert  $\bar{y}$ . Die Residuenquadratsumme entspricht der Summe der Differenzen der tatsächlichen Werte und der statistisch vorhergesagten Werte  $\hat{y}$ .

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (7)$$

$R^2$  kann einen Wert von 0 bis 1 annehmen, wobei 1 eine vollständige Übereinstimmung der tatsächlichen empirischen Daten mit dem angelegten Graphen bedeutet. [28] Um eine passende Funktion für die Messergebnisse zu finden wird die Curve-Fit Funktion von Python genutzt. Diese passt verschiedene mathematische Modelle an die gegebenen Messdaten an. Mit einem zusätzlichen Code wird dann das jeweilige Bestimmtheitsmaß berechnet und so die den realen Messwerten ähnlichste Ersatzfunktion ermittelt.

## 4 Versuchsaufbau

Das folgende Kapitel erläutert den Versuchsaufbau und die damit einhergehenden technischen und materiellen Voraussetzungen, die für die anschließende Durchführung der Experimente benötigt werden.

Die GFK-Platten wurden vom Unternehmen „PCC – Polymer Composite Consulting“ hergestellt. Eine Platte besteht aus 12 Lagen, in denen Glasgewebe mit einem Flächengewicht von ca.  $170 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$  verarbeitet wurde. Bei einer Einzellagen-Dicke von 0,17 mm ergibt sich eine Laminatstärke von 2,04 mm. Das Matrixmaterial ist ein Standard-Epoxidharz, welches bei 140°C ausgehärtet wurde. Die Platten wurden anhand des Pressverfahrens hergestellt und weisen eine Abmessung von 26 cm x 26 cm auf. Abbildung 15 zeigt eine der in dieser Arbeit verwendeten unbearbeiteten GFK-Platten.



Abbildung 15: In dieser Arbeit verwendete unbearbeitete GFK-Platte

#### 4.1 Eigenschaften verwendeter Strahlmittel

Das in dieser Arbeit verwendete Glasbruch-Strahlmittel hat ein kantiges Korn, eine Härte von 6 bis 7 mohs und ein spezifisches Gewicht von ca.  $2,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Das Edelkorund ist ebenfalls kantig mit einer Härte von 9 mohs und einem spezifischen Gewicht von ca.  $4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Es wird Edelkorund mit den Bezeichnungen F180, F100 und F54 verwendet. Tabelle 1 zeigt die Korngrößenverteilung des Edelkorunds mit den soeben genannten Bezeichnungen sowie die vom Hersteller spezifizierte Korngrößenverteilung des in dieser Arbeit verwendeten Glasbruchs.

Tabelle 1: Bezeichnungen und Korngrößenverteilung der in dieser Arbeit verwendeten Strahlmittels

Bezeichnung	Min. Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]	Max. Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]
F180	63	90
F100	106	150
F54	250	355
GB150	80	150
GB180	80	180
GB315	200	315
GB500	350	500
GB1000	600	1000

#### 4.2 Aufbau der Vakuumsaugstrahl-Anlage

Die Vakuumsaugstrahlanlage besteht aus vier wesentlichen Komponenten. Dem sechs-achsigen Roboterarm, dem Endeffektor, einem Industriesauger und einem Strahlmittel-Dosiersystem. Auf dem Arbeitstisch befindet sich eine Saugplatte, die der GFK-Platte beim Saugstrahlen eine

definierte Position gibt und diese vor dem Verrutschen schützt. Beim Roboterarm handelt es sich um das Modell „KR 270 R2700 Ultra“ des Herstellers Kuka (siehe Abbildung 16). Bei einer Arm-Reichweite von 2696 mm liegt die Nenn-Traglast bei 270 kg. [29] Der Roboter sitzt auf einer Schiene, welche die siebte Achse bildet und so die Reichweite des Systems deutlich erweitert. Die Bedienung erfolgt anhand einer mobilen kabelgebundenen Bedienerkonsole mit Touchscreen. Die Programme für eine präzise Bewegungs- und Vakuumsaugstrahlsteuerung können mithilfe der Software „Kuka Work Visual“ an einem Computer geschrieben und auf den Roboter übertragen werden. Der Code wird in der Programmiersprache „Kuka Robot Language“ (KRL) verfasst.



Abbildung 16: Der in dieser Arbeit verwendete Roboter: KUKA KR 270 R2700 ultra [29]

In der Robotik wird der Endeffektor als das letzte Glied einer kinematischen Kette bezeichnet. In dieser Arbeit ist dies die Vakuumsaugstrahleinheit. Die Hauptkomponenten sind hierbei das Gehäuse mit Außenrohr, die innere Düse (Venturi-Düse) sowie die Strahlmittelzufuhr- und Absaugungsleitung per PVC-Schlauch (siehe Abbildung 17). Beim Sauger handelt es sich um einen Industriesauger des italienischen Herstellers „Delfin“ Modell „D/G 2 PN H“ (siehe Abbildung 18). Er besitzt eine Leistung von 5,5 kW. So wird über einen ca. 30 m langen PVC-Schlauch ein Unterdruck erzeugt, welcher das Strahlmittel vom Dosiersystem bis zur zu bearbeitenden GFK-

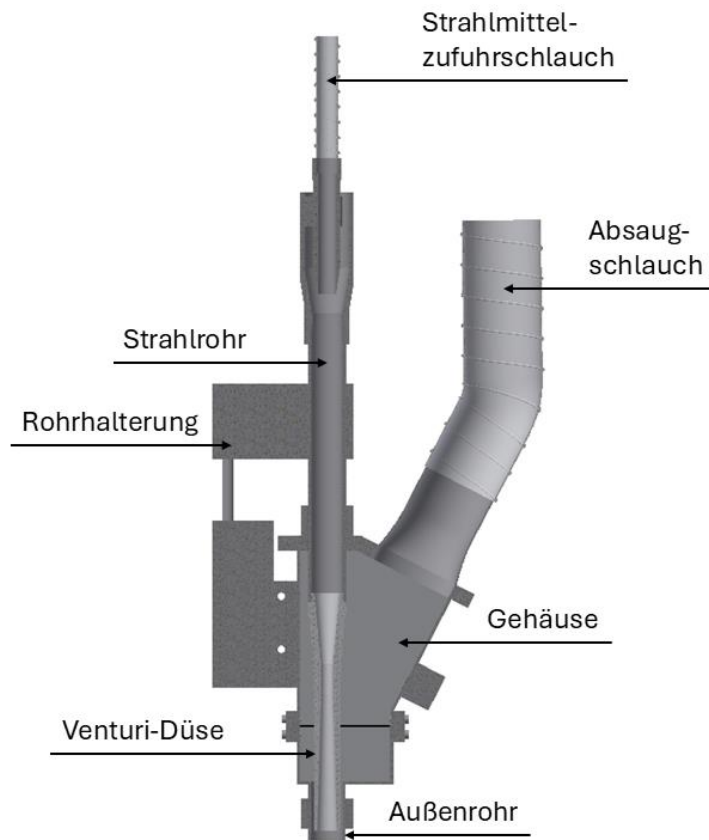


Abbildung 17: Schnittbild der verwendeten Vakuumsaugstrahleinheit

Oberfläche fördert und anschließend auch das Strahlmittel sowie das abgetragene Material wieder absaugt. Am Sauger sind zwei Ventile verbaut, welche den Unterdruck in den drei Stufen 16 kPa, 23 kPa und 30 kPa einstellen lassen. Die im Sauger integrierten Filter reinigen die abgesaugte Luft und scheiden die ausgefilterten Partikel in einer Sammeltonne ab.



Abbildung 18: Der in dieser Arbeit verwendete Industriesauger

Für eine kontrollierte Strahlmittelzufuhr ist ein Dosiersystem vorhanden, welches aus einem mit Strahlmittel befüllten Trichter und einer Rüttelrinne besteht (siehe Abbildung 19). Der Trichter fördert das Strahlmittel anhand eines Rohres auf die Rüttelrinne, welche das Strahlmittel mit einem Massenstrom von bis zu.  $2 \frac{g}{s}$  in einen Schlauch fördert. Dieser Schlauch ist mit der im Endeffektor verbauten Düse verbunden.

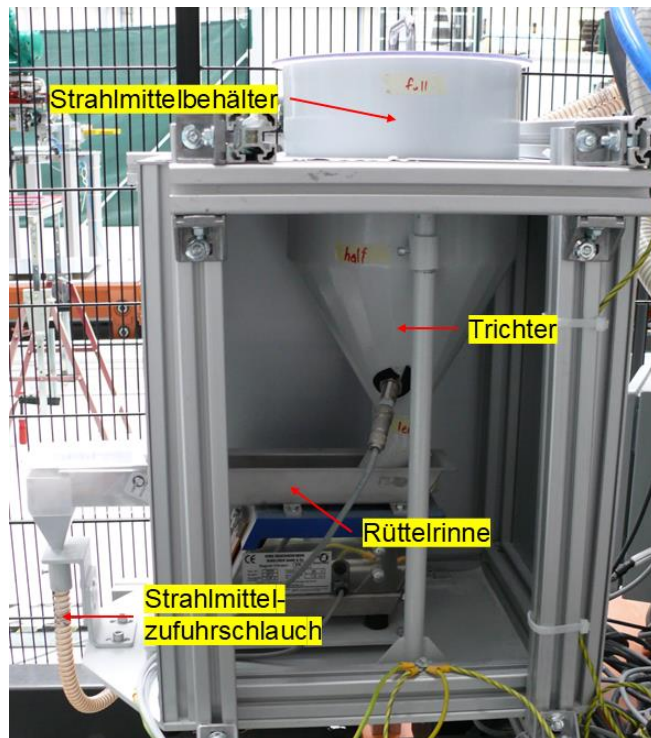


Abbildung 19: Das in dieser Arbeit verwendete Strahlmitteldosiersystem

#### 4.3 Versuchsaufbau der Messtechnik

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau der verwendeten Messsysteme im Detail erläutert.

#### 4.3.1 2D-Laser-Profil-Scanner

Der Profilsensor des Herstellers „Micro-Epsilon“ wurde an einem Gerüst aus Bosch-Rexroth-Profilen montiert (siehe Abbildung 20). Der Laser ist nach unten ausgerichtet, sodass dieser auf die auszumessende Oberflächenbearbeitung projiziert wird. Der Höhenabstand des Sensors wird dabei so angepasst, dass beim Messen eine Sättigung von 70 bis 90 % erreicht wird, was gemäß Herstellerangaben als optimal gilt. [30] Dieser Sensor besitzt einen Messbereich von 25 mm entlang der Laserlinie, wobei im späteren Verlauf der Arbeit ein Profilsensor mit einem Messbereich von 50 mm genutzt wird, um das Ausmessen von überlappten Bahnen zu ermöglichen.

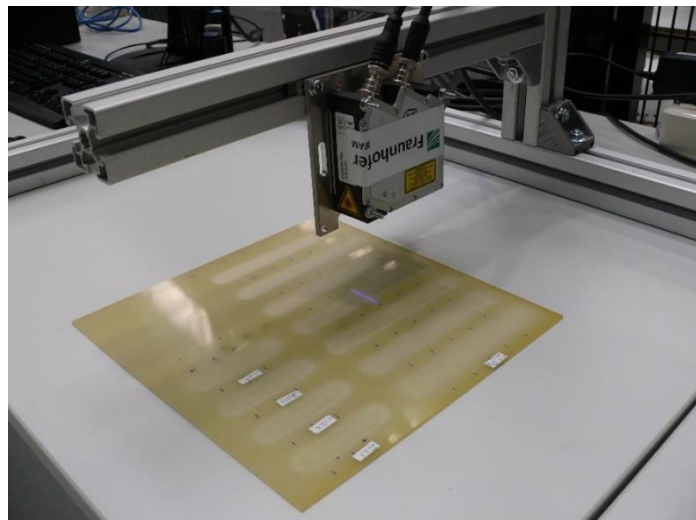


Abbildung 20: Versuchsaufbau des in dieser Arbeit genutzten 2D-Laser-Profil-Scanners

#### 4.3.2 Rauheitsmessgerät

Das Rauheitsmessgerät wird manuell auf die GFK-Platte gelegt (siehe Abbildung 21). Die Messnadel ist hierbei auf den auszumessenden Bereich auszurichten. Da es sich bei der Rauheitsmessung um eine sehr störungsanfällige Messung handelt, ist für den Aufbau ein schwingungsfreier Messstandort zu wählen, welcher möglichst wenig von äußeren Einflüssen gestört wird.

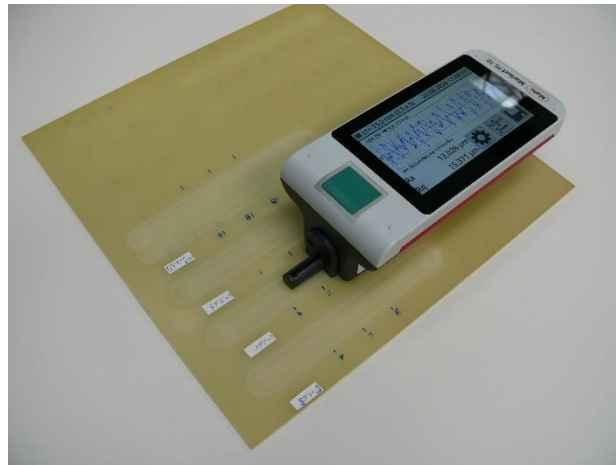


Abbildung 21: Positionierung des Rauheitsmessgeräts bei der Ausmessung einer Linienabtragung

#### 4.3.3 Lichtmikroskop

Das Lichtmikroskop wird auf einem festen und schwingungsfreien Arbeitsplatz aufgebaut. Die GFK-Platte wird zur Mikroskopie so unter das Objektiv platziert, dass sie sich im Fokusbereich des Mikroskops befindet, damit eine Scharfstellung des Bildes erfolgen kann (siehe Abbildung 22).

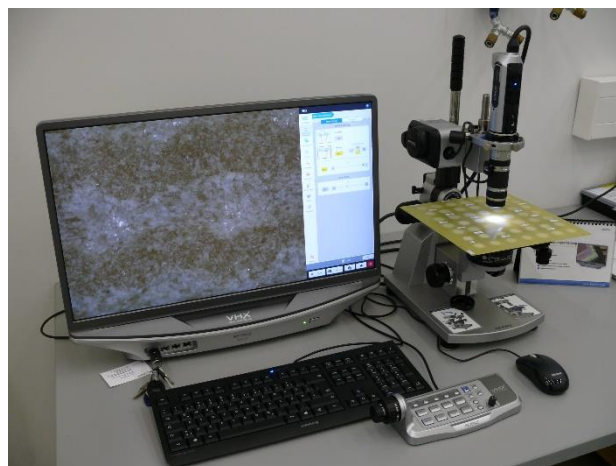


Abbildung 22: Positionierung der GFK-Platte und Versuchsaufbau des Lichtmikroskops

## 5 Konzeptentwicklung und Versuchsdurchführung

Im folgenden Kapitel wird die Konzeptentwicklung der Versuche sowie deren Durchführung unter Darlegung einer Anforderungsliste detailliert beschrieben. Es wird erläutert, welche Parameter im Rahmen dieser Arbeit an der Vakuumsaugstrahlanlage variiert und getestet werden.

### 5.1 Anforderungsliste

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die durchzuführen Parameterstudie vorgestellt. Die im folgenden aufgeführte Anforderungsliste (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) dient als Grundlage für die Planung und Durchführung der Untersuchungen. Dabei sind die mit „F“ gekennzeichneten Anforderungen als zwingend zu erfüllende Kriterien zu verstehen, während die mit „W“ gekennzeichneten Anforderungen als wünschenswerte, aber nicht notwendigerweise zu realisierende Merkmale definiert sind. Als Grenzwerte für den Abtrag einer Lage soll gelten, dass mindesten  $\frac{3}{4}$  einer Lagenstärke (0,128 mm) abgetragen werden muss. Jedoch dürfen nicht mehr als 10 % der zweiten Lage abgetragen werden, da diese möglichst nicht beschädigt werden darf. Dieser Richtwert stammt aus einer von Airbus vorgeschriebenen Richtlinie für den Abtragprozess von FVK und wird für diese Arbeit adaptiert. [31] Der obere Grenzwert liegt hierbei somit bei 0,187 mm durchschnittlicher Abtragtiefe.

Tabelle 2: Anforderungsliste

Anforderungsliste			
Nr.	F/W	Beschreibung der Anforderung	Bemerkungen
1		Allgemeine Funktionen	
1.1	F	Automatisierte Bearbeitung	Durchführung mit dem vorhandenen Kuka-Roboter und Endeffektor und Schreiben der Programme in KRL
2		Parameter	
2.1	F	Variation des Unterdrucks	16 kPa, 23 kPa und 30 kPa bei PA
2.2	F	Variation des inneren Düsenabstands	2 mm, 7 mm und 12 mm bei PA
2.3	F	Variation des Strahlmittelmassenstroms	0,67 g/s, 1,33 g/s und 2 g/s bei PA
2.4	F	Strahldauer	PA mit Bestrahlungszeiten von 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 s
2.5	F	Vorschubgeschwindigkeit	Ermittlung der Vorschubgeschwindigkeit für den Abtrag von min. $\frac{3}{4}$ einer Lage mit weniger als 10% Abtrag der zweiten Lage

2.6	F	Überlappung zweier Bahnen	Ermittlung des optimalen Überlappungsabstands zur gleichmäßigen Überlappung von zwei LA
3		<b>Materialien</b>	
3.1	F	Edelkorund	Untersuchung von PA bei Verwendung von EK F180, F100 und F54
3.2	F	Glasbruch	Untersuchung von PA bei Verwendung von GB150, GB180, GB315, GB500 und GB1000
4		<b>Berechnungen</b>	
4.1	F	Abtragrate	Berechnung der volumetrischen Abtragrate für PA und LA
5		<b>Messungen</b>	
5.1	F	Ermittlung der Profilmessdaten	Mit 2D-Laser-Profil-Scanner
5.2	F	Abtragtiefe	Ermittlung der durchschnittlichen Abtragtiefe und der Tiefstwerte bei PA anhand der Profilmessdaten
5.3	F	Abtragbreite	Ermittlung der Breite und Breite im tiefsten Bereich bei PA anhand der Profilmessdaten
5.4	F	Sichtprüfung der Profilformen	Prüfung der Abträge auf Ungleichförmigkeiten
5.5	F	Oberflächenrauheit	Messung des Mittenrauheits Ra bei Verwendung verschiedener Strahlmittel für PA und für LA mit der Vorschubgeschwindigkeit für den Abtrag min. 3/4 einer Lage und nicht mehr als 10% der nächsten Lage
5.6	F	Oberflächenbeschaffenheit	Mikroskopieren des Abtrags bei Verwendung verschiedener Strahlmittel

## 5.2 Ermittlung der Profilmessdaten

Der Profilsensor wird je nachdem ob eine PA oder LA vorliegt, anders ausgerichtet. Bei einer PA wird die Messung möglichst mittig der Abtragung durchgeführt (Abbildung 23 (a)). Bei einer LA werden entlang der Bahn fünf Messpunkte mit jeweils einem Abstand von 20 mm zueinander definiert. Die Länge der LA beträgt hierbei immer 120 mm damit der Abtrag lang genug für die Messungen ist. Die Messung erfolgt jeweils immer orthogonal zur Abtragrichtung, sodass das Tiefenprofil erfasst werden kann (Abbildung 23 (b)). Für eine korrekte Darstellung des Abtrags muss in der Software eine Korrektur der Einbaulage erfolgen. Hierfür wird links und rechts des Abtrags jeweils ein Referenzbereich gewählt, in dem die Software eine gemittelte Profilhöhe berechnet. Durch diese beiden Punkte wird eine Referenzgerade gelegt, welche die unbearbeitete Oberfläche der GFK-Platte darstellt. Erkennt das Messprogramm anhand dieser Geraden eine Schräglage, kann diese jetzt korrigiert und auf einen Winkel von 0° gestellt werden. Bevor die Profildaten als Excel-Datei exportiert werden, wird ein spezifischer Messbereich definiert. Dieser Messbereich enthält alle Messpunkte innerhalb der Abtragung, beginnend an den Kanten des Abtrags. Auf diese Weise ist es einfacher eine automatisierte Auswertung anhand

eines im Rahmen dieser Arbeit geschriebenen Python-Codes durchzuführen, da so nur die relevanten Profildaten des Abtrags vorhanden sind und der unbearbeitete Bereich ausgeschlossen wird.

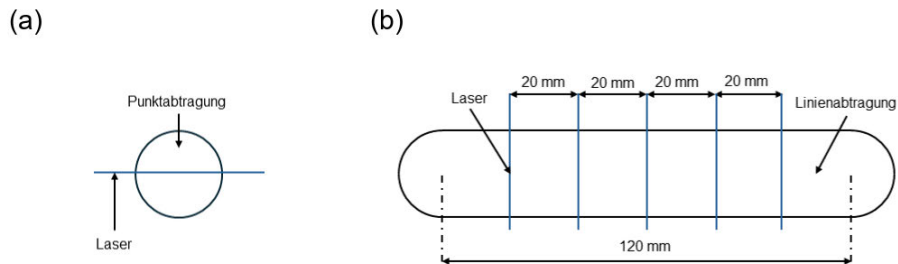


Abbildung 23: Messpunkte bei einer PA (a) und LA (b)

### 5.3 Ermittlung der Abtragtiefen

Zur Ermittlung der Abtragtiefe müssen die Daten der Profilhöhe weiterverarbeitet werden, da die Software die Höhendaten relativ zur Einbaulage des Sensors ausgibt. Hierfür wird die Annahme getroffen, dass der höchste Punkt der Abtragung die Nulllinie und somit die Oberfläche der GFK-Platte darstellt. Alle tieferliegenden Messpunkte befinden sich somit im negativen z-Bereich des Koordinatensystems. Um dies zu erreichen, wird von jedem Höhenmesspunkt der Wert des tiefsten Messpunktes abgezogen und die Daten auf diese Weise „genullt“. Auf dieser Grundlage werden zwei Abtragtiefen bestimmt. Dabei handelt es sich um den Tiefstwert der gesamten Abtragung sowie der durchschnittlichen Tiefe im tiefsten Bereich, welche als Tiefenwert aussagekräftiger ist, da sie nicht nur einen Spitzenwert darstellt. Wobei der Tiefstwert lediglich der Wert des tiefstliegenden Messpunkts ist, muss für die durchschnittliche Tiefe zunächst der tiefste Bereich definiert werden, in dem dann eine Mittelwertbildung erfolgt. Die Definition erfolgt in einem Zwischenschritt der Erzeugung des Plots und Berechnung der Messdaten anhand von manueller Auswahl zweier Messpunkte, welche die linke und rechte Grenze des tiefsten Bereichs bilden. Die Grenzen werden in etwa dort platziert, wo sich der Übergangsbereich des zentralen, tiefsten Abtragungsbereichs und der weniger tiefen Randgebiete des Abtrags befindet. Abbildung 24 zeigt beispielhaft den Plot einer Abtragung, bei dem die Grenzen des tiefsten Bereichs durch

zwei gestrichelte vertikale Linien verdeutlicht werden. Die durchschnittliche Abtragtiefe wird durch eine grüne horizontale Linie markiert.

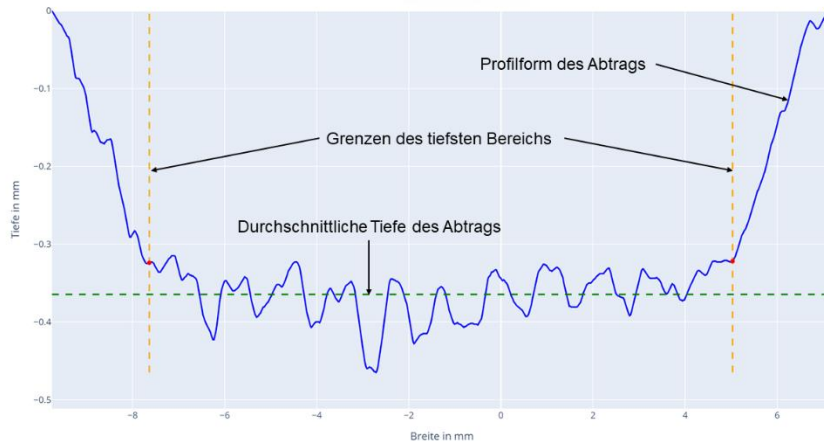


Abbildung 24: Beispiel einer Auswahl der Grenzen des tiefsten Bereichs und der damit ermittelten durchschnittlichen Abtragtiefe

## 5.4 Ermittlung der Abtragbreite

Das Abtragprofil lässt sich in der Regel vereinfacht durch ein Trapez darstellen. Dies hat den Hintergrund, dass in der Realität kein perfekt zylindrischer Abtrag möglich ist und die Breite mit zunehmender Tiefe abnimmt. Somit lassen sich auch bei der Abtragbreite zwei Werte für diesen Parameter darstellen. Einerseits die Breite, die bei 0 mm Tiefe und die, die im tiefsten Bereich der Abtragung vorliegt. Abbildung 25 verdeutlicht dieses Prinzip, in dem ein Trapez in einer Beispielmessung eingefügt und beschriftet wurde.

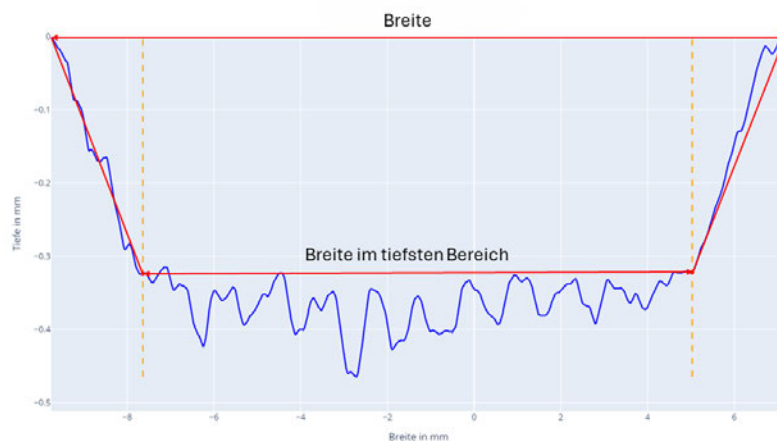


Abbildung 25: Ermittlung der Breiten anhand einer Beispielmessung

## **5.5 Ermittlung der Gleichmäßigkeit des Abtrags**

Die Gleichmäßigkeit wird optisch anhand der Profilform des Abtrags bestimmt. Hierbei wird darauf geachtet, ob Unregelmäßigkeiten der Abtragtiefe im tiefsten Bereich vorhanden sind. Diese können sich durch überdurchschnittlich große Berge und Täler, Schräglagen oder spitz zulaufende Profilformen äußern.

## **5.6 Ermittlung der Oberflächenrauheit**

Mit dem Rauheitsmessgerät wird der Mittenrauwert  $R_a$  erfasst. Es wird immer in zwei Richtungen im Winkel von  $90^\circ$  gemessen und anschließend der höhere Mittenrauwert gewählt. Für PA wird aufgrund der kleinen Abtragsfläche eine Prüfstrecke von 4,8 mm gewählt. Bei den LA wird an den Messpunkten gemessen, an denen auch die Profilmessdaten mit dem Profilsensor ermittelt wurden. Wie schon bei den PA wird auch hier immer in zwei Richtungen gemessen. Da der Messbereich längs des Linienabtrags weniger eingeschränkt ist als quer wird hier statt den 4,8 mm eine Prüfstrecke von 15 mm gewählt.

## **5.7 Mikroskopierung der Abtragungen**

Hier wurde die Oberflächenbeschaffenheit der Punktabtragungen bei Verwendung von EK und GB verschiedener Korngrößen geprüft. Es wird insbesondere auf den Zustand der Faser und der Matrix geachtet und dieser für die jeweils verschiedenen Abträge verglichen.

## **5.8 Durchführung der statischen Versuche**

Als statische Versuche gelten Versuche, die eine Abtragung ohne Verfahren des Roboterarms durchführen und so eine Punktabtragung erreichen. Die Parameterwerte und -kombinationen basieren auf zuvor am IFAM durchgeführten Studien, die zwar auf CFK anstelle von GFK angewendet wurden, sich jedoch als Standardeinstellungen für einen gleichmäßigen und schnellen Abtrag etabliert haben. Diese Standardeinstellungen sind Tabelle 3 zu entnehmen. Die Strahldauer von zehn Sekunden wurde so gewählt, damit bei der Versuchsdurchführung verschiedener Parameter genügend Zeit vorhanden ist, um einen ausreichenden Abtrag zu gewährleisten.

Tabelle 3: Einstellungen der Parameter für die größte Abtragsrate bei Punktabtragungen an CFK

Parameter	Einstellung
Unterdruck	30 kPa
Abstand der inneren Düse	7 mm
Strahlmittel	GB315
Massenstrom des Strahlmittels	$2 \frac{g}{s}$
Strahldauer	10 s

Aufbauend auf diesen Werten wird in dieser Versuchsreihe immer einer von fünf Parametern variiert, der erfahrungsgemäß einen großen Einfluss auf das Abtragergebnis hat (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Variationen aller in dieser Arbeit erforschten Parameter

Parameter	Einstellungen
Unterdruck	16, 23 und 30 kPa
Abstand der inneren Düse	2, 7 und 12 mm
Strahlmittel	Glasbruch GB150, 180, 315, 500 und 1000 Edelkorund F180, F100 und F054
Massenstrom des Strahlmittels	$0,67 \frac{g}{s}$ , $1,33 \frac{g}{s}$ und $2 \frac{g}{s}$
Strahldauer	2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 s

Das Außenrohr des Endeffektors wird immer mit einem Abstand von 1 mm zur Oberfläche der GFK-Platte ausgerichtet. Dadurch wird bei den darauffolgenden dynamischen Versuchen ein

Kontakt und eventuelle Beschädigung der Probenoberfläche vermieden, was bereits bei kleinsten Schräglagen oder Unebenheiten des Laminats geschehen kann. Die anschließende automatisierte PA wird so programmiert, dass nach dem Einschalten des Industriesaugers eine Wartezeit von drei Sekunden vorhanden ist, sodass sich ein stabiler Unterdruck aufbauen kann. Anschließend wird die Strahlmittelzufuhr eingeschaltet, auf die eine weitere Wartezeit von zwei Sekunden folgt, da das Strahlmittel erfahrungsgemäß so lange braucht, um die zu bearbeitende Oberfläche zu erreichen. Das hierauf folgende Zeitfenster ist die Strahldauer, in der eine konstante Zufuhr des Strahlmittels erfolgt. Sobald die Zufuhr ausgeschaltet ist, folgt eine Abschaltachsaugezeit, die sicherstellt, dass kein Strahlmittel im Zuführschlauch verbleibt. Danach wird der Industriesauger abgeschaltet und vor dem Anheben des Endeffektors weitere acht Sekunden gewartet damit sich der Unterdruck abbauen kann. Zu jeder Einstellung werden drei Versuchswiederholungen mit einer anschließende Mittelwertbildung der jeweiligen Messwerte durchgeführt.

## **5.9 Durchführung der dynamischen Versuche**

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 5.8 werden dynamische Versuche auf den Proben durchgeführt. Zunächst wird die Geschwindigkeit für eine Einzelspur zur Entfernung genau einer Lage ermittelt. Hierfür wird ein Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und durchschnittlicher Abtragtiefe hergestellt. Es werden Geschwindigkeiten im Bereich von 1 bis  $7 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  in Schritten von  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  getestet. Für jede Geschwindigkeit werden jeweils drei Wiederholungen durchgeführt, wobei pro Wiederholung fünf Messpunkte erfasst werden. Dies Resultiert in 15 Tiefenmessungen pro Geschwindigkeit, welche anschließend auf einen Messwert gemittelt werden. Mithilfe eines Python-Codes wird eine Ersatzfunktion gebildet, welche den Zusammenhang der Messpunkte aller Geschwindigkeiten abbilden kann. Zur Ermittlung der genauesten Ersatzfunktion wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  herangezogen. Durch Umstellung der Variablen der Funktion wird anschließend die optimale Vorschubgeschwindigkeit für den Abtrag einer Lage (0,17 mm) ermittelt. Die auf diese Art ermittelte Geschwindigkeit wird anschließend mit drei Bahnwiederholungen erprobt und jeweils an drei Positionen mit dem Profilsensor und Rauheitsmessgerät auf die durchschnittliche Abtragtiefe, Abtragrate und Rauheit geprüft. Die drei Tiefenmessungen jeder Bahn werden dabei gemittelt, wobei die volumetrische Abtragrate für jede Bahn einzeln bestimmt wird. Im nächsten Schritt gilt es den optimalen Überlappungsabstand zweier Bahnen zu ermitteln, sodass ein gleichmäßiger Abtrag im Überlappungsbereich entsteht. Bei der Bearbeitung von CFK haben sich Überlappungsabstände von 11-13 mm als zielführend erwiesen, welche in Schritten von 0,5 mm auf GFK erprobt werden. Jede Einstellung wird mit

einer Wiederholung und jeweils fünf Messpunkten getestet und anschließend optisch anhand der Profilform beurteilt.

## **6 Ergebnisse**

Dieses Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen der Parameterstudie sowie deren anschließender Diskussion.

### **6.1 Statische Versuche**

In diesem Kapitel befinden sich die Ergebnisse aller statischen Versuche, welche die Grundlage für die dynamischen Versuche bilden. Hierbei werden alle in Kapitel 5.8 beschriebenen Parameter dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die dargelegten Werte i.d.R. Mittelwerte sind und nicht immer mit den Einzelbeispielen der Profilformen übereinstimmen.

#### **6.1.1 Abtrag bei Variation des Unterdrucks**

Die Ergebnisse der Abtragtiefen ist in Abbildung 26 (a) dargestellt. Die durchschnittliche Abtragtiefe beträgt hierbei 0,167 mm für 16 kPa, 0,264 mm für 23 kPa und 0,334 mm für 30 kPa. Die Tiefstwerte liegen bei 0,207 mm, 0,303 mm und 0,404 mm. Die Breiten des Abtrags werden, wie in Abbildung 26 (b) zu sehen ist, kaum vom anliegenden Unterdruck beeinflusst. Die Breite des Abtrags beträgt 16,441 mm für 16 kPa, 16,624 mm für 23 kPa und 16,604 mm für 30 kPa. Analog dazu beträgt die Breite im tiefsten Bereich 12,211 mm, 11,847 mm und 11,826 mm. Die Abtragrate nimmt mit höherem Unterdruck zu (Abbildung 26 (c)) und beläuft sich auf  $2,84 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  für 16 kPa,  $3,675 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  für 23 kPa und  $4,97 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  für 30 kPa. Die Gleichmäßigkeit des Abtrags (siehe Abbildung 27) weist anhand der Profilform keine auffälligen Unregelmäßigkeiten vor. Jedoch sind in Abbildung 27 (a) und (c) verstärkt Berge und Täler im tiefsten Bereich zu erkennen.

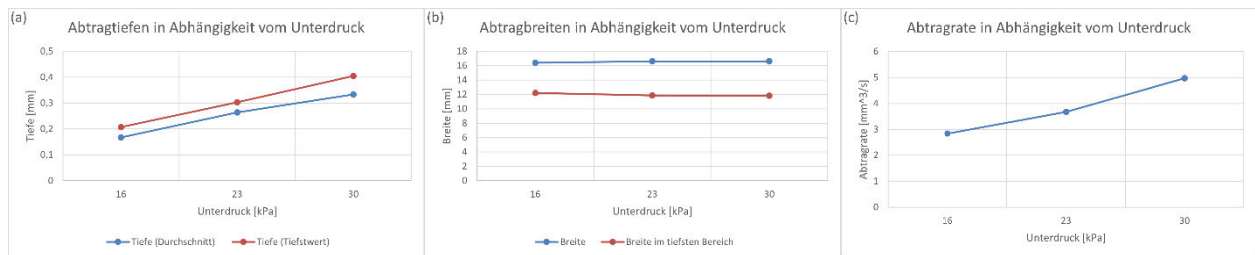


Abbildung 26: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragrate (c) in Abhängigkeit vom Unterdruck bei einer Punktabtragung auf GFK

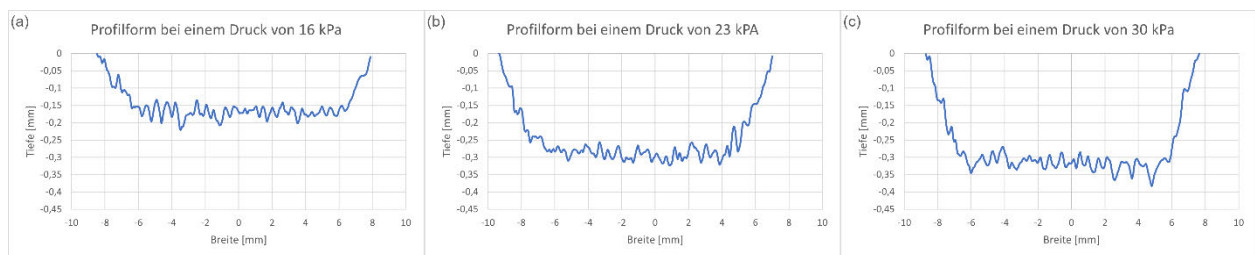


Abbildung 27: Profilformen bei einem Druck von 16 kPa (a), 23 kPa (b) und 30 kPa (c)

### 6.1.2 Abtrag bei Variation des Abstands der inneren Düse

Die Abtragtiefen (Abbildung 28 (a)) nehmen mit der Erhöhung des inneren Düsenabstands ab. Hierbei beträgt die durchschnittliche Tiefe 0,423 mm bei 2 mm, 0,351 mm bei 7 mm und 0,28 mm bei 12 mm innerem Düsenabstands. Analog dazu betragen die Tiefstwerte 0,471 mm, 0,415 mm und 0,339 mm. Die Abtragbreite (Abbildung 28 (b)) dahingegen steigt mit höherem Düsenabstand an. Die Werte betragen 16,173 mm für 2 mm, 17,203 mm für 7 mm und 17,697 mm für 12 mm. Die Breite im tiefsten Bereich dahingegen steigt zuerst von 11,718 mm auf 12,159 mm und sinkt anschließend bei einem Düsenabstand von 12 mm auf 11,635 mm ab. Die Abtragrate (Abbildung 28 (c)) beträgt bei einem Düsenabstand von 2 mm auf  $6,949 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und sinkt bei Erhöhung des inneren Düsenabstands auf  $5,046 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und anschließend auf  $4,241 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$ . Bei der Profilform des Abtrags mit einem inneren Düsenabstand von 7 mm (Abbildung 29 (b)) ist zu erkennen, dass im tiefsten Bereich ausgeprägtere Berge und Täler als bei den anderen Profilen vorhanden sind.

Außerdem nimmt die Schräglage der äußeren Profilbereiche mit steigendem Düsenabstand zu (Abbildung 29 (c)).

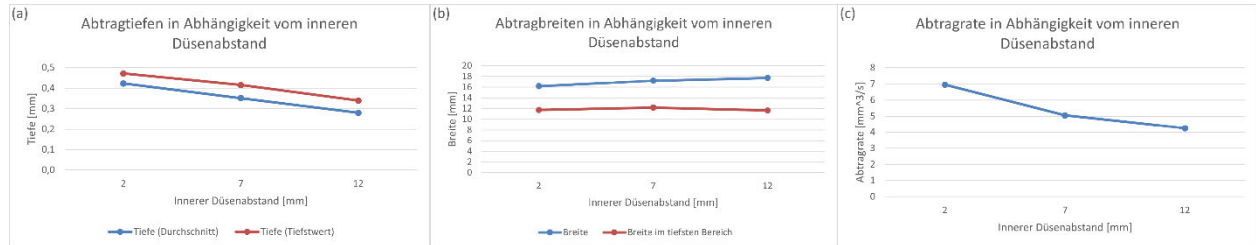


Abbildung 28: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragsrate (c) in Abhängigkeit des inneren Düsenabstands



Abbildung 29: Profilformen bei einem inneren Düsenabstand von 2 mm (a), 7 mm (b) und 12 mm (c)

### 6.1.3 Abtrag bei Verwendung verschiedener Strahlmittel

In Abbildung 30 (a) und (b) ist zu erkennen, dass die durchschnittliche Abtragtiefe sowie der Tiefstwert beider Strahlmittelarten einen ähnlichen Trend verfolgen. Bei Glasbruch steigt die durchschnittliche Tiefe (Abbildung 30 (a)) in Folge der max. Korngröße von 0,262 mm auf 0,337 mm, 0,349 mm und schließlich 0,415 mm für GB500. Anschließend ist bei GB1000 ein deutlicher Abfall zu verzeichnen und die durchschnittliche Tiefe sinkt auf einen Wert von 0,274 mm. Parallel dazu lauten die Tiefstwerte für GB (Abbildung 30 (b)) 0,343 mm, 0,382 mm, 0,406 mm, 0,518 mm und 0,418 mm. Das Edelmetall erreicht im Vergleich zum Glasbruch grundsätzlich einen tieferen Abtrag. Hier liegen die Messwerte für die durchschnittliche Tiefe (Abbildung 30 (a)) bei 0,36 mm für EK F180, 0,456 mm für F100 und 0,437 mm für F54. In Analogie dazu betragen die Tiefstwerte bei EK 0,437 mm, 0,51 mm und 0,48 mm in Folge steigender Korngröße. Die Art und Korngröße des Strahlmittels haben keinen großen Einfluss auf die Abtragbreite (Abbildung 30 (c)) und befinden sich für GB und EK in einem Bereich von 16,26 bis 17,259 mm, wobei der kleinste Wert für das EK mit der in dieser Arbeit kleinsten verwendeten Korngröße von 90  $\mu\text{m}$  gilt. In Abbildung 30 (d) wird deutlich, dass EK in Hinsicht auf die Abtragbreite im tiefsten Bereich deutlich schlechter performt als GB. Die Messwerte belaufen sich hierbei auf 6,115 mm für F180, 6,603

mm für F100 und 8,666 mm für F54. Bei Verwendung von GB lauten die Messwerte 9,446 mm, 9,585 mm, 12,077 mm, 12,197 mm und 12,778 mm. Die Abtragraten beider Strahlmittel (Abbildung 30 (e)) verfolgen einen ähnlichen Trend, wie dieser schon bei den Tiefen beobachtet werden konnte. Jedoch liegt das EK hier näher an den Messergebnissen des Glasbruchs. Diese lauten in Folge steigender Körnung  $3,889 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$ ,  $5,322 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und  $5,617 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  für EK und  $3,731 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$ ,  $5,215 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$ ,  $5,755 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$ ,  $8,243 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und  $5,602 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  für GB. Die Abtragrate erreicht bei GB500 ihr Maximum, fällt jedoch in Richtung höherer Korngröße wieder stark ab.

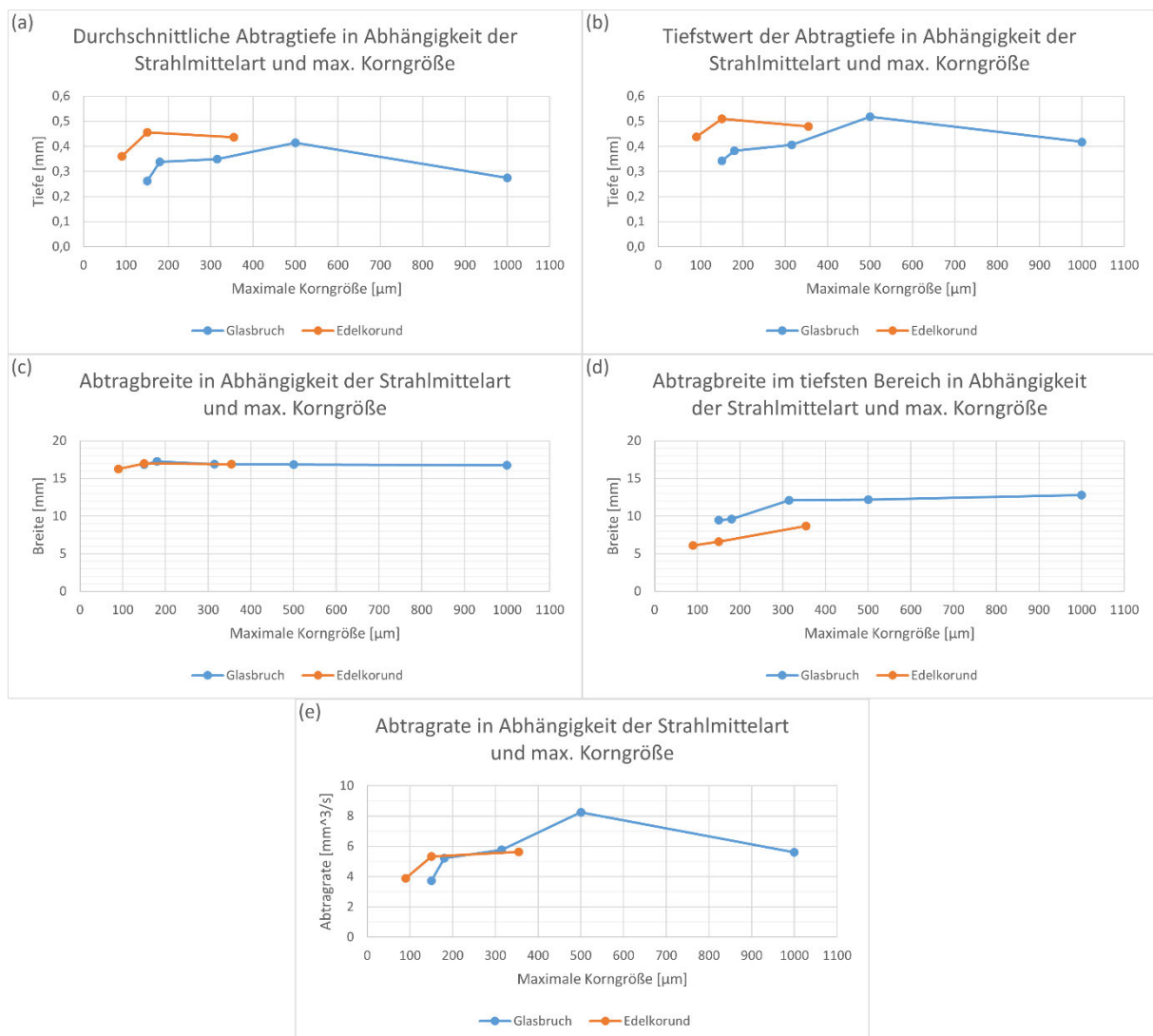


Abbildung 30: Durchschnittliche Abtragtiefe (a), Tiefstwert der Abtragtiefe (b), Abtragbreite (c), Abtragbreite im tiefsten Bereich (d) und Abtragrate (e) in Abhängigkeit der Strahlmittelart und max. Korngröße bei PA auf GFK

Die Profilform bei Nutzung von GB150 (Abbildung 31 (a)) weist Unregelmäßigkeiten im mittleren Bereich der Abtragung auf. Bei Verwendung von GB180 (Abbildung 31 (b)) und GB315

(Abbildung 31 (c)) sind keine ausschlaggebenden Unregelmäßigkeiten im Hinblick auf die Abtragtiefe zu erkennen. Jedoch liefert GB315 eine größere Breite im tiefsten Bereich und somit einen grundsätzlich gleichmäßigeren Abtrag. GB500 (Abbildung 31 (d)) weist eine starke Erhebung im mittleren Bereich des Abtrags auf, die sich bei Verwendung von GB1000 (Abbildung 31 (e)) noch weiter ausprägt. Diese Erhebungen sind ebenfalls in Abbildung 32 (d) und (e) erkennbar. Des Weiteren ist insbesondere bei der mit GB1000 behandelten Oberfläche eine weiße Verfärbung sichtbar.

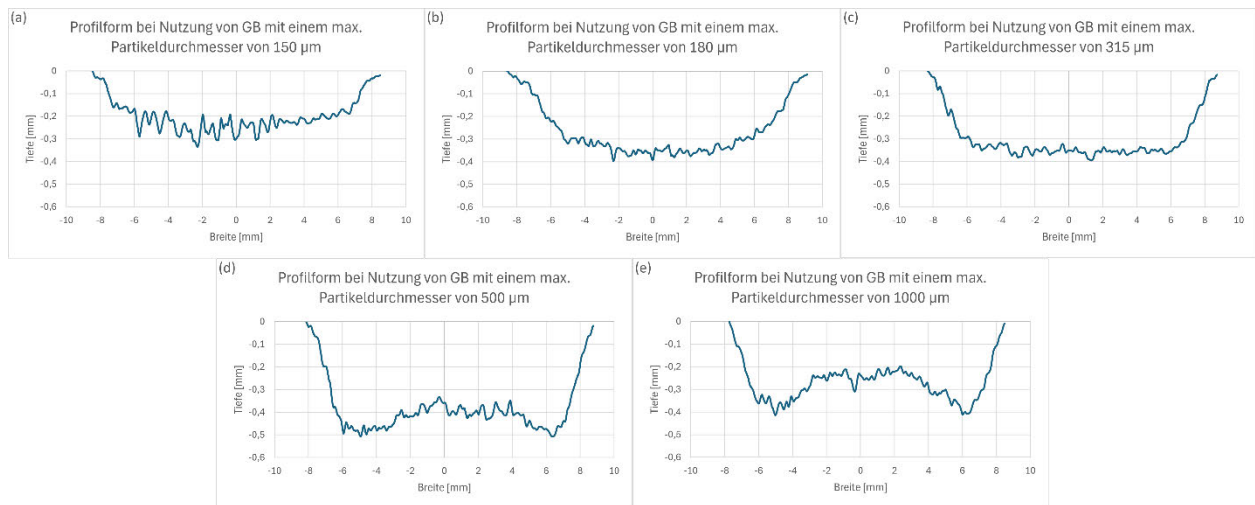


Abbildung 31: Profilverläufe bei Nutzung von GB mit maximalen Partikeldurchmessern von 150 µm (a), 180 µm (b), 315 µm (c), 500 µm (d) und 1000 µm (e) bei PA auf GFK

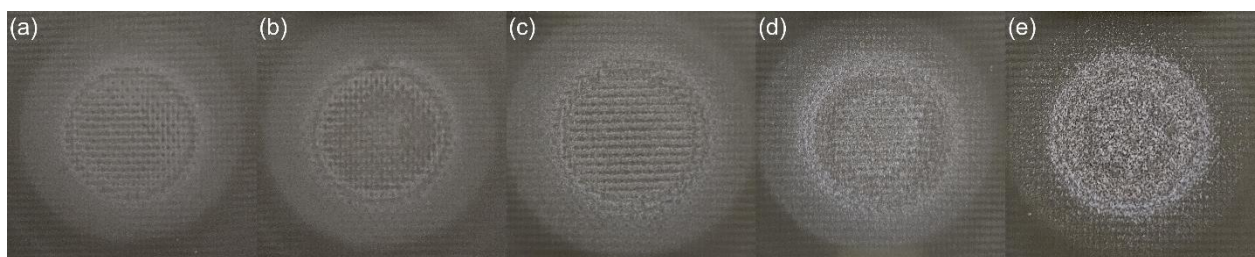


Abbildung 32: Fotos der GFK-Oberfläche: GB150 (a), GB180 (b), GB315 (c), GB500 (d) und GB1000 (e) nach einer Behandlungszeit von 10 s

Abbildung 33 zeigt die Profilformen nach der Oberflächenbehandlung mit EK. Bei Verwendung von F180 (Abbildung 33 (a)) wird deutlich, dass der Abtrag ungleichmäßig ist und spitz zuläuft. Im Hinblick auf größere Korndurchmesser wie F100 (Abbildung 33 (b)) und F54 (Abbildung 33 (c)) nimmt die Breite im tiefsten Bereich zu und die Profilform ist mit einem Halbkreis vergleichbar. Im Vergleich der Profilformen mit den in Abbildung 34 dargestellten Fotos der GFK-Oberfläche wird deutlich, dass in allen Fällen mehrere Lagen, insbesondere im mittleren Bereich des Abtrags, abgetragen wurden. Aufgrund der ausgeprägten Ungleichmäßigkeit des Abtrags, sind die einzelnen Lagen durch farblich leicht unterschiedliche Ringe gut erkennbar.



Abbildung 33: Profilformen bei Nutzung von EK mit maximalen Partikeldurchmessern von 90 µm (a), 150 µm (b) und 350 µm (c) bei PA auf GFK

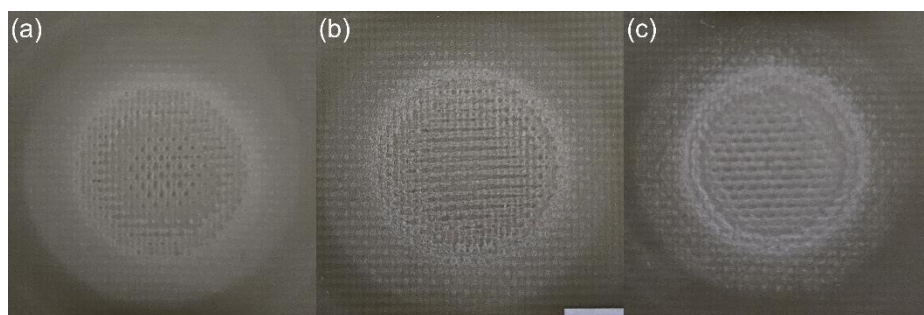


Abbildung 34: Fotos der GFK-Oberfläche: EK F180 (a), F100 (b) und F54 (c) nach einer Behandlungszeit von 10 s

Bei genauerer Beobachtung der Oberflächen unter dem Mikroskop wird deutlich, dass mit steigender Korngröße ein sehr grober Abtrag des Harzes erreicht wird. Insbesondere beim GB1000 (Abbildung 35 (e)) werden große Harzstücke hinterlassen, die sich durch die weiße Verfärbung äußern. Wohingegen bei feinerer Körnung wie dem GB150 (Abbildung 35 (a)) verstärkt um die Faser herum abgetragen wird. Die Strahlmittelart scheint rein optisch im Hinblick auf die Oberflächenbeschaffenheit keine ausschlaggebenden Unterschiede darzustellen. Bei der Behandlung mit EK ist lediglich dasselbe Phänomen wie schon bei der Behandlung mit GB zu erkennen (Abbildung 36 (c)).

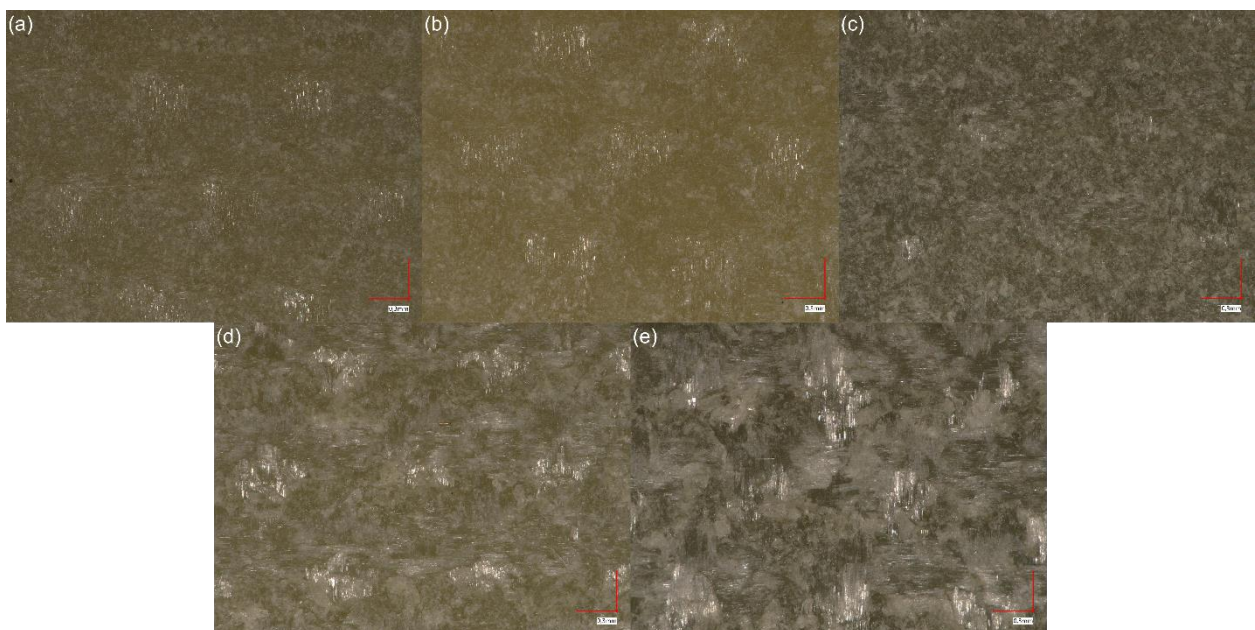


Abbildung 35: Lichtmikroskopaufnahmen der behandelten GFK-Oberfläche mit einer Vergrößerung von x100: GB150 (a), GB180 (b), GB315 (c), GB500 (d) und GB1000 (e)



Abbildung 36: Mikroskopaufnahmen der behandelten GFK-Oberfläche mit hundertfacher Vergrößerung: EK F180 (a), F100 (b) und F54 (c)

In Abbildung 37 wird der Mittenrauwert Ra bei Verwendung verschiedener Strahlmittel dargestellt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass bei der Oberflächenbehandlung mit Edelmetall eine etwas höhere Rauheit vorliegt. Diese sei 30,268 µm für F180, 27,213 µm für F100 und 19,974 µm für F54. Für GB lauten die Messwerte 22,88 µm für GB150, 11,912 µm für GB180, 18,996 µm für GB315, 17,217 µm für GB500 und 11,939 µm für GB1000. Darüber hinaus lässt sich aus dem Trend der Messwerte schließen, dass die Rauheit mit steigender Körnung abnimmt. Der Mittenrauwert GB180 sticht besonders heraus, worauf in Kapitel 6.2 genauer eingegangen wird.

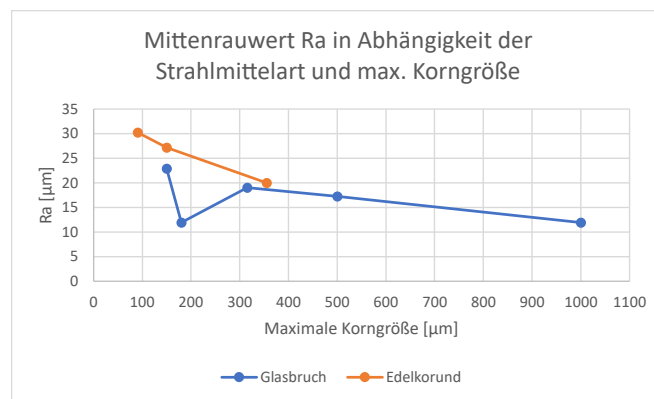


Abbildung 37: Mittenrauwert Ra in Abhängigkeit der Strahlmittelart und max. Korngröße bei PA auf GFK

#### 6.1.4 Abtrag bei Variation des Massenstroms des Strahlmittels

Anhand der Variation der Zuführrate ist zu erkennen, dass mit steigendem Strahlmittelmassenstrom grundsätzlich ein tieferer Abtrag erreicht wird (Abbildung 38 (a)). Die durchschnittliche Tiefe beträgt 0,167 mm für  $0,67 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ , 0,239 mm für  $1,33 \frac{\text{g}}{\text{s}}$  und 0,364 mm für einen Massenstrom von  $2 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ . Analog dazu belaufen sich die Tiefstwerte auf 0,211 mm, 0,28 mm und 0,414 mm. Die Breite des Abtrags (Abbildung 38 (b)) bleibt größtenteils unverändert und beläuft sich auf 16,854 mm bei  $0,67 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ , 16,847 mm bei  $1,33 \frac{\text{g}}{\text{s}}$  und 17,043 mm bei  $2 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ . Bei der Breite im tiefsten Bereich wurde ein ähnlicher Trend festgestellt. Hier lauten die Messwerte bei Erhöhung des Massenstroms 11,409 mm, 11,478 mm und 11,734 mm. Die Abtragrate dahingegen erhöht sich mit steigendem Massenstrom von  $2,813 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  auf  $4,181 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und mit einer anschließend größeren Zunahme auf  $6,806 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  (Abbildung 38 (c)). Die Profilformen der Abträge (Abbildung

39) sind gleichmäßig, wobei bei einem Massenstrom von  $1,33 \frac{\text{g}}{\text{s}}$  (Abbildung 39 (b)) verstärkt Berge und Täler zu erkennen sind.

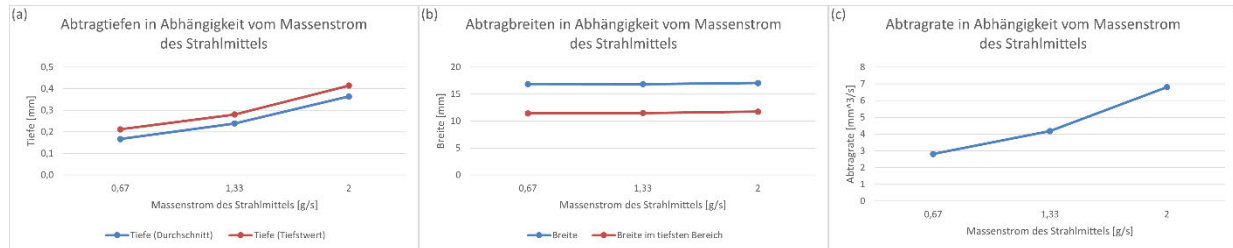


Abbildung 38: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragrate (c) in Abhängigkeit vom Massenstrom des Strahlmittels bei PA auf GFK

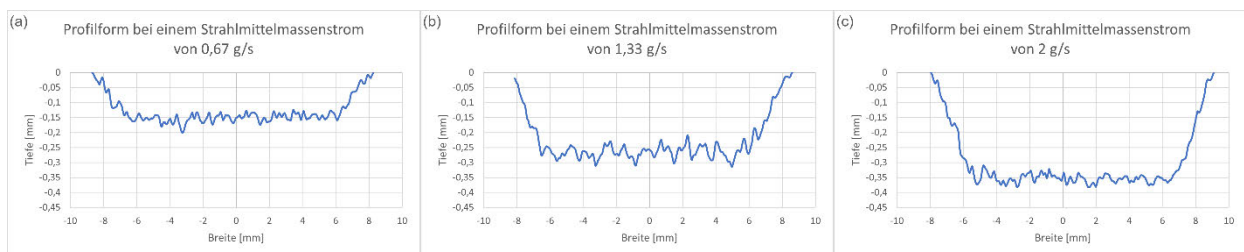


Abbildung 39: Profilformen bei einem Strahlmittelmassenstrom von  $0,67 \text{ g/s}$  (a),  $1,33 \text{ g/s}$  (b) und  $2 \text{ g/s}$  (c)

### 6.1.5 Abtrag bei Variation der Strahldauer

Es ist zu beobachten, dass mit zunehmender Strahldauer, die Abtragtiefe nahezu konstant zunimmt (Abbildung 41 (a)). Auch die Abtragbreite (Abbildung 41 (b)) nimmt mit der Zeit weiter zu wobei die Breite im tiefsten Bereich hierbei abnimmt. Die Abtragrate (Abbildung 41 (c)) fällt ebenfalls mit steigender Strahldauer. Der Übersicht halber werden die exakten Messwerte für diese Versuchsreihe dem Anhang dieser Arbeit hinzugefügt, statt diese im Fließtext auszuformulieren. Abbildung 40 zeigt die GFK-Oberfläche nach verschiedenen Bearbeitungszeiten. Der schichtweise Abtrag der tieferen Lagen ist hierbei gut an den Ringen im äußeren Bereich des Abtrags zu erkennen.

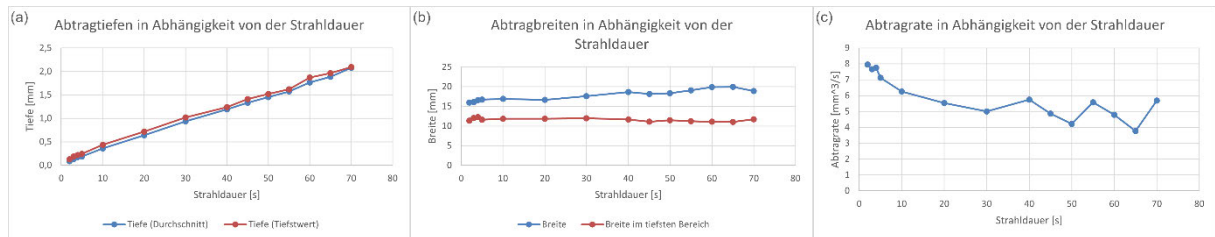


Abbildung 41: Abtragtiefen (a), Abtragbreiten (b) und Abtragrate (c) in Abhängigkeit von der Strahldauer bei PA von GFK

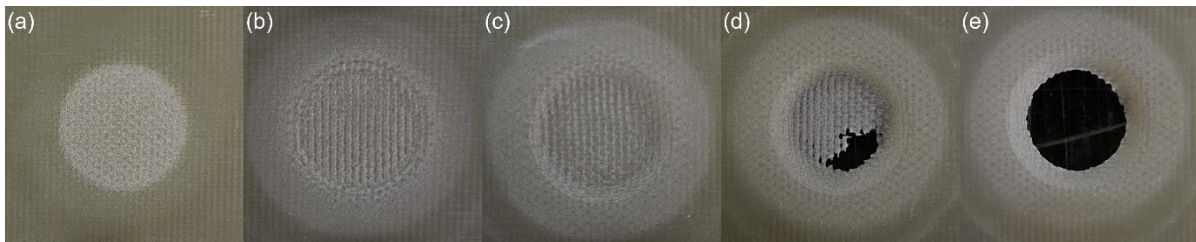


Abbildung 40: Fotos der GFK-Oberfläche nach einer Strahldauer von 2 s (a), 10 s (b), 30 s (c), 65 s (d) und 70 s (e)

Abbildung 42 zeigt die Profilformen aller untersuchten Strahldauern. Bei Verwendung der in Kapitel 5.8 erwähnten Standardeinstellungen ist bei fast allen Profilformen ein gleichmäßiger Abtrag zu erkennen. Das in Abbildung 40 erkennbare Loch in der letzten Lage spiegelt sich ebenfalls in der Profilform in Abbildung 42 (d) wider und deutet hier für einen etwas ungleichmäßigen Abtrag.

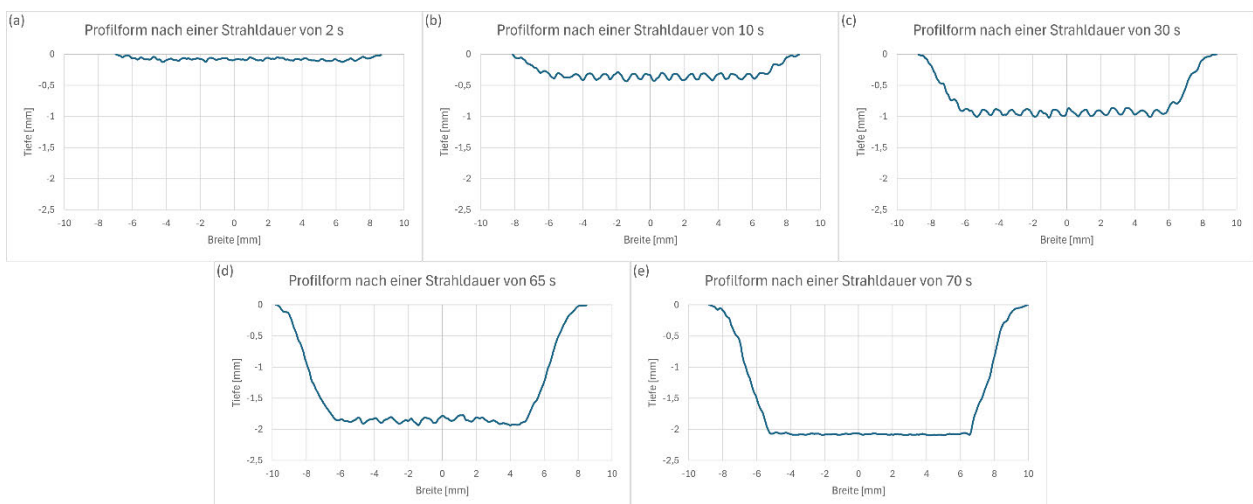


Abbildung 42: Profilformen nach einer Strahldauer von 2 s (a), 10 s (b), 30 s (c), 65 s (d) und 70 s (e)

## 6.2 Zwischenfazit und Diskussion der statischen Versuche

Durch die Erhöhung des Unterdrucks werden die Partikel des Strahlmittels mit einer höheren Geschwindigkeit und somit auch höheren kinetischen Energie auf die GFK-Oberfläche gefördert. Der abrasive Effekt ist dadurch verstärkt und dementsprechend sind tiefere Abträge mit höherer Abtragsrate möglich. Da ein möglichst schneller Abtrag wünschenswert ist, wird die höchstmögliche Unterdruckeinstellung von 30 kPa für die darauffolgenden dynamischen Versuche gewählt. Die Abbildung 27 dargestellten Profilformen der verschiedenen Druckeinstellungen sind in Hinsicht der Gleichmäßigkeit unbedenklich. Die Berge und Täler, die in öfters bei sämtlichen Profilformen sichtbar sind, kommen dadurch zu Stande, dass der tiefste Bereich sich hier im Bereich der Faser befindet und diese vom Profilsensor erfasst wird. Die Abtragtiefe und Abtragsrate bei Erhöhung des inneren Düsenabstand nehmen ab, da die Partikel durch den größeren Abstand zur Oberfläche einen weiteren Weg zurücklegen müssen und im Laufe der Zeit an Geschwindigkeit und Energie verlieren. Die Breite dahingegen nimmt zu, da die Partikel durch die Absaugung nach außen geleitet und dadurch einen stärkeren abrasiven Effekt auf die Oberfläche aufbringen. Hier gilt es einen Kompromiss zwischen Abtragtiefe und Abtragbreite einzugehen und aus diesem Grund wird der innere Düsenabstand vom 7 mm für die dynamischen Versuche gewählt. Das Edeldornd bietet zwar einen grundsätzlich tieferen Abtrag als der Glasbruch, jedoch sind die Profilformen so ungleichmäßig, dass die Abtragsrate darunter leidet und der Glasbruch im Endeffekt doch besser performt als das Edeldornd. Im Hinblick auf die Profilformen und Oberflächenbeschaffenheit bei GB500 und GB1000 ist von der Verwendung dieses Strahlmittels abzuraten. Der Mehrabtrag im äußeren Bereich kommt durch das sehr Grobe, durch die Saugströmung in den äußeren Bereich geleitete Strahlmittelkorn zu Stande. Die weiße Verfärbung, die ebenfalls bei gröberen GB auftritt kommt durch die größeren Auftreffkrater der Körner zu Stande. Die hohe Rauheit bei kleinerer Körnung ist vermutlich dem zu Schulden, dass das Strahlmittel hier die Matrix um die Faser herum abträgt und somit größere Berge und Täler auf der Oberfläche entstehen. Ebenfalls wird die in der Zeit von zehn Sekunden erreichte Abtragtiefe eine Rolle spielen. So ist in Abbildung 31 (a) zu erkennen, dass sich der tiefste Bereich inmitten der zweiten Lage befindet und die Faser somit durchaus einen Einfluss auf den Raumittenwert haben könnte. Unter Berücksichtigung diskutierter Parameter wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit das GB315 gewählt. Da die Erhöhung des Massenstroms ausschließlich mit positiven Folgen wie der Steigerung der Abtragtiefe und Abtragsrate, ohne dabei die Abtragbreite oder die Form des Abtrags negativ zu beeinflussen, einhergeht, wird der max. Massenstrom von  $2 \frac{g}{s}$  für die weiteren Versuche gewählt. Der nahezu konstante Anstieg der Abtragtiefen bei steigender Strahldauer lässt auf eine qualitative und homogene GFK-Platte

schließen. Ebenfalls spricht dies für eine durchweg konstante Performance der Vakuumsaugstrahl-Anlage – auch über längere Bearbeitungszeiten hinweg. Die mit der Zeit sinkende Abtragrate ist dem mit fortschreitender Abtragtiefe sinkenden Breite im tiefsten Bereich geschuldet.

## 6.3 Dynamische Versuche

In diesem Kapitel befinden sich die Ergebnisse aller dynamischen Versuche, welche auf der Grundlage der in Kapitel 6.1 durchgeführten Versuche basieren.

### 6.3.1 Ermittlung der Vorschubgeschwindigkeit für den Abtrag einer Lage

Die Vorschubgeschwindigkeit hat insbesondere im Bereich kleiner Geschwindigkeiten eine große Auswirkung auf die Abtragtiefe. Die gemittelten durchschnittlichen Tiefenwerte betragen in Folge steigender Geschwindigkeit 0,365 mm, 0,215 mm, 0,156 mm, 0,126 mm, 0,105 mm, 0,084 mm und 0,078 mm. Parallel dazu liegen die gemittelten Tiefstwerte bei 0,427 mm, 0,264 mm, 0,196 mm, 0,171 mm, 0,15 mm, 0,128 mm und 0,116 mm.

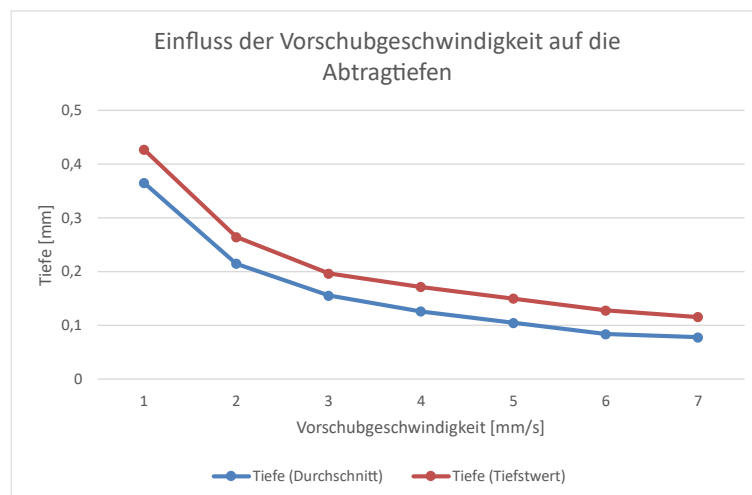


Abbildung 43: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Abtragtiefen bei einer Linienabtragung auf GFK

Da die durchschnittliche Abtragtiefe eine präzisere Kennzahl für den gezielten Materialabtrag darstellt als der Tiefstwert, werden diese Werte herangezogen, um eine Ersatzfunktion zu konstruieren. Es wurden Annäherungen mit quadratischen, kubischen, logarithmischen, exponentiellen und Potenz-Funktionen erprobt und das jeweils zur Funktion gehörende Bestimmtheitsmaß ermittelt. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Annäherungen,

wobei sich die Potenzfunktion mit einer Anpassungsgüte von 99,9% als genaueste Ersatzfunktion herausgestellt hat und für den weiteren Verlauf der Arbeit genutzt wird (Abbildung 44).

Tabelle 5: Ergebnisse der Bildung einer Ersatzfunktion für die durchschnittliche Abtragtiefe bei einer Linearabtragung auf GFK für Geschwindigkeiten im Bereich von 1 bis 7 mm/s

Art der Funktion	Funktion	R <sup>2</sup> [%]
Quadratisch	$y = 0,011 * x^2 - 0,131 * x + 0,462$	96,3
Kubisch	$y = -0,003 * x^3 + 0,046 * x^2 - 0,25 * x + 0,567$	99,3
Logarithmisch	$y = -0,145 * \log(x) + 0,338$	96,1
Exponentiell	$y = 0,466 * e^{-0,32 * x}$	94,6
Potenz	$y = 0,366 * x^{-0,786}$	99,9

Für den Abtrag einer Lage des GFK muss eine durchschnittliche Tiefe von 0,17 mm erreicht werden. Zur Bestimmung der erforderlichen Vorschubgeschwindigkeit wird die Potenzfunktion nach der Variablen x umgestellt, woraus Formel (8) resultiert. Anschließend wird die gewünschte Abtragtiefe für y eingesetzt. Dies ergibt einen Wert von  $2,65 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  für die erforderliche Vorschubgeschwindigkeit.

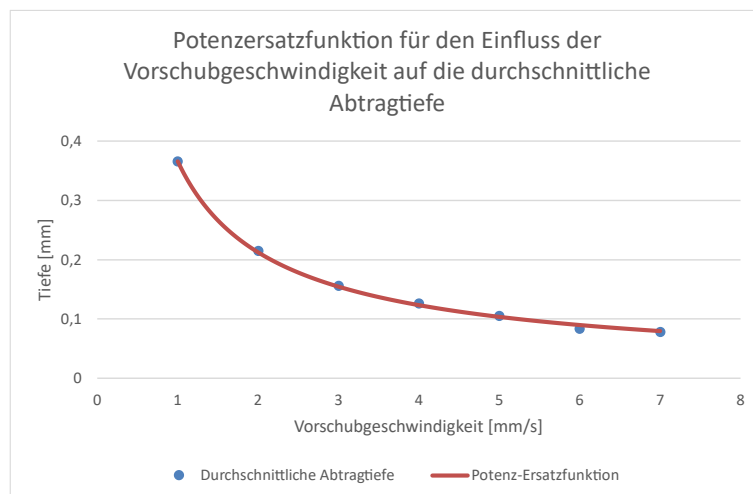


Abbildung 44: Potenz-Ersatzfunktion für den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die durchschnittliche Abtragtiefe für eine Linienabtragung auf GFK

$$x = \left(\frac{y}{0,366}\right)^{-1,272} \quad (8)$$

Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse der drei LA, an denen die durchschnittliche Abtragtiefe jeweils an drei Punkten erfasst wurde. In Aufsteigender Reihenfolge der Messpunkte lauten die Messwerte 0,149 mm, 0,18 mm, 0,142 mm, 0,148 mm, 0,18 mm, 0,179 mm, 0,162 mm, 0,148 mm und 0,156 mm. Die roten Linien stellen die in der Anforderungsliste genannte obere und untere Grenzen für die durchschnittliche Abtragtiefe dar. Es ist zu erkennen, dass alle 9 Messpunkte im Bereich der definierten Toleranz liegen, und somit ist das Ergebnis für den Abtrag einer Lagenstärke von 0,17 mm eine Vorschubgeschwindigkeit von  $2,65 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ .

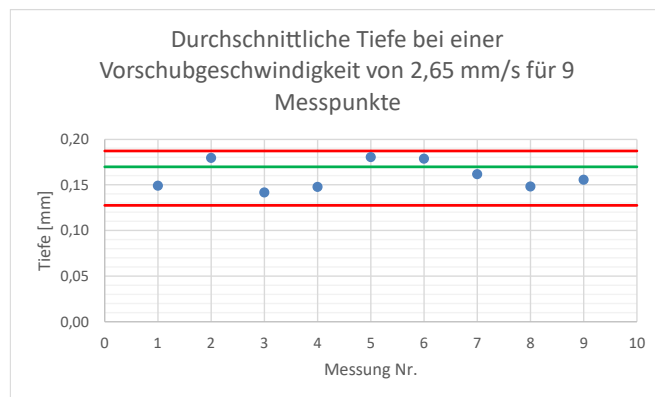


Abbildung 45: Durchschnittliche Abtragtiefe bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s für 9 Messpunkte

Unter Verwendung der Formel (5) werden die Abtragraten für die drei LA mit einer Geschwindigkeit von  $2,65 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  bei einer Segmentlänge von 20 mm berechnet. Somit wird für das gegebene GFK-Laminat eine Abtragrade  $Q_{\text{LA}}$  von Bahn 1  $5,488 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$ , für Bahn 2  $5,444 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und für Bahn 3  $5,315 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  benötigt. Der Mittenrauwert  $R_a$  ist längs der Abtragrichtung am höchsten. Die Rauheiten haben in diesem Fall in steigender Reihenfolge der Messpunkte  $16,303 \mu\text{m}$ ,

19,219  $\mu\text{m}$ , 17,152  $\mu\text{m}$ , 14,715  $\mu\text{m}$ , 15,499  $\mu\text{m}$ , 16,153  $\mu\text{m}$ , 13,335  $\mu\text{m}$ , 15,543  $\mu\text{m}$  und 16,317  $\mu\text{m}$  betragen (vgl. Abbildung 46).

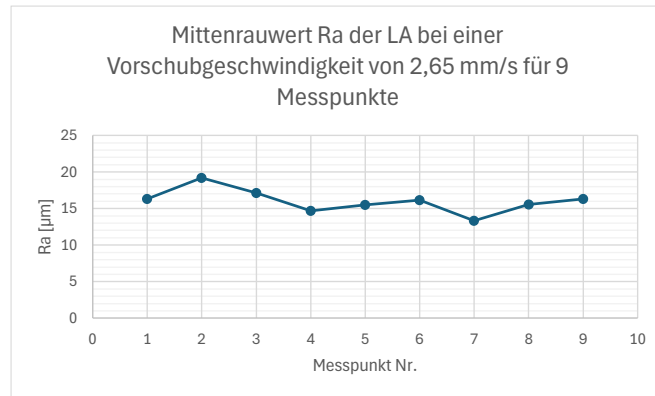


Abbildung 46: Mittensrauwert Ra der LA bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s für 9 Messpunkte

Die Profilform der LA zeigt, dass mit den bisher erarbeiteten Parametern ein Gleichmäßiger Abtrag erreicht wird. Auch hier sind allerdings wieder verstärkt Berge und Täler im tiefsten Bereich des Abtrags zu erkennen. Ergänzend zur Profilform zeigt Abbildung 48 ein Foto der beschriebenen LA.

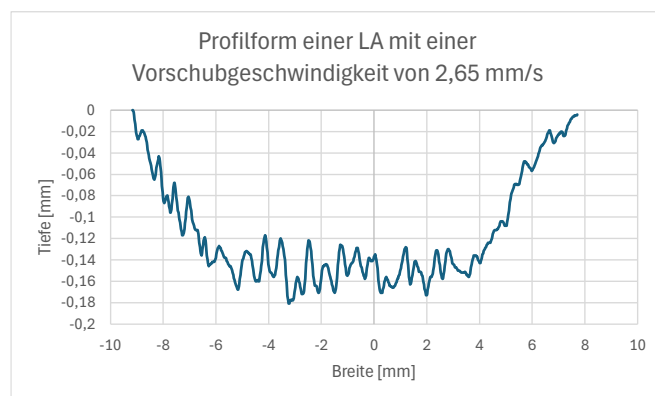


Abbildung 47: Profilform einer LA mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s

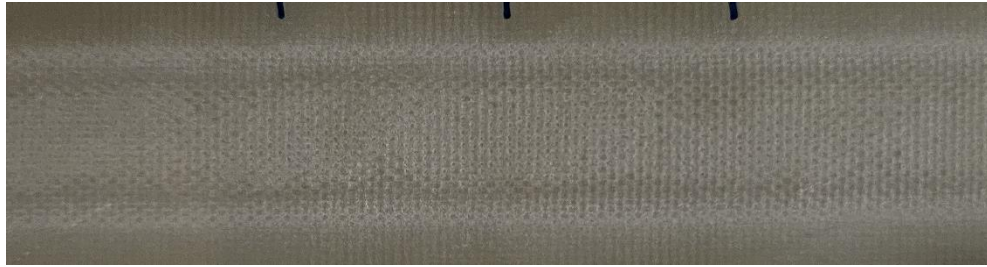


Abbildung 48: Foto der LA mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,65 mm/s

### 6.3.2 Ermittlung des geeigneten Überlappungsabstands

Abbildung 49 zeigt die Profilformen der verschiedenen Überlappungsabstände. Es wird deutlich, dass sich bei Überlappungen kleiner als 12 mm ein Mehrabtrag in der Mitte bildet. Ist der Überlappungsabstand größer als 12 mm, wird im mittleren Bereich zu wenig Material abgetragen.

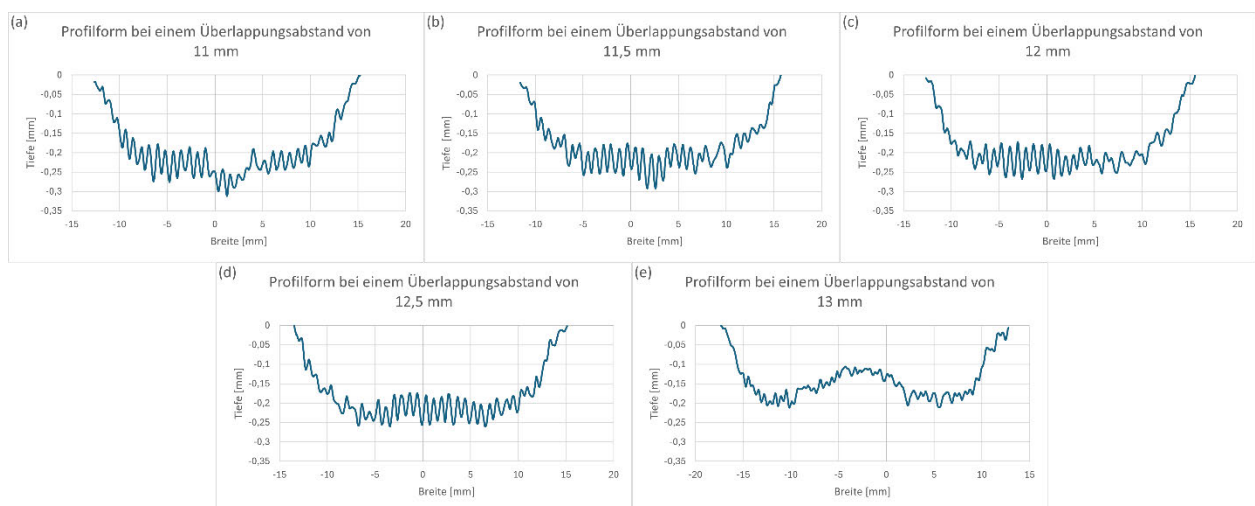


Abbildung 49: Profilformen bei Überlappungsabständen von 11 mm (a), 11,5 mm (b), 12 mm (c), 12,5 mm (d) und 13 mm (e)

Abbildung 50 zeigt zum Vergleich ein Foto der behandelten Oberfläche bei einem Überlappungsabstand von 12 mm. In der Mitte der Abtragung sind wie in Abbildung 49 (c) keine Erhöhungen oder Vertiefungen zu erkennen, was für einen optimalen Überlappungsabstand spricht.



Abbildung 50: Foto einer Überlappung zweier Bahnen mit einem Überlappungsabstand von 12 mm

## 6.4 Diskussion der dynamischen Versuche

Die gebildete Ersatzfunktion hat den Zusammenhang zwischen Abtragtiefe und Vorschubgeschwindigkeit ausreichend genau dargestellt. Die dadurch ermittelte Vorschubgeschwindigkeit von  $2,65 \frac{mm}{s}$  konnte eine durchschnittliche Abtragtiefe hervorbringen, die sich innerhalb der in der Anforderungsliste definierten Grenzen befand. Die Abtragraten aller drei Bahnen unterscheiden sich im Wert kaum und deuten zusammen mit den sich untereinander ebenfalls recht ähnlichen Mittelrauwerten auf eine gute Wiederholgenauigkeit des Abtrags hin. Die Profilformen lassen anhand ihrer gut differenzierbaren Abtragsform im mittleren Bereich deutlich darauf schließen, dass ein Überlappungsabstand von 12 mm optimal ist.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurden verschiedene Parameterwerte, -kombinationen und Strahlmittel auf ihre Abtrageigenschaften einer Punktabtragung auf GFK erforscht. Es hat sich herausgestellt, dass die Standardeinstellungen, die Bereits auf CFK-Oberflächen einen gleichmäßigen und schnellen Abtrag erreichen konnten, einen ebenfalls so guten Abtrag auf GFK erreichen. Im Hinblick auf das Strahlmittel, hat Glasbruch eine bessere Performance und Abtragsgleichmäßigkeit als das Edelkorund gezeigt. Die für den Abtrag einer Lage notwendige Vorschubgeschwindigkeit hat sich als  $2,65 \frac{mm}{s}$  ergeben. Für das Überlappen zweier Bahnen ist der Überlappungsabstand von 12 mm ideal. Aufbauend auf dieser Arbeit könnte als nächstes ein großflächiger Bereich eines GFK-Laminats abgetragen oder sogar stufenweise geschäftet werden. Das anschließende Einkleben eines Reparaturpatches und dessen

Reparatureigenschaften des Schadens könnten analysiert werden. Auch andere Strahlmittelkörnungen, wie z.B. gröberes Edelmetall könnten mit dem in dieser Arbeit verwendeten sehr groben Glasbruch verglichen werden, um potenzielle Steigerungen der Abtragrate oder Verbesserungen des Abtragprofils zu erforschen.

## V Literatur

1. KAPADIA, A. und TWI LTD. *Non Destructive Testing of Composite Materials* [online]. *Best Practice Guide* [Zugriff am: 19. August 2024]. Verfügbar unter: <https://avaloncs1.com/wp-content/uploads/2013/01/ncn-best-practice-ndt.pdf>
2. HALLIWELL, S. und NETCOMPOSITES. *Repair of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Structures* [online]. *National Composites Network Best Practice Guide* [Zugriff am: 19. August 2024]. Verfügbar unter: <https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/repairoffrpstructures.pdf>
3. WALTER, A., A. FORBES und ET AL. *Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen: Einführung und Überblick* [online], 2012 [Zugriff am: 22. August 2024]. Verfügbar unter: [https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-spanende\\_bearbeitung\\_von\\_leichtbauwerkstoffen.html](https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-spanende_bearbeitung_von_leichtbauwerkstoffen.html)
4. HINTZE, W. *CFK-Bearbeitung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN 978-3-662-63264-2.
5. PETER WREDE YACHTREFIT GMBH & CO.KG. *GfK- und Gelcoat Reparatur* [online] [Zugriff am: 2. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.yachtlackierung.de/gfk-reparatur>
6. DOOBE, M., Hg. *Kunststoffe erfolgreich kleben. Grundlagen, Klebstofftechnologien, Best-Practice-Beispiele*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer Vieweg, 2018. ISBN 978-3-658-18445-2.
7. NIEDERNHUBER, M., J. HOLTMANNSPÖTTER und I. EHRLICH. Fiber-oriented repair geometries for composite materials [online]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, **94**, 327-337. ISSN 13598368. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compositesb.2016.03.027
8. GP ANLAGENBAU GMBH. *Vakuum-Saugstrahlen* [online]. *Sauber und präzise!* [Zugriff am: 19. August 2024]. Verfügbar unter: [https://www.messe.de/apollo/parts2clean\\_2019/obs/Binary/A945435/23983\\_41458\\_155990411028777600\\_aeid\\_205\\_\\_265\\_atomfeld\\_205\\_265-1361671559904185.pdf\\_org](https://www.messe.de/apollo/parts2clean_2019/obs/Binary/A945435/23983_41458_155990411028777600_aeid_205__265_atomfeld_205_265-1361671559904185.pdf_org)
9. SYSTECO GMBH. *Vakuum-Saugstrahlen* [online]. *Das Vakuum Saugstrahlen wird vielfältig eingesetzt* [Zugriff am: 19. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.systeco.com/de/vakuum-saugstrahlen/>

10. FRAUNHOFER IFAM. Reinigen und Aktivieren vor dem Lackieren und Kleben. In: *Jahresbericht 2011/2012 - Fraunhofer IFAM*, S. 84-89.
11. SYSTECO GMBH. *Naturstein Fassade umweltfreundlich reinigen* [online]. *Es geht auch anders - ohne Hochdruck, ohne Wasser und ohne Chemie* [Zugriff am: 19. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.sys-teco.com/de/fassadenreinigung/naturstein-fassade-umweltfreundlich-reinigen/>
12. AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKT KUNSTSTOFFE E.V. *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-0881-3.
13. CAMPBELL, F.C. *Structural composite materials*. Ohio: Asm international, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
14. FRIEDRICH, H.E., Hg. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 2. Auflage. Wiesbaden, Germany: Springer Science and Business Media; Springer Vieweg, 2017. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-12295-9.
15. UCAN, H., G. REQUENA und ET AL. Leicht auf kurzer Strecke; Automatisierte Fertigung aus Faser-Metall- Laminaten hat das Potenzial für hohe Produktionsraten im Flugzeugbau [online]. *DLR Magazin*, 2017. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/321936909\\_Leicht\\_auf\\_kurzer\\_Strecke\\_Automatisierte\\_Fertigung\\_aus\\_Faser-Metall-Laminaten\\_hat\\_das\\_Potenzial\\_fur\\_hohe\\_Produktionsraten\\_im\\_Flugzeugbau](https://www.researchgate.net/publication/321936909_Leicht_auf_kurzer_Strecke_Automatisierte_Fertigung_aus_Faser-Metall-Laminaten_hat_das_Potenzial_fur_hohe_Produktionsraten_im_Flugzeugbau)
16. PIETSCHMANN, J. Oberflächenvorbehandlung von Metallen. In: J. PIETSCHMANN, Hg. *Industrielle Pulverbeschichtung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, S. 227-301. ISBN 978-3-658-40811-4.
17. CERABLAST GMBH & CO.KG. *Glasgranulat* [online], 2017 [Zugriff am: 16. August 2024]. Verfügbar unter: <https://cerablast.com/glasgranulat-2/>
18. HASENFRATZ ING. BÜRO INDUSTRIEVERTRETUNGEN GMBH. *Strahlglaskorn* [online] [Zugriff am: 16. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.hafra-sandstrahltechnik.de/page-tag/schuettgewicht/>
19. CERABLAST GMBH & CO.KG. *Edelkorund* [online], 2017 [Zugriff am: 16. August 2024]. Verfügbar unter: <https://cerablast.com/edelkorund-2/>

20. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG. *scanCONTROL // 2D/3D Laser-Profil-Sensoren* [online] [Zugriff am: 5. Juli 2024]. Verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/fileadmin/download/products/cat--scanCONTROL--de.pdf>
  
21. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG. *LASER-TRIANGULATION* [online]. *Laser-Linien-Triangulation* [Zugriff am: 5. Juli 2024]. Verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/wiki/laser-triangulation/>
  
22. MAHR GMBH. *Originalbetriebsanleitung* [online]. *MarSurf PS 10*, 2016 [Zugriff am: 9. Juli 2024]. Verfügbar unter: <https://metrology.mahr.com/de/produkte/artikel/6910230-mobiles-rauheitsmessgeraet-marsurf-ps-10/>
  
23. KEFERSTEIN, C.P. und M. MARXER. *Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 8., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-8348-2583-4.
  
24. MAHR GMBH. *MarSurf I Mobiles Rauheitsmessgerät* [online]. *MarSurf PS 10* [Zugriff am: 15. August 2024]. Verfügbar unter: <https://metrology.mahr.com/de/produkte/artikel/6910230-mobiles-rauheitsmessgeraet-marsurf-ps-10/>
  
25. KEYENCE DEUTSCHLAND GMBH. *Einführung in die Digitalmikroskopie* [online]. *Funktionsweise des Objektivs und Bildsensors*, 2019 [Zugriff am: 9. Juli 2024]. Verfügbar unter: [https://www.keyence.de/ss/products/microscope/microscope\\_glossary/](https://www.keyence.de/ss/products/microscope/microscope_glossary/)
  
26. KEYENCE DEUTSCHLAND GMBH. *Einführung in die Digitalmikroskopie* [online]. *Beleuchtung*, 2019 [Zugriff am: 1. August 2024]. Verfügbar unter: [https://www.keyence.de/ss/products/microscope/microscope\\_glossary/](https://www.keyence.de/ss/products/microscope/microscope_glossary/)
  
27. MAHNKEN, R. *Lehrbuch der technischen Mechanik - Statik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer, 2012. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-642-21711-1.
  
28. ASUERO, A.G., A. SAYAGO und A.G. GONZÁLEZ. The Correlation Coefficient: An Overview [online]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2006, **36**(1), 41-59. ISSN 1040-8347. Verfügbar unter: doi:10.1080/10408340500526766
  
29. KUKA DEUTSCHLAND GMBH. *Datenblatt - KUKA KR 270 R2700 ultra* [online], 2021 [Zugriff am: 10. Juli 2024]. Verfügbar unter: <https://www.kuka.com/event/media?itemId=9CB53763796D4C1DBF5D1CB89B32F49A>

30. MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG. *scanCONTROL Configuration Tools 6.9* [online]. *Bedienungsanleitung* [Zugriff am: 22. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/fileadmin/download/manuals/man--scanCONTROL-Configuration-Tools--de.pdf>
31. AIRBUS SAS. AIPS03-08-003, *Rework of Structures Manufactured from Composite Materials (Laminates and Sandwich)*.

## VI Anhang

Tabelle 6: Messwerte der Strahldauer bei PA auf GFK

Zeit [s]	Tiefe (Durchschnitt) [mm]	Tiefe (Tiefstwert) [mm]	Breite [mm]	Breite im tiefsten Bereich [mm]	Abtragsrate (Volumen) [mm <sup>3</sup> /s]
2	0,085	0,128	15,955	11,370	7,953
3	0,133	0,188	16,063	12,035	7,663
4	0,174	0,216	16,604	12,265	7,758
5	0,188	0,243	16,682	11,591	7,155
10	0,357	0,436	16,884	11,818	6,251
20	0,641	0,719	16,637	11,845	5,532
30	0,935	1,019	17,578	11,957	5,008
40	1,191	1,237	18,661	11,663	5,754
45	1,333	1,411	18,147	11,098	4,862
50	1,453	1,519	18,318	11,466	4,213
55	1,572	1,622	19,086	11,241	5,573
60	1,767	1,872	19,886	11,079	4,781
65	1,887	1,966	19,966	11,018	3,769
70	2,079	2,096	18,864	11,716	5,681

Tabelle 7: Python-Code zur Ermittlung der Messwerte anhand der Profilmessdaten

```
import os
import pandas as pd
import plotly.graph_objects as go
import plotly.io as pio
import numpy as np
import kaleido #als Version 0.1.0post1
from statsmodels.nonparametric.smoothers_lowess import lowess
from ipywidgets import Output, VBox
from io import StringIO
from sylk_parser import SylkParser
from plotly.subplots import make_subplots
```

```

from openpyxl import load_workbook

# Verzeichnis mit den SLK-Dateien und das Zielverzeichnis
input_directory = os.getcwd()

# Funktion zum Einlesen und Verarbeiten von SLK-Dateien
def process_slk_file(file_path):
    if "ausschnitt" in file_path.lower():
        parser = SylkParser(file_path)
        fbuf = StringIO()
        parser.to_csv(fbuf)
        file_content = fbuf.getvalue()

        lines = file_content.strip().split('\n')

        column1 = []
        column2 = []

        for line in lines:
            values = line.strip().split(',')
            column1.append(float(values[0].strip("")))
            column2.append(float(values[1].strip("")))

        # Erstellen und Sortieren des DataFrames und Messwerte extrahieren
        df = pd.DataFrame({"x": column1, "y": column2})
        df = df.astype(float)
        df_sorted = df.sort_values(by="x")
        x = df_sorted["x"].values
        y = df_sorted["y"].values
        y0 = y - y.max()

        return x, y0
    return None, None

# Funktion zum Verarbeiten und Plotten der Daten
def process_and_plot(file_path):
    x, y0 = process_slk_file(file_path)

    # LOESS-Glättung anwenden
    lowess_result = lowess(y0, x, frac=0.1) # frac bestimmt den Glättungsparameter
    x_loess = lowess_result[:, 0]
    y_loess = lowess_result[:, 1]

    # Hier Berechnungen einfügen
    # Integrale
    if len(x) % 2 == 0:
        middle_index = len(x) // 2
        mittelpunkt = (x[middle_index - 1] + x[middle_index]) / 2
    else:
        mittelpunkt = x[len(x)//2]

    lower_bound = mittelpunkt
    upper_bound = x.max()

    indices = np.where((x >= lower_bound) & (x <= upper_bound))
    x_subset = x[indices]
    y_subset = y0[indices]
    area = np.trapz(y_subset, x_subset)

```

```

lower_bound2 = x.min()
upper_bound2 = x.max()

indices = np.where((x >= lower_bound2) & (x <= upper_bound2))
x_subset2 = x[indices]
y_subset2 = y0[indices]
full_area = np.trapz(y_subset2, x_subset2)

# Schwerpunkt integrierter Teilfläche
integral_xy = np.trapz(x_subset * y_subset, x_subset)
centroid = integral_xy / area
integral_yx = np.trapz(x_subset * y_subset, y_subset)
centroid_y = integral_yx / abs(area)

# Rotationsvolumen
def V(area, centroid):
    return 2 * np.pi * abs(area) * abs(centroid)

# Abtragraten
strahldauer = 10 #Sekunden
abtragate_schnitt = abs(full_area / strahldauer)
abtragate = abs(V(area, centroid) / strahldauer)
#print(abtragate)

# Berechnungen ende

if x is not None and y0 is not None:
    fig = go.FigureWidget(make_subplots(rows=1, cols=1))

    fig.add_scatter(x=x, y=y0, mode="markers", marker=dict(color="blue"), name="Messpunkte des Abtrags")
    fig.add_trace(go.Scatter(x=x_loess, y=y_loess, mode="lines", line=dict(color="black"), name="LOESS
Kurve"))
    # Layout anpassen
    fig.update_layout(
        title={
            'text': f"{os.path.basename(file_path).replace('_ausschnitt_00001.slk', '').replace('_', ' ')}",
            'font': {'size': 24},
            'y': 0.93,
            'x': 0.5,
            'xanchor': 'center',
            'yanchor': 'top'
        },
        xaxis_title="Breite in mm",
        yaxis_title="Tiefe in mm",
        yaxis=dict(range=[min(y0)+0.1*min(y0), 0]),
        showlegend=True,
        legend=dict(
            orientation="h",
            yanchor="bottom",
            y=-0.45,
            xanchor="center",
            x=0.5
        )
    )

# Ausgabe-Widget für zusätzliche Informationen
output = Output()

```

```

# Variable für die ausgewählten Punkte
selected_points = []

# Event-Handler für Klicks auf Punkte
def on_point_click(trace, points, state):
    with output:
        output.clear_output()
        if points.point_inds:
            for point_ind in points.point_inds:
                selected_points.append(point_ind)
            x_data = trace.x
            y_data = trace.y
            new_marker_color = ["red" if i in selected_points else "blue" for i in range(len(x_data))]
            fig.data[0].update(marker=dict(color=new_marker_color))
            if len(selected_points) >= 2:
                selected_x = [x_data[i] for i in selected_points]
                selected_y = [y_data[i] for i in selected_points]

                #Breite des tiefsten Bereichs
                #distance = np.sqrt((selected_x[1] - selected_x[0])**2 + (selected_y[1] - selected_y[0])**2) # mit
Pythagoras

                start_x = selected_x[0]
                end_x = selected_x[1]
                distance = abs(start_x-end_x)

                def calculate_mean_in_interval(x, y0, start_x, end_x):
                    start_index = np.where(x == start_x)[0][0]
                    end_index = np.where(x == end_x)[0][0]

                    # Extrahiere die y-Werte im Intervall
                    y_values_in_interval = y0[start_index:end_index+1]

                    # Berechne den Mittelwert der y-Werte im Intervall
                    mean_in_interval = sum(y_values_in_interval) / len(y_values_in_interval)

                return mean_in_interval

                mean_in_interval = calculate_mean_in_interval(x, y0, start_x, end_x)

            # .png Plot
            fig.data = [] # Entfernen aller Spuren bzw. Daten

            fig.add_scatter(x=[start_x, start_x], y=[min(y0), 0], mode='lines', line=dict(color="orange",
dash="dash"), name="Grenzen des tiefsten Bereichs")
            fig.add_trace(go.Scatter(x=x_subset, y=y_subset, fill="tozero", fillcolor="skyblue",
mode="none", name="Halbe Schnittfläche", opacity=0.5))
            fig.add_trace(go.Scatter(x=[centroid], y=[centroid_y], mode="markers", marker=dict(color="red",
size=12, symbol="x"), name="Schwerpunkt der halben Schnittfläche"))
            fig.add_scatter(x=x, y=y0, mode="lines", line=dict(color="blue"), name="Form des Abtrags")
            fig.add_trace(go.Scatter(x=x_loess, y=y_loess, mode="lines", line=dict(color="black"),
name="LOESS Kurve"))
            fig.add_scatter(x=[end_x, end_x], y=[min(y0), 0], mode='lines', line=dict(color="orange",
dash="dash"), showlegend=False)

```

```

fig.add_scatter(x=[min(x), max(x)], y=[mean_in_interval, mean_in_interval], mode='lines',
line=dict(color="green", dash="dash"), name="Durchschnittliche Tiefe im tiefsten Bereich")
fig.add_scatter(x=selected_x, y=selected_y, mode="markers", marker=dict(color="red"),
name="Ausgewählte Punkte")
fig.update_layout(
    title={
        'text': f"{os.path.basename(file_path).replace('_ausschnitt_00001.slk', '').replace('_', ' ')}",
        'font': {'size': 24},
        'y':0.93,
        'x':0.5,
        'xanchor': 'center',
        'yanchor': 'top'
    },
    #title=os.path.splitext(os.path.basename(file_path))[0],
    xaxis_title='Breite in mm',
    yaxis_title='Tiefe in mm',
    yaxis=dict(range=[min(y0)+0.1*min(y0), 0]),
    showlegend=True,
    legend=dict(
        orientation="h",
        yanchor="bottom",
        y=-0.23, #sieht in JN falsch aus, aber die html und png sind gut so
        xanchor="center",
        x=0.5,
        traceorder="normal",
        font=dict(size=12),
        #itemsizing="constant",
        #valign="top",
        bgcolor="lightgray",
        bordercolor="black",
        borderwidth=2
    )
)
#print(f"X-Werte: {selected_x}")
#print(f"Y-Werte: {selected_y}")
#print(f"Breite des tiefsten Bereichs: {distance:.3f}")
#print(f"Durchschnittliche Tiefe im tiefsten Bereich: {mean_in_interval:.3f}")

# Plots speichern
# Wenn nicht vorhanden, notwendige Ordner erstellen

output_directory_plots_png = os.path.join(input_directory, "Plots_png")
if not os.path.exists(output_directory_plots_png):
    os.makedirs(output_directory_plots_png)

output_directory_excel = os.path.join(input_directory, "Messwerte")
if not os.path.exists(output_directory_excel):
    os.makedirs(output_directory_excel)

# Sicherstellen, dass das Ausgabeverzeichnis existiert

os.makedirs(output_directory_plots_png, exist_ok=True)
os.makedirs(output_directory_excel, exist_ok=True)

# Speichern Plot .png
output_path_png = os.path.join(output_directory_plots_png,
f"Plot_{os.path.basename(file_path).replace('.slk', '')}.png")

```

```

pio.write_image(fig, output_path_png, width=1200, height=800, scale=2, engine="kaleido")
print(f"Plot als .png gespeichert: {output_path_png}")

# Speichern relevanter Daten in einer Excel .xlsx
data_to_save = {

    "Tiefe (Durchschnitt) [mm]": [abs(mean_in_interval)],
    "Tiefe (Tiefstwert) [mm]": [abs(min(y0))],
    "Breite [mm]": [abs(min(x)-max(x))],
    "Breite im tiefsten Bereich [mm]": [distance],
    "Fläche des markierten Bereichs [mm^2]": [abs(area)],
    "Gesamtfläche [mm^2]": [abs(full_area)],
    "Schwerpunkt x-Koordinate [mm]": [centroid],
    "Schwerpunkt y-Koordinate [mm]": [centroid_y],
    "Rotationsvolumen [mm^3]": [V(area, centroid)],
    "Strahldauer [s]": [strahldauer],
    "Abtragate (Schnittfläche) [mm^2/s]": [abtragate_schnitt],
    "Abtragate (Volumen) [mm^3/s]": [abtragate]

}

df_to_save = pd.DataFrame(data_to_save)

excel_filename = os.path.splitext(file_path)[0] + ".xlsx"
excel_path = os.path.join(output_directory_excel, f"{os.path.basename(file_path).replace('.slk',
)}.xlsx")

# Speichere das DataFrame in einer Excel
df_to_save.to_excel(excel_path, index=False)

# Spaltenbreite der Excel für bessere Lesbarkeit anpassen
wb = load_workbook(excel_path)
ws = wb.active
for column_cells in ws.columns:
    length = max(len(str(cell.value)) for cell in column_cells)
    ws.column_dimensions[column_cells[0].column_letter].width = length + 2
wb.save(excel_path)
print(f"Daten als Excel gespeichert: {excel_path}")

# .html Plot mit angepasster Legende
# Ordnerstruktur .html
output_directory_plots_html = os.path.join(input_directory, "Plots_html")
if not os.path.exists(output_directory_plots_html):
    os.makedirs(output_directory_plots_html)
os.makedirs(output_directory_plots_html, exist_ok=True)

fig.data = [] # Entfernen aller Spuren bzw. Daten

fig.add_scatter(x=[start_x, start_x], y=[min(y0), 0], mode='lines', line=dict(color="orange",
dash="dash"), name="Grenzen des tiefsten Bereichs", legendgroup="group1")
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_subset, y=y_subset, fill="tozero", fillcolor="skyblue",
mode="none", name="Halbe Schnittfläche", opacity=0.5))
fig.add_trace(go.Scatter(x=[centroid], y=[centroid_y], mode="markers", marker=dict(color="red",
size=12, symbol="x"), name="Schwerpunkt der halben Schnittfläche"))
fig.add_scatter(x=x, y=y0, mode="lines", line=dict(color="blue"), name="Form des Abtrags")
fig.add_scatter(x=[end_x, end_x], y=[min(y0), 0], mode='lines', line=dict(color="orange",
dash="dash"), name="Rechte Grenze des tiefsten Bereichs", legendgroup="group1", showlegend=False)

```

```

fig.add_trace(go.Scatter(x=x_loess, y=y_loess, mode="lines", line=dict(color="black"),
name="LOESS Kurve"))
fig.add_scatter(x=[min(x), max(x)], y=[mean_in_interval, mean_in_interval], mode='lines',
line=dict(color="green", dash="dash"), name="Durchschnittliche Tiefe im tiefsten Bereich")
fig.add_scatter(x=selected_x, y=selected_y, mode="markers", marker=dict(color="red"),
name="Ausgewählte Punkte")
fig.update_layout(
    title={
        'text': f"{os.path.basename(file_path).replace('_ausschnitt_00001.slk', '').replace('_', ' ')}",
        'font': {'size': 24},
        'y':0.93,
        'x':0.5,
        'xanchor': 'center',
        'yanchor': 'top'
    },
    #title=os.path.splitext(os.path.basename(file_path))[0],
    xaxis_title='Breite in mm',
    yaxis_title='Tiefe in mm',
    yaxis=dict(range=[min(y0)+0.1*min(y0), 0]),
    showlegend=True,
    legend=dict(
        orientation="h",
        yanchor="bottom",
        y=-0.3, #sieht in JN falsch aus, aber die html und png sind gut so
        xanchor="center",
        x=0.5,
        traceorder="normal",
        font=dict(size=12),
        #itemsizing="constant",
        #valign="top",
        bgcolor="lightgray",
        bordercolor="black",
        borderwidth=2
    )
)

# Config für das manuelle speichern einer .html als .png
config = {
    'toImageButtonOptions': {
        'format': 'png', # Speichert das Bild als PNG
        'filename': f"Plot_{os.path.basename(file_path).replace('.slk', '')}.html",
        'height': 800, # Höhe des gespeicherten Bildes in Pixeln
        'width': 1200, # Breite des gespeicherten Bildes in Pixeln
        'scale': 2 # DPI-Skalierungsfaktor
    }
}

# Speichern Plot .html
output_path_html = os.path.join(output_directory_plots_html,
f"Plot_{os.path.basename(file_path).replace('.slk', '')}.html")
fig.write_html(output_path_html, config=config)
print(f"Plot als .html gespeichert: {output_path_html}")

# Einfacher .png Plot
output_directory_plots_epng = os.path.join(input_directory, "Plots_e_png")
if not os.path.exists(output_directory_plots_epng):
    os.makedirs(output_directory_plots_epng)

```

```

os.makedirs(output_directory_plots_epng, exist_ok=True)

fig.data = [] # Entfernen aller Spuren bzw. Daten

#fig.add_scatter(x=[start_x, start_x], y=[min(y0), 0], mode='lines', line=dict(color="orange",
dash="dash"), name="Linke Grenze des tiefsten Bereichs")
#fig.add_scatter(x=[end_x, end_x], y=[min(y0), 0], mode='lines', line=dict(color="orange",
dash="dash"), name="Rechte Grenze des tiefsten Bereichs")
#fig.add_trace(go.Scatter(x=x_subset, y=y_subset, fill="tozero", fillcolor="skyblue",
mode="none", name="Halbe Schnittfläche", opacity=0.5))
#fig.add_trace(go.Scatter(x=[centroid], y=[centroid_y], mode="markers",
marker=dict(color="red", size=12, symbol="x"), name="Schwerpunkt der halben Schnittfläche"))
fig.add_scatter(x=x, y=y0, mode="lines", line=dict(color="blue"), name="Form des Abtrags")
#fig.add_trace(go.Scatter(x=x_loess, y=y_loess, mode="lines", line=dict(color="black"),
name="LOESS Kurve"))
#fig.add_scatter(x=[min(x), max(x)], y=[mean_in_interval, mean_in_interval], mode='lines',
line=dict(color="green", dash="dash"), name="Durchschnittliche Tiefe im tiefsten Bereich")
#fig.add_scatter(x=selected_x, y=selected_y, mode="markers", marker=dict(color="red"),
name="Ausgewählte Punkte")
fig.update_layout(
    title={
        'text': f"{os.path.basename(file_path).replace('_ausschnitt_00001.slk', '')}.replace('_', ' ')",
        'font': {'size': 24},
        'y':0.93,
        'x':0.5,
        'xanchor': 'center',
        'yanchor': 'top'
    },
    #title=os.path.splitext(os.path.basename(file_path))[0],
    xaxis_title='Breite in mm',
    yaxis_title='Tiefe in mm',
    yaxis=dict(range=[min(y0)+0.1*min(y0), 0]),
    showlegend=True,
    legend=dict(
        orientation="h",
        yanchor="bottom",
        y=-0.17,
        xanchor="center",
        x=0.5,
        traceorder="normal",
        font=dict(size=12),
        #itemsizing="constant",
        #valign="top",
        bgcolor="lightgray",
        bordercolor="black",
        borderwidth=2
    )
)

# Speichern einfacher .png Plot
output_path_epng = os.path.join(output_directory_plots_epng,
f"Simple_{os.path.basename(file_path).replace('.slk', '')}.png")
pio.write_image(fig, output_path_epng, width=1200, height=800, scale=2, engine="kaleido")
print(f"Einfacher Plot als .png gespeichert: {output_path_epng}")

selected_points.clear()

# Hinzufügen des Klick-Event-Handlers zu der Scatter-Spur

```

```

fig.data[0].on_click(on_point_click)

# Anzeigen des Plots und des Ausgabe-Widgets
display(VBox([fig, output]))

# Verarbeiten aller relevanten SLK-Dateien
for file_name in os.listdir(input_directory):
    if "ausschnitt" in file_name.lower() and file_name.endswith(".slk"):
        file_path = os.path.join(input_directory, file_name)
        process and plot(file_path)

```

Tabelle 8: Python-Code für den Curve-Fit und Bestimmtheitsmaß

```

import pandas as pd
import numpy as np
import plotly.graph_objects as go
from scipy.optimize import curve_fit

y_axis_title = "Tiefe (Tiefstwert) [mm]"
diagramm_title = "Ersatzfunktion für den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Abtragtiefe (Tiefstwert)"

# Excel-Datei einlesen
file_path = 'Auswertung_Linienabtragung.xlsx'
sheet_name = 'Berechnungen 2'
df = pd.read_excel(file_path, sheet_name=sheet_name)

# Relevante Spalten als x und y einlesen
x = pd.to_numeric(df['Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]'], errors='coerce').values
y = pd.to_numeric(df[y_axis_title], errors='coerce').values

# Überprüfen auf NaN oder inf Werte und diese entfernen
mask = np.isfinite(x) & np.isfinite(y)
x_clean = x[mask]
y_clean = y[mask]

# Lineare Anpassung
def linear(x, a, b):
    return a * x + b

popt_linear, _ = curve_fit(linear, x_clean, y_clean)
y_linear = linear(x_clean, *popt_linear)
r_squared_linear = 1 - np.sum((y_clean - y_linear) ** 2) / np.sum((y_clean - np.mean(y_clean)) ** 2)

# Quadratische Anpassung
def quadratisch(x, a, b, c):
    return a * x**2 + b * x + c

popt_quadratisch, _ = curve_fit(quadratisch, x_clean, y_clean)
y_quadratisch = quadratisch(x_clean, *popt_quadratisch)
r_squared_quadratisch = 1 - np.sum((y_clean - y_quadratisch) ** 2) / np.sum((y_clean - np.mean(y_clean)) ** 2)

# Exponentielle Anpassung
def exponentiell(x, a, b):
    return a * np.exp(b * x)

popt_exponentiell, _ = curve_fit(exponentiell, x_clean, y_clean)
y_exponentiell = exponentiell(x_clean, *popt_exponentiell)

```

```

r_squared_exponentiell = 1 - np.sum((y_clean - y_exponentiell) ** 2) / np.sum((y_clean - np.mean(y_clean)) ** 2)

# Logarithmische Anpassung
def logarithmisch(x, a, b):
    return a * np.log(x) + b

popt_logarithmisch, _ = curve_fit(logarithmisch, x_clean, y_clean)
y_logarithmisch = logarithmisch(x_clean, *popt_logarithmisch)
r_squared_logarithmisch = 1 - np.sum((y_clean - y_logarithmisch) ** 2) / np.sum((y_clean - np.mean(y_clean)) ** 2)

# Potenzfunktion Anpassung
def potenz(x, a, b):
    return a * np.power(x, b)

popt_potenz, _ = curve_fit(potenz, x_clean, y_clean)
y_potenz = potenz(x_clean, *popt_potenz)
r_squared_potenz = 1 - np.sum((y_clean - y_potenz) ** 2) / np.sum((y_clean - np.mean(y_clean)) ** 2)

# Kubische Anpassung (Polynom 3. Grades)
def kubisch(x, a, b, c, d):
    return a * x**3 + b * x**2 + c * x + d

popt_kubisch, _ = curve_fit(kubisch, x_clean, y_clean)
y_kubisch = kubisch(x_clean, *popt_kubisch)
r_squared_kubisch = 1 - np.sum((y_clean - y_kubisch) ** 2) / np.sum((y_clean - np.mean(y_clean)) ** 2)

# Plotly-Diagramm erstellen
fig = go.Figure()

# Datenpunkte hinzufügen
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_clean, mode="markers", name="Rohdaten"))

# Anpassungen hinzufügen
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_linear, mode='lines',
    name=f'Linear (1. Grad): y = {popt_linear[0]:.3f}x + {popt_linear[1]:.3f}, R² = {r_squared_linear:.3f}',
    line=dict(color='red'))
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_quadratisch, mode='lines',
    name=f'Quadratisch (2. Grad): y = {popt_quadratisch[0]:.3f}x² + {popt_quadratisch[1]:.3f}x + {popt_quadratisch[2]:.3f}, R² = {r_squared_quadratisch:.3f}',
    line=dict(color='green'))
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_exponentiell, mode='lines',
    name=f'Exponentiell: y = {popt_exponentiell[0]:.3f} * exp({popt_exponentiell[1]:.3f}x), R² = {r_squared_exponentiell:.3f}',
    line=dict(color='blue'))
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_logarithmisch, mode='lines',
    name=f'Logarithmisch: y = {popt_logarithmisch[0]:.3f} * log(x) + {popt_logarithmisch[1]:.3f}, R² = {r_squared_logarithmisch:.3f}',
    line=dict(color='orange'))
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_potenz, mode='lines',
    name=f'Potenz: y = {popt_potenz[0]:.3f} * x^{popt_potenz[1]:.3f}, R² = {r_squared_potenz:.3f}',
    line=dict(color='purple'))
fig.add_trace(go.Scatter(x=x_clean, y=y_kubisch, mode='lines',
    name=f'Kubisch (3. Grad): y = {popt_kubisch[0]:.3f}x³ + {popt_kubisch[1]:.3f}x² + {popt_kubisch[2]:.3f}x + {popt_kubisch[3]:.3f}, R² = {r_squared_kubisch:.3f}',
    line=dict(color='brown'))

```

```
# Layout anpassen
fig.update_layout(
    title=diagramm_title,
    xaxis_title="Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]",
    yaxis_title=y_axis_title,
    legend=dict(x=1.02, y=0.5),
    width=1200, # Breite des Plots
    height=600, # Höhe des Plots
)

# Plot als HTML-Datei speichern
fig.write_html(f"{diagramm_title}.html")
print("Plot erfolgreich als .html gespeichert.")
```



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt werden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Valeika

Vorname: Deimantas

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

**„Parameterstudie zum Schäften von GFK mittels Vakuumsaugstrahlens“**

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*-die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten-*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

03.09.2024

Datum

Unterschrift im Original