

Andreas Gebhardt

»Gestaltungsrichtlinien zur systematischen
Verbesserung der Spanguterfassung bei der
Fräsbearbeitung von CFK«



Andreas Gebhardt

Gestaltungsrichtlinien zur systematischen Verbesserung der
Spanguterfassung bei der Fräsbearbeitung von CFK

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,3}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke⁴

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

² Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³ Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

⁴ Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-1100
info@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2023

D 93

2023

Druck und Weiterverarbeitung:

Fraunhofer Verlag Mediendienstleistungen, Stuttgart, Jahr des Drucks
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet,
unter folgender Creative-Commons-Lizenz:
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

Gestaltungsrichtlinien zur systematischen Verbesserung der Spanguterfassung bei der Fräsbearbeitung von CFK

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von

**Andreas Gebhardt
aus Backnang**

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Mitberichter: apl. Prof. Dr. rer. nat. Andreas Killinger

Tag der mündlichen Prüfung: 29.03.2023

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
2023

Vorwort

Eine Dissertation wird allein dem Autor zugeschrieben, doch ist sie ohne die Unterstützung vieler nicht möglich. Darum möchte ich meinen Dank all jenen aussprechen, die mich während dieses Vorhabens unterstützt haben und ohne die ich diese Arbeit nicht hätte verfassen können.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit in der Abteilung Leichtbautechnologien am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Herrn Prof. Thomas Bauernhansl, als Doktorvater und Institutsleiter, möchte ich für die Betreuung und die Möglichkeit zur Promotion danken. Herrn Prof. Andreas Killinger danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dr. Marco Schneider aussprechen, für seine Motivation, die fachlichen Diskussionen und die immerwährende Unterstützung.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit in all den Jahren, die kollegiale Hilfe und die gemeinsame Zeit. Hier möchte ich insbesondere Herrn Dr. Philipp Esch und Herrn Thomas Götz hervorheben, die mir in den letzten Monaten vor Fertigstellung den Rücken freigehalten haben. Danken möchte ich zudem allen Studierenden für ihre wertvolle Zuarbeit.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Eltern Irmgard und Rainer, die mich auf meinem Bildungsweg begleitet und mir das Studium ermöglicht haben.

Besonders möchte ich mich bei meiner Frau Claudia und unseren Söhnen Aron und Henry für den bedingungslosen Rückhalt und den Verzicht auf gemeinsame Zeit an Wochenenden, Abenden und im Urlaub bedanken.

Kurzfassung

Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sind High-End-Leichtbauwerkstoffe, mit einem hohen Potenzial zur Leistungssteigerung von Maschinen und Produkten sowie zur Energieeinsparung. Ihre Herstellung erfolgt typischerweise unter Einsatz trockener Fräsprozesse, deren Spangut eine besondere Gefährdung darstellt und sicher erfasst werden muss. Der Prozess der Spangutabsaugung stand bisher nicht im Fokus der Wissenschaft, obgleich er eine hohe wirtschaftliche und technische Relevanz aufweist. Die vorliegende Arbeit widmet sich daher zunächst dem Stand der Technik in der fertigen Industrie sowie den Anforderungen der CFK-zerspanenden Betriebe. Hieraus wird die Notwendigkeit dieser Arbeit aufgezeigt, die Absaugprozesse effektiver und effizienter zu gestalten und systematisches Grundlagenwissen zur Auslegung von Absaugsystemen zu schaffen.

In einer theoretischen Betrachtung des Absaugprozesses werden die relevanten Einflussgrößen identifiziert und anschließend experimentell untersucht. In diesem Zusammenhang wird auf grundlegende Fragen zur Spanbildung von CFK eingegangen. Es folgen Untersuchungen zum Spangutauswurf und dessen Optimierung für eine verbesserte Erfassung. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden Gestaltungsrichtlinien für Absaugsysteme formuliert, die zur Optimierung dreier wesentlicher Varianten von Absaugsystemen genutzt werden. Diese werden abschließend anhand von zwei Schikanebauteilen bewertet. Diese Validierung zeigt das hohe Potenzial zur Steigerung der Spanguterfassung und zur Senkung des Energiebedarfs.

Abstract

Carbon fibre reinforced plastics (CFRP) are high-end lightweight materials with a high potential for increasing the performance of machines and products and saving energy. CFRP is typically manufactured using dry milling processes, whose chips and dust particles pose a variety of hazards and must be safely collected. The peripheral process of particle extraction has not been in the focus of science so far, although it has a high economic and technical relevance. Therefore, this work first records the state of the art in the manufacturing industry and the requirements of CFRP manufacturers. From this, the necessity of this work is derived to make the extraction processes more effective and efficient and to create basic knowledge for the design of extraction systems.

The relevant influencing variables are identified in a theoretical consideration of the extraction process and subsequently investigated experimentally. In this context, fundamental questions about the chip formation of CFRP are addressed. This is followed by investigations into particle ejection and its optimisation for improved collection. Based on all findings, design guidelines for extraction systems are formulated, which are used to optimise three fundamental extraction systems. Finally, these are evaluated based on two use cases. The validation shows the high potential for increasing chip extraction and reducing energy demand through the present work.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	15
Formelzeichenverzeichnis.....	19
Abbildungsverzeichnis	23
Tabellenverzeichnis.....	35
1 Einleitung.....	37
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	37
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	39
1.3 Aufbau der Arbeit.....	40
1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung	42
2 Stand der Technik und Forschung.....	45
2.1 Faserverstärkte Kunststoffe, CFK	45
2.1.1 Aufbau und Eigenschaften	45
2.1.2 Spanbildung	49
2.1.3 Gefährdungen durch CFK-Stäube.....	58
2.2 Erfassung des Spanguts bei der spanenden Bearbeitung	62
2.2.1 Absauganlagen für stationäre Bearbeitungsmaschinen	62
2.2.2 Erfassungseinrichtungen an Bearbeitungsmaschinen.....	64
2.2.3 Spangutauswurf und Lenkung des Spangutstrahls.....	76
2.2.4 Strömungssimulation der Spangutabsaugung	79

2.2.5	Fazit zum Stand der Technik und Konkretisierung der Aufgabenstellung	82
3	Analyse und Bewertung industriell eingesetzter Absaugsysteme	83
3.1	Studienumfang und Ergebnisse	83
3.2	Bewertung der Absaugsysteme und Ableitung von Optimierungspotenzialen	94
3.3	Fazit zur Analyse und Bewertung der eingesetzten Absaugsysteme und Konkretisierung der Aufgabenstellung	98
4	Theoretische Betrachtungen der Partikelabsaugung	99
4.1	Widerstandskräfte	99
4.2	Stoßkräfte, Haft- und Reibkräfte	102
4.3	Trägheitskräfte und Gravitationskraft	104
4.4	Vernachlässigbare Kräfte	105
4.5	Fazit zur theoretischen Betrachtung und Konkretisierung der Zielstellung	106
5	Experimentelle Untersuchungen	107
5.1	Versuchstechnische Einrichtungen und Messtechnik	107
5.2	Versuchswerkstoffe und Zerspanwerkzeuge	109
5.3	Versuchsablauf und Durchführung	112
5.4	Analyse des Spanguts	121
5.5	Analyse des Spangutauswurfs	138
6	Optimierung der Spanguterfassung	151
6.1	Ableiten von Gestaltungsrichtlinien	151
6.2	Optimierung des Spangutauswurfs für eine verbesserte Erfassung	154

6.2.1	Analyse und Bewertung unterschiedlicher Technologien zur Optimierung des Spangutauswurfs.....	154
6.2.2	Experimentelle Untersuchungen der ausgewählten technologischen Ansätze zur Optimierung des Spangutauswurfs.....	159
6.3	Aufbau und Validierung des Simulationsmodells.....	169
6.4	Optimierung ausgewählter Absaugsysteme	178
6.4.1	Optimierung der spannsystemintegrierten Absaugung.....	178
6.4.2	Optimierung von Kopfabsaugungen.....	187
6.4.3	Optimierung von Raumabsaugungen	196
6.4.4	Test der optimierten Absaugsysteme	207
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	219
	Literaturverzeichnis.....	225
	Anhang.....	261

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3-Achs	dreiachsig
3D	dreidimensional
5-Achs	fünfachsig
A-Fraktion	alveolengängige Fraktion
AVK	Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.
C	Kohlenstoff
CCD	charge-coupled device
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CMC	Ceramic Matrix Composites (Verbundwerkstoff mit keramischer Matrix)
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DNS	direkte numerische Simulation
E-Fraktion	einatembare Fraktion
EU	Europäische Union
FK	Flugkreis
fps	frames per second
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
HM-Faser	High Modulus (hochmodulige) Faser
HSK	Hohlschaftkegel

HST-Faser	High Strain and Tenacity (hochfeste) Faser
HT-Faser	High Tenacity (hochfeste) Faser
IFF	Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb
IfW	Institut für Werkzeugmaschinen
IM-Faser	Intermediate Module (Kompromiss aus hochfester und hochmoduliger) Faser
IPA	Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
KSS	Kühlschmierstoff
LES	Large Eddy Simulation
MMC	Metal Matrix-Composites (Verbundwerkstoff mit metallischer Matrix)
MMS	Minimalmengenschmierung
NSG	Navier-Stokes-Gleichungen
PAN	Polyacrylnitril
PKD	Polykristalliner Diamant
PMC	Polymer Matrix Composites (Verbundwerkstoff mit polymerer Matrix)
PVC	Polyvinylchlorid
Q	qualitativ
REM	Rasterelektronenmikroskop
SMC	Sheet Molding Compound
T	technisch
TCP	Tool Center Point
T-Fraktion	thoraxialgängige Fraktion

TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UD	Unidirektional
UHM-Faser	Ultra High Modulus (ultra-hochmodulige) Faser
W	wirtschaftlich
WHO	World Health Organisation

Formelzeichenverzeichnis

Φ	°	Faserorientierungswinkel
ϑ	°	Fasertrennwinkel
E	MPa	E-Modul
ν	-	Poisson-Zahl
ρ	kg/m ³	Dichte
d	mm	Durchmesser
f	mm	Vorschub
F_c	N	Schnittkraft
h_m	mm	mittlere Spandicke
n	1/min	Drehzahl
r	mm	Radius
r_β	µm	Schneidkantenverrundung
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
Z	-	Anzahl Schneiden
α	°	Freiwinkel
β	°	Keilwinkel
γ	°	Spanwinkel
λ	°	Drallwinkel
σ	-	Standardabweichung

σ	-	Standardabweichung
d_f	mm	Abweichung
Δt_r	mm	Rückfederung
d_d	mm	Deformationstiefe
f_z	mm	Zahnvorschub
d_{ae}	mm	aerodynamischer Durchmesser
L	mm	Länge
L/d	-	Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis
P_{el}	W	Leistungsaufnahme
Q	m ³ /h	Volumenstrom
Δp	N/m ²	Druckdifferenz
η	-	Wirkungsgrad
v_L	m/s	Luftgeschwindigkeit
F_{ZF}	N	Zentrifugalkraft
G	N	Gewichtskraft
F_{R1} / F_{R2}	N	Reibkraft
a	m/s ²	Beschleunigung
m	kg	Masse
N	N	Normalkraft
v	m/s	Geschwindigkeit
F_c	N	Schnittkraft
c_w	-	Strömungswiderstandskoeffizient
$x_{c \min}$	μm	minimale Sehnenlänge

V_{rel}	-	relatives Arbeitsraumvolumen
V_{Bauteil}	m^3	Volumen Bauteil
$V_{\text{Arbeitsraum}}$	m^3	Volumen Arbeitsraum
η	-	Erfassungsgrad
p	N/m^2	Druck
t_{R}	min	Reinigungszeit je Schicht
n	-	Anzahl
P_{p}	W	pneumatische Leistung
Δp_{spez}	N/m^2	spezifischer Druckverlust Absaugsystem
Δp_{AA}	N/m^2	spezifischer Druckverlust Absauganlage
$P_{\text{p,A}}$	W	pneumatische Leistung Absaugsystem
f	Hz	Frequenz
a_{e}	mm	Arbeitseingriff
$x_{\text{Fe max}}$	μm	maximale Feret-Durchmesser
l/b	-	Längen- zu Breitenverhältnis
$Q(x)$	%	Verteilungssumme
$q(x)$	%	Verteilungsdichte
$Q_3(x)$	%	Massenverteilungssummen
$Q_0(x)$	%	Anzahlverteilungssummen
ω_{m}	°	mittlerer Entleerungswinkel
ω_{v}	°	vorderer Entleerungswinkel
ω_{h}	°	hinterer Entleerungswinkel
τ_{h}	°	horizontaler Spangutstrahlöffnungswinkel

φ_s	°	Schnittbogenwinkel
ψ_m	°	mittlerer Auswurfwinkel
ψ_o	°	oberer Auswurfwinkel
ψ_u	°	unterer Auswurfwinkel
τ_v	°	vertikaler Spangutstrahlöffnungswinkel
h	mm	Spandicke
φ	°	Vorschubrichtungswinkel
$l_{F,max}$	mm	maximale Faserlänge
v_p	m/s	Partikelgeschwindigkeit
l_f	m	Flugweite
β	°	Voreilwinkel
a_λ	-	gemittelter Proportionalitätsfaktor
t	mm	Werkstückdicke
F_v	N	Vertikalkraft
Ma	-	Machzahl
T	Nm	Drehmoment

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Gefährdungen durch CFK-Stäube.....	38
Abbildung 1-2:	Gliederung der Arbeit	41
Abbildung 1-3:	Erkenntnistheoretische Grundpositionen nach <i>Singer et al.</i> (2002) und <i>Töpfer</i> (2010).....	42
Abbildung 1-4:	Merkmale des wissenschaftlichen Realismus in schematischer Darstellung nach <i>Hunt</i> (2010); <i>Eisend et al.</i> (2017)	43
Abbildung 1-5:	Wissenschaftssystematik nach <i>Ulrich et al.</i> (1976).....	44
Abbildung 2-1:	Vergleich der spezifischen Festigkeit (Reißlänge) und spezifischen Steifigkeit (Dehnlänge) verschiedener Leichtbauwerkstoffe nach <i>Wiedemann</i> (2022)	46
Abbildung 2-2:	Anisotropie in Abhängigkeit der Faseranordnung nach <i>Schulte</i> (1992).....	48
Abbildung 2-3:	Typische Faserarchitekturen von 2-D-Bauteilen nach <i>Kowtsch et al.</i> (2011).....	48
Abbildung 2-4:	Faserorientierungswinkel und Fasertrennwinkel nach <i>Hartmann</i> (2012).....	51
Abbildung 2-5:	Zerspanungsmechanismen für unterschiedliche Fasertrennwinkel nach <i>Rummenhöller</i> (1996)	52
Abbildung 2-6:	Spanbildung unter Berücksichtigung des Schneidkantenradius nach <i>Sheikh-Ahmad</i> (2009) (links); Deformations- und Rückfederzone nach <i>Kaneeda</i> (1991) (rechts)	55

Abbildung 2-7:	Schematische Darstellung der arbeitsmedizinisch-toxikologisch relevanten Anteile des Aerosols in den Atmungsorganen nach MAK (2014)	59
Abbildung 2-8:	Kanzerogene Potenz einer Faser in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften nach <i>Pott et al.</i> (1993).....	60
Abbildung 2-9:	Unterschiedliche Arten von Absauganlagen nach <i>Tech et al.</i> (2003) (von links nach rechts: Entstauber, Einzelabsaugung, Zentralabsaugung, Gruppenabsaugung)	63
Abbildung 2-10:	Erfassungseinrichtungen nach <i>Dittes et al.</i> (1987)	64
Abbildung 2-11:	Spanguterfassungseinrichtungen in der CFK-Zerspanung	65
Abbildung 2-12:	Funktionsprinzip der Raumentsorgung nach (Heisel et al. 2007a)	68
Abbildung 2-13:	Typische Absaughauben bei der Holz- und FVK-Bearbeitung (links: spindelumschließend; rechts: werkzeugumschließend) ..	69
Abbildung 2-14:	Werkzeugnahe Absaugung mit rotierender Glocke (links) (Beckenlechner et al. 2019); Werkzeugnahe Absaugung mit statischer Glocke (rechts) (Gebhardt et al. 2021)	69
Abbildung 2-15:	Erfassungseinrichtung mit nachgeführtem Mundstück nach <i>Geis et al.</i> (2012) und <i>Hintze</i> (2013).....	70
Abbildung 2-16:	Innenabgesaugtes Fräswerkzeug im Einsatz (links) (N. N. 2016) und im ausgebauten Zustand (rechts)	72
Abbildung 2-17:	Kernbohrwerkzeug mit exzentrischem Kern Seitenansicht (links) und Querschnitt (rechts) nach <i>Hagino et al.</i> (2013).....	73
Abbildung 2-18:	Spannvorrichtung mit integrierter Absaugung (rot eingefärbte Bereiche) und Stützen zum Anschluss an eine Hochvakuumabsaugung (blau markiert).....	74

Abbildung 2-19: Patentschrift einer spannvorrichtungsintegrierten Absaugung (Lensing et al. 2014).....	75
Abbildung 2-20: Spangutauswurf für verschiedene Bearbeitungsoperationen der Holzbearbeitung (Blecken 2004).....	76
Abbildung 2-21: Modellierung der auf ein Spanpartikel wirkenden Kräfte nach <i>Martynenko</i> (2007)	77
Abbildung 2-22: Strömungsfelder durch das Fräswerkzeug (links); schematischer (Mitte) und realer Spangutauswurf (rechts) nach (Barz et al. 1967).....	77
Abbildung 2-23: Prototypisches Design nach <i>Heisel et al.</i> (2004a) (links) und industrielle Umsetzung eines Spannfutters mit integriertem Diagonalventilator (rechts).....	79
Abbildung 2-24: Simulation der Partikelreflexionen und Flugbahnen (links) (Heisel et al. 2001c) und Simulation der Luftströmungen im Spanraum (rechts) (Heisel et al. 2009)	80
Abbildung 3-1: Untersuchungsgegenstand der Studie zur Analyse der Absaugsysteme in der industriellen Fertigung in Deutschland...	83
Abbildung 3-2: Arbeitsraumvolumina und Stückzahl der betrachteten Bauteile und Absaugsysteme der Bearbeitungsmaschinen	85
Abbildung 3-3: Relatives Arbeitsraumvolumen in Abhängigkeit vom Arbeitsraumvolumen der Bearbeitungsmaschinen mit Raumabsaugung	86
Abbildung 3-4: Erfassungsgrade der untersuchten Anlagen in Abhängigkeit der Bauteilspannung	88
Abbildung 3-5: Erfassungsgrade von Kopf- und spannsystemintegrierten Absaugungen	89

Abbildung 3-6:	Eingesetzte Absaugsysteme unterteilt nach Absaugvolumenstrom und Druckniveau	90
Abbildung 3-7:	Häufigkeit der Bearbeitungsoperation	91
Abbildung 3-8:	Häufigkeit der eingesetzten Zerspanwerkzeuge.....	91
Abbildung 3-9:	Reinigungsaufwand in Abhängigkeit der Gesamtstückzahl.....	92
Abbildung 3-10:	Zielstellungen an den Einsatz der Absaugtechnik bei den befragten Unternehmen	93
Abbildung 3-11:	Erfassungsgrad und pneumatische Leistung der untersuchten Bearbeitungsmaschinen.....	95
Abbildung 3-12:	Bewertung der Absaugsysteme.....	96
Abbildung 3-13:	Einteilung der Absaugsysteme nach Einsatzszenarien	97
Abbildung 4-1:	Widerstandsbeiwerte umströmter Körper (Zierep 1991; Bohl et al. 2005)	100
Abbildung 4-2:	Widerstandsbeiwerte umströmter Körper (Lackmann 2011) ..	101
Abbildung 4-3:	REM-Aufnahmen einer CFK-Spangutprobe mit Kennzeichnung von Faserbruchstücken, Matrixpartikel und Laminatpartikel ...	102
Abbildung 4-4:	Auf einen Partikel wirkende Gewichtskraft sowie Trägheits- und Strömungskräfte.....	105
Abbildung 5-1:	Versuchsmaschinen <i>Lambda BOF</i> (links); Roboterzelle (rechts)	107
Abbildung 5-2:	Zerspanvorrichtung zur Herstellung des Spanguts	112
Abbildung 5-3:	Versuchsmatrix der Parametervariation für die Fräsuntersuchungen	114
Abbildung 5-4:	Bestimmung der Partikelkenngrößen	114
Abbildung 5-5:	Verteilungsdichte q und Verteilungssumme Q einer Partikelmessung	116

Abbildung 5-6:	Versuchsaufbau zur Analyse des Spangutauswurfs mit Spannvorrichtung zur Untersuchung des vertikalen (1) und des horizontalen Spangutauswurfs (2)	118
Abbildung 5-7:	Bestimmung des mittleren Entleerungswinkels und des Spangutstrahlöffnungs-winkels (Ansicht von unten).....	120
Abbildung 5-8:	Bestimmung der Auswurfinkel und des vertikalen Spangutstrahlöffnungswinkels (Seitenansicht)	121
Abbildung 5-9:	Anzahlbezogene (Q_0) und volumenbezogene Verteilungssumme (Q_3) sowie Längen-/Breitenverhältnisse (l/b) für eine Spangutprobe	122
Abbildung 5-10:	Partikelgrößenverteilung für unterschiedliche Fräswerkzeuge .	123
Abbildung 5-11:	Eingriffsverhältnisse beim Umwälzfräsen	125
Abbildung 5-12:	Spandicke für unterschiedliche Zahnvorschübe in Abhängigkeit des Schnittbogenwinkels.....	127
Abbildung 5-13:	Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variiertem Schneidkantenradius	128
Abbildung 5-14:	Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variiertem Zahnvorschub	129
Abbildung 5-15:	REM-Aufnahmen von CFK-Spangut für unterschiedliche Zahnvorschübe $f_z = 0,01$ mm (links); $f_z = 0,1$ mm (rechts)	129
Abbildung 5-16:	Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variiertes Schnittgeschwindigkeit	130
Abbildung 5-17:	REM-Aufnahmen von CFK-Spangut für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten; $v_c = 40$ m/s (links); $v_c = 750$ m/s (rechts)	131
Abbildung 5-18:	Einschluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Partikelgröße; $v_c = 40$ m/s (links); $v_c = 180$ m/s (Mitte); $v_c = 300$ m/s (rechts).	131

Abbildung 5-19: Großflächige, dünnwandige Späne bei der Zerspanung mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten.....	132
Abbildung 5-20: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variierenden Faserorientierungswinkeln	133
Abbildung 5-21: REM-Aufnahmen von CFK-Spangut für unterschiedliche Faserorientierungswinkel	134
Abbildung 5-22: Maximale berechnete Faserlängen in Abhängigkeit des Faserorientierungswinkels.....	136
Abbildung 5-23: Berechnete maximale Faserlänge und korrespondierender Faserorientierungswinkel in Abhängigkeit des Zahnvorschubs	136
Abbildung 5-24: Stoßweiser Auswurf des Spanguts durch das Fräswerkzeug ..	138
Abbildung 5-25: Geschwindigkeit der Spangutpartikel nach dem Auswurf für die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 180$ m/s.....	139
Abbildung 5-26: Partikelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit.....	140
Abbildung 5-27: Verschiedene Phasen der Fräsbearbeitung im Trennschnitt; schematische Darstellung (links); Wärmebildaufnahme im realen Schnitt (rechts)	142
Abbildung 5-28: Darstellung verschiedene Stadien der Werkzeug-Eintrittsphase in Wärmebildaufnahmen.....	143
Abbildung 5-29: Entleerungs- und Spangutstrahlöffnungswinkel sowie Spanbogenwinkel in den unterschiedlichen Phasen des Trennschnitts.....	143
Abbildung 5-30: Horizontaler Spangutauswurf in der Übergangsphase	144
Abbildung 5-31: Einfluss des Zahnvorschubs auf den horizontalen Spangutauswurf	145

Abbildung 5-32: Horizontaler Spangutauswurf in der stationären Phase	145
Abbildung 5-33: Spangutauswurf in der Austrittsphase	146
Abbildung 5-34: Horizontaler Spangutauswurf für unterschiedliche Arbeitseingriffe	147
Abbildung 5-35: Entleerungs- und Spangutstrahlöffnungswinkel sowie Spanbogenwinkel für unterschiedliche Arbeitseingriffe	147
Abbildung 5-36: Auswurfwinkel und Spangutstrahlöffnungswinkel in den unterschiedlichen Phasen des Trennschnitts	148
Abbildung 5-37: Vertikaler Spangutauswurf für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten	149
Abbildung 6-1: Gestaltungsrichtlinien für eine effektive Spanguterfassung	154
Abbildung 6-2: Wärmebildaufnahmen des Spangutauswurfs der fünf technologischen Ansätze	157
Abbildung 6-3: Staubkonzentrationen bei Nutzung der fünf technologischen Ansätze zur Optimierung des Spangutauswurfs	158
Abbildung 6-4: Vertikaler Partikelwurf für Werkzeuge mit gedrahten Schneiden (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)	161
Abbildung 6-5: Horizontaler Partikelwurf für Werkzeuge mit gedrahten Schneiden (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)	162
Abbildung 6-6: Vertikaler Partikelwurf für angestellte Werkzeuge (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)	163
Abbildung 6-7: Horizontaler Partikelwurf für angestellte Werkzeuge (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)	164

Abbildung 6-8:	Darstellung der Partikelbewegung und Auswurfbereich im Vollschnitt mit angestellten Werkzeugen	165
Abbildung 6-9:	Kraft- und Schwingungsmessung (links: Kräfte am Fräswerkzeug; rechts: gemessene Zerspankraftkomponenten und Messbereich)	167
Abbildung 6-10:	Vertikalkraft und Schwingungsamplitude in Abhängigkeit von Werkzeug-Drallwinkel und Voreilwinkel	167
Abbildung 6-11:	Simulierter Zerspanprozess mit Werkstück (gelb) und Werkzeug (blau) (links); Längsschnitt durch die Fluid-Domains mit unterschiedlichen Netztypen (rechts).....	173
Abbildung 6-12:	Gegenüberstellung experimenteller und simulativer Untersuchungen des Partikelflugs	176
Abbildung 6-13:	Unterschiedliche Ansätze der spannsystemintegrierten Absaugung.....	179
Abbildung 6-14:	Prüfstand zur Untersuchung der spannsystemintegrierten Absaugung.....	180
Abbildung 6-15:	Erfassungsgrad in Abhängigkeit der Absaugrichtung des Vorschubwegs.....	182
Abbildung 6-16:	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fräsnut für die Absaugung in (unten) und entgegen der Vorschubrichtung (oben)	182
Abbildung 6-17:	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fräsnut für verschiedene Absaugkanalquerschnitte und Formen	183
Abbildung 6-18:	Erfassungsgrad in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit im Absaugkanal und der Schnittgeschwindigkeit.....	183
Abbildung 6-19:	Erfassungsgrad in Abhängigkeit des Voreilwinkels und des Drallwinkels.....	184

Abbildung 6-20: Partikelsedimentationen im Absaugkanal in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit	185
Abbildung 6-21: Pneumatische Leistung zur Absaugung unterschiedlicher Absaugkanäle in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit	186
Abbildung 6-22: Aufbau der optimierten Kopfabsaugung	189
Abbildung 6-23: Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten im Absaugrüssel und dessen Umfeld	190
Abbildung 6-24: Erfassungsgrad in Abhängigkeit des Abstands des Absaugrüssels über dem Werkstück (links) und in Abhängigkeit des Absaugvolumenstroms (rechts).....	192
Abbildung 6-25: Erfassungsgrad in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit (links) und des Werkzeug-Drallwinkels (rechts).....	192
Abbildung 6-26: Aufbau der Strömungs- und Partikelsimulation (links) und Simulation der Partikelflugbahnen (rechts).....	193
Abbildung 6-27: Prüfstand zur Ermittlung des abrasiven Verschleißes durch CFK-Partikel	194
Abbildung 6-28: Materialabtrag durch die Beschussversuche	195
Abbildung 6-29: Pneumatische Leistung der optimierten Kopfabsaugung für unterschiedliche Abstände zwischen Absaugrüssel und Werkstück	196
Abbildung 6-30: Geschwindigkeitsverteilung an einem Saugrohr ohne und mit Flansch relativ zur Luftgeschwindigkeit am Ansaugquerschnitt nach VDI 2262-4 (2006).....	197
Abbildung 6-31: Unterschied zwischen Blas- und Saugwirkung am Beispiel eines Radialventilators nach (Pfeiffer 1982).....	198

Abbildung 6-32: Unterschiede zwischen reiner Absaugung und einer Kombination aus Blasluft und Absaugung	199
Abbildung 6-33: Schematische Darstellung der Arbeitsraumabsaugung mit Rückführung der teilgefilterten Luft	201
Abbildung 6-34: Simulationsumgebung	204
Abbildung 6-35: Einfluss des vertikalen Auswurfwinkels (links) und der Strömungsgeschwindigkeit (rechts) auf die Sinktiefe der Partikel (bei einer horizontalen Flugweite von 2 m).....	205
Abbildung 6-36: Einfluss des horizontalen Auswurfwinkels auf die Sinktiefe (links) und die Wurfweite senkrecht zur Strömungsrichtung der Partikel (rechts) (bei einer horizontalen Flugweite von 2 m).....	205
Abbildung 6-37: Realbauteil (links) und 2D-Schikanebauteil (rechts) mit Darstellung der Bearbeitungsoperationen	207
Abbildung 6-38: Versuchsaufbau zum Test der optimierten Kopfabsaugung ...	208
Abbildung 6-39: Darstellung des Erfassungsgrads am 2D-Schikanebauteil für die beiden Steuerungsvarianten der Kopfabsaugung	209
Abbildung 6-40: Pneumatische Leistung und Erfassungsgrad der untersuchten Absaugsysteme	210
Abbildung 6-41: Staubkonzentrationen bei der Bearbeitung des 2D-Schikanebauteils mit der optimierten Kopfabsaugung mit CNC-(1) und sensorischer Steuerung (2)	210
Abbildung 6-42: Realbauteil (links) und 3D-Schikanebauteil (rechts) mit Darstellung der Bearbeitungsaufgaben	211
Abbildung 6-43: Spannvorrichtung für das 3D-Schikanebauteil mit abgesaugten Fräskanälen und Taschen.....	212

Abbildung 6-44: Staubkonzentrationen bei Raumabsaugung (1), spannsystemintegrierte Absaugung (2) und Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung (3)	213
Abbildung 6-45: Mobiler Entstauber mit Prozessluftrückführung (links), Blasdüseneinheit (rechts oben) und Werkstück vor Absaughaube (rechts unten).....	214
Abbildung 6-46: Spangutablagerungen bei Raumabsaugung mit gezielter Zuluft (links) und Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung (rechts)	215
Abbildung 6-47: Bewertung der optimierten Absaugsysteme.....	217

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Versagensformen für CFK-Werkstoffe nach <i>Puck</i> (1996) und <i>Schürmann</i> (2007)	49
Tabelle 2-2:	Einflussfaktoren auf die Staubkonzentration bei der CFK-Bearbeitung	57
Tabelle 2-3:	Klassifizierung von Erfassungssystemen	66
Tabelle 3-1:	Verteilung der Maschinentypen und Absaugsysteme unter den 42 analysierten Bearbeitungsmaschinen	84
Tabelle 3-2:	Bewertungsklassen und -kriterien zur qualitativen Einordnung der Spanguterfassung an den Bearbeitungsanlagen.....	87
Tabelle 3-3:	Unterteilung des Druckverlusts in spezifischen Druckverlust des Absaugsystems und Druckverlust der Absauganlage	94
Tabelle 3-4:	Bewertungskriterien von Absaugsystemen	96
Tabelle 4-1:	Einteilung der auf einen Partikel wirkenden Kräfte im Fluid	99
Tabelle 5-1:	Werkstoffdaten des Versuchswerkstoffes	110
Tabelle 5-2:	Daten der eingesetzten Schaftfräser (Teil 1)	111
Tabelle 5-3:	Daten der eingesetzten Schaftfräser (Teil 2)	112
Tabelle 5-4:	Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung des Spanguts beim Fräsen	113
Tabelle 5-5:	Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung des Spangutauswurfs	119
Tabelle 5-6:	Bewertung der Einflussgrößen auf die Partikelgrößenverteilung	137

Tabelle 5-7:	Vergleich von mittlerer Partikelgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit.....	140
Tabelle 6-1:	Technologien zur Optimierung des Spangutauswurfs	155
Tabelle 6-2:	Möglichkeiten zur Verbesserung des Spangutauswurfs	159
Tabelle 6-3:	Daten der eingesetzten Schaftfräser.....	160
Tabelle 6-4:	Versuchsplan zur Optimierung des Spangutauswurfs	160
Tabelle 6-5:	Bewertung des Spangutauswurfs.....	169
Tabelle 6-6:	Simulierte Partikel.....	174
Tabelle 6-7:	Gewählte Werkstoff- und Kontaktgrößen	175
Tabelle 6-8:	Abweichung zwischen experimentellen und simulativen Daten.....	177
Tabelle 6-9:	Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung der Spanguterfassung der spannsystemintegrierten Absaugung ..	181
Tabelle 6-10:	Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung der Spanguterfassung der optimierten Kopfabsaugung.....	190
Tabelle 6-11:	Bewertung unterschiedlicher Blasluft-Absaugungskonzepte ..	202
Tabelle 6-12:	Randbedingungen zur Simulation des Partikelflugs in Luftströmungen.....	203

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Leichtbau ist eine Schlüsseltechnologie zur Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft. Er senkt den Energie- und Ressourcenverbrauch, die CO₂-Emissionen und steigert die Leistungsfähigkeit von Produkten (Kroll 2019). Leichtbauprodukte ermöglichen so die Entkopplung des Rohstoffverbrauchs vom wirtschaftlichen Wachstum (Habeck 2022).

Neben konstruktiven Maßnahmen (*Formleichtbau*) und dem Einsatz geeigneter Fertigungsverfahren (*Fertigungsleichtbau*) kommt der Wahl des Werkstoffs (*Werkstoffleichtbau*) eine zentrale Rolle zu (Westkämper et al. 2004). In diesem Zusammenhang zählen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zu den Werkstoffen mit den höchsten spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten und weisen daher ein exzellentes Leichtbaupotenzial auf (Wiedemann 2022). Verglichen mit konventionellen Werkstoffen ist ihr Marktanteil zwar gering, jedoch verzeichnen sie ein schnelles und stetiges Marktwachstum (Sauer et al. 2021).

Trotz endkonturnaher Ur- und Umformverfahren ist die spanende bzw. abtragende Endbearbeitung von CFK-Bauteilen nach wie vor ein essentieller Prozessschritt in der Herstellung (Biermann et al. 2008). Aktuell werden hierfür überwiegend spanende Bearbeitungsverfahren den Laser- und Wasserstrahlverfahren vorgezogen (Hintze 2021). Die Zerspanung erfolgt in den meisten Fällen trocken, d.h. ohne den Einsatz von Kühlschmierstoffen, sodass eine große Menge ungebundener Staub- und Spanpartikel entstehen (Heisel et al. 2016). Diese stellen eine Gefährdung für die Werker, die Bearbeitungsmaschine und alle angrenzenden Anlagen sowie die Prozesssicherheit dar (Abbildung 1-1). Zugleich gehen die anfallenden manuellen Reinigungsarbeiten der Werkstücke, Maschinen und Spanneinrichtungen zulasten

einer wirtschaftlichen und produktiven Fertigung und sollten folglich auf ein Minimum reduziert werden.

Wirkgröße	geringe Partikelgröße / luftgetragene Staubanteile	hohe Härte und Abrasivität	gute elektrische Leitfähigkeit der Kohlenstofffaser-Anteile
Einfluss			
Gefährdeter	Mensch 	Bearbeitungsprozess 	Maschinen und elektrische Anlagen
Gefährdung	<ul style="list-style-type: none"> Haut- und Augenreizungen Schädigung und Erkrankung/Überlastung des Atemtraktes Brand- oder Explosionsereignisse 	<ul style="list-style-type: none"> Undefinierter Werkzeugverschleiß durch Doppelzersetzung Spannfehler Manuelle Reinigungsarbeiten 	<ul style="list-style-type: none"> Abrasiver Verschleiß relativ bewegter Partner wie Führungen und Lager Kurzschlüsse und elektrische Störungen

Abbildung 1-1: Gefährdungen durch CFK-Stäube

Für die spanende Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen (FVK-Bauteile) standen bis vor wenigen Jahren keine dezidiert auf diese Werkstoffe ausgelegten Werkzeugmaschinen zur Verfügung (Schneider et al. 2012). Die Spannweite industriell eingesetzter Maschinen erstreckte sich vom Modellbau über die Holzbearbeitung bis hin zur Metallzerspanung. FVK-Bauteile besitzen jedoch abweichende Anforderungen, insbesondere an die Spanguterfassung, als Bauteile aus konventionellen Werkstoffen. Zudem standen Absaugsysteme für die FVK-Zerspanung bisher nicht im Fokus der Forschung, sodass grundlegende Kenntnisse für deren Auslegung fehlen. Folglich zeigen viele industriell eingesetzte Bearbeitungsmaschinen Defizite hinsichtlich Effektivität und Effizienz der Absaugmaßnahmen (Schneider et al. 2018). In der vorliegenden Arbeit wird daher diese Problemstellung aufgegriffen: grundlegende Untersuchungen sowie die methodische und wissensbasierte Optimierung von ausgewählten Absaugsystemen leisten so einen Beitrag zur Verbesserung der Spanguterfassung in der CFK-Zerspanung.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Der Stand der Technik (Kapitel 2) belegt, dass sich bis dato nur sehr wenige Forschungsarbeiten mit der Absaugung des Spanguts bei der Trockenbearbeitung von CFK auseinandergesetzt haben. Grundlagenwissen zum entstehenden Spangut in Bezug auf die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform ist nur unvollständig vorhanden. So beschäftigten sich bisher die meisten Arbeiten mit den grundlegenden Untersuchungen zur Spanbildung im Orthogonalschnitt. Der Spangutauswurf in der CFK-Zerspanung wurde bisher nicht beforscht. Analogien sind am ehesten im Bereich der Holzbearbeitung zu finden, wobei die Partikel dort im Allgemeinen wesentlich größer ausfallen, die Schnittgeschwindigkeiten in einem höheren Bereich liegen und die Werkzeuge andere Durchmesser und Geometrien aufweisen, was die Auswurfgeschwindigkeit und -kinematik verändert. Forschungsarbeiten zu Absaugsystemen können ebenfalls aus der Branche der Holzbearbeitung übertragen werden, bei der der Abtransport der Späne und die Erfassung der Feinstäube seit jeher eine zentrale Rolle einnimmt. Jedoch befassen sich hier die Autoren primär mit der Absaugung im Bereich der (3-Achs-) Plattenbearbeitung oder der Zerspanung von Balken oder Profilstäben. CFK-Bauteile weisen jedoch meist eine komplexe 3D-Gestalt auf und erfordern folglich differenzierte Ansätze. Somit kann auch in diesem Bereich ein großer Forschungsbedarf aufgezeigt werden. Das in vorliegender Arbeit verfolgte *Primärziel ist es daher, die Spanguterfassung bei der CFK-Zerspanung zu verbessern und hierfür notwendiges Grundlagenwissen, vor allem im Bereich des Spanguts und des Spangutauswurfs, zu erschließen.*

Getrieben durch steigende Energiepreise und dem gesellschaftspolitischen Ziel der Reduzierung von CO₂-Emissionen durch eine Minderung des Energieverbrauchs *kann die Effizienzsteigerung der Spanguterfassung als ein weiteres Ziel definiert werden.* Konkrete Zahlen zum Energieverbrauch der Absaugung in der spanenden Fertigung von CFK-Bauteilen liegen nicht vor, jedoch legen Studien der Holz- und Kunststoffbearbeitung (Wirtschaftsministerium BW et al. 1999; Lachenmayr et al.

2006) einen bedeutenden Anteil am Gesamtenergieverbrauch des Herstellungsprozesses nahe.

Abgeleitet aus diesen Zielstellungen lässt sich die übergeordnete Forschungsfrage wie folgt formulieren: *Wie kann die Erfassungsrate des Spanguts bei der spanenden Trockenbearbeitung von CFK erhöht und der Energiebedarf der Absaugsysteme gesenkt werden?* Der Lösungsweg zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

1.3 Aufbau der Arbeit

CFK ist seit langem ein etablierter Werkstoff in der Luft- und Raumfahrt, der in den letzten beiden Jahrzehnten vermehrt Einzug in die Breite der Industrie fand (Schneider et al. 2012; Siebenpfeiffer 2014). Zur mechanischen Bearbeitung von CFK-Bauteilen in der Industrie existieren keine aktuellen Studien. Hier kann lediglich auf die Erhebung von *Schneider et al (2012)* verwiesen werden. Für die angestrebte praxisgerechte Optimierung der Absaugsysteme für die CFK-Zerspanung wird daher zunächst eine Analyse der in der Industrie eingesetzten Bearbeitungsmaschinen, Absaugsysteme und der zu bearbeitenden Werkstücke durchgeführt, um die Zielstellung zu fokussieren. Hierbei werden die Absaugsysteme hinsichtlich Effektivität und Energiebedarf beurteilt sowie die Anforderungen und Randbedingungen an die Spanguterfassung ermittelt.

Anschließend erfolgt eine theoretische Betrachtung des Absaugvorgangs, um relevante Einflussgrößen zur Optimierung der Spangutabsaugung zu identifizieren. In experimentellen Untersuchungen werden das Spangut und dessen Auswurf durch das Werkzeug unter Anwendung verschiedener Prozess-, Werkstoff- und Werkzeugparameter systematisch analysiert.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden Gestaltungsrichtlinien für eine effektive und effiziente Spanguterfassung aufgestellt. Auf Seiten des Zerspanprozesses kann die Spanguterfassung durch einen geeigneten

Spangutauswurf verbessert werden. Hierzu werden unterschiedliche technologische Ansätze analysiert und bewertet. Als Hilfsmittel für die anschließende Optimierung exemplarischer Absaugsysteme wird zunächst ein Simulationsmodell des Spangutauswurfs und des Partikelflugs entwickelt und validiert. Den Abschluss der Arbeit bilden die Entwicklung, Optimierung und Validierung neuer Ansätze zur Raumabsaugung, Kopfabsaugung und Absaugung durch die Spannvorrichtung sowie deren Bewertung.

Den Ablauf der vorgestellten Arbeitspakete zeigt Abbildung 1-2.

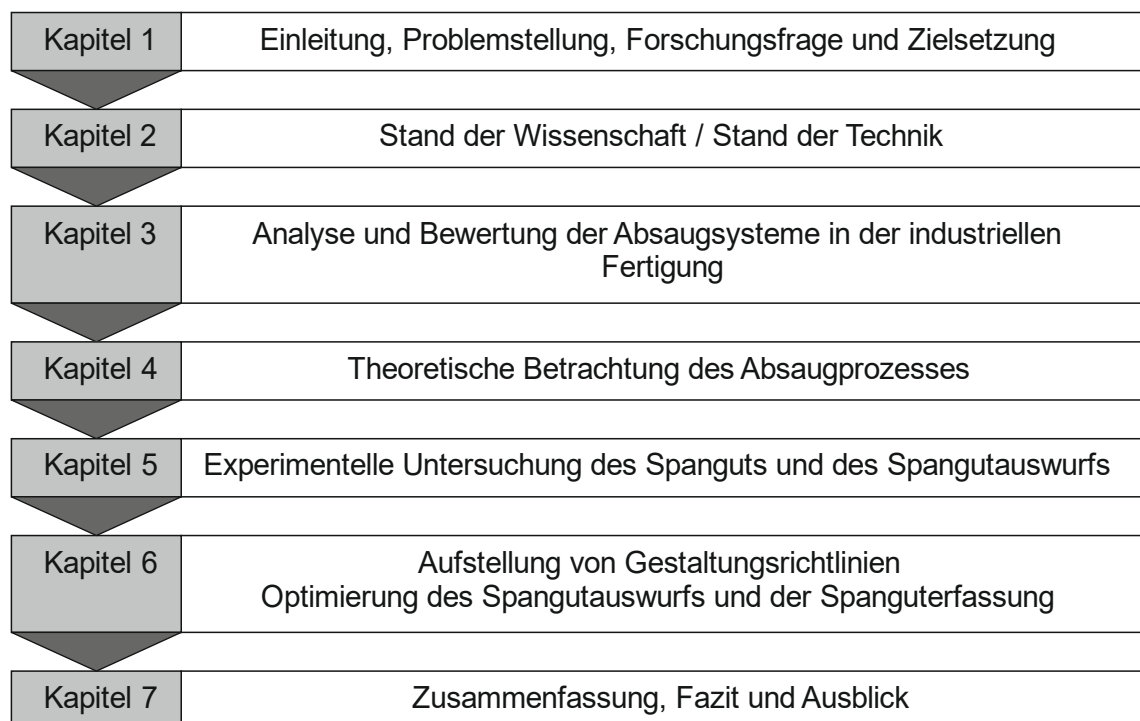


Abbildung 1-2: Gliederung der Arbeit

1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Die wissenschaftliche Positionierung der vorliegenden Arbeit erfolgt nach *Brinkmann* (1997) und *Popper* (2005). Aufgrund des hohen Praxisbezugs und der empirisch geprägten Vorgehensweise kann sie der erkenntnistheoretischen Grundposition des *Wissenschaftlichen Realismus* zugeordnet werden.

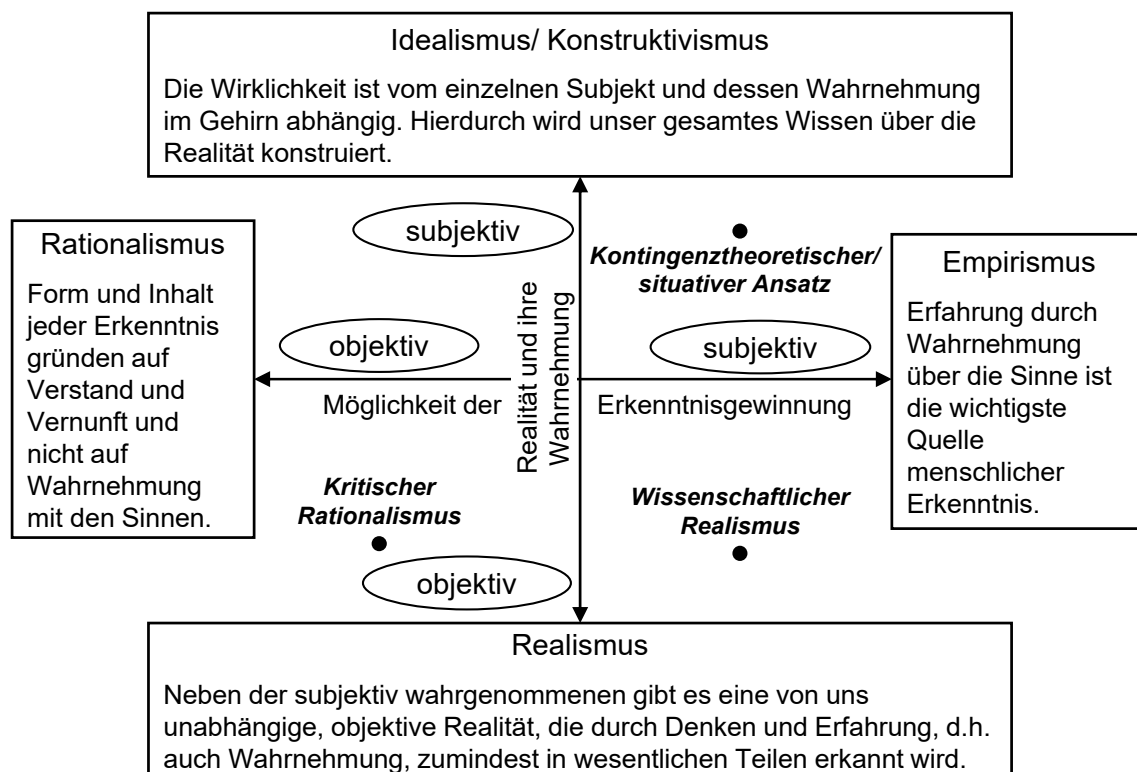


Abbildung 1-3: Erkenntnistheoretische Grundpositionen nach *Singer et al.*(2002) und *Töpfer* (2010)

Der wissenschaftliche Realismus akzeptiert eine subjektiv wahrgenommene, aber auch eine objektiv akzeptierte Realität (Töpfer 2010). Er basiert auf der Einschätzung wissenschaftlicher Theorien und deren empirischer Überprüfung zur Generierung von Erkenntnisgewinn (Eisend et al. 2017). Nach *Hunt* (2010) umfasst der wissenschaftliche Realismus vier Ansätze: *Klassischer Realismus*, *Induktiver Realismus*, *Fehlbarer Realismus* und *Kritischer Realismus* (Abbildung 1-4):

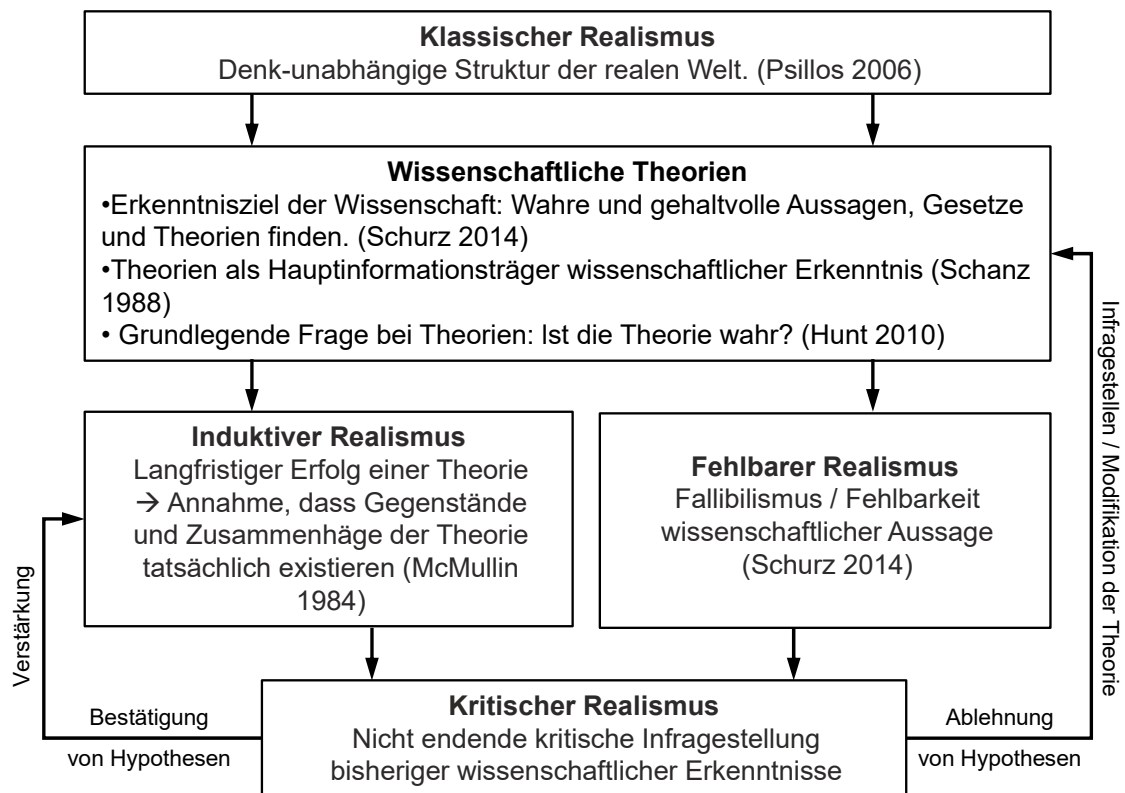


Abbildung 1-4: Merkmale des wissenschaftlichen Realismus in schematischer Darstellung nach Hunt (2010); Eisend et al. (2017)

Im Bereich der Wissenschaftssystematik kann die Einteilung nach Ulrich et al. (1976) herangezogen werden (Abbildung 1-5). Die vorliegende Arbeit befasst sich mit aktuellen Problemen der industriellen Produktion und hat einen hohen Praxisbezug. Sie kann eindeutig den *Realwissenschaften* zugeordnet werden und ist primär im Bereich der *angewandten Handlungswissenschaften* anzusiedeln. Aspekte der theoretischen Erörterung, der experimentellen Validierung und der numerischen Simulation können jedoch auch den *Grundlagenwissenschaften* und den *Formalwissenschaft* zugeschrieben werden.

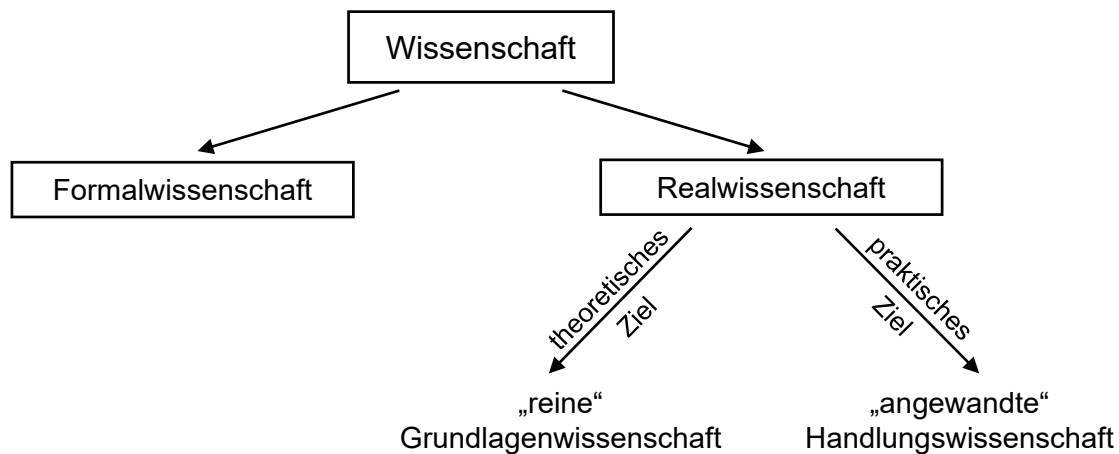


Abbildung 1-5: Wissenschaftssystematik nach Ulrich et al. (1976)

Der Lösungsweg dieser Arbeit orientiert sich an der forschungsmethodischen Vorgehensweise (*Forschungsprozess*) für anwendungsorientierte Wissenschaft nach Ulrich (2001), die den Praxisbezug in den Vordergrund stellt und folgende Voraussetzungen hat:

- Das Forschungsvorhaben muss von vornherein auf in der Praxis festgestellte Problemsituationen hin ausgerichtet sein.
- Eine Hauptaufgabe muss in der Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs liegen.
- Die postulierten Regeln und Modelle müssen auch im Anwendungszusammenhang auf ihre Konsequenzen hin geprüft werden.

Um diesen Forderungen gerecht zu werden, liegt ein Schwerpunkt der Arbeit auf der ausführlichen Analyse der Ist-Situation in der Industrie. Zudem werden die experimentellen Untersuchungen praxisnah durchgeführt und die gewonnenen Erkenntnisse an einem industrienahen Bauteil validiert.

2 Stand der Technik und Forschung

In Kapitel 2.1 werden die Grundlagen zum Aufbau von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen vermittelt. Diese ermöglichen ein Verständnis der Bruchmechanik und daraus abgeleitet der Spanbildung. Anschließend erfolgt ein Überblick relevanter Forschungsarbeiten zu Staub- und Partikelanalysen in der spanenden Bearbeitung, die klar den Forschungsbedarf offenlegt. Das Kapitel schließt mit einer Gefährdungsbeurteilung von CFK-Stäuben.

Kapitel 2.2 befasst sich der Absaugtechnik und stellt den Stand der Technik sowie Forschungsarbeiten vor. Zudem werden Untersuchungen zum Spangutauswurf durch das Werkzeug und Möglichkeiten zur Lenkung und Beeinflussung des Spangutstrahls zusammengefasst. Abschließend werden relevante Forschungsarbeiten zur Simulation der Absaugtechnik in Werkzeugmaschinen diskutiert, bevor ein Fazit zum Stand der Technik und Forschung gezogen und die Aufgabenstellung konkretisiert werden.

2.1 Faserverstärkte Kunststoffe, CFK

2.1.1 Aufbau und Eigenschaften

Verbundwerkstoffe sind zumindest aus zwei heterogenen Phasen aufgebaut, die makroskopisch einen homogenen Stoff bilden. Gängige Klassifizierungen unterteilen Verbundwerkstoffe in Partikelverbundwerkstoffe, Faserverbundwerkstoffe und Schichtverbundwerkstoffe, während ergänzend Durchdringungsverbundwerkstoffe und Oberflächenbeschichtungen genannt werden (Zeilinger 1985; Schulte 1992; Czichos et al. 2012).

Faserverbundwerkstoffe sind aus verstärkenden und/oder versteifenden Fasern und einer umgebenden Matrix aufgebaut. Dieser Aufbau folgt einem bionischen Prinzip, das aus dem Aufbau von Holz und Knochen abgeleitet ist: Die Fasern, als lasttragende Phasen, werden hierbei primär entlang der Hauptkraftflussrichtung orientiert, während die Matrix die formgebende, stabilisierende Phase bildet (Menges et al. 1988). Der Matrixwerkstoff kann hierbei zu einer weiteren Unterteilung in Polymer Matrix Composites (PMC), Metal Matrix Composites (MMC) und Ceramic Matrix Composites (CMC) herangezogen werden (Czichos et al. 2012). Im Bereich der PMC haben sich kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) aufgrund der exzellenten mechanischen Eigenschaften in vielen Branchen etabliert (Siebenpfeiffer 2014). Neben der sehr hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit von CFK sind als weitere Vorteile die hohe Dauerfestigkeit, die guten Dämpfungseigenschaften und die große Formgebungsfreiheit zu nennen (Biermann et al. 2008). Eine Gegenüberstellung alternativer Faserverbundwerkstoffe und gängiger Leichtmetalle zeigt das Potenzial von CFK anhand der *spezifischen Festigkeit* und *Steifigkeit* in der nachfolgenden Grafik.

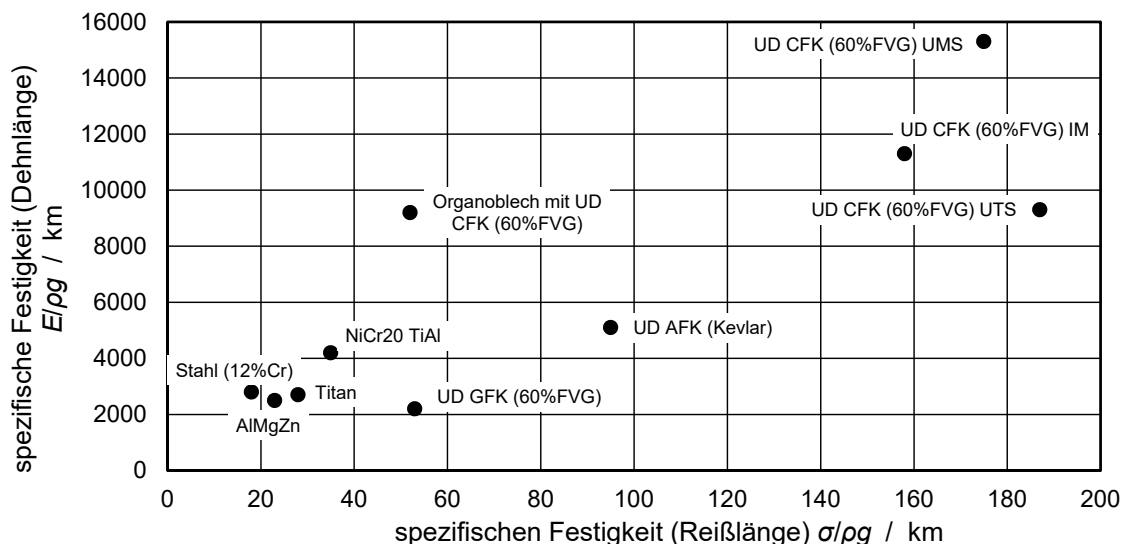


Abbildung 2-1: Vergleich der spezifischen Festigkeit (Reißlänge) und spezifischen Steifigkeit (Dehnlänge) verschiedener Leichtbauwerkstoffe nach Wiedemann (2022)

Basis für die erwähnten mechanischen Eigenschaften bildet die hochfeste und hochsteife Kohlenstofffaser, die sich neben einer hoher Temperaturbeständigkeit,

einer geringen Bruchdehnung und der sehr guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit vor allem dadurch ausgezeichnet, dass die Kombination aus Festigkeit und Steifigkeit im Herstellungsprozess anwendungsbezogen beeinflusst werden kann (Freundenberg 2011; Arendts et al. 1992). So werden Kohlenstofffasern in hochfeste (HAT/HST), hochmodulige (HM/UHM) oder intermediate (IM) Fasern eingeteilt, wobei eine Vielzahl an Varianten bekannt sind (Wulfhorst 1989; Michaeli et al. 1989).

Als Matrixwerkstoffe werden sowohl duroplastische als auch thermoplastische Polymere industriell eingesetzt. Die Matrizen fixieren die Fasern in der gewünschten Form, übertragen Kräfte in die Fasern und zwischen den Fasern und stützen diese bei Druck- oder Scherbelastungen. Des Weiteren schützen sie die Fasern vor Umgebungsmedien (Heißler 1986; Schulte 1992; Roos et al. 2011).

Duroplastische Polymere (auch Duromere genannt) härten in einer dreidimensionalen, irreversiblen chemischen Vernetzungsreaktion durch Aktivierung mittels Wärme, Druck oder Strahlung aus und sind danach nicht mehr plastifizierbar (Domininghaus et al. 2005; Menges 2011). Aufgrund des geringeren Materialpreises und der vergleichsweise hohen Warmfestigkeit werden überwiegend Duroplaste für FVK eingesetzt (Schürmann 2007).

Thermoplaste Polymere (auch Thermoplaste genannt) erweichen bei Wärmezufuhr und werden plastifizierbar. Dieser Umstand ermöglicht schnelle Formgebungs- und Fügeprozesse sowie eine gewisse Recyclierbarkeit, weshalb thermoplastische Faserverbundwerkstoffe in der Serienfertigung vor allem in den Fokus der Automobilindustrie gerückt sind (Arendts et al. 1992; AVK 2010; Cherif 2011). Bedingt durch diese Materialeigenschaft werden jedoch, im Vergleich zu Duroplasten, geringere Festigkeiten und Warmfestigkeiten erreicht. Nachteilig ist auch die vorhandene Kriechneigung unter Dauerbelastung. Dem gegenüber stehen wesentlich bessere Eigenschaften hinsichtlich Bruchdehnung, Schlagzähigkeit und Druckfestigkeit (Menges et al. 1988; Schürmann 2007).

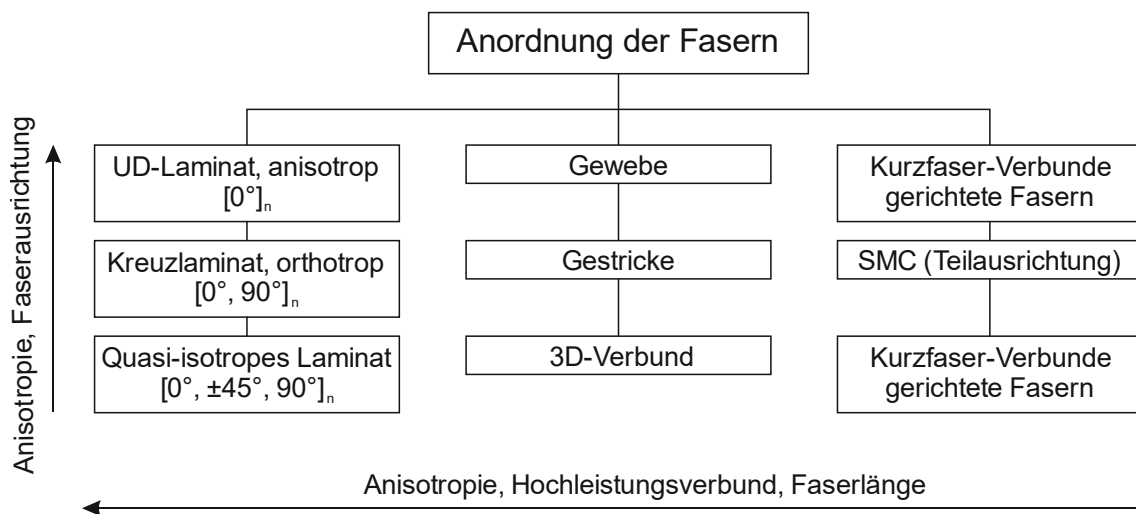


Abbildung 2-2: Anisotropie in Abhängigkeit der Faseranordnung nach *Schulte* (1992)

Neben der Auswahl der Fasern und des Matrixwerkstoffs, werden die mechanischen Eigenschaften des Faserverbunds maßgeblich durch dessen Faserarchitektur und der damit verbundenen Anisotropie des Verbundwerkstoffs bestimmt. Einflussgrößen sind der Faservolumengehalt, die Art der Faserverstärkung (Kurz-, Lang- oder Endlosfaserverstärkung) sowie die Ausrichtung der Fasern (Abbildung 2-2). Für die Herstellung hochbeanspruchter Bauteile wird heute typischerweise ein Schichtaufbau aus Endlosfasern in Form von Gelegen oder Geweben eingesetzt (Arendts et al. 1992; Czichos et al. 2012). Beispiele hierfür sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

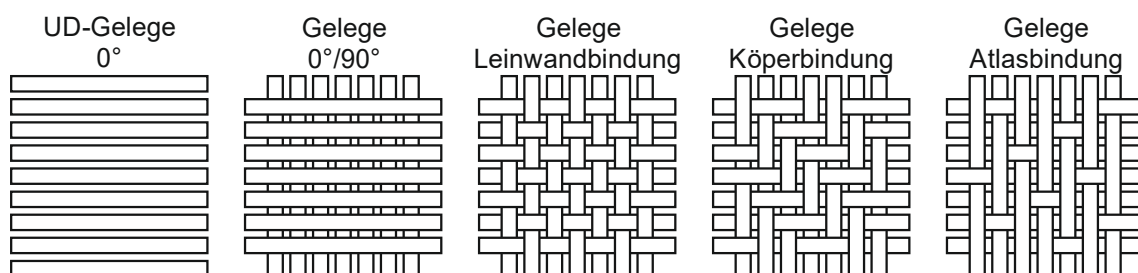


Abbildung 2-3: Typische Faserarchitekturen von 2-D-Bauteilen nach *Kowtsch et al.* (2011)

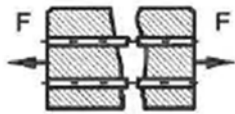
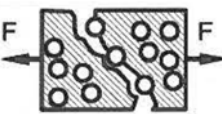
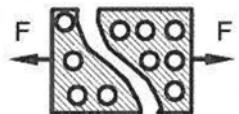
Unidirektional- (UD) Gelege mit einer Faserausrichtung bieten die bestmögliche Ausnutzung der Fasereigenschaften bei eindimensionalen Belastungen. Kräfte senkrecht zur Faserorientierung werden jedoch nur durch den Matrixwerkstoff getragen (Schürmann 2007). Gewebe sind definiert als zwei rechtwinklig zueinander orientierte Faserstränge, die sich in Kreuzungspunkten überschneiden.

Die Art des Geleges wird durch den Abstand und das Muster der Kreuzungspunkte festgelegt. Diese haben maßgeblich Einfluss auf die Festigkeit des Verbundwerkstoffs, sowie die Drapierbarkeit des Gewebes (Kowtsch et al. 2011).

2.1.2 Spanbildung

Die Zerspannung von CFK wird von den Werkstoffeigenschaften des Faserverbundwerkstoffs bestimmt, die sich vor allem aufgrund der Anisotropie, der Inhomogenität und der fehlenden plastischen Verformbarkeit stark von denen isotroper metallischer Werkstoffe unterscheiden. So ist die Spanbildung duroplastischer CFK überwiegend von Bruch- und Rissmechanismen geprägt (Rummenhöller 1996; Sheikh-Ahmad 2009; Zemann 2014). Die zugrundeliegenden Versagensmechanismen basieren auf Mikroschäden (Faserbruch oder Matrixriss im Bereich von ca. 10 μm), die – wie in Tabelle 2-1 dargestellt - zu größeren Makroschäden in Form von Faserbruch oder Zwischenfaserbruch führen (Puck 1996; Schürmann 2007).

Tabelle 2-1: Versagensformen für CFK-Werkstoffe nach Puck (1996) und Schürmann (2007)

Faserbruch	Zwischenfaserbruch	
	Grenzflächenbruch	Matrixbruch
		

Faserbruch erfolgt primär durch Normalspannungen in Form von Zug-, Druck- oder Biegespannungen mit einer Rissfläche senkrecht zur Faserachse (Becker 1991; Rummenhöller 1996). Schubspannungen führen in der Regel zu keinen Faserbrüchen durch Scherung, sondern verursachen überwiegend Zwischenfaserbrüche (Schürmann 2007).

Zwischenfaserbrüche treten aufgrund der niedrigeren Festigkeit der Matrix im Vergleich zur Verstärkungsfaser häufiger als Faserbrüche auf (Puck 1996; Ehrenstein 2006). Die Bruchfläche liegt parallel zu den Faserachsen entlang der Faser-Matrix-Grenzfläche (Grenzflächenbruch) oder im Matrixwerkstoff (Matrixbruch). Zwischenfaserbrüche werden durch Lastfälle längs zur Faserorientierung (Längsschub) oder quer zur Faserorientierung (Querzug, Querdruck oder Querschub) erzeugt (Puck 1996; Rummenhöller 1996; Schürmann 2007). Ein Sonderfall der Zwischenfaserbrüche stellt die Delamination dar, die eine Trennung einzelner Laminatschichten bezeichnet (Puck 1996; Hartmann 2012).

Die beschriebenen Versagensmechanismen in der unidirektionalen Faserorientierung treten auch in den Einzelschichten eines multidirektionalen Faserverbundes auf. Im Verbund ist jedoch zusätzlich das Risswachstum zwischen den Einzelschichten zu beachten (Schütte 2014).

Grundsätzlich lassen sich die Versagensmechanismen auf den Zerspanvorgang übertragen. Durch die in der Zerspanung auftretenden mehrachsigen Beanspruchungen und abweichenden Belastungsarten hinsichtlich Belastungsgeschwindigkeit und Kraftereinleitung kommt es zu einer komplexen Überlagerung der Versagensmechanismen (Schütte 2014).

In diversen Untersuchungen des Zerspanprozesses wird vor allem der Faserorientierung ein maßgeblicher Einfluss auf die Spannbildung und die erzeugte Schnittkante attestiert (Koplev et al. 1980; Koplev et al. 1983; Reimann 1991; Wang et al. 1995; Voß et al. 2014). Aus Studien zum Orthogonalschnitt von FVK stammt die Definition des Faserorientierungswinkels Φ , der den Winkel zwischen Vorschubrichtung und Faserrichtung in mathematisch positiver Richtung beschreibt. Bei nichtlinearen Schnittbewegungen, etwa dem Fräsen oder Bohren, tritt eine zyklische Änderung des Schneideneingriffswinkels relativ zur Faserrichtung auf, die durch den Faserorientierungswinkel nicht berücksichtigt wird. Eine Erweiterung stellt deshalb der Fasertrennwinkel θ dar, der aus der Schnitttrichtung und der

Faserorientierung bestimmt wird (Hohensee 1992; Rummenhöller 1996). Eine Gegenüberstellung der beiden Winkeldefinitionen und den wechselnden Fasertrennwinkeln beim Umfangfrasen zeigt nachfolgende Abbildung.

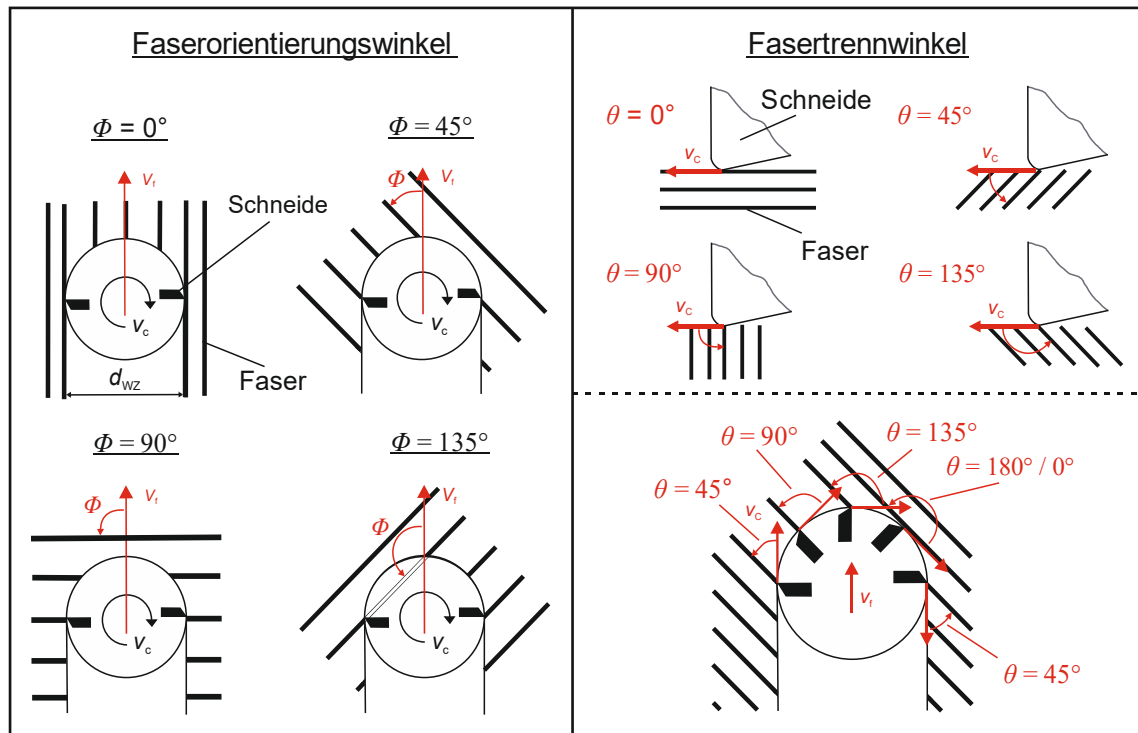


Abbildung 2-4: Faserorientierungswinkel und Fasertrennwinkel nach Hartmann (2012)

Abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren und den Schneidstoffen bzw. Beschichtungen ergeben sich unterschiedliche Radien an den Werkzeugschneiden, die jedoch in der Regel größer als der Faserdurchmesser sind. Dies gilt insbesondere mit zunehmendem Schneidkantenverschlei. Es kommt somit nicht zu einem Abscheren der Kohlenstofffaser, sondern zu einem Bruchversagen, hervorgerufen durch Zug-, Druck- und Biegespannungen (Purslow 1988; Reimann 1991; Hohensee 1992). Aufgrund der höheren Festigkeit der Fasern versagt der Verbundwerkstoff überwiegend im Bereich der mechanisch schwächeren Matrix. Hierbei entstehen viele Einzelbr uche, hervorgerufen durch die kombinierten Belastungen (Koplev et al. 1980; Reimann 1991; Arola et al. 1996).

Rummenhöller (1996) definierte fünf Zerspanungsmechanismen, deren Auftreten er vier Fasertrennwinkel, bzw. Fasertrennwinkelbereiche zuordnete. Diese vier Bereiche sind in Abbildung 2-5 dargestellt und werden nachfolgend näher erläutert.

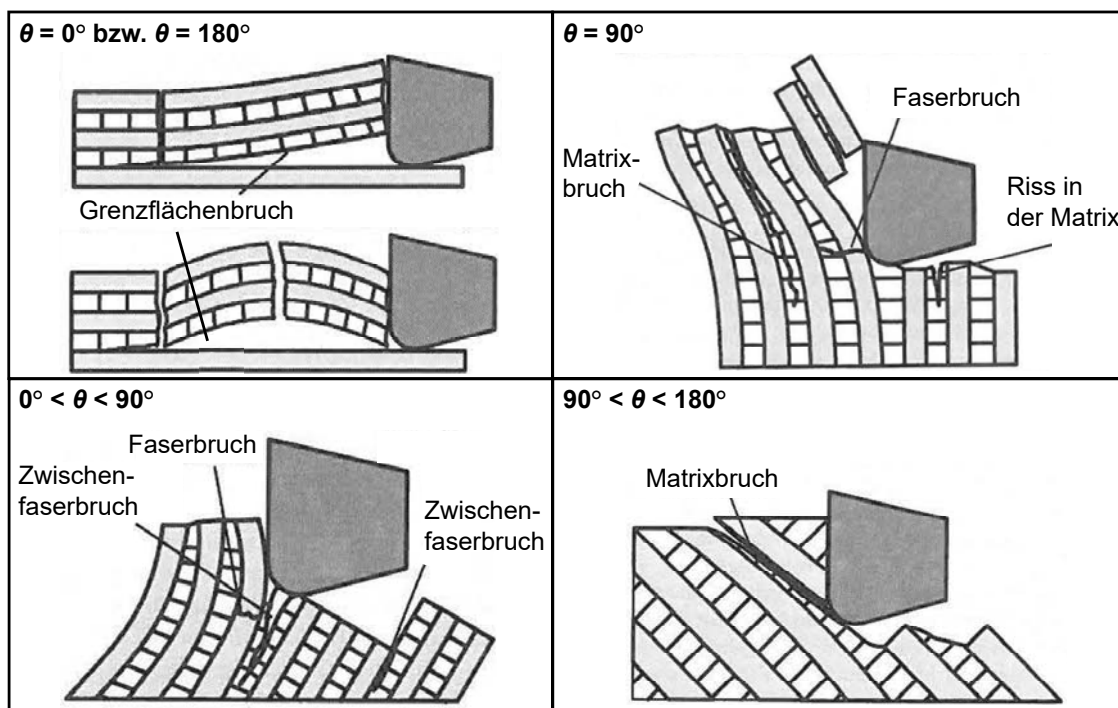


Abbildung 2-5: Zerspanungsmechanismen für unterschiedliche Fasertrennwinkel nach Rummenhöller (1996)

Fasertrennwinkel $\theta = 0^\circ$ bzw. $\theta = 180^\circ$

Bei einem Fasertrennwinkel von $\theta = 0^\circ$ bzw. $\theta = 180^\circ$ liegen die Fasern parallel zur Schnitttrichtung. Der Verbundwerkstoff wird durch die Spanfläche gestaucht, was zu vorseilenden Druckspannungen und Schubspannungen zwischen den Faserlagen oberhalb und unterhalb der Schneidebene führt (Rummenhöller 1996; Girot et al. 2009; Calzada et al. 2012). In Abhängigkeit vom Spanwinkel werden zwei Versagensfälle beschrieben: Bei Spanwinkeln $\theta \leq 0^\circ$ tritt ein Ausknicken der Fasern nach den Eulerschen Knickf allen 3 oder 4 auf. Dieses Ph anomenverst arkt sich mit größeren Schneidkantenradien bzw. zunehmendem Schneidkantenverschlei  (Wang et al. 1995; Xu et al. 2016). Das Ausknicken bewirkt multiple Brücke der

Fasern bzw. ganzer Faserpakete, bevorzugt an den Scheitelpunkten des Deformationszustandes.

Positive Spanwinkel und kleine Schneidradien führen zu einem Abschälen der Faser nach dem Eulerschen Knickfall 1. Die Fasern werden hierbei über die Spanfläche kontinuierlich hochgebogen, bis der sich verkleinernde Radius am Scheitelpunkt das kritische Minimum erreicht und die Fasern aufgrund von Biegespannungen brechen (Rummenhüller 1996).

Beiden Versagensfällen ist gemein, dass der Faserbruch deutlich vor dem Schneidkeil auftritt. Aufgrund der kontinuierlich aufstauenden und brechenden Fasern herrscht eine hohe Prozessdynamik. Die erzeugten Bruchstücke sind zusammenhängend und in Relation zu den anderen Zerspanungsmechanismen, vergleichsweise groß (Arola et al. 1996; Rummenhüller 1996). *Koplev et al.* (1983) beschreiben die Partikelform als regelmäßig mit rechteckigem Querschnitt, während *Rummenhüller* (1996) im Fall des Abschälens primär langgestreckte Bruchstücke feststellte. Unabhängig von der Versagensart werden hohe Oberflächengüten bei einer geringen Werkzeugbelastung erzeugt (Rummenhüller 1996).

Fasertrennwinkel $\theta = 90^\circ$

Bei einem Fasertrennwinkel von $\theta = 90^\circ$ trifft die Schneide senkrecht zur Faserorientierung auf den Verbund. Der Schneidkeil erzeugt hierbei eine Stauchung, die zu interlaminarem Matrix- und Grenzflächenversagen und zu Schub- und Biegespannungen in den Fasern führt (Rummenhüller 1996). Die Belastungen führen zu einem Brechen der Fasern und zu einem Risswachstum parallel zur Vorschubrichtung bis zur nächsten intakten Faser. Trifft der Riss auf eine Matrix- oder Grenzflächenschädigung, wird ein Partikel abgetrennt (Rummenhüller 1996). *Koplev et al.* (1983) beschreibt diese Partikel als weniger regelmäßig als die unter einem Fasertrennwinkel von $\theta = 0^\circ$ auftretenden. Nach *Rummenhüller* (1996) bilden sich überwiegend kleine bis sehr kleine Partikel, bestehend aus Matrix-Faserpartikeln, Einzelfasern und Faserbruchstücken. Untersuchung von *Arola et al.*

(1996) bestätigen diesen Eindruck. Des Weiteren weisen sie für den Fasertrennwinkel $\theta = 90^\circ$ die kleinsten Partikel aller Fasertrennwinkel nach.

Fasertrennwinkel $0^\circ < \theta < 90^\circ$

In diesem Fasertrennwinkelbereich kommt es zu einer komplexen Spanbildung durch die Überlagerung der Trennmechanismen der zwei bereits beschriebenen Fasertrennwinkel (Arola et al. 1996). Mit zunehmendem Fasertrennwinkel überlagert die Biegebelastung die Druckbelastung der Fasern und es kommt zu einem Faserbruch durch Biegung und Scherung in Verbindung mit Zwischenfaserbrüchen (Bhatnagar et al. 1995; Girot et al. 2009). Durch die fehlende Abstützung der Fasern in Richtung der Oberfläche gleitet die Schneide unter die Fasern und es kommt zu einem Ausreißen größerer Partikel in Verbindung mit einer zerklüfteten Oberfläche und einer sehr großer Oberflächenrauheit (Girot et al. 2009). Die resultierende Spandicke ist hierbei größer als die Zustellung, da das Werkstoffversagen unterhalb der Schnittebene stattfindet (Sheikh-Ahmad 2009).

Fasertrennwinkel $90^\circ < \theta < 180^\circ$

Im Fasertrennwinkelbereich $90^\circ < \theta < 180^\circ$ liegen die Fasern zunehmend in Schnittrichtung, wodurch sie besser abgestützt werden (Wang et al. 1995). Der Schneidkeil belastet die Fasern quer zur ihrer Achse, was zu Faserbrüchen führt. Schubbelastungen in der Matrix führen anschließend zu Zwischenfaserbrüchen und dem Abgleiten der abgetrennten Schicht (Rummenhüller 1996) in Form größerer, blockartiger Spanpakete (Bhatnagar et al. 1995; Lopresto et al. 2016). Rummenhüller (1996) bescheinigt für diese Winkelbereich gemeinsam mit dem Fasertrennwinkel $\theta = 0^\circ$ die größten Partikel. Die Spanbildung kann als deutlich vorteilhafter als für Fasertrennwinkel $0^\circ < \theta < 90^\circ$ angesehen werden (Bhatnagar et al. 1995). Die erzeugten Schnittflächen weisen eine geringe Oberflächenrauigkeit auf (Wang et al. 1995).

Die fünf beschriebenen Zerspanungsmechanismen (Abbildung 2-5) lassen sich von UD-Schichten auch auf multidirektionale Schichten übertragen. Jedoch erfolgt damit auch eine Überlagerung der Mechanismen, da parallel immer mehrere Zerspanungsmechanismen durchlaufen werden (Ramulu 1997). Dies bewirkt eine verbesserte Abstützung der Einzelschichten, in Verbindung mit geringeren Schäden im Laminat und der Bildung größerer Spänen (Sheikh-Ahmad 2009).

Die elastischen Werkstoffeigenschaften von CFK führen zu einer Verformung durch den Schneideneingriff, insbesondere für zunehmende Schneidkantenradien (Kaneeda 1991; Hohensee 1992; Hartmann 2012). Hierdurch kommt es zu Abweichungen der realen zur nominellen Spandicke, wie in Abbildung 2-6 dargestellt und in Extremfällen zu einem Ausweichen des Werkstoffs ohne Spanabtrag (Rummenhüller 1996; Schütte 2014; Lopresto et al. 2016). Für Fasertrennwinkel im Bereich $0^\circ < \theta < 90^\circ$ beträgt die Tiefe des sich verformenden und wieder zurückfedernden Werkstoffs etwa den Schneidenradius, während dieser Wert für Fasertrennwinkel im Bereich $90^\circ < \theta < 180^\circ$ mehr als das Zweifache des Schneidenradius betragen kann (Wang et al. 2003).

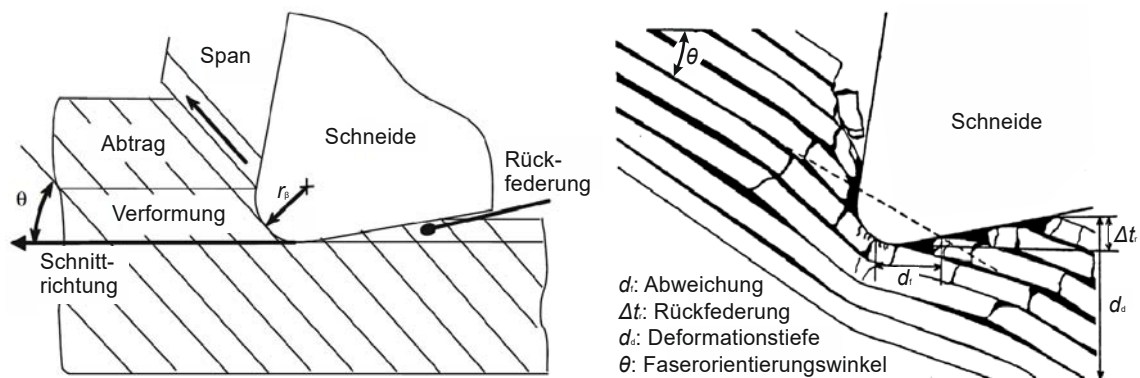


Abbildung 2-6: Spanbildung unter Berücksichtigung des Schneidkantenradius nach *Sheikh-Ahmad* (2009) (links); Deformations- und Rückfederzone nach *Kaneeda* (1991) (rechts)

Die im Orthogonalschnitt mit scharfer Schneide erörterten Zerspanungsmechanismen ändern sich mit zunehmenden Schneidkantenradien nur unwesentlich (Wang et al. 2003). Jedoch führt die Verformung zu Schädigung tieferliegender Schichten in Form von Faserbrüchen und Zwischenfaserbrüchen. Die

Deformationstiefe steigt mit zunehmendem Schneidkantenradius und erreicht für Faserentrenwinkel von $\theta = 90^\circ$ ihr Maximum (Kaneeda 1991).

Die Analyse des bei der spanenden Bearbeitung von CFK anfallenden Spanguts stand bisher nicht im Fokus der Forschung. *Arola et al.* (1996) führten Orthogonalschnittversuche unter Variation des Span- und Freiwinkels und des Faserorientierungswinkels durch. Die dreidimensionale Vermessung der Partikel in Mikroskop- und REM-Aufnahmen diente primär der Untersuchung der bereits geschilderten Zerspanmechanismen. *Reimann* (1991) analysierte das Spangut beim Hochgeschwindigkeitsfräsen von CFK und attestiert eine Abhängigkeit der mittleren Partikelgröße von der mittleren Spandicke für $h_m < 100 \mu\text{m} \dots 150 \mu\text{m}$. Das anfallende Spangut lag in Bereich zwischen $x_{c \text{ min}} = 1 \mu\text{m} \dots 180 \mu\text{m}$. Zu beachten sind die hohen Schnittgeschwindigkeiten von $v_c = 500 \text{ m/min} \dots 5000 \text{ m/min}$ bei den durchgeführten Untersuchungen.

Mehrere Autoren untersuchten das luftgetragene Spangut mittels Staubmessgeräten. Deren Erkenntnisse sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Die meisten wissenschaftlichen Abhandlungen befassen sich mit der Abhängigkeit der Staubkonzentration von den Prozessparametern. Sie weisen nach, dass hohe Schnittgeschwindigkeiten und kleine Zahnvorschübe zu höheren Staubkonzentrationen führen.

Der Einfluss der Werkzeuggeometrie wird kontrovers diskutiert: *König et al.* (1993) bescheinigen Werkzeugen mit wenigen Zähnen und großen Spanräumen geringere Staubkonzentrationen aufgrund der geringeren Belastung des Spanguts in den Spanräumen. *Würtz* (2000) jedoch ermittelt für Werkzeuge mit mehr Schneiden und folglich kleineren Spanräumen niedrigere Staubkonzentrationen und führt dies auf den ruhigeren Lauf des mehrschneidigen Werkzeugs und so die Vermeidung von Vibrationen zurück. Gegensätzliche Ergebnisse liefern auch Untersuchungen mit unterschiedlichen Schneidkantenradien. Während *Rummenhöller* (1996) höhere Staubkonzentrationen für kleine Schneidkantenradien maß, ermittelte *Würtz* (2000) niedrigere Staubkonzentrationswerte. Einig sind sich beide Autoren beim Einfluss

des Faserorientierungswinkels: Dieser führt im Bereich $\phi = 90^\circ \dots 135^\circ$ zu den höchsten Staubkonzentrationen.

Tabelle 2-2: Einflussfaktoren auf die Staubkonzentration bei der CFK-Bearbeitung

Einflussfaktor	Ausprägung	Quelle
Schnittgeschwindigkeit	Zunahme der Schnittgeschwindigkeit führt zu höheren Staubkonzentrationen	(König et al. 1993) (Rummenhöller 1996) (Würtz 2000) (Haddad et al. 2012) (Haddad et al. 2014) (Körkel 2015) (Tölle et al. 2022)
Zahnvorschub	Verringerung des Zahnvorschubs führt zu höheren Staubkonzentrationen	(König et al. 1993) (Rummenhöller 1996) (Würtz 2000) (Haddad et al. 2012) (Haddad et al. 2014) (Körkel 2015)
Werkzeuggeometrie	Geringere Staubkonzentration für Werkzeuge mit großen Spanräumen	(König et al. 1993)
	Höhere Staubkonzentrationen für kleinere Schneidkantenradien	(Rummenhöller 1996)
	Geringere Staubkonzentration für Werkzeuge mit hoher Schneidenanzahl, kleinen Durchmesser und kleinen Schneidkantenradien	(Würtz 2000)
Faserorientierung des Werkstoffs	Höchste Staubkonzentrationen für Faserorientierungswinkel $\phi = 90^\circ \dots 135^\circ$	(Rummenhöller 1996) (Würtz 2000)
Schneidstoff	Kein Einfluss des Schneidstoffs bzw. der Beschichtung	(Haddad et al. 2014) (Rummenhöller 1996)

Haddad et al. (2014) und *Rummenhöller* (1996) untersuchten verschiedene Schneidstoffe, bzw. Beschichtungen auf ihre Auswirkung auf die Staubkonzentration, konnten hierbei jedoch keinen signifikanten Einfluss feststellen. Unterschiede in den Staubkonzentrationswerten der Versuchsreihen führten sie auf die unterschiedlichen Schneidkantenradien der Werkzeuge zurück.

2.1.3 Gefährdungen durch CFK-Stäube

Die Einteilung des bei der Zerspaltung entstehenden Spanguts in Späne- und Staubfraktionen wird nach VDI 3462 (2014) anhand des aerodynamischen Durchmessers d_{ae} vorgenommen. Dieser Wert beschreibt die Größe eines sphärischen Vergleichspartikels der Dichte $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ mit derselben Sinkgeschwindigkeit wie der betrachtete Partikel. Definitionsgemäß sind Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $d_{ae} > 0,5 \text{ mm}$ als Späne klassifiziert (VDI 3462). Als Staub gelten Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $d_{ae} < 0,5 \text{ mm}$, die als disperse Verteilung in einem gasförmigen Medium vorliegen. So wird Staub, ebenso wie Rauche und Nebel, den Aerosolen zugeordnet (MAK 2014; DIN ISO 7708).

Staubpartikel werden primär über die Atemwege in den menschlichen Körper aufgenommen. Dabei können sie, entsprechend ihrer geometrischen Ausprägungen, die Rückhaltebarrieren durchdringen und unterschiedlich tief in den menschlichen Atemtrakt aspiriert werden. Sie werden unterteilt in *einatembarer Anteil* (E-Fraktion), *thoraxialgängiger Anteil* (T-Fraktion) und *alveolengängiger Anteil* (A-Fraktion). Teile des eingeatmeten Staubes verbleiben in den jeweiligen Partien des Atemtraktes. Dieser wird *total deponierter Staub* genannt (MAK 2014). Eine Einteilung in die drei Partikelklassen, sowie die Anteile an deponiertem Staub sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

Deponierte Partikel können von körpereigenen Reinigungsmechanismen entfernt oder zersetzt werden (Costabel et al. 1988). Um Überladungseffekte der Reinigungsmechanismen und damit verbundene Gefährdungen für den Menschen zu vermeiden, wurden durch den Gesetzgeber Grenzwerte für die zulässigen Partikelkonzentrationen festgelegt (Oberdörster 1995). Für die in CFK enthaltenen Bestandteile existieren derzeit keine spezifischen Grenzwerte, sodass die allgemeinen Staubgrenzwerte nach (TRGS900 2022) herangezogen werden müssen (DGUV 2014). Diese betragen für die A-Fraktion $1,25 \text{ mg/m}^3$ und für die E-Fraktion 10 mg/m^3 . Die Verschärfung dieser Grenzwerte in den Jahren 2001 und 2014 zeigt

jedoch die Sensibilisierung des Gesetzgebers hinsichtlich der Staubexposition am Arbeitsplatz. Dies ist sicherlich auch darauf zurückzuführen, dass Luftverschmutzung die umweltbedingte Haupttodesursache in der EU ist (Lim et al. 2012; WHO 2014).

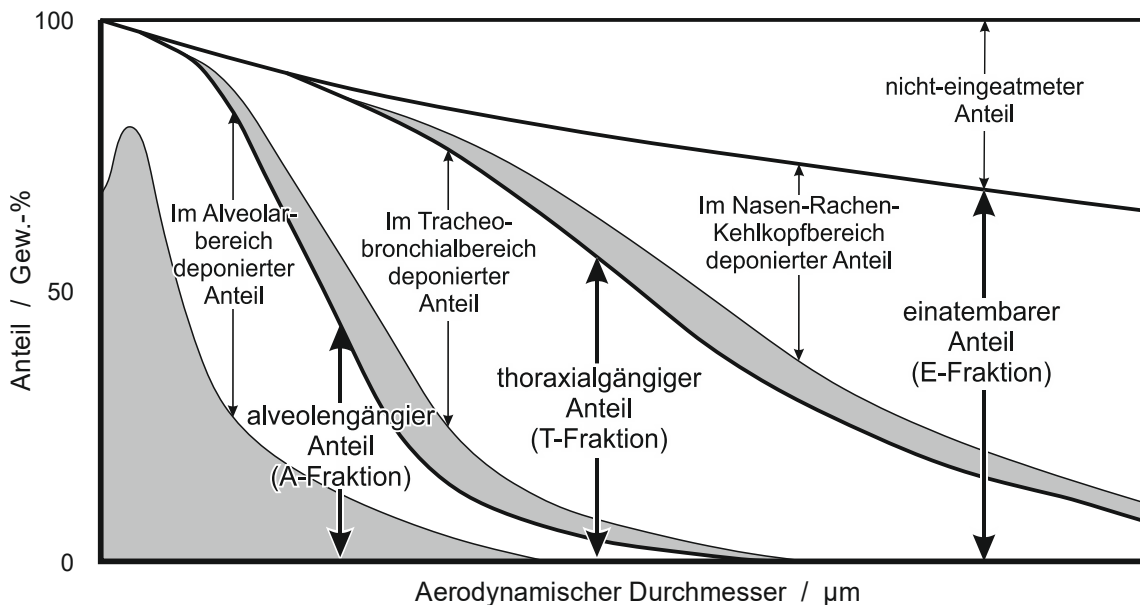


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der arbeitsmedizinisch-toxikologisch relevanten Anteile des Aerosols in den Atmungsorganen nach MAK (2014)

Neben der Bildung von granulären Stäuben kommt es bei der Zerspannung von CFK ebenfalls zur Entstehung von Faserstäuben (BGIA 2008). Analog zu der Definition von Stäuben werden Faserstäube als disperse Verteilung von organischen oder anorganischen Fasern in gasförmigen Stoffen bezeichnet (DIN ISO 7708; MAK 2014). Die Gefährdung durch Faserstäube grenzt sich insofern von der Gefährdung durch granuläre Stäube ab, als dass sie durch ein eingeschränktes Abbauverhalten eine kanzerogene Wirkung erzielen können. Dies gilt insbesondere für biobeständige, langgestreckte Fasern, die aufgrund ihres geringen Durchmessers noch bis in die Alveolen respiriert werden können (Pott et al. 1993; Blome 2006). Diese kritischen Abmessungen werden zumeist mit einer Länge $L > 5 \mu\text{m}$, einem Durchmesser $d < 3 \mu\text{m}$ und einem Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis $L/d > 3 : 1$ angegeben (Mangelsdorf 1993; TRGS 521). Die Kanzerogenität einer Faser in Abhängigkeit ihrer Abmessungen und Biobeständigkeit sind in der nachfolgenden Grafik aufgezeigt.

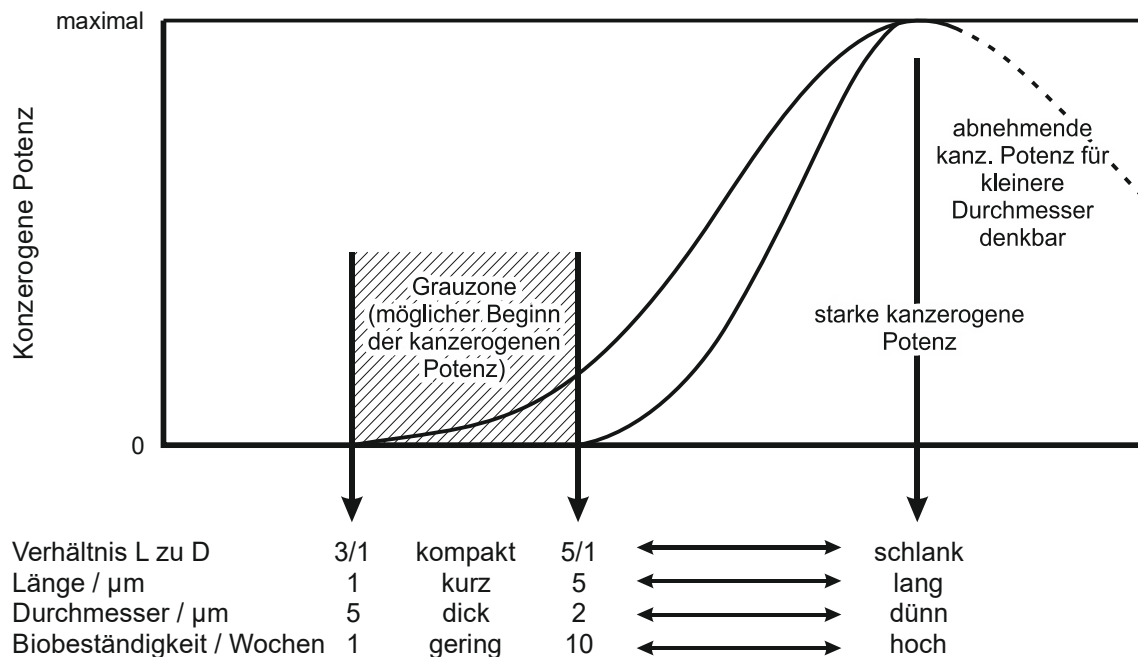


Abbildung 2-8: Kanzerogene Potenz einer Faser in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften nach Pott et al. (1993)

Kohlenstofffasern liegen mit Durchmessern von typischerweise $d = 6 \dots 8 \mu\text{m}$ deutlich außerhalb dieser kritischen Abmessungen. Obwohl ein Aufspießen der Fasern wie bei Asbest oder Aramid bisher nicht festgestellt wurde, konnten Fasern dieser Abmessungen bei Zerspanoperationen von CFK nachgewiesen werden (Boatman et al. 1988; BGIA 2008; DGUV 2014). Die Faserkonzentrationen lagen bei diesen Studien jedoch in einem sehr niedrigen Bereich. Für Aufsehen sorgte eine Studie aus dem Jahr 2019 von Bäger et al. (2019), die hohe Faserkonzentrationen bei der Zerspannung von CFK aus Pech-basierten Kohlenstofffasern nachwies. Die Autoren führten das kritische Bruchverhalten der Pech-basierten Kohlenstofffasern auf die höhere Kristallinität im Vergleich zu den bisher untersuchten PAN-basierten Kohlenstofffasern zurück.

In den Jahren 2014 und 2015 wurden Untersuchungen zum Einfluss von Brandereignissen auf die Eigenschaften und Abmessungen von Kohlenstofffasern durchgeführt (Eibl et al. 2014; Loibl et al. 2015). Die Autoren konnten eine Durchmesserabnahme der Kohlenstofffasern auf $d < 3 \mu\text{m}$ nachweisen. Jedoch waren hierfür sehr hohe Temperaturen von mehr als 600°C sowie eine Einwirkzeit von mehreren Minuten notwendig. Zwar wurden bei der Zerspannung von

Temperaturen am Werkzeug im Bereich von 200°C – 320 °C nachgewiesen (Hintze et al. 2012; Sadek et al. 2012; Babenko et al. 2017; Hintze 2021), jedoch beschränkt sich die Kontaktzeit zwischen Werkzeug und CFK-Werkstoff auf wenige Millisekunden, sodass eine signifikante thermische Einflussnahme auf die Kohlenstofffaser ausgeschlossen werden kann.

Die kanzerogene Potenz von Kohlenstofffasern wird in der Fachliteratur kontrovers diskutiert (Pott et al. 1993). Während für viele Faserarten die Frage der Biobeständigkeit geklärt scheint, fehlen allgemein anerkannte Studien für die C-Faser (Purslow 1988; Luchtel et al. 1989; Pott et al. 1993; Gandhi et al. 1998). Als Orientierungshilfe empfiehlt die *Berufsgenossenschaft Holz und Metall* in der *DGUV-Richtlinie FB-HM 74* (DGUV 2014) die Grenzwerte nach TRGS 521 (2008) einzuhalten, die derzeit 50.000 Fasern/m³ betragen.

Neben einer Gefährdung durch Einatmen geht von CFK-Stäuben eine Gefahr durch Brand- und Explosionsereignisse aus (DGUV 2014). Eine allgemeingültige Aussage zum Brand-, bzw. Explosionsverhalten von CFK in der spanenden Fertigung ist nicht zu treffen. Auf der einen Seite weist im Regelfall ein wesentlicher Anteil des Spanguts einen Durchmesser $d < 500 \mu\text{m}$ auf und fällt somit in die Kategorie „potenziell explosionsfähig“ (DGUV 2021). Auf der anderen Seite existieren eine Fülle an unterschiedlichen Fasertypen und Schichten, Matrixwerkstoffen, Additiven und Füllstoffen, sodass jeder CFK-Werkstoff einzeln betrachtet werden müsste. Hinweise zur Gefährdungsbeurteilung bietet die *GESTIS-STAUB-EX-Datenbank* der *Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V.* (DGUV). Diese ordnen alle untersuchten CFK-Proben (Stand August 2022) in die Staubexplosionsklasse 1 ein. Die Staubexplosionsklasse ist ein Maß für die Reaktivität einer Staubprobe (Stahmer 2015). Somit sind CFK-Stäube ähnlich zu betrachten wie die meisten Holzstäube, die ebenfalls unter die Staubexplosionsklasse 1 fallen.

CFK-Partikel stellen ein Risiko für technische Anlagen dar (Königsreuther 2017). Neben einem erhöhten Verschleiß von Führungen und Lager durch die harten und abrasivwirkenden Kohlenstofffaserbestandteile im CFK-Spangut, ist die hohe elektrische Leitfähigkeit dieser Fasern ein Risiko für elektrische und elektronische Baugruppen (Herdegen 2014; Hintze 2021). Schäden werden durch Kurzschlüsse und Spannungsüberschläge bis hin zu Schaltschrankbränden verursacht. Besonders gefährdet sind hierbei Antriebe für Motoren (Herdegen 2014). Für den Schutz dieser Baugruppen sowie zur Kapselung von Schaltschränken wurden deshalb eigens Schutzeinrichtungen entwickelt (Pöhler et al. 2017).

2.2 Erfassung des Spanguts bei der spanenden Bearbeitung

2.2.1 Absauganlagen für stationäre Bearbeitungsmaschinen

Absauganlagen dienen der Erfassung des Spanguts oder zumindest der luftgetragenen Partikel, um diese lokal abzuscheiden und das eingesetzte gasförmige Medium in einem ausreichenden Maß zu reinigen. Nach *Dressler (2007)* müssen sie folgende Grundanforderungen erfüllen:

- Optimale Spanguterfassung
- Geringe Luftgeschwindigkeit
- Verschleißresistenz
- Optimale Abstimmung Werkzeug/Haube
- Geringe Kosten
- Variabilität

Die Leistungsaufnahme P_{el} von Absauganlagen wird anhand der Gesamtdruckdifferenz Δp , dem Volumenstrom Q und dem Wirkungsgrad des Ventilators η wie folgt berechnet:

$$P_{el} = \frac{\Delta p \cdot Q}{\eta}$$

Formel 2-1

Absauganlagen können nach *Tech et al. (2003)* in Entstauber, Einzel-, Zentral- und Gruppenabsauganlagen unterteilt werden (Abbildung 2-9).

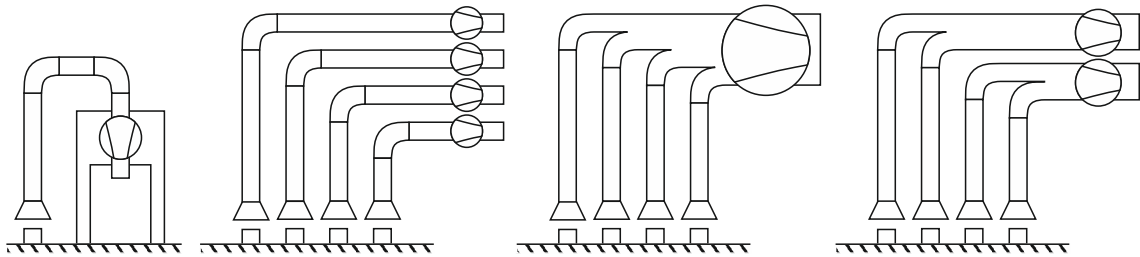


Abbildung 2-9: Unterschiedliche Arten von Absauganlagen nach *Tech et al.* (2003) (von links nach rechts: Entstauber, Einzelabsaugung, Zentralabsaugung, Gruppenabsaugung)

Bei Entstaubern handelt es sich um Kompaktgeräte, die die Baugruppen Ventilator, Filtereinheit und Sammeleinrichtung in einem Gehäuse vereinen. Entstauber werden in der Regel als dezentrale Anlagen direkt an der Bearbeitungsmaschine aufgestellt und können durch eine Änderung der *EN 16770* (2018) bis Leistungsklassen von $8.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgeführt werden. Einzelabsaugungen verfügen über jeweils einen Ventilator je Absaugleitung, was eine individuelle Ansteuerung ermöglicht. Die partikelbeladene Luft wird in einem zentralen Abscheidesystem gefiltert. Bei Zentralabsaugungen werden die einzelnen Maschinen über Steigleitungen in ein zentrales Absaugrohr mit einem Ventilator verbunden. Für die Auslegung des zentralen Absaugrohrs und des Ventilators wird der maximal zu erwartende Gleichzeitigkeitsfaktor herangezogen. Gruppenabsaugungen stellen einen Kompromiss aus individueller Ansteuerung und Investitionskosten dar. In diesem Konzept werden Bearbeitungsmaschinen, die in der Regel gleichzeitig betrieben werden, zu Gruppen zusammengefasst und an eine gemeinsame Absaugung angeschlossen. So kann jede Gruppe individuell betrieben werden und stellt für sich eine Zentralabsaugung dar (*Tech et al.* 2003).

Ein neuartiges Absaugkonzept stellte die Firma *Schuko* im Jahr 2008 auf der Messe *Holz-Handwerk* vor. Bei diesem Konzept wird der Transport des abgesaugten Spannguts in der Hauptrohrleitung durch einen Kettenförderer übernommen. So kann die zur Vermeidung von Partikelablagerungen vorgeschriebene Strömungsgeschwindigkeit von $v_L = 20 \text{ m/s}$ in der Hauptleitung mittels eines drehzahlregulierten Ventilators auf die, entsprechend der laufenden Maschinen, tatsächlich benötigte Leistung gedrosselt werden (*N. N.* 2008). Mit derselben Zielstellung entwickelte die Firma *Scheuch LIGNO* ein Fördersystem mit einer

reduzierten Strömungsgeschwindigkeit in der Hauptrohrleitung und Strahldüsen zur impulsweisen Aufwirbelung sedimentierten Spanguts (Scheuch 1990).

Als weitere Entwicklungen im Bereich der Anlagentechnik sind vor allem die Umstellung von Überdruck- auf Unterdruckventilatoren und der drehzahlregelten Ventilatoren mittels Frequenzumrichter zu nennen (Tech et al. 2003).

2.2.2 Erfassungseinrichtungen an Bearbeitungsmaschinen

Westkämper et al. (1991) definieren Erfassungseinrichtungen als Teil einer Bearbeitungsmaschine, deren Ziel eine wirkungsvolle, möglichst vollständige Erfassung des Spanguts ist, ohne den Bearbeitungsprozess zu beeinträchtigen.

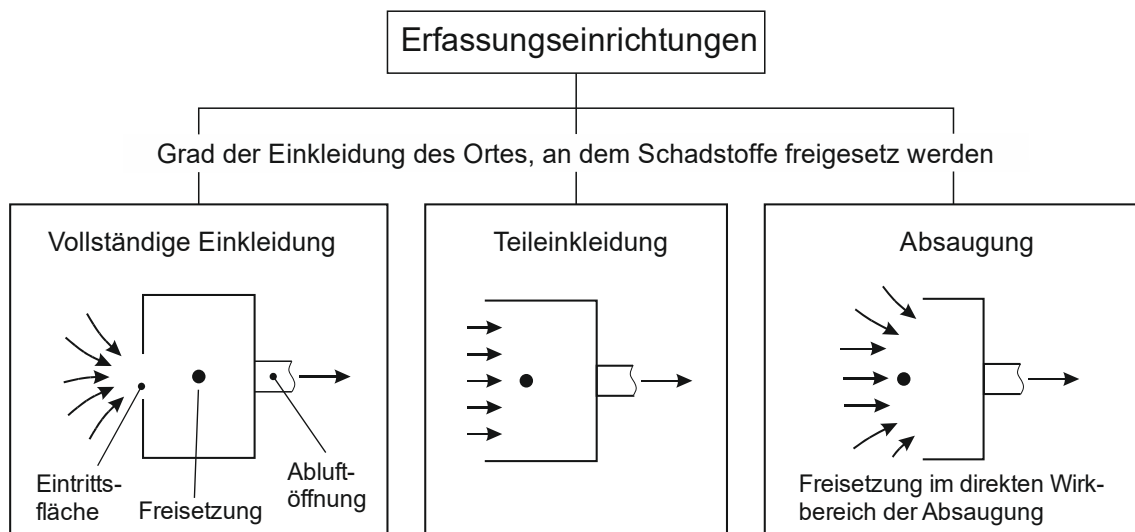


Abbildung 2-10: Erfassungseinrichtungen nach *Dittes et al.* (1987)

Sie können nach *Dittes et al.* (1987) in drei grundlegende Kategorien eingeteilt werden (Abbildung 2-10). Die vollständige Einkleidung des Freisetzungsortes in Form einer Kapselung oder Einkleidung, eine Teileinkleidung und die Absaugung des Schadstoffes unmittelbar an der Entstehungsstelle.

Eine Betrachtung der industriell genutzten Bearbeitungsmaschinen für die CFK-Zerspaltung zeigt, dass heute Spangut-Erfassungseinrichtungen aus allen drei

Kategorien Einsatz finden (Schneider et al. 2012). Diese können in vier grundlegende Arten der Spangutabfuhr unterteilt werden (Abbildung 2-11).

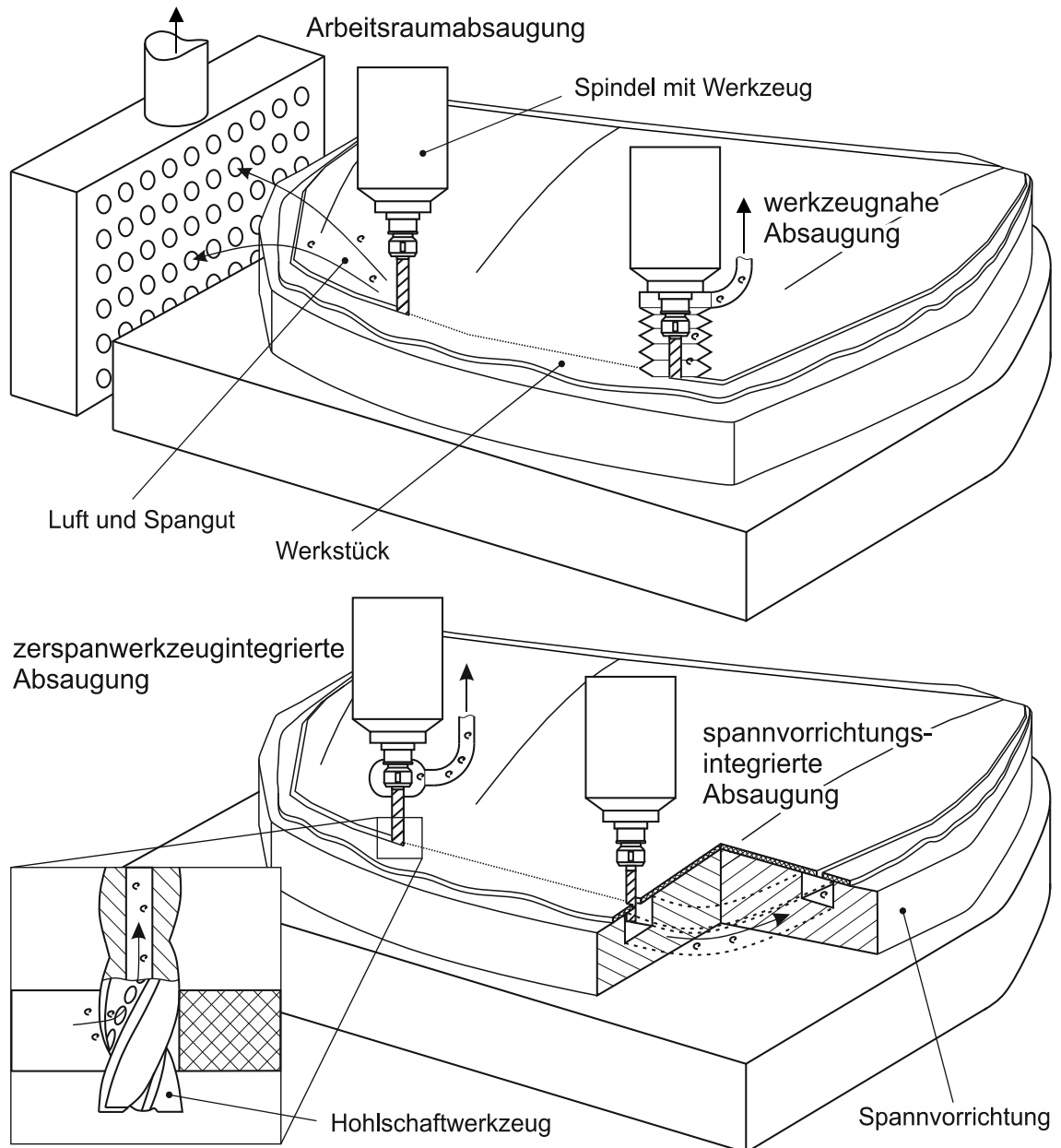


Abbildung 2-11: Spanguterfassungseinrichtungen in der CFK-Zerspanung

Die Unterteilung für Schadstofffassungseinrichtungen nach *Dittes et al.* (1987) bringt für die CFK-Zerspanung eine gewisse Unschärfe mit sich. So wird bei spannvorrichtung- und werkzeugintegrierten, sowie werkzeugnahen Spanguterfassungseinrichtungen unmittelbar am Freisetzungsort abgesaugt, jedoch

wird dieser hierbei häufig auch teileingekleidet¹. Eine genauere Klassifizierung der Erfassungseinrichtungen lässt sich anhand ihrer Relativposition vornehmen (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Klassifizierung von Erfassungssystemen

	Arbeitsraumabsaugung	spannvorrichtungsgintegrierte Absaugung	zerspanwerkzeugintegrierte Absaugung	werkzeugnahe Absaugung
Dittes et al. (1987)	Vollständige Einkleidung	Absaugung / Teileinkleidung	Absaugung / Teileinkleidung ¹	Absaugung/ Teileinkleidung
Relativposition	ortsfest zur Werkzeugmaschine		ortsfest zur Spindel	
	Fernfeld der Zerspanstelle	Nahfeld der Zerspanstelle		

Arbeitsraumabsaugungen werden an vollgekapselten Maschinen zur zentralen Entlüftung eingesetzt. Die Absaug- und Zuluftöffnungen sind hierbei in die Umhausung ortsfest integriert.

Werkzeuge mit integrierten Erfassungsöffnungen lenken das Spangut durch eine geeignete Schneidengeometrie direkt ins Werkzeuginnere, bzw. begünstigen den Spangutflug vorteilhaft, sodass die Partikel durch einen Absaugstrom durch das Werkzeug hindurch abgesaugt werden können.

Werkzeugumschließende Erfassungseinrichtung dichten die Zerspanstelle gegenüber der Umwelt lokal ab, sodass das Spangut an der Innenwand der Absaughaube abgelenkt oder abgebremst wird und/oder durch die definiert einströmende Luft erfasst wird. Die Erfassung des Spanguts im Bereich der Spannvorrichtung wird vor allem in der Serienfertigung komplexer Bauteile angewandt. Die Spanguterfassung wird hierbei über die Absaugung von Taschen und Nuten entlang der Fräsbahnen realisiert.

¹ Im Falle der werkzeugintegrierten Absaugung bilden die Spann- und die Fräsnut, abhängig von der Werkstückdicke und dem Werkzeugdurchmesser, eine Teileinkleidung aus

Nachfolgend ist der Stand der Technik in den vier Kategorien der Erfassungssysteme dargestellt. Hierbei wird auf viele Entwicklungen aus der Holzbearbeitung eingegangen, da die Problemstellung der Spanguterfassung in dieser Branche bereits seit Jahrzehnten erforscht wird.

Arbeitsraumabsaugung

Die Entlüftung vollgekapselter Bearbeitungsmaschinen mittels in der Kapselung integrierter Absaugöffnungen ermöglicht die volle Bewegungsfreiheit des Bearbeitungsaggregates ohne Einschränkungen durch Absaughauben oder das Mitführen von Schlauchleitungen. Der ausgetragene Volumenstrom sorgt für einen Unterdruck in der Kapselung und verhindert den Austritt von Emissionen. Gezielt eingebrachte Öffnungen ermöglichen eine laminare Luftströmung zur Förderung der luftgetragenen Partikel zur Absaugöffnung. Hierfür sind großflächige Absaug- und Einströmöffnungen von Vorteil. Größere Partikel werden meist nicht vom Luftstrom erfasst und sedimentieren im Arbeitsraum. Nachteilig erweisen sich die benötigten hohen Absaugvolumina sowie der unzureichende Schutz der Maschinenbaugruppen innerhalb der Kapselungen (Blecken 2004).

Forschungsarbeiten:

Heisel et al. (1998) untersuchten Möglichkeiten zur Steigerung der Spanguterfassung bei einer Senkung der Absaugleistung an Durchlaufmaschinen für die Holzbearbeitung. 2007 wurde dieses Konzept erneut von (Heisel et al. 2007b; Heisel et al. 2007a; Heisel et al. 2007c) aufgegriffen und auf 5-Achs-Bearbeitungsmaschinen zur Holzspanung übertragen (Abbildung 2-12). Beiden Vorhaben vermieden Sedimentation auf Funktionsflächen und Bauteilen mittels Blasluft und förderten das Spangut zu vorgesehenen Sedimentationsbereichen. Hierbei wurde der von *Pfeiffer* (1982) untersuchte Effekt genutzt, dass Blasluft deutlich zielgerichteter wirkt als Saugluft. Die eingesetzte Spülluft wurde aus dem

Arbeitsraum abgesaugt, wodurch ein geschlossener Kreislauf entstand und eine kostengünstige Bereitstellung der Spülluft gegeben war. Zusätzlich wurden konstruktive Optimierungen an den Bearbeitungsmaschinen umgesetzt, wie zusätzliche Abdichtungen und die Vermeidung horizontaler Flächen.

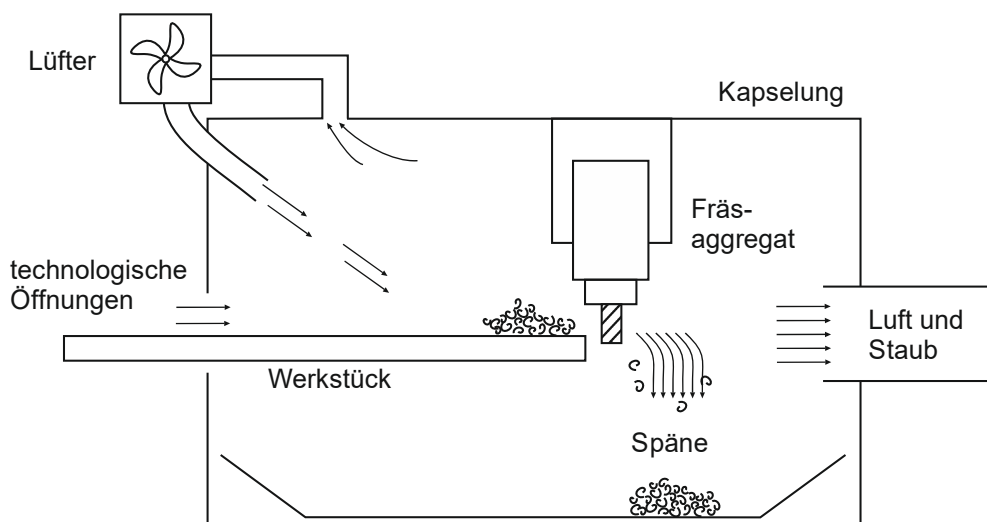


Abbildung 2-12: Funktionsprinzip der Raumentsorgung nach (Heisel et al. 2007a)

Werkzeugnahe Teilkapselungen

Werkzeugnahe Teilkapselungen sind primär an Bearbeitungsmaschinen für die Holz- und Kunststoffzerspanung vorzufinden. Bei *Stationärrmaschinen* zur Holzbearbeitung ist meist das gesamte Bearbeitungsaggregat großzügig mit einer Absaughaube umhaust, sodass alle potenziellen Werkzeuge innerhalb der Haube eingesetzt werden können. Bürstenlamellen, Lamellen aus PVC oder Schutzvorhänge nach *DIN EN ISO 19085-3* (2017) dienen zur Abdichtung am unteren Haubenrand. Zum Einrichten von Bearbeitungsprogrammen oder zur Prozessüberwachung können die Hauben in Z-Richtung verfahren werden.

Seit wenigen Jahren sind auf dem Markt spezielle Bearbeitungsmaschinen oder Erweiterungen für konventionelle Maschinen zur FVK-Zerspanung verfügbar. Neben speziellen Kapselungen der elektrischen und mechanischen Baugruppen werden für diese Maschinen oftmals auch werkzeugnahe Erfassungssysteme angeboten. Diese sind meist koaxial um das Werkzeug herum positioniert, dichten mittels

Borstenlamellen zum Werkstück hin ab und können für Werkzeugwechsel oder bei Störkonturen parallel zur Werkzeugachse verfahren werden (Abbildung 2-13).

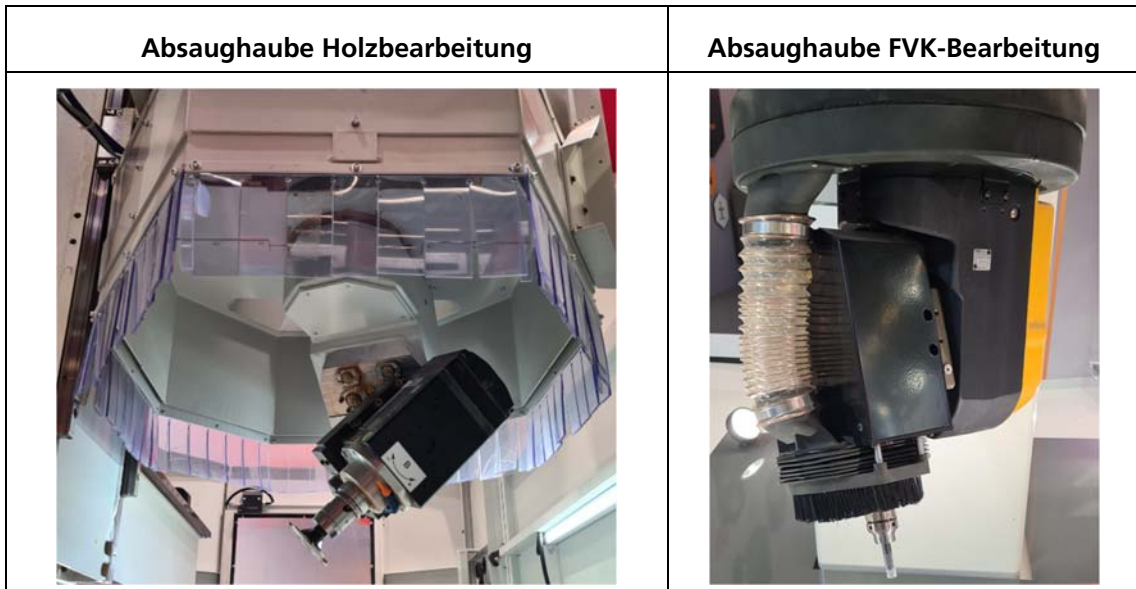


Abbildung 2-13: Typische Absaughauben bei der Holz- und FVK-Bearbeitung (links: spindelumschließend; rechts: werkzeugschließend)

Forschungsarbeiten:

In den Forschungsprojekten *MAI Span* (Beckenlechner et al. 2019) und *MAI iSpan* (Gebhardt et al. 2021) wurde der Ansatz eines HSK-Spannfutters mit integrierter Absaugglocke für die CFK-Zerspanung untersucht.

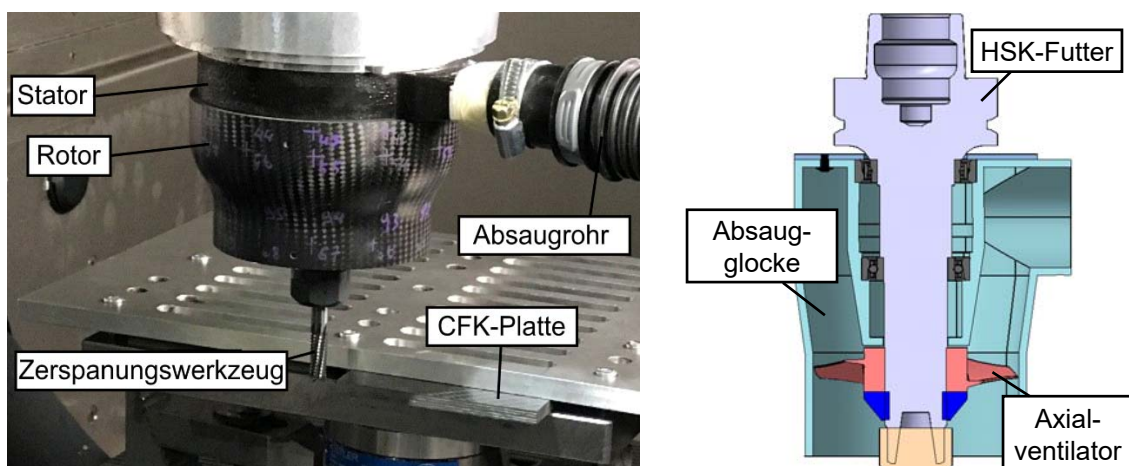


Abbildung 2-14: Werkzeugnahe Absaugung mit rotierender Glocke (links) (Beckenlechner et al. 2019); Werkzeugnahe Absaugung mit statischer Glocke (rechts) (Gebhardt et al. 2021)

Während die Absaugglocke im erstgenannten Projekt als Rotor ausgeführt war (Abbildung 2-14 links), erfolgte die Ausführung im zweitgenannten Projekt als Stator, wobei für eine zusätzliche Unterstützung der Absauganlage ein Axialventilator in dem Spannfutter montiert war (Abbildung 2-14 rechts). Die Absaugglocken zeigten sich effektiv beim Randbeschnitt zur Erfassung kleiner Partikel. So konnte deren Ablenkung und Absaugung mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Staubmessungen belegt werden.

Einen weiteren Ansatz meldeten *Geis et al.* 2012 zum Patent an (Geis et al. 2012; Hintze 2013). Das Patent sieht ein Mundstück vor, das über eine zum Fräs Werkzeug koaxiale Führung unmittelbar nach dem Werkzeug in der Fräsnut nachgeführt wird und so den Spangutstrahl des Werkzeugs erfasst und absaugt. Dieses Erfassungselement ist vor allem für den Randbeschnitt von Faserverbundwerkstoffen gedacht. *Hintze* (2013) nennt eine um 80% geringere Leistungsaufnahme im Vergleich zu einer Arbeitsraumabsaugung bei einer rückstandsfreien Spanguterfassung.

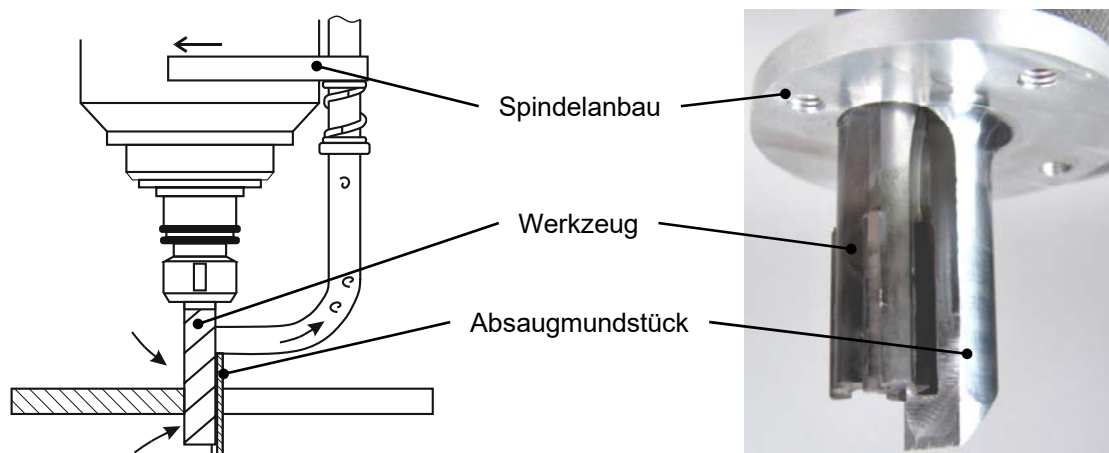


Abbildung 2-15: Erfassungseinrichtung mit nachgeführtem Mundstück nach *Geis et al.* (2012) und *Hintze* (2013)

Denner (1993) entwickelte am *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA* eine Absaughaube zur Erfassung von Stäuben und Gasen

mittels einer tornado-ähnlichen Wirbelströmung. Für die von ihm untersuchten Anwendungen, bei denen es sich um die Erfassung von Dämpfen und Rauchgasen handelte, konnte eine Verringerung der notwendigen Absaugleistung um etwa 90 % erzielt werden. *Heisel et al. (2000a)* und *Heisel et al. (2000b)* untersuchten das Potenzial dieser Wirbelsenken für die Holzbearbeitung. Experimentelle Untersuchungen an Prototypen zeigten jedoch, dass stabile Wirbelströmungen unter Realbedingungen nicht aufrechtzuerhalten sind. Des Weiteren konnten auch unter Laborbedingungen nur kleine und langsame Partikel erfasst werden.

Für die Bohrbearbeitung von Metallen entwickelten (*Heisel et al. 2001d*); (*Heisel et al. 2001a*) und *Heisel et al. (2001b)* eine Absaugvorrichtung in Form einer Federbandspirale, die das Werkzeug vollständig umgibt. Bei stirnseitigem Kontakt mit dem Werkstück verkürzt sich das Dichtelement durch die Vorschubkraft axial, sodass es die Zerspanstelle radial abdichtet. Fräsbearbeitungen mit dem Dichtelement sind prinzipiell möglich und wurden anhand des Nutens von Holz demonstriert. Da sich die Federbandspirale jedoch nicht selbstständig zurückstellen kann, ist ein vorgelagertes axiales Eintauchen in das Werkstück notwendig.

Blecken (2004) führte vielfältige Untersuchungen zur Spangutabsaugung in Bearbeitungszentren für die Holzzerspanung durch. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen entwickelte er eine Absaughaube für das 3-Achs-Fräsen (Formatieren) sowie zwei Absaughauben für das Sägen und Horizontalbohren. Die Absaughauben konnten gemeinsam mit den Zerspanwerkzeugen automatisch abgelegt, bzw. eingewechselt werden und erzielten gute Erfassungsergebnisse für das Fräsen und Bohren, während für das Sägen nur eine etwas 20%ige Verbesserung festgestellt wurde. Die Absaugleistung konnte jedoch für alle drei Absaughauben deutlich gesenkt werden (Sägen um 20 %, Fräsen um 45 %, Horizontalbohren um 70 %).

Zerspanwerkzeuginterne Absaugung

Ein erster Ansatz zur Spanguterfassung durch den Werkzeuggrundkörper wurde in den 90er Jahren durch *Fischer et al.* entwickelt und als *I-System* oder *In-Chip-Konzept* bekannt (Fischer et al. 2000; (Gittel 2000b; Oertel et al. 2001). Hierbei wird das Spangut durch eine konstruktive Ausgestaltung des Werkzeugs in dessen hohle Werkzeugkontur hineingeleitet und von dort abgesaugt. Zerspanversuche mit Holz und Holzwerkstoffen zeigten Erfassungsraten bis 98 % bei normgerechten Arbeitsplatzgrenzwerten. Industrielle Anwendung finden diese Werkzeuge heute in Durchlaufmaschinen zur Holzbearbeitung.

Bei der Zerspanung von FVK haben sich innenabgesaugte Werkzeuge bisher nur im Bereich der Bearbeitung von Flügel für Windkraftanlagen durchgesetzt, wo der Einsatz von Werkzeugen mit großen Durchmessern möglich ist (N. N. 2016). Typische Bearbeitungsaufgaben sind die Einbringung der Querbohrungen am Flansch mittels Kernlochbohrern oder das Planfräsen der Rotorblattwurzel (Abbildung 2-16).

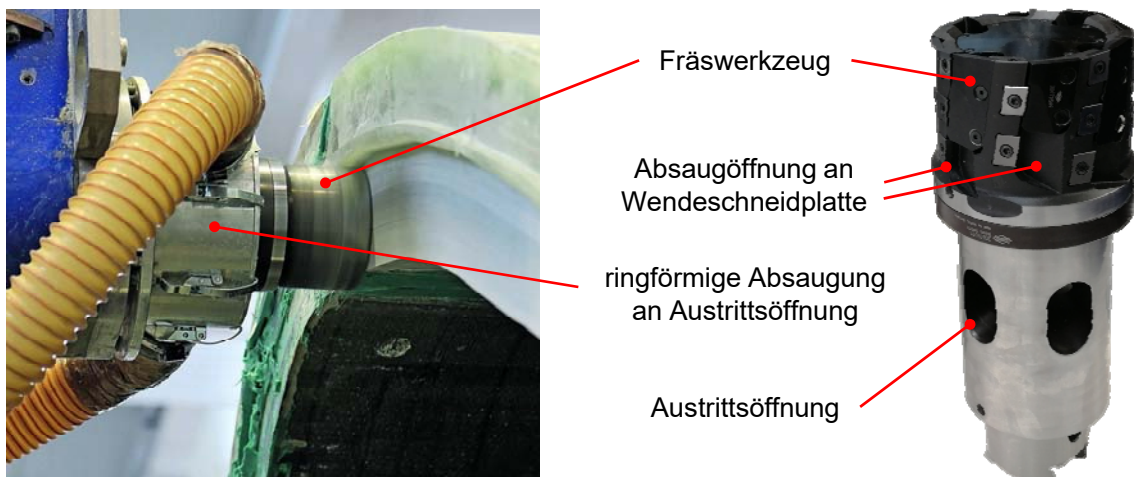


Abbildung 2-16: Innenabgesaugtes Fräs Werkzeug im Einsatz (links) (N. N. 2016) und im ausgebauten Zustand (rechts)

Die großen Werkzeugdurchmesser erlauben die Integration von Absaugkanälen und das prozesssichere Abführen des Spanguts ohne die Gefahr des Verstopfens.

Einen ähnlichen Ansatz für ein innenabgesaugtes Kronenwerkzeug entwickelten *Gauggel et al.* (2020). Die im Vergleich kleiner gestalteten Werkzeuge wurden primär für die Luftfahrt ausgelegt.

Forschungsarbeiten:

Das Konzept der inneren Werkzeugabsaugung wurde auch bei der Zerspaltung von Faserverbundwerkstoffen durch *Bilbatua* (2011), sowie der Magnesiumzerspanung durch *Essel et al.* (2006) und *Willrett* (2012) untersucht. In den beiden von der EU geförderten Projekten *Aspirate* und *SEPMEC* wurden spezielle Fräswerkzeuge mit Innenabsaugung, dazugehörigen Werkzeugaufnahmen und Motorspindeln konzipiert, um die anfallenden Späne und Stäube bei der Zerspaltung von CFK, bzw. Magnesium von der Zerspaltung direkt durch den hohlgestalteten Werkzeuggrundkörper in die Absaugung zu leiten.

Einen vergleichbaren Ansatz untersuchten *Hagino et al.* (2013) zur Erfassung des Spanguts beim Bohren von CFK. Sie erweiterten die Spindel um einen zusätzlichen Sperrluftvorhang um die Zerspaltung. Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Gestaltung des Bohrwerkzeugs, das zur Verminderung der Feinstaubanteile als spezielles Kernbohrwerkzeug ausgelegt wurde. Hierbei war die Wandstärke im Bereich der Schneiden so gewählt, dass ein exzentrischer Innenraum entstand. Dieser sorgt dafür, dass der beim Bohrvorgang innen verbleibende Werkstoff durch Druck- und Schubspannungen delaminiert und abgelöst wurde, sodass er durch den hohlen Schaft abgesaugt werden konnte. Dies ermöglichte die vollständige Absaugung des Bohrkerns, ohne ein staub- und verschleißintensives vollständiges Zerspaltung.

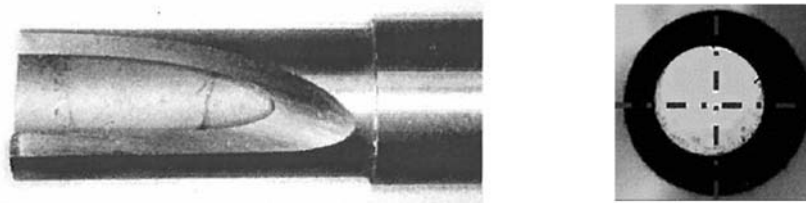


Abbildung 2-17: Kernbohrwerkzeug mit exzentrischem Kern Seitenansicht (links) und Querschnitt (rechts) nach *Hagino et al.* (2013)

Spannvorrichtungintegrierte Absaugung

Spannvorrichtungintegrierte Absaugungen sind bisher nur in der FVK-Zerspanung vorzufinden. Das Spangut wird in Kanälen oder Taschen abgesaugt, die entlang der Schnittkanten, bzw. unterhalb von Bohrungen oder Ausschnitten angeordnet sind. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2-18.

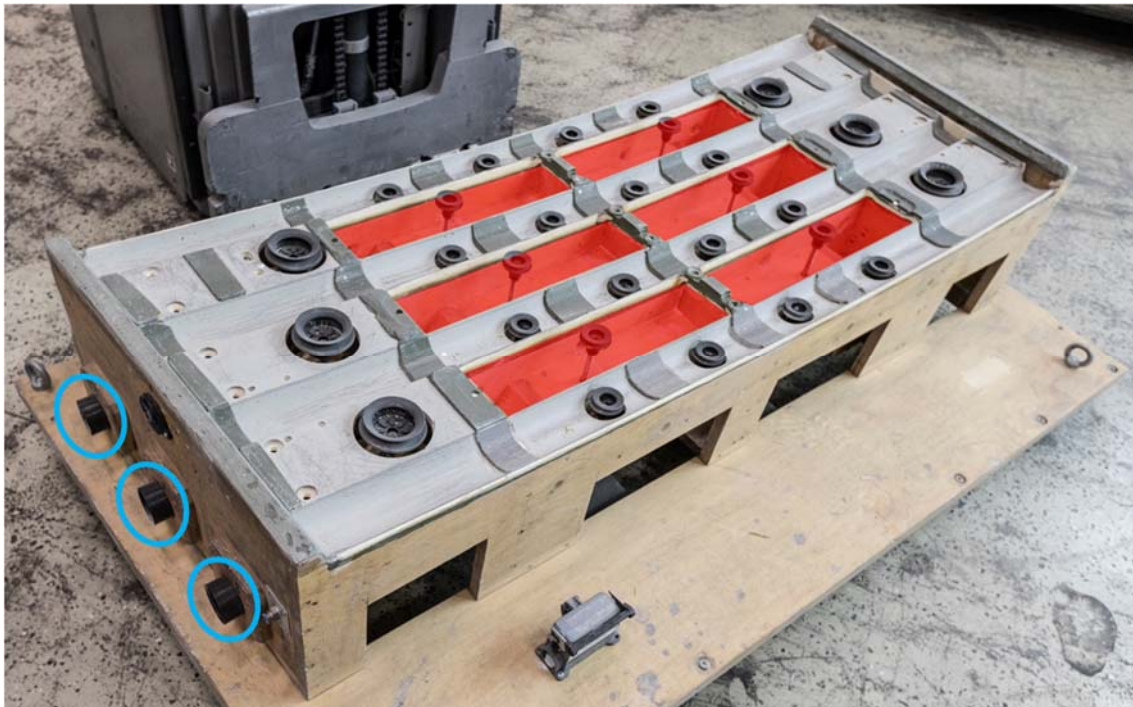


Abbildung 2-18: Spannvorrichtung mit integrierter Absaugung (rot eingefärbte Bereiche) und Stützen zum Anschluss an eine Hochvakuumabsaugung (blau markiert)

Die Integration der Absaugkanäle und Taschen und deren Fortführung in der Spannvorrichtung bis zum Anschluss der Absaugleitung stellt eine konstruktive Herausforderung dar und bedarf meist einer aufwendigen mehrseitigen Bearbeitung der Spannvorrichtung, inklusive Einkleben und Überfräsen von Abdeckungen und Einsätzen nach der Bearbeitung von Innenstrukturen.

Forschungsarbeiten:

Neue Ansätze beschäftigen sich mit dem extrusionsbasierten 3D-Druck von Spannvorrichtungen, der die Integration der komplexen Innenstrukturen mit

reduziertem Zerspan-, Handlings- und Rüstaufwand ermöglicht (Gebhardt et al. 2020).

Ein anderer Ansatz ist in der Patentschrift von *Lensing et al.* (2014) zu finden. Diese beschreibt eine das Werkstück umlaufende Absaugvorrichtung. Da es sich hierbei um eine ortsfeste Vorrichtung handelt, die relativ zur, bzw. an der Spannvorrichtung montiert ist, kann sie der Gruppe der spannvorrichtungsintegrierten Absaugungen zugeordnet werden. Die umlaufende Absaugvorrichtung kann in mehrere Abschnitte unterteilt werden, die einzeln abgesaugt werden (Abbildung 2-19). Durch eine sequenzielle Absaugung nur derjenigen Abschnitte, die dem Fräs Werkzeug am nächsten sind, soll so die Absaugleistung reduziert werden.

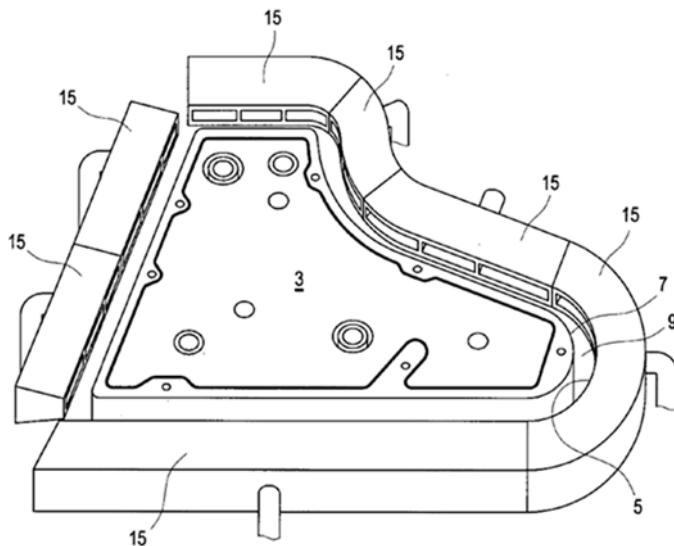
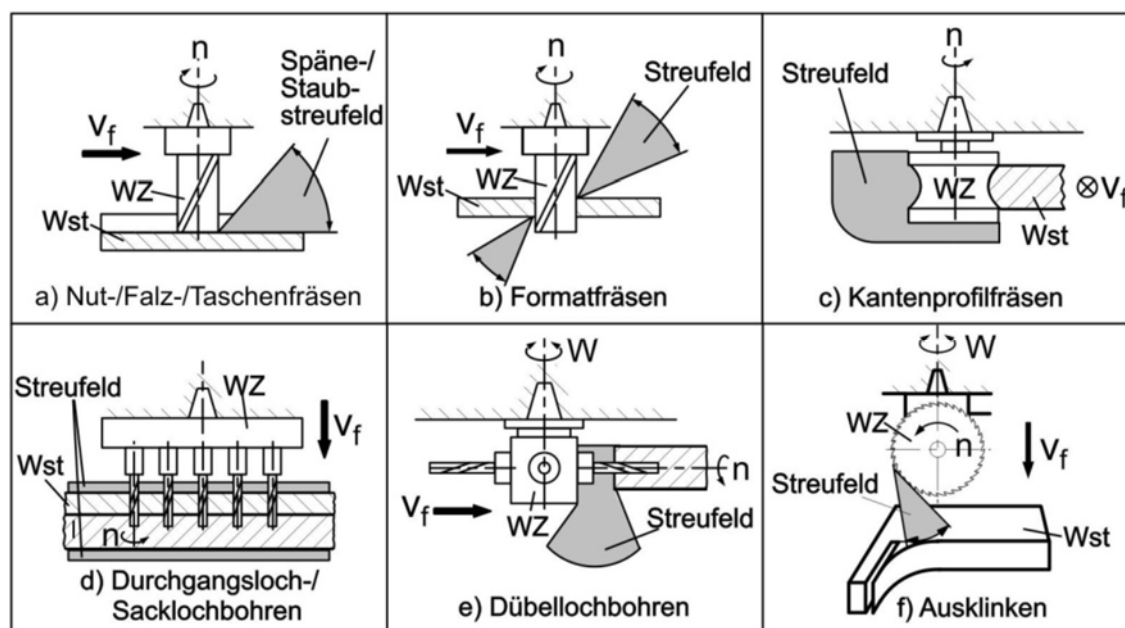


Abbildung 2-19: Patentschrift einer spannvorrichtungsintegrierten Absaugung (Lensing et al. 2014)

Einen vergleichbaren Ansatz untersuchten *Denkena et al.* (2017) am Beispiel einer Roboterfräszelle. Hierzu wurden am Maschinentisch umlaufend Absaughauben montiert, die ebenfalls entsprechend der Position des Werkzeugs abgesaugt wurden. Der Energieverbrauch konnte so um bis zu 70 % im Vergleich zu einer Arbeitsraumabsaugung gesenkt werden. Die Autoren empfehlen aber trotzdem eine zusätzliche Arbeitsraumabsaugung, um nach dem Bearbeitungsprozess einen zügigen und zielgerichteten Luftwechsel im Arbeitsraum zu ermöglichen.

2.2.3 Spangutauswurf und Lenkung des Spangutstrahls

Während der spanenden Bearbeitung wird das Spangut in Abhängigkeit der Werkzeug- und Prozessparameter ausgeworfen (Blecken 2004). Dies wird anhand beispielhafter Bearbeitungsoperationen aus der Holzbearbeitung in Abbildung 2-20 verdeutlicht.



© **WF** 422-60-00

Abbildung 2-20: Spangutauswurf für verschiedene Bearbeitungsoperationen der Holzbearbeitung (Blecken 2004)

Nach der Spanentstehung verbleibt der Span im Spanraum des Werkzeugs bis dieser nicht mehr durch das Werkstück verschlossen wird. Die Entleerung des Spanraums erfolgt zeitlich verzögert, sodass das Spangut den Spanraum über einen Winkelbereich verlässt. Die radiale Geschwindigkeit, erzeugt durch die wirkenden Zentrifugalkräfte, ist im Vergleich zur Schnittgeschwindigkeit als gering einzuschätzen, sodass trotz einer vektoriellen Addition beider Geschwindigkeitsvektoren der Auswurf näherungsweise tangential erfolgt (Barz et al. 1967).

Martynenko (2007) untersuchte den Einfluss gedrahter Schneiden auf den Spangutauswurf und erstellte ein umfangreiches Modell zur Berechnung der

Geschwindigkeitsvektoren (Abbildung 2-21). Hierbei berücksichtigte er, neben den beschriebenen Zentrifugalkräften (F_{ZF}) und der Schnittgeschwindigkeit, auch die Gewichtskraft (G) sowie die Reibkräfte zwischen dem Spanpartikel und dem Werkstück (F_{R1}) sowie zwischen dem Spanpartikel und dem Werkzeug (F_{R2}), welche wesentliche Einflussfaktoren auf die Axialbeschleunigung sind.

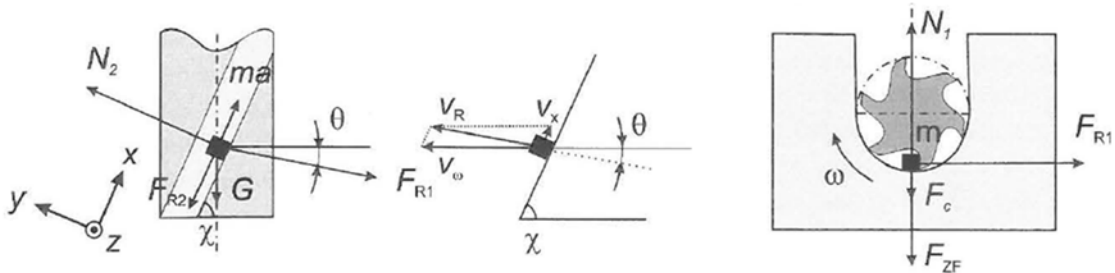


Abbildung 2-21: Modellierung der auf ein Spanpartikel wirkenden Kräfte nach Martynenko (2007)

In Abhängigkeit der Werkzeuggröße und Geometrie sowie Randbedingungen, wie Absaughauben und umgebende Luftströmungen, induziert das Werkzeug Strömungsfelder, die den Spangutauswurf beeinflussen können (Westkämper et al. 1995). Dies wird am Beispiel eines Holzfräsers mit Durchmesser $d = 140$ mm und großen Spannuten in Abbildung 2-22 verdeutlicht. Das näherungsweise tangentielle Strömungsfeld, das durch Eigenventilation des Werkzeugs erzeugt wird, überlagert die Richtungsvektoren des Spangutauswurfes und lenkt das Spangut auf degressiv gekrümmte Flugbahnen.

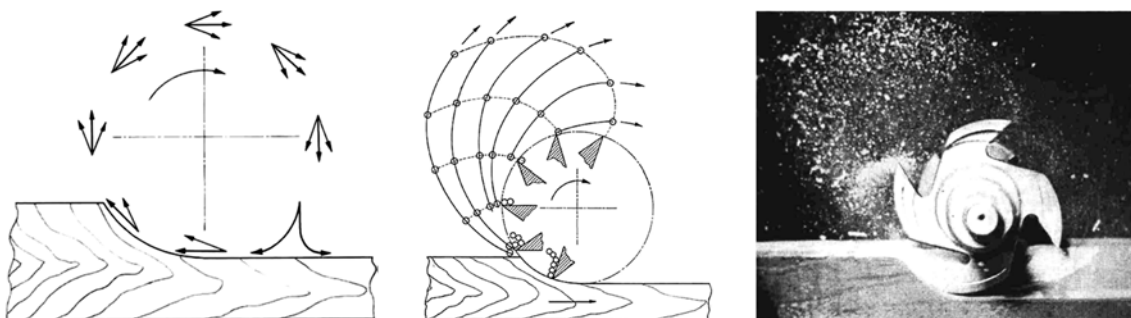


Abbildung 2-22: Strömungsfelder durch das Fräswerkzeug (links); schematischer (Mitte) und realer Spangutauswurf (rechts) nach (Barz et al. 1967)

Eine zielgerichtete Ablenkung des ausgeworfenen Spanguts kann dessen anschließende Absaugung deutlich vereinfachen. Ziel ist hierbei einerseits die Umlenkung der Partikel, andererseits soll durch Stoßvorgänge kinetische Energie abgebaut werden, sodass die Partikel besser von den Absaugluftströmen erfasst werden können. Industrielle Umsetzung fand dieser Ansatz durch die Werkzeughersteller *Leitz* und *Leuco*: *Leitz* entwickelte Fräswerkzeuge für die Profilmbearbeitung, die auf Höhe der Zerspanstelle ein drehbar gelagertes Ablenkblech vorsehen, das über einen Zapfen relativ zur Spindel fixiert wird. Durch die C-Achse der Bearbeitungsmaschine wird das Ablenkblech so in den Spangutstrahl positioniert, dass die Partikel vorteilhaft in Richtung der Absaughaube abgelenkt werden. Basierend auf Untersuchungen von *Heisel et al.* (2004b) und *Heisel et al.* (2005) integrierte *Leuco* Leitnuten direkt in den Spannuten von Fräswerkzeugen, wodurch der Spangutauswurf in definierte Vorzugsrichtungen lenkbar wurde. Dieser Ansatz war jedoch nur für Werkzeuge bis zu einem Durchmesser von $d = 25$ mm wirksam, da bei höheren Werkzeugdurchmessern der spanführende Effekt aufgrund der zunehmenden Fliehkräfte abnimmt (Gittel 2000a).

Ein reines Parallelement zur Abbremsung des Spangutstrahls bei der Kantenbearbeitung entwickelte *van Gertten* (1981). Die nach dem schwedischen Forschungszentrum benannte *Trätek-Späneleitschürze* konnte frei um die Werkzeugachse rotieren und dichtete die Zerspanstelle auf der dem Werkstück gegenüberliegenden Seite in einem Winkelbereich von etwa 180° ab. Aufgrund der großen Störkontur erwies sich das System für automatische Werkzeugwechsel und 3D-Bauteile als kritisch.

In diesem Zusammenhang seien auch die zahlreichen Untersuchungen im Bereich der Durchlaufmaschinen genannt, die sich mit einer Ablenkung des Spangutstrahls für eine verbesserte Spanguterfassung befassen (Hupe 1985; Westkämper et al. 1991; Heisel et al. 1999; Heisel et al. 2004a; Dressler 2007).

Mit dem Ziel, das Spangut auf alternativen Arten in Richtung Absaughaube zu beschleunigen, wurden unterschiedliche Forschungsansätze durchgeführt: Mittels auf dem Spannfutter aufgeschraubten Axial- und Radialventilatoren versuchten (Heisel et al. 2000e)); (Heisel et al. 2000c; Heisel et al. 2000d) die Absauggeschwindigkeit an der Zerspanstelle zu erhöhen, um das Spangut in Richtung der Absaughaube zu fördern (Abbildung 2-23 links). Mit Radialventilatoren wurde so zwar eine dem Spangutflug entgegengerichtete Luftströmung induziert, eine komplette Umlenkung des Spangutstrahls konnte jedoch nicht erzielt werden. Negativ zeigte sich auch der hohe Lärmpegel und die zusätzliche Störkontur nahe der Zerspanstelle. Eine industrielle Umsetzung fand jedoch einige Jahre später durch diverse Unternehmen statt, die heute Spannfutter mit integriertem Radial- oder Diagonalventilator vertreiben (Abbildung 2-23 rechts).

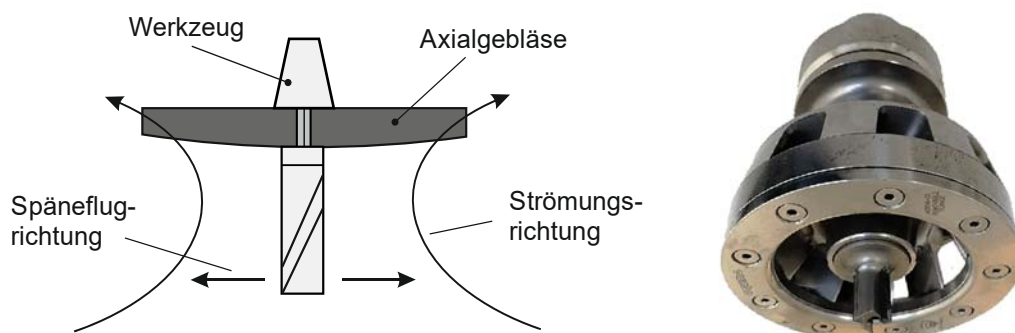


Abbildung 2-23: Prototypisches Design nach Heisel et al. (2004a) (links) und industrielle Umsetzung eines Spannfutters mit integriertem Diagonalventilator (rechts)

2.2.4 Strömungssimulation der Spangutabsaugung

Mit dem Ziel einer vollständigen Erfassung des anfallenden Spanguts wurden an mehreren Forschungsstellen Untersuchungen mithilfe von Strömungssimulationen durchgeführt:

Das Institut für *Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart (IfW)* befasste sich mit Strömungs- und Partikelsimulationen im Bereich der Holzbearbeitung (Heisel et al. 2001c; Heisel et al. 2006; Dressler 2007; Heisel et al. 2008; Heisel et al. 2009). Diese

wurden auf Anwendungen im Bereich der Metallbearbeitung erweitert (Heisel et al. 2006). Für die Untersuchungen wurden kommerzielle Simulationsprogramme, wie *ANSYS Flotran*, eingesetzt und durch eine autarke Simulationssoftware ergänzt bzw. ersetzt. Die am *IfW* entwickelte Software *ChipSi* wurde gegenüber kommerzieller Software mittels umfangreicher experimenteller Untersuchungen um spezifische Partikeleigenschaften wie c_w -Werte und Reflexionswerte bei Partikel-Wand-Kollisionen ergänzt (Abbildung 2-24 links).

Heisel et al. (2008) und *Heisel et al.* (2009) erweiterten den Simulationsbereich um den Spanraum des Werkzeugs, um eine durchgängige Simulation von der Werkzeugschneide über die Absaughaube bis zum Absaugstutzen zu ermöglichen (Abbildung 2-24 rechts).

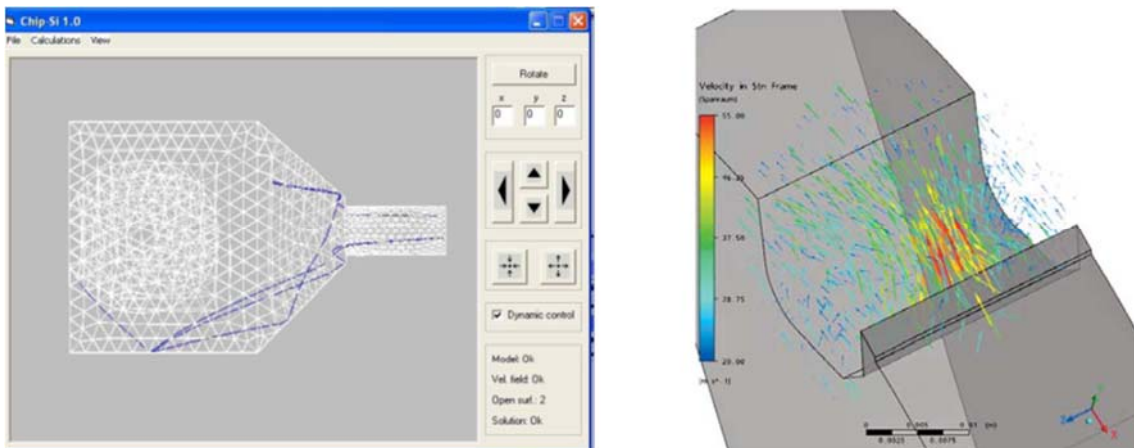


Abbildung 2-24: Simulation der Partikelreflexionen und Flugbahnen (links) (Heisel et al. 2001c) und Simulation der Luftströmungen im Spanraum (rechts) (Heisel et al. 2009)

Wieland (2004) untersuchte die Spanguterfassung bei der Trockenbearbeitung von Metallen. Wie in den vorhergehenden Arbeiten kam hierbei kommerzielle Software zum Einsatz, die durch eigene Softwaretools erweitert wurde. Zudem wurden Partikeleigenschaften implementiert, die durch experimentelle Untersuchungen gewonnen wurden. Auf Basis dessen wurde ein Strömungsmodell für einen gesamten Maschinenarbeitsraum entworfen sowie optimierte Absaughauben für die Bohr- und Fräsbearbeitung abgeleitet.

Blecken (2004) befasste sich mit der Spanguterfassung bei der Holzbearbeitung. In umfangreichen experimentellen Untersuchung. In einem Strömungskanal wurden verschiedene Möglichkeiten zur Aufwirbelung und Erfassung ruhender Partikel untersucht. Des Weiteren wurde das Flugverhalten der Partikel in Luftströmungen analysiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine werkzeugumschließende Absaughaube entwickelt und mittels kommerzieller Simulationssoftware optimiert. Im Gegensatz zu den oben vorgestellten Arbeiten standen bei *Blecken* (2004) weniger die Förderung und das Verhalten der Partikel in der Absaughaube im Vordergrund als die Erfassung ruhender Partikel und die Abdichtung der Haube gegenüber dem Werkstück.

Gu et al. (2006) bewerteten die Ausbreitung von KSS-Aerosolen bei der Nasszerspannung an Drehmaschinen unter Betrachtung des rotierenden Spannfutters. Hierzu wurde ein zweiphasiges Strömungsmodell in *ANSYS* entwickelt und die Aufkonzentration der KSS-Aerosole im Arbeitsraum unter Variation der Absaugpunkte analysiert.

Denkena et al. (2017) simulierten die Ausbreitung und Absaugung von CFK-Partikel im Arbeitsraum einer Fräsroboterzelle. Hierfür kam kommerzielle Software für die zweiphasige Strömungssimulation zum Einsatz. Für die CFK-Partikel wurden sphärische Ersatzpartikel genutzt. Die Partikelgrößenverteilung der Ersatzpartikel orientierte sich hierbei an den Staubmessungen von *Haddad et al.* (2014), sodass nur luftgetragene Partikel bis zu einem Partikeldurchmesser $x_{c, \min} \leq 32 \mu\text{m}$ betrachtet wurden.

2.2.5 Fazit zum Stand der Technik und Konkretisierung der Aufgabenstellung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe sind moderne Hochleistungswerkstoffe mit einem hohen Leichtbaupotenzial. Fertigungsbedingt müssen sie vor der Montage endbearbeitet werden, wofür sich spanende Bearbeitungsmethoden durchgesetzt haben. Bei der Zerspanung entstehen größere Partikel und luftgetragene CFK-Bruchstücke, die eine Gefährdung für die Werker, die Maschine und die Prozesssicherheit darstellen.

Untersuchungen zum anfallenden Spangut wurden bisher nur für limitierte Partikelgrößenbereiche, bzw. für luftgetragene Partikel durchgeführt. Wissen zur Partikelgrößenverteilung und den Partikelformen für das gesamte Größenspektrum liegen nicht vor. Zudem wurde der Einfluss von Werkstoff, Werkzeug und Einstellparameter auf das Spangut nur lückenhaft untersucht. Die vorliegende Arbeit setzt sich daher eine umfängliche Analyse des Spanguts als Teilziel.

Absaugeinrichtungen für die Erfassung von trockenem, nicht-metallischem Spangut wurden vor allem durch die Holzbearbeitung geprägt, die sich schon seit mehreren Jahrzehnten mit dieser Thematik beschäftigt. Viele Forschungsarbeiten befassen sich mit einer Optimierung der Arbeitsraumabsaugung oder einer werkzeughnahen Erfassung. Zudem sind Ansätze zur zerspanwerkzeugintegrierten Absaugung und zur Absaugung durch die Spannvorrichtung bekannt. Jedoch liegen weder Daten zu deren industriellen Nutzung, noch zu den Anforderungen der CFK-Branche an diese Systeme vor. Somit ist eine zielgerichtete Entwicklung oder Optimierung geeigneter Absaugsysteme bisher nicht möglich. Ein weiteres Teilziel besteht deshalb in der Untersuchung der industriellen CFK-Zerspanung, der eingesetzten Absaugtechnik und der Anforderungen der Industrie an diese Systeme.

3 Analyse und Bewertung industriell eingesetzter Absaugsysteme

3.1 Studienumfang und Ergebnisse

Der Stand der Technik zeigt auf, dass unterschiedliche Absaugsysteme für die spanende Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen zur Verfügung stehen. Jedoch existieren keine Erhebungen zu deren Nutzung in der industriellen Fertigung, zur Effektivität unter Realbedingungen oder zu den Anforderungen durch die Nutzer. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Studie bei CFK-zerspanenden Unternehmen in Deutschland durchgeführt: es wurden 14 Unternehmen befragt, davon fünf kleine- und mittlere Unternehmen und neun Großunternehmen (Abbildung 3-1). Bei der Auswahl der Unternehmen wurden jeweils sechs Vertretern aus der Luft- und Raumfahrt und sechs aus dem Automobilbau ausgewählt, da diese nach *Sauer et al.* (2021) die höchsten Tonnagen an CFK umsetzen. Zusätzlich wurden zwei Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau eingeschlossen.

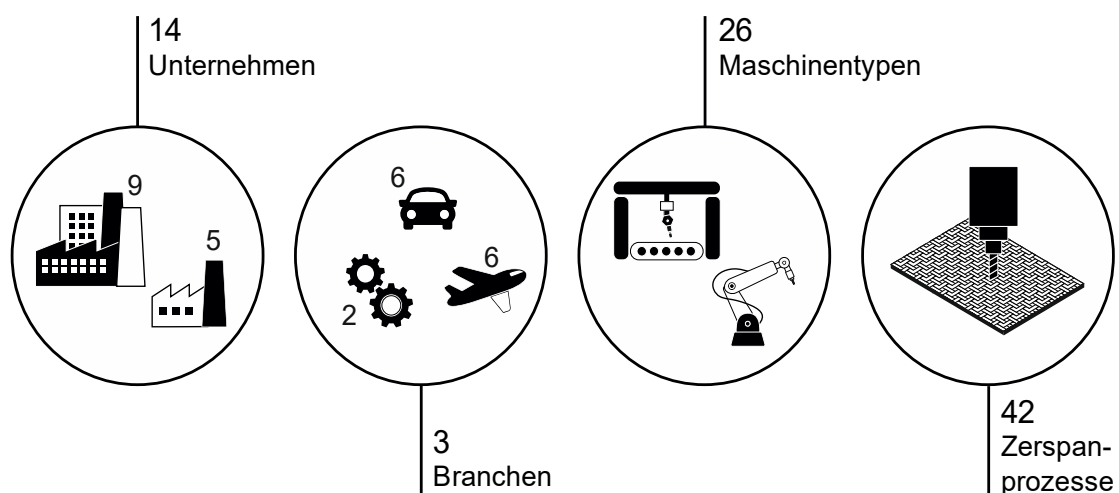












Abbildung 3-1: Untersuchungsgegenstand der Studie zur Analyse der Absaugsysteme in der industriellen Fertigung in Deutschland

In den Fertigungsstätten wurden 42 Bearbeitungsmaschinen und die zu diesem Zeitpunkt bearbeiteten Werkstücke, inkl. der zugehörigen Bearbeitungs-, Spann-

und Absaugtechnik untersucht. Gleichartige Maschinen, auf denen dieselben Werkstücke bearbeitet wurden, wurden nicht berücksichtigt. Damit wurden in Summe 26 unterschiedliche Maschinentypen in die Auswertung aufgenommen. Keine Beachtung fanden Maschinen zur Nassbearbeitung unter Zuhilfenahme von KSS.

Als Bearbeitungsmaschinen wurden primär Portalfräsmaschinen - sowohl in Gantry- als auch in Tischbauweise - eingesetzt, aber auch Bettfräsmaschinen und Zerspanroboter. Die Maschinen waren überwiegend vollständig gekapselt, nur bei großen Portalfräsmaschinen waren offene Bauweisen vorzufinden, wie in Tabelle 3-1 ersichtlich. Zum Einsatz kamen überwiegend Raumabsaugungsanlagen und Kopfabsaugungen, während spannsystemintegrierte Absaugungen seltener vorzufinden waren.

Tabelle 3-1: Verteilung der Maschinentypen und Absaugsysteme unter den 42 analysierten Bearbeitungsmaschinen

	Raumabsaugung	Kopfabsaugung	spannsystemintegrierte Absaugung	Σ
Portalfräsmaschine vollgekapselt	 14	 6	 3	23
Portalfräsmaschine ungekapselt	 1	 6	0	7
Bettfräsmaschine vollgekapselt	 5	 2	 1	8
Zerspanroboter vollgekapselt	 2	0	 2	4
Σ	22	14	6	

Die Betrachtung der Maschinentypen, ihrer Maschinenarbeitsräume und Absaugsysteme in Abbildung 3-2 zeigt, dass nur für sehr große Maschinen auf die Vollkapselung verzichtet wird. Generell werden bei großen Fräsmaschinen bevorzugt Kopfabsaugungen genutzt. Spannsystemintegrierte Absaugsysteme

finden nur für größere Stückzahlen Einsatz, während Raumabsaugungsanlagen für alle Stückzahlen vorzufinden sind.

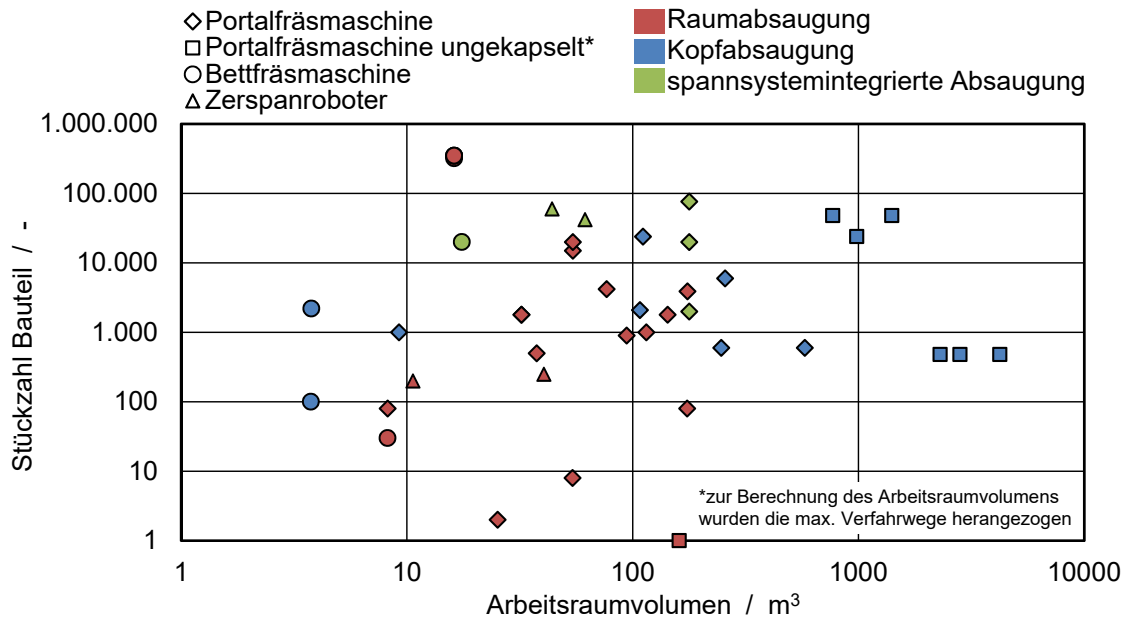


Abbildung 3-2: Arbeitsraumvolumina und Stückzahl der betrachteten Bauteile und Absaugsysteme der Bearbeitungsmaschinen

Zur Beurteilung der Bearbeitungsmaschinen mit Raumabsaugung wird der Faktor *Relatives Arbeitsraumvolumen* V_{rel} eingeführt, der aus dem Quotienten aus Volumen des Bauteils und Arbeitsraumvolumen der Bearbeitungsmaschine gebildet wird (Formel 3-1), wobei für das Volumen des Bauteils ein kubischer Hüllkörper herangezogen wurde.

$$V_{rel} = \frac{V_{Bauteil}}{V_{Arbeitsraum}}$$

Formel 3-1

Da die erforderliche Leistung bei Raumabsaugungsanlagen primär vom Arbeitsraumvolumen abhängt, ist für eine effektive Spanguterfassung ein kleinstmöglicher Arbeitsraum einzusetzen: für diesen Fall strebt das relative Arbeitsraumvolumen V_{rel} gegen den Wert 1. Bei 5-Achs-Bearbeitungszentren

bedingen die notwendigen Verfahrenwege zur Durchführung der mehrseitigen Bearbeitungen hohen V_{rel} -Werte.

Abbildung 3-3 zeigt die *relativen Arbeitsraumvolumina* der betrachteten Bearbeitungsmaschinen mit Raumabsaugung: in allen betrachteten Fällen wurden sehr großdimensionierte Bearbeitungsmaschinen eingesetzt. Damit liegt das mittlere *relative Arbeitsraumvolumen* bei 0,0042.

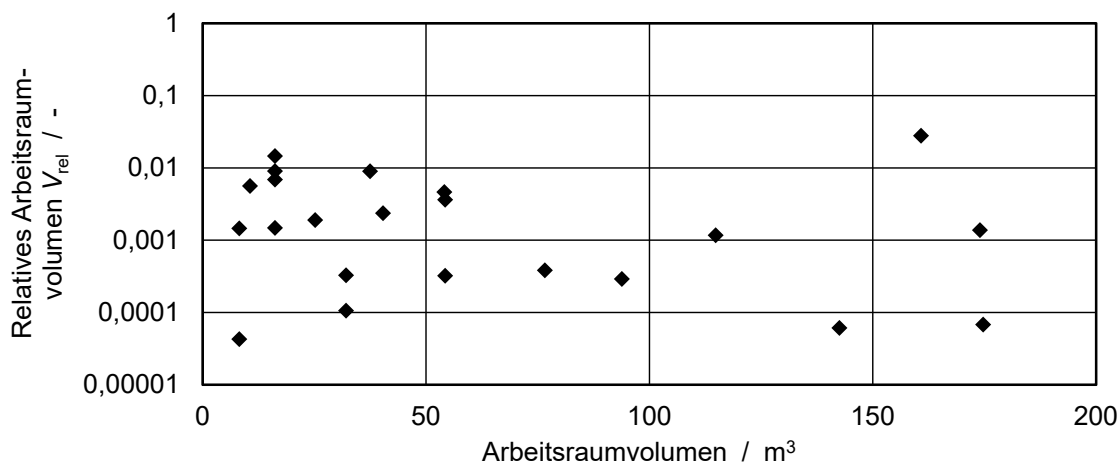


Abbildung 3-3: Relatives Arbeitsraumvolumen in Abhängigkeit vom Arbeitsraumvolumen der Bearbeitungsmaschinen mit Raumabsaugung

Die Bewertung der Absaugsysteme bzw. der betrachteten Bearbeitungsprozesse wurde durch Einteilung in sieben Klassen vorgenommen, die die Erfassungsgrade des Spanguts von 0% bis 100 % darstellen (Tabelle 3-2). Eine gravimetrische Messung des nach dem Zerspanprozess in der Maschine verbliebenen Spanguts konnte aufgrund der oft komplexen Bearbeitungsräume und Spannvorrichtungen nicht realisiert werden. Ebenso war es nicht möglich, einen Filter in die Rohrleitung zwischen Bearbeitungsmaschine und Absauganlage zu installieren und diesen auszuwiegen, da dies einen unzumutbaren Eingriff in den Produktionsbetrieb der Unternehmen bedeutet hätte. Die Bestimmung des Erfassungsgrads erfolgte daher durch subjektive Abschätzung des Autors anhand der in Tabelle 3-2 beschriebenen Kriterien.

Tabelle 3-2: Bewertungsklassen und -kriterien zur qualitativen Einordnung der Spanguterfassung an den Bearbeitungsanlagen

qualitative Größe	quantitative Umrechnung
keine Erfassung	0 %
Erfassung ausschließlich der feinen, luftgetragenen Partikel	5 %
starke Verschmutzung von Bauteil, Spannvorrichtung und Maschine	25 %
mittlere Verschmutzung	50 %
leicht Verschmutzung, Rückstände nur in z.B. Bauteilecken	75 %
vollständige Erfassung bis auf Staubfilm auf Bauteiloberfläche	95 %
vollständige Erfassung, keinerlei Staubrückstände sichtbar	100 %

Der Erfassungsgrad nach *Heisel et al.* (2011) beschreibt hierbei die Menge des abgesaugten Spanguts im Verhältnis zum erzeugten Spangut (Formel 3-2).

$$\eta = \frac{\text{Menge erfasstes Spangut}}{\text{Menge erzeugtes Spangut}}$$

Formel 3-2

Die betrachteten Bearbeitungsmaschinen mit Arbeitsraumabsaugung können in Anlagen mit vertikaler Bauteilspannung (vergleiche Horizontalfräsmaschinen) und Anlagen mit horizontaler Bauteilspannung (vergleiche Vertikalfräsmaschinen) unterteilt werden, wobei bei Letzteren in sechs Fällen noch zusätzliche Gebläse verbaut wurden, um das Spangut mittels eines Luftstroms in Richtung der Absaughauben zu transportieren.

Nach Abbildung 3-4 zeigen Anlagen mit vertikaler Bauteilspannung deutlich höhere Erfassungsgrade ($\eta = 65,8\%$) als Anlagen mit horizontaler Bauteilspannung ($\eta = 40,3\%$). Die Absaughauben sind bei vertikaler Bauteilspannung meist unterhalb der Spannvorrichtung angeordnet, wodurch das Spangut zusätzlich durch die Gewichtskraft in Richtung Absaughaube beschleunigt wird. Bei zwei der sechs Anlagen wurden auf diese Art auch Bauteilausschnitte mit abgesaugt und entsorgt.

Bei den Anlagen mit horizontaler Bauteilspannung wird ein deutlicher Mehrwert durch den Einsatz von Gebläse erzielt. Diese Anlagen erreichen durchschnittliche

Erfassungsgrade von $\eta = 70\%$ gegenüber Anlagen ohne Gebläseunterstützung mit einem Mittelwert von $\eta = 22,5\%$.

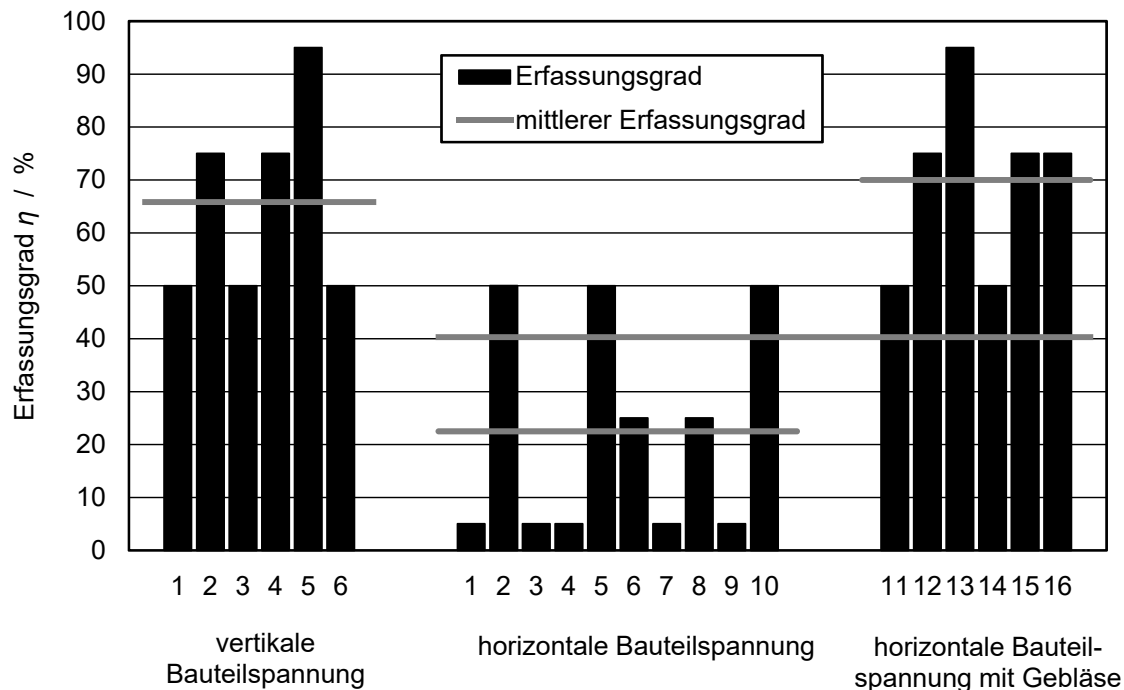


Abbildung 3-4: Erfassungsgrade der untersuchten Anlagen in Abhängigkeit der Bauteilspannung

Bei der Zuführung von Zuluft in die Vollkapselung zeigte sich in den überwiegenden Fällen eine diffuse Zuströmung durch unverschlossene Öffnungen, wie Kabeldurchführungen, Türspalte, Wand- und Deckenöffnungen etc. Nur in wenigen Fällen waren technische Öffnungen vorgesehen: nur in drei der 22 Fällen war eine Anordnung vorzufinden, die eine gezielte Luftströmung über das Werkstück zur Absaughaube ermöglichte.

Die betrachteten Maschinen mit Kopf- und spannsystemintegrierten Absaugungen besaßen alle eine horizontale Werkstückspannung. In 14 Fällen war eine Kopfabsaugung in Form einer werkzeug- oder spindelumschließenden Absaughaube vorzufinden, die in neun Fällen gesteuert war. In sechs Fällen wurde durch die Spannvorrichtung hindurch abgesaugt. Bei spannsystemintegrierten Absaugungen wurde in allen Fällen parallel durch eine Raumabsaugung abgesaugt, die jedoch nur zur Erfassung verbleibender Schwebstäube genutzt wurde.

Abbildung 3-5 zeigt die Erfassungsgrade für die zwei Absaugsysteme. Diese liegen im Durchschnitt höher als die der unterschiedlichen Raumabsaugungssysteme. Es zeigt sich, dass durch die aktive Ansteuerung der Kopfabsaugung höhere Erfassungsgrade ($\eta = 72,2\%$) erzielt werden als bei voreingestellten, passiven Systemen ($\eta = 65\%$). Der Wert der spannsystemintegrierten Absaugungen in Verbindung mit Raumabsaugungen liegt mit einem durchschnittlichen Wert von $\eta = 73,3\%$ am höchsten.

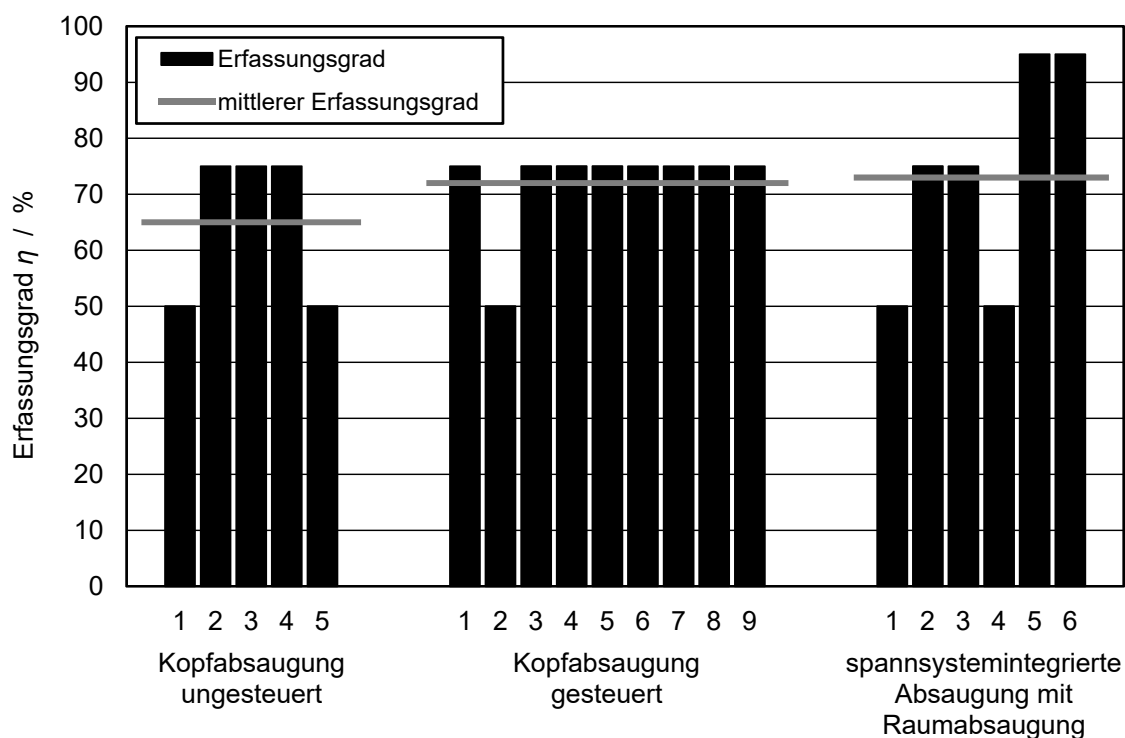


Abbildung 3-5: Erfassungsgrade von Kopf- und spannsystemintegrierten Absaugungen

Die Absaugsysteme wurden mittels Entstauber und Industriesauger entlüftet, wobei diese je nach Bauart und Anschluss unterschiedliche Anforderungen an den Absaugvolumenstrom und Unterdruck der Absauganlagen besitzen. Die Entstauber können nach ihrem maximal erzeugbaren Unterdruck unterteilt werden, wobei die Druckniveaus keiner Normierung unterliegen, sondern sich wie nachfolgend definiert im Sprachgebrauch eingebürgert haben (VDI/DVS 6005):

- Hochvakuumstauer: $p > 6$ kPa
- Mittelvakuumentstauer: $p = 2 \dots 6$ kPa
- Niedervakuumentstauer: $p < 2$ kPa

Neben Entstaubern der zwei höheren Vakuumpklassen kamen bei den betrachteten Fällen auch Industriesauger zum Einsatz, die, im Gegensatz zu Entstaubern, auch für die Erfassung sedimentierter Partikel zugelassen sind. Ihre Druckniveaus lagen im Bereich $p > 20$ kPa. In Abbildung 3-6 werden die untersuchten Absauganlagen hinsichtlich Druckniveau und Volumenstrom Q klassifiziert und den drei Absaugsystemen zugeordnet. Die Ermittlung der Druckniveaus und Absaugvolumenströme wurde durch Messungen, Berechnungen und aufgeführte Nennleistungen ermittelt.

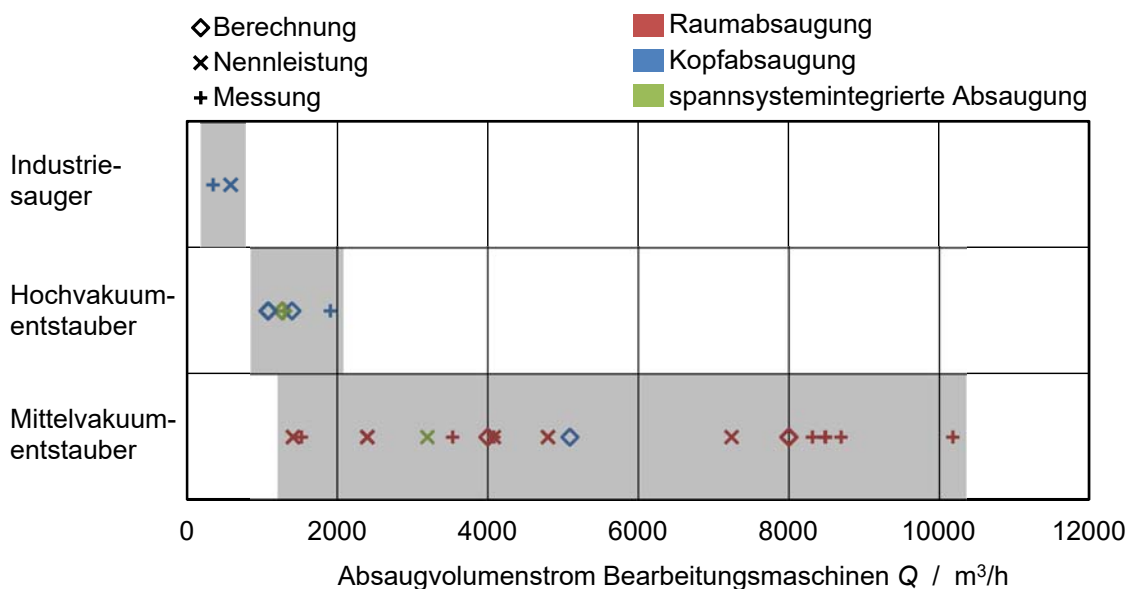


Abbildung 3-6: Eingesetzte Absaugsysteme unterteilt nach Absaugvolumenstrom und Druckniveau. Mittelvakuumentstauber wurden überwiegend für Raumabsaugungssysteme eingesetzt. Die Absaugvolumenströme erreichten hierbei Werte von $Q > 10.000$ m³/h je Bearbeitungsmaschine. Hochvakuum-entstauber wurden sowohl für Kopf- als auch für spannsystemintegrierte Absaugsysteme genutzt. Ihre Volumenströme lagen deutlich unter dem Niveau der Mittelvakuumentstauber. In zwei Fällen fanden Industriesauger Einsatz. Sie wurden für Kopfabsaugungen eingesetzt und wiesen Volumenströmen von $Q = 346$ m³/h bzw. $Q = 576$ m³/h auf. Die Analyse der Bearbeitungsoperationen in Abbildung 3-7 zeigt, dass überwiegend Randbeschnitte an den Werkstücken durchgeführt und Bohrungen und Ausschnitte eingebracht wurden.

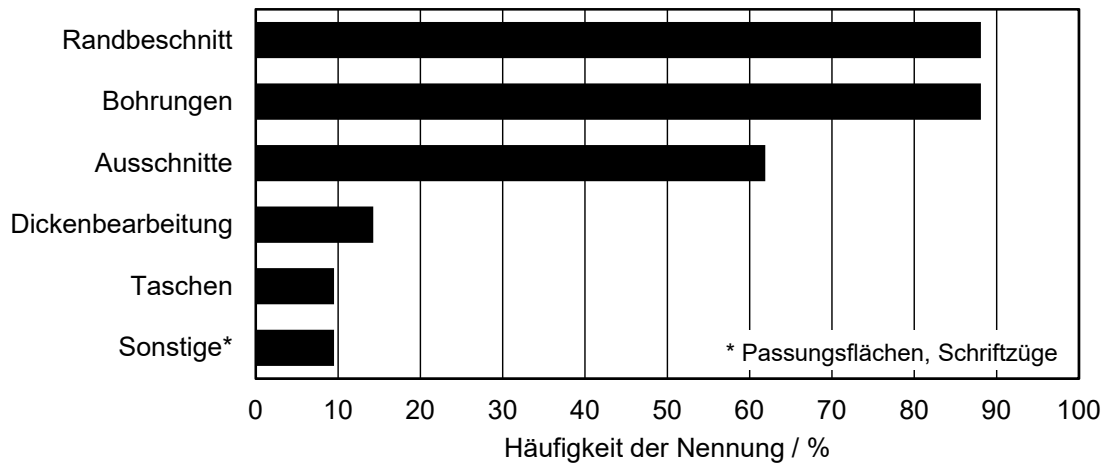


Abbildung 3-7: Häufigkeit der Bearbeitungsoperation

In allen betrachteten Fällen kamen Fräswerkzeuge zum Einsatz, in 45 % der Fälle zusätzlich Bohrwerkzeuge (Abbildung 3-8). Ein Großteil der Bohrungen wurde durch Fräswerkzeuge eingebracht. Trennschleif- und Sägewerkzeuge zum Randbeschnitt wurden aufgrund ihrer eingeschränkten Formgebungseigenschaften nur in wenigen Fällen eingesetzt.

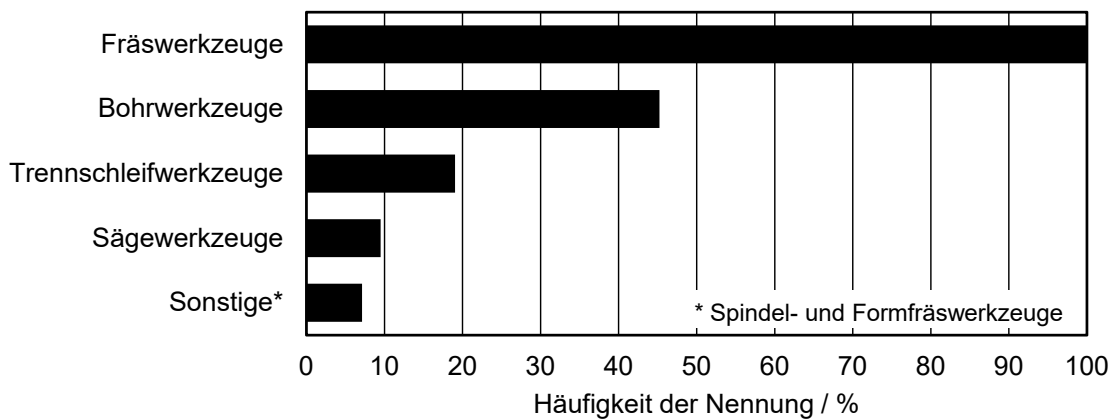


Abbildung 3-8: Häufigkeit der eingesetzten Zerspanwerkzeuge

Niedrige Erfassungsgrade erzwingen einen hohen Reinigungsaufwand der Bauteile vor der Weiterverarbeitung, der Spannvorrichtungen vor Wiederbestückung und der Bearbeitungsmaschine zur Vermeidung von Verschleiß. Diese nicht-wertschöpfenden Arbeiten stellen nicht nur einen hohen Personal- und somit Kostenaufwand dar, sondern setzen den Werker darüber hinaus auch den gefährdenden Stäuben aus. Die Reinigungszeit je Schicht t_R , kann mithilfe von

Formel 3-3 aus der Reinigungszeit je Bauteile und Spannvorrichtung, der Anzahl n als Summe der Bauteile je Schicht und der Reinigungszeit der Bearbeitungsmaschine bezogen auf eine Schichtlänge berechnet werden.

$$t_R = \sum_{k=1}^n (\text{Reinigungszeit Bauteil}_k + \text{Reinigungszeit Spannvorrichtung}_k) + \frac{\text{Reinigungszeit Bearbeitungsmaschine}}{\text{Anzahl Schichten bis zur Reinigung der Maschine}}$$

Formel 3-3

In Abbildung 3-9 sind für die betrachteten Bearbeitungsprozesse die Reinigungszeiten je Schicht bezogen auf die Gesamtstückzahl der betrachteten Bauteile dargestellt.

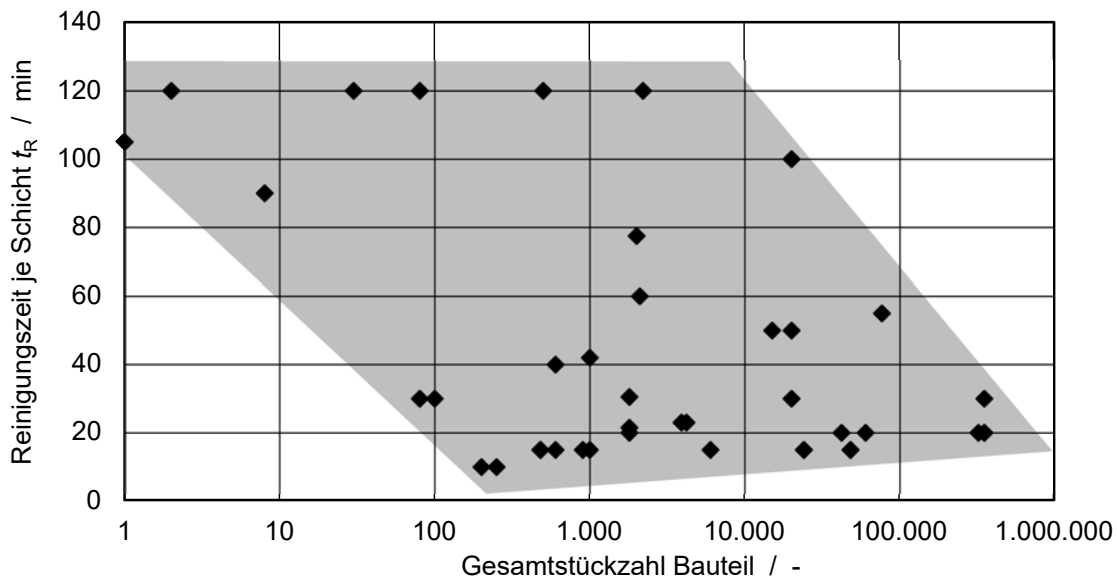


Abbildung 3-9: Reinigungsaufwand in Abhängigkeit der Gesamtstückzahl

Nimmt die Gesamtstückzahl eines Bauteils zu, so sinkt in der Regel die Reinigungszeit je Schicht. Dies kann damit begründet werden, dass Optimierungen der Spanguterfassung Kosten (z.B. für Personal, Sach- und Investitionsmittel) verursachen und sich unter einer reinwirtschaftlichen Betrachtung erst mit steigender Stückzahl amortisieren. Auch können für die Serienproduktion lang

laufender Bauteile optimalabgestimmte Bearbeitungsmaschinen mit optimierter Spanguterfassung beschafft werden, während für kleine Losgrößen oder eine hohe Variantenvielfalt Universalmaschinen mit einem niedrigen Rüstaufwand bevorzugt werden.

Die Vermeidung der Reinigungsarbeiten und eine Erhöhung der Taktzeiten besitzen für fast alle befragten Unternehmen eine sehr hohe oder mittlere Relevanz, wie in Abbildung 3-10 dargestellt ist. Dies hohe Relevanz steht im Kontrast zu den ermittelten, teils sehr langen, Reinigungszeiten (2 h).

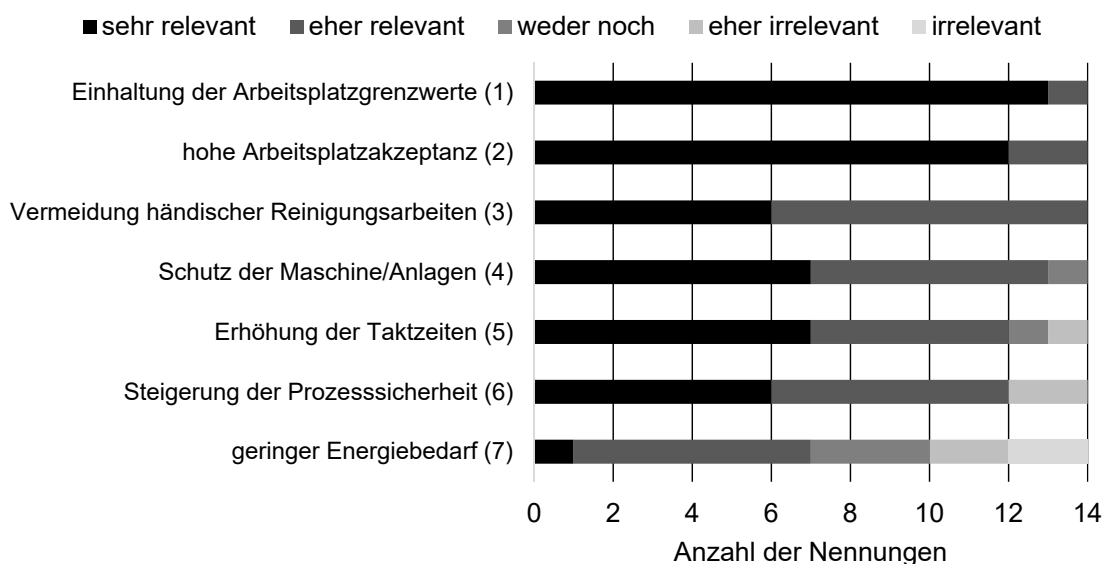


Abbildung 3-10: Zielstellungen an den Einsatz der Absaugtechnik bei den befragten Unternehmen

Die Zielstellungen einer verbesserten Absaugung liegen nach Abbildung 3-10 für die befragten Unternehmen primär auf dem Arbeitsschutz und einer hohen Mitarbeiterakzeptanz der Arbeitsplätze. Jedoch kommen auch dem Schutz der Bearbeitungsmaschine und angrenzender Anlagen sowie einer erhöhten Prozesssicherheit ein hoher Stellenwert zu. Eine Senkung des Energiebedarfs ist für die Hälfte der befragten Unternehmen relevant und spielt nur für vier Unternehmen eine untergeordnete Rolle.

3.2 Bewertung der Absaugsysteme und Ableitung von Optimierungspotenzialen

Die Bewertung der Absaugsysteme kann anhand ihrer primären Eigenschaften Erfassungsgrad (Formel 3-3) und Energiebedarf in Form der pneumatischen Leistung P_p (Formel 3-4) mit dem Absaugvolumenstrom Q und dem Druckverlust Δp vorgenommen werden.

$$P_p = Q \cdot \Delta p$$

Formel 3-4

Es gilt jedoch zu beachten, dass der Druckverlust einer Absauganlage aus einer Vielzahl an Einzel-Druckverlusten besteht, die nur teilweise dem Absaugsystem zugerechnet werden dürfen, da sie entsprechend der Verrohrung, der Filteranlage oder der Art und Sättigung der Filter variieren. Für eine reine Beurteilung des Absaugsystems muss daher zwischen dem spezifischen Druckverlust des Absaugsystems Δp_{spez} und dem Druckverlust der Absauganlage Δp_{AA} unterschieden werden (Tabelle 3-3). Die Systemgrenze liegt an der Schnittstelle zur Werkzeugmaschine und schließt die Kapselung mit ein, denn auch die Zuführung der Zuluft führt zu einem anlagenspezifischen Druckverlust.

Tabelle 3-3: Unterteilung des Druckverlusts in spezifischen Druckverlust des Absaugsystems und Druckverlust der Absauganlage

Spezifischer Druckverlust Absaugsystem	Druckverlust Absauganlage
Zuluftöffnungen und Leckageöffnungen der Kapselung	Rohrleitungen, Schlauchleitungen, Bögen, Abzweige, Schieber, Drosseln
Kapselung der Bearbeitungsmaschine	Explosionsschutzklappe
Absaughaube/Absaugöffnung	Hauptfilter mit Filtergehäuse
Schlauchleitungen bei bewegten Absaughauben	Ventilator
Verrohrung in der Kapselung	Nachfilter
	Abluffführung, Schalldämpfer, Luftrückführung

Für die energetische Bewertung des Absaugsystems wird nur der spezifische Druckverlust des Absaugsystems herangezogen. Für die pneumatische Leistung des Absaugsystems $P_{p,A}$ ergibt sich somit:

$$P_{p,A} = Q \cdot \Delta p_{spez}$$

Formel 3-5

Die Energieeffizienz eines Absaugsystems kann also mithilfe des Erfassungsgrads η (Formel 3-2) und der pneumatische Leistung $P_{p,A}$ (Formel 3-5) bestimmt werden.

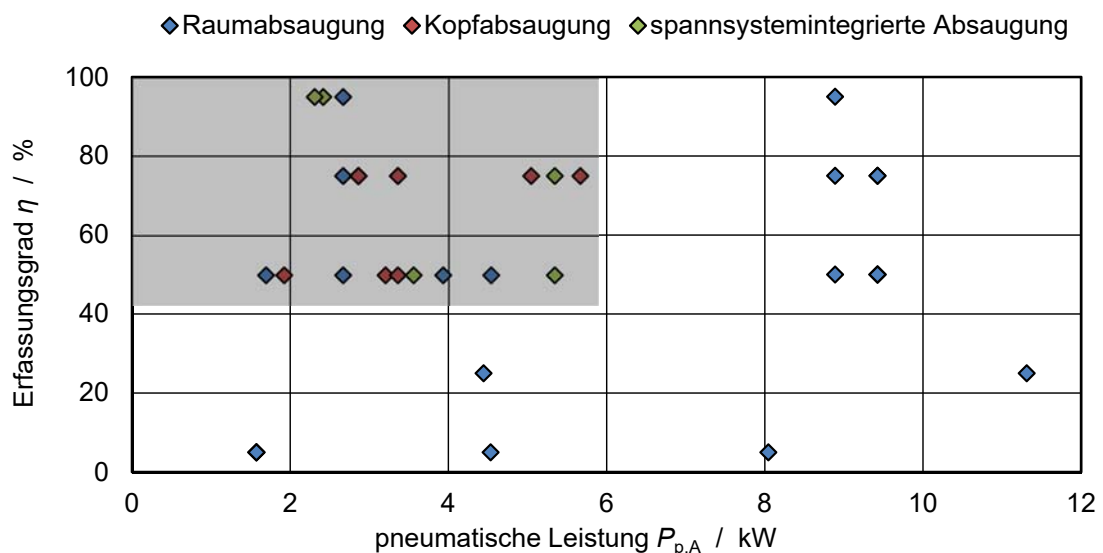


Abbildung 3-11: Erfassungsgrad und pneumatische Leistung der untersuchten Bearbeitungsmaschinen

Nach Abbildung 3-11 zeigen Kopfabsaugungssysteme und spannsystemintegrierte Absaugungen eine hohe Energieeffizienz: die so ausgestatteten Anlagen liegen im oberen linken Quadranten der Darstellung.

Über Energieeffizienz und Erfassungsgrad hinaus wurden in den Unternehmensbefragungen weitere Kriterien ermittelt, die zur Beurteilung eines Absaugsystems herangezogen werden können und in Tabelle 3-4 dargestellt sind.

Tabelle 3-4: Bewertungskriterien von Absaugsystemen

Bewertungskriterien	Definition
Investitionskosten	Geringe Kosten für das Absaugsystem und die zugehörige Absauganlage, Anpassungen in der Bearbeitungsmaschine und der Werkzeuge und Werkstück-Spannsysteme
Wartungsaufwand	Keine häufigen und ungeplanten Wartungen, Reinigungen und Reparaturen notwendig
Verfahrwegseinschränkung	Keine Reduktion der Verfahrwege oder Schwenkbereich der Maschinenachsen, keine Begrenzung der Werkzeugdurchmesser oder Werkzeuglängen
Sicht auf Zerspanstelle	Freie Sicht auf den Zerspanprozesses
Rüstaufwand	Keine zusätzlichen Arbeiten beim Rüsten, wie z.B. Verstellen von Absaughauben, Anschluss von Schläuchen, etc.
Einrichtaufwand	Kein Einteachen von zusätzlichen Störkonturen, Abändern von CNC-Programmen, Steuerung von Kopfabsaugungen, etc.
Arbeitsraumgröße	Eignung des Absaugsystems auch für große Maschinenarbeitsräume
Nachrüstbarkeit	Geringer Aufwand für die nachträgliche Installation des Absaugsystems

Abbildung 3-12 zeigt eine qualitative Bewertung der betrachteten Absaugsysteme hinsichtlich der Kriterien aus Tabelle 3-4. Es ist ersichtlich, dass keines der drei Absaugsysteme in alle Kategorien eine optimale Lösung darstellt.

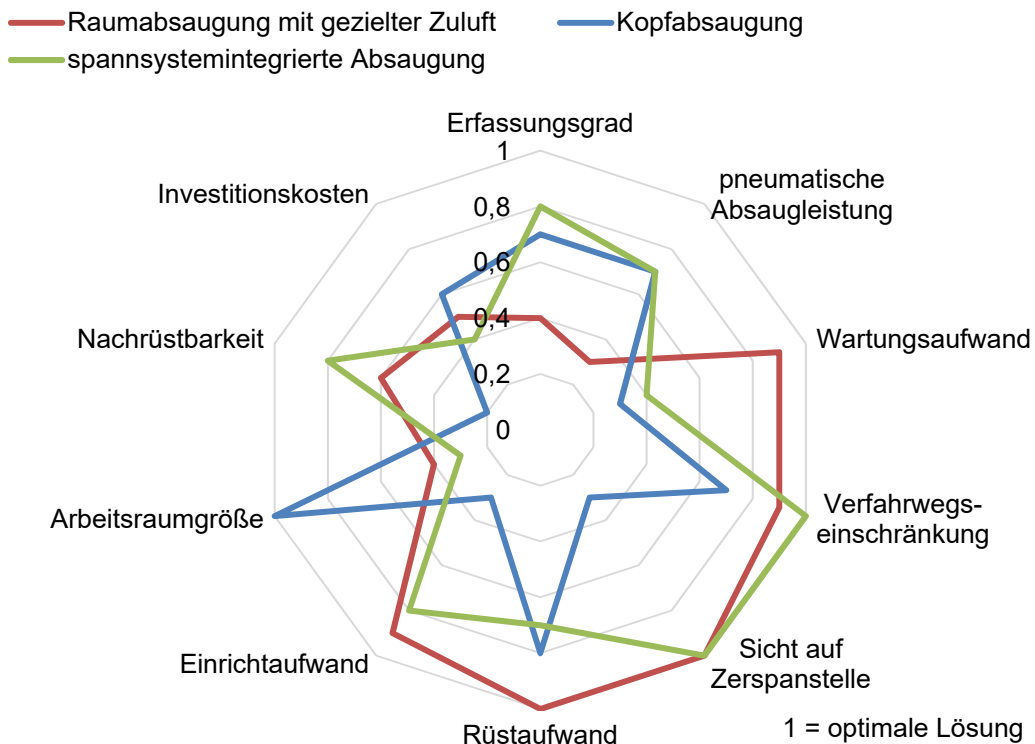


Abbildung 3-12: Bewertung der Absaugsysteme

Die Absaugsysteme weisen individuelle Vor- und Nachteile auf, die sie für unterschiedliche Einsatzszenarien qualifizieren und den Forschungsbedarf offenlegen (Abbildung 3-13).

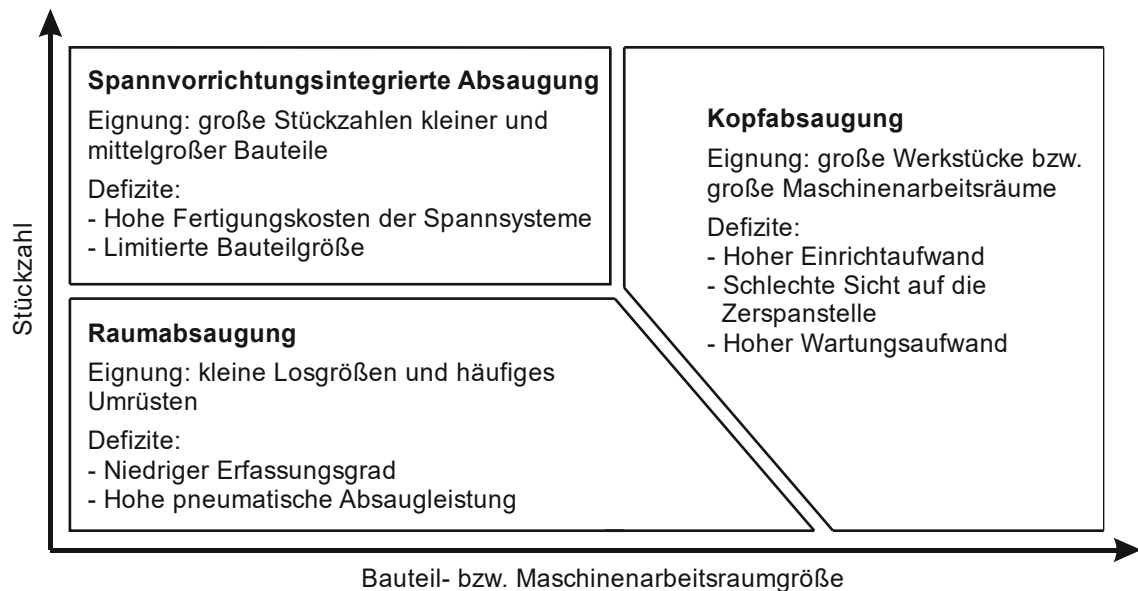


Abbildung 3-13: Einteilung der Absaugsysteme nach Einsatzszenarien

Spannvorrichtungsintegrierte Absaugungen eignen sich aufgrund der hohen Kosten und Beschaffungszeiten vor allem für große Stückzahlen. Mit zunehmender Vorrichtunggröße steigen jedoch die Kosten und die Komplexität der Luftführung im Inneren der Vorrichtung. Raumabsaugungen müssen meist nicht oder nur geringfügig eingerichtet werden und ermöglichen den Einsatz einfacher Spannvorrichtungen, weshalb sie auch für geringe Stückzahlen eine wirtschaftliche Option darstellen – auch unter der Einschränkung einer geringeren Spanguterfassung. Während Kopfabsaugungen unabhängig von der Werkstückgröße gleichbleibend gute Erfassungsgrade ermöglichen und der Energieverbrauch nur durch die längeren Rohr- und Schlauchleitungen steigt, nimmt der Energiebedarf von Raumabsaugungssystemen proportional zur Maschinenarbeitsraumgröße zu, während der Erfassungsgrad signifikant abfällt. Für große Maschinenarbeitsräume werden somit Kopfabsaugungen vorgezogen.

3.3 Fazit zur Analyse und Bewertung der eingesetzten Absaugsysteme und Konkretisierung der Aufgabenstellung

In der industriellen Produktion werden Raumabsaugungs-, Kopfabsaugungs- und Spangsystemintegrierte Absaugsysteme eingesetzt (Tabelle 3-1). Die vorliegende Arbeit berücksichtigt daher diese drei grundsätzlichen Absaugsysteme.

Neben einer generellen Steigerung der Spanguterfassung und einer Senkung des Energiebedarfs bestehen spezifische Defizite der drei Absaugsysteme (Abbildung 3-13). Ein Ziel dieser Arbeit ist daher die methodische Verringerung dieser Defizite unter Berücksichtigung der Bewertungskriterien aus der durchgeführten Befragung (Tabelle 3-4).

Die häufigsten Bearbeitungsoperationen stellen Randbeschnitte und das Einbringen von Bohrungen und Ausschnitten dar (Abbildung 3-7). Beim Einbringen von Bohrungen entsteht vergleichsweise wenig und kinematisch kaum beschleunigtes Spangut *Hintze* (2021), weshalb sich die Arbeit auf den Randbeschnitt und das Einbringen von Ausschnitten fokussiert. Für diese Bearbeitungsoperationen werden typischerweise Schafffräswerkzeuge eingesetzt (Abbildung 3-8), die daher in den nachfolgenden Untersuchungen eingesetzt werde

4 Theoretische Betrachtungen der Partikelabsaugung

Für die Auslegung der Absaugsysteme bedarf es neben experimenteller Untersuchungen auch Simulationsberechnungen zur Darstellung der Luftströmungen und Partikelflugbahnen. Hierbei wirken auf die Partikel eine Vielzahl von Kräften ein, die unterschiedlich stark in ihrer Ausprägung sind. Sie sind in aufgelistet und werden nachfolgend diskutiert. Die im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigten Kräfte sind unterstrichen dargestellt, am Ende des Kapitels erfolgt eine Begründung zur Vernachlässigbarkeit der ausgeschlossenen Kräfte.

Tabelle 4-1: Einteilung der auf einen Partikel wirkenden Kräfte im Fluid

Kräfte zwischen Fluid und Partikel	Kräfte zwischen Partikeln	Trägheitskräfte	Feldkräfte
<ul style="list-style-type: none"> - <u>Widerstandskräfte</u> - statische Auftriebskräfte - Magnus-Kraft 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Stoßkräfte</u> - <u>Reibungskräfte</u> - <u>Haftkräfte</u> - Zwischenmolekulare Kräfte 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>translatorische Trägheitskräfte</u> - <u>rotatorische Trägheitskräfte</u> - Corioliskraft 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Gravitationskraft</u> - elektrische Kräfte - magnetische Kräfte

4.1 Widerstandskräfte

In einem Fluid bewegte Körper erfahren eine ihrer Bewegungsrichtung entgegengesetzte Widerstandskraft F_w . Diese wird durch Reibung und Druck- und Geschwindigkeitsgefälle sowie den daraus entstehenden Turbulenzen am Körper hervorgerufen (Bohl et al. 2005). Sie ist abhängig von der Querschnittsfläche des Körpers senkrecht zur Bewegungsrichtung $A_{\text{Körper}}$, der Bewegungsgeschwindigkeit relativ zur Fluidgeschwindigkeit v_{relativ} , der Dichte des Fluids ρ_{Fluid} und dem Widerstandsbeiwert c_w (Formel 4-1).

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho_{Fluid}}{2} \cdot v_{relativ}^2 \cdot A_{Partikel}$$

$$= c_w \cdot \frac{\rho_{Fluid}}{2} \cdot (v_{Partikel} - v_{Fluid})^2 \cdot A_{Partikel}$$

Formel 4-1

Der Widerstandsbeiwert ist abhängig von der Körperform, deren Ausrichtung im Fluid und dem Bewegungszustand (gleichbleibend, rotierend, taumelnd, etc.). Zudem ist der Widerstandsbeiwert eine Funktion der Reynoldszahl Re . Die Reynoldszahl ist eine dimensionslose Kennzahl, die anhand geometrischer Merkmale des Strömungsproblems, der Strömungsgeschwindigkeit und Stoffgrößen des Fluides berechnet wird (Noll 1993).

Zur Bestimmung des Widerstandsbeiwerts existieren eine Vielzahl an Korrelationsformeln. Exemplarisch sind hier die Formeln nach *Haider et al.* (1989), *Tran-Cong et al.* (2004) und *Thompson et al.* (1991) genannt. Darüber hinaus sind gemittelte Widerstandswerte für viele Körperformen in definierten Reynoldszahlen-Bereichen bestimmt und tabellarisch aufgeführt. Die nachfolgenden Grafiken (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2) vermitteln einen Überblick über die Widerstandsbeiwerte gängiger Körperformen.

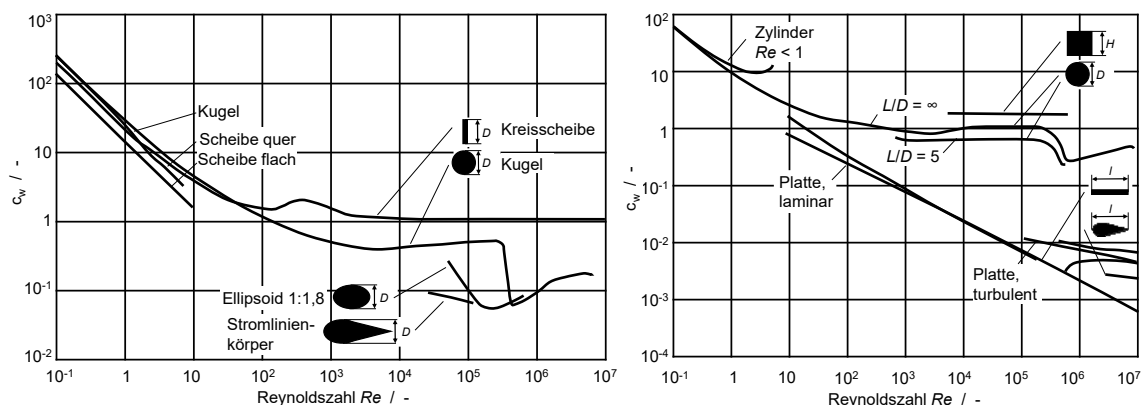


Abbildung 4-1: Widerstandsbeiwerte umströmter Körper (Zierep 1991; Bohl et al. 2005)

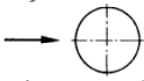
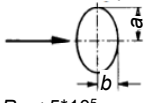
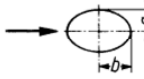
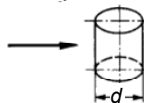
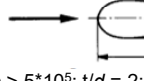
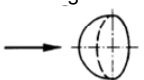

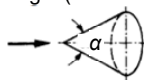
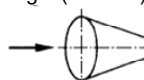
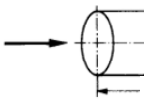
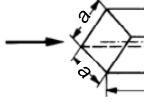
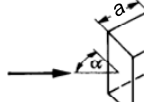
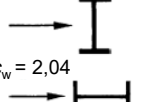
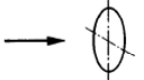
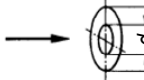
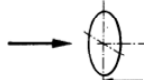
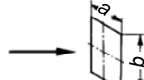
<p>Kugel</p>  <p>$10^3 < Re < 2 \cdot 10^5: c_w = 0,47$ $Re = 4 \cdot 10^5: c_w = 0,09$ $Re = 10^6: c_w = 0,13$</p>	<p>Rotationsellipsoid</p>  <p>$Re < 5 \cdot 10^5: c_w = 0,6$ $Re > 5 \cdot 10^6: c_w = 0,21$</p>  <p>$Re > 10^5: c_w = 0,05 \dots 0,1$</p>	<p>Kreiszylinder</p>  <p>$Re < 9 \cdot 10^4: l/d = 1: c_w = 0,63$ $Re < 9 \cdot 10^4: l/d = 2: c_w = 0,68$ $Re < 9 \cdot 10^4: l/d = 5: c_w = 0,74$ $Re < 9 \cdot 10^4: l/d = 10: c_w = 0,82$ $Re < 9 \cdot 10^4: l/d = 40: c_w = 0,98$ $Re < 9 \cdot 10^4: l/d = \infty: c_w = 1,2$ $Re > 5 \cdot 10^5: l/d = \infty: c_w = 3,5$</p>	<p>Profilstab</p>  <p>$Re > 5 \cdot 10^5: t/d = 2: c_w = 0,2$ $Re > 5 \cdot 10^5: t/d = 3: c_w = 0,1$ $Re > 5 \cdot 10^5: t/d = 5: c_w = 0,06$ $Re > 5 \cdot 10^5: t/d = 10: c_w = 0,083$ $Re > 5 \cdot 10^5: t/d = 20: c_w = 0,094$</p>
<p>Halbkugel</p>  <p>ohne Boden: $c_w = 0,34$ mit Boden: $c_w = 0,4$</p>	<p>Halbkugel</p>  <p>ohne Boden: $c_w = 1,33$ mit Boden: $c_w = 1,17$</p>	<p>Kegel (ohne Boden)</p>  <p>$\alpha = 30^\circ: c_w = 0,34$ $\alpha = 60^\circ: c_w = 0,51$</p>	<p>Kegel (schlank)</p>  <p>$c_w = 0,58$</p>
<p>Kreiszylinder</p>  <p>$l/d = 1: c_w = 0,61$ $l/d = 2: c_w = 0,85$ $l/d = 4: c_w = 0,87$ $l/d = 7: c_w = 0,99$</p>	<p>Prisma</p>  <p>$l/a = 2,5: c_w = 0,81$</p>	<p>Prisma</p>  <p>$\alpha = 90^\circ: l/a = 5: c_w = 1,56$ $\alpha = 90^\circ: l/a = \infty: c_w = 2,03$ $\alpha = 45^\circ: l/a = 5: c_w = 0,92$ $\alpha = 45^\circ: l/a = \infty: c_w = 1,54$</p>	<p>I-Profil-Stab</p>  <p>$c_w = 2,04$ $c_w = 0,86$</p>
<p>Kreisplatte</p>  <p>$c_w = 1,11$</p>	<p>Kreisringplatte</p>  <p>$d/D = 0,5: c_w = 1,22$</p>	<p>Zwei Kreisplatten</p>  <p>$l/D = 1: c_w = 0,93$ $l/D = 1,5: c_w = 0,78$ $l/D = 2: c_w = 1,04$ $l/D = 3: c_w = 1,52$</p>	<p>Rechteckplatte</p>  <p>$a/b = 1: c_w = 1,1$ $a/b = 2: c_w = 1,15$ $a/b = 3: c_w = 1,19$ $a/b = 10: c_w = 1,29$ $a/b = \infty: c_w = 2,01$</p>

Abbildung 4-2: Widerstandsbeiwerte umströmter Körper (Lackmann 2011)

Beim Partikelwurf durch das Zerspanwerkzeug und der anschließenden Flugphase der Partikel in der Luft zeigen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen Partikelrotation. Zudem sind CFK-Partikel nicht sphärisch, wie in REM-Aufnahmen einer Spangutprobe in Abbildung 4-3 ersichtlich. Somit verändert sich der Widerstandsbeiwert eines Partikels laufend entsprechend seiner Ausrichtung in der Strömung. Hinzu kommt, dass der Widerstandsbeiwert von der Reynolds-Zahl abhängt und somit jede Geschwindigkeitsänderung des Partikels eine erneute Berechnung erfordert.

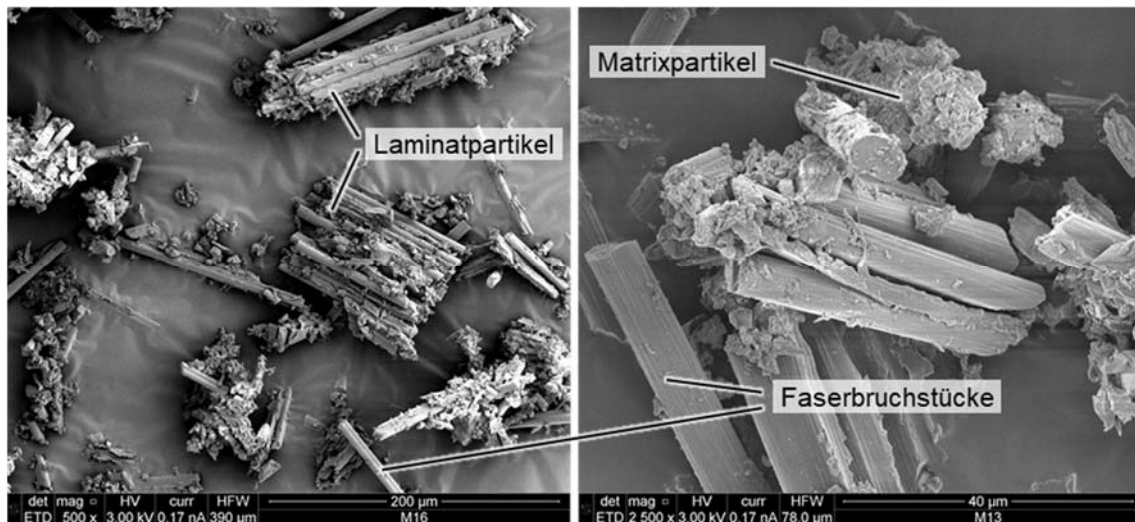


Abbildung 4-3: REM-Aufnahmen einer CFK-Spangutprobe mit Kennzeichnung von Faserbruchstücken, Matrixpartikel und Laminatpartikel

Zur Bestimmung der Widerstandskräfte auf die einzelnen Partikel sind somit Kenntnisse zur Partikelform, zur Partikelgeschwindigkeit relativ zum umgebenden Fluid, der Bewegungsform und der Querschnittsfläche senkrecht zur Flugrichtung notwendig (Bohl et al. 2005). Es ist daher erforderlich, das Spangut hinsichtlich Partikelform und Größenverteilung zu analysieren. Zudem ist die Geschwindigkeit und Richtung des Partikelaustriffs durch das Werkzeug als Ausgangspunkt der Simulationen zu bestimmen.

4.2 Stoßkräfte, Haft- und Reibkräfte

Nach dem Auswurf durch das Werkzeug können Partikel des Spanguts untereinander im Partikelstrahl kollidieren. Ein Stoß wird hierbei als kurzzeitiger Kontakt zweier oder mehrerer Körper definiert, wobei mindestens einer der Körper seinen Bewegungszustand ändert. Laminatpartikel, ebenso wie Faser- oder Matrixbruchstücke, weisen ein sprödhartes Verhalten auf. Eine plastische Verformung der Partikel einhergehend mit einem Energieabbau ist somit nicht zu erwarten. Stattdessen werden durch den Impuls der Kollision die Flugbahnen der Partikel verändert oder es kommt zum Spröbruch der Partikel. Da sich die Partikel vom Werkzeug wegbewegen, sind vor allem Stöße zwischen langsameren und

schnelleren Partikeln zu erwarten. Die absoluten Geschwindigkeiten, aber auch die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Partikeln, sind jedoch gering. Von der daraus resultierenden Stoßenergie ist ein Partikelbruch unwahrscheinlich.

Ein weiterer Kollisionsfall betrifft die Partikel-Wand-Kollision. Die Wand stellt hierbei eine Prallplatte mit hoher Masse dar, die im betrachteten Fall keine Energie durch elastische Verformung oder Beschleunigung aufnimmt. Die Impulsenergie durch das Auftreffen des Partikels wird somit vollständig für eine Änderung seines Bewegungszustands oder die Zersetzung des Partikels verbraucht. Eine Wand im Sinne des Kollisionsfalls, kann hierbei das Bauteil, die Absaughaube, eine Spannvorrichtung oder andere Peripherieeinheiten der Bearbeitungsmaschine darstellen.

Einen häufigen Kollisionspartner stellt das Bauteil dar: Beim Trennschnitt wird das Spangut im Bereich der Fräsnut durch das Werkzeug ausgeworfen. Hierbei können Partikel-Wand-Kollisionen mit beiden Fräskanten stattfinden.

Im Bereich von Wandkollisionen sind Partikel-Partikel-Kollisionen zwischen den bereits mit der Wand kollidierten und den auf die Wand zufliegenden Partikeln wahrscheinlich. Dies trifft insbesondere bei großen Auftreffwinkeln zu, da in diesem Fall die Partikel über einen größeren Winkelbereich reflektiert werden (Dressler 2007).

Bei Untersuchungen zum Kollisionsverhalten von Holzspänen mit einer Prallwand stellte *Dressler* (2007) fest, dass es im Bereich des senkrechten Partikelaufralls zu einer Reflexion über einen weiten Winkelbereich kommt, was er auf eine hohe Anzahl an Partikel-Partikel-Kollisionen zurückführte. Partikelkollisionen in Bereichen hoher Partikelkonzentrationen haben deshalb einen großen Einfluss.

CFK-Partikel weisen eine raue Oberfläche auf und weichen von einer idealen Kugel ab. Zudem unterliegen sie Rotationsbewegungen. Der Stoß zwischen zwei Partikeln oder einem Partikel und einer Wand kann daher nicht als idealer, gerader und zentraler elastischer Stoß angenommen werden, sondern als rauer exzentrischer Stoß. Die tribologischen Eigenschaften an der Kontaktstelle, und somit die Haft- und

Reibungskräfte, spielen eine wesentliche Rolle bei den Stoßvorgängen und müssen für eine Bestimmung der Partikelflugbahnen berücksichtigt werden. Ebenso spielen die translatorischen und rotatorischen Trägheitskräfte eine wesentliche Rolle.

4.3 Trägheitskräfte und Gravitationskraft

Nach *Rackwitz* (1967) wird die Flugbahn eines Partikels primär durch die Trägheitskräfte, die Gravitation und die Widerstandkräfte bestimmt. Deren Zusammenhang wird nachfolgend diskutiert. Die Masse des Partikels wirkt sich direkt auf dessen Trägheitskraft F_T aus (Formel 4-2). Dieser wirkt die Widerstandskraft (Formel 4-1) entgegen, solange sich der Partikel relativ zum umgebenden Fluid bewegt. Hinzu kommt die Gravitationskraft F_G , die den Partikel in Richtung Erdmittelpunkt hin beschleunigt (Formel 4-3).

$$F_T = m_{\text{Partikel}} \cdot a$$

Formel 4-2

$$F_G = m_{\text{Partikel}} \cdot g$$

Formel 4-3

Diese Zusammenhänge für einen Partikel der Masse m_{Partikel} und der Geschwindigkeit v_{Partikel} sind in Abbildung 4-4 skizziert.

Eine höhere Partikelmasse bewirkt eine lineare Zunahme der Trägheitskräfte und steigert somit die Fähigkeit des Partikels, eine weitere Distanz entgegen der wirkenden Widerstandskräfte zu fliegen. Gleichzeitig nimmt die resultierende Beschleunigung in Richtung Erdmittelpunkt zu. Der Partikel sedimentiert somit schneller. Leichtere Partikel hingegen werden schneller von der umgebenden Luftströmung abgebremst und in dieser transportiert. Ihre Sinkgeschwindigkeit ist

niedrig. Kleine Partikel sind folglich leichter abzusaugen. Für eine vollständige Erfassung des Spanguts ist deshalb vor allem eine Betrachtung der größeren Partikel erforderlich.

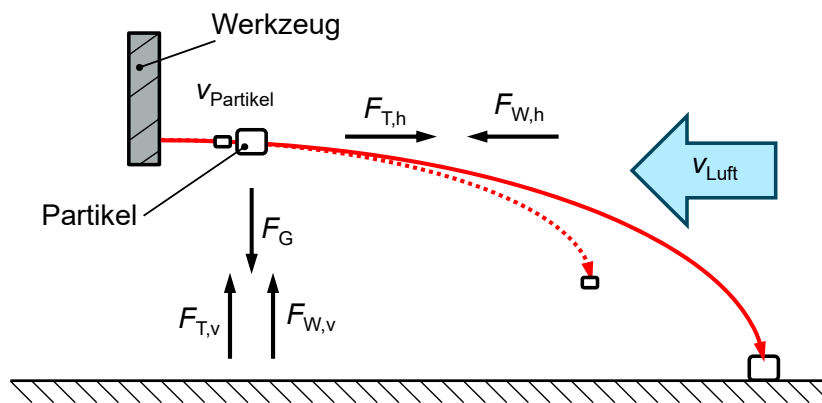


Abbildung 4-4: Auf einen Partikel wirkende Gewichtskraft sowie Trägheits- und Strömungskräfte

4.4 Vernachlässigbare Kräfte

Auf den Partikel wirken weitere Kräfte ein, deren Einfluss jedoch gering ist, sodass sie in der Fortführung der Arbeit nicht betrachtet werden. Diese Kräfte werden kurz diskutiert:

Die statische Auftriebskraft wirkt der Gewichtskraft entgegen. Sie entspricht der Gewichtskraft des Fluids, das der Körper verdrängt. Da die Dichte des Körpers (CFK-Partikel) mit $\rho_{\text{Partikel}} = 1600 \text{ kg/m}^3$ mehr als tausendfach über der Dichte von Luft $\rho_{\text{Luft}} = 1,2041 \text{ kg/m}^3$ liegt, kann die statische Auftriebskraft vernachlässigt werden.

Die Magnuskraft tritt bei rotierenden Körper in einer Fluidströmung auf. Durch die Überlagerung aus Strömungsgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit des Körpers treten in der Grenzschicht zwischen Fluid und Körper Druckunterschiede auf, die eine Kraft senkrecht zur Strömungsrichtung induzieren. Dieser Effekt tritt nur für vergleichsweise schnell rotierende und große Partikel auf (Zenker 1972; Dressler 2007) und wird daher vernachlässigt.

Zwischenmolekulare Kräfte sind Wechselwirkungen zwischen Molekülen. Bekannte Vertreter sind Van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoffbrückenbindungen. Ihre Wirkung nimmt mit zunehmender Partikelgröße ab. Für die zu erwartenden Partikel im Bereich $x_{c \min} = 1 \mu\text{m} \dots 2 \text{mm}$ sind sie vernachlässigbar (Zenker 1972).

Die Corioliskraft ergibt sich aus einer Körperbewegung in einem rotierenden Bezugssystem, bei der die Flugbahn des Körpers nicht parallel zur Rotationsachse verläuft. Bezogen auf den Anwendungsfall der Partikelabsaugung ist die Erdrotation zu beachten. Deren Winkelgeschwindigkeit ist jedoch so gering, dass die Kraft auf einen Partikel vernachlässigt werden kann (Heisel et al. 2008).

Elektrische Kräfte werden durch ein Aufladen von Teilchen erzeugt. Da es sich bei dem CFK-Partikel und dem CFK-Werkstück jedoch um den gleichen Werkstoff handelt, sind statische Aufladungen auszuschließen (Zenker 1972).

Magnetische Kräfte können ausgeschlossen werden, da CFK-Partikel aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften nicht magnetisiert werden können.

4.5 Fazit zur theoretischen Betrachtung und Konkretisierung der Zielstellung

Auf einen Partikel in einer Luftströmung wirken diverse Kräfte, die ihn in seiner Flugbahn beeinflussen. Für eine hinreichend genaue Simulation der Partikelabsaugung sind Widerstands- und Trägheitskräfte, die Gravitationskraft, sowie die Stoßkräfte inkl. Reibungs- und Haftkräfte zu betrachten.

Zur Ermittlung dieser Größen sind genaue Kenntnisse der Partikelgröße und Form, sowie der Partikelgeschwindigkeit und Flugrichtung notwendig. In den experimentellen Untersuchungen sind daher die Partikelgrößenverteilung, die Partikelformen sowie die Auswurfgeschwindigkeiten und Richtungen der Partikel nach dem Zerspanvorgang zu bestimmen.

5 Experimentelle Untersuchungen

Im nachfolgenden Kapitel werden umfangreiche Analysen des Spanguts bei der Fräsbearbeitung von CFK erläutert. Weiter wird der Spangutauswurf systematisch analysiert, um die Spanguterfassung zu optimieren.

5.1 Versuchstechnische Einrichtungen und Messtechnik

Für die experimentellen Untersuchungen wurden folgende Maschinen und Messmittel eingesetzt:

Versuchsmaschinen

Zur Herstellung der Spangutproben wurde eine 3-Achs-Holzbearbeitungsmaschine vom Typ *Lambda BOF* der *HOMAG Group* mit Scherenkinematik eingesetzt (Abbildung 5-1 links). Die Vorschubachsen ermöglichen Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 120 m/s, die Hauptspindel Drehzahlen bis zu 30.000 1/min. Somit konnten mit dieser Maschine alle relevanten Prozessparameter abgebildet werden.



Abbildung 5-1: Versuchsmaschinen *Lambda BOF* (links); Roboterzelle (rechts)

Die Untersuchungen zum Spangutauswurf wurden an einem sechsachsigen Vertikal-Knickarmroboter der *KUKA AG* vom Typ *KR600 R2830F* durchgeführt, der

mit einer Hochfrequenzspindel vom Typ *ES951 L 1612 S* der Firma *HSD* bestückt ist und durch eine *Siemens SINUMERIK 840D* CNC-Steuerung bedient wird (Abbildung 5-1 rechts). Die Roboterzelle bietet einen geeigneten Zugang zur Zerspanstelle, was sie für die Wärmebild- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen prädestiniert.

Korngrößenmessgerät

Für die Analyse des Spanguts wurde das Korngrößenmessgerät *Camsizer XT* der Firma *Retsch GmbH* eingesetzt. Das Gerät nutzt zwei CCD-Kameras, um mittels digitaler Bildanalyse Kenngrößen aus den aufgenommenen Partikelprojektionen zu ermitteln. Das Messgut wird hierzu mithilfe eines Luftstrahls vereinzelt und dem Aufnahmebereich zwischen Beleuchtung und Kameras zugeführt. Die Kameras erfassen die Projektionen der Partikel mit maximal 25 Aufnahmen pro Sekunde (engl. frames per second, fps). Eine der Kameras ist hierbei mit einem Zoomobjektiv ausgestattet, um auch Partikel kleiner Abmessungen aufzunehmen. Der Messbereich beträgt 1 μm - 3000 μm . Die Partikel können anschließend hinsichtlich Form und Größe klassifiziert werden. Basis hierfür bildet die Norm *DIN ISO 9276-6* (2012), die Verfahren zur deskriptiven und quantitativen Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln beschreibt. Im Vergleich zur verbreiteten Siebanalyse bietet das beschriebene optische Verfahren einen erweiterten Messbereich hin zu kleineren Partikeln. Auch können neben dem Partikeldurchmesser weitere Geometriedaten der Partikel wie die Partikellänge oder Sphärizität ermittelt werden.

Wärmebildkamera

Die Betrachtung des Spangutauswurfs im Nahfeld der Zerspanstelle wurde mithilfe einer Wärmebildkamera vom Typ *T7250* der Firma *Teledyne FLIR* durchgeführt. Diese besitzt eine Auflösung von 1024 \times 768 Infrarot-Pixel und eine thermische Empfindlichkeit von < 25 mK bei 30 °C bei einer Aufnahmefrequenz von maximal 50 Hz. Die farbcodierten Wärmebilder (Falschfarbenbilder) erlauben eine deutliche

Abgrenzung der durch die Zerspanungsenergie erwärmten Partikel im Vergleich zum Umfeld. Durch die hohe Auswurfgeschwindigkeit der Partikel erscheinen diese in den Aufnahmen als Strahl, der für die messtechnische Auswertung herangezogen wird.

Hochgeschwindigkeitskamera

Die Betrachtung des Spangutauswurfs unmittelbar an der Zerspanstelle wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ *Fastcam Nova S12* des Herstellers *Photron* durchgeführt. Die Kamera besitzt eine maximale Auflösung von 1024 Pixel x 1024 Pixel bei einer Bildfrequenz von 12.800 fps, welche bei Verringerung der Auflösung auf eine maximale Bildfrequenz von 1.000.000 fps gesteigert werden kann.

REM- und Mikroskopieaufnahmen

Für die Analyse des Spanguts wurde ein Rasterelektronenmikroskop (REM) des Herstellers *Amray Group Ltd.* Typ *1645* genutzt. Die Proben wurden zur Ableitung der Elektronen mit Gold besputtert und so leitfähig gemacht.

Zur Betrachtung größerer Partikel wurde ein digitales Auflichtmikroskop der *KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH* vom Typ *VHX7000* eingesetzt.

5.2 Versuchswerkstoffe und Zerspanwerkzeuge

Für die durchgeführten Zerspanversuche wurde wegen der Vergleichbarkeit durchgängig derselbe CFK-Werkstoff eingesetzt. Die Herstellung der Versuchswerkstoffe erfolgte aus identischen Prepreg-Halbzeugen, die in Schichten in einem Heißpressverfahren ausgehärtet wurden. Als polymerer Matrixwerkstoff dient ein Epoxy-System. Die Werkstoffeigenschaften des Prepregs und der enthaltenen Fasern sind in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Werkstoffdaten des Versuchswerkstoffes²

Prepreg		Faser	
Typ	SGL PREDO PR-UD 600/1250 FT1091 33	Typ	SIGRAVIL C T50- 4.0/ 240 E100
Harzsystem	FT1091	Filamentdurchmesser	7 μm
Harzmasseanteil	33 %	Schlichte	Epoxy
Faserflächengewicht	600 g/m^2	Anzahl Filamente	50.000
Prepregflächengewicht	896 g/m^2	Zugfestigkeit	4.000 MPa
Lagenstärke	0,6 mm	E-Modul (Zug)	240 GPa

Für die Hauptversuche wurde ein bidirektionales Gelege ($0^\circ/90^\circ$) genutzt, das aus zehn Einzellagen aufgebaut war und eine Gesamtstärke von 6 mm aufwies. Für die Zerspanversuche zur Untersuchung des Einflusses des Faserorientierungswinkels wurden unidirektionale Gelege (0°) eingesetzt, welche ebenfalls aus zehn Einzellagen aufgebaut waren und eine Gesamtstärke von 6 mm besaßen. Alle Versuchswerkstoffe wiesen eine Dichte von $1,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ auf.

Für die Fräsversuche wurden Schaftfräser mit einem Durchmesser $d = 8 \text{ mm}$ ausgewählt, die einem weitverbreiteten Werkzeugdurchmesser im industriellen Einsatz entsprechen (Tabelle 5-2).

Das Werkzeug mit der Bezeichnung F1 wurde als Referenzwerkzeug definiert. Bis auf das Werkzeug F2 sind alle Werkzeuge aus WC-Co-Hartmetall hergestellt. Das Werkzeug F2 besitzt hingegen zwei Schneiden aus polykristallinem Diamant (PKD), die auf einen Hartmetallschaft aufgelötet sind. Die Werkzeuge F3 – F5 besitzen jeweils acht Schneiden, das Werkzeug F8 zehn Schneiden. Das Werkzeug F3 weist einen positiven Drallwinkel auf, die anderen Versuchswerkzeuge sind gerade genutet. An den Schneiden der Werkzeug F3, F4 und F6 sind sogenannte Faserfänger in Form kleiner Zähne an den Schneiden eingeschliffen. An Werkzeug

² Datenblätter der SGL Carbon SE

F5 wurde dieses Merkmal nicht vorgesehen. Die Werkzeuge F7 – F9 weisen alle eine Pyramidenverzahnung auf, unterscheiden sich jedoch in der Zähnezahl z .

Tabelle 5-2: Daten der eingesetzten Schaftfräser (Teil 1)³

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Schneidkantenradius r_β / μm	9,2	10,1	7,2	8,9	9,8	10,1	-	-	-
Freiwinkel α / $^\circ$	20	15	19	20	20	21	-	-	-
Keilwinkel β / $^\circ$	60	65	49	50	48	51	-	-	-
Spanwinkel γ / $^\circ$	10	0	20	20	22	18	-	-	-
Drallwinkel λ / $^\circ$	0	0	8,9	0	0	0	-	-	-
Zähnezahl z / -	2	2	8	8	8	10	12	10	6
Schneidstoff	HM	PKD	HM	HM	HM	HM	HM	HM	HM
Draufsicht Werkzeug									
Seitenansicht Werkzeug									

Die Werkzeuge F10 – F13 (Tabelle 5-3) sind in der gleichen Geometrie wie das Werkzeug F1 geschliffen, wobei unterschiedliche Schneidkantenverrundungen r_β vorgesehen waren, um den Einfluss des fortlaufendem Verschleißes auf die Spanbildung zu untersuchen.

³ Die Geometriedaten der Werkzeug F7 – F9 sind wegen der Pyramidenverzahnung nicht darstellbar

Tabelle 5-3: Daten der eingesetzten Schaftfräser (Teil 2)

	F10	F11	F12	F13
Schneidkantenverrundung r_β / μm	13,9	23,3	29,8	40,7

5.3 Versuchsablauf und Durchführung

Herstellung und Untersuchung des Spanguts

Die Herstellung des Spanguts erfolgte in einer gekapselten Zerspanvorrichtung, die auf dem Maschinentisch der Versuchsmaschine *Lambda BOF* montiert wurde, um alle Spanpartikel innerhalb der Kapselung zu erfassen. Diese ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Vorrichtung ist aus einem Aluminiumbehälter und einer metallischen Deckplatte mit Spindelführung aufgebaut. Der Behälter dient einerseits zur Aufnahme des Spanguts und übernimmt andererseits durch ein verschraubtes Spannstück die Funktion der Werkstückspannung. Für eine vollständige Entnahme des Spanguts wurden die Innenseiten des Behälters poliert und der Behälter geerdet, sodass elektrostatische Anhaftungen vermieden werden.

Die Deckplatte dichtet den Behälter auf der Oberseite ab, ermöglicht der Spindel jedoch Verfahrbewegungen in allen drei Raumrichtungen, ohne die Deckplatte anzuheben.

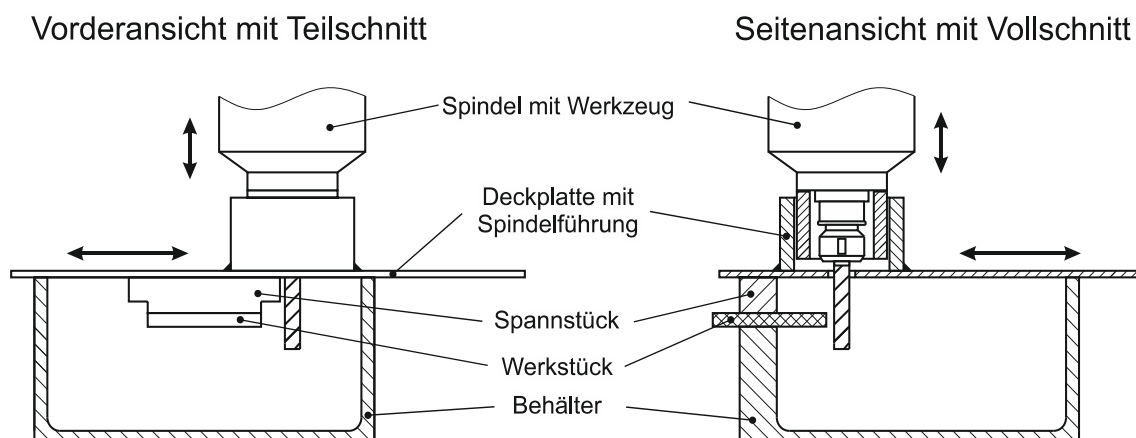


Abbildung 5-2: Zerspanvorrichtung zur Herstellung des Spanguts

Da dem Stand der Wissenschaft nach keine ausreichenden Erkenntnisse zum Einfluss der verfahrenstechnischen Einstellgrößen auf die Partikelgrößenverteilungen und die Partikelgeometrien vorliegen, wurde in Kapitel 5.4 eine systematische Bandbreite an Bearbeitungsparametern untersucht. Die Zerspanversuche wurden für jede Parameterkombination jeweils zweimal wiederholt, wobei die Versuche in einer randomisierten Reihenfolge durchgeführt wurden.

Für die Parameterstudien zum Fräsen von CFK wurde das Werkzeug F1 eingesetzt. Die untersuchten verfahrenstechnischen Einstellgrößen sind in Tabelle 5-4 aufgeführt. Die Parametervariation erfolgte einfaktoruell. Die Standardparameter sind in der Tabelle unterstrichen gekennzeichnet.

Tabelle 5-4: Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung des Spanguts beim Fräsen

	Untersuchte Einstellgrößen									
Schnittgeschwindigkeit v_c / m/min	20	40	65	100	<u>180</u>	300	500	750		
Zahnvorschub f_z / mm	0,005		0,01		0,03		<u>0,05</u>	0,07		0,1
Arbeitseingriff a_e / mm	2			4			6		<u>Volleingriff</u>	
Faserorientierungswinkel ϕ / °	<u>0/90</u>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	

Die in Tabelle 5-2 aufgeführten Werkzeuge F2 – F6 wurden mit den Standardparametern betrieben. Eine Ausnahme bilden die pyramidenverzahnten Werkzeuge F7 – F9, die unabhängig der Zähnezahl entsprechend der Herstellerangaben mit einer einheitlichen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 2,86$ m/min eingesetzt wurden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Versuchsmatrix für die Parametervariationen der Fräsversuche.

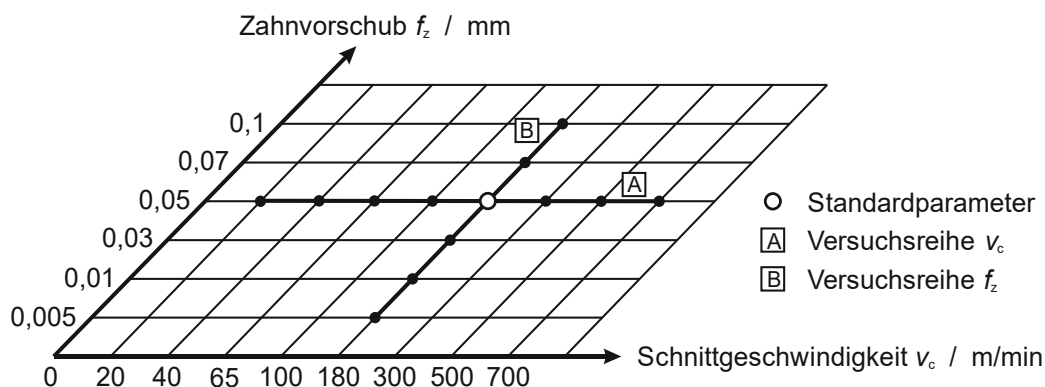


Abbildung 5-3: Versuchsmatrix der Parametervariation für die Fräsuntersuchungen

Die Analyse des Spanguts erfolgte anhand der Messgrößen Partikeldurchmesser und Partikellänge sowie des aus den beiden Größen abgeleiteten Längen-/Breitenverhältnisses. Zur Bestimmung der Partikellänge wurde der maximale Feret-Durchmesser $x_{Fe \max}$ und für den Partikeldurchmesser der Kennwert der minimalen Sehnenlänge $x_{c \min}$ herangezogen (Abbildung 5-4). Der Feret-Durchmesser x_{Fe} wird durch den Abstand zweier paralleler Tangenten an die Partikelkontur bestimmt. Der Abstand zwischen den am weitesten voneinander entfernten parallelen Tangenten beschreibt den maximalen Feret-Durchmesser $x_{Fe \max}$. Die minimale Sehnenlänge $x_{c \min}$ ist die kleinste aller maximalen Sehnen $x_{c \ n, \max}$ der Partikelkontur. Nach *Westermann* (2016) bildet die minimale Sehnenlänge $x_{c \min}$ die beste Näherung zur Siebanalyse und ermöglicht so eine Korrelation der optischen Messwerte mit dem verbreiteten Verfahren der Siebanalyse.

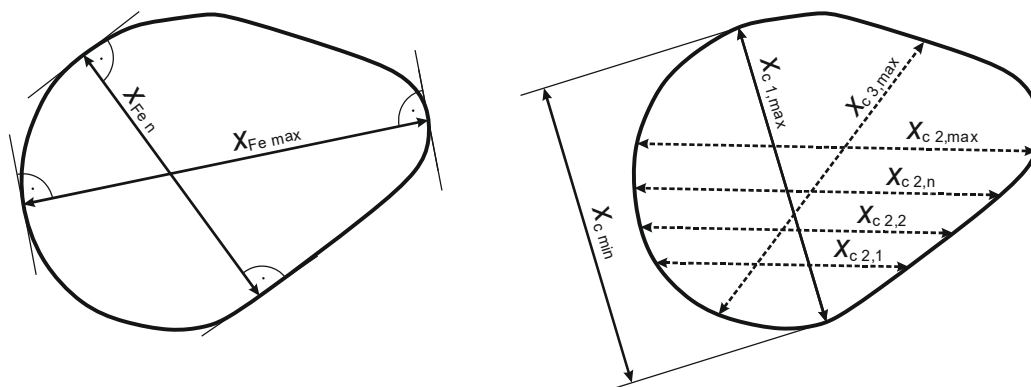


Abbildung 5-4: Bestimmung der Partikelkenngößen

Das Längen-/Breitenverhältnis l/b wird aus dem Quotienten der beiden beschriebenen Größen gebildet:

$$\frac{l}{b} = \frac{x_{\text{Fe max}}}{x_{\text{C min}}}$$

Formel 5-1

Die Beschreibung der Messgrößen erfolgt in der vorliegenden Arbeit in Form der Mengenmaße Verteilungsdichte $q(x)$ und der Verteilungssumme $Q(x)$ in Abhängigkeit der Partikelgröße x . Die Verteilungssumme $Q(x)$ gibt hierbei den Mengenanteil der Partikel an, die kleiner oder gleich der Partikelgröße x_i sind, für $1 \leq i \leq n$ mit $n = \text{Anzahl der Partikel}$.

Die Ableitung der Verteilungssumme bildet die Verteilungsdichte:

$$q(x) = \frac{dQ(x)}{dx}$$

Formel 5-2

Für einen Intervall $x_{i+1} - x_i$ kann so ein Mengenanteil der Messgröße bestimmt werden:

$$\bar{q}(x_{i+1} - x_i) = \frac{Q(x_{i+1}) - Q(x_i)}{x_{i+1} - x_i}$$

Formel 5-3

Zur übersichtlicheren Darstellung wird anstelle des Intervalls $x_{i+1} - x_i$ häufig die Klassenmitte \bar{x}_i eingesetzt:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$$

Formel 5-4

Für Formel 6-3 ergibt sich daraus unter Anwendung der Formel 6-4 folgende Beschreibung der Verteilungsdichte:

$$\bar{q}(\bar{x}_i) = \frac{Q(x_{i+1}) - Q(x_i)}{x_{i+1} - x_i}$$

Formel 5-5

Ein Beispiel für die volumenbezogene Verteilungssumme $Q(x)$ und die Verteilungsdichte $q(x)$ sind in Abbildung 5-5 dargestellt.

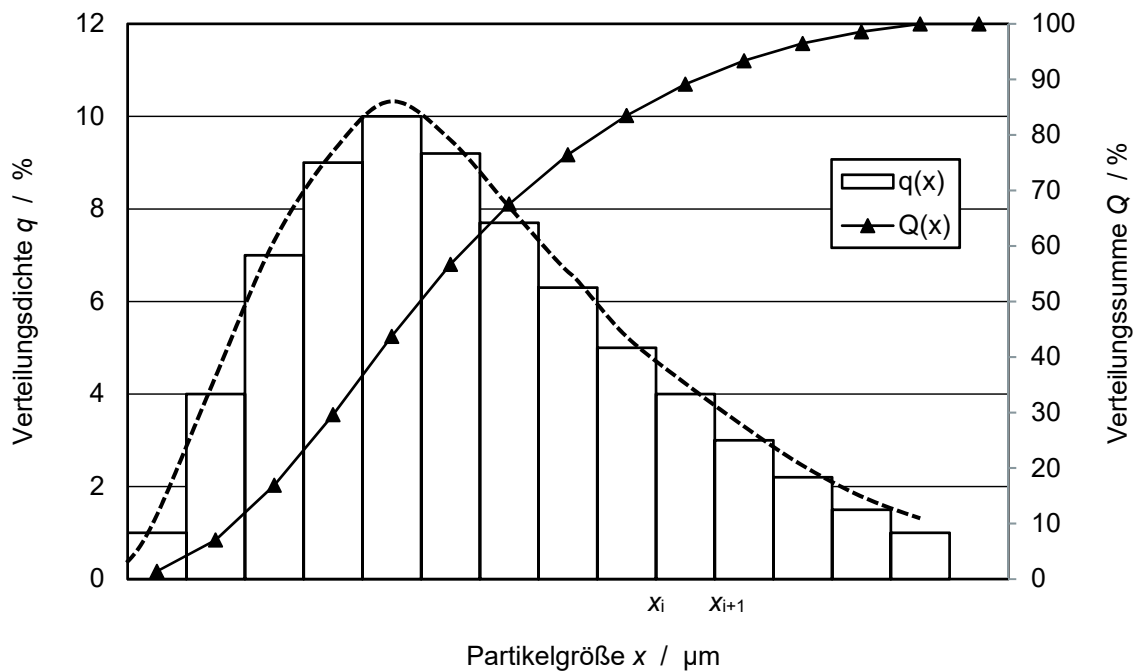


Abbildung 5-5: Verteilungsdichte q und Verteilungssumme Q einer Partikelmessung

Abhängig vom gewählten Messgerät oder der geforderten Zielstellung können die Mengenmaße Verteilungsdichte $q(x)$ und Verteilungssumme $Q(x)$ anhand unterschiedlicher Mengenarten ermittelt werden. Diese werden mit dem Index r beschrieben und nach *DIN ISO 9276-2* (2006) wie folgt definiert:

- Anzahl (mit dem Mengenarten-Index $r = 0$),
- Länge (mit dem Mengenarten-Index $r = 1$),
- Fläche oder Oberfläche (mit dem Mengenarten-Index $r = 2$) oder
- Volumen oder Masse (mit dem Mengenarten-Index $r = 3$)⁴.

⁴ Einfachheitshalber wird bei dieser Mengenart nachfolgend immer nur der Massenbezug genannt, obwohl auch der Volumenbezug gültig wäre.

Die Wahl der Mengenart übt einen maßgeblichen Einfluss auf die Verteilungsfunktionen und ermittelten Kenngrößen aus. Beispielsweise ergeben Siebanalysen massenbezogene Kennwerte, die einen großen Partikel im Vergleich zu einem kleineren Partikel um das Vielfache seiner Masse stärker gewichten. Die Auswahl der Mengenart bzw. des Analyseverfahrens ist somit an die spätere Nutzung der Kennwerte anzupassen. Verdeutlicht wird dies an der Darstellung der Anzahl Q_0 und der Massenverteilungssummen Q_3 einer Partikelmessung von CFK-Spangut (Abbildung 5-9). Die Untersuchungen der Partikelgrößenverteilungen in Kapitel 5.4 dienen der späteren Auslegung der Absaugsysteme in Kapitel 5. Die theoretische Analyse der Spangutförderung in Kapitel 4 hat gezeigt, dass hierfür die massereichsten Partikel betrachtet werden müssen. Daher wird in Kapitel 5.4 eine volumen- bzw. massenbezogene Bewertung des Spanguts durchgeführt.

Die Darstellung der Partikeldurchmesser $x_{c,min}$ erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln anhand der 10 %-, 50 %- und 90 %-Quantile, die exemplarisch für eine Spangutprobe in Abbildung 5-9 rot gekennzeichnet sind. Diese werden aus der Umkehrfunktion der Verteilungssumme bestimmt und repräsentieren jeweils den größten Durchmesser der 10 %, 50 % bzw. 90 % kleinsten Partikel, was die Beurteilung einer Spangutprobe anhand weniger Kennzahlen ermöglicht. Nachfolgende Nomenklatur wird hierfür definiert:

- $x_{c,min,Qr=0,1}$: Partikeldurchmesser $x_{c,min}$ für $Q_r(x) = 10 \%$
- $x_{c,min,Qr=0,5}$: Partikeldurchmesser $x_{c,min}$ für $Q_r(x) = 50 \%$
- $x_{c,min,Qr=0,9}$: Partikeldurchmesser $x_{c,min}$ für $Q_r(x) = 90 \%$

Die Untersuchungen aus Kapiteln 5.4 zeigen, dass die Verteilung der Längen-/Breitenverhältnisse für die betrachteten Zerspanvorgänge eine enge Normalverteilung beschreibt. Aufgrund dessen erfolgt die Darstellung des Breiten-/Längenverhältnisses in Form des Mittelwertes. Diese erfolgt für Kapiteln 5.4 volumen- bzw. massenbezogen mit V_i als dem Volumen des i -ten Partikels und n als Anzahl der Partikel nach Formel 5-6.

$$\frac{\bar{l}}{\bar{b}_3} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \frac{l}{b}}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Formel 5-6

Untersuchung des Spangutauswurfs

Die Richtungsvektoren und die Partikelgeschwindigkeiten des Spangutauswurfs bilden neben der Partikelgrößenverteilung und Partikelgeometrie wesentliche Eingangsgrößen für die simulative Auslegung und Optimierung von Spanguterfassungssystemen. Deren Untersuchungen wurden an der Roboterzelle mithilfe der Hochgeschwindigkeitskamera und der Wärmebildkamera durchgeführt. Zur räumlichen Betrachtung des Spangutauswurfs kam eine wandelbare Spannvorrichtung zum Einsatz, die sowohl einen Blick auf die Arbeitsebene als auch auf die Werkzeugbezugs Ebene ermöglichte.

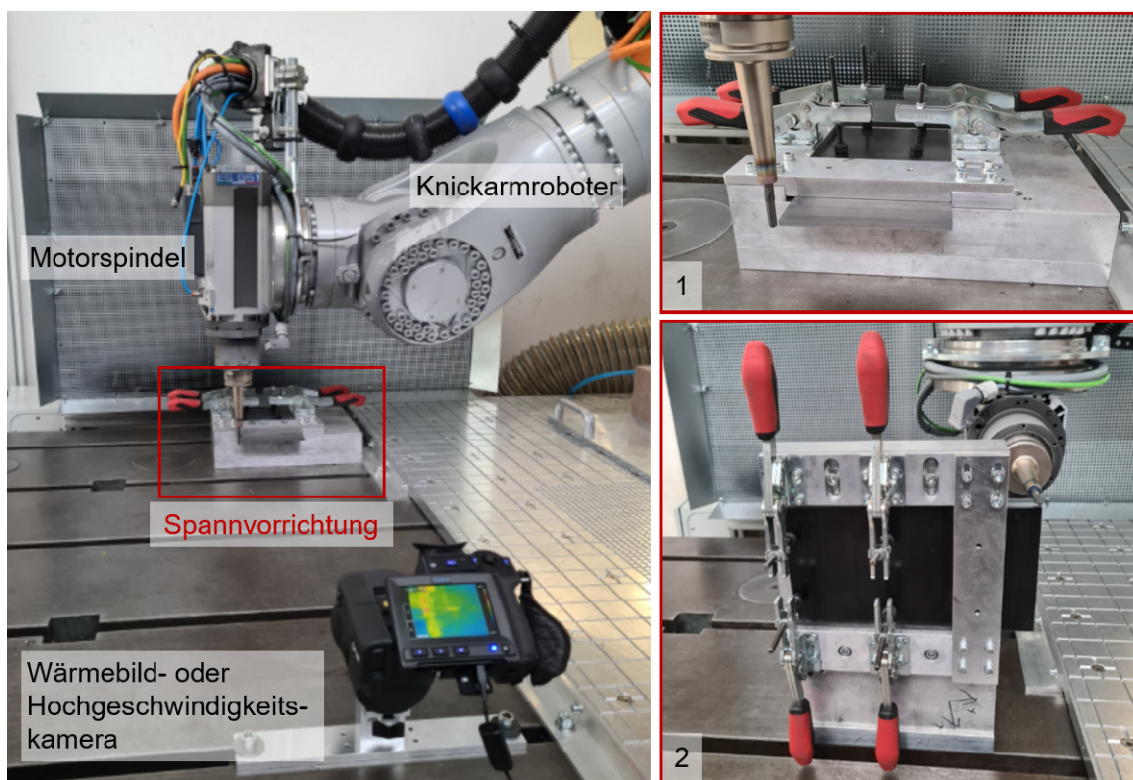


Abbildung 5-6: Versuchsaufbau zur Analyse des Spangutauswurfs mit Spannvorrichtung zur Untersuchung des vertikalen (1) und des horizontalen Spangutauswurfs (2)

Der Beobachtungsbereich der Kameras beschränkte sich auf den Nahbereich der Werkzeuge. Für diesen Bereich wird davon ausgegangen, dass die kinetische Energie

der Partikel überwiegt, während alle anderen auf den Partikel wirkenden Kräfte wie Gewichts- oder Luftwiderstandskräfte keinen relevanten Einfluss auf die Partikelflugbahn nehmen. Der Versuchsaufbau ist in der nachfolgenden Abbildung für beide Spangutsituationen dargestellt.

Zur Analyse des Spangutauswurfs wurden die verfahrenstechnischen Parameter Schnittgeschwindigkeit, Zahnvorschub und Arbeitseingriff betrachtet, wobei die in Tabelle 5-5 aufgeführten Einstellgrößen berücksichtigt wurden. Die Parametervariation erfolgte analog zur Versuchsmatrix zur Analyse des Spanguts einfaktoriell (Abbildung 5-3). Die Standardparameter sind in Tabelle 5-5 unterstrichen dargestellt. Die Versuche wurden randomisiert und je Parameterkombination zweimal wiederholt. Für jeden Versuch wurden anschließend zwei Wärmebildaufnahmen ausgewertet, sodass je Parametersatz ein Mittelwert aus 6 Einzelmesswerten gebildet wurde.

Tabelle 5-5: Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung des Spangutauswurfs

	untersuchte Einstellgrößen							
Schnittgeschwindigkeit v_c / m/min	20	40	65	100	<u>180</u>	300	500	750
Zahnvorschub f_z / mm	0,005	0,01	0,03	<u>0,05</u>	0,07	0,1		
Arbeitseingriff a_e / mm	2	4	6	<u>Volleingriff</u>				

Die Auswertung des Spangutauswurfs in der Arbeitsebene (nachfolgend horizontaler Spangutauswurf genannt) erfolgte in Anlehnung an *Heisel et al.* (2011) anhand der Größen mittlerer Entleerungswinkel und horizontaler Spangutstrahlöffnungswinkel, die in Abbildung 5-7 dargestellt sind.

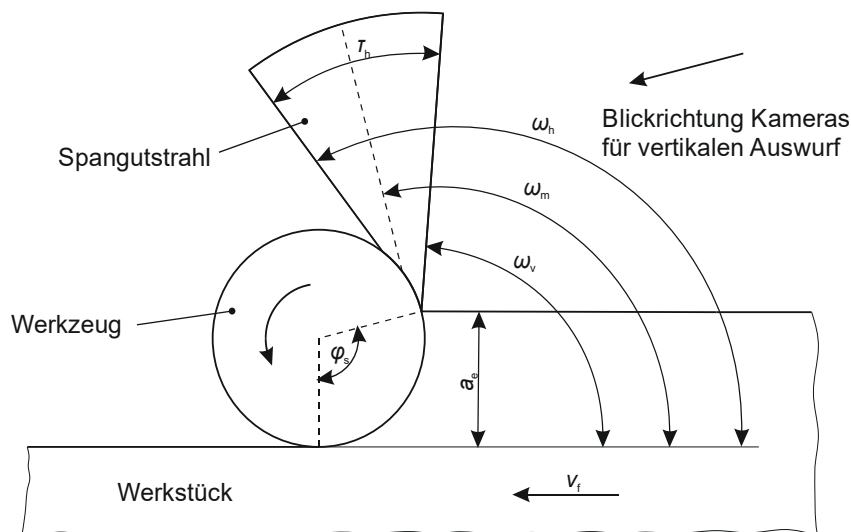


Abbildung 5-7: Bestimmung des mittleren Entleerungswinkels und des Spangutstrahlöffnungswinkels (Ansicht von unten)

Der mittlere Entleerungswinkel ω_m wird aus dem Mittelwert des vorderen Entleerungswinkel ω_v und des hinteren Entleerungswinkels ω_h gebildet.

$$\omega_m = \frac{\omega_v + \omega_h}{2}$$

Formel 5-7

Der horizontale Spangutstrahlöffnungswinkel τ_h ergibt sich als Differenz von hinterem Entleerungswinkel ω_h und vorderem Entleerungswinkel ω_v .

$$\tau_h = \omega_h - \omega_v$$

Formel 5-8

Zusätzlich wird der Winkel des Schnittbogens φ_s betrachtet, der den Winkel des Schneidenaustritts aus dem Werkstück beschreibt.

In der Werkzeugbezugsebene erfolgte die Betrachtung des vertikalen Spangutauswurfs anhand der Größen mittlerer Auswurfwinkel und vertikaler Spangutstrahlöffnungswinkel. Diese Größen sind in Abbildung 5-8 dargestellt und werden nachfolgend definiert.

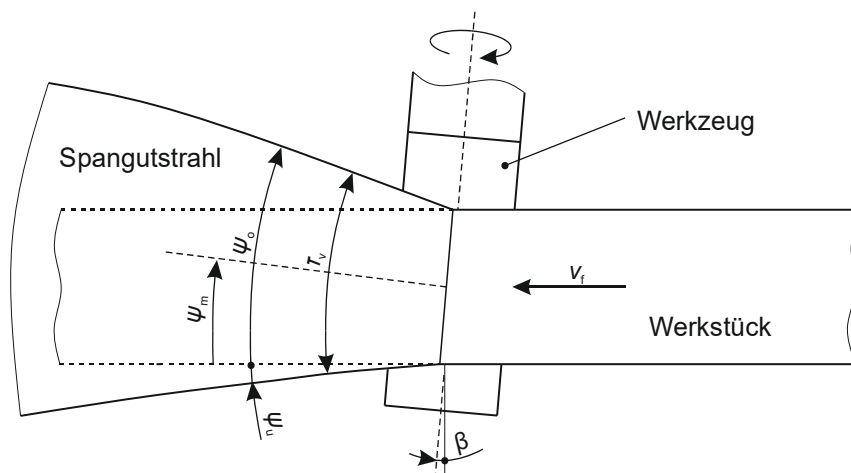


Abbildung 5-8: Bestimmung der Auswurfwinkel und des vertikalen Spangutstrahlöffnungswinkels (Seitenansicht)

Analog zum horizontalen Spangutauswurf wird der mittlere Auswurfwinkel ψ_m aus dem Mittelwert des oberen Auswurfwinkels ψ_o und des unteren Auswurfwinkels ψ_u gebildet.

$$\psi_m = \frac{\psi_u + \psi_o}{2}$$

Formel 5-9

Der vertikale Spangutstrahlöffnungswinkel τ_v ist die Differenz aus unterem Auswurfwinkel ψ_u und oberem Auswurfwinkel ψ_o .

$$\tau_v = \psi_u - \psi_o$$

Formel 5-10

5.4 Analyse des Spanguts

Die Analyse des CFK-Spanguts zeigt eine große Anzahl an Kleinstpartikeln. So weisen in allen analysierten Spangutproben mehr als 90% der Partikel einen Partikeldurchmesser $x_{c\min} < 100 \mu\text{m}$ auf. Dies ist exemplarisch am steilen Anstieg der Kurve der anzahlbezogenen Verteilungssumme Q_0 in Abbildung 5-9 zu sehen, die

die Messwerte einer Spanprobe zeigt, die mit dem Standardwerkzeug F1 unter Anwendung der Standardparameter hergestellt wurde.

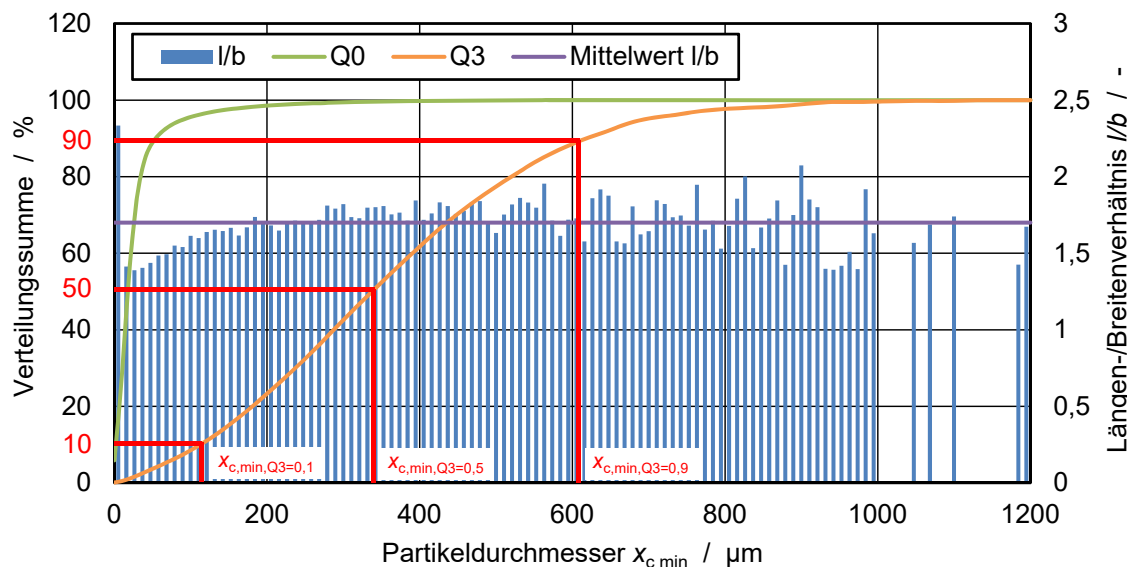


Abbildung 5-9: Anzahlbezogene (Q_0) und volumenbezogene Verteilungssumme (Q_3) sowie Längen-/Breitenverhältnisse (l/b) für eine Spangutprobe

Die für die Spanguterfassung relevante volumen- (und damit massenbezogene) Verteilungssumme Q_3 weist für alle Spangutproben die charakteristische S-förmige Verteilungskurve mit einer maximalen Steigung bzw. einer vorherrschenden Partikelgröße im Bereich $x_{c\min} = 220 \mu\text{m} \dots 400 \mu\text{m}$ auf. Das zu jedem Partikelgrößenintervall korrespondierende Längen-/Breitenverhältnis zeigt die höchsten Werte für Partikel mit einem Partikeldurchmesser von $x_{c\min} = 0 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$. Dies ist auf Bruchstücke von Einzelfasern zurückzuführen, die mit einem Filamentdurchmesser von $7 \mu\text{m}$ in diesem Größenbereich liegen und in REM-Aufnahmen klar erkennbar sind (Abbildung 5-21). Kleinstpartikel weisen eine kompakte Form auf und werden mit zunehmender Partikelgröße langgestreckter, bevor etwa beim Wert des 10%-Quantils der Durchschnittswert der Spangutprobe erreicht wird, der für alle Partikelgrößen annähernd konstant ist. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der geringeren Anzahl großer Partikel in den oberen Partikelgrößenintervallen die Volatilität der Längen-/Breitenverhältnisse zunimmt. Aufgrund der klaren Tendenz zu einem Mittelwert in Verbindung mit einer kleinen Standardabweichung (für die dargestellte Spangutprobe beispielsweise $\sigma = y_{0,145}$)

ist die Nutzung des Mittelwerts für die vorliegende Arbeit jedoch hinreichend genau, um repräsentative Partikel in den Simulationen zu modellieren.

Für die Fräsbearbeitung von CFK kommen unterschiedliche Werkzeugtypen zum Einsatz, wie sie in Tabelle 5-2 aufgelistet sind. Deren Einfluss auf das entstehende Spangut unter Berücksichtigung konstanter Zahnvorschübe zeigt Abbildung 5-10.

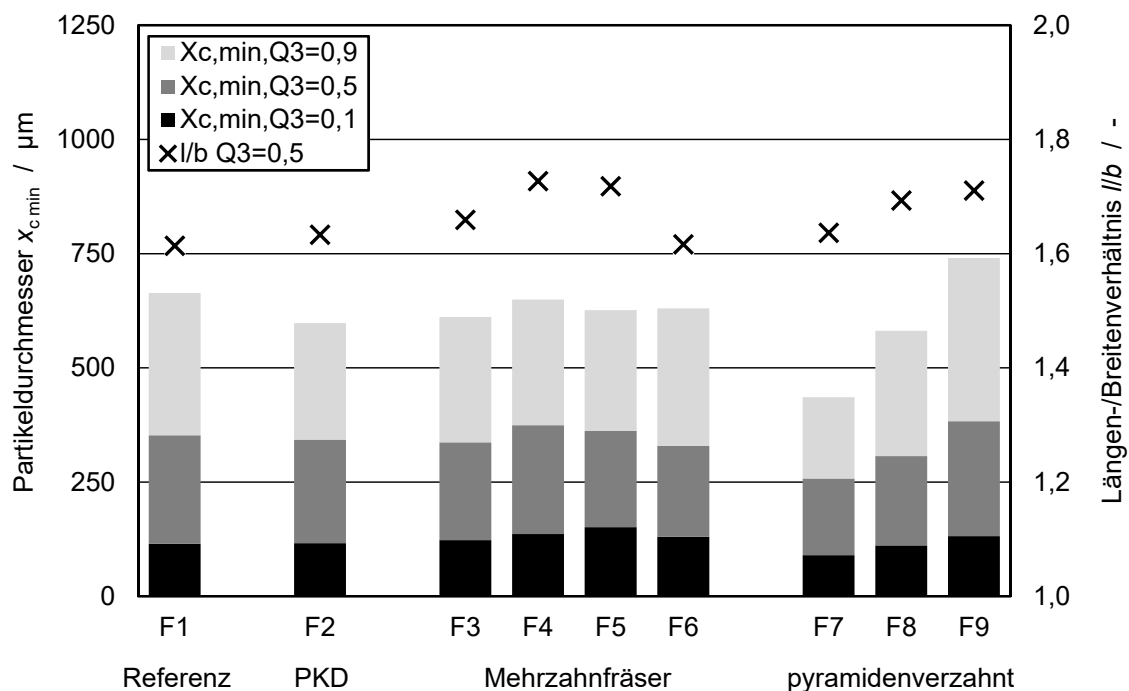


Abbildung 5-10: Partikelgrößenverteilung für unterschiedliche Fräswerkzeuge

Die Messwerte aller Werkzeuge weisen Partikelgrößen deutlich oberhalb des Zahnvorschubs von $f_z = 50 \mu\text{m}$ auf. Das mittlere Längen-/Breitenverhältnis variiert für alle Werkzeuge im Bereich $l/b = 1,61 \dots 1,73$. Die Entstehung größerer Partikel als dem Zahnvorschub als maßgeblichen Wert zur Beschreibung der Spanungsdicke ergibt sich aus dem Durchlaufen von Fasertrennwinkel, die den Ausbruch größerer Partikel begünstigen und durch den mehrschichtigen Gelegeaufbau, der ebenfalls zu größeren Partikelabspaltungen führt (siehe Kapitel 2.1.2 und *Rummenhüller* (1996) und *Sheikh-Ahmad* (2009)). Durch die massen- bzw. volumenbezogene Zählweise der Partikel werden zudem die bekanntermaßen überwiegend anfallenden Feinstpartikel weniger stark gewichtet.

Die Fräswerkzeuge mit durchgehenden Schneiden (F1 bis F6) erzeugen Spangut mit ähnlichen Eigenschaften hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und Längen-/Breitenverhältnis. Die Anzahl der Schneiden (F3 zu F6), der Schneidstoff (F1 zu F2), der Drallwinkel (F3 zu F4) und die Strukturierung der Hauptschneide zur Vermeidung von Ausfransungen (F3 zu F5) beeinflussen die Spanbildung nur unwesentlich. Bei den pyramidenverzahnten Router-Fräsern (F7 bis F9) zeigt sich, dass Verzahnungen mit weniger Pyramiden-Schneiden am Werkzeug zu einer Zunahme der Partikelgrößen führen. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass die Werkzeuge trotz unterschiedlicher Verzahnung mit der gleichen Vorschubgeschwindigkeit eingesetzt wurden.

Die in den Untersuchungen beobachtete ähnliche Charakteristik des Spanguts ist primär auf das Sprödbbruchverhalten des Matrixwerkstoffs zurückzuführen. Während bei der Bearbeitung von duktilen Werkstoffen die Geometrie des Schneidkeils, der Drallwinkel, Spanbrecher oder andere geometrische Merkmale des Werkzeugs die Spanbildung und Spanformung maßgeblich beeinflussen, wird die Spanbildung von CFK vorwiegend durch den Faserorientierungswinkel, das Matrixmaterial, die Bearbeitungsparameter und den Schneidenradius bestimmt (Sheikh-Ahmad 2009; Schledjewski et al. 2014; Zimmermann et al. 2016). Dem Spanwinkel wird ebenfalls ein Einfluss auf die Spanbildung beigemessen, wobei die Unterschiede primär zwischen positiven und negativen Spanwinkeln liegen (Wang et al. 1995; Arola et al. 1996; Ramulu 1997). Da die untersuchten Fräswerkzeuge jedoch alle positive Spanwinkel besitzen, wird die Spanbildung nachfolgend nur anhand der Größen Faserorientierungswinkel, Zahnvorschub und Schnittgeschwindigkeit analysiert.

Einfluss des Zahnvorschubs und des Schneidkantenradius

Beim Fräsen im Vollschnitt ergibt sich eine zyклоide Bewegung der Schneide durch die Überlagerung aus Werkzeugrotation und Vorschubbewegung. Zwei aufeinanderfolgende Schneidenflugkreise bilden hierbei einen sichelförmigen

Bereich, der durch die Schneide abgetragen wird. Die Spandicke h variiert hierbei zwischen $h = 0$ mm und einem Maximalwert, der dem Zahnvorschub f_z in Abhängigkeit des Vorschubrichtungswinkels φ entspricht.

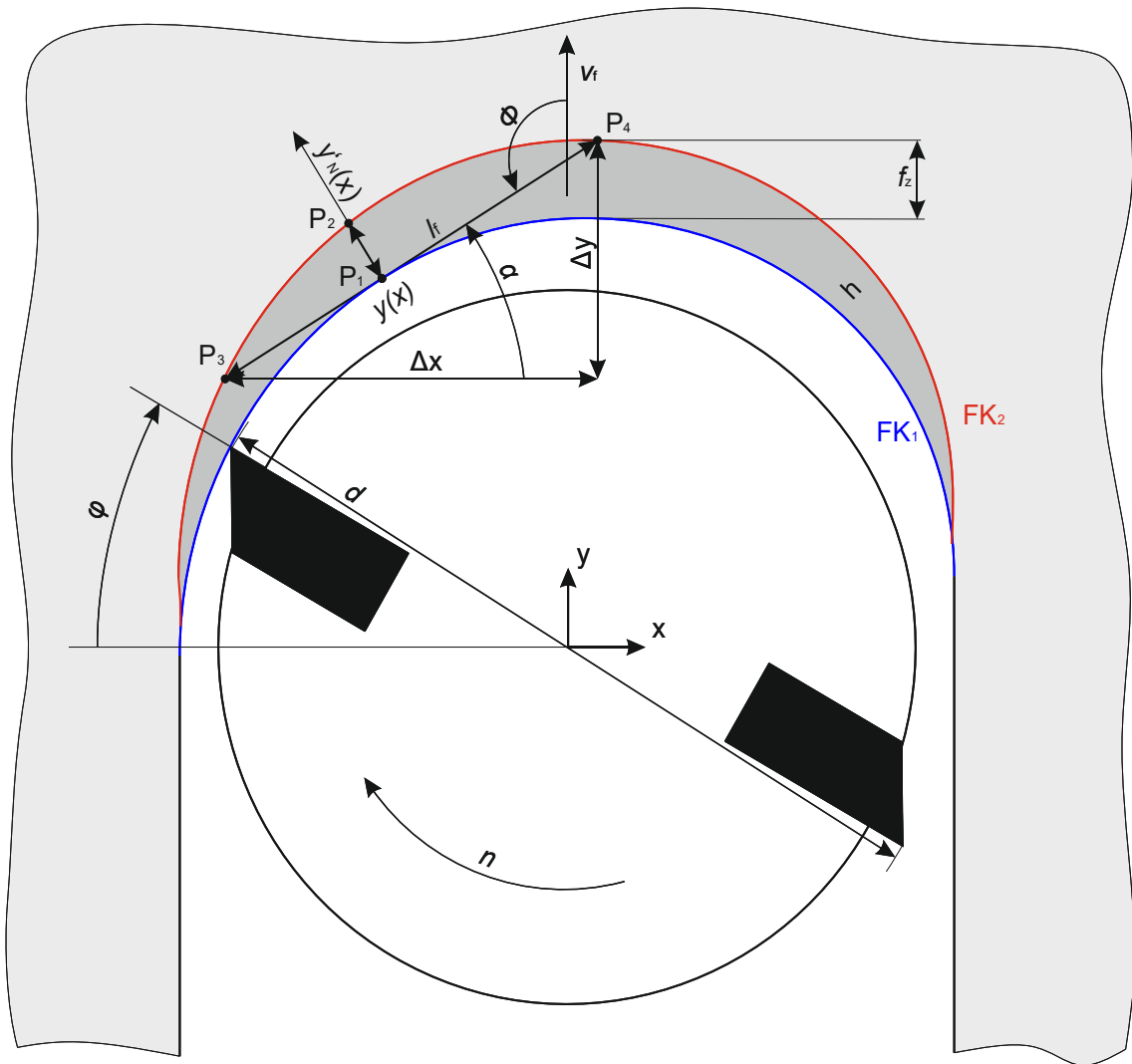


Abbildung 5-11: Eingriffsverhältnisse beim Umwälzfräsen

Zur Analyse der Spandicke wird die Schneidenbewegung in der Werkzeug-Bezugsebene anhand des Werkzeugdurchmessers d , des Vorschubs f , der Schneidenanzahl z und des Vorschubrichtungswinkels φ in X- und Y-Richtung mithilfe der Formel 5-11 und Formel 5-12 beschrieben.

$$x = -\frac{d}{2} * \cos \varphi$$

Formel 5-11

$$y = \frac{d}{2} * \sin \varphi + f * \frac{\varphi}{z * \pi}$$

Formel 5-12

Durch Gleichsetzen der beiden Formeln lässt sich die Schneidenposition auf dem Flugkreis wie folgt berechnen:

$$y(x) = \frac{d}{2} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{-2x}{d} \right) \right) + f \frac{\cos^{-1} \left(\frac{-2x}{d} \right)}{z\pi} + \frac{f}{z}$$

Formel 5-13

Die Steigung der Kurve wird durch die Ableitung der Formel 5-13 und einer Transformation um 90° erreicht.

$$y'_T(x) = \frac{-1}{\left(\frac{-2x}{d\sqrt{1-\frac{4x^2}{d^2}}} + \frac{f}{zd\sqrt{1-\frac{4x^2}{d^2}}\pi} \right)}$$

Formel 5-14

Für die Berechnung der Spandicke wird aus Formel 5-13 und Formel 5-14 die allgemeine Normalengleichung erstellt.

$$y_{N,a}(x) = \frac{-1}{\left(\frac{-2a}{d\sqrt{1-\frac{4a^2}{d^2}}} + \frac{f}{zd\sqrt{1-\frac{4a^2}{d^2}}\pi} \right)} (x - a) + \frac{d}{2} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{-2a}{d} \right) \right) + f \frac{\cos^{-1} \left(\frac{-2a}{d} \right)}{z\pi}$$

$$\text{mit } a = \left\{ a \in \mathbb{Q} \mid -\frac{a}{2} \leq a \leq \frac{a}{2} \right\}$$

Formel 5-15

Durch Schnitt dieser Geraden mit dem nachfolgenden Schneidenflugkreis FK_2 ergibt sich die Spandicke aus dem Abstand des Schnittpunkts (P_2) mit Ursprung auf dem Schneidenflugkreis FK_1 (P_1). Diese ist für unterschiedliche Zahnvorschübe in Abhängigkeit des Vorschubrichtungswinkels φ in Abbildung 5-12 dargestellt.

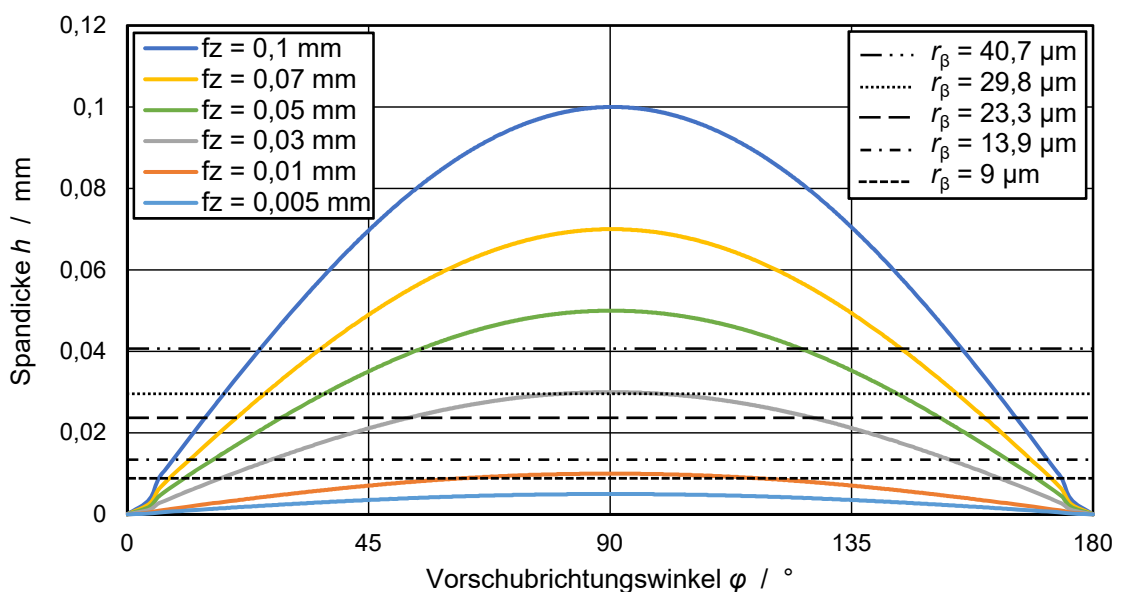


Abbildung 5-12: Spandicke für unterschiedliche Zahnvorschübe in Abhängigkeit des Schnittbogenwinkels

In Abhängigkeit des Zahnvorschubs und des Verschleißzustands des Werkzeugs liegt die Spandicke in Teilen oder vollständig unterhalb des Schneidkantenradius. In Orthogonalschnittversuchen wurde nachgewiesen, dass der Werkstoff in diesem Fall der Schneide ausweicht und Deformationen unterhalb der Schneide entstehen (siehe Kapitel 2.1.2 sowie (Kaneeda 1991; Rummenhölter 1996; Schütte 2014; Lopresto et al. 2016)). Nach Kaneeda (1991) verhält sich die Deformationstiefe hierbei proportional zum Schneidkantenradius und kann je nach Eingriffswinkel im Wert dem doppelten Schneidkantenradius entsprechen. Im wiederkehrenden Eingriff der Fräsbearbeitung führt die fortwährende Kompression und Deformation zu einer Ermüdung des Werkstoffs in Form von Zwischenfaserbrüchen und Faserbrüchen. Trifft ein durch einen nachfolgenden Schneideneingriff initiiertes

Risswachstum auf diese Vorschädigungen, kommt es zu einem abrupten Ende der Rissausbreitung bei gleichzeitigem Ablösen eines kleineren Partikels.

Bei der Zerspanung von CFK unterliegen die Werkzeuge einem fortwährenden Verschleiß, der zu einer Zunahme des Schneidkantenradius führt. Am Beispiel des in der industriellen Nutzung häufig eingesetzten und daher für diese Arbeit gewählten Standard-Zahnvorschubs $f_z = 0,05$ mm ist der Einfluss des Werkzeugverschleißes in Abbildung 5-12 ersichtlich. Während bei Erstnutzung des Werkzeugs ($r_\beta = 9$ μm) die Spandicke fast vollständig oberhalb des Schneidkantenradius liegt, ist dieses Verhältnis am Standzeitende ($r_\beta = 40,9$ μm) nahezu umgekehrt.

Der zunehmende Schneidkantenradius führt zu einer stärkeren Ausprägung der beschriebenen Vorschädigungen und zur Bildung von feinem Spangut (Abbildung 5-13).

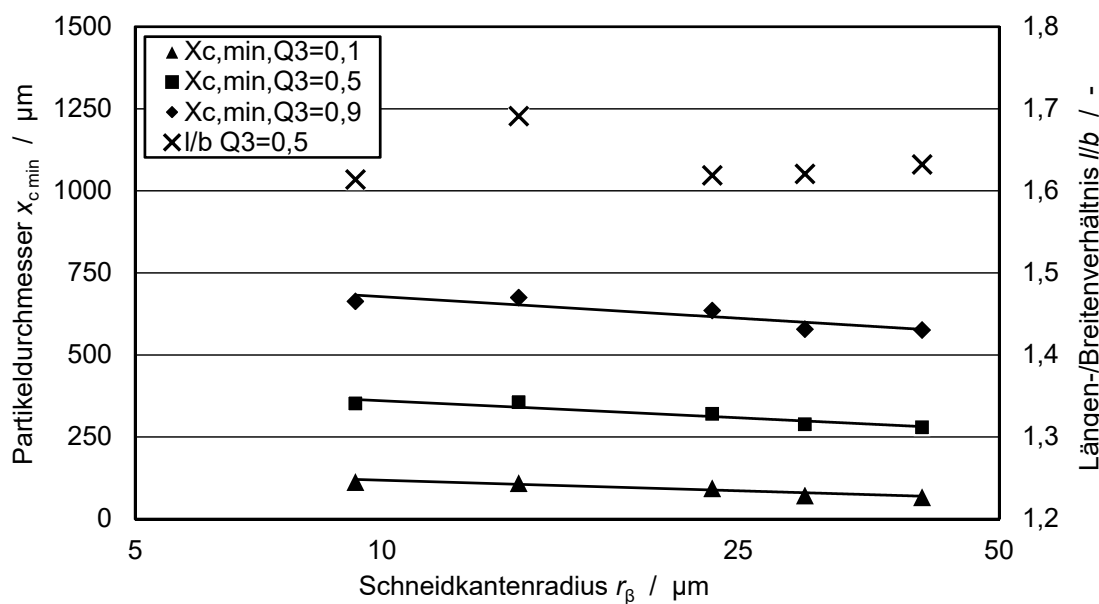


Abbildung 5-13: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variiertem Schneidkantenradius

Unter Variation des Vorschubs tritt dieser Effekt noch deutlicher zutage (Abbildung 5-14). Bei den zwei kleinsten betrachteten Zahnvorschüben ($f_z = 0,005$ mm; $f_z = 0,01$ mm) liegt die Spandicke bereits bei Neuwerkzeugen unterhalb des Schneidkantenradius. Das dadurch stark ausgeprägte Deformations- und Vorschädigungsverhalten führt zu kleinsten Partikeln ($x_{c,\min,Q3=0,1} < 59$ μm). REM-

Aufnahmen zeigen hier deutliche Grenzflächenbrüche (Abbildung 5-15 links).

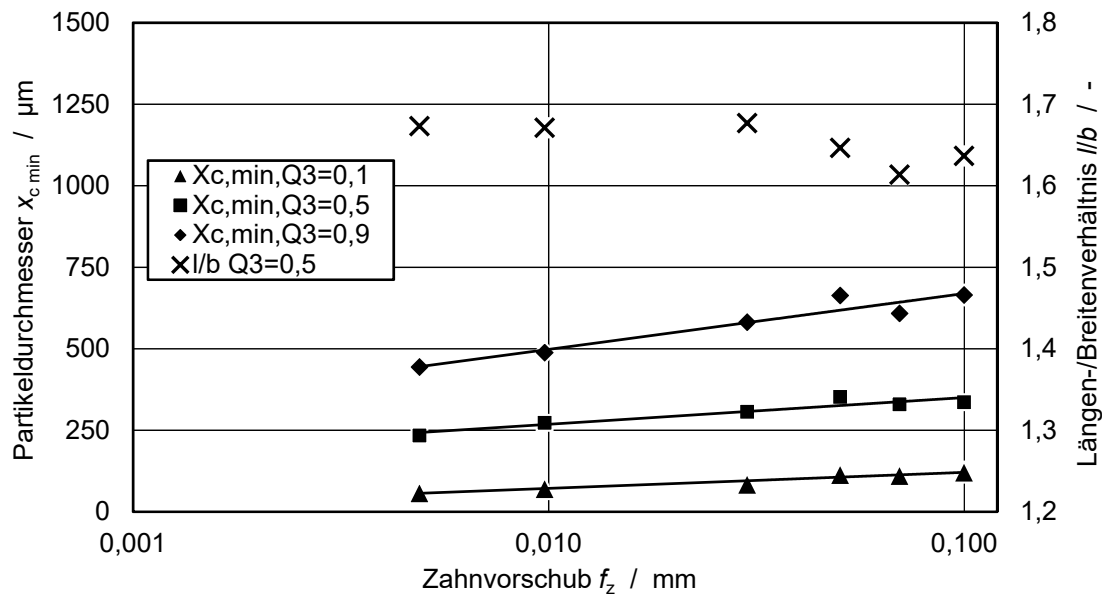


Abbildung 5-14: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variiertem Zahnvorschub

Mit zunehmendem Zahnvorschub nimmt der Einfluss der Vorschädigungen auf die Trennmechanismen ab, da Vorschädigungen des Werkstoffes nur noch im Bereich des Schneidenein- und Schneidenaustrittes auftreten. Der zunehmende Zahnvorschub führt zu steigenden Spandicken und größeren Partikeln (Abbildung 5-15 rechts).

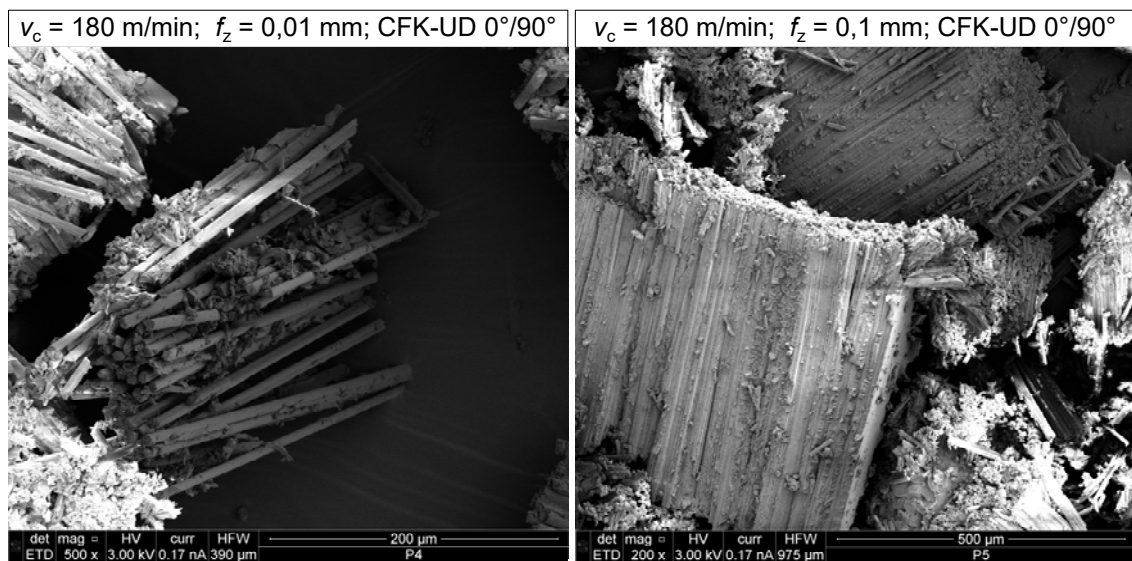


Abbildung 5-15: REM-Aufnahmen von CFK-Spangut für unterschiedliche Zahnvorschübe $f_z = 0,01$ mm (links); $f_z = 0,1$ mm (rechts)

Einfluss der Schnittgeschwindigkeit

Die Variation der Schnittgeschwindigkeit bei konstantem Zahnvorschub offenbart abnehmende Partikelgrößen bei zunehmenden Schnittgeschwindigkeiten. So treten im betrachteten Parameterbereich von $v_c = 20 \text{ m/s} \dots 750 \text{ m/s}$ nahezu Halbierungen der Partikelgrößen für die drei Perzentile auf (Abbildung 5-16). Zudem werden die Partikel geringfügig kompakter.

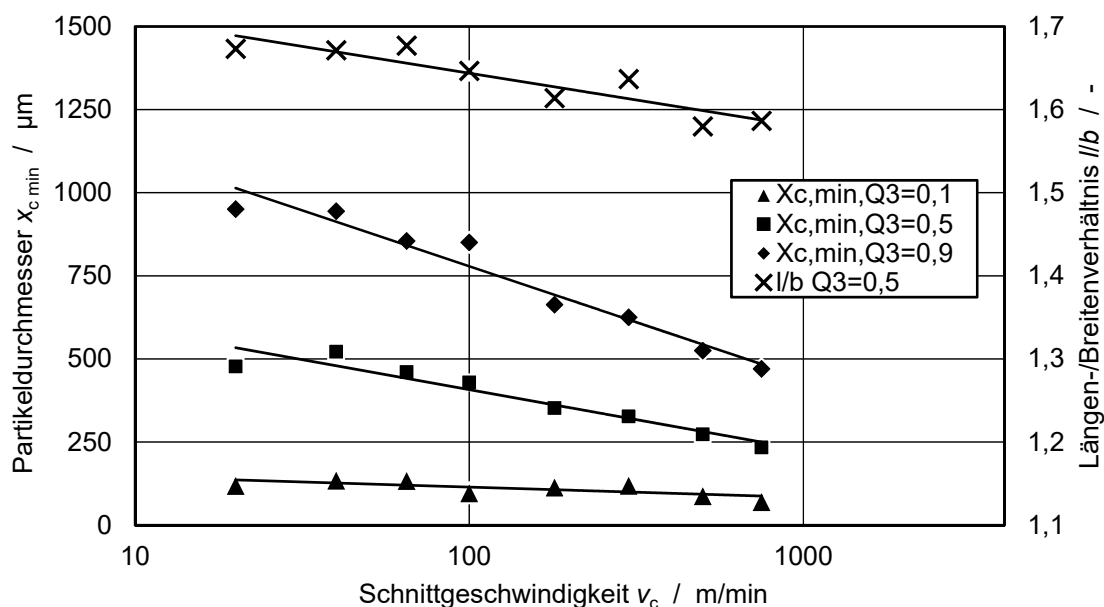


Abbildung 5-16: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variiertes Schnittgeschwindigkeit

REM-Aufnahmen des Spanguts (Abbildung 5-17) zeigen bei niedrigeren Schnittgeschwindigkeiten größere Laminatpartikel und Partikelagglomerate aus Einzelfasern, Faserbündeln und Laminatpartikeln. Bei zunehmenden Schnittgeschwindigkeiten ist das Spangut hingegen durch eine Vielzahl an Einzelfasern und Faserbündeln sowie kleineren Partikelagglomeraten charakterisiert. Die steigende Belastungsgeschwindigkeit führt vermehrt zu Zwischenfaser- und Grenzflächenbrüchen und im Extremfall zu einer vollständigen Auflösung der Matrix und dem Freilegen von kurzen Einzelfasern. Untersuchungen von *Würtz* (2000) legen hierfür eine Zunahme von Mikrorissen aufgrund der höheren Belastungsgeschwindigkeit nahe. Die Abnahme der Faserlänge kann nach *Masters* (1987) auf eine Steigerung an Rissherden in den Fasern zurückgeführt werden.

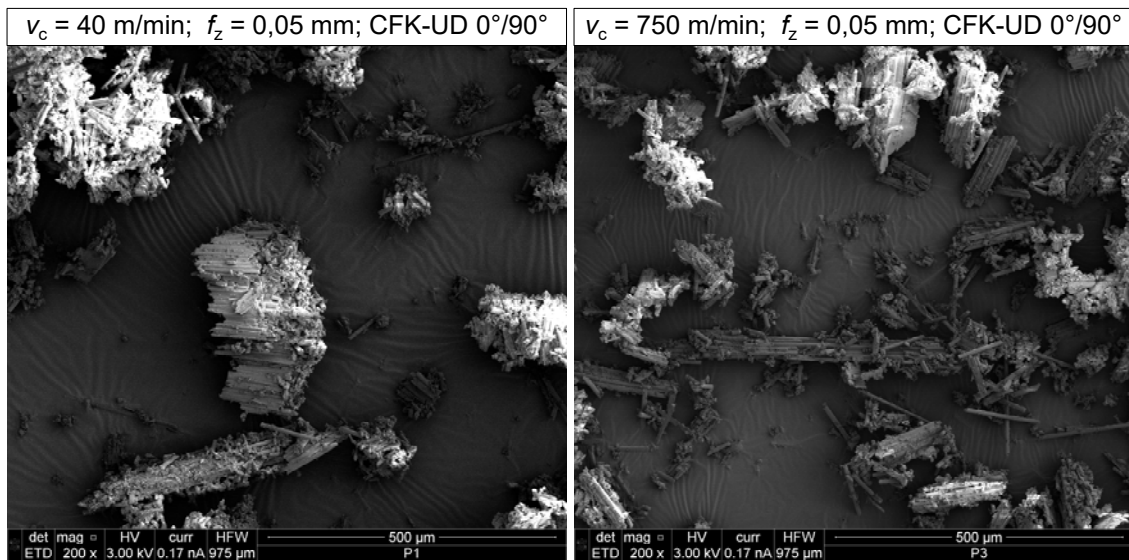


Abbildung 5-17: REM-Aufnahmen von CFK-Spangut für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten; $v_c = 40$ m/s (links); $v_c = 750$ m/s (rechts)

Weiterhin sind großflächige, dünnwandige Späne zu beobachten, die aus verschweißtem und verklammertem Spangut bestehen und primär über den Matrixwerkstoff miteinander verbunden sind. Diese Späne sind äußerst fragil und zerfallen unter Einwirkung minimaler mechanischer Belastung in Einzelpartikel. Sie treten überwiegend bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten auf.

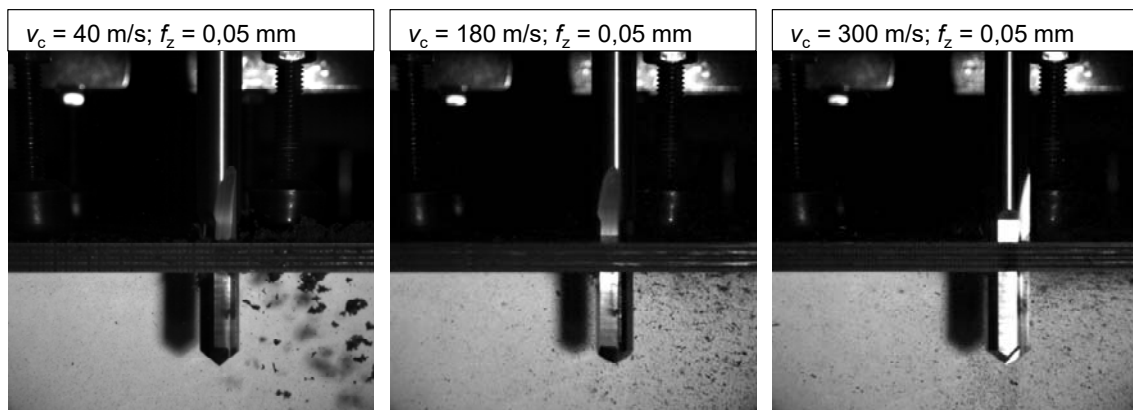


Abbildung 5-18: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Partikelgröße; $v_c = 40$ m/s (links); $v_c = 180$ m/s (Mitte); $v_c = 300$ m/s (rechts)

Abbildung 5-18 zeigt die Entstehung dieser Partikel im Zerspanprozess, während Abbildung 5-19 die Detailaufnahme eines Spans zeigt.

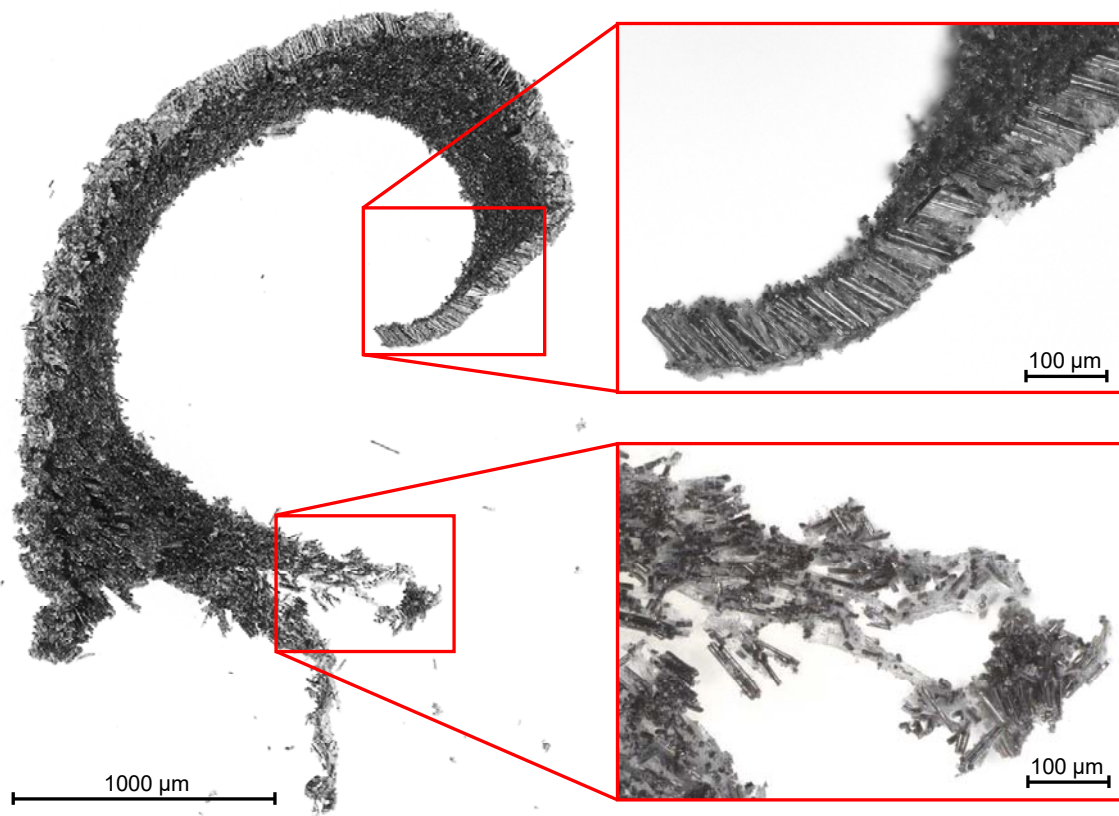


Abbildung 5-19: Großflächige, dünnwandige Späne bei der Zerspanung mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten

Die mit Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit zunehmende Kinetik während des Zerspanprozesses und des Spanauswurfs führt durch Partikel-Partikel-, Partikel-Werkzeug- und Partikel-Werkstück-Kollisionen sowie durch den Luftwiderstand zum Lösen dieser miteinander verbundenen Späne zu Einzelbruchstücken.

Einfluss des Faserorientierungswinkels

Zur Analyse des Einflusses des Faserorientierungswinkels wurde der unidirektionalverstärkte CFK-Werkstoff zerspannt. Die Analyse des Spanguts zeigt für mittlere Faserorientierungswinkel im Bereich $\phi = 67,5^\circ \dots 112,5^\circ$ größere und auffallend langgestreckte Partikel. Im Vergleich zum bidirektionalen Werkstoff entstehen deutlich kleinere Partikel und insbesondere viele Kleinstpartikel (Abbildung 5-20).

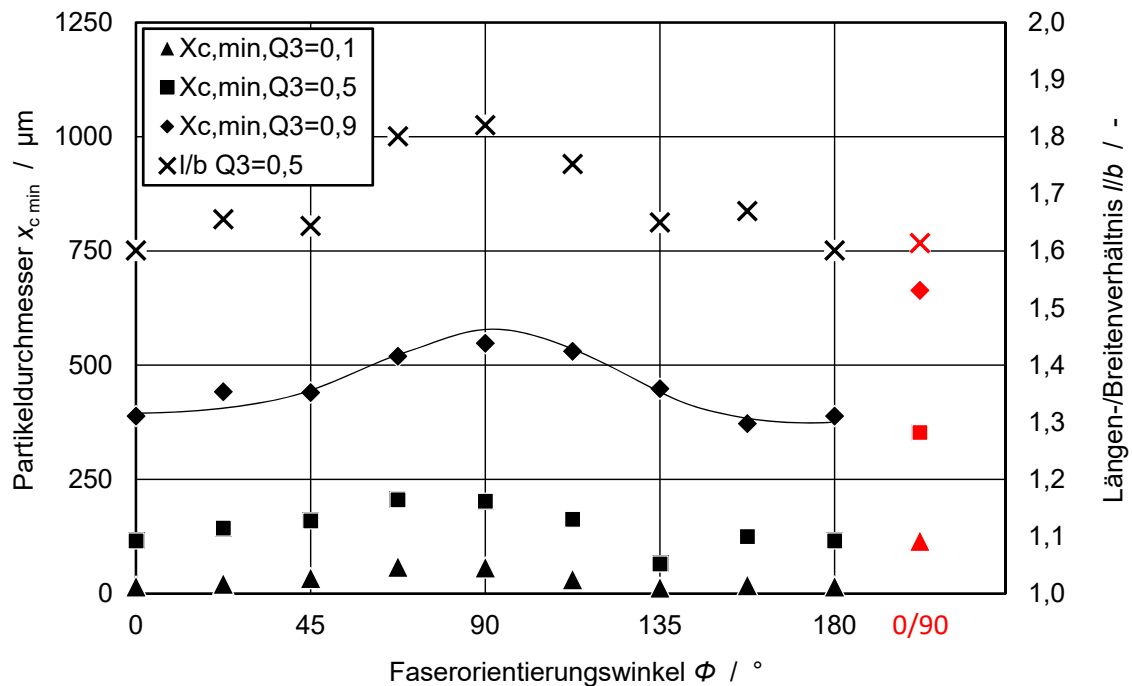


Abbildung 5-20: Partikelgrößenverteilung beim Fräsen mit variierenden Faserorientierungswinkeln⁵ REM-Aufnahmen des Spanguts (Abbildung 5-21) zeigen für die mittleren Faserorientierungswinkel viele Laminatpartikel, bestehend aus Kohlenstofffasern von mehreren 100 Mikrometern Länge sowie diverse kleine Laminatpartikel und Einzelfasern. Für die anderen Faserorientierungswinkel liegen überwiegend kleinere Laminatpartikel aus kürzeren Fasern sowie sehr viele kurze Einzelfasern und Matrixbruchstücke vor. Das Spangut des bidirektionalen Werkstoffs zeigt ebenfalls kleinere Laminatpartikel und Einzelfasern, die jedoch oft in Form von Partikelagglomeraten zusammenhängen.

⁵ Die Werte des Faserorientierungswinkel $\phi = 180^\circ$ entsprechen denen von $\phi = 0^\circ$

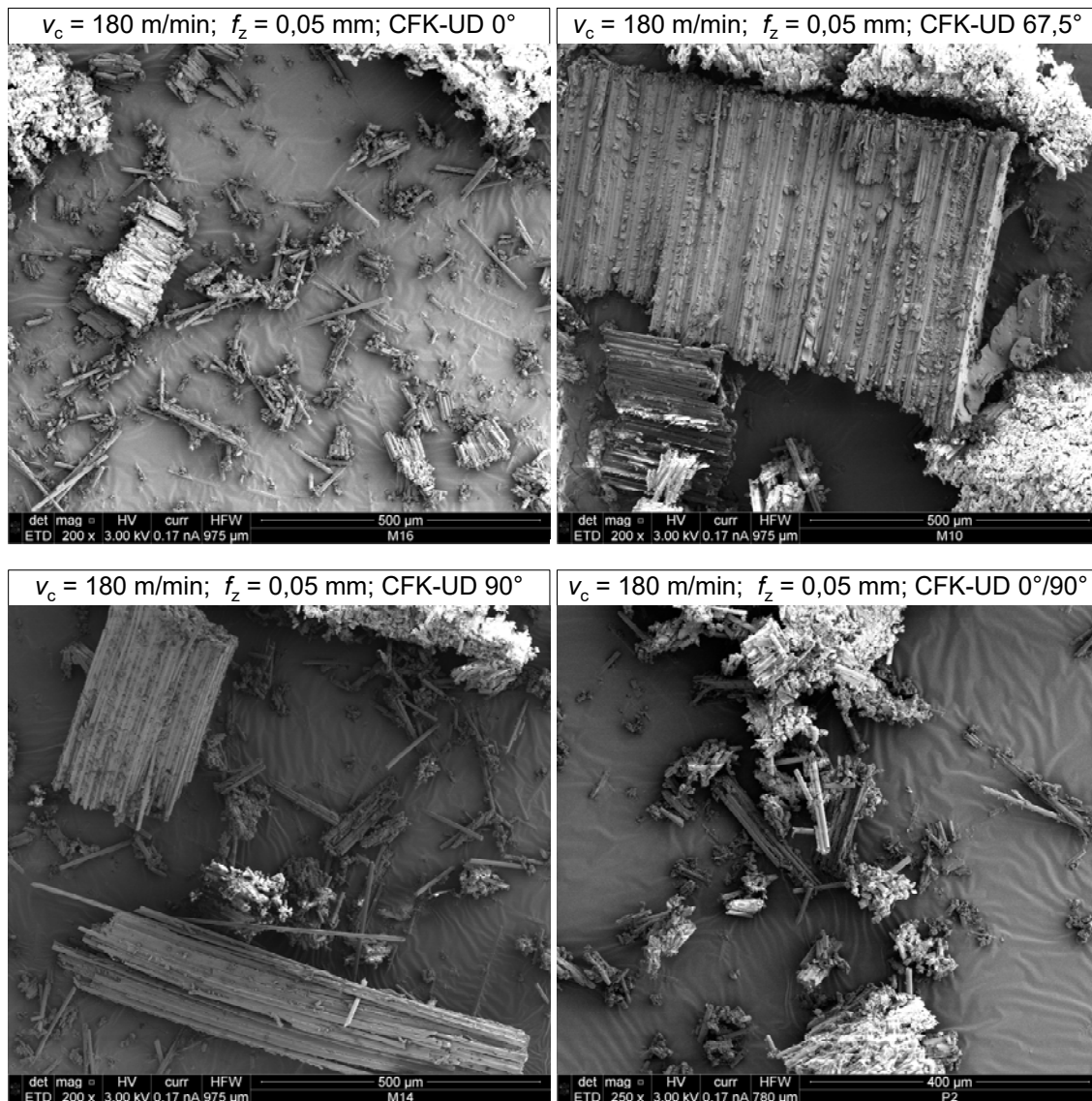


Abbildung 5-21: REM-Aufnahmen von CFK-Spangut für unterschiedliche Faserorientierungswinkel. Das Auftreten unterschiedlich geformter Partikel kann auf die jeweils vorherrschenden Fasertrennwinkel zurückgeführt werden. Beim Fräsen im Volleingriff werden zwar alle Fasertrennwinkel einmal durchlaufen, aufgrund der schwankenden Spandicke definiert der Faserorientierungswinkel jedoch den vorherrschenden Fasertrennwinkel bzw. Trennwinkelbereich. Maximal lange Faserbruchstücke, wie sie für die mittleren Faserorientierungswinkel nachgewiesen wurden, werden bei einem Fasertrennwinkel von $\theta = 0^\circ$ erzeugt (Kapitel 2.1.2). Übertragen auf den sichelförmigen Abtrag des Spanguts wird die Tangente an Flugkreis FK_1 gesucht, deren Schnittpunkte mit Flugkreis FK_2 den maximalen

Abstand zueinander aufweisen (Abbildung 5-11). Hierzu wird zunächst die Tangentensteigung durch Ableiten von Formel 5-13 bestimmt:

$$y'(x) = \frac{-2x}{d * \sqrt{1 - \frac{4 * x^2}{d^2}}} + \frac{fz}{d * \sqrt{1 - \frac{4 * x^2}{d^2} * \pi * z}}$$

Formel 5-16

Durch die Formel 5-13 und Formel 5-16 kann somit die Gleichung jeder Tangente des Flugkreises der Schneide definiert werden.

$$y_{T,a}(x) = \left(\frac{-2a}{d * \sqrt{1 - \frac{4 * a^2}{d^2}}} + \frac{fz}{d * \sqrt{1 - \frac{4 * xa^2}{d^2} * \pi * z}} \right) * (x - a) + \frac{d}{2} * \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{-2a}{d} \right) \right) + f * \frac{\cos^{-1} \left(\frac{-2a}{d} \right)}{z * \pi}$$

mit $a = \left\{ a \in \mathbb{Q} \mid -\frac{d}{2} \leq a \leq \frac{d}{2} \right\}$

Formel 5-17

Durch den Schnitt der Tangente des Schneidenflugkreises FK₁ (Formel 5-17) mit dem nachfolgenden Schneidenflugkreis FK₂ erhält man für jede Tangente Punktepaare (P₃ und P₄), deren Abstand die maximale Faserlänge l_f darstellt, während die Tangentensteigung in den Faserorientierungswinkel umgerechnet werden kann.

$$\Phi = 90^\circ + \arctan \left(\frac{-2x}{d * \sqrt{1 - \frac{4 * x^2}{d^2}}} + \frac{fz}{d * \sqrt{1 - \frac{4 * x^2}{d^2} * \pi * z}} \right)$$

Formel 5-18

Die Berechnung der maximalen Faserlänge zeigt ein Maximum bei einem Faserorientierungswinkel $\Phi = 100,4^\circ$. Die maximale Faserlänge beträgt hierbei $l_{\max} = 0,92$ mm. Die Berechnung stimmt in diesem Fall mit den Messwerten (Abbildung 5-20) sehr gut überein. Zu berücksichtigen ist, dass dieses Modell nur für Partikel nach Faserentrenwinkel $\theta = 0^\circ$ gilt.

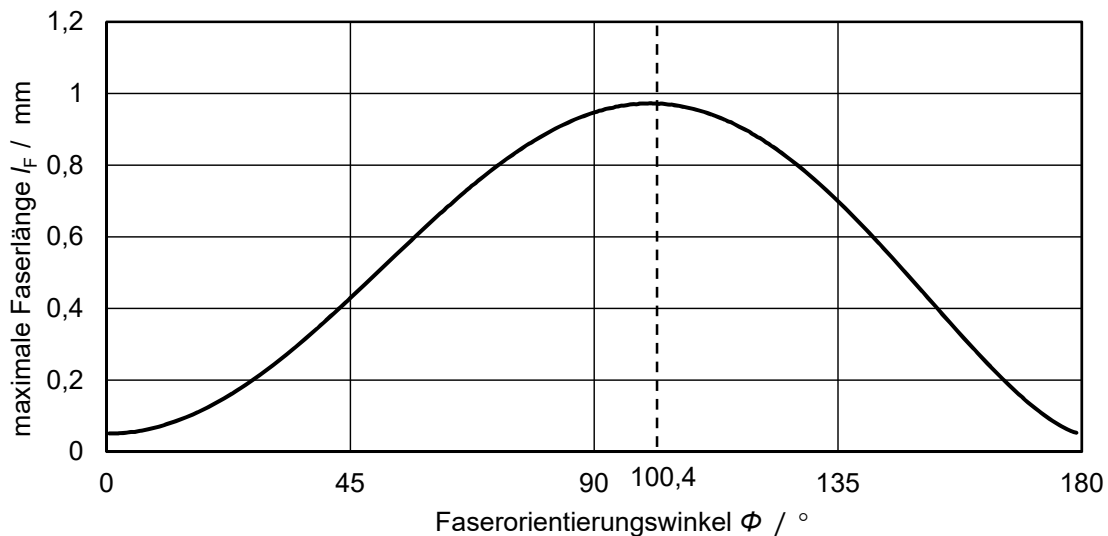


Abbildung 5-22: Maximale berechnete Faserlängen in Abhängigkeit des Faserorientierungswinkels

Die Variation des Zahnvorschubs hat großen Einfluss auf die maximale Faserlänge (Abbildung 5-23). Diese steigt in etwa wurzelförmig an, während der zugehörige Faserorientierungswinkel leicht abnimmt.

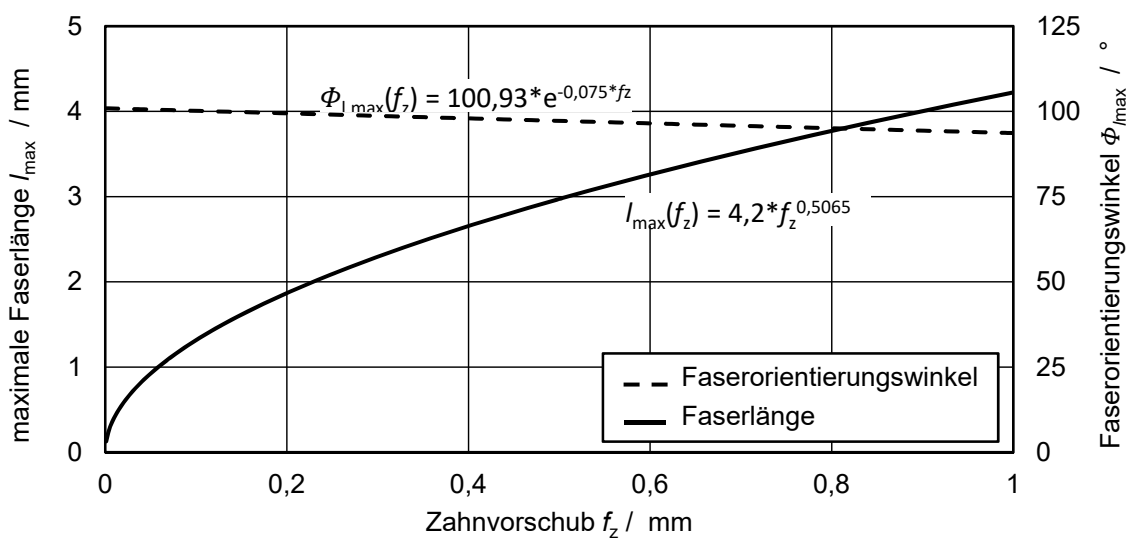


Abbildung 5-23: Berechnete maximale Faserlänge und korrespondierender Faserorientierungswinkel in Abhängigkeit des Zahnvorschubs

Die Variation des Werkzeugdurchmessers übt ebenfalls einen Einfluss auf die maximale Faserlänge aus. Der Faserorientierungswinkel liegt hierbei konstant bei $\Phi_{l,max} = 100,4^\circ$, während die Faserlänge in einer quadratischen Funktion zunimmt (Formel 5-19):

$$\Phi_{l,max}(d) = -0,0012 * d^2 + 0,0781 * d + 0,364$$

Formel 5-19

Fazit zur Analyse des Spanguts

Für eine verbesserte Spangutabsaugung sind Partikel zu bevorzugen, die eine niedrige Sinkgeschwindigkeit aufweisen und somit länger in der Schwebelage verbleiben. Dies ist bei kleinen Partikeln und Partikeln mit einem hohen Widerstandsbeiwert gegeben, der mit zunehmender Abweichung der Partikelform von einer Kugel steigt. Da die Partikelform, repräsentiert durch das Längen-/Breitenverhältnis, nur bedingt beeinflusst werden kann, sind kleine Partikel anzustreben. Die Partikelgrößenverteilung bei der Fräsbearbeitung von CFK kann durch mehrere Parameter signifikant beeinflusst werden, die hier methodisch untersucht wurden. Tabelle 5-6 zeigt diese Einflussgrößen und bewertet deren Grenzen anhand technischer (T), wirtschaftlicher (W) und qualitativer (Q) Gesichtspunkte.

Tabelle 5-6: Bewertung der Einflussgrößen auf die Partikelgrößenverteilung

Hohe Schnittgeschwindigkeit	Hohe Maschinendynamik notwendig
	Erhöhter Werkzeugverschleiß
Niedriger Zahnvorschub	Lange Bearbeitungsdauer
	Erhöhter Werkzeugverschleiß
Großer Schneidkantenradius	Verminderte Prozesssicherheit durch erhöhte Bearbeitungskräfte
	Verminderte Bearbeitungsqualität
Pyramidenfräser mit feiner Verzahnung	Lange Bearbeitungsdauer
	Limitierte Werkzeugstandzeit

Zudem kann über die Faserarchitektur und Faserausrichtung Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung genommen werden. Diese definieren jedoch die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Die Optimierung der Spanerfassung ist dem unterzuordnen. Jedoch ermöglicht die Betrachtung der Faserarchitektur und Faserausrichtung eine Abschätzung der zu erwartenden Partikelgrößen und so eine optimale Auslegung des Absaugsystems.

5.5 Analyse des Spangutauswurfs

Der Auswurf des Spanguts durch das Werkzeug erfolgt stoßweise mit jedem Austritt der Schneiden aus dem Werkstück und der Entleerung des zugehörigen Spanraums. Das Spangut bildet hierbei einen Strahl, der sich aus dem Spangut der einzelnen Auswürfe zusammensetzt (Abbildung 5-24). Dabei weisen die einzelnen Auswürfe unterschiedliche Geschwindigkeiten auf, sodass sich diese zunehmend vermischen und den Spangutstrahl homogenisieren. Eine Analyse der Geschwindigkeiten der Einzelpartikel erfolgte mithilfe von fortlaufenden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Flugbahnen einzelner Partikel unmittelbar nach dem Auswurf durch das Werkzeug.

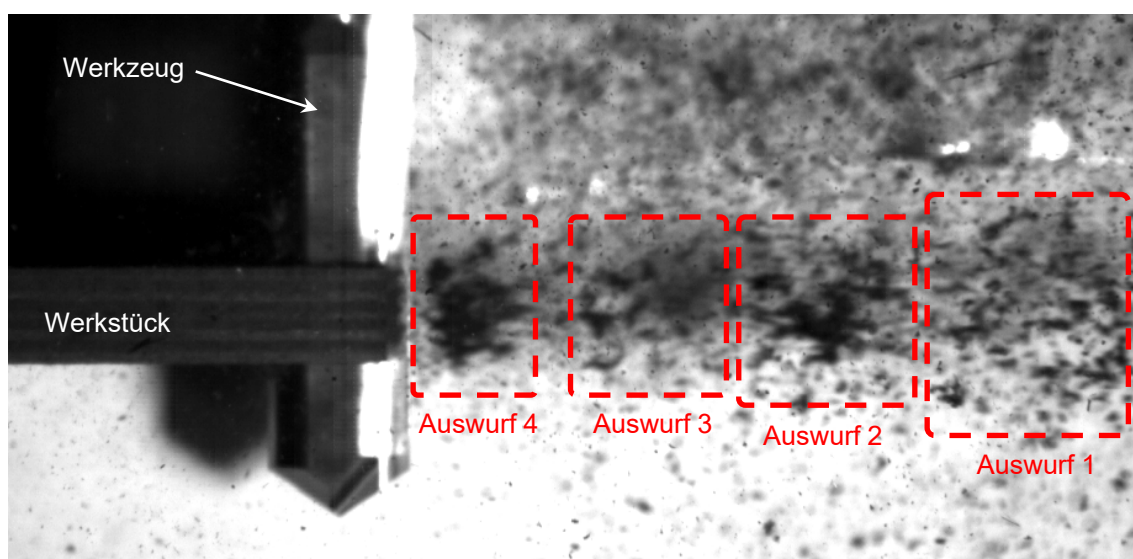


Abbildung 5-24: Stoßweiser Auswurf des Spanguts durch das Fräswerkzeug

Mittels dieser Aufnahmen wurde die Partikelgeschwindigkeit v_p anhand der zurückgelegten Flugweite l_f , der Aufnahmefrequenz f und der Anzahl der Bilder n_f nach Formel 5-20 ermittelt.

$$v_p = \frac{l_f}{n_f} * f$$

Formel 5-20

Die Partikelgeschwindigkeit bei der Fräsbearbeitung mit Standardparametern ($v_c = 180$ m/min) ist in Abbildung 5-25 dargestellt. Da eine exakte Ermittlung der Partikelgröße anhand der Bilder der Hochgeschwindigkeitskamera nicht möglich ist, wurden die Partikel in drei Größenklassen eingeteilt.

Die Partikelgeschwindigkeiten in den drei Größenklassen unterliegen einer starken Streuung, die mit abnehmender Partikelgröße zunimmt (Abbildung 5-25).

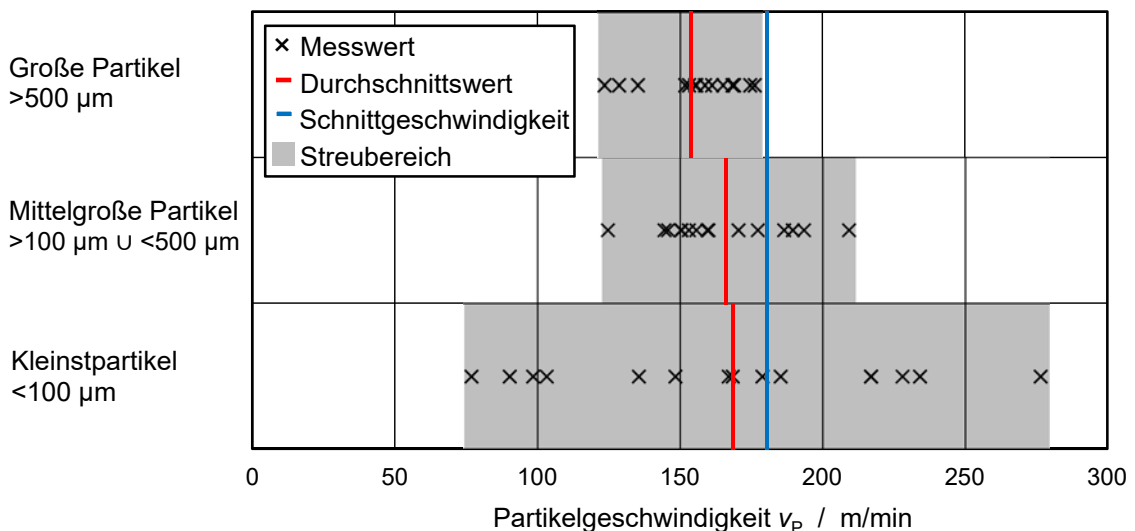


Abbildung 5-25: Geschwindigkeit der Spangutpartikel nach dem Auswurf für die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 180$ m/s

Die durchschnittlichen Partikelgeschwindigkeiten liegen hierbei unterhalb der Schnittgeschwindigkeit, wobei für die kleinsten Partikel die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit ermittelt wurde. Dieser Sachverhalt lässt sich auch für andere Schnittgeschwindigkeiten beobachten, wobei bei einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 300$ m/s die kleinste Partikelfraktion eine

durchschnittliche Partikelgeschwindigkeit größer der Schnittgeschwindigkeit aufwies (Abbildung 5-26).

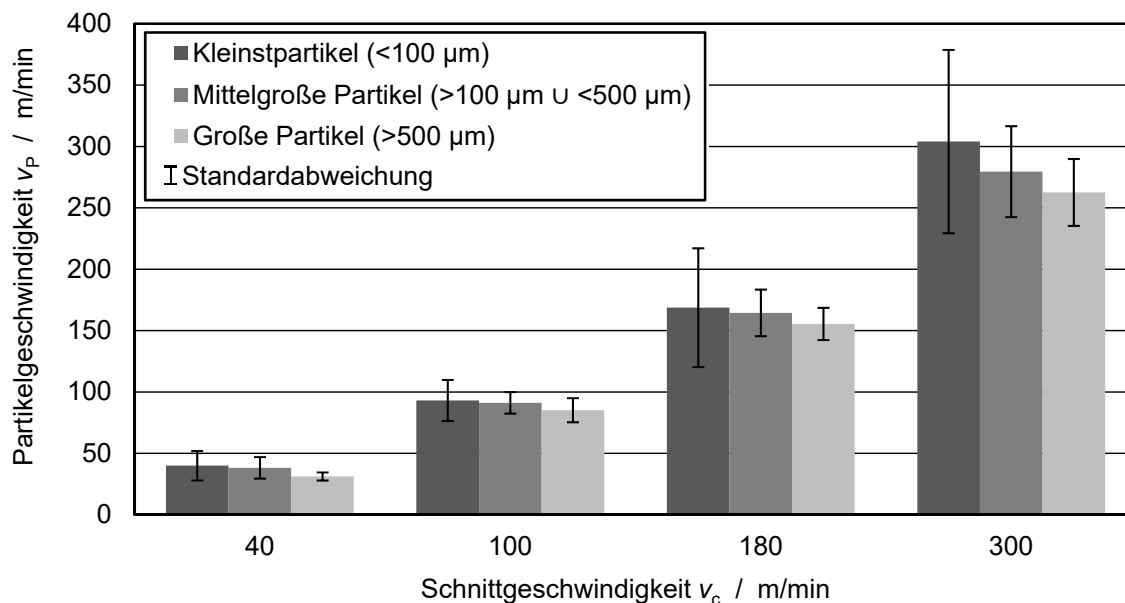


Abbildung 5-26: Partikelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit

Ein Vergleich der mittleren Partikelgeschwindigkeiten mit den Schnittgeschwindigkeiten zeigt Tabelle 5-7. Während die Partikelgröße einen beträchtlichen Einfluss auf die Partikelgeschwindigkeit ausübt, zeigt sich keine deutliche Interdependenz zwischen Schnittgeschwindigkeit und Partikelgeschwindigkeit.

Tabelle 5-7: Vergleich von mittlerer Partikelgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit

	40 m/min	100 m/min	180 /min	300/min	alle v_c
Kleinstpartikel	99,8%	93,0%	93,7%	101,3%	97,0%
Mittelgroße Partikel	95,4%	91,1%	91,3%	93,2%	92,8%
Große Partikel	77,9%	85,1%	86,3%	87,5%	84,2%
Alle Partikel	91,0%	89,8%	90,4%	94,0%	91,3%

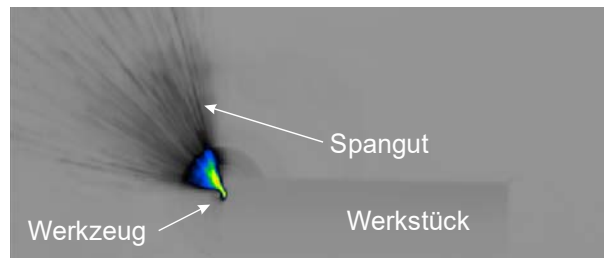
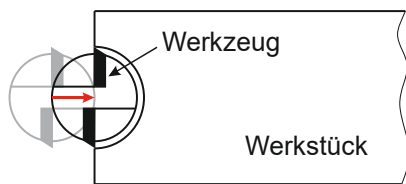
Die Geschwindigkeit einiger Partikel liegt deutlich oberhalb der jeweiligen Schnittgeschwindigkeit. Dies ist auf die Freisetzung von Verformungsenergie beim Brechen und Abscheren der Kohlenstofffasern zurückzuführen, was bereits *Rummenhöller* (1996) beobachtete. Niedrigere Partikelgeschwindigkeiten als die

Schnittgeschwindigkeiten sind auf Partikel-Partikel-, Partikel-Werkzeug- oder Partikel-Bauteil-Kollisionen zurückzuführen. Eine Verzögerung der Partikel durch den Luftwiderstand kann aufgrund der Nähe der Messung zum Werkzeug vernachlässigt werden.

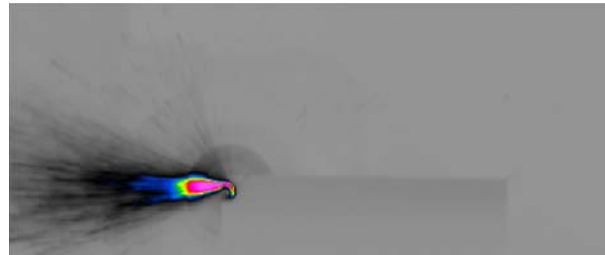
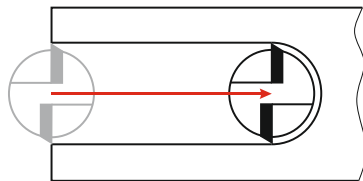
Mit zunehmender Partikelgröße dominiert die Massenträgheit über die beschriebenen Effekte. Die großen Partikel liegen somit in einem engeren Geschwindigkeitsband, während mittelgroße Partikel und Kleinstpartikel die größte Streuung aufweisen.

Der Trennschnitt im Volleingriff stellt in der CFK-Bearbeitung den überwiegend genutzten Fräsprozess dar (Kapitel 3). In Bezug auf den Spangutauswurf lässt sich dieser in vier Phasen unterteilen (Abbildung 5-27): Die *Eintrittsphase* beschreibt den Vorschubweg des Werkzeugs vom Werkzeugeintritt bis zu einem Weg entsprechend der Länge eines halben Werkzeugdurchmessers ($d/2$). Die nachfolgende *Übergangsphase* erstreckt sich von letztgenannter Position bis zu einem Vorschubweg des Zwei- bis Vierfachen des Werkzeugdurchmessers ($2 \dots 4 \cdot d$). Die sich anschließende *Stationäre Phase* endet mit dem Durchtrennen des Werkstücks. In der abschließenden *Austrittsphase* wird das Restmaterial in der Nut entlang der Vorschubrichtung abgetragen. Der Spangutauswurf in den vier Phasen wird nachfolgend beschrieben.

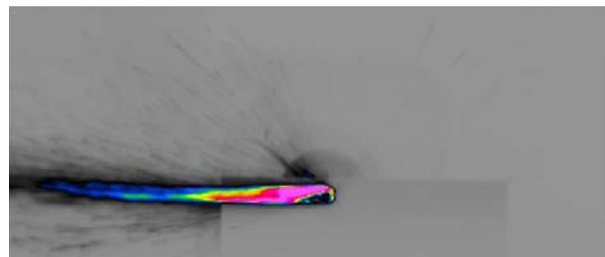
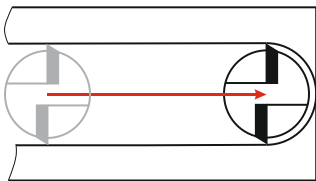
Eintrittsphase (bis ca. $D/2$)



Übergangsphase (bis ca. $(2...4) \cdot D$)



Stationäre Phase (bis Start Durchtrennen)



Austrittsphase (bis vollständig durchtrennt)

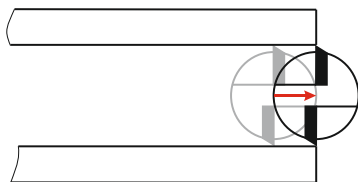


Abbildung 5-27: Verschiedene Phasen der Fräsbearbeitung im Trennschnitt; schematische Darstellung (links); Wärmebildaufnahme im realen Schnitt (rechts)

Eintrittsphase:

Die Eintrittsphase ist gekennzeichnet durch zunehmende Entleerungswinkel (Abbildung 5-29). Eine Gegenüberstellung des mittleren Entleerungswinkels ω_m und des Spanbogenwinkels φ_s zeigt, dass der Auswurf primär tangential erfolgt und radial wirkende Fliehkräfte eine untergeordnete Rolle spielen (Abbildung 5-29).

Vielmehr kommt es zu einem aufgefächerten Spangutstrahl durch eine schrittweise Entleerung des Spanraums.

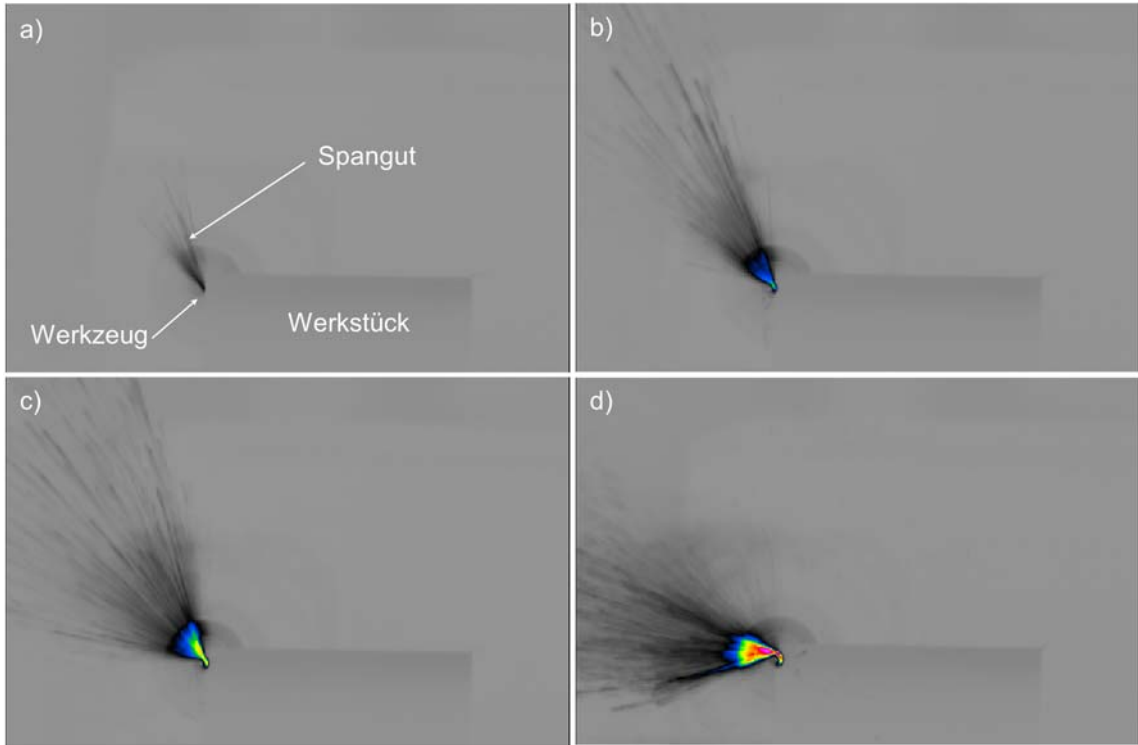


Abbildung 5-28: Darstellung verschiedene Stadien der Werkzeug-Eintrittsphase in Wärmebildaufnahmen

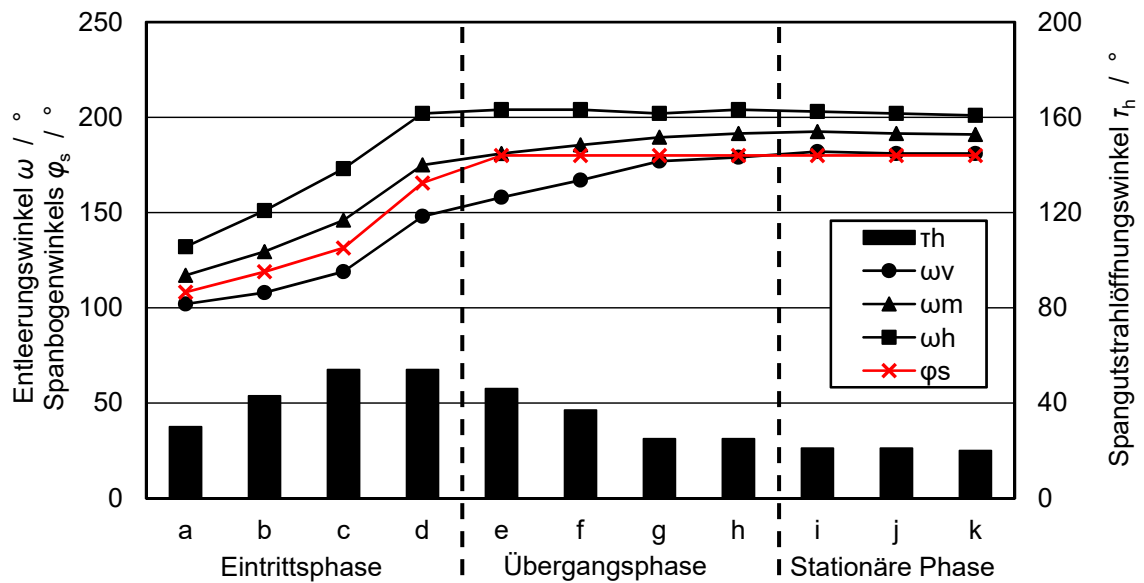


Abbildung 5-29: Entleerungs- und Spangutstrahlöffnungswinkel sowie Spanbogenwinkel in den unterschiedlichen Phasen des Trennschnitts

Übergangsphase:

In der Übergangsphase erreicht der Spanbogenwinkel den Wert $\varphi_s = 180^\circ$. Mit zunehmendem Vorschub wird der Spangutstrahl in den vorliegenden Abbildungen durch die rechte Flanke der Fräsnut begrenzt, sodass sowohl der vordere Entleerungswinkel als auch der Spanbogenwinkel $\omega_v = \varphi_s = 180^\circ$ betragen.

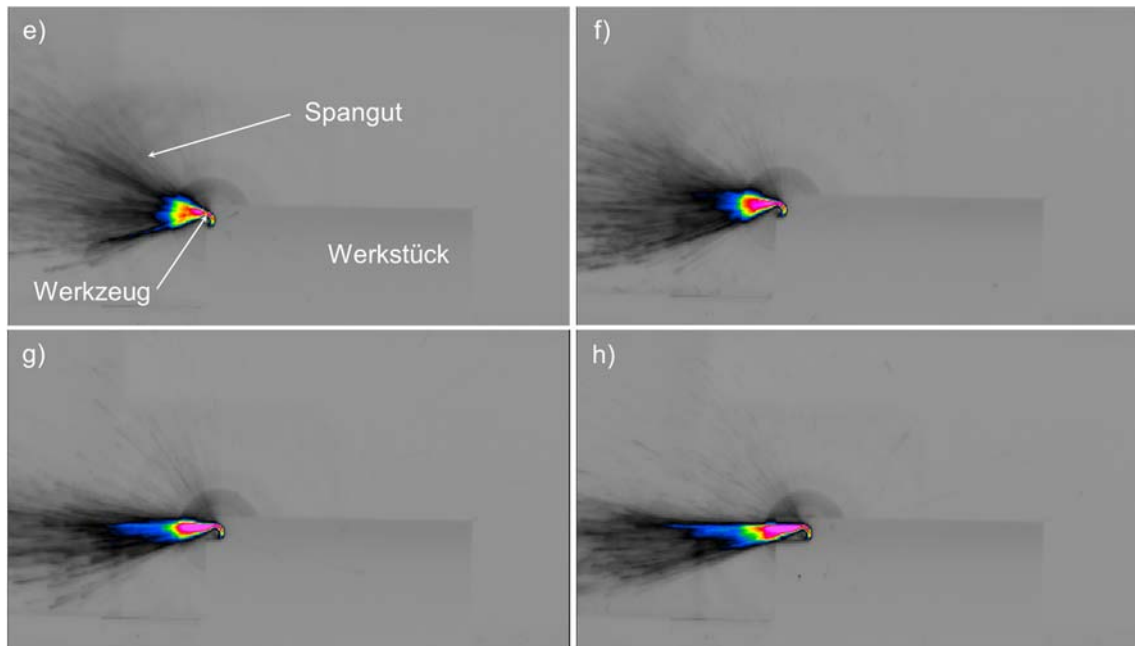


Abbildung 5-30: Horizontaler Spangutauswurf in der Übergangsphase

Die Übergangsphase endet mit dem Auftreffen des Spangutstrahls auf die linke Flanke der Fräsnut.

Eine Zunahme des Zahnvorschubs f_z führt zu einer längeren Entleerungsdauer des Spanraums durch die gesteigerte Menge an Spangut. Hierdurch wird das Spangut in einem größeren Spangutstrahlöffnungswinkel ausgeworfen (Abbildung 5-31). Der Zahnvorschub hat somit großen Einfluss auf die Länge der Übergangsphase. Im Unterschied dazu kann der Schnittgeschwindigkeit kein wesentlicher Einfluss auf den horizontalen Spangutauswurf zugeschrieben werden.

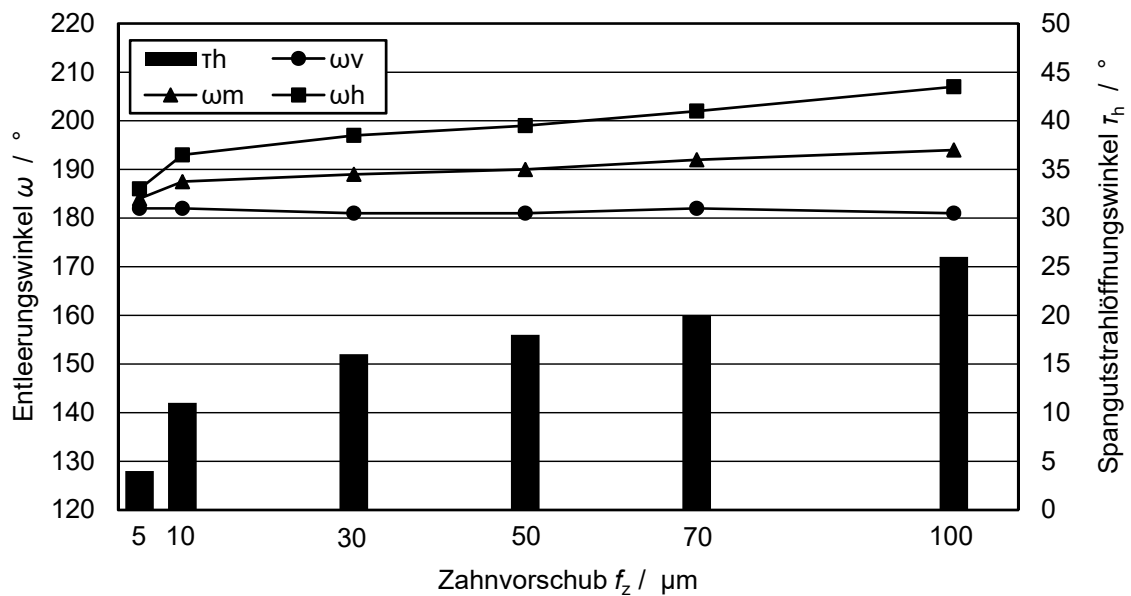


Abbildung 5-31: Einfluss des Zahnvorschubs auf den horizontalen Spangutauswurf

Stationäre Phase

Die stationäre Phase stellt den vorherrschenden Vorgang beim Randbeschnitt eines CFK-Bauteils dar und ist somit für die Erzeugung des überwiegenden Anteils an Spangut verantwortlich. Spangutstrahlöffnungswinkel und Entleerungswinkel erweisen sich in Abhängigkeit des Vorschubwegs als konstant. Die Reflexion des Spangutstrahls an der linken Flanke der Fräsnut führt zu seiner Bündelung auf die Breite der Fräsnut.

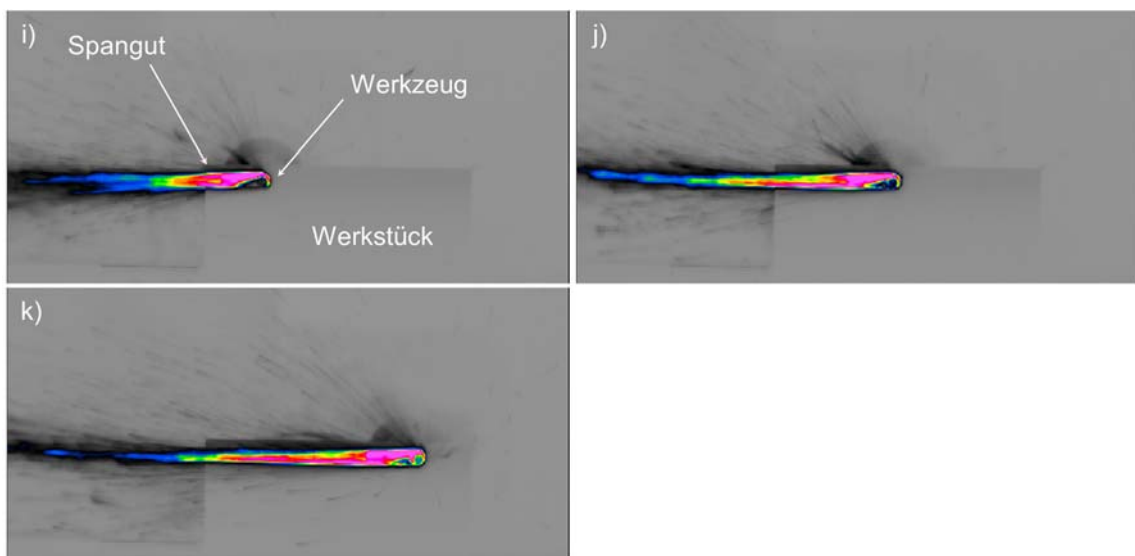


Abbildung 5-32: Horizontaler Spangutauswurf in der stationären Phase

Austrittsphase:

Die Austrittsphase beinhaltet den Abtrag des Restmaterials nach dem Durchtrennen des Bauteils. Es kommt zu einem unterbrochenen Schnitt, bis an der linken und rechten Flanke der Fräsnut das Restmaterial vollständig abgetragen ist. Der Spangutauswurf wird hierbei von der Kontur des Restmaterials beeinflusst: Beispiele hierzu zeigt Abbildung 5-33.

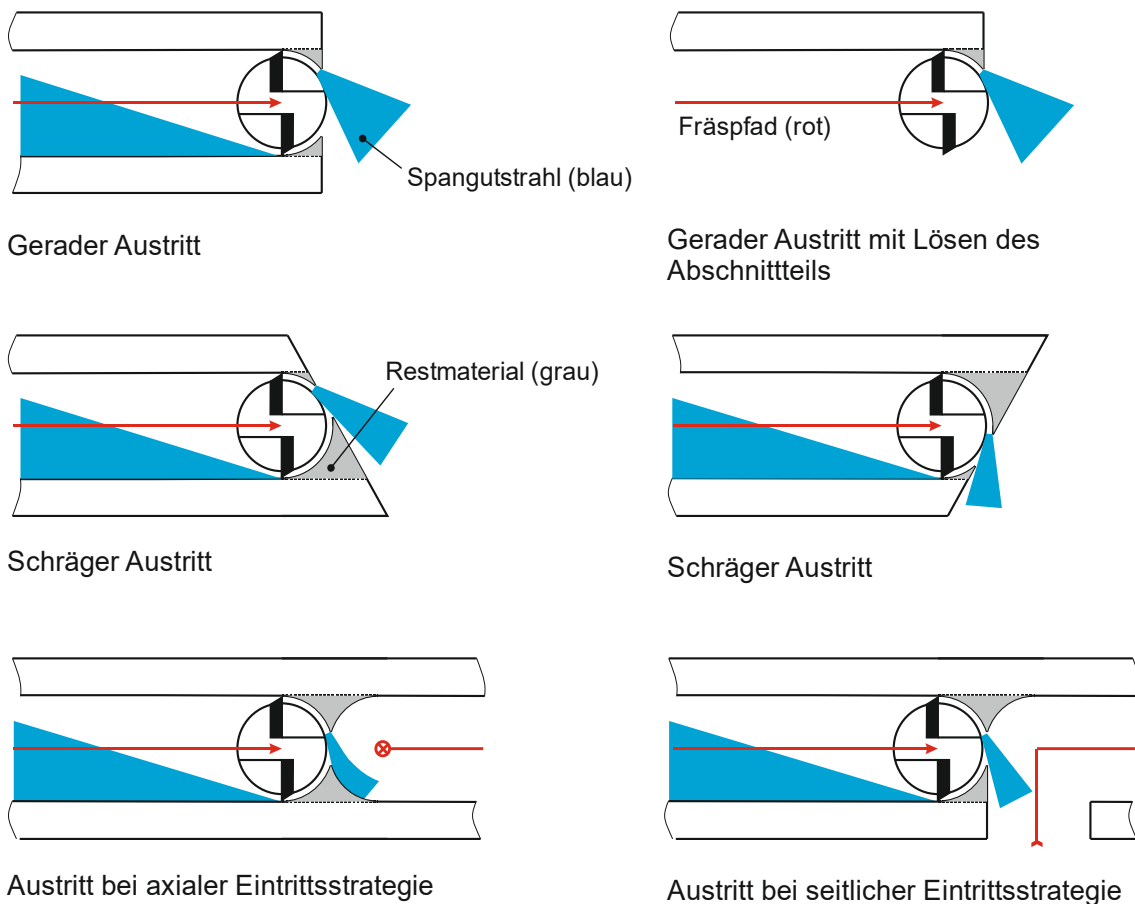


Abbildung 5-33: Spangutauswurf in der Austrittsphase

Arbeitseingriff

Die spanende Bearbeitung von CFK-Bauteilen erfolgt in den meisten Fällen in einem einstufigen Prozess im Vollschnitt ohne eine anschließende Schlichtbearbeitung, wie sie in der Metallbearbeitung üblich ist. Jedoch finden sich Anwendungsfälle, beispielsweise bei der Randbearbeitung von SMC-Bauteilen sowie dem Auffräsen

von Durchbrüchen oder Bohrungen, bei denen mit einem Arbeitseingriff kleiner dem Werkzeugdurchmesser zerspant wird.

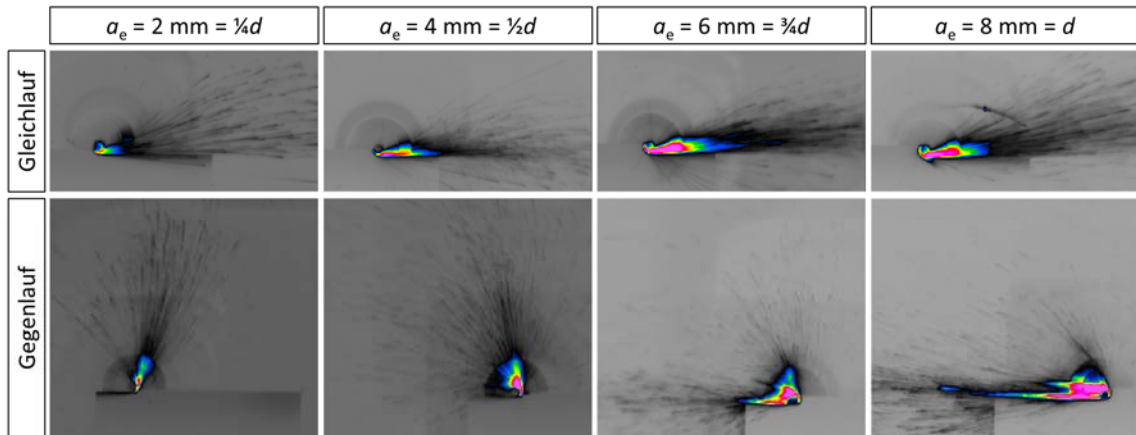


Abbildung 5-34: Horizontaler Spangutauswurf für unterschiedliche Arbeitseingriffe

Im Gleichlauf wird der Spangutstrahl durch die hier rechte Flanke der Fräsnut begrenzt (Abbildung 5-34). Der vordere Entleerungswinkel entspricht dem Spanbogenwinkel. Das Spangut wird in einem kompakten Strahl ausgeworfen. Mit zunehmendem Arbeitseingriff nimmt der Spangutstrahlöffnungswinkel zu (Abbildung 5-35), da durch die höhere Menge an Spangut die Entleerungszeit des Spanraums ebenfalls zunimmt.

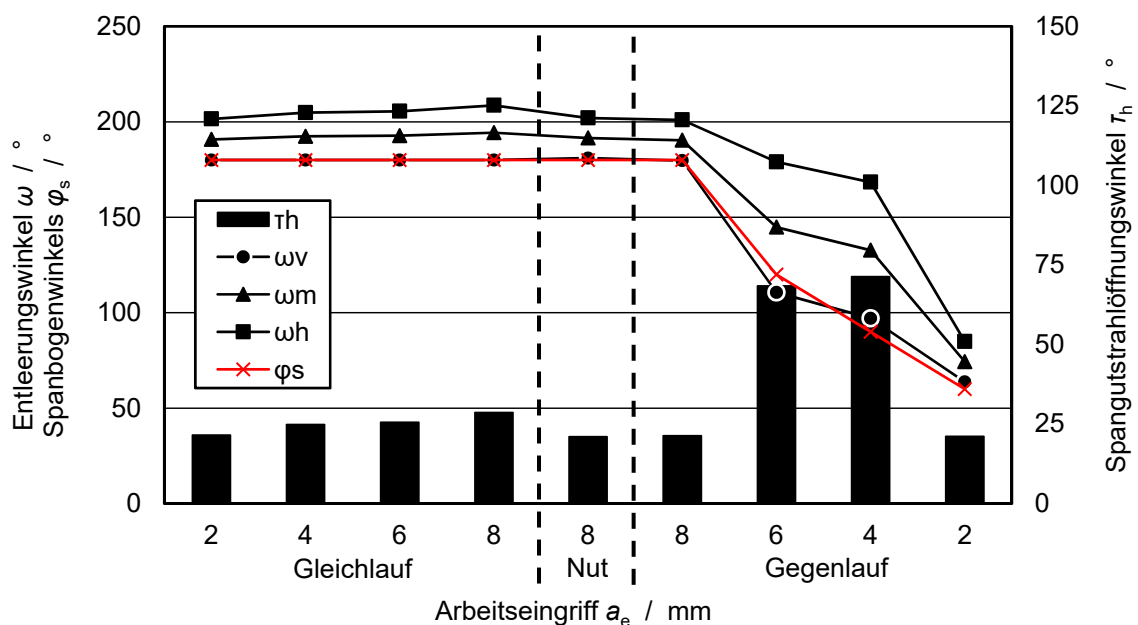


Abbildung 5-35: Entleerungs- und Spangutstrahlöffnungswinkel sowie Spanbogenwinkel für unterschiedliche Arbeitseingriffe

Im Gegenlauf erfolgt ein überwiegend tangentialer Auswurf des Spanguts mit großen Spangutstrahlöffnungswinkeln. Eine Fokussierung des Spanguts erfolgt nur im Volleingriff sowie eingeschränkt im Arbeitseingriff von $a_e = 6 \text{ mm}$ (hier entsprechend dem halben Werkzeugdurchmesser) durch das Auftreffen des Spanguts auf die linke Flanke der Fräsnut.

Der vertikale Auswurf der Partikel spielt beim eingesetzten Werkzeug und den Einstellparametern eine untergeordnete Rolle. Der mittlere Auswurfwinkel liegt in allen Phasen in einem schmalen Bereich um $\psi_m = 0^\circ$, wobei der Spangutstrahlöffnungswinkel bis zum Erreichen der *stationären Phase* zunimmt (Abbildung 5-36).

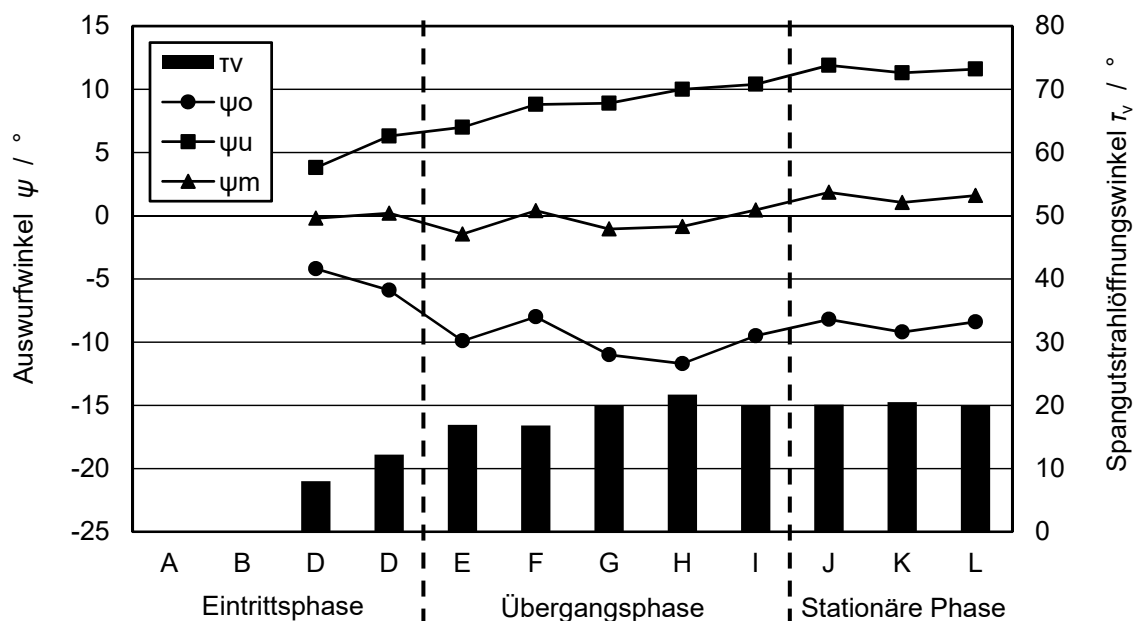


Abbildung 5-36: Auswurfwinkel und Spangutstrahlöffnungswinkel in den unterschiedlichen Phasen des Trennschnitts⁶

Der mittlere Auswurfwinkel tendiert in der *stationären Phase* zu leicht positiven Werten, da es durch die Bündelung des Spangutstrahls vermehrt zu Kollisionen der

⁶ Die Ermittlung der Auswurfwinkel und der Spangutstrahlöffnungswinkel ist für die Abschnitte A und B aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit nicht möglich

Partikel mit der Wandung der Fräsnut kommt. Hierdurch werden die Partikel abgebremst und der Einfluss der Gravitation auf die Partikelflugbahn nimmt zu.

Die Variation des Zahnvorschubs zeigt höhere Spangutstrahlöffnungswinkel bei zunehmenden Vorschubwerten. Auch kann eine leichte Zunahme des mittleren Auswurfwinkels beobachtet werden.

Ein Absenken der Schnittgeschwindigkeit führt zu einer deutlichen gravitationsbedingten Ablenkung des Spangutstrahls hin zu positiven Auswurfwinkeln (Abbildung 5-37). Im Gegensatz hierzu führen hohe Schnittgeschwindigkeiten zu einem stärker horizontalen Partikelflug und großen Wurfweiten der Partikel.

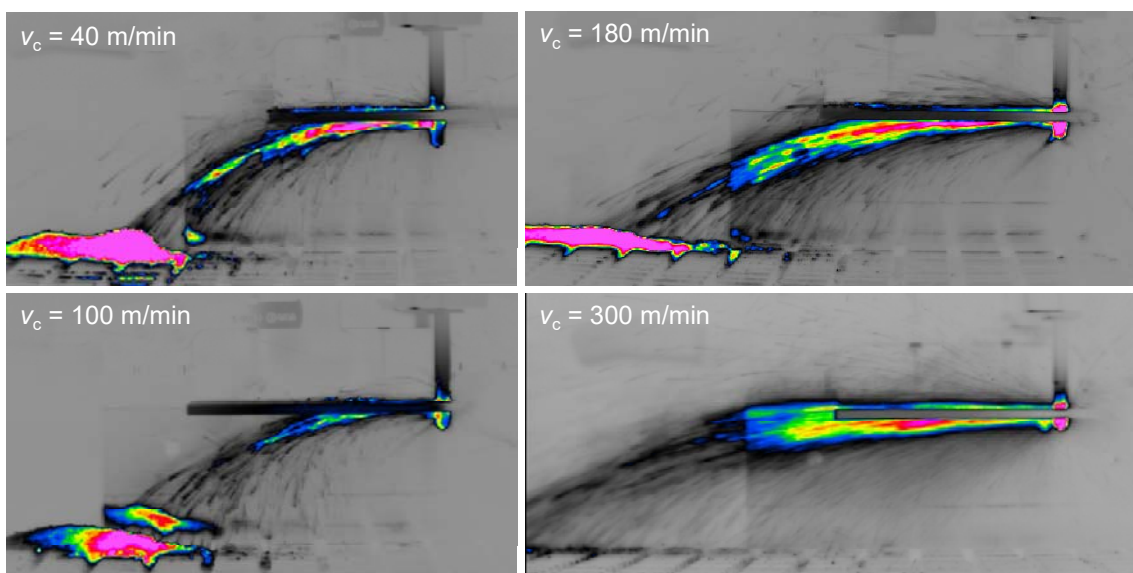


Abbildung 5-37: Vertikaler Spangutauswurf für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten

Fazit zur Analyse des Spangutauswurfes:

Der Spangutauswurf erfolgt primär tangential, wird durch die Flanken der Fräsnut begrenzt und in Abhängigkeit der Eingriffsbedingungen gebündelt. Die durchschnittlichen Partikelgeschwindigkeiten liegen vorwiegend unterhalb der Schnittgeschwindigkeit und variieren insbesondere bei kleineren Partikeln stark.

Der Spangutauswurf kann in mehrere Phasen unterteilt werden, die jeweils eine eigene Auswurfcharakteristik aufweisen. Das Fräsen im Volleingriff stellt den häufigsten Anwendungsfall dar. Der stark fokussierte Spangutstrahl verbleibt zunächst in der Fräsnut, bis er zunehmend durch Gravitationskräfte abgelenkt wird.

Der Auswurf in die Fräsnut erschwert die Absaugung der Partikel, da diese nicht von einer Luftströmung umspült und in deren Richtung beschleunigt werden können. Je nach Absaugsystem ist ein Partikelauswurf „nach unten“ in den Absaugkanal oder „nach oben“ in Richtung der Spindel anzustreben.

6 Optimierung der Spanguterfassung

Die in Kapitel 3 anhand der durchgeführten Studie untersuchten Absaugsysteme erreichen in den meisten Fällen keine zufriedenstellende Spanguterfassung (Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Die Ursachen hierfür liegen in einer falschen Auslegung des Gesamtsystems bestehend aus Werkzeugmaschine, Absaugeinrichtung, Zerspanprozess, Werkzeugauslegung und Luftführung. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel werden daher Gestaltungsrichtlinien abgeleitet und methodisch an den drei grundlegenden Absaugsystemen optimiert. Als Grundlage wird ein Simulationsmodell des Spangutauswurfs und des Spanguttransports durch die Luftströmung aufgebaut. Zudem wird der Spangutauswurf hinsichtlich einer Eignung für die verschiedenen Absaugsysteme hin angepasst.

6.1 Ableiten von Gestaltungsrichtlinien

Aus dem Stand der Technik (Kapitel 2), der Studie zu industriell eingesetzten Absaugsystemen (Kapitel 3), der theoretischen Betrachtung (Kapitel 4) und den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 5) lassen sich folgende Kernergebnisse ableiten:

Verhalten der Partikel in einer Luftströmung

1. Große Partikel sedimentieren schneller, während kleine Partikel sehr lange in der Luft verbleiben.
2. Das Abbremsen und Beschleunigen von großen Partikeln benötigt eine deutlich längere Einwirkstrecke (Flugbahn) bzw. höhere relative Luftgeschwindigkeiten im Vergleich zu kleinen Partikeln.

3. Luftbewegungen werden durch Druckunterschiede und die Massenträgheit der Luft beeinflusst.

Spangutauswurf

4. Das Spangut wird mit einer Geschwindigkeit durch das Zerspanwerkzeug ausgeworfen, die in der Regel etwas niedriger als die Schnittgeschwindigkeit ist.
5. Der Auswurf des Spanguts erfolgt näherungsweise tangential zum Schneidenflugkreis, wobei das Spangut durch das Werkstück abgelenkt und zu einem Strahl gebündelt werden kann, z.B. im Fall der Herstellung einer Nut.
6. Die Werkzeuggeometrie und die Prozessparameter haben Einfluss auf den Spangutauswurf.

Spanbildung

7. Die Bearbeitungsparameter, der Schneidkantenradius und der zu zerspanende Werkstoff üben einen Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung des Spanguts aus.
8. Größere Partikel weisen meistens eine blockförmige Gestalt auf. Das Längen-/Breitenverhältnis liegt vorwiegend in einem Band von $l/b = 1,6 \dots 1,8$.

Aus den Kernergebnissen lassen sich Gestaltungsrichtlinien ableiten, die eine verbesserte Erfassung des Spanguts begünstigen (Abbildung 6-1). Diese sind universell und lassen sich auch auf andere Werkstoffe und Zerspanprozesse übertragen, die denselben Gesetzen (1-8) gehorchen. Zu berücksichtigen sind die werkstoff- und prozessspezifischen Besonderheiten der Zerspanprozesse, beispielsweise die hohen Schnittgeschwindigkeiten in der Holzbearbeitung, die vergleichsweise hohe Dichte des Spanguts bei der Stahlzerspannung oder der Einsatz von MMS in der Aluminiumzerspannung.

1. *Kinetische Energie nutzen*

Ausrichtung des Bauteils und Anpassung der Frässtrategie, um den Spangutstrahl in Richtung der Absaugöffnung auszurichten

2. *Gravitation nutzen*

Positionierung der Absaugöffnungen unterhalb der Zerspanstelle, um die Gewichtskraft auf die Partikel für eine verbesserte Spanguterfassung zu nutzen

3. *Luft zielgerichtet zuführen*

Positionierung und Gestaltung von Einströmöffnungen für einen zielgerichteten Transport der Schwebstäube hin zur Absaugöffnung und einem effizienten Luftwechsel ohne Toträume

4. *Feines Spangut erzeugen*

Einsatz von Werkzeugen und Wahl der Prozessparameter zur Erzeugung von feinem Spangut unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen

5. *Spangutauswurf zielgerichtet auswerfen*

Auswurf des Spanguts „nach oben“ oder „nach unten“ entsprechend der Position der Absaughaube

6. *Spangut abbremesen*

Verminderung der kinetischen Energie der Partikel durch Kollision mit einer Prallwand, Bürsten oder Lamellenvorhängen, sodass sie leichter von einer Absaugströmung erfasst werden können

7. *Spangutstrahl umlenken*

Beschleunigen des Spanguts durch Luftströme mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten und einer ausreichend langen Einwirkstrecke in Richtung der Absaugöffnung. Alternativ kann das Spangut mittels eines Leitblechs in Richtung der Absaugöffnung abgelenkt werden.

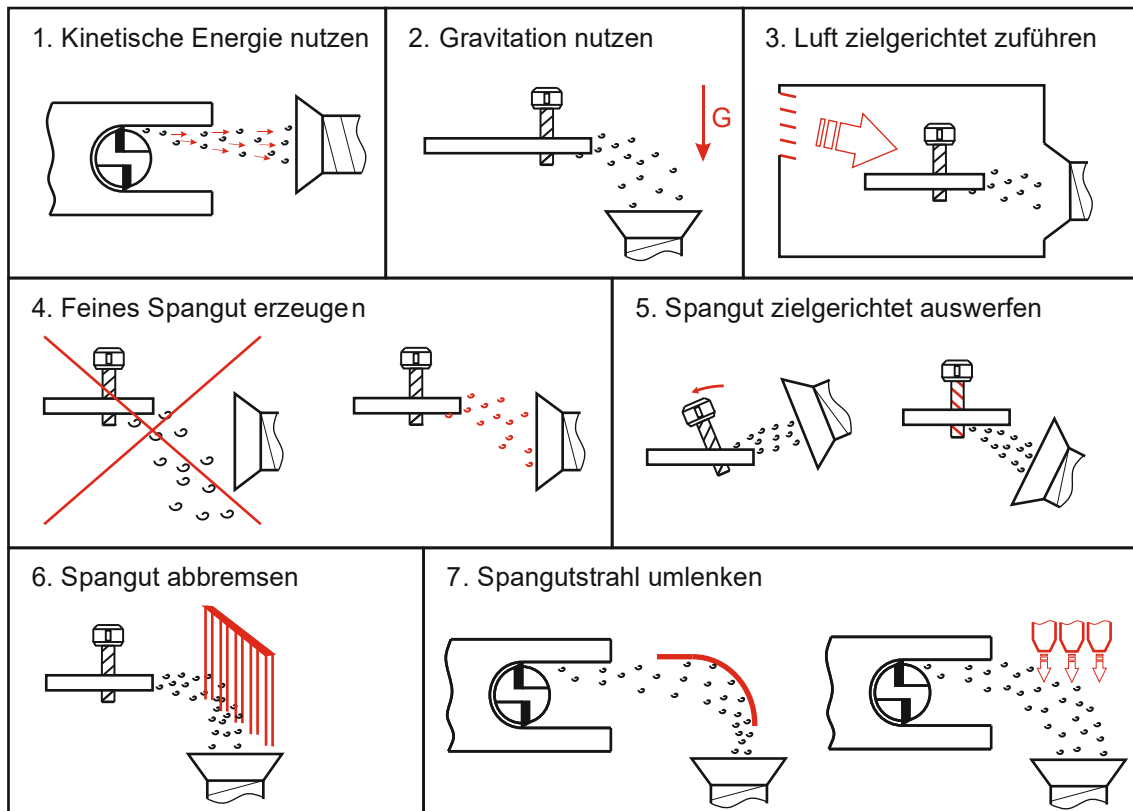


Abbildung 6-1: Gestaltungsrichtlinien für eine effektive Spanguterfassung

Die Gestaltungsrichtlinien werden in den nachfolgenden Kapiteln zur Optimierung dreier Absaugsysteme eingesetzt. Vorab werden technologische Ansätze für einen „zielgerichteten Spangutauswurf“ (Gestaltungsrichtlinie 5) untersucht und optimiert.

6.2 Optimierung des Spangutauswurfs für eine verbesserte Erfassung

6.2.1 Analyse und Bewertung unterschiedlicher Technologien zur Optimierung des Spangutauswurfs

Die Untersuchungen des Spangutauswurfs in Kapitel 5.4 haben gezeigt, dass das Spangut bei der Zerspanung mit typischen CFK-Werkzeugen in der Werkzeug-Schneideebene ausgeworfen wird. In Abhängigkeit des gewählten Absaugsystems ist

jedoch ein Spangutauswurf in Richtung der Absaugöffnung, also „nach oben“ oder „nach unten“, für eine effektive Absaugung vorteilhaft. Zur Optimierung des Spangutauswurfs werden daher nachfolgend fünf technologische Ansätze experimentell untersucht (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Technologien zur Optimierung des Spangutauswurfs

<p>Werkzeuge mit gedrahten Schneiden (1.1/1.2)</p> <p>Fräswerkzeuge analog zum Standardwerkzeug F1, jedoch mit Drallwinkel $\lambda_1 = 15^\circ$ und $\lambda_2 = -15^\circ$</p>	
	
<p>Anstellen der Werkzeuge (2.1/2.2)</p> <p>Anstellen des Standardwerkzeugs F1 mit Voreilwinkel $\beta_1 = 15^\circ$ und $\beta_2 = -15^\circ$</p>	<p>Druckluftstrahl (3)</p> <p>Aufwirbeln des Spanguts mittels eines Druckluftstrahls aus einer an der Spindel montierten Druckluftdüse</p>
	
<p>Spannfutter-Ventilator (4)</p> <p>Spannfutter mit Diagonalventilator zur Erzeugung einer Luftströmung von der Zerspanstelle durch den Ventilator konisch nach oben</p>	<p>Druckluftschleier um Werkzeug (5)</p> <p>Druckluftschleier nach Wirkungsweise des Coandă-Effekts um das Werkzeug, erzeugt durch einen Düsenkörper mit ringförmig angeordneten Druckluftdüsen</p>
	

Die Bewertung der fünf technologischen Ansätze erfolgt anhand folgender Kriterien:

1. *Austrag des Spanguts aus der Zerspanstelle:*

Vollständiges Entfernen des Spanguts aus der Zerspanstelle

2. *Zielgerichteter Abtransport „nach oben“:*

Auswurf des Spanguts in einem kompakten Spangutstrahl „nach oben“

3. *Zielgerichteter Abtransport „nach unten“:*

Auswurf des Spanguts in einem kompakten Spangutstrahl „nach unten“

4. *Aufwirbelung von Feinstaub:*

Kein Anstieg der Feinstaubkonzentration im Umfeld der Zerspanstelle

Zur Bewertung der Kriterien 1 – 3 wurde die in Kapitel 5 beschriebene Wärmebildkamera eingesetzt. Die Feinstaubkonzentration im Umfeld der Zerspanstelle wurde mit dem Staubmessgerät *Respicon TM* des Herstellers *Helmut Hund GmbH* gemessen, das eine kombinierte gravimetrische und optische Messung der Staubkonzentration für die drei Fraktionen *einatembarer Staub*, *thoraxialgängiger Staub* und *alveolengängiger Staub* ermöglicht. Die Fräsversuche erfolgten in der Roboterzelle analog zu den Untersuchungen des Spangutauswurfs von Kapitel 5. Da der Spannfutter-Ventilator eine Arbeitsdrehzahl von mindestens $n = 18000 \text{ } 1/\text{min}$ benötigt, wurde die Drehzahl bei gleichem Zahnvorschub ($f_z = 0,05 \text{ mm}$) auf diesen Wert erhöht. Die anderen vier technologischen Ansätze wurden mit der Standard-Drehzahl ($n = 7162 \text{ } 1/\text{min}$) untersucht.

Die Auswertung der Wärmebilddaufnahmen (Abbildung 6-2) zeigt den Spangutauswurf in Form eines kompakten Strahls für die Werkzeuge mit gedrahten Schneiden (Wärmebild 1.1 – 1.2) und die angestellten Werkzeuge (Wärmebild 2.1 – 2.2). Die Auswurfwinkel sind vergleichsweise flach, jedoch zielgerichtet „nach oben“ oder „nach unten“. Durch den Druckluftstrahl (Wärmebild 3) wird das Spangut gebremst und aufgewirbelt. Ein Teil des Spanguts wird in Richtung des Druckluftstrahls beschleunigt, der Großteil jedoch diffus verteilt.

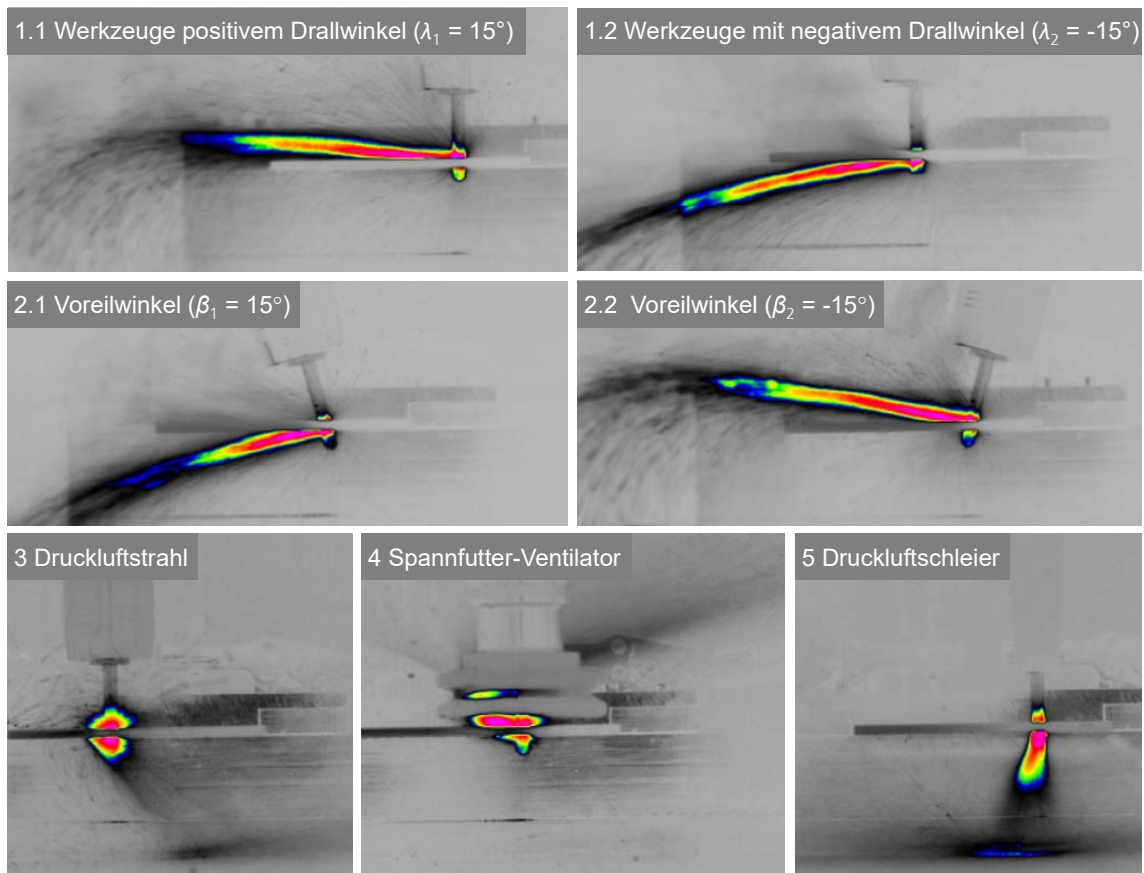


Abbildung 6-2: Wärmebildaufnahmen des Spangutauswurfs der fünf technologischen Ansätze

Der Spannutterventilator (Wärmebild 4) erfasst die Partikel vollständig und wirft diese konisch nach oben aus. Die Partikel sind hierbei nicht gleichmäßig über den Umfang verteilt. Der Druckluftschleier um das Werkzeug (Wärmebild 5) beschleunigt die ausgeworfenen Partikel in einem Strahl nach unten. Im ausgewählten Versuchsaufbau treffen die Partikel auf den Spanntisch und werden reflektiert, was auf eine hohe Partikelgeschwindigkeit schließen lässt.

Die Staubkonzentrationen aller Versuche (Abbildung 6-3) liegen deutlich oberhalb der Arbeitsplatzgrenzwerte. Bei angestellten Werkzeugen (Versuche 2.1 und 2.2) fallen sie niedriger aus als bei Werkzeugen mit gedrehten Schneiden (Versuche 1.1. und 1.2) aus. Ein Auswurf nach unten (Versuche 1.2 und 2.1) begünstigt niedrigere Staubkonzentrationen im Vergleich zu einem Auswurf nach oben. Dies zeigt sich an den maximalen Konzentrationswerten, die für den Spannutterventilator (Versuch 4) gemessen wurden, der die Partikel in einer konischen Flugbahn nach oben auswirft.

Diese liegen um ein Vielfaches höher als bei den anderen Ansätzen. Die zweithöchsten Konzentrationswerte wurden bei dem Ansatz des Luftschleiers (Versuch 5) gemessen. Die hohen Luftgeschwindigkeiten führen zu einer starken Aufwirbelung. Die Luftgeschwindigkeiten des Druckluftstrahls (Versuch 3) sind im Vergleich dazu geringer und führen somit zu niedrigeren Staubkonzentrationen.

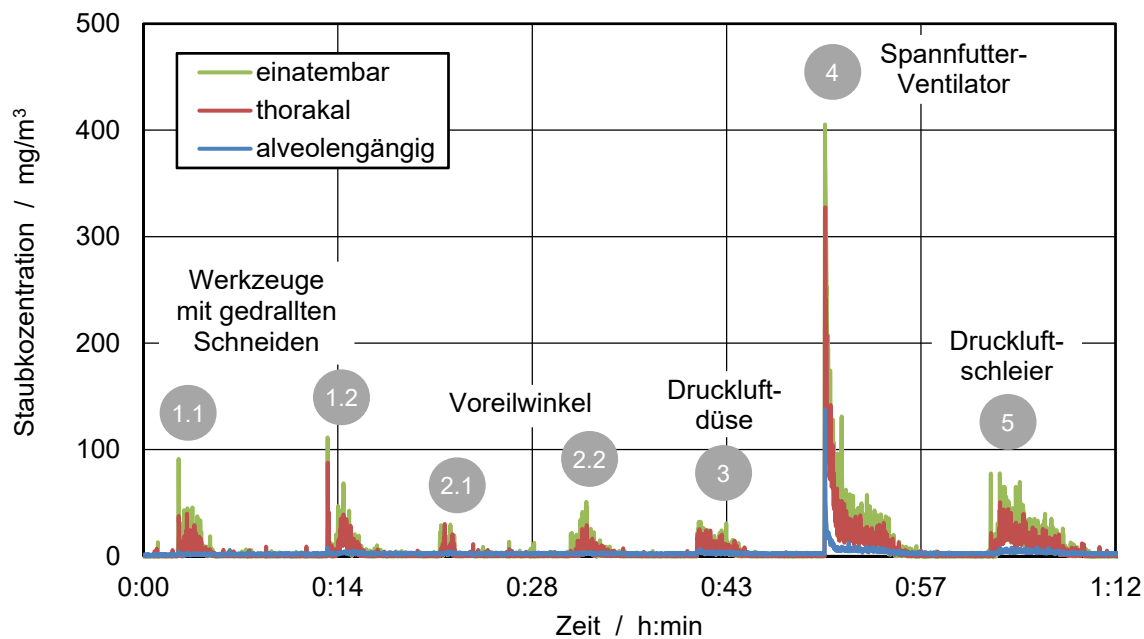


Abbildung 6-3: Staubkonzentrationen bei Nutzung der fünf technologischen Ansätze zur Optimierung des Spangutauswurfs

Auf Basis der Untersuchungen wurde in Tabelle 6-2 eine Bewertung der technologischen Ansätze vorgenommen. Die zwei Systeme mit Drucklufteinsatz ermöglichen einen zuverlässigen Austrag des Spanguts aus der Zerspanstelle. Dieser ist jedoch nur beim Druckluftschleier „nach unten“ zielgerichtet. Zudem wird der Feinstaubanteil des Spanguts bei diesem Ansatz stark aufgewirbelt. Der Spannfutterventilator unterstützt den Spangutaustrag „nach oben“, jedoch wird das Spangut hierbei aus dem kompakten Spangutstrahl in ein größeres Luftvolumen verteilt. Durch die große Ventilatorgeometrie und deren notwendiger Nähe zum Werkstück stellt der Ventilator eine einschränkende Störkontur für die Bearbeitung von 3D-Bauteilen dar.

Der Einsatz von Werkzeugen mit positivem und negativem Drallwinkel sowie das Anstellen von Werkzeugen erweisen sich als vielversprechende Ansätze, um das Spangut in einem definierten Strahl „nach oben“ oder „nach unten“ auszuwerfen. Beide Ansätze werden nachfolgend eingehend untersucht. Allerdings gilt es hierbei zu beachten, dass die Bearbeitung von 3D-Bauteilen mit angestellten Werkzeugen eine Herausforderung im Bereich der Programmierung darstellt und einer erweiterten Kollisionsbetrachtung bedarf.

Tabelle 6-2: Möglichkeiten zur Verbesserung des Spangutauswurfs

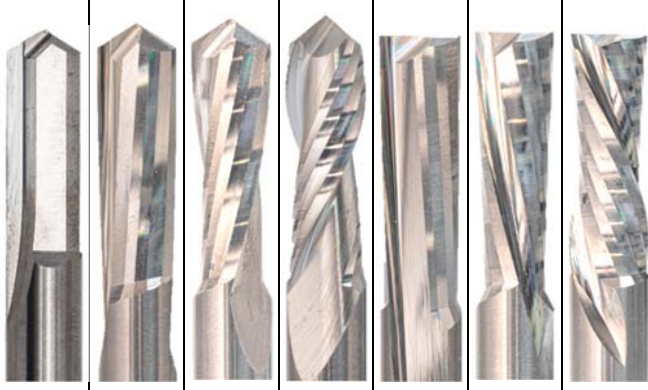
	Werkzeug mit gedrahten Schneiden	angestellte Werkzeug	Druckluftdüse	Spannfutter-ventilator	Druckluftschleier
Austrag aus Zerspanstelle	+	+	+	++	++
Zielgerichteter Abtransport „nach oben“	++	++	--	+	--
Zielgerichteter Abtransport „nach unten“	++	++	-	--	++
Aufwirbelung von Feinstaub	+	++	+	--	o
Eignung für 2D-Bauteile	++	+	++	++	++
Eignung für 3D-Bauteile	++	o	+	--	+

6.2.2 Experimentelle Untersuchungen der ausgewählten technologischen Ansätze zur Optimierung des Spangutauswurfs

Die experimentellen Untersuchungen wurden analog zu den Analysen in Kapitel 5.5 durchgeführt. Als Fräswerkzeuge kamen neben den geradegenutzten Standardwerkzeugen sechs weitere Fräswerkzeuge mit unterschiedlichen Drallwinkeln zum Einsatz, wobei drei einen Rechts- und drei einen Linksdrall

aufwiesen. Die Werkzeuge mit ihren geometrischen Merkmalen sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Tabelle 6-3: Daten der eingesetzten Schaftfräser

	F1	F13	F14	F15	F16	F17	F18
Schneidkantenverrundung r_β / μm	6,3 ... 10,1						
Freiwinkel α / $^\circ$	20						
Keilwinkel β / $^\circ$	60						
Spanwinkel γ / $^\circ$	10						
Drallwinkel λ / $^\circ$	0	+5	+15	+30	-5	-15	-30
Zähnezahl z / -	2						
Schneidstoff / -	HM						
Werkzeug Seitenansicht							

In einfaktoriellen Versuchsreihen wurden die unterschiedlichen Fräswerkzeuge (F1; F13 – F18) bei konstantem Voreilwinkel von $\beta = 0^\circ$ getestet. Anschließend wurden mit dem Standardwerkzeug F1 die Voreilwinkel variiert (Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Versuchsplan zur Optimierung des Spangutauswurfs

	untersuchte Größen						
Voreilwinkel β / $^\circ$	-30	-20	-10	<u>0</u>	10	20	30
Zerspanwerkzeug	<u>F1</u>	F13	F14	F15	F16	F17	F18

Die Untersuchungen dienen auch zur Validierung des Simulationsmodells, das im nachfolgenden Kapitel vorgestellt wird. Um Doppelungen zu vermeiden, werden die

simulativ ermittelten Ergebnissen bereits in diesem Kapitel in den Diagrammen ergänzt, jedoch erst später diskutiert.

Der Einsatz von Werkzeugen mit gedrahten Schneiden ermöglicht einen Auswurf des Spanguts entsprechend der Drallrichtung „nach oben“ oder „nach unten“ (Abbildung 6-4). Hierbei ist eine lineare Abhängigkeit zum Drallwinkel des Werkzeugs zu erkennen. Diese wird durch den Einfluss der Gravitation, insbesondere bei hohen Drallwinkeln, beeinflusst. Der gemittelte Proportionalitätsfaktor a_λ kann wie folgt angegeben werden:

$$a_\lambda = \frac{\psi_m}{\lambda} \approx -0,54$$

Formel 6-1

Das Spangut wird in einem Hauptstrahl mit einem Spangutstrahlöffnungswinkel von $\tau_v = 7,1^\circ \dots 14,3^\circ$ ausgeworfen. Zudem sind einzelne Partikel mit einer großen Streuung zu beobachten (Abbildung 6-12), die außerhalb dieses Strahls ausgeworfen werden.

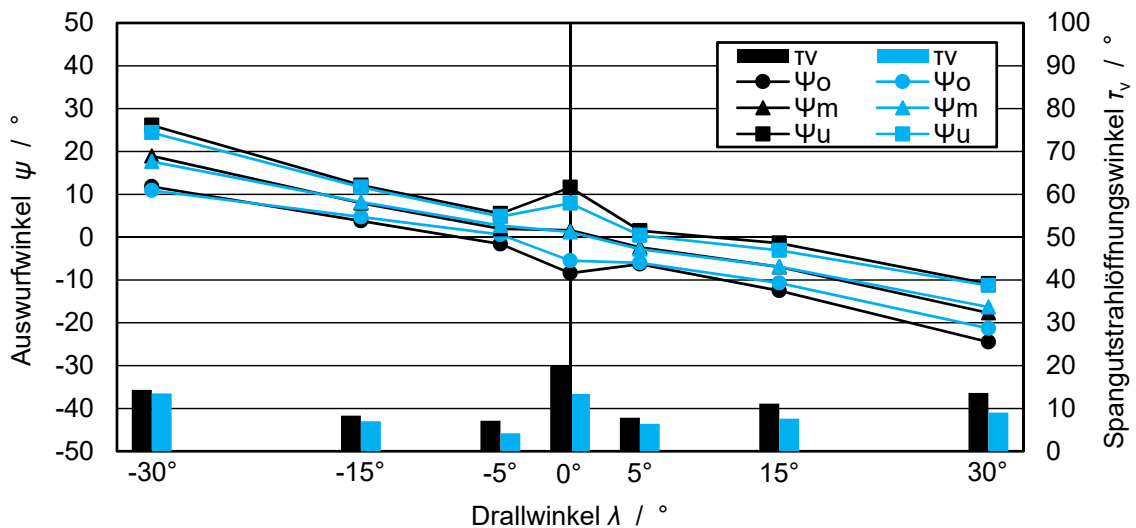


Abbildung 6-4: Vertikaler Partikelaustritt für Werkzeuge mit gedrahten Schneiden (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)

Ein höherer Spangutstrahlöffnungswinkel tritt nur bei dem geradegenuteten Werkzeug auf, bei dem der Spangutstrahl in der Fräsnut gebündelt wird und es vermehrt zu Partikel-Partikel- und Partikel-Wand-Kollisionen kommt.

Die unterschiedlichen Drallwinkel zeigen keinen Einfluss auf den horizontalen Spangutauswurf (Abbildung 6-5). Während des Schneideneingriffs kann jedoch ein geringfügiger Partikelaustritt tangential zur Schneide „nach oben“ (bei positiven Drallwinkel) bzw. „nach unten“ (bei negativen Drallwinkel) festgestellt werden.

Bei Werkzeugen mit gedrahten Schneiden gleitet das Spangut in den Spanräumen (Spanräumen) des Werkzeugs durch Trägheitskräfte „nach oben“ oder „unten“ und erhält eine Geschwindigkeitskomponente in axialer Richtung, aus der der Auswurfwinkel resultiert (Abbildung 2-22). Zudem wird hierdurch bereits ein Teil des Spanguts während der laufenden Schnittbewegung ausgeworfen.

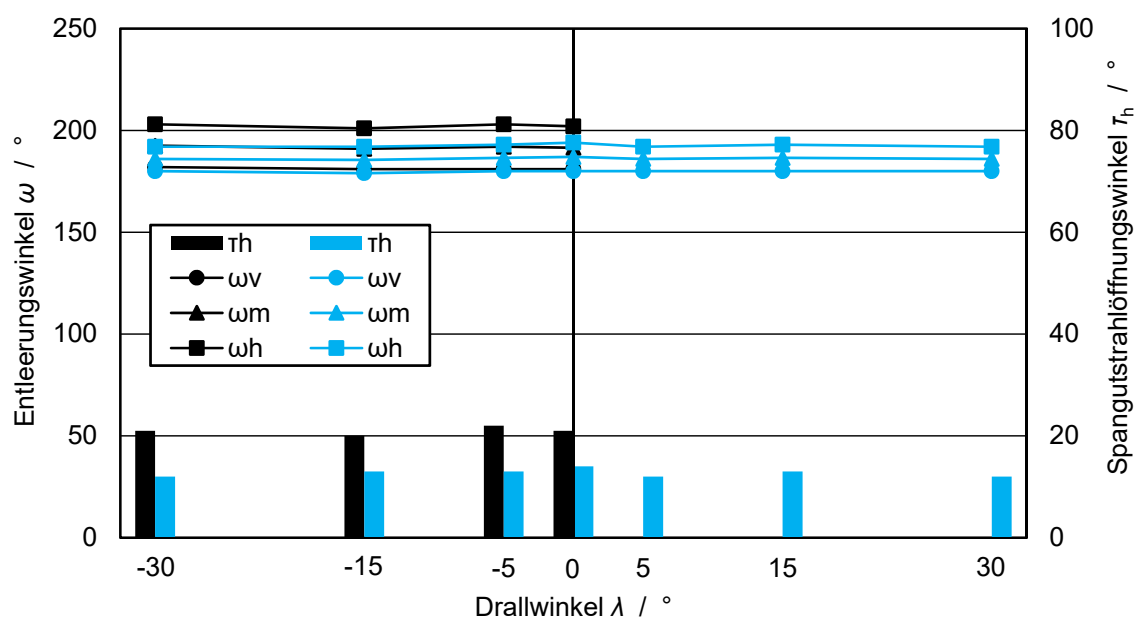


Abbildung 6-5: Horizontaler Partikelaustritt für Werkzeuge mit gedrahten Schneiden (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)⁷

⁷ Bei positiven Drallwinkel wird die Sicht auf den Spangutstrahl durch das Werkstück verdeckt, sodass diese Werte experimentell nicht gemessen werden können.

Nach *Martynenko* (2007) ist die axiale Geschwindigkeitskomponente von diversen Faktoren abhängig, u.a. vom Reibkoeffizienten zwischen Spanpartikel und Werkstück oder der Fliehkraft, die auf die Partikel wirkt. Aufgrund des heterogenen Materialaufbaus von CFK und der während der Schnittbewegung zunehmenden Menge an Spangut im Spanraum, ist von einer starken Wechselwirkung der Partikel im Spanraum auszugehen, die die genannten beiden Faktoren beeinflusst und einem geordneten Spangutauswurf entgegenwirkt. Dies bedingt neben dem Hauptstrahl eine Streuung einzelner Partikel.

Das Anstellen des Werkzeugs zeigt sich als effektives Mittel zur Beeinflussung des Spangutauswurfs (Abbildung 6-6). Der Spangutstrahl wird hierbei näherungsweise proportional zum Voreilwinkel ausgeworfen (Formel 6-2).

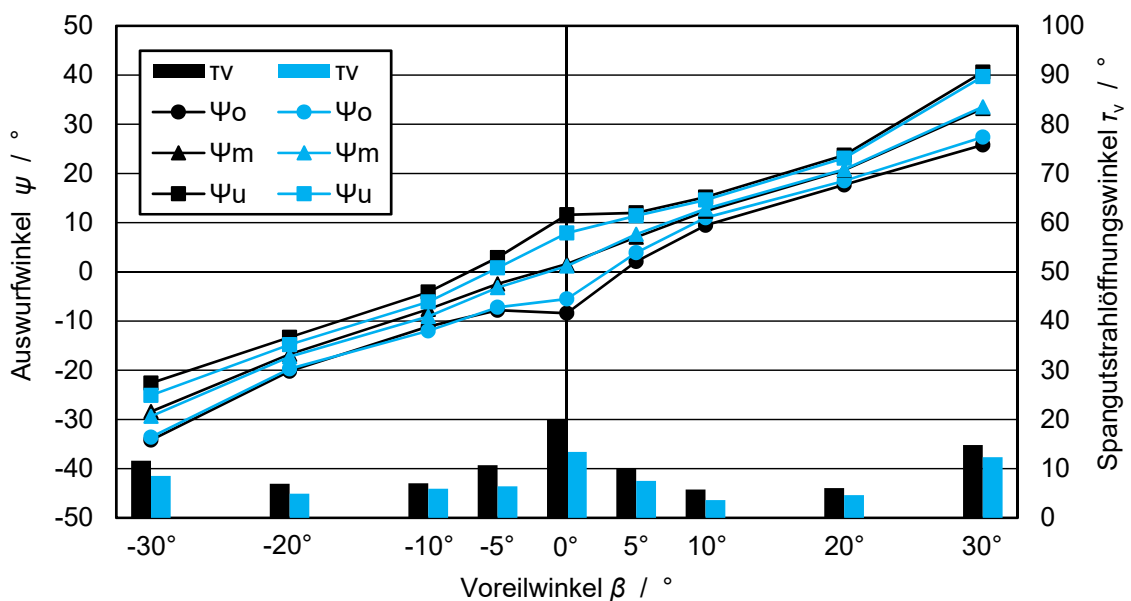


Abbildung 6-6: Vertikaler Partikelaustritt für angestellte Werkzeuge (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)

So können durch das Anstellen des Werkzeugs große Auswurfwinkel erzielt werden. Ein Einfluss der Gravitation ist zwar erkennbar, jedoch auf niedrigem Niveau.

$$a_s = \frac{\psi_m}{\beta} \approx 1,04$$

Formel 6-2

Das Spangut bildet einen kompakten Strahl mit einem Spangutstrahlöffnungswinkel von $\tau_v = 5,7^\circ \dots 14,8^\circ$. Streueffekte wie bei Werkzeugen mit gedrahten Schneiden sind nicht zu beobachten (Abbildung 6-12). Der horizontale Spangutauswurf wird durch den Voreilwinkel nicht beeinflusst (Abbildung 6-7).

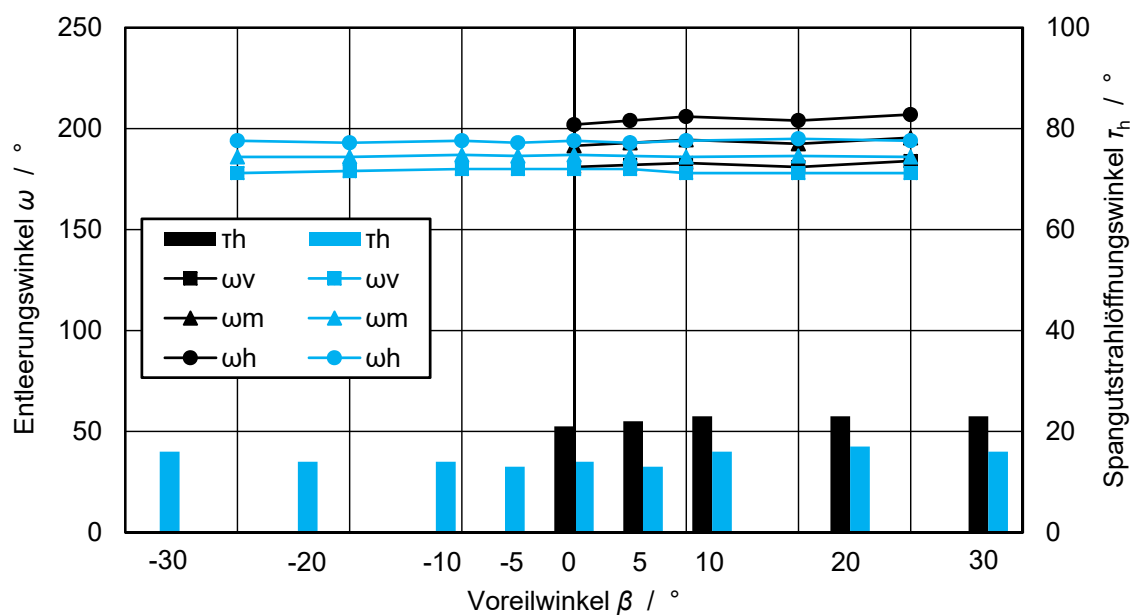


Abbildung 6-7: Horizontaler Partikelwurf für angestellte Werkzeuge (schwarz: experimentelle Werte; blau: Simulationsergebnisse)⁸

Jedoch wird ein geringer Teil des Spanguts auf der dem Spangutstrahl entgegengesetzten Werkstückseite ausgeworfen. Die Betrachtung der Bewegungsbahn eines Spanpartikels entlang des Schneideneingriffs erklärt dieses Phänomen: Nach der Spanentstehung bewegt sich der Partikel in einer kreisförmigen Bahn parallel zum Schneidenflugkreis entlang der Schnittfläche in der Spannut (Abbildung 6-8). Endet die Schnittfläche, wird der Partikel in überwiegend tangentialer Richtung ausgeworfen. Durch das Anstellen des Werkzeugs endet die

⁸ Bei negativem Voreilwinkel wird die Sicht auf den Spangutstrahl durch das Werkstück verdeckt, sodass diese Werte experimentell nicht gemessen werden können.

Begrenzung durch die Schnittfläche in manchen Fällen jedoch schon vor einem Spanbogenwinkel von $\varphi = 180^\circ$, sodass es zu einem differenzierten Spangutaufwurf kommt. Dieser kann in drei Bereiche unterteilt werden:

- Auswurfbereich 1: Das Spangut wird nach Vollendung der Schnittbewegung bei $\varphi = 180^\circ$ in einem kompakten Hauptstrahl ausgeworfen. Dieser Auswurfbereich umfasst den überwiegenden Anteil an Spangut.
- Auswurfbereich 2: Der Auswurf des Spanguts erfolgt im Bereich des Vorschubrichtungswinkels $\varphi = 90^\circ \dots 180^\circ$ tangential zur Schneide.
- Auswurfbereich 3: Das Spangut wird im Bereich $\varphi = 0^\circ \dots 90^\circ$ auf der dem Hauptstrahl abgewandten Werkstückseite ausgeworfen. Da die Spandicke (Kapitel 5.4) und die Schnittfläche sehr klein sind, fällt die Menge an Spangut gering aus.

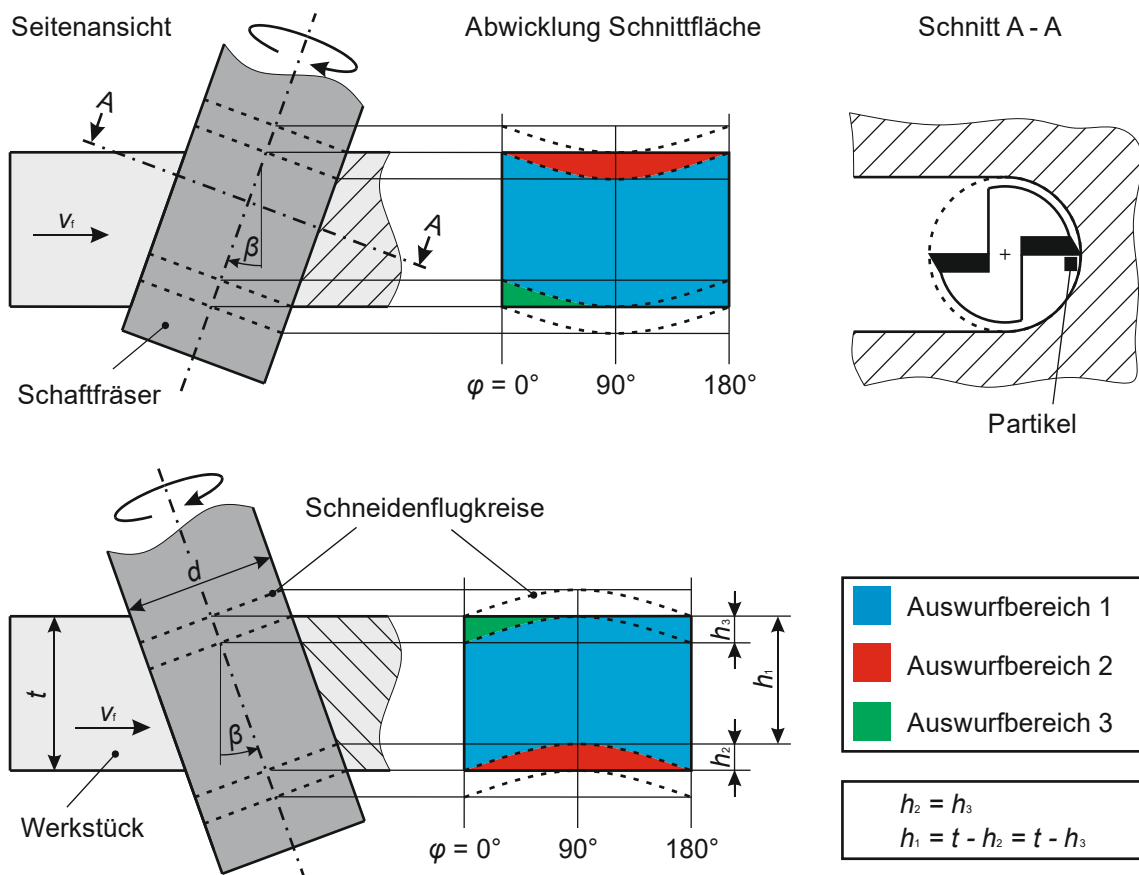


Abbildung 6-8: Darstellung der Partikelbewegung und Auswurfbereich im Vollschnitt mit angestellten Werkzeugen

Der Anteil an Spangut je Auswurfbereich hängt von der Werkstückdicke t , dem Werkzeugdurchmesser d und dem Voreilwinkel β (Formel 6-3) ab. Der bevorzugte Auswurf als Hauptstrahl durch den Auswurfbereich 1 wird durch kleine Voreilwinkel, große Werkstückdicken und kleine Werkzeugdurchmesser begünstigt.

$$h_1 = t - h_{2/3} = t - \frac{d}{2} \sin(\beta)$$

Formel 6-3

Durch das Anstellen der Werkzeuge oder den Einsatz von Werkzeugen mit gedrahten Schneiden wird eine Zerspangkraftkomponente senkrecht zur Bauteiloberfläche induziert, die zu Schwingungen senkrecht zu den Faserebenen führt. Die Schwingungen erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Bearbeitungsfehlern wie Delaminationen, Ausbrüchen oder Ausfransungen. Wird im Prozess eine Vakuumspannvorrichtung eingesetzt, erhöhen die Schwingungen zudem die Gefahr eines lokalen Abhebens des Bauteils, was in Verbindung mit dem Verlust des Unterdrucks zu einem Komplettversagen der Bauteilspannung führt.

Zur Analyse der Zerspangkraftkomponenten wurden Fräsversuche analog zu den in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen zum Spangutauswurf durchgeführt. Hierbei kamen ein 4-Komponenten-Dynamometer der *Kistler Gruppe* vom Typ 9272 in Kombination mit einem 4-Komponenten-Ladungsverstärker der *Kistler Gruppe* vom Typ 5070A sowie ein Multifunktionsdatenerfassungsgerät der Firma *National Instruments* vom Typ *NI USB-6212* zum Einsatz. Als Werkstück diente der Standard-Werkstoff (CFK-UD 0°/90° in 6 mm Wandstärke). Dieser wurde für die Untersuchungen auf dem Dynamometer gespannt und mittels Standard-Werkzeug F1 am genutzten Knickarmroboter zerspant. Die Kraftmessung erfolgte mit einer Abtastrate von 1 kHz. Die Zerspangkraftkomponenten wurden entsprechend Abbildung 6-9 aufgenommen. Für die Beurteilung wurde nur die kritische Vertikalkraft F_v herangezogen.

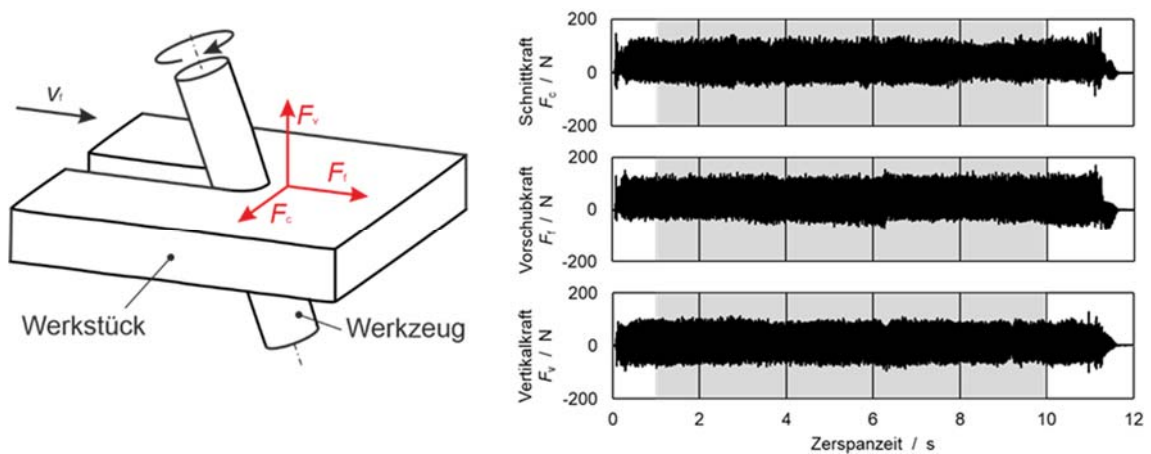


Abbildung 6-9: Kraft- und Schwingungsmessung (links: Kräfte am Fräswerkzeug; rechts: gemessene Zerspankraftkomponenten und Messbereich)

Der Betrachtungsbereich wurde auf den mittleren Zeitraum zwischen 1 s bis 10 s eingeschränkt, um Effekte durch den Ein- und Austritt des Werkzeugs auszuschließen. Zur Bewertung der Schwingungen wurde die mittlere Amplitude der Vertikalkraft F_v im Betrachtungsbereich berechnet.

Die Kraft- und Amplitudenwerte für die verschiedenen Drall- bzw. Voreilwinkel sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind sie in Abhängigkeit des mittleren Auswurfwinkels aufgetragen.

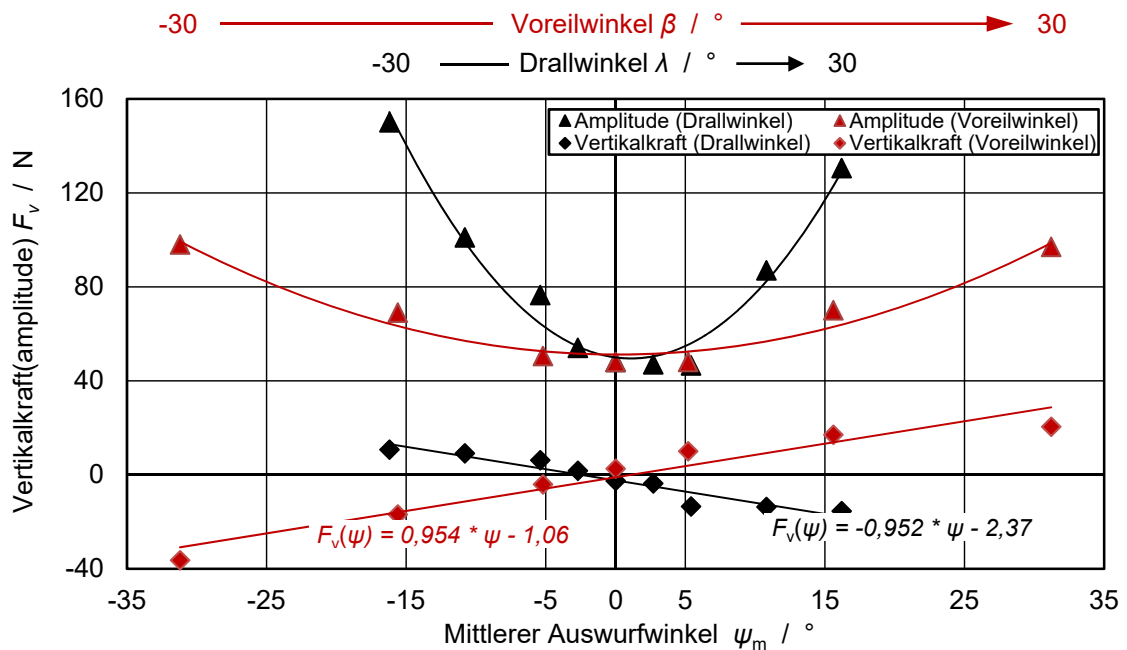


Abbildung 6-10: Vertikalkraft und Schwingungsamplitude in Abhängigkeit von Werkzeug-Drallwinkel und Voreilwinkel

Werkzeuge mit gedrahten Schneiden und angestellte Werkzeuge weisen eine ähnliche lineare Abhängigkeit zwischen Auswurfwinkel und Vertikalkraft auf (Steigung der Geraden $-0,952$ bzw. $0,954$). Jedoch wirkt die Vertikalkraft in Abhängigkeit des mittleren Auswurfwinkels für die beiden Ansätze in die entgegengesetzten Richtungen. Die durch das Anstellen der Werkzeuge im Vergleich zum Einsatz von gedrahten Werkzeugen resultierenden größeren Auswurfwinkel führen zu nahezu proportional größeren Vertikalkräften.

Werkzeuge mit Drall erzeugen deutlich höhere Schwingungsamplituden im Vergleich zu angestellten Werkzeugen. Während des Schneideneingriffs wird durch die Schneide eine Zerspankraftkomponente in vertikaler Richtung erzeugt, die bei einem zweiseidigen Werkzeug am Schneidenaustritt wieder auf null absinkt, was zu einer starken Anregung führt. Bei angestellten Werkzeugen überlagern sich vertikale Anteile der Vorschubkraft (konstant) mit Anteilen der Schnittkraft (alternierend), die während des Schneideneingriffs in etwa sinusförmig das Vorzeichen wechselt. Durch den sinusförmigen Kraftverlauf wird eine geringere Schwingung induziert als durch den abrupten Kraftabfall bei den Werkzeugen mit gedrahten Schneiden.

In einer abschließenden Bewertung der zwei Ansätze zur Optimierung des Spangutauswurfs können dem Anstellen der Werkzeuge Vorteile hinsichtlich der Kompaktheit des Spangutstrahls, möglicher hoher Auswurfwinkel und der Vermeidung von Streuung zugesprochen werden. Jedoch wird nicht das vollständige Spangut in Vorzugsrichtung ausgeworfen, wie es bei Werkzeugen mit gedrahten Schneiden der Fall ist. Werkzeuge mit Drall neigen wiederum zu höheren Schwingungen am Bauteil (Tabelle 6-5). Zu berücksichtigen sind zudem die bereits in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Nachteile, die sich bei angestellten Werkzeugen für die Prozessführung ergeben.

Tabelle 6-5: Bewertung des Spangutauswurfs

	Werkzeuge mit Drall	Anstellen der Werkzeuge
Kompaktheit Spangutstrahl	+	++
Maximaler Auswurfwinkel	o	++
Streuung Spangutstrahl	-	++
Vollständiger Auswurf in Vorzugsrichtung	++	-
Vertikalkräfte	+	+
Schwingungen	-	+

6.3 Aufbau und Validierung des Simulationsmodells

Die Auslegung und Optimierung von Einrichtungen zur Erfassung und Absaugung von Spangut beruhen auf langjährigem Erfahrungswissen, der Vereinfachung von Randbedingungen, aufwendigen experimentellen Untersuchungen und iterativen Optimierungsschritten. Eine Möglichkeit zur Verkürzung von Entwicklungszeiten und der effektiveren und effizienteren Gestaltung der Absaugung bietet die numerische Strömungssimulation (Dressler 2007). Daher wird in diesem Kapitel ein Strömungsmodell zur Simulation von CFK-Partikeln in Luftströmungen entwickelt und validiert. Dieses dient der weiteren Optimierung der Absaugsysteme.

Auslegung der Strömungssimulation:

Die numerische Strömungssimulation ist eine Methode zur approximativen Lösung komplexer Aufgaben der Strömungsmechanik (Noll 1993). Die gebräuchlichsten Gleichungen zur Beschreibung von Strömungen sind die Navier-Stokes-Gleichungen, die die Grundlagen der gesamten Hydrodynamik bilden (Herwig et al. 2018; Martin 2011). Eine direkte numerische Simulation (DNS) der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen ist technisch machbar, bedarf jedoch enormer

Rechenkapazitäten (Schwarze 2013). In der Praxis werden deshalb Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen vorgenommen und in Grundgleichungen für spezielle Strömungssituationen überführt. Eine erste Vereinfachung kann durch die Annahme der Inkompressibilität der Fluide vorgenommen werden. Dies führt für Strömungen mit Machzahlen $Ma < 0,3$ (entsprechend Strömungsgeschwindigkeiten $v_L < 100$ m/s) zu hinreichend genauen Ergebnissen (Durst 2006; Schwarze 2013). Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Absaugtechnik von FVK liegen typischerweise im Bereich $v_L = 15$ m/s ... 25 m/s und somit deutlich unterhalb dieser Grenze, weshalb die Annahme inkompressibler Fluide zulässig ist.

Die Grundgleichungen für inkompressible Fluide differenzieren zwischen laminaren und turbulenten Strömungen (Laurien et al. 2018). Eine Klassifikation kann anhand der Reynolds-Zahl vorgenommen werden, die anhand geometrischer Merkmale des Strömungsproblems, der Strömungsgeschwindigkeit und Stoffgrößen des Fluides berechnet wird (Noll 1993). Für die typischen Strömungsgeschwindigkeiten und Dimensionen der Werkzeugmaschinen und Absaugsysteme in der CFK-Zerspanung kann anhand der Reynolds-Zahl von einer turbulenten Strömung ausgegangen werden. Für den Partikelwurf in ruhender Luft hingegen weist die Reynolds-Zahl auf eine laminare Strömung hin.

Für turbulente Strömungen wurde die Large-Eddy-Simulation (LES) ausgewählt. Diese filtert die Navier-Stokes-Gleichungen mittels eines Tiefpassfilters, wobei große Wirbelstrukturen (large eddies) direkt berechnet, während kleinere durch ein Turbulenzmodell approximiert werden (Schwarze 2013). So ermöglicht die Large Eddy Simulation eine akzeptable Genauigkeit bei einer vertretbaren Rechenzeit. Als Turbulenzmodell werden situationsabhängig das $k-\varepsilon$ - oder das $k-\Omega$ -Turbulenzmodell herangezogen.

Für laminare Strömungen können die Navier-Stokes-Gleichungen weiter vereinfacht werden, da die Turbulenzkräfte entfallen. Die vereinfachten Gleichungen können mittels direkter numerischer Simulation gelöst werden, weshalb keine Modelle zur Vereinfachung herangezogen werden müssen.

Auslegung der Partikelsimulation

Neben der reinen Luftströmung soll das Simulationsmodell vor allem das Flugverhalten der CFK-Partikel abbilden. Es handelt sich somit um ein Phänomen der Zweiphasenströmung, bei dem sich ein Feststoff (hier CFK-Partikel) in einem Gas (hier Luft) bewegt. Die Untersuchungen des Spanguts und des Spangutauswurfs haben in Kapitel 5.4 gezeigt, dass bei der Zerspanung unterschiedliche Partikelformen und Größenverteilungen auftreten. Das Spangut wird in einem Spangutstrahl ausgeworfen und verteilt sich im Umfeld der Zerspanstelle. Die starke Inhomogenität des Spanguts und dessen inhomogene Verteilung im umgebenden Luftvolumen erfordern eine Betrachtung jedes Partikels als Einzelelement. Diesen Ansatz bietet die Diskrete-Elemente-Methode (DEM), die die Bewegung jedes Partikels sowie seine Wechselwirkung mit der Umgebung mithilfe der Lagrange-Funktion berechnet (Kloss et al. 2012). Grundlage hierfür bildet das zweite Newtonsche Gesetz, das sowohl für die translatorische (Formel 6-4) als auch für die rotatorische Bewegung (Formel 6-5) herangezogen wird (Fonte et al. 2015; He et al. 2018).

$$m_P \frac{dv_P}{dt} = F_P^C + m_P g + F_P^{fp}$$

Formel 6-4

$$I_P \frac{d\omega_P}{dt} = T_P^C + T_P^{fp}$$

Formel 6-5

Die Terme F_P^C von Formel 6-4 und T_P^C von Formel 6-5 beinhalten hierbei die auf den Partikel wirkenden Kräfte und Momente durch Partikel-Partikel- oder Partikel-Wand-Kollisionen. Alle anderen auf die Partikel wirkenden Kräfte, abgesehen von der einzeln aufgeführten Gewichtskraft, werden im Term F_P^{fp} zusammengefasst. Dieser summiert alle wirkenden Fluidkräfte wie Druck- und Widerstandkräfte auf und stellt gemeinsam mit den Fluidmomenten T_P^{fp} die Schnittstelle zwischen Strömungssimulation und DEM-Simulation dar. Des Weiteren beinhaltet der Term

alle weiteren Kräfte wie Auftriebskraft, Van-der-Waals-Kraft, Magnus-Kraft und viele mehr (Fonte et al. 2015). In der theoretischen Betrachtung von Kapitel 4 wurde der Einfluss dieser Kräfte ausführlich diskutiert und bewertet. Auf Basis dieser Einschätzung werden für das Simulationsmodell ausschließlich die Fluidkräfte berücksichtigt.

Bei der Berechnung des Kräfte- und Momentenübergangs zwischen Fluid und Partikel kommt der Widerstandskraft eine Schlüsselrolle zu. In Kapitel 4 wurden mehrere Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche Partikelformen vorgestellt. Die in Kapitel 5.4 untersuchten Partikel weisen spezifische Formen auf. Auch kann eine ideale Anströmung ohne Rotations- oder Taumelbewegung nicht sichergestellt werden, weshalb die statischen Widerstandsbeiwerte nur bedingt Gültigkeit haben. Darum wird auf das Ganser-Widerstands-Korrelationsmodell zurückgegriffen, das die Widerstandsbeiwerte auf Basis der Partikelform, Bewegung und Anströmung berechnet (El-Emam et al. 2021)

Im Allgemeinen ist der Massenstrom des Spanguts im Vergleich zum Massenstrom der Absaugung vergleichsweise gering. Die Beeinflussung der Luftströmung durch einen Kraft- und Momentenübertrag der Partikel kann in diesem Fall vernachlässigt werden. Die Berechnung der Partikelflugbahnen erfolgt somit in zwei Schritten: einer reinen Strömungssimulation und einer nachgelagerten Partikelsimulation im zuvor berechneten Strömungsfeld. Im Nahfeld des Werkzeugs tritt jedoch eine hohe Konzentration an Partikeln im Vergleich zum umgebenden Luftvolumen auf. Die Partikelgeschwindigkeit beträgt hierbei mehrere Meter pro Sekunde (Kapitel 5.5), sodass in diesem Fall die Induktion einer Schleppströmung möglich ist. Darum wird eine Zwei-Wege-Kopplung (2-way coupling) genutzt. In dieser Methode werden nach jedem Rechenschritt der Strömungssimulation (time step) die Fluidkräfte und Momente auf die Partikel berechnet. Die Partikelbewegungen werden mit diesen Informationen neu berechnet und die auf das Fluid wirkende Kräfte und Momente angepasst. Die Strömungssimulation wird aktualisiert und der nächste Rechenschritt durchgeführt, bis das vorgegebene Zeitintervall erreicht ist.

Validierung des Simulationsmodells:

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt am Beispiel des Partikelauswurfs entsprechend den Untersuchungen in Kapitel 6.2.2. Dies ermöglicht nicht nur eine Betrachtung des Partikelauswurfs durch das Werkzeug, welcher primär durch Partikel-Partikel- und Partikel-Wand-Kollisionen geprägt ist, sondern auch des anschließenden Partikelflugs in der Luft, welcher durch den Strömungswiderstand bestimmt wird. Für die Strömungssimulation wird die kommerzielle Software *ANSYS Fluent* der Firma *Ansys, Inc.* benutzt, während für Partikelsimulation die Software *Rocky DEM* der *ESSS Group* zum Einsatz kommt. Der Versuchsaufbau wird auf das Werkstück, das Werkzeug und ein umgebendes Luftvolumen vereinfacht. Für die Strömungssimulation wird das Luftvolumen in mehrere Einzelbereiche (domains) unterteilt, um unterschiedliche Netztypen zu realisieren (Abbildung 6-11).

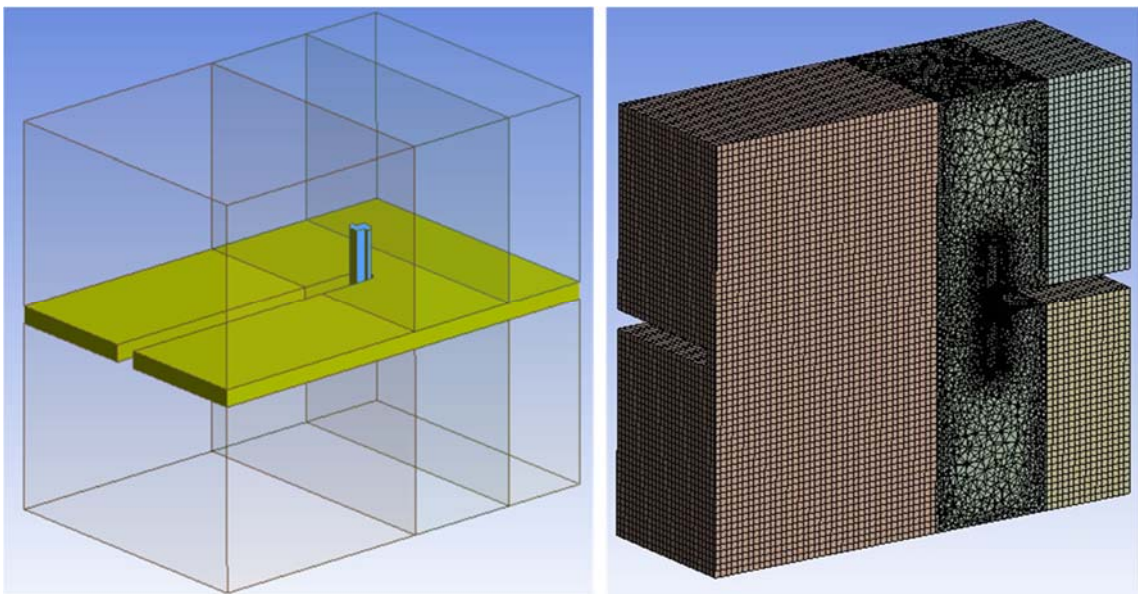


Abbildung 6-11: Simulierter Zerspanprozess mit Werkstück (gelb) und Werkzeug (blau) (links); Längsschnitt durch die Fluid-Domains mit unterschiedlichen Netztypen (rechts)






Das Werkzeug erfährt in der Simulation eine Rotation mit $n = 7162$ 1/min. Für die umgebende Domain wurde daher ein *Dynamic Mesh* eingesetzt, das sich der rotierenden Werkzeuggeometrie kontinuierlich anpasst. Hierfür wurde ein Tetraeder-Netz ausgewählt, das eine schnelle und unkomplizierte Neuberechnung des Netzes ermöglicht. Dieser ungeordnete Netztyp reduziert jedoch die

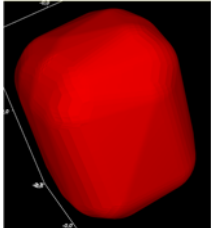
Simulationsgenauigkeit (Matsson 2021), weshalb für die anderen Fluiddomains ein geordnetes *Hexaeder-Netz* ausgelegt wurde.

Die Simulation bildet den Partikelwurf in ruhender Luft ab. Da eine unbewegliche Fluiddomain erhebliche Probleme bei der Berechnung mit sich bringen würde, wurde eine minimale Strömung von $v_L = 0,0001$ m/s durch die Luftdomain angelegt, die im Vergleich zur Partikelgeschwindigkeit vernachlässigbar gering ist. Als Fluid wurde Luft als *Ideales Gas* ausgewählt.

Die Simulation der Spanbildung beim Fräsprozess von CFK ist ein komplexer und rechenaufwendiger Vorgang, der noch der Grundlagenforschung unterliegt (Vazquez Martinez et al. 2016). Aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich überwiegend mit der Spanbildung im Orthogonalschnitt (Abena et al. 2017; Cepero-Mejias et al. 2019). Die Implementierung einer Zerspansimulation in die DEM-Simulation zur Erzeugung der Partikel wurde aus diesem Grund verworfen. Als zielführend wurde daher das Vorgehen gewählt, die Partikel zu modellieren und entlang des Flugkreises der Schneide am Werkstück durch virtuelle Adhäsionskräfte anzuheften. Mit Beginn der Schnittbewegung wurden diese virtuellen Kräfte gelöst, sodass die Schneide bei ihrer rotatorischen Bewegung die Partikel vom Werkstück ablöst. Die Form der Partikel und die Partikelgrößenverteilung wurden auf Basis der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 5.4 für den Standardfall getroffen (Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: Simulierte Partikel

	Partikelklassen				
Partikelbreite x_c / μm	5	10	50	100	250
Partikellänge Fe_{\max} / μm	8,3	16,5	82,5	165	412
Längen-/Breitenverhältnis l/b / -	1,65				
Partikelfarbe in Simulation					



Hierbei wurde in der Partikelgrößenverteilung die Partikelklasse bis zu einem Partikeldurchmesser von $x_c = 250$ μm berücksichtigt, da die größeren Partikel nicht

bei jedem Schneideneingriff beobachtet wurden. Die Gesamtanzahl an Partikeln wurde auf 150 limitiert, um die Rechenzeit der Simulation auf einem akzeptablen Niveau zu begrenzen (ca. 40 ... 50 h je Simulation).

Während der Schnittbewegung und des anschließenden Partikelauswurfs kommt es zu einem Kontakt zwischen den Partikeln, den Partikeln und dem Werkzeug sowie den Partikeln und dem Werkstück. Für diese Kontakte wurden Kontaktbedingungen auf Basis der in Tabelle 6-7 festgelegt.

Tabelle 6-7: Gewählte Werkstoff- und Kontaktgrößen

Größe	Bezug	Wert	Quelle
Haftreibungskoeffizient CFK/CFK	Partikel/Partikel oder Partikel/Werkstück	0,7	(Schön 2004)
Gleitreibungskoeffizient CFK/CFK		0,5	Schätzung
Restitutionskoeffizient CFK/CFK		0,85	(Martínez et al. 2005)
Tangentialsteifigkeitsverhältnis CFK/CFK		1	Rocky User Manual
Haftreibungskoeffizient CFK/Stahl ⁹	Partikel/ Werkzeug	0,33	(Quintelier et al. 2005)
Gleitreibungskoeffizient CFK/Stahl ⁹		0,27	(Quintelier et al. 2005)
Restitutionskoeffizient CFK/Stahl ⁹		0,3	(Dhaliwal 2016)
Tangentialsteifigkeitsverhältnis CFK/Stahl		1	Rocky User Manual
Dichte CFK	Partikel und Werkstück	1600 kg/m ³	Messung
E-Modul CFK		90 GPa	Schätzung
Dichte Hartmetall	Werkzeug	14000 kg/m ³	(Brookes 1992)
E-Modul Hartmetall		550 MPa	(Brookes 1992)

Die Simulation wurde in Zeitschritten von 0,05 s berechnet und manuell gestoppt, sobald der Partikelflug eine ausreichende Weite erreicht hatte. Die

⁹ Die beiden Quellen beziehen sich auf CFK/Stahl- bzw. CFK/Aluminium. Da zur Paarung CFK/Hartmetall keine Messwerte vorliegen, wurden diese Daten als Näherung eingesetzt.

Konvergenzkriterien der Strömungssimulation für die Kontinuitätsgleichung und die Geschwindigkeitsgleichungen in den drei Raumrichtungen wurden auf 10^{-6} festgelegt.

Ein Vergleich der Wärmebildaufnahmen der experimentellen Untersuchungen und der Simulation der Partikeltrajektorien zeigt eine hohe Übereinstimmung. Dies gilt sowohl für die Werkzeuge mit unterschiedlichen Drallwinkeln als auch für die angestellten Werkzeuge (Abbildung 6-12). Hier zeigt der Partikelauwurf durch das Werkzeug eine hohe Übereinstimmung mit der Realität, ebenso stimmen auch die weiteren Partikelflugbahnen überein. Die Simulation ermöglicht zudem die differenzierte Betrachtung der einzelnen Partikelklassen, die das in der theoretischen Betrachtung von Kapitel 3 prognostizierte Flugverhalten zeigen.

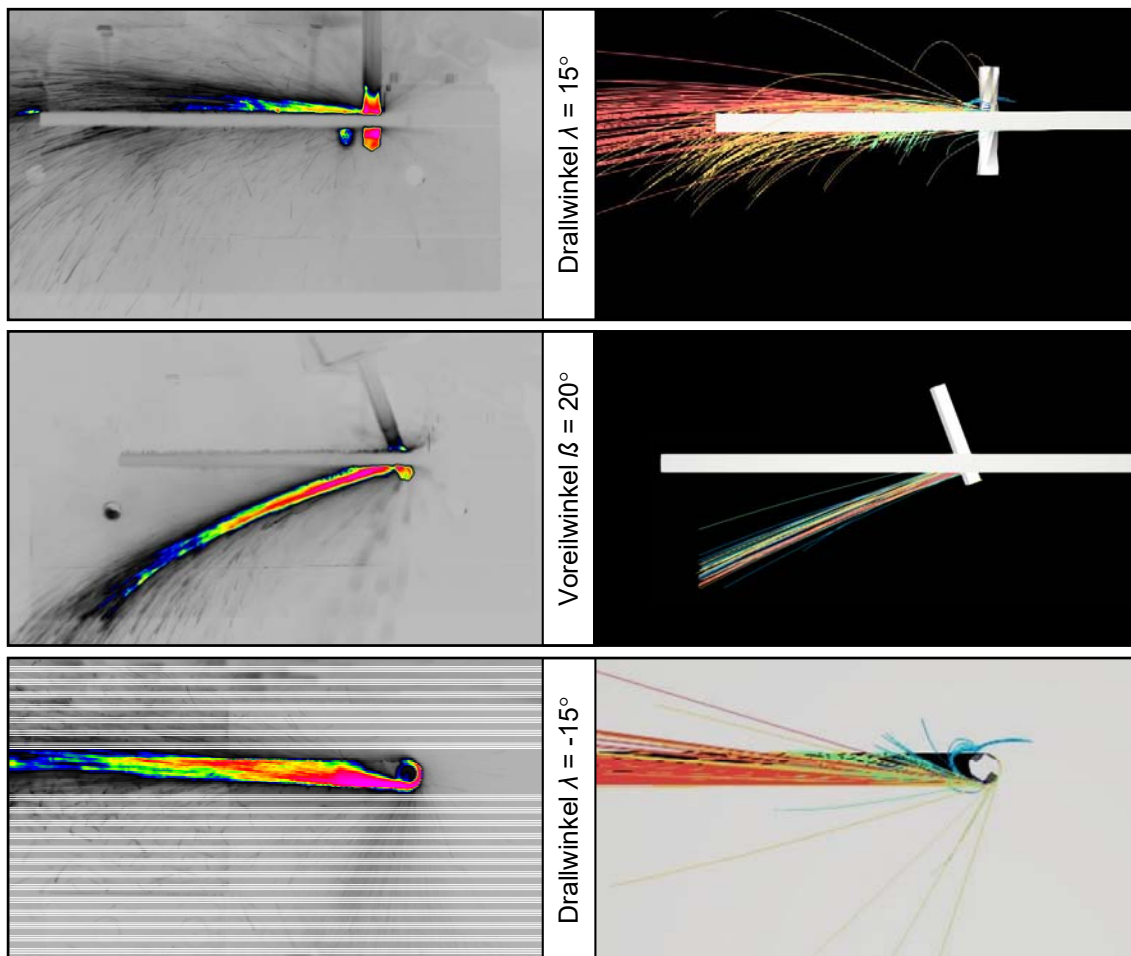


Abbildung 6-12: Gegenüberstellung experimenteller und simulativer Untersuchungen des Partikelflugs

Neben der qualitativen Betrachtung zeigt auch ein Vergleich der Auswurf- und Spangutstrahlöffnungswinkel eine gute Übereinstimmung. Diese Werte wurden vorab in den Abbildung 6-4 -Abbildung 6-6 in Kapitel 6.2.2 dargestellt. Die mittleren Auswurfwinkel der Simulationen stimmen in einem hohen Maße mit den experimentell erhobenen Werten überein (Tabelle 6-8). Die Spangutstrahlen der Simulationen sind jedoch weniger stark aufgefächert, was auf die geringere Anzahl an Partikeln in der Simulation zurückzuführen ist: der Spanraum der Werkzeuge wird schneller entleert und es kommt zudem zu weniger Partikel-Partikel- und Partikel-Werkstück-Kollisionen, was einen kompakteren Spangutstrahl und somit kleinere Spangutstrahlöffnungswinkel begünstigt.

Tabelle 6-8: Abweichung zwischen experimentellen und simulativen Daten

	Werkzeuge mit Drall	Angestellte Werkzeuge
Abweichung mittlerer Auswurfwinkel ψ_m	3,4 %	1,9 %
Abweichung Spangutstrahlöffnungswinkel τ_v	14,4 %	13,3 %
Abweichung mittlerer Entleerungswinkel ω_m	2,9 %	3,6 %
Abweichung Spangutstrahlöffnungswinkel τ_e	31,3 %	36,4 %

Fazit zum Simulationsmodell

Zusammenfassend besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulationsmodell und realem Partikelflug. Der Auswurf der Partikel, der primär über die Kontaktbedingungen zwischen Partikel und Partikel, Werkstück und Werkzeug definiert ist, wird sehr genau abgebildet. Die für die Auslegung der Absaugsysteme relevanten Auswurf- und Entleerungswinkel stimmen entsprechend Tabelle 6-8 sehr gut überein. Die wegen der Simulationsdauer reduzierte Anzahl an Partikeln führt jedoch zu kompakteren Spangutstrahlen. Der an den Partikel auswurf anschließende Flug in der Luft zeigt ebenfalls ein der Realität entsprechendes

Verhalten, sodass das validierte Simulationsmodell für die weiteren Optimierungsschritte eingesetzt werden kann.

6.4 Optimierung ausgewählter Absaugsysteme

In der industriellen Praxis werden Raum- und Kopfabsaugungen sowie spannsystemintegrierte Absaugungen eingesetzt. Diese drei Systeme werden nachfolgend nach den in Kapitel 3 bis Kapitel 6.3 ermittelten Ergebnissen systematisch optimiert.

6.4.1 Optimierung der spannsystemintegrierten Absaugung

Technologischer Ansatz

Die Absaugung durch die Spannvorrichtung ist ein industriell genutztes Verfahren, zu dem gegenwärtig keinerlei Forschungsarbeiten vorliegen. In der Industrie sind unterschiedliche Ansätze und Dimensionierungen vorzufinden, die durchschnittliche Spanguterfassungsraten von $\eta = 73,3 \%$ ermöglichen (siehe Abbildung 3-5). Generell können zwei Ansätze unterschieden werden (Abbildung 6-13):

1. Das Spangut wird entgegen der Vorschubrichtung abgesaugt. Dieser Ansatz nutzt die kinetische Energie des Spangutstrahls, dessen Richtungsvektor mit dem der Luftströmung im Absaugkanal annähernd übereinstimmt. Mit zunehmendem Vorschubweg nimmt jedoch die Luftgeschwindigkeit durch Fehlluftzufuhr im Absaugkanal ab.
2. Das Spangut wird in Vorschubrichtung abgesaugt. Dieser Ansatz erfordert eine Richtungsänderung des Spangutstrahls um annähernd 180° . Hier kann von einer näherungsweise konstanten Luftgeschwindigkeit in der Fräsnut, unabhängig vom Vorschubweg ausgegangen werden.

Nachfolgend werden die beiden Ansätze analysiert. Zudem werden die Technologien zur Optimierung des Spangutauswurfes aus Kapitel 6.2 getestet und bewertet. Abschließend erfolgen Untersuchungen zur Förderung des Spanguts im Absaugkanal.

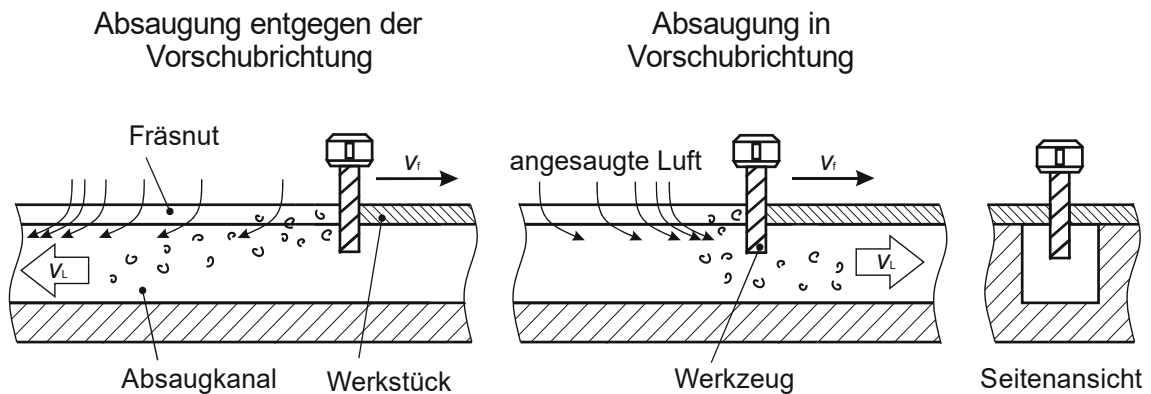


Abbildung 6-13: Unterschiedliche Ansätze der spannsystemintegrierten Absaugung

Auslegung und Untersuchungen

Für die Untersuchungen wurde ein wandelbarer Prüfstand aufgebaut, der in Abbildung 6-14 dargestellt ist. Dieser erlaubt es, Bearbeitungsparameter und Absaugstrategien an unterschiedlichen Absaugkanälen zu untersuchen. Hierzu ist in den Prüfstand ein auswechselbarer, 1000 mm langer Absaugkanal integriert. Eine zweiteilige Spannvorrichtung ermöglicht das Fixieren von Werkstücken an unterschiedlichen Positionen entlang dieses Absaugkanals. Zum Verschließen der verbliebenen Kanalabschnitte stehen unterschiedliche Abdeckungen zur Verfügung. Der Unterdruck am Fräskanal wurde mithilfe des Differenzdruckmessgeräts 512 des Herstellers *Testo* ermittelt. Die Messung des Volumenstroms erfolgte mittels eines Flügelradanemometers vom Typ 417, ebenfalls vom Hersteller *Testo*, in einer Beruhigungsstrecke, die zwischen Absaugkanal und Industriesauger installiert wurde. Als Industriesauger kamen zwei Modelle zum Einsatz: Für die überwiegende Anzahl der Versuche wurde der Typ *CTH48 E/a* des Herstellers *Festool* eingesetzt. Dieser weist einen stufenlos regelbaren Volumenstrom bis $Q_{\max} = 234 \text{ m}^3/\text{h}$ und


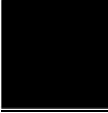


einen maximalen Unterdruck von $p_{\max} = 240.000 \text{ Pa}$ auf. Für den Absaugkanal mit Querschnittsfläche $A = 3.600 \text{ mm}^2$ (Tabelle 6-9) wurde zudem ein Industriesauger vom Typs *DS1220* des Herstellers *Ruwac* parallelgeschaltet. Dieser weist einen maximalen Volumenstrom von $Q_{\max} = 270 \text{ m}^3/\text{h}$ und einen maximalen Unterdruck von $p_{\max} = 207.000 \text{ Pa}$ auf. Die Bestimmung des Spanguterfassungsgrads erfolgte durch Wiegen des nicht abgesaugten Spanguts und des Werkstücks vor und nach der Bearbeitung. Hierfür wurde die Präzisionswaage *EMB-V* des Herstellers *KERN & SOHN* genutzt.



Abbildung 6-14: Prüfstand zur Untersuchung der spannsystemintegrierten Absaugung

Neben den zwei gegensätzlichen Ansätzen zur Absaugrichtung wurden die Schnitt- und Absauggeschwindigkeit sowie die Werkzeuge und Voreilwinkel variiert. Zudem kamen vier verschiedene Absaugkanäle zum Einsatz. Die untersuchten Größen sind in Tabelle 6-9 zusammengefasst, wobei die Standardparameter unterstrichen dargestellt sind.

Tabelle 6-9: Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung der Spanguterfassung der spannsystemintegrierten Absaugung

	Untersuchte Einstellgrößen					
Strömungsgeschwindigkeit der Absaugluft v_L / m/s	11,3	16,8	<u>22,5</u>	26,2	28,8	30,2
Schnittgeschwindigkeit¹⁰ v_c / m/min	90	<u>180</u>	360	540	720	
Werkzeugdrallwinkel λ / °	<u>0</u>	-5	-15	-30		
Voreilwinkel β / °	<u>0</u>	10	20	30		
Absaugrichtung	in Vorschubrichtung			entgegen Vorschubrichtung		
Absaugkanalform und Querschnittsfläche A / mm²	 400	 <u>1600</u>	 3600	 1600		

Die Richtung der Luftströmung im Absaugkanal zeigt einen wesentlichen Einfluss auf den Erfassungsgrad: während die Spanguterfassung bei der Absaugung in Vorschubrichtung auf konstant hohem Niveau verbleibt, fällt der Erfassungsgrad bei einer Luftströmung entgegen der Vorschubrichtung ab einem Vorschubweg von ca. 200 mm stark ab (Abbildung 6-15).

¹⁰ Bei konstantem Zahnvorschub $f_z = 0,05$ mm

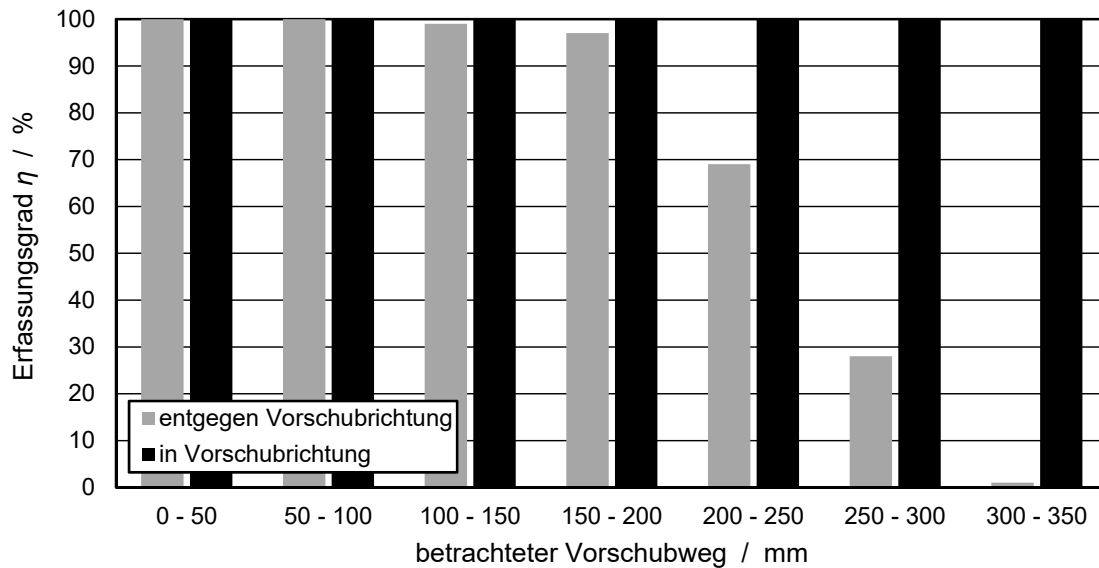


Abbildung 6-15: Erfassungsgrad in Abhängigkeit der Absaugrichtung des Vorschubwegs

Zurückzuführen ist dieses Phänomen auf die Luftgeschwindigkeiten in der Fräsnut unmittelbar im Auswurfbereich des Werkzeugs. Während bei einer Absaugung in Vorschubrichtung konstant hohe Strömungsgeschwindigkeiten in der Fräsnut vorliegen, fällt die Strömungsgeschwindigkeit bei einer Absaugung entgegen der Vorschubrichtung mit fortschreitendem Vorschubweg schnell ab (Abbildung 6-16) und das Spangut sedimentiert zunehmend. Es wird daher eine Absaugung in Vorschubrichtung für die weiteren Untersuchungen genutzt.

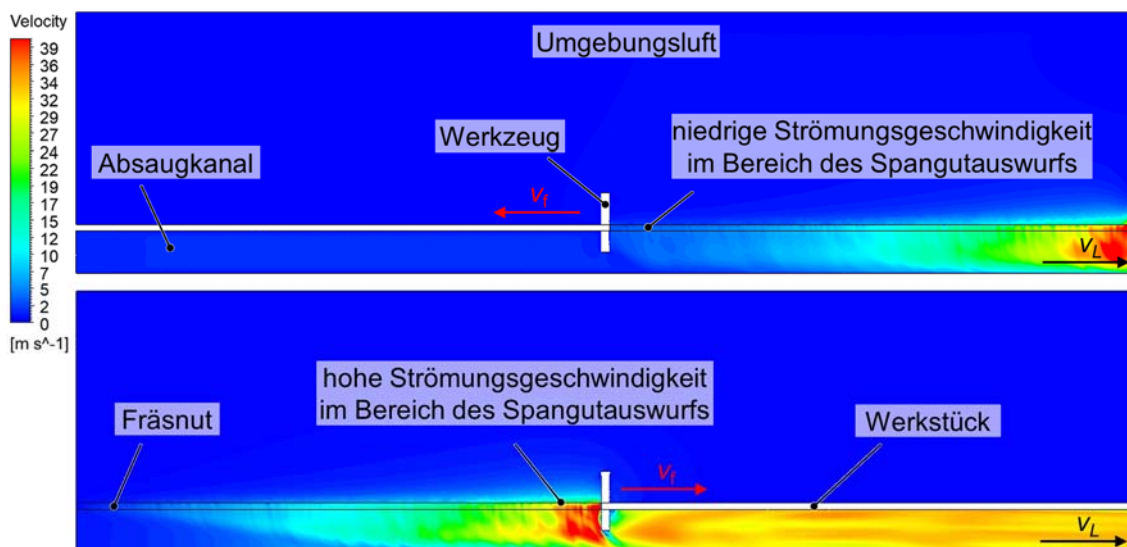


Abbildung 6-16: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fräsnut für die Absaugung in (unten) und entgegen der Vorschubrichtung (oben)

Die Kanalform zeigt keinen wesentlichen Einfluss auf die Spanguterfassung. Jedoch ist bei größeren Querschnitten eine Senkung der Strömungsgeschwindigkeit unter Beibehaltung der Erfassungsrate möglich. Dies ist dadurch begründet, dass bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit in größeren Querschnitten ein proportional größerer Volumenstrom abgesaugt wird. Hierdurch fällt die Strömungsgeschwindigkeit in der Fräsnut erst nach einer längeren Wegstrecke ab (Abbildung 6-17). Es wirkt somit ein höherer Volumenstrom auf die Partikel ein.

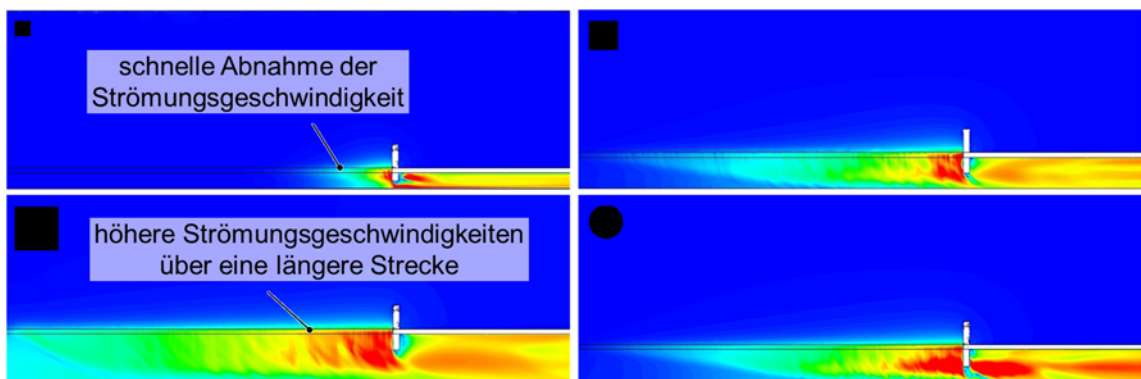


Abbildung 6-17: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fräsnut für verschiedene Absaugkanalquerschnitte und Formen

Der Erfassungsgrad der spannsystemintegrierten Absaugung ist sowohl von der Schnitt- als auch von der Strömungsgeschwindigkeit im Absaugkanal abhängig (Abbildung 6-18).

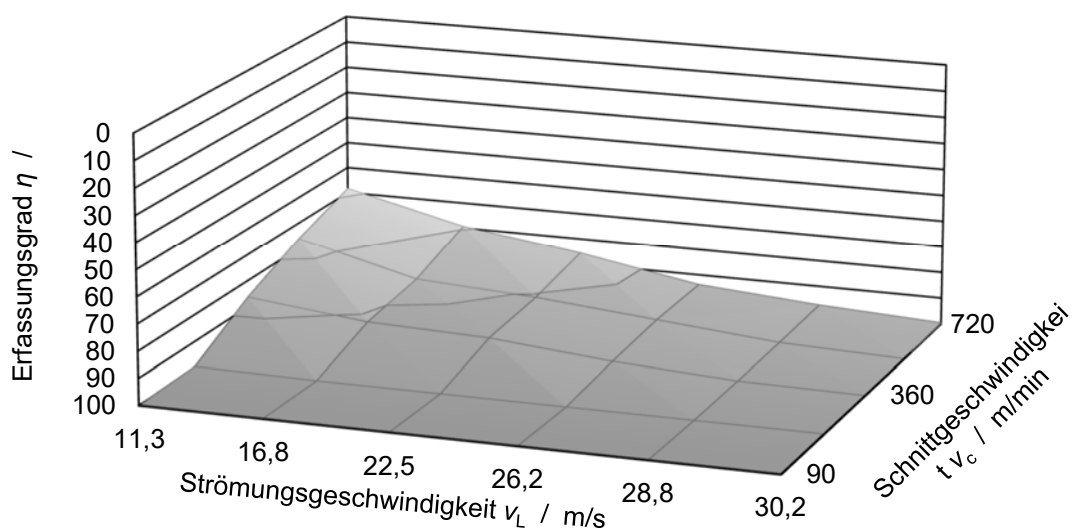


Abbildung 6-18: Erfassungsgrad in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit im Absaugkanal und der Schnittgeschwindigkeit

Für Schnittgeschwindigkeiten von $v_c \leq 180$ m/s und Strömungsgeschwindigkeiten von $v_L \geq 28,8$ m/s wird das Spangut vollständig erfasst (Erfassungsgrad = 100%). Bei zunehmenden Schnitt- und abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten sinkt der Erfassungsgrad. Das nicht erfasste Spangut sedimentiert überwiegend in Auswurfriichtung auf dem Werkstück. Bei der maximalen betrachteten Schnittgeschwindigkeit ($v_c = 720$ m/s) und den beiden geringsten Strömungsgeschwindigkeiten ($v_L = 11,3$ m/s; $v_L = 16,8$ m/s) verblieb zudem Spangut im Absaugkanal.

Eine Verbesserung der Spanguterfassung kann durch das Anstellen des Werkzeugs erzielt werden (Abbildung 6-19). Mit zunehmendem Voreilwinkel wird jedoch vermehrt Spangut durch den Auswurfbereich 3 (Abbildung 6-8) ausgeworfen, das seitlich auf dem Werkstück sedimentiert und dadurch die Spanguterfassung vermindert. Für alle drei Werkzeuge mit negativ-gedrahten Schneiden konnte eine durchweg vollständige Erfassung des Spanguts auch für den höheren Schnittgeschwindigkeitswert ($v_c = 540$ m/s) festgestellt werden. Werkzeuge mit negativem Drallwinkel sind somit für eine verbesserte Spanguterfassung bei diesem Absaugkonzept zu bevorzugen.

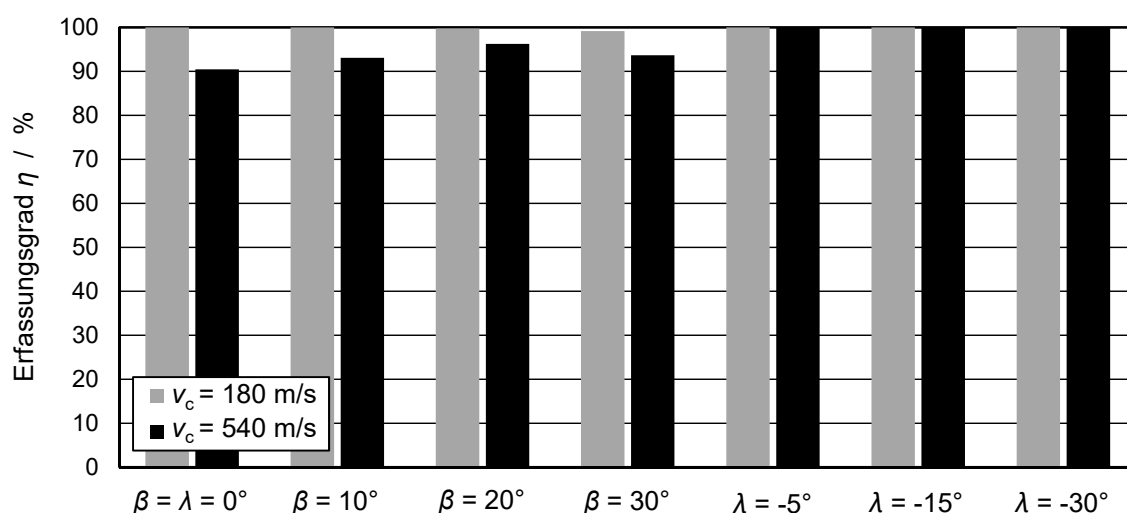


Abbildung 6-19: Erfassungsgrad in Abhängigkeit des Voreilwinkels und des Drallwinkels

Neben der Erfassung der Partikel ist auch deren Transport im Absaugkanal zu betrachten. Hierfür wurden die Absaugkanäle vollständig abgedeckt und eine definierte Menge Spangut an der der Absaugung gegenüberliegenden Seite von oben in den Absaugkanal eingeführt. Unabhängig von Kanalform und Kanalquerschnitt konnten erste Spangutablagerungen ab Strömungsgeschwindigkeiten von $v_L < 4$ m/s festgestellt werden (Abbildung 6-20). Diese Werte liegen um ein Mehrfaches unterhalb der für eine sichere Erfassung der Partikel notwendigen Strömungsgeschwindigkeiten (Abbildung 6-18). Ein prozesssicherer Abtransport sollte daher garantiert sein. Es sollte dabei auf eine strömungsgünstige Ausführung der Absaugkanäle geachtet werden, die Turbulenzen und ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilungen über den Querschnitt durch scharfe Ecken oder übergangslose Querschnittsänderungen verhindert. Auch sollten bei Querschnittsänderungen die notwendigen Mindestströmungsgeschwindigkeiten von $v_L \geq 4$ m/s eingehalten werden. Für eine Überprüfung und Optimierung bietet sich die Strömungssimulation an.

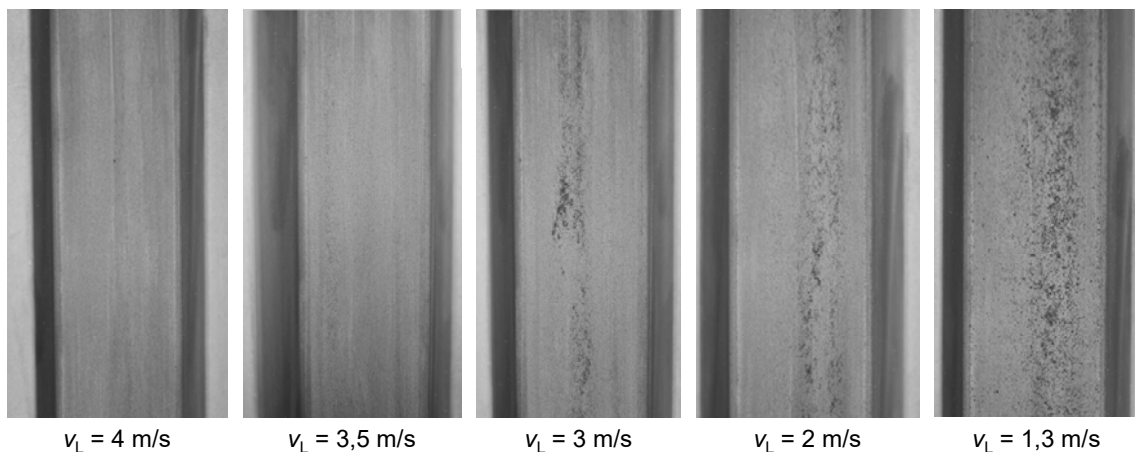


Abbildung 6-20: Partikelsedimentationen im Absaugkanal in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit

Energetische Betrachtung:

Für eine Abschätzung der notwendigen pneumatischen Leistung der spannsystemintegrierten Absaugung wurden die Absaugkanäle mit einem Werkstück abgedeckt, das eine 500 mm lange Fräsnut aufwies. In dieser

Konfiguration wurde der Volumenstrom variiert und der korrespondierende Unterdruck gemessen. Zur Bestimmung der pneumatischen Leistung wurde Formel 3-4 herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-21 dargestellt.

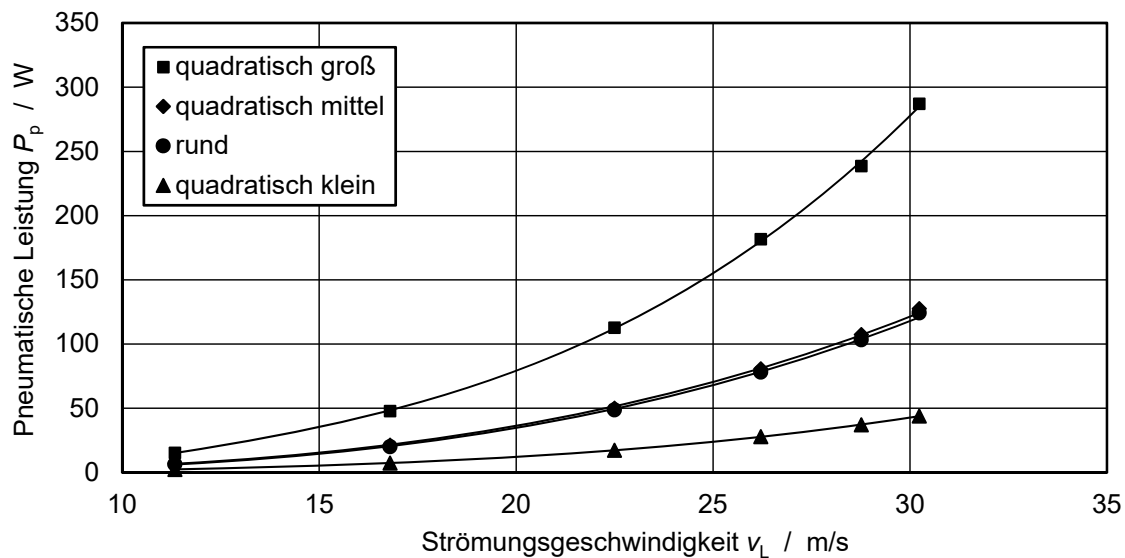


Abbildung 6-21: Pneumatische Leistung zur Absaugung unterschiedlicher Absaugkanäle in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Die pneumatische Leistung für die Absaugung aller Absaugkanäle steigt in kubischen Funktionen. Zurückzuführen ist dies auf den Druckverlust, der eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Quadrat ist (Formel 6-6) und

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} v^2$$

Formel 6-6

den Volumenstrom Q , der wiederum linear von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt (Formel 6-7).

$$Q = Av$$

Formel 6-7

Durch Multiplikation beider Formeln in Formel 3-4 ergibt sich eine kubische Abhängigkeit der pneumatischen Leistung von der Strömungsgeschwindigkeit :

$$P_p = Q \cdot \Delta p = Av \cdot \zeta \frac{\rho}{2} v^2 = A\zeta \frac{\rho}{2} v^3$$

Formel 6-8

Aufgrund der Druckverluste beim Einströmen der Luft durch die Fräsnut und deren konstanter Breite im Vergleich zur Variation des Kanalquerschnitts kann die Formel 6-8 nicht zur Berechnung der pneumatischen Leistung herangezogen werden, da der Druckverlustbeiwert ζ variiert. Die Formel verdeutlicht aber die kubische Abhängigkeit der pneumatischen Leistung von der Strömungsgeschwindigkeit.

Für einen energieeffizienten Einsatz sind Werkzeuge mit negativem Drallwinkel der Schneiden zu bevorzugen, die hohe Erfassungsraten auch bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ermöglichen. Zudem ist die Nutzung kleiner Kanalquerschnitte zu präferieren, was zu einer Senkung des Volumenstroms und folglich der pneumatischen Leistung führt. Hierbei ist zu beachten, dass für die Prozesssicherheit ein Verstopfen der Absaugkanäle vermieden werden muss. Der Querschnitt muss daher entsprechend potenziell abgesaugten Ausschnittteilen, Bruchstücken oder Randabschnitten ausgelegt werden. Bei längeren Fräswegen oder nicht zusammenhängenden Bearbeitungsaufgaben wie einzelne Ausschnitte ist zudem ein sequentielles Absaugen der jeweils aktiven Bearbeitungskontur sinnvoll, um den notwendigen Gesamtvolumenstrom zu reduzieren und eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit an jeder Bearbeitungsstelle zu garantieren.

6.4.2 Optimierung von Kopfabsaugungen

Technologischer Ansatz

Alle im Stand der Technik (Kapitel 2) beschriebenen und in der industriellen Nutzung (Kapitel 3) eingesetzten Kopfabsaugungssysteme berücksichtigen die Gestaltungsprinzipien (Kapitel 6.1) „Partikel abbremesen“ oder „Spangutstrahl

umlenken“. Es werden hohe Strömungsgeschwindigkeiten und Absaugvolumenströme benötigt, um die Partikel direkt oder nach der Verzögerung am Prallelement zur Absaugöffnung zu beschleunigen. In Kapitel 5.5 wurde ermittelt, dass der Spangutauswurf im Volleingriff in einem kompakten Partikelstrahl erfolgt, der in seinem vertikalen Auswurfwinkel beeinflusst werden kann (Kapitel 6.2). Ziel einer Optimierung der Kopfabsaugung ist daher eine direkte Erfassung des Spangutstrahls durch Positionierung der Absaugöffnung in den Spangutstrahl. Die Bearbeitung einer Kontur bedarf hierfür einer ständigen Nachführung der Absaugöffnung, entsprechend der Fräsbahn am Werkstück. Bei der Bearbeitung komplexer 3D-Bauteile ist eine mehrachsige Kinematik erforderlich. Zudem stellt ein 3D-Bauteil eine Störkontur dar, die den Spangutstrahl ablenken kann und die Positionierung der Absaugöffnung erschwert. Der skizzierte Ansatz wird daher nur für die Bearbeitung planarer Werkstücke mit einer 3-Achs-Kinematik betrachtet.

Auslegung und Untersuchungen

Die optimierte Kopfabsaugung (Abbildung 6-22) nutzt einen Absaugrüssel, der frei um die Z-Achse der Spindel rotiert und in seiner Z-Position entsprechend der Werkzeuglänge eingestellt werden kann. Der Einsatz eines Absaugrüssels anstelle einer umschließenden Haube erlaubt eine freie Sicht auf die Zerspanstelle, was bisherige Kopfabsaugungen nicht ermöglichen.

Das Spangut wird durch den Absaugrüssel in einen Ringkanal transportiert, der den Übergang zwischen Rotor (Absaugrüssel) und Stator (ortsfester Kanal entlang der Spindel) darstellt und eine freie und endlose Rotation ermöglicht. Am Stator des Ringkanals erfolgt der Anschluss der Absauganlage.

Die Bewegung des Absaugrüssels am Rotor wird durch einen Schrittmotor ermöglicht. Dessen Ansteuerung erfolgt über einen Messrechner. Dieser berechnet den Spangutauswurf auf Basis der Spindelbewegung durch Abfrage der Achsbewegungen an der Maschinensteuerung. Ein zweiter Steuerungsansatz basiert auf der sensorischen Bestimmung der Position des Spangutstrahls. Hierfür

wird der Umstand genutzt, dass sich das Spangut im Zerspanprozess erwärmt. Zur Detektion der Winkelposition des Spangutstrahls wurde am Stator ein Ring aus 16 Sensoren auf Basis von *Thermosäulen* (eng. *thermopile*; elektrisches Bauelement zur Wandlung thermischer Energie in elektrische Energie) installiert. Diese messen die Temperatur in einem konisch-zulaufenden Bereich um das Werkzeug. Die Messbereiche der einzelnen Thermosäulen wurden hierbei so gewählt, dass diese überlappen. Mithilfe der *Thermosäulen* kann so die Winkelposition des Spangutstrahls messtechnisch ermittelt werden.

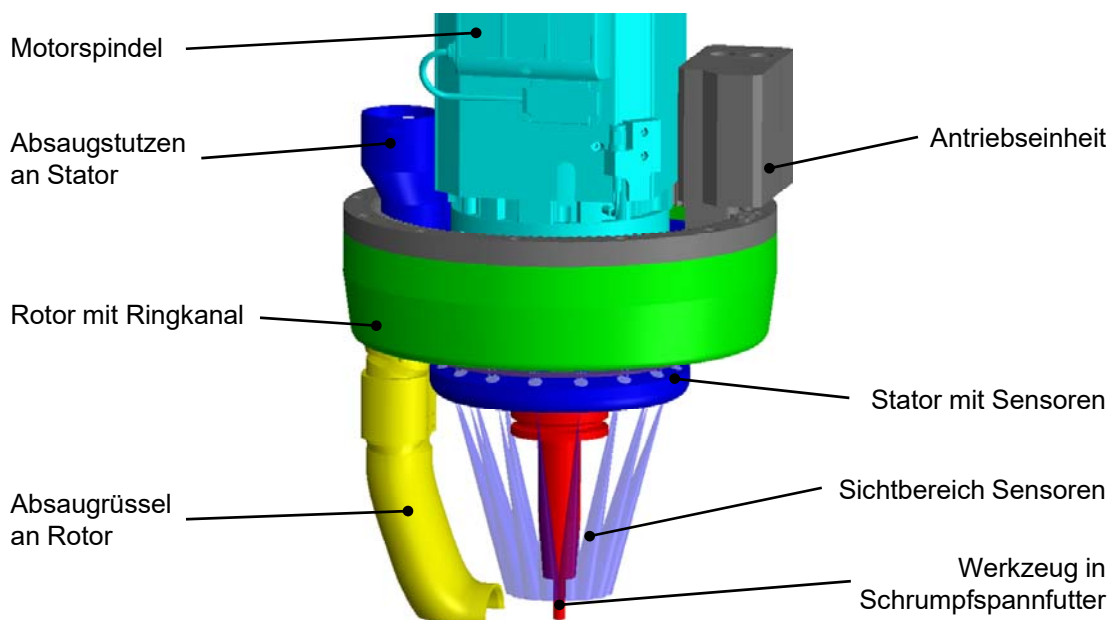


Abbildung 6-22: Aufbau der optimierten Kopfabsaugung

Die Öffnung des Absaugrüssels ist sowohl in Richtung des Werkzeugs als auch nach unten geöffnet und in einem Abstand von 45 mm zur Werkzeugachse positioniert. Dies erlaubt eine freie Sicht der Sensoren auf den Spangutstrahl von oben und eine verbesserte seitliche Einsichtnahme.

Die Auslegung des Absaugrüssels erfolgte mittels Strömungssimulation anhand eines vereinfachten Modells aus Werkstück, Werkzeug und Absaugrüssel (Abbildung 6-26 links). Die Strömungsgeschwindigkeiten im Absaugrüssel sowie an der Absaugöffnung sind in Abbildung 6-23 dargestellt. Das gewählte Design erzeugt

eine gleichmäßige, laminare Strömung im Absaugrüssel und maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich zwischen Werkstück und Absaugrüssel, um das Spangut aus der Fräsnut in den Absaugrüssel zu beschleunigen.

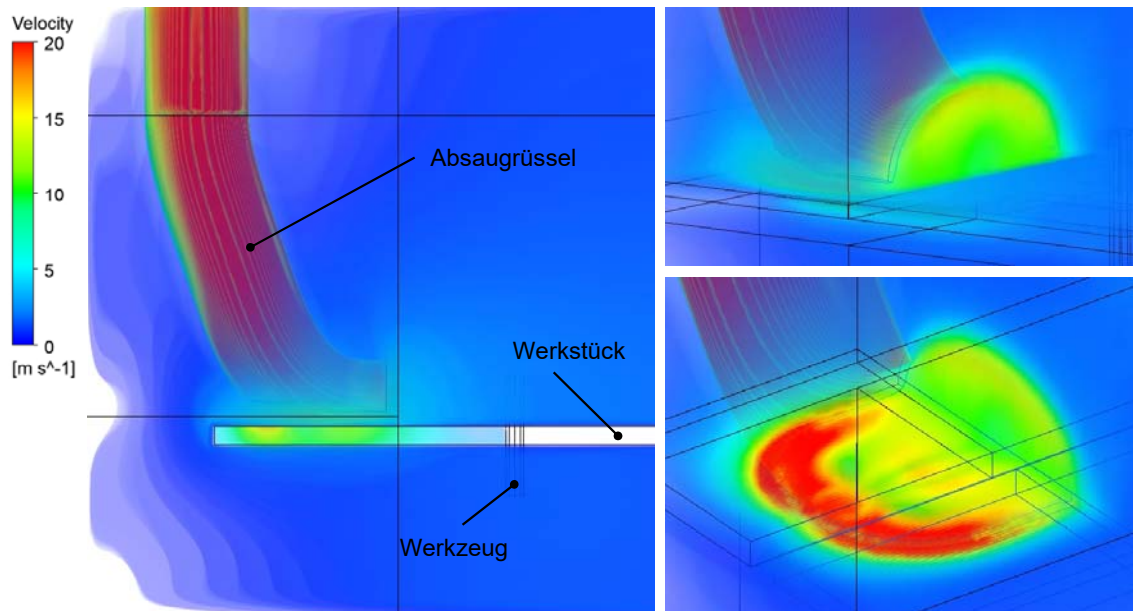


Abbildung 6-23: Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten im Absaugrüssel und dessen Umfeld. Der Spanguterfassungsgrad in Abhängigkeit verschiedener Parameter wurde experimentell untersucht. Hierzu wurden gerade Schnitte in den Standardwerkstoff gefräst und das nicht erfasste Spangut gesammelt und gewogen. Die untersuchten Parameter sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst, wobei die jeweiligen Standardwerte unterstrichen wurden.

Tabelle 6-10: Verfahrenstechnische Einstellgrößen zur Untersuchung der Spanguterfassung der optimierten Kopfabsaugung

	Untersuchte Einstellgrößen				
	Absaugvolumenstrom Q / m³/h	107	133	164	<u>192</u>
Abstand Absaugrüssel h_{Ar} / mm	1	<u>3</u>	5	10	15
Schnittgeschwindigkeit¹¹ v_c / m/min	90	<u>180</u>	360	540	720
Werkzeugdrallwinkel λ / °	0	5	<u>15</u>		30

¹¹ Bei konstantem Zahnvorschub $f_z = 0,05$ mm

Die Spangutabsaugung entlang des Vorschubwegs kann in zwei Bereiche eingeteilt werden: einen *Eintrittsbereich* vom ersten Schneidenkontakt mit dem Werkstück bis zu einem Vorschubweg von etwa 60 mm und einem nachfolgenden Bereich des *Folgeschnitts*. Der *Eintrittsbereich* ist durch niedrigere Spanguterfassungsgrade gekennzeichnet, was auf die größere Streuung des Spangutstrahls in der *Eintritts- und Übergangsphase* (siehe Kapitel 5.5) zurückzuführen ist. Der Absaugrüssel in diesem Bereich zudem noch nicht über der Fräsnut positioniert. Im *Folgeschnitt* liegt der Absaugrüssel über der Fräsnut, was zu einer Querschnittsverengung und damit einer signifikanten Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten führt. Im Folgeschnitt sind hierdurch höhere Erfassungsgrade vorzufinden. In den nachfolgenden Diagrammen wird daher zwischen diesen zwei Bereichen unterschieden.

Der Abstand zwischen Absaugrüssel und Werkstück h_{Ar} hat einen wesentlichen Einfluss auf den Erfassungsgrad (Abbildung 6-24 links). Für geringe Abstände erfolgt eine nahezu vollständige Erfassung des Spanguts, was auf hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Fräsnut zurückzuführen ist (Abbildung 6-23). Mit zunehmendem Abstand fällt der Erfassungsgrad ab. Durch den größeren Spalt zwischen Absaugrüssel und Werkstück wird in diesem Bereich verstärkt Fehlluft abgesaugt und die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Fräsnut fallen signifikant ab.

Für die weiteren Untersuchungen wurde ein Abstand von $h_{Ar} = 3$ mm gewählt, was einen Kompromiss aus hohem Erfassungsgrad und sicherer Vermeidung von Kontakt zwischen Absaugrüssel und Werkstück (→ Kollision/Verhaken) darstellt.

Die Variation des Absaugvolumenstroms zeigt im betrachteten Bereich einen in etwa linearen Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Spanguterfassungsgrad (Abbildung 6-24 rechts). Die Erfassungsgrade im Folgeschnitt liegen auf einem hohen Niveau. Von hohen Volumenströmen profitiert primär der Eintrittsbereich.

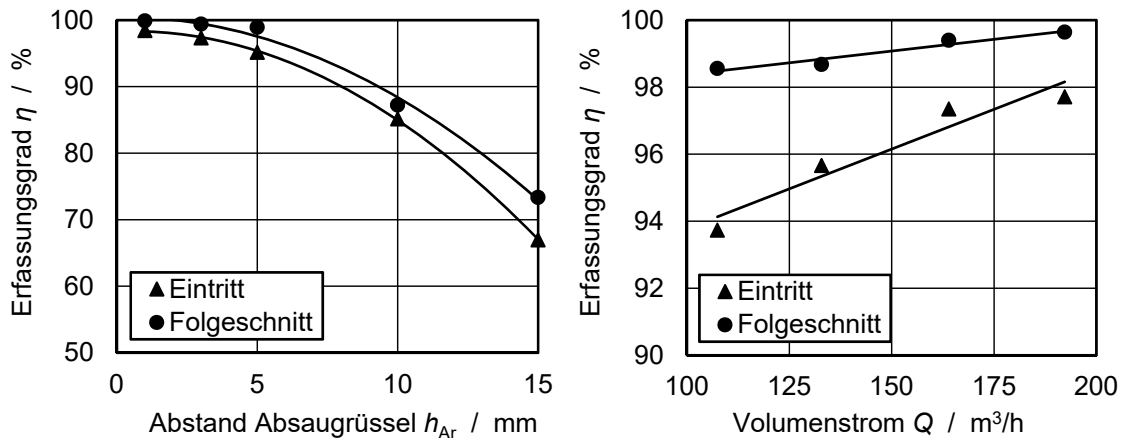


Abbildung 6-24: Erfassungsgrad in Abhängigkeit des Abstands des Absaugrüssels über dem Werkstück (links) und in Abhängigkeit des Absaugvolumenstroms (rechts)

Eine Zunahme der Schnittgeschwindigkeit führt zunächst zu einer verbesserten Spanguterfassung, ehe diese bei höheren Schnittgeschwindigkeiten signifikant abnimmt (Abbildung 6-25 links). Dieses Phänomen kann auf die Überlagerung zweier Effekte zurückgeführt werden: auf der einen Seite resultieren bei höheren Schnittgeschwindigkeiten kleinere Partikel (vergleiche Kapitel 5.4), die leichter von einem Luftstrom beschleunigt und abtransportiert werden können; auf der anderen Seite führen höhere Schnittgeschwindigkeiten zu höheren Partikelgeschwindigkeiten (vergleiche Kapitel 5.5) und somit zu einer höheren kinetischen Energie, die die Absaugung des Spanguts erschwert.

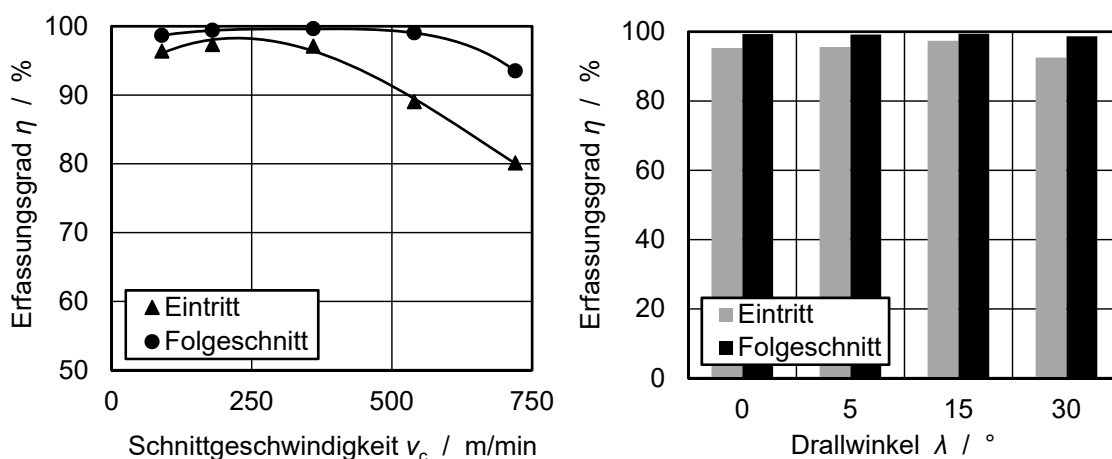


Abbildung 6-25: Erfassungsgrad in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit (links) und des Werkzeug-Drallwinkels (rechts)

Abschließend wurde der Einfluss von Werkzeugen mit unterschiedlichen Drallwinkeln untersucht (Abbildung 6-25 rechts). Ein zunehmender Drallwinkel führt zu einem verbesserten Spangutauswurf „nach oben“ und verbessert die Erfassung der Partikel durch den Absaugrüssel bis zu einem Drallwinkel von $\lambda = 15^\circ$. Bei den Werkzeugen mit einem Drallwinkel von $\lambda = 30^\circ$ konnte ein „seitlicher“ Partikelauswurf noch während des Schnittvorgangs festgestellt werden. Diese ausgeworfenen Partikel konnten durch den Absaugrüssel nicht vollständig erfasst werden und führten somit zu niedrigeren Erfassungsgraden.

Nach Durchführung der beschriebenen Untersuchungen konnten erste Verschleißerscheinungen an den Innenwänden des Absaugrüssels festgestellt werden. In diesem Zusammenhang zeigen Simulationen der Partikelflugbahnen, dass das Spangut auf die Rückwand des Absaugrüssels trifft (Abbildung 6-26 rechts), was sich mit den beobachteten Verschleißerscheinungen deckt.

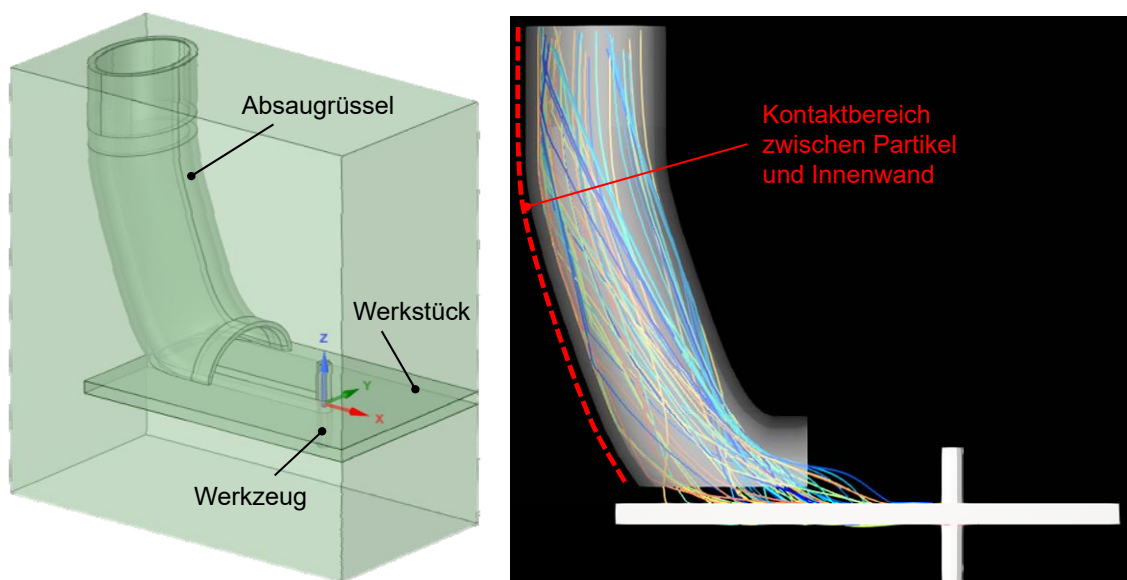


Abbildung 6-26: Aufbau der Strömungs- und Partikelsimulation (links) und Simulation der Partikelflugbahnen (rechts)

Die abrasive Wirkung von CFK-Partikel ist ein bekanntes Phänomen (Königsreuther 2017) Der Absaugrüssel muss folglich aus einem verschleißfesten Werkstoff

hergestellt werden. Zur Ermittlung geeigneter Werkstoffe wurde ein Prüfstand eingesetzt, der das Spangut gezielt dosiert, die die Partikel in einem Luftstrahl beschleunigt und auf Werkstoffproben schießt (Abbildung 6-27).

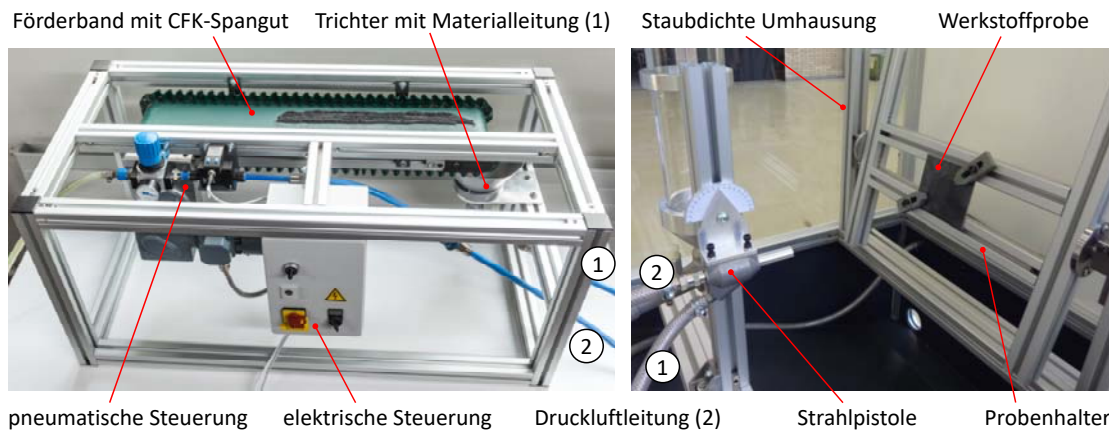


Abbildung 6-27: Prüfstand zur Ermittlung des abrasiven Verschleißes durch CFK-Partikel

Die Geschwindigkeit der CFK-Partikel wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemessen und betrug mit $v_p = 300 \text{ m/s} \dots 320 \text{ m/s}$ ein Vielfaches der Partikelauwurfgeschwindigkeit durch das Werkzeug. Hierdurch konnte in einem Schnellverschleißtest eine qualitative Aussage zur Verschleißbeständigkeit der Werkstoffe getroffen werden. Die Werkstoffproben wurden hierzu mit einer definierten Menge an CFK-Spangut beschossen und anschließend der Werkstoffabtrag durch ein Laserscan-Mikroskop vom Typ *VK-9710* des Herstellers *Keyence* volumetrisch bestimmt. Die Messwerte sind relativ in Bezug auf den Werkstoff mit dem höchsten Werkstoffabtrag in Abbildung 6-28 dargestellt.

Die Beschussversuche zeigen einen vergleichsweise geringen Abtrag für die Werkstoffe Polycarbonat (PC) und Schnellarbeitsstahl (HSS). Dieser liegt im Vergleich zum Referenzwerkstoff Polymethylmethacrylat (Acrylglas, PMMA) für PC um etwa 90 % und für HSS um etwa 95 % niedriger. Zurückzuführen ist dies bei PC auf die deutlich höhere Zähigkeit und Schlagfestigkeit gegenüber den anderen beiden Kunststoffen PMMA und CFK mit Phenolharz, während bei den metallischen Werkstoffen die Verschleißbeständigkeit durch deren Härte bedingt ist.

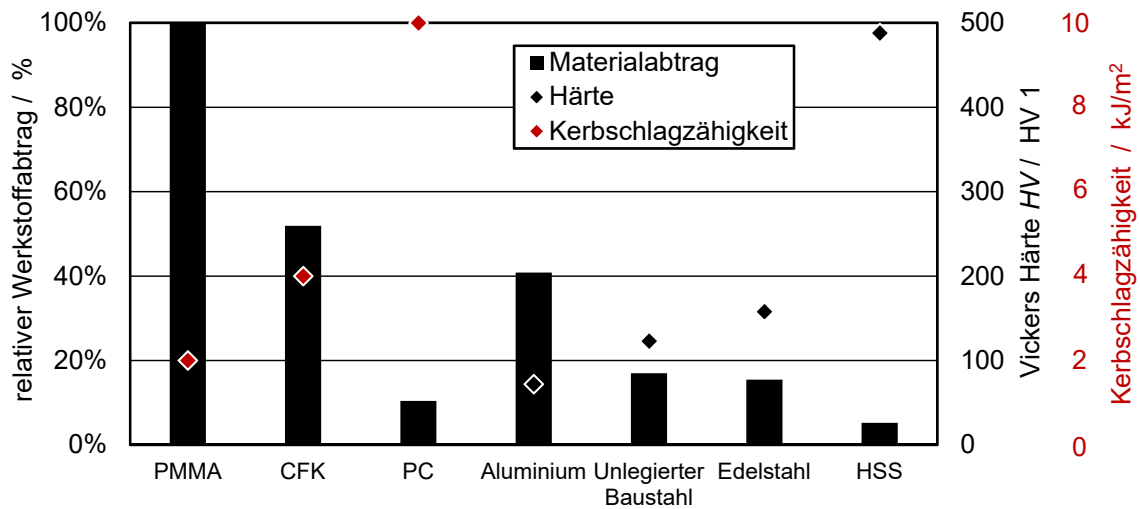


Abbildung 6-28: Materialabtrag durch die Beschussversuche

Der Absaugrüssel der adaptiven Absaughaube ist komplex geformt und mithilfe spanender Verfahren nur unter einem hohen technischen und wirtschaftlichen Aufwand zu fertigen. Daher bietet sich die Herstellung mittels Additiver Fertigungsverfahren an, wobei der Werkstoff PC beim gängigen Druckverfahren *Fused Deposition Modeling* (FDM) kostengünstig verarbeitet werden kann.

Energetische Betrachtung:

Für die energetische Betrachtung der optimierten Kopfabsaugung wurde der Messaufbau aus dem vorherigen Kapitel 6.4.1 genutzt, bestehend aus den Komponenten Differenzdruckmessgerät, Flügelradanemometer und Beruhigungsstrecke. Der Messaufbau wurde zwischen der Schlauchleitung der Kopfabsaugung und dem Industriesauger *CTH48 E/a* installiert. Die Messung des Differenzdrucks erfolgte am Eingang der Beruhigungsstrecke, die die Systemgrenze der Kopfabsaugung darstellt.

Wie schon bei der spannsystemintegrierten Absaugung sind kubische Abhängigkeiten zwischen pneumatischer Leistung und Absaugvolumenstrom

¹² Die Härtewerte wurden messtechnisch bestimmt; die Werte der Kerbschlagzähigkeiten wurden den Datenblättern der Hersteller entnommen.

respektive Strömungsgeschwindigkeit im Absaugrüssel festzustellen (Abbildung 6-29).

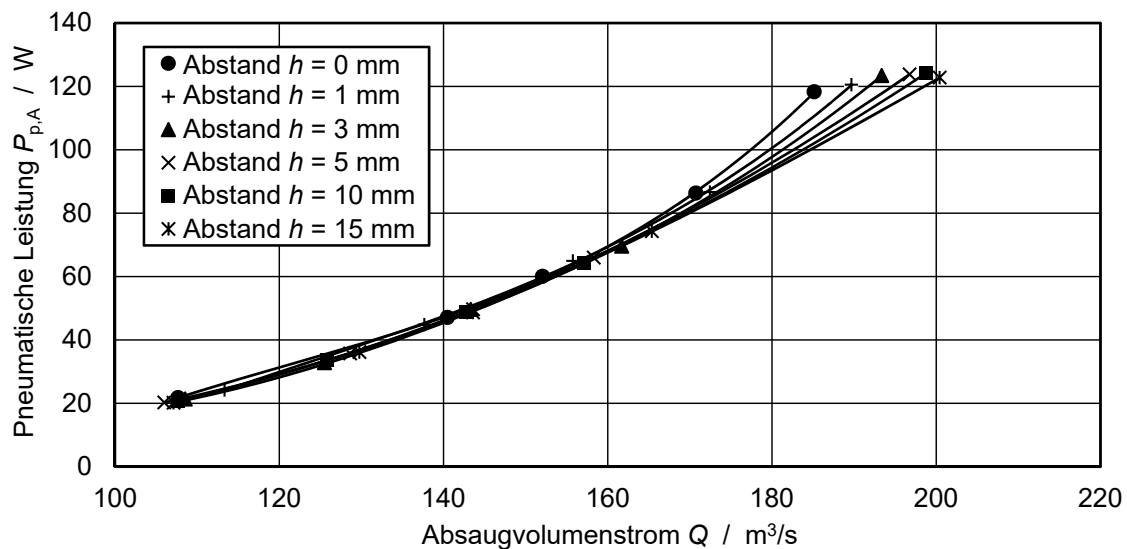


Abbildung 6-29: Pneumatische Leistung der optimierten Kopfabsaugung für unterschiedliche Abstände zwischen Absaugrüssel und Werkstück

Eine Verringerung des Abstands zwischen Absaugrüssel und Werkstück erhöht den Strömungswiderstand, verringert aber parallel den Absaugvolumenstrom, sodass es zu einer verringerten pneumatischen Leistung kommt. Im Vergleich zu Absaugsystemen in der Industrie mit $P_p = 1,9 \text{ kW} \dots 5,6 \text{ kW}$ (Kapitel 3.1) sind die ermittelten Werte deutlich geringer.

6.4.3 Optimierung von Raumabsaugungen

Technologischer Ansatz

Aus technologischer Sicht birgt die Spanguterfassung im Nahfeld der Zerspanstelle viele Vorteile, wie etwa ein geringer Energieverbrauch, hohe Erfassungsgrade und eine geringe Verschmutzung des Werkstücks sowie des Arbeitsraums. Diesen Vorteilen stehen jedoch ein hoher Aufwand für das Einstellen und Rüsten (Kopfabsaugung) und für die Herstellung der Spannvorrichtung (spannsystemintegrierte Absaugung) einer zerspanstellennahen Absaugung

gegenüber. Dies bedingt vor allem bei einer hohen Variantenvielfalt ökonomische Nachteile. Im Unterschied dazu bieten Raumabsaugungen freie Sicht und uneingeschränkten Zugang zur Zerspanstelle und erfordern keinen Rüstaufwand bei Werkstückwechseln. Durch die vorwiegend im Randbereich der Bearbeitungsmaschine angebrachten Erfassungselemente wirkt an der Zerspanstelle meist nur eine geringe Luftgeschwindigkeit, die ausschließlich feine Partikel zum Erfassungselement zu fördern vermag. Das Erfassungselement bildet eine Drucksenke, zu der die Luft aus den Bereichen höheren Drucks strömt. Beispielhaft hierfür sind in Abbildung 6-30 die Geschwindigkeitsverteilungen in Relation zur Luftgeschwindigkeit am Ansaugquerschnitt sowohl für eine runde Saugöffnung als auch für eine runde Saugöffnung mit Flansch dargestellt.

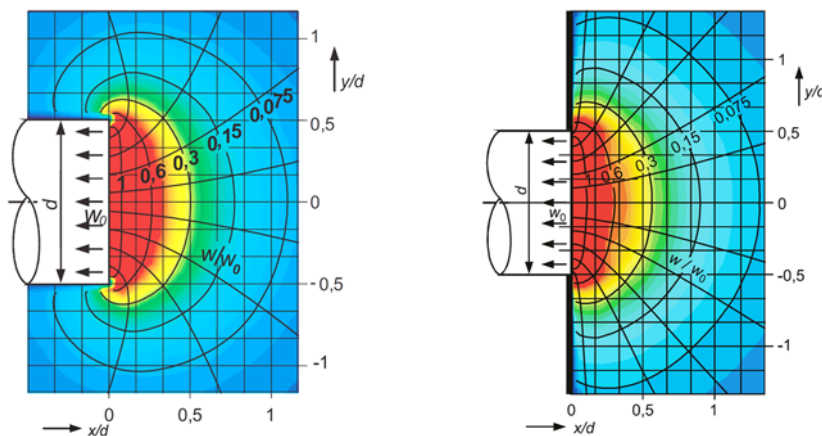


Abbildung 6-30: Geschwindigkeitsverteilung an einem Saugrohr ohne und mit Flansch relativ zur Luftgeschwindigkeit am Ansaugquerschnitt nach VDI 2262-4 (2006)

Die Untersuchungen von Röttscher (1954) und des VDI 2262-4 (2006) zeigen, dass die Luftgeschwindigkeit bereits nach dem einfachen axialen Abstand d des Rohrdurchmessers von der Saugöffnung beim Saugrohr auf einen Wert von ca. $v_{L,S1} = 0,1 \cdot v_L$ und beim Saugrohr mit Flansch auf einen Wert von ca. $v_{L,F1} = 0,125 \cdot v_L$ der ursprünglichen Luftgeschwindigkeit v_L abfällt. Eine Steigerung des Absaugvolumens führt folglich nur zu einer moderaten Steigerung der Luftgeschwindigkeiten im Zielfeld der Absaugung. Durch die großen Volumenströme vermag eine Raumabsaugung jedoch sehr effektiv Fein-/Schwebstäube zu erfassen und die Luft des Arbeitsraums auszutauschen, um die

Staubkonzentrationen auf ein unbedenkliches Maß, z.B. beim Werkstückwechsel, zu senken. Für eine effiziente Wirkung der Raumabsaugung ist zu beachten, dass eine zielgerichtete Einströmung in die Kapselung notwendig ist. Die Unterschiede zwischen zielgerichteter und diffuser Einströmung sind in Abbildung 6-32 dargestellt.

Im Gegensatz zu einer Ansaugströmung verhält sich eine Blasströmung deutlich zielgerichteter: Diese behält aufgrund ihrer kinetischen Energie die Bewegungsrichtung über eine größere Distanz aufrecht und weist nach einer Länge des 30-fachen Rohrdurchmessers d noch etwa $v_{L,g} = 0,1 * v_{L,0}$ der Luftgeschwindigkeit am Rohraustritt auf (Pfeiffer 1982). Verdeutlicht wird die unterschiedliche Reichweite von Blas- und Saugwirkung in nachfolgender Abbildung am Beispiel eines Radialventilators:

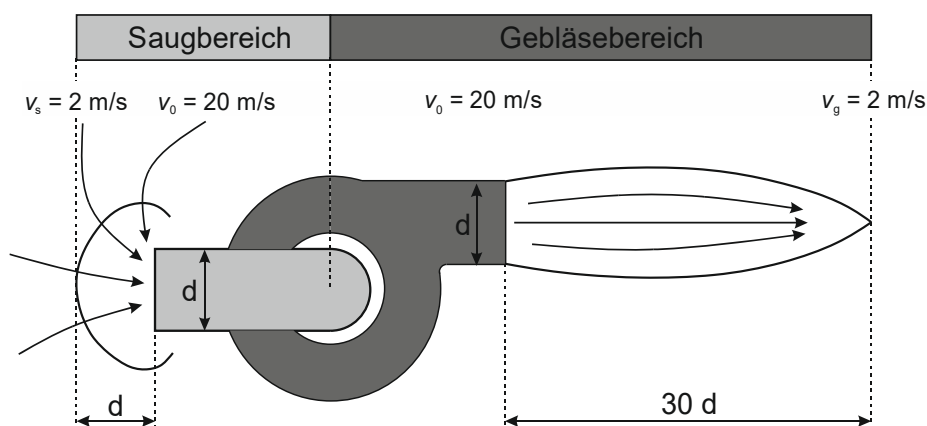


Abbildung 6-31: Unterschied zwischen Blas- und Saugwirkung am Beispiel eines Radialventilators nach (Pfeiffer 1982)

Zur Steigerung der Spanguterfassung bietet sich vor diesem Hintergrund eine Kombination aus Blasluftstrahl und Absaugung an (Abbildung 6-32 rechts). Hierbei übernimmt der Blasluftstrahl mit der großen Reichweite die Aufgabe, die Partikel aus der Zerspanzone zur Absaugöffnung zu leiten, wo die Absaugung die Partikel erfasst. Dieser Ansatz wird nachfolgend weiter untersucht.

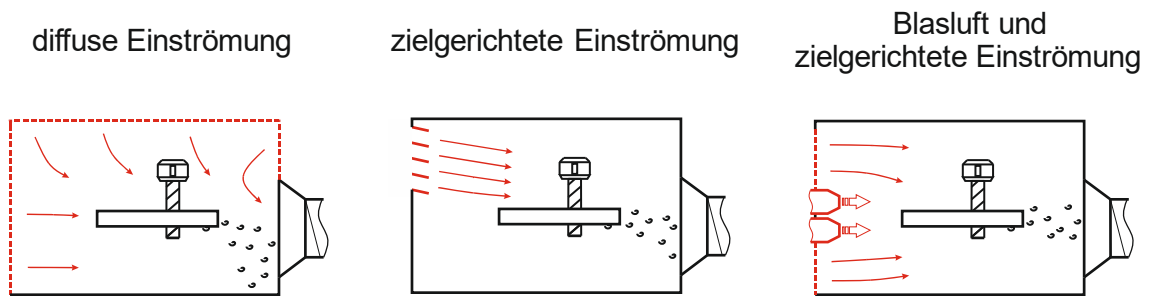


Abbildung 6-32: Unterschiede zwischen reiner Absaugung und einer Kombination aus Blasluft und Absaugung

Aufbau und Auslegung

Eine Blasströmung wird durch eine negative Druckdifferenz zwischen dem Bereich vor und nach einer Düse hervorgerufen. Dies kann entweder durch eine Druckerhöhung vor der Düse oder eine Drucksenkung nach der Düse erfolgen. Im Falle einer vollgekapselten Bearbeitungsmaschine kann die Druckdifferenz durch den Unterdruck der Absauganlage erzeugt werden. Die Drucksenkung ist somit auf den maximalen Unterdruck der Absauganlage begrenzt, bei handelsüblichen Entstaubern entspricht dies einem Wert von etwa $p = 2000 \text{ Pa} \dots 6000 \text{ Pa}$ (vgl. Kapitel 3.1). Für eine störkonturfremie Nutzung des Maschinenarbeitsraums ist die Zuführung der Blasluft im Bereich der Maschinenkapselung anzuordnen. Folglich muss der Blasluftstrahl eine weite Wegdistanz zwischen Blasluftdüse über das Werkstück bis zur Absaughaube zurücklegen. Um an der Zerspanstelle das Spangut aufnehmen und Richtung Absaughaube beschleunigen zu können, sind zudem ausreichende Strömungsgeschwindigkeiten erforderlich. Die Erzeugung der Blasluft-Zuströmung durch den Unterdruck des Entstaubers ist begrenzt und für große Maschinenarbeitsräume unzureichend und schwer regulierbar. Zielführender ist die Erzeugung von Blasluft durch eine Druckerhöhung (aktive Luftzuführung, z.B. mittels Ventilator), die im theoretischen Fall beliebig gesteigert werden kann.

(Heisel et al. 2007a) untersuchten den Einsatz eines Ventilators im Inneren der Maschinenkapselung, um das Spangut in eine bevorzugte Richtung zu blasen (Abbildung 2-12). Dieses Konzept birgt jedoch das Risiko, dass der Blasluftstrahl eine

Umwälzbewegung innerhalb der Maschinenkapselung hin zur Ansaugöffnung des Ventilators induziert, was zu einer Verteilung des Spanguts im Arbeitsraum führt.

Daher ist es sinnvoll, dem Arbeitsraum die Blasluft von außen durch eine Druckerhöhung (Ventilator) zuzuführen, um eine Strömung durch den Arbeitsraum über die Zerspanstelle zur Absaughaube zu erzeugen. Die hierfür benötigte Luft kann aus drei Quellen stammen:

1. Konditionierte Zuluft aus der Werkhalle
2. Unkonditionierte Außenluft
3. Gefilterte oder teilgefilterte Rückluft des Entstaubers

Die Luft in der Werkhalle ist in der Regel temperiert. Eine Entnahme dieser Luft bedingt in kalten Monaten einen hohen Energieverbrauch. Daher ist die Nutzung dieser konditionierten Luft sowohl als Zuluft für eine Raumabsaugung als auch eine Raumabsaugung mit Blaslufteinsatz aus energetischer Sicht ungeeignet, insbesondere, wenn die abgesaugte Luft nach der Filtration ohne Wärmetauscher an die Umwelt abgegeben wird.

Aus energetischer Sicht sinnvoller ist die Nutzung unkonditionierter Außenluft. Bei Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft und Maschine bzw. Werkhalle ist dann allerdings ein thermischer Drift in der Werkzeugmaschine zu befürchten. Zudem ist bei einer Unterschreitung des Taupunktes eine Kondensatbildung möglich. Diese Luftquelle ist somit aus technischer Sicht ungeeignet.

Dagegen ist die Rückführung eines Teils der teilgefilterten (nach Hauptfilter; Abbildung 6-33) oder der vollständig gefilterten Absaugluft (nach Haupt- und Feinfilter) als Blasluft aus mehreren Gründen vorteilhaft: Zum einen wird der Verbrauch konditionierter Hallenluft gesenkt, da nur die Differenz zwischen der abgesaugten Luft und der als Blasluft zurückgeführten Luft durch den vorherrschenden Unterdruck in den Maschinenarbeitsraum gesaugt wird. Diese Differenz verhindert ein Austreten der Blasluft (mit schädlichen luftgetragenen Partikeln), eine stetige Erwärmung der im Kreislauf genutzten Luft (*Prozessluft*) und limitiert ein Aufkonzentrieren des Feinstaubes im Maschineninneren. Daneben wird

beim Einsatz teilgefilterter Luft der Anteil der Feinstfiltration verringert, was zu einer Reduktion des Energieverbrauchs der Absauganlage führt und die Einsatzzeiten der Feinfilter (in der Regel nicht-regenerierbare Sättigungsfilter) verlängert (Gebhardt et al. 2014).

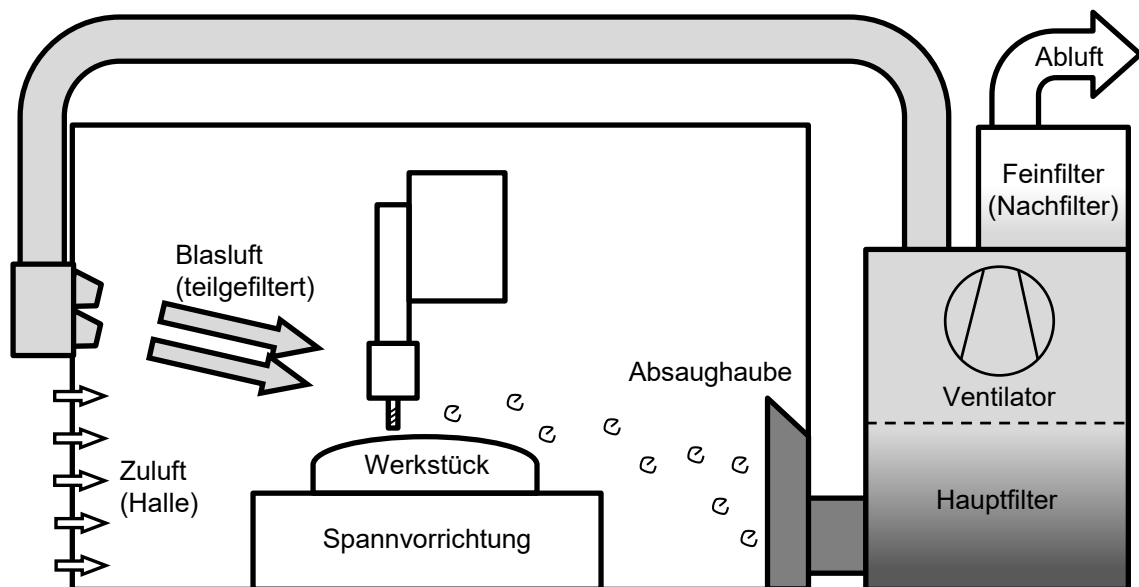


Abbildung 6-33: Schematische Darstellung der Arbeitsraumabsaugung mit Rückführung der teilgefilterten Luft

Eine Bewertung unterschiedlicher Arbeitsraumabsaugungen mit Blaslufteinsatz zeigt Tabelle 6-11. Durch den Unterdruck des Entstaubers kann eine Blasluftströmung erzeugt werden, die niedrige Geschwindigkeiten und wenig Turbulenzen aufweist. Die Blasluftströmung ist daher für die Erfassung von Feinstaub geeignet. Für größere Spanpartikel ist die Strömungsgeschwindigkeit in der Regel zu gering. Ein in der Kapselung installierter Umluftventilator erzeugt eine Umwälzströmung und somit eine hohe Feinstaubkonzentration im Maschineninneren. Durch diese Luftbewegung können größere Partikel zur Absaughaube geblasen und der Volumenstrom zur Absaugung in der Kabine verringert werden. Eine verbesserte Erfassung des Feinstaubes sowie größerer Spanpartikel kann durch alle vier evaluierten Verfahren erzielt werden, bei denen Blasluft mittels Überdruck durch einen separaten Ventilator oder einen Entstauber von außen in die Kapselung eingebracht wird. Beim Einsatz von Außenluft wird keine konditionierte Hallenluft verbraucht, jedoch besteht eine Gefährdung von Maschine und Prozesssicherheit

durch Kondensatbildung und thermischen Drift. Beim Einsatz von Hallenluft als Blasluft werden große Mengen Hallenluft verbraucht. Bei der Prozessluftrückführung nach einer Teilfiltration steigt die Feinstaubkonzentration in der Kapselung der Maschine, was einen Luftwechsel durch das Absaugen von Hallenluft vor dem Betreten der Maschine erfordert. Jedoch sinkt die Belastung des Feinfilters und die energieaufwendige Feinfiltration wird reduziert. Die Rückführung der vollständig gefilterten Luft macht einen Luftwechsel vor dem Betreten unnötig, steigert jedoch den Energiebedarf und die Filterbelastung.

Tabelle 6-11: Bewertung unterschiedlicher Blasluft-Absaugungskonzepte

	Blasluftströmung durch Unterdruck	Umluftventilator in Kapselung	Blasluft durch Überdruck aus Halle	Blasluft durch Überdruck aus Umwelt	Prozessluftrückführung mit Teilfiltration	Prozessluft-rückführung mit Feinfiltration
Absaugung Feinstaub	++	-	+	+	+	+
Absaugung Spanpartikel	-	o	+	+	+	+
Feinstaubkonzentration in Kapselung	++	--	+	+	o	+
Verbrauch Hallenluft	--	o	--	++	+	+
Belastung Feinfilter	-	o	-	-	+	-
Anlagenkomplexität	++	-	o	o	-	-
Maschinensicherheit	++	+	+	--	+	+

Unabhängig von der Wahl des Blasluft-Absaugungskonzepts ist eine Betrachtung der notwendigen Strömungsgeschwindigkeiten und Dimensionierungen erforderlich. Eine global anwendbare Auslegung ist aufgrund der in Kapitel 3.1 festgestellten Vielzahl unterschiedlicher Bearbeitungsmaschinen und deren variierenden Abmessungen nicht möglich. Alternativ bietet sich der methodische

Ansatz an, den Partikelflug in einer laminaren Strömung unter Variation unterschiedlicher Start- und Randbedingungen zu simulieren. Diese Bedingungen sind in Tabelle 6-12 aufgelistet, die Standardparameter sind unterstrichen dargestellt.

Tabelle 6-12: Randbedingungen zur Simulation des Partikelflugs in Luftströmungen

	untersuchte Einstellgrößen							
Auswurfwinkel vertikal $\psi / ^\circ$	<u>0</u>		-10		-20		-30	
Auswurfwinkel horizontal $\omega / ^\circ$	<u>0</u>	45	90	135	180			
Auswurfgeschwindigkeit Partikel $v_p / \text{m/s}$	<u>2,71</u>							
Luftgeschwindigkeit $v_L / \text{m/s}$	0,001	1	3	<u>5</u>	7,5	10		
Partikelbreite $x_c / \mu\text{m}$	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>50</u>	<u>100</u>	<u>250</u>	<u>500</u>	<u>1000</u>	<u>1500</u>
Längen-/Breitenverhältnis $l/b / -$	<u>1,65</u>							
Partikelfarbe in Simulation								

Der Simulationsraum umfasst hierbei ein Luftvolumen von 6 m Länge, 4 m Breite und eine Höhe von 1,5 m (entsprechend typischen Werten aus der Befragung in Kapitel 3). Der Partikelwurf erfolgte in einer Höhe von 1,2 m und einer Weglänge von 1 m in der Mitte des Luftvolumens. Während für die Simulation die in Kapitel 5.5 ermittelten Spangutstrahlöffnungswinkel herangezogen wurden, wurden die Auswurfwinkel entsprechend Tabelle 6-12 variiert.

Zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Parameter wurde die Position der Partikel entweder nach einer Wegstrecke von 2 m in Strömungsrichtung bestimmt oder bei ihrem Auftreffen auf dem Boden des Simulationsraumes vor Erreichung dieser Weggrenze. Sinktiefe und Flugweite ermöglichen somit eine Abschätzung der notwendigen Dimensionierung des Blasluftstrahls sowie der Abmessungen der Absaughaube.

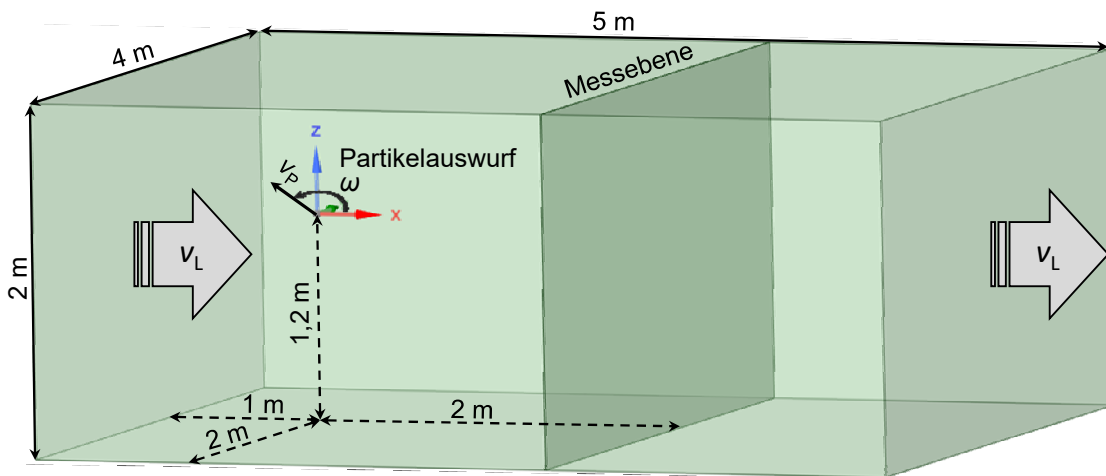


Abbildung 6-34: Simulationsumgebung

Der Einfluss der Variation des vertikalen Auswurfwinkels ist auf die Partikelgröße zurückzuführen (Abbildung 6-35 links). Während kleine Partikel unmittelbar von der Luftströmung aufgenommen und nur geringfügig durch die Gravitationskraft oder den Auswurfwinkel beeinflusst werden, werden größere Partikel zunächst entsprechend des vertikalen Auswurfwinkels nach oben ausgeworfen, bis die Gewichtskraft zunehmend zu einer Geschwindigkeitskomponente nach unten führt. Diese Überlagerung erzeugt für den betrachteten Flugweg eine Fokussierung des Partikelstrahls für vertikale Auswurfwinkel bis $\psi = -30^\circ$.

Für kleine Partikel bestimmt die Strömungsgeschwindigkeit die Flugzeit bis zum Erreichen der betrachteten Flugweite. Langsame Strömungsgeschwindigkeiten begünstigen ein gravitationsbedingtes Absinken der Partikel. Bei der kleinsten betrachteten Strömungsgeschwindigkeit $v_L = 0,001 \text{ m/s}$ erreichen die fünf kleinsten Partikelfractionen nicht das Ende der betrachteten Flugweite. Im Vergleich hierzu ermöglicht bei den drei größten Partikelfractionen die kinetische Energie des Auswurfs einen ausreichend langen Partikelflug. Abbildung 6-35 (rechts) verdeutlicht, dass die Strömungsgeschwindigkeit den maßgeblichen Einfluss auf die Sinktiefe ausübt und entsprechend hoch gewählt werden muss, um die Partikel bis zur Absaughaube zu transportieren, ohne dass sie am Boden segmentieren.

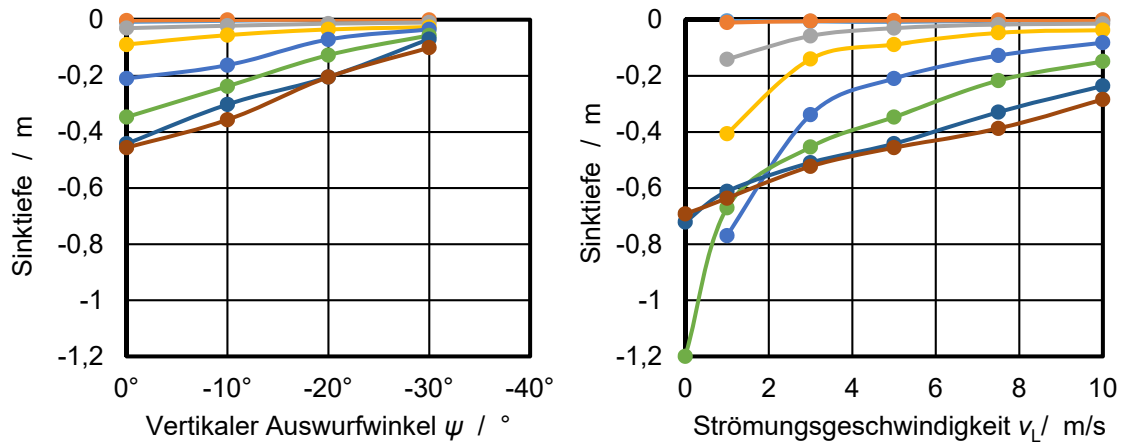


Abbildung 6-35: Einfluss des vertikalen Auswurfwinkels (links) und der Strömungsgeschwindigkeit (rechts) auf die Sinktiefe der Partikel (bei einer horizontalen Flugweite von 2 m)

In den bisher betrachteten Fällen erfolgte der Partikelwurf in Strömungsrichtung. Die nachfolgenden Diagramme (Abbildung 6-36) zeigen die Wurfweite der Partikel senkrecht zur Luftströmung und ihre Sinktiefe für Auswurfwinkel im Bereich $\omega = 0^\circ \dots 180^\circ$.

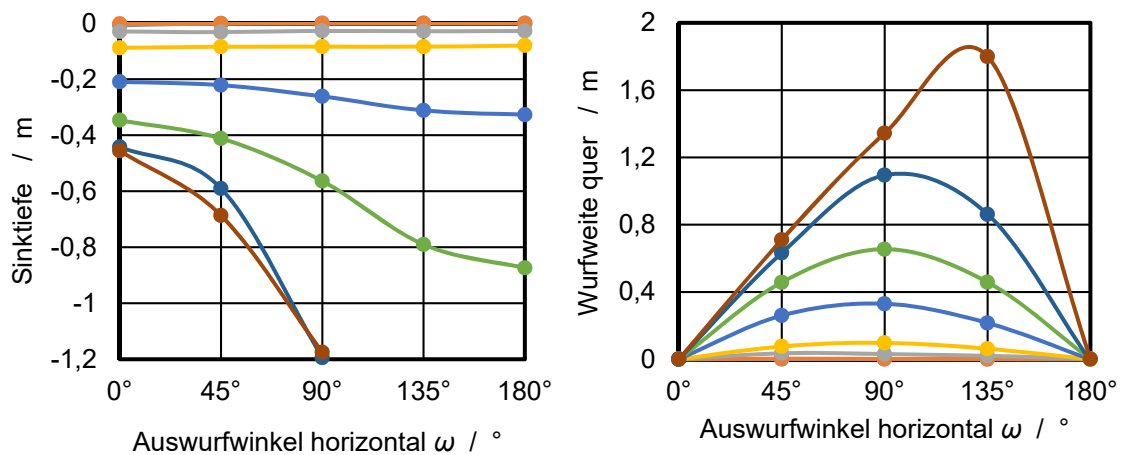


Abbildung 6-36: Einfluss des horizontalen Auswurfwinkels auf die Sinktiefe (links) und die Wurfweite senkrecht zur Strömungsrichtung der Partikel (rechts) (bei einer horizontalen Flugweite von 2 m)

Bei der Variation des Auswurfwinkels gilt es wiederum, zwischen kleinen und großen Partikeln zu unterscheiden. Die kleinen Partikelfraktionen werden durch die Luftströmung sofort erfasst und abtransportiert. Die Flugdauer verlängert sich nur geringfügig im Vergleich zur Auswurfrichtung in Strömungsrichtung, sodass die

Sinktiefe konstant bleibt und die Wurfweite gering ist. Mit wachsender Partikelgröße verlängert sich die Flugdauer für zunehmende horizontale Auswurfwinkel, sodass größere Sinktiefen festgestellt werden können. Die Partikel der zwei größten Fraktionen erreichen bei Auswurfwinkeln von $\omega > 90^\circ$ nicht mehr das Ende des Betrachtungsbereichs. Zudem werden sie durch ihre hohe kinetische Energie sehr weit seitlich abgelenkt, was mit einer großflächigen Verschmutzung des Arbeitsbereichs einhergeht.

Energetische Betrachtung:

Die energetische Betrachtung der skizzierten Raumabsaugungskonzepte hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Es gilt nicht nur die Erzeugung des Unterdrucks zur Absaugung des Partikel-Luft-Gemisches aus dem Arbeitsraum der Maschine sowie dessen Förderung durch das Rohrleitungssystem und schließlich die Abscheidung im Filter bzw. in den Filtern zu betrachten, sondern auch die Erzeugung der Blasluft. Weitere Faktoren umfassen die Energie für die Konditionierung der verbrauchten Hallenluft in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der notwendigen Aufbereitung (Erwärmen, Kühlen, Entfeuchten, etc.). In diesem Zusammenhang sind auch Wärmetauscher zwischen Zu- und Abluft zu berücksichtigen. Zudem können Raumabsaugungskonzepte mit Blasluft ggf. mit kleineren Absaugvolumenströmen dimensioniert werden, was primär von den Zielstellungen des Betreibers abhängt. Eine allgemeingültige Bilanzierung ist nicht möglich, sondern muss im Einzelfall unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen und Anforderungen erfolgen.

Die industrielle Umsetzung der Raumabsaugung mit Rückführung der teilgefilterten Prozessluft ist bereits in mehreren Fällen durch den Autor und die Firma *Schuko* als gemeinsame Entwickler erfolgt. Die Bilanzierung im Falle zweier Roboterzellen zeigt einen mit einer konventionellen Raumabsaugungsanlage vergleichbaren Energiebedarf, jedoch wird der Verbrauch an temperierter Hallenluft um etwa 80% gesenkt, was im Winter zu einer deutlichen Energieeinsparung führt. Zudem konnte die Erfassung des Spanguts auf über 93 % gesteigert werden (Gebhardt et al. 2017).

Bilder dieser Anlage und einer weiteren Installation in einer Portalfräsmaschine befinden sich im Anhang.

6.4.4 Test der optimierten Absaugsysteme

Die Bewertung der Absaugsysteme erfolgte anhand eines 2D- und eines 3D-Schikanebauteils. Diese wurden auf Basis der Geometrie eines CFK-Strukturbauteils aus dem Automobilbau entworfen und bilden dessen herausforderndste Bearbeitungsoperationen ab. Die Schikanebauteile und die übertragenen Bearbeitungsoperationen sind Abbildung 6-37 und Abbildung 6-42 dargestellt.

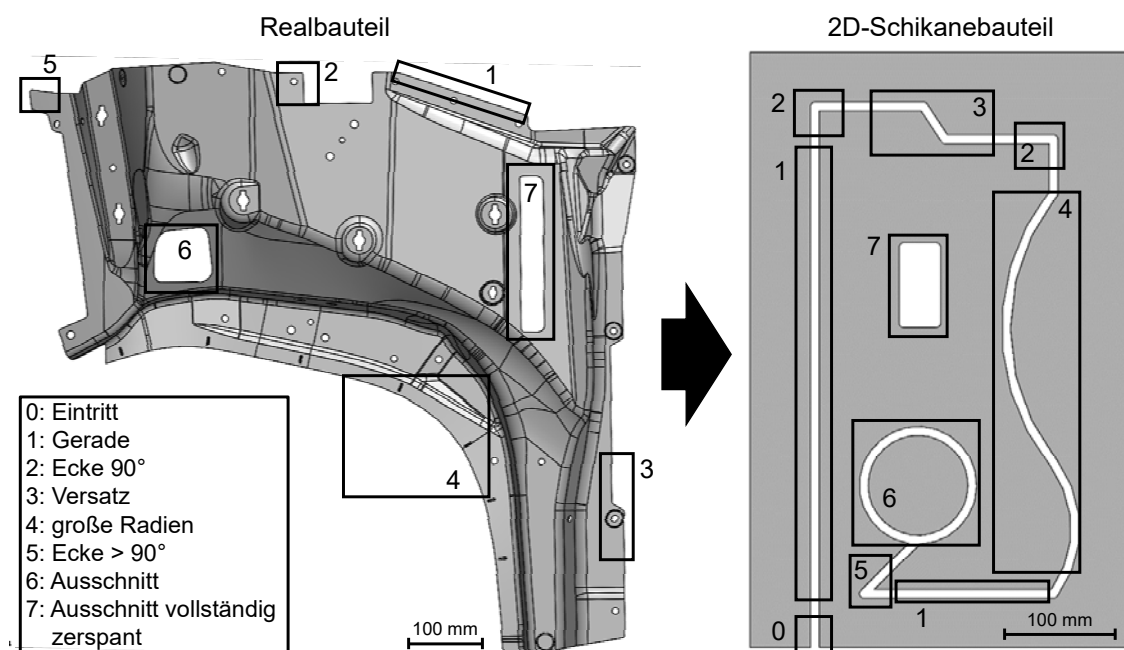


Abbildung 6-37: Realbauteil (links) und 2D-Schikanebauteil (rechts) mit Darstellung der Bearbeitungsoperationen

Die Bewertung der Absaugsysteme erfolgte anhand der pneumatischen Leistung und des Erfassungsgrades, der durch Wiegen des nicht erfassten Spanguts und des Schikanebauteils vor und nach der Bearbeitung ermittelt wurde. Zudem wurde die

Staubkonzentration mit Hilfe des Staubmessgeräts *Respicon TM* (Kapitel 6.2.1) gemessen.

Das 2D-Schikanebauteil wurde zur Bewertung der optimierten Kopfabsaugung herangezogen. Als Fräs Werkzeug wurde das Versuchswerkzeug F14 mit einem Drallwinkel von $\lambda = 15^\circ$ ausgewählt, das durch seinen Spangutauswurf „nach oben“ die Erfassung begünstigt. Zur Erzeugung von feinerem Spangut wurden die Schnittgeschwindigkeit auf $v_c = 360$ m/min erhöht und der Zahnvorschub auf $f_z = 0,03$ mm gesenkt (entsprechend einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 860$ mm/min).

Der Absaugrüssel wurde in einer Höhe von $h = 3$ mm über dem Werkstück platziert und mit einem Volumenstrom von $Q = 190$ m³/h abgesaugt. Das Schikanebauteil wurde einmal mit sensorischer und einmal mit CNC-Steuerung des Absaugrüssels gefräst. Der Versuchsaufbau mit einem gefrästen Bauteil ist in Abbildung 6-38 dargestellt.

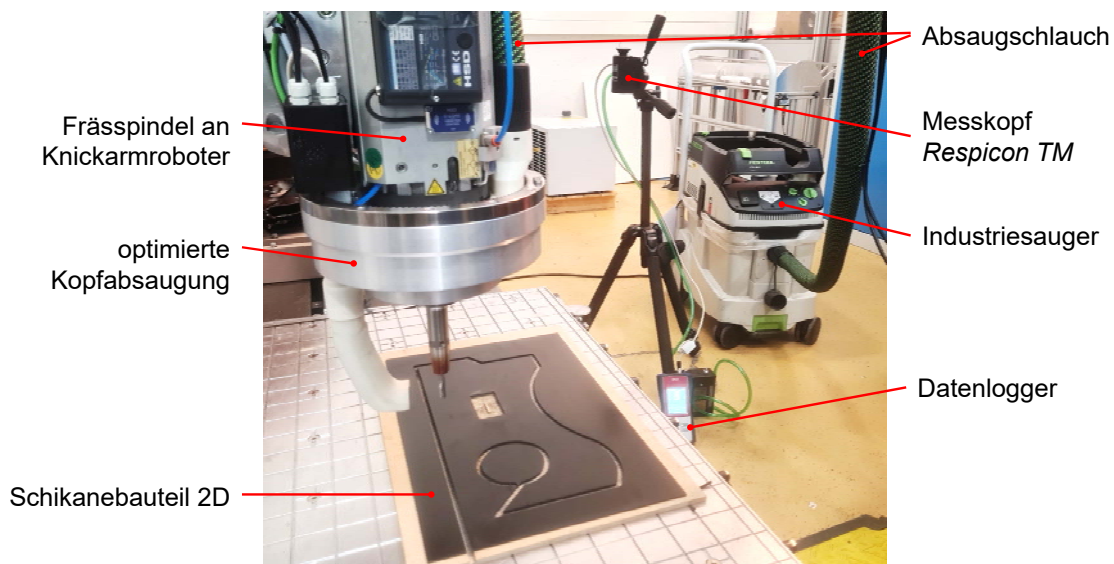


Abbildung 6-38: Versuchsaufbau zum Test der optimierten Kopfabsaugung

Die optimierte Kopfabsaugung zeigt mit beiden Steuerungsarten hohe Erfassungsraten (Abbildung 6-39).

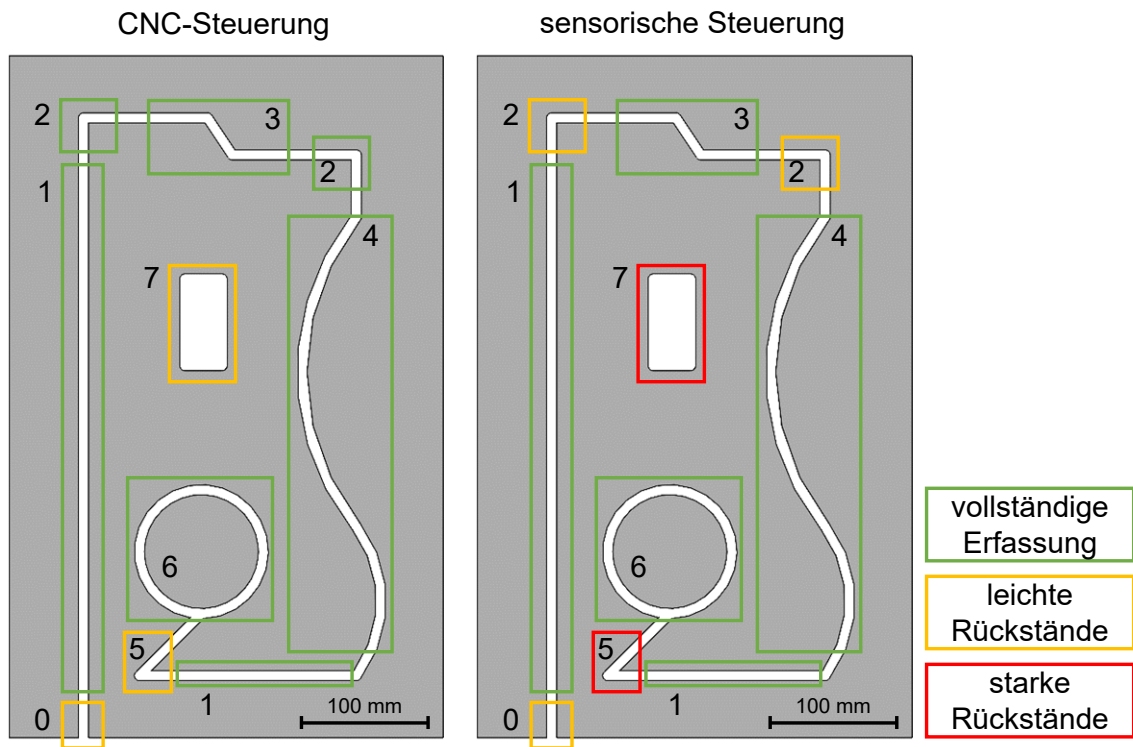


Abbildung 6-39: Darstellung des Erfassungsgrads am 2D-Schikanebauteil für die beiden Steuerungsvarianten der Kopfabsaugung

Nicht erfasstes Spangut konnte für beide Steuerungsarten im Bereich des Werkzeugeintritts (Abbildung 6-39 Bereich 0) festgestellt werden. Zudem wurden Spangutablagerungen an Abschnitten mit schnellen Richtungswechseln (Bereich 0 und 7, bzw. 0, 2 und 7), insbesondere für die sensorgesteuerte Kopfabsaugung, festgestellt. Die Erfassungsgrade für das gesamte 2D-Schikanebauteil betragen $\eta = 95,6 \%$ für die CNC-Steuerung und $\eta = 92,7 \%$ für die sensorische Steuerung bei einer pneumatischen Leistung von $P_p = 117,1 \text{ W}$ (Abbildung 6-40).

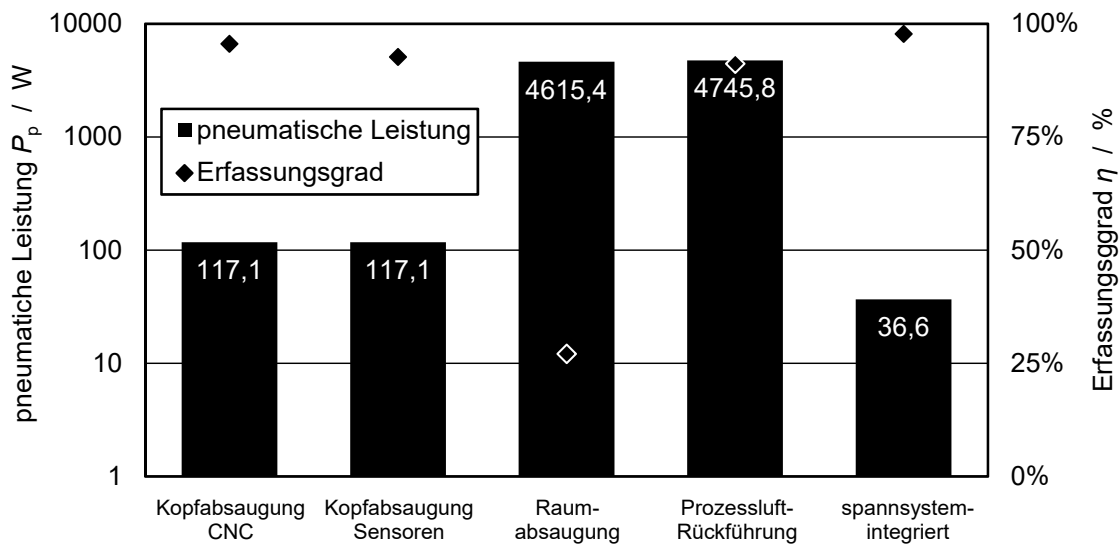


Abbildung 6-40: Pneumatische Leistung und Erfassungsgrad der untersuchten Absaugsysteme

Die Analyse der Staubkonzentrationen während der Bearbeitung (Abbildung 6-41) bestätigt die unvollständige Erfassung des Spanguts in Form von zwei Ausschlägen. Die Werte für die sensorgesteuerte Kopfabsaugung liegen hierbei leicht höher, jedoch werden die Arbeitsplatzgrenzwerte (Kapitel 2.1.3) nur kurzzeitig überschritten.

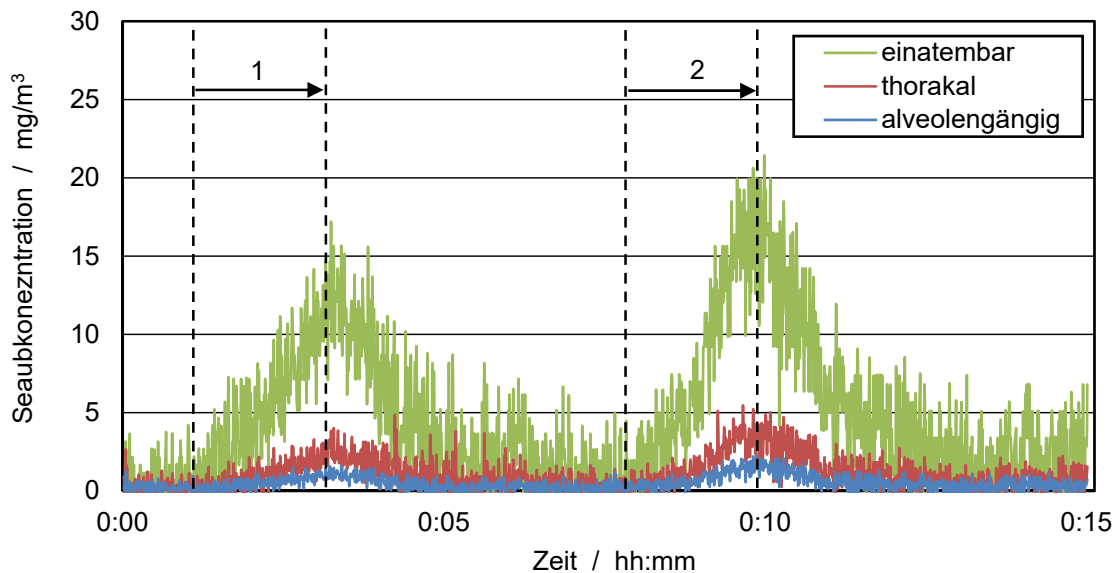


Abbildung 6-41: Staubkonzentrationen bei der Bearbeitung des 2D-Schikanebauteils mit der optimierten Kopfabsaugung mit CNC- (1) und sensorischer Steuerung (2)

Für die Untersuchung der spannsystemintegrierten Absaugung und der Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung wurde das 3D-Schikanebauteil bearbeitet. Die Bearbeitungsoperationen umfassen einen Randbeschnitt und das Einbringen von Ausschnitten, inklusive der vollständigen Zerspaltung eines Ausschnittes (Abbildung 6-42). Als Referenz wurde das Schikanebauteil zusätzlich unter Zuhilfenahme einer Raumabsaugung bearbeitet.

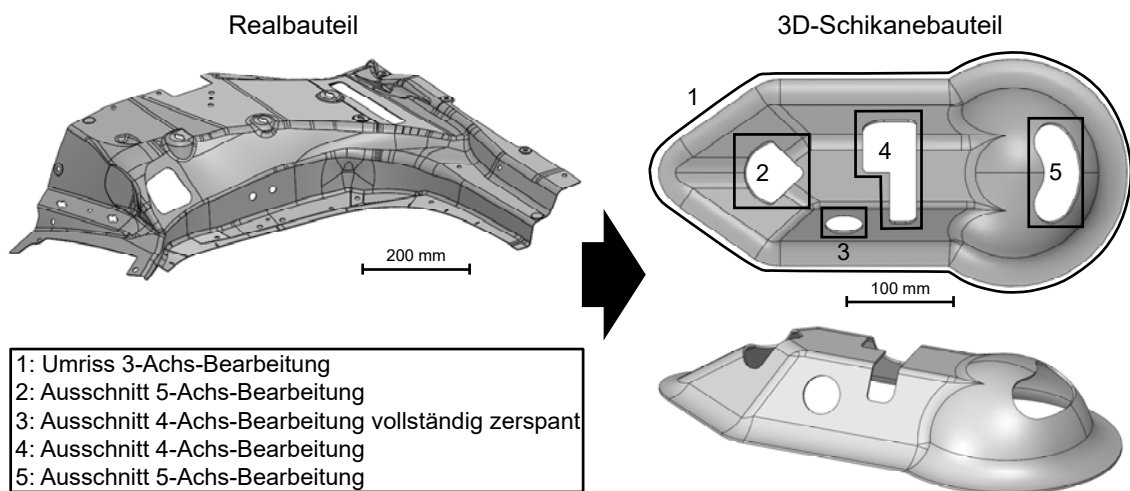


Abbildung 6-42: Realbauteil (links) und 3D-Schikanebauteil (rechts) mit Darstellung der Bearbeitungsaufgaben

Für die Untersuchungen wurde – basierend auf den Erkenntnissen von Kapitel 6.4.1 – eine Spannvorrichtung ausgelegt, die eine separate Absaugung der fünf Bearbeitungsaufgaben ermöglichte, die in Abbildung 6-42 eingezeichnet sind (Abbildung 6-43). Für Bearbeitungsaufgabe 1 war ein Absaugkanal mit einer Absaugung in Vorschubrichtung vorgesehen. Die Bearbeitungsaufgaben 2, 3 und 5 wurden durch taschenförmige Absaugöffnungen abgesaugt. Die Absaugung von Bearbeitungsaufgabe 4 bestand aus einem abgesaugten Fräskanal, der in eine Taschenabsaugung überging. Durch eine sequentielle Absaugung der jeweils aktiven Bearbeitungsaufgabe sollte der Volumenstrom minimiert und eine prozessichere Zurverfügungstellung eines ausreichenden Unterdrucks ermöglicht werden. Zur Berechnung der pneumatischen Leistung wurden für jede Bearbeitungsaufgabe jeweils nach dem Eintauchen des Werkzeugs und nach Fertigstellung der Bearbeitung der Volumenstrom und der Unterdruck gemessen

und für alle fünf Bearbeitungsaufgaben gemittelt. Für einen Spangutauswurf „nach unten“ kam Fräswerkzeug F17 mit einem Drallwinkel von $\lambda = -15^\circ$ zum Einsatz, das mit den optimierten Bearbeitungsparametern zur Erzeugung von feinem Spangut ($v_c = 360$ m/min und $f_z = 0,03$ mm) eingesetzt wurde.

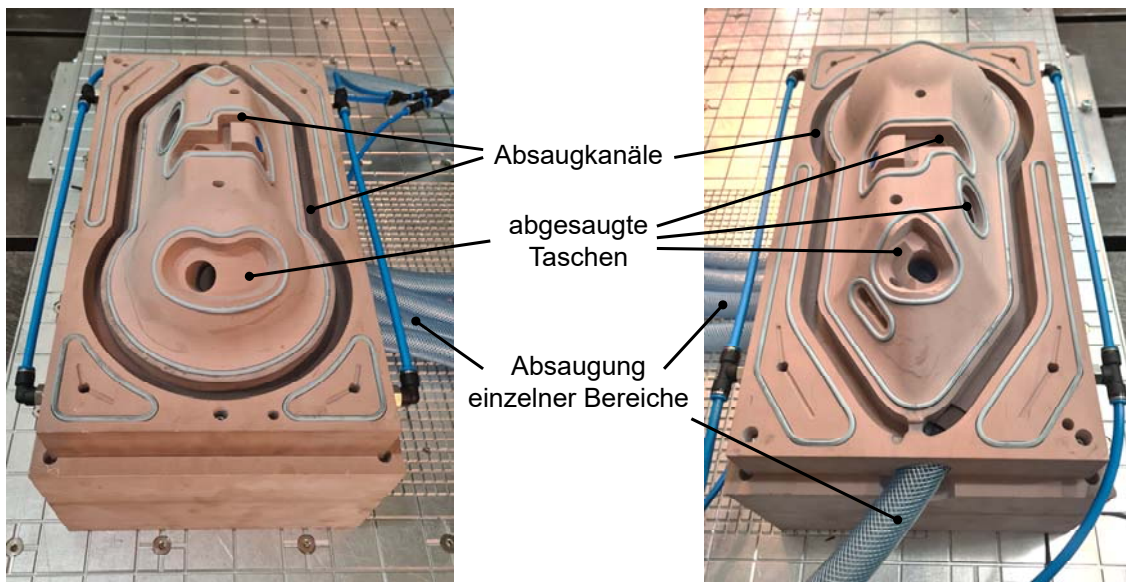


Abbildung 6-43: Spannvorrichtung für das 3D-Schikanebauteil mit abgesaugten Fräskanälen und Taschen

Die spannvorrichtungsintegrierte Absaugung erzielte einen Spanguterfassungsgrad von $\eta = 97,8$ % bei einer pneumatischen Leistung von durchschnittlich $P_p = 36,6$ W (Abbildung 6-40). Das nicht erfasste Spangut wurde ausschließlich beim Eintauchen des Werkzeugs in das Werkstück erzeugt. Es führte zu einem leichten Anstieg der Staubkonzentrationen, die jedoch die Arbeitsplatzgrenzwerte für Feinstäube nur leicht in Höhe und Dauer überschritten (Abbildung 6-44).

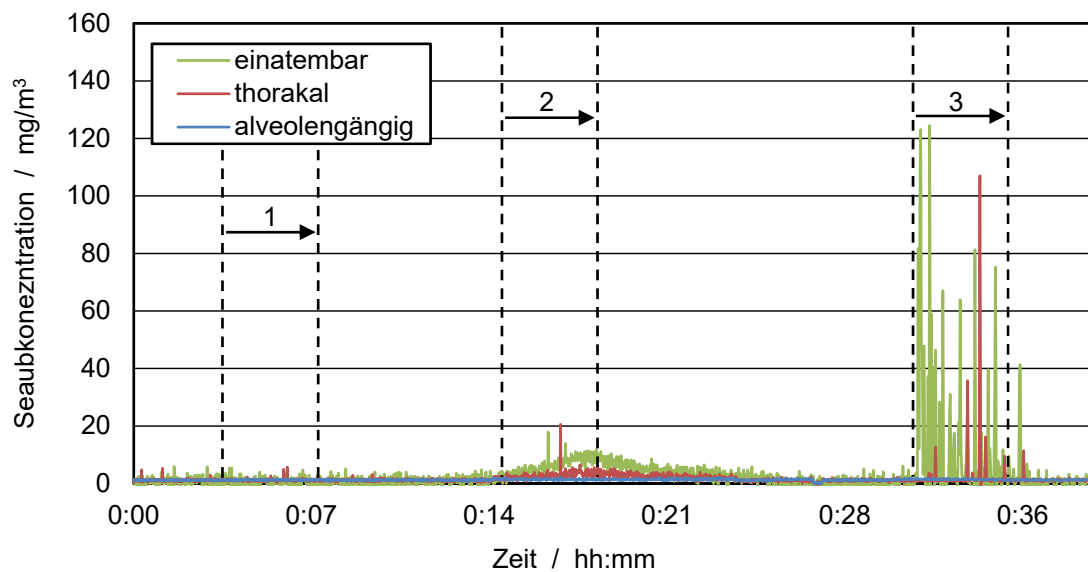


Abbildung 6-44: Staubkonzentrationen bei Raumabsaugung (1), spannsystemintegrierte Absaugung (2) und Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung (3)

Abschließend wurde die Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung sowie die Raumabsaugung mit gezielter Luftzuführung untersucht. Die genutzte Roboterzelle war hierfür mit einer großflächigen Absaughaube, sowie mit gegenüberliegenden Blasluftdüsen ausgestattet (Abbildung 6-45). Die Spannvorrichtung wurde zwischen diesen beiden Elementen auf dem Maschinentisch mit einem Abstand von 750 mm zur Absaughaube platziert. Die verstellbaren Blasdüsen wurden so ausgerichtet, dass sich ein Luftstrom um das Werkstück hin zur Absaughaube ausbildet. Die großflächige Einlassöffnung für die in die Roboterzelle nachströmende Hallenluft unterstützte in ihrer Anordnung einen Luftstrom über das Werkstück zur Absaughaube.

Für die Bearbeitungsaufgaben 2 – 5 kam Fräswerkzeug F15 mit einem Drallwinkel von $\lambda = 30^\circ$ zum Einsatz. Für die Umrissbearbeitung von Bearbeitungsaufgabe 1 wurde das Standardwerkzeug F1 eingesetzt und in Bereichen mit geradlinigem Vorschub um den Voreilwinkel $\beta = -30^\circ$ geneigt, um einen maximalen Spangutauswurf „nach oben“ zu erzielen. Die Werkzeuge wurden mit den optimierten Prozessparametern ($v_c = 360$ m/min und $f_z = 0,03$ mm) eingesetzt. Für die Raumabsaugung wurde ein Volumenstrom von $Q = 5690$ m³/h eingestellt. Für die Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung wurde auf Basis einer

Strömungssimulation ein Absaugvolumenstrom von $Q = 3605 \text{ m}^3/\text{h}$ und ein Blasluftstrom von $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$ gewählt.



Abbildung 6-45: Mobiler Entstauber mit Prozessluftrückführung (links), Blasdüseneinheit (rechts oben) und Werkstück vor Absaughaube (rechts unten)

Die pneumatischen Leistungen beider Raumabsaugungssysteme liegen auf einem vergleichbaren Niveau (Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung: $P_p = 4745,8 \text{ W}$; Raumabsaugung mit gezielter Zuluft: $P_p = 4615,4 \text{ W}$), jedoch wesentlich höher als für die anderen Absaugsysteme (Abbildung 6-40).

Mit einem Spanguterfassungsgrad von $\eta = 91,2 \%$ wird bei der Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung ein Großteil des Spanguts erfasst. Spangutablagerungen waren im Bereich hinter der Spannvorrichtung vorzufinden, was durch die Verwirbelungen in diesem Bereich zu begründen ist. Zudem wiesen die Taschen und Fräskanäle teilweise noch Spangut auf (Abbildung 6-46 rechts).

Für die Raumabsaugung mit gezielter Zuluft wurde ein Spanguterfassungsgrad von $\eta = 27,1 \%$ ermittelt. Das Spangut sedimentierte primär zwischen dem Werkstück und der Absaughaube, sowie auf Werkstück (Abbildung 6-46 links).



Abbildung 6-46: Spangutablagerungen bei Raumabsaugung mit gezielter Zuluft (links) und Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung (rechts)

Der Einsatz der Blasluft führte zu einer starken Aufwirbelung des Spanguts, was kurzzeitig zu hohen Feinstaubkonzentrationen führt (Abbildung 6-44). Für die Raumabsaugung mit Zuluft wurden keine erhöhten Feinstaubkonzentration gemessen, was darauf zurückzuführen ist, dass die Schwebstäube direkt abgesaugt wurden (Abbildung 6-44).

In der vorliegenden Arbeit wird die Forschungsfrage beantwortet, wie die Spanguterfassung bei der spanenden Trockenbearbeitung von CFK erhöht und

zugleich der Energiebedarf der Absaugsysteme gesenkt werden kann. Durch eine Studie zur CFK-Zerspanung in der deutschen Industrie konnte die Forschungsfrage auf den vorherrschenden spanenden Bearbeitungsfall der Fräsbearbeitung konzentriert und auf die drei grundsätzlich industriell eingesetzten Absaugsysteme (Raum- und Kopfabsaugung sowie spannsystemintegrierte Absaugung) angewandt werden. Eine theoretische Betrachtung sowie experimentelle Untersuchungen ermöglichten die systematische Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien für die Spanguterfassung, die angewandt auf die drei Absaugsysteme eine deutliche Steigerung der Spanguterfassung, im Vergleich zum Stand der Technik (Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5), ermöglichte. In einer Validierungsuntersuchung konnte die Wirksamkeit nachgewiesen werden:

- Spannsystemintegrierte Absaugung: $\eta_{\text{alt}} = 73,3 \% \rightarrow \eta_{\text{neu}} = 97,8 \%$
- Kopfabsaugung: $\eta_{\text{alt}} = 69,6 \% \rightarrow \eta_{\text{neu}} = 92,7 \% \dots 95,6 \%$
- Raumabsaugung: $\eta_{\text{alt}} = 47,3 \% \rightarrow \eta_{\text{neu}} = 91,2 \%$

Hierbei gilt jedoch zu beachten, dass die Kopfabsaugung an einem 2D-Bauteil untersucht wurde, was einen vereinfachten Anwendungsfall darstellt.

Eine gegenüberstellende Bewertung der Energieverbräuche der Absaugsysteme kann nur für vergleichbare Bauteile bzw. Maschinenarbeitsräume vorgenommen werden. Jedoch liegen die pneumatischen Leistungen der optimierten Kopf- und spannsystemintegrierten Absaugungen für die betrachteten Anwendungsfälle um den Faktor 28-mal bzw. 103-mal niedriger als die Durchschnittswerte in der industriellen Fertigung (Abbildung 3-11), sodass eine signifikante Energieeinsparung prognostiziert werden kann:

- Spannsystemintegrierte Absaugung: $P_{\text{p,alt}} = 3789 \text{ W} \rightarrow P_{\text{p,neu}} = 36,6 \text{ W}$
- Kopfabsaugung: $P_{\text{p,alt}} = 3314 \text{ W} \rightarrow P_{\text{p,neu}} = 117,1 \text{ W}$
- Raumabsaugung: $P_{\text{p,alt}} = 5802 \text{ W} \rightarrow P_{\text{p,neu}} = 4746 \text{ W}$

Für die optimierte Raumabsaugung kann von einem vergleichbaren Energieverbrauch wie für ein konventionelles System ausgegangen werden. Jedoch wurde der Spanguterfassungsgrad signifikant gesteigert und zudem wurde die

Raumabsaugung durch die Nutzung der Prozessluft-Rückführung für größere Arbeitsräume befähigt. Somit wurde dieses Defizit aus Kapitel 3.2 beseitigt. Eine Bewertung der optimierten Absaugsysteme auf Basis der Kriterien von Tabelle 3-4 ist Abbildung 6-47 zusammenfassend dargestellt.

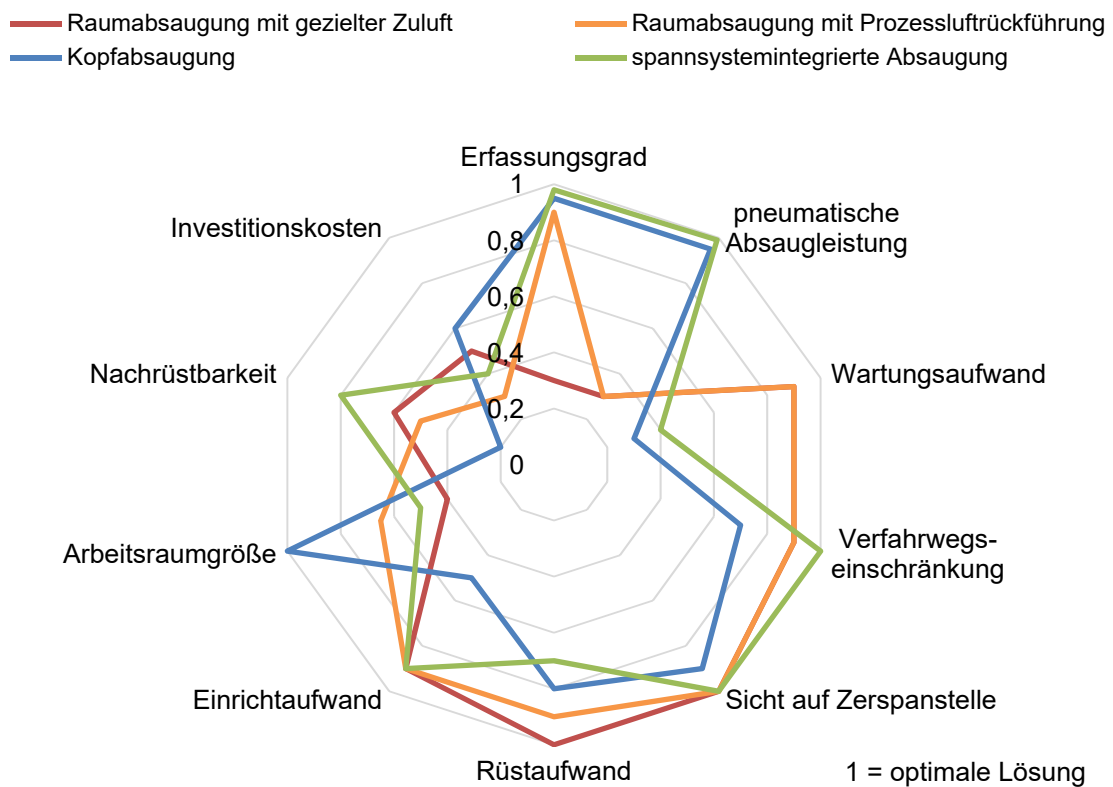


Abbildung 6-47: Bewertung der optimierten Absaugsysteme

Die drei Absaugsysteme konnten maßgeblich auf Basis der ermittelten Grundlagen aus Kapitel 5 und der methodischen Betrachtung der Wirkmechanismen der einzelnen Absaugsysteme optimiert werden. Gleichzeitig wird deutlich, dass keines der Systeme in allen Bewertungskriterien eine optimale Lösung darstellt. Anhand von Abbildung 6-47 und den Erkenntnissen aus Kapitel 6.4.1 – 6.4.3 zur methodischen Auslegung, kann für jede Bearbeitungsaufgabe eine den Randbedingungen angepasste optimale Lösung gefunden und umgesetzt werden, abhängig von Stückzahl, Rüstaufwand, Maschinenbauraum, Werkstückgeometrie, Werkzeugauswahl, verfahrenstechnische Einstellgrößen und Anforderungen des Bedienpersonals an Zugänglichkeit und Gesundheitsschutz.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Endbearbeitung von Bauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ist ein essentieller Schritt in der Herstellungskette. Er wird überwiegend durch spanende Fertigungsverfahren ohne Zuhilfenahme von Kühlschmiermitteln durchgeführt. Das entstehende Spangut stellt eine Gefahr für die Maschinenbediener, die Prozesssicherheit sowie die Bearbeitungsmaschine und umliegende elektrische Anlagen dar. Für eine möglichst vollständige Erfassung des Spanguts werden heute in der Industrie leistungsstarke Absauganlagen eingesetzt. Im Gegensatz zur Holzindustrie, in der die Erfassung des Spanguts seit jeher eine große Aufmerksamkeit erfährt, existieren für die vergleichsweise junge Gattung der faserverstärkten Kunststoffe nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen und kaum auf effektive Spanguterfassung ausgelegte Absaugsysteme. Die vorliegende Arbeit hat daher das Ziel, Grundlagenwissen zur Absaugung von CFK-Spangut zu erarbeiten und anhand von methodisch hergeleiteten Gestaltungsrichtlinien eine effektive und effiziente Spanguterfassung zu ermöglichen.

Im Stand der Technik wurden verschiedenste Absaugsysteme – vor allem aus dem Bereich der Holzbearbeitung – aufgezeigt. Jedoch war deren Nutzung und Wirksamkeit in der fertigen Industrie für CFK-Bauteile weitgehend unbekannt. Die Arbeit widmete sich daher zuvorderst einer Studie der industriellen CFK-Zerspanung, die zeigt, dass überwiegend Raumabsaugungssysteme eingesetzt werden, teils auch Kopfabsaugungen und spannsystemintegrierte Absaugungen. Diese drei grundlegenden Systeme ermöglichen Erfassungsgrade des Spanguts von $\eta = 47\% \dots 73\%$ in der Studie, was in einem hohen Bedarf an manuellen Reinigungsarbeiten von durchschnittlich 74 min/Schicht resultiert. Zugleich weisen die Absaugsysteme einen hohen Energiebedarf von durchschnittlich $P_p = 3,8$ kW auf.

In einem ersten Schritt wurde die Spanguterfassung theoretisch erörtert und alle auf die Spangutpartikel wirkenden Kräfte analysiert und bewertet. Es konnte ermittelt werden, dass sich die weiteren Untersuchungen primär auf die größeren Partikelfraktionen des Spanguts fokussieren sollten, da diese wesentlich schwieriger zu erfassen sind als Feinfraktionen. Als relevante Einflussgrößen und wirkende Kräfte, wurden die Partikelform und Partikelgrößenverteilung, die Auswurfrichtung und Geschwindigkeit, die Widerstands- und die Gravitationskräfte identifiziert. Zudem sind im Falle von Partikel-Partikel-, oder Partikel-Wand-Kollisionen die Haft- und Reibkräfte zu beachten.

Die Analysen zum entstehenden Spangut und dessen Auswurf durch das Werkzeug wurden experimentell durchgeführt. Anzahlbezogene Auswertungen des Spanguts verdeutlichen, dass überwiegend feine Spanpartikel entstehen. So weisen in allen analysierten Spangutproben mehr als 90% der Partikel einen Partikeldurchmesser $x_{c, \min} < 100 \mu\text{m}$ auf. Die für die Auslegung der Absaugtechnik sinnvollere massenbezogene Auswertung hingegen zeigt eine vorherrschende Partikelgröße im Bereich $x_{c, \min} = 220 \mu\text{m} \dots 400 \mu\text{m}$. Die Partikelgrößenverteilung ist von mehreren Einflussgrößen abhängig: niedrige Schnittgeschwindigkeiten, große Zahnvorschübe und eine scharfe Schneide führen zu größerem Spangut. Zudem werden für Faserorientierungswinkel im Bereich $\phi = 67,5^\circ \dots 112,5^\circ$ größere Partikel gebildet. Ursächlich hierfür ist die Bruchmechanik der Faserverstärkung sowie der Fasern selbst.

Das Spangut wird überwiegend tangential durch das Zerspanwerkzeug ausgeworfen, sobald der Spanraum des Werkzeugs in seiner Rotationsbewegung nicht mehr durch das Werkstück verschlossen ist. Abhängig von den Eingriffsbedingungen wird das Spangut von den Flanken der Fräsnut eingeschlossen, sodass vor allem im Volleingriff ein gebündelter Spangutstrahl entsteht. Die Geschwindigkeit der Partikel liegt bei durchschnittlich 91% der Schnittgeschwindigkeit. Kleine Partikel weisen eine höhere Streuung der Partikelgeschwindigkeit auf, die teilweise die Schnittgeschwindigkeit übersteigt, was

auf Kollisionen mit andern Partikeln, dem Werkstück oder Werkzeug und die Freisetzung von Verformungsenergie beim Brechen und Abscheren der Kohlenstofffasern zurückzuführen ist.

Durch einen gezielten Spangutauswurf „nach oben“ oder „nach unten“ kann die Absaugung durch die Absaugsysteme erleichtert werden. Hierzu wurden verschiedene technologische Ansätze untersucht. Werkzeuge mit gedrahten Schneiden oder das Anstellen des Werkzeugs um den Voreilwinkel ermöglichen, das Spangut in einem gebündelten Strahl in eine Vorzugsrichtung auszuwerfen.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden Gestaltungsrichtlinien methodisch erarbeitet, die eine Verbesserung der Spanguterfassung ermöglichen. Diese wurden eingesetzt, um die drei grundlegenden industriell genutzten Absaugsysteme (spannsystemintegrierte Absaugung, Kopf- und Raumabsaugung) zu optimieren.

Spannsystemintegrierte Absaugsysteme ermöglichen hohe Erfassungsraten bei einer Absaugung in Vorschubrichtung. Bei einer Absaugung entgegen der Vorschubrichtung fällt die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal durch die zunehmend einströmende Luft der sich verlängernden Fräsnut. Eine vollständige Erfassung des Spangutes konnte beim Einsatz von Werkzeugen mit negativgedrahten Schneiden festgestellt werden. In einer abschließenden Validierung wurde eine spannsystemintegrierte Absaugung für ein 3D-Schikanebauteil entwickelt. Unter Optimierung der Bearbeitungsparameter hin zu feinem Spangut und der Nutzung eines Werkzeugs mit gedrahten Schneiden wurde 97,8 % des Spangutes erfasst und hierfür die geringste pneumatische Leistung von $P_p = 36,6$ W benötigt.

Für die Kopfabsaugung wurde das Ziel verfolgt, einen Absaugrüssel dem sich bildenden Spangutstrahl nachzuführen, um das Spangut unter minimalstem Energieaufwand direkt an der Zerspanstelle zu erfassen und der Absaugöffnung des Absaugrüssels zuzuführen. Es wurde eine Absaugvorrichtung mit einem Absaugrüssel entworfen, der durch einen Schrittmotor frei um die Z-Achse der Frässpindel verfahren werden konnte. Die Ansteuerung erfolgte wahlweise über

Sensoren, die den Spangutstrahl anhand seiner Wärmesignatur detektieren, oder mittels einer Prognose der Spangutstrahlposition auf Basis der Steuerungsdaten der Bearbeitungsmaschine. Die Kopfabsaugung wurde für beide Steuerungsvarianten an einem 2D-Schikanebauteil untersucht. Auch hier wurden die optimierten Bearbeitungsparameter und ein geeignetes Fräswerkzeug auf Basis der vorhergehenden Analysen herangezogen. Die Kopfabsaugung erzielte eine Erfassung von 95,6 % des Spanguts für die Nachführung auf Basis der CNC-Steuerung und 92,7 % für die sensorische Steuerung bei einer Absaugleistung (pneumatische Leistung) von $P_p = 117,1 \text{ W}$ - ebenfalls mehrfach unter dem Durchschnittswert aus der Studie zur industriellen Praxis.

Für eine Steigerung der Spanguterfassung von Raumabsaugungsanlagen, wurde der gezielte Einsatz von Blasluft aus unterschiedlichen Quellen (Frischlufte, Hallenluft oder gefilterte oder teilgefilterte Prozessluft) diskutiert. Zudem wurden der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit und der Auswurfwinkel simulativ untersucht. Nach Optimierung der Technologie erzielte die Raumabsaugung mit Prozessluftrückführung in der abschließenden Validierung einen Erfassungsgrad von 91,2 %, was eine signifikante Steigerung im Vergleich zum Stand der Technik darstellt. Die pneumatische Leistung war hierbei mit einer herkömmlichen Raumabsaugung vergleichbar.

Zusammenfassend ermöglichen systematisch optimierte Absaugsysteme eine wesentliche Verbesserung der Spanguterfassung und im Falle der spannsystemintegrierten Absaugung und der Kopfabsaugung ein enormes Potential zur Energieeinsparung. Hierbei ist zu beachten, dass alle Absaugsysteme ihre Berechtigung angesichts unterschiedlicher Anwendungsfälle und Randbedingungen besitzen.

Zukünftige Arbeiten sollten sich auf eine Vernetzung der Bearbeitungsmaschine und der Absauganlage fokussieren, um anhand der Werkzeug- und Bearbeitungs- und Bewegungsparameter und der Erkenntnisse dieser Arbeit eine Prognose zum anfallenden Spangut und dessen Auswurf treffen zu können und die Absaugung so

hinsichtlich einer effizienten Nutzung zu steuern. Die Staubkonzentrationsmessung hat sich als geeigneter Indikator hinsichtlich der Spanguterfassung der drei optimierten Absaugsysteme erwiesen und ermöglicht die Erweiterung der Steuerung der Absauganlage um einen Regelkreis oder – für ein komplexes Umfeld (unterschiedliche Maschinen und Bauteile in einem Absaugsystem) – zum Anlernen eines Maschine Learning-Algorithmus.

Die spannsystemintegrierte Absaugung zeigte sich als effektivste und effizienteste Methode der Spanguterfassung, auch für 3D-Bauteile. Jedoch wird die Komplexität der Spannvorrichtung durch die einzubringenden Absaugkanäle und Taschen, sowie deren Absaugung weiter gesteigert. Dies erfordert eine aufwendige mehrseitige Fräs- und Bohrbearbeitung zur Herstellung der Vorrichtung. Neue Entwicklungen im Bereich extrusionsbasierter Drucktechnologien und der Hybridfertigung aus Additiver Fertigung und spanender Bearbeitung wecken die Hoffnung, große und komplexe Vorrichtungen zukünftig schnell und kostengünstig fertigen zu können (Götz et al. 2019). Erste Untersuchungen basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit zeigen das Potenzial für Spannvorrichtungen auf (Gebhardt 2021) und empfehlen weitere Forschungsarbeiten. Mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen kann bereits belegt werden, wie die grundlegenden Analysen zur Spanguterfassung, sowie die methodische Optimierung der Erfassungssysteme in dieser Arbeit, einen Beitrag zur künftigen Effizienzsteigerung der Absaugung von CFK-Spangut leisten können und hierbei insbesondere die Reduktion des Energieaufwands für die Spanguterfassung berücksichtigen.

8 Literaturverzeichnis

- Abena et al. 2017** Abena, A; Soo, S. L; Essa, K., 2017. Modelling the orthogonal cutting of UD-CFRP composites: Development of a novel cohesive zone model.
Composite Structures **168**, S. 65–83
DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.02.030
- Arendts et al. 1992** Arendts, F. J; Brandt, J.; Drechsler, K., 1992.
Faserverstärkte Kunststoffe.
In: Bundesverband der Deutschen Luftfahrt-, Raumfahrt-, und Ausrüstungsindustrie (Hrsg.): *BDLI - Werkstofftag*, S. 183–211
- Arola et al. 1996** Arola, D; Ramulu, M; Wang, D. H., 1996. Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite.
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **27** (2), S. 121–133
DOI: 10.1016/1359-835X(95)00013-R
- AVK 2010** Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (AVK), 2010.
Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen ; mit 46 Tabellen.
Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
ISBN 3834808814
- Babenko et al. 2017** Babenko, Y; Schneider, M; Gebhardt, A., 2017.
Temperaturanalyse beim Trennschleifen von CFK.
wt Werkstattstechnik online **107** (01-02), S. 87–93
DOI: 10.37544/1436-4980-2017-01-02-89

- Bäger et al. 2019** Bäger, D; Simonow, B; Kehren, D; Dziurawitz, N; Wenzlaff, D; Thim, C; Meyer-Plath, A; Plitzko, S., 2019. Pechbasierte Carbonfasern als Quelle alveolengängiger Fasern bei mechanischer Bearbeitung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK).
Gefahrstoffe **79** (01-02), S. 13–16
DOI: 10.37544/0949-8036-2019-01-02-15
- Barz et al. 1967** Barz, E; Münz, U. V., 1967. Der Spanablauf bei Fräsen für die Holzbearbeitung.
Holz als Roh- und Werkstoff **25** (11), S. 422–428
DOI: 10.1007/BF02612902
- Beckenlechner et al. 2019** Beckenlechner, R; Gebhardt, A; Baeten, A; Kornmann, M; Oblinger, C; Körner, T; Hufschmied, R; Oyanedel Fuentes, J; Frank, A; Lebmeier, R., 2019. Optimierung der Trocken- und Nasszerspannung von CFK*/Optimization of dry and wet machining of CFRP.
wt Werkstattstechnik online **109** (07-08), S. 575–581
DOI: 10.37544/1436-4980-2019-07-08-65
- Becker 1991** Becker, G., 1991.
Struktur und mechanisch-technologische Eigenschaften von Filamentgarnen für Faserverbundwerkstoffe: Rheinisch-Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1991
- BGIA 2008** Institut für Arbeitsschutz der DGUV, 2008.
Jahresbericht 2007
Verfügbar unter:
https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/jahr/pdf/jahresbericht_2008.pdf
Zugriff am: 02.10.2022

- Bhatnagar et al. 1995** Bhatnagar, N; Ramakrishnan, N; Naik, Nk; Komanduri, R., 1995. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates: Int. J. Mach. Tools Manuf. *International Journal Of Machine Tools & Manufacture* **35** (5), S. 701–716
DOI: 10.1016/0890-6955(95)93039-9
- Biermann et al. 2008** Biermann, D; Hufenbach, W; Seliger, G., 2008. *Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe: (sefawe) ; Untersuchung zum Forschungs- und Handlungsbedarf.* Dresden: Progressmedia Verl. & Werbeagentur.
ISBN 3000262172
- Bilbatua 2011** Bilbatua, J. P., 2011.
ASPIRATE: a new green process to machine CFRP safe, clean and efficient.
In: CFK-Valley Stade Convention GbR (Hrsg): *CFK-Valley Stade Convention 2011*. Stade, 08.06.2011, 29 Folien.
- Blecken 2004** Blecken, J., 2004.
Optimierung der Staub- und Späneerfassung in stationären Holzbearbeitungsmaschinen.
Essen: Vulkan-Verlag.
Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig
Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2004
ISBN 9783802786815

- Blome 2006** Blome, H., 2006.
Arbeitsschutzlösungen für ausgewählte Stoffe und Verfahren.
Sankt Augustin: Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften.
BG-BGIA-Report.
ISBN 9783883837116
- Boatman et al. 1988** Boatman, E. S; Covert, D; Kalman, D; Luchtel, D; Omenn, G. S., 1988. Physical, morphological, and chemical studies of dusts derived from the machining of composite-epoxy materials.
Environmental Research **45** (2), S. 242–255
DOI: 10.1016/S0013-9351(88)80050-1
- Bohl et al. 2005** Bohl, W; Elmendorf, W., 2005.
Technische Strömungslehre: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, inkompressible Strömungen, kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik.
Würzburg: Vogel.
ISBN 3834330299
- Brinkmann 1997** Brinkmann, G., 1997.
Analytische Wissenschaftstheorie: Einführung sowie Anwendung auf einige Stücke der Volkswirtschaftslehre.
München: Oldenbourg.
ISBN 3486241265
- Brookes 1992** Brookes, K. J. A., 1992. World directory and handbook of hardmetals and hard materials.
Materials in engineering **13** (3), 184

- Calzada et al. 2012** Calzada, K. A; Kapoor, S. G; DeVor, R. E; Samuel, J; Srivastava, A. K., 2012. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites.
Micro and Nano Manufacturing **14** (2), S. 141–149
DOI: 10.1016/j.jmapro.2011.09.005
- Cherif 2011** Cherif, C., 2011.
Einführung.
In: Cherif, Chokri (Hrsg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*.
Berlin: Springer
ISBN 3642179916
- Costabel et al. 1988** Costabel, U; Kroegel, C., 1988.
Die Lunge und ihre Abwehrmechanismen.
In: Konietzko, N. (Hrsg.): *AIDS und Lunge*.
Heidelberg: Steinkopff, S. 15–28
DOI: 10.1007/978-3-642-85513-9_2
- Czichos et al. 2012** Czichos, H; Skrotzki, B; Simon, F.-G, 2012.
Werkstoffe.
In: Czichos, H; Hennecke, M. (Hrsg.): *Das Ingenieurwissen*.
34., aktualisierte Aufl.
Berlin: Springer Vieweg
ISBN 364222850X
- Denkena et al. 2017** Denkena, B; Dittrich, M.-A; Rahner, B.-H., 2017. Smart and energy-efficient dust suction concept for milling of fibre-reinforced plastics.
Production Engineering **11** (6), S. 723–729
DOI: 10.1007/s11740-017-0776-x

Denner 1993

Denner, W.-J., 1993.
Theoretische und experimentelle Untersuchungen an dreidimensionalen Wirbelströmungen für industrielle Absauganlagen. Berlin: Springer.
IPA-IAO-Forschung und -Praxis Bd. 187.
Stuttgart, Univ., Diss., 1993
ISBN 9780387574103

DGUV 2014

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2014.
Bearbeitung von CFK Materialien: Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen.
Verfügbar unter: https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen-dokumente/infoblaetter/infobl_deutsch/074_cfk_materialien.pdf
Zugriff am: 25.09.2022

DGUV 2021

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2015.
Bestimmen von Brenn- und Explosionskenngößen staubförmiger Feststoffe.
Verfügbar unter:
https://www.dguv.de/medien/ifa/de/gestis/staub_ex/erlaeueterungen_2015.pdf
Zugriff am: 25.09.2022

Dhaliwal 2016

Dhaliwal, G. S., 2016. Modeling Low Velocity Impact Response of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminates (CARALL).
Journal of dynamic behavior of materials **2** (2), S. 181–193

DIN 7708

DIN ISO 7708:1996-01.
Luftbeschaffenheit - Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme.

-
- DIN EN ISO 19085** DIN EN ISO 19085-3:2017-10.
Sicherheit von Holzbearbeitungsmaschinen – Fräsmaschinen für einseitige Bearbeitung mit drehendem Werkzeug – Teil 3: NC-Bohr- und Fräsmaschinen.
- DIN ISO 9276** DIN ISO 9276-2:2006-02.
Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 2: Berechnung von mittleren Partikelgrößen/-durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen.
- DIN ISO 9276** DIN ISO 9276-6:2012-01.
Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen – Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln.
- Dittes et al. 1987** Dittes, W; Goettling, D; Wolf, H., 1987.
Arbeitsplatzluftreinhaltung 'Kein System von der Stange':
Einrichtungen zur Schadstoffeffassung.
Sanitaer- und Heizungstechnik **52** (3), S. 219–223
- Domininghaus et al. 2005** Domininghaus, H; Elsner, P; Eyerer, P; Hirth, T., 2005.
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften.
6., neu bearb. und erw. Aufl.
Berlin: Springer.
ISBN 3-540-21410-0
- Dressler 2007** Dressler, M., 2007.
Simulation von Späneerfassungsvorgängen in Absaughauben bei holzbearbeitenden Maschinen.
Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen /
Konstruktion und Fertigung ; Bd. 30
Stuttgart, Univ., Diss., 2006
ISBN 3000197583

- Durst 2006** Durst, F., 2006.
Grundlagen der Strömungsmechanik: Eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden.
Berlin: Springer
DOI: 10.1007/978-3-540-31324-3
- Ehrenstein 2006** Ehrenstein, G. W., 2006.
Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften.
München: Hanser.
ISBN 3446227164
- Eibl et al. 2014** Eibl, S; Scholz, N., 2014. Besondere Gefährdung beim Abbrand von Carbon-Kunststoff.
BRANDSchutz **86** (6), S. 423–427
- Eisend et al. 2017** Eisend, M; Kuß, A., 2017.
Die wissenschaftstheoretische Grundlage:
Wissenschaftlicher Realismus.
In: *Grundlagen empirischer Forschung.*
Wiesbaden: Springer, S. 69–92
DOI: 10.1007/978-3-658-09705-9_3
- El-Emam et al. 2021** El-Emam, M. A; Zhou, L; Shi, W. D; Han, C., 2021. True shape modeling of bio-particulate matter flow in an aerocyclone separator using CFD–DEM simulation.
Computational Particle Mechanics **8** (4), S. 955–971
DOI: 10.1007/s40571-020-00383-w
- EN 16770** EN 16770:2018-09.
Sicherheit von Holzbearbeitungsmaschinen – Absauganlagen für Holzstaub und Späne für Innenaufstellung – Sicherheitstechnische Anforderungen.

-
- Essel et al. 2006** Essel, K; Fleck, R; Klocke, F; Fritsch, R; Lung, D; Siebel, H., 2006. Zerspanforschung (ab 1906).
In: Eversheim, W; Pfeifer, T; Weck, M. (Hrsg.): *100 Jahre Produktionstechnik*.
Berlin: Springer, S. 183–211
ISBN 9783540333166
- Fischer et al. 2000** Fischer, R; Oertel, M; Buchelt, B., 2000.
Fräsen ohne Absaughaube durch innere Spanabfuhr.
In: Hesselbach, J. (Hrsg.): *Innovationen für die Holzbearbeitung von morgen*.
Essen: Vulkan Verlag, 18 S.
- Fonte et al. 2015** Fonte, C; Oliveira, J. A; Almeida, L., 2015.
DEM-CFD coupling: mathematical modelling and case studies using Rocky-DEM and ANSYS Fluent.
In: CSIRO (Hrsg.): *11th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, Melbourne, 7.-09.12.2015*
- Freudenberg 2011** Freudenberg, C., 2011. Textile Faserstoffe.
In: Cherif, Chokri (Hrsg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*.
Berlin: Springer, S. 39–111
ISBN 3642179916
- Gandhi et al. 1998** Gandhi, S; Lyon, R. S., 1998. Health Hazards of Combustion Products From Aircraft Composite Materials
In: U.S. Department of Transportation (Hrsg.): *Final Report*.
Verfügbar unter:
<http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar98-34.pdf>
Zugriff am: 01.02.2022

- Gauggel et al. 2020** Gauggel, C; Bischoff, T; Chetreanu, C., 2020.
Neue Werkzeugkonzepte zur Bearbeitung von
Verbundwerkstoffen
In: Institut für Werkzeugmaschinen (Hrsg): *10. IfW-Tagung
Prozesskette Bearbeitung von Verbundwerkstoffen (PKV)*
Stuttgart, 30.11.2020
- Gebhardt 2021** Gebhardt, A., 2021.
Smarte Prozesskette der Verbund- und
Leichtbauwerkstoffbearbeitung.
In: ProMicron (Hrsg): *DiMaP 2.0 - Digital Machining*,
Kaufbeuren, 16.-19.3.2021, 30 Folien
- Gebhardt et al. 2014** Die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e. V; Schuko Heinz Schulte-
Südhoff GmbH & CO KG.
*Absaugvorrichtung, Werkzeugmaschine und
Absaugverfahren.*
WO2015091341A1·2015-06-25
- Gebhardt et al. 2017** Gebhardt, A; Miller, P; Schulte-Südhoff, A; Hauck, M.,
2017. Neuartiges Absaugsystem für die 5-Achs-Zerspanung
von Composites.
lightweight design **10** (5), S. 54–59
DOI: 10.1007/s35725-017-0050-3
- Gebhardt et al. 2020** Gebhardt, A; Esch, P., 2020. Ganzheitliche Betrachtung der
Prozesskette von der Aufspannung bis zur Versiegelung
In: Institut für Werkzeugmaschinen (Hrsg): *10. IfW-Tagung
Prozesskette Bearbeitung von Verbundwerkstoffen (PKV)*
Stuttgart, 30.11.2020, 12 Folien

- Gebhardt et al. 2021** Gebhardt, A; Baeten, A; Fehn, S; Ottmann, D; Kleinhenz, S; Oyanedel Fuentes, J; Hufschmied, R; Lebmeier, R., 2021.
MAI iSpan - Vergleich optimierter Bearbeitungstechnologien von CFK für den Serieneinsatz in der Automobilbranche im Hinblick auf Prozesskosten, Qualität und Emissionsverhalten.
In: Composites United e.V. (Hrsg.): *MAI Carbon Projektforum 2021*.
Augsburg, 14.10.2021, 21 Folien
- Geis et al. 2012.** Geis, T.; Hintze, W.; Kober, H., 2012.
Erfassungseinrichtung von Staub und Spänen während der Bearbeitung von faserverstärktem Kunststoff, Honeycomb, Holz oder dergleichen.
DE 102012007344 A1
- Giroto et al. 2009** Giroto, F; López de Lacalle, L. N; Lamikiz, A; Iliescu, D; Gutiérrez, M. E., 2009.
Machinability Aspects of Polymer Matrix Composites.
In: Paulo Davim, J. (Hrsg.): *Machining Composite Materials*.
John Wiley & Sons, S. 39–111
- Gittel 2000a** Gittel, H.-J., 2000.
Werkzeuge für die Hochleistungsbearbeitung.
In: Hesselbach, J. (Hrsg.): *Flexibilität - Know-how - Kundenorientierung: Innovationen für die Holzbearbeitung von morgen*.
Essen: Vulkan-Verl., 13.1-13.6
ISBN 380278653X
- Gittel 2000b** Gittel, H.-J., 2000. Werkzeuge für die Hochleistungsbearbeitung.
HOB – Die Holzbearbeitung (5), S. 58–62

- Götz et al. 2019** Götz, T; Gebhardt, A; Esch, P; Schneider, M; Vogel, C; Modler, N., 2019. Additiv gefertigte Spannmittel für CFK-Bauteile.
wt Werkstattstechnik online **109** (06), S. 407–412
DOI: 10.37544/1436-4980-2019-06-9
- Gu et al. 2006** Gu, B; Schmid, J., 2006. Verbesserung der Stoffeffassung an Werkzeugmaschinen mittels Strömungssimulation.
Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft **66** (10), S. 417–422
- Habeck 2022** Habeck, R., 2022. Videobotschaft.
In: *3. Lightweighting Summit 2022, Hannover, 31.05.2022*
Verfügbar unter:
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Videos/2022/20220525-habeck-lightweight-summit/20220525-habeck-lightweight-summit.html>
Zugriff am: 25.10.2022
- Haddad et al. 2012** Haddad, M; Zitoune, R; Eyma, F; Castanié, B; Bougherara, H., 2012. Surface Quality and Dust Analysis in High Speed Trimming of CFRP.
Applied Mechanics and Materials **232**, S. 57–62
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.232.57
- Haddad et al. 2014** Haddad, M; Zitoune, R; Eyma, F; Castanie, B., 2014. Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range.
Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **66**, S. 142–154
DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.07.005

- Hagino et al. 2013** Hagino, M; Inoue, T; Olabi, A. G; Aoki, W; Matsumoto, F., 2013. New Machine Tool on Collecting Cutting Chips of CFRP for Working Environment Improvement. *Advanced Materials Research* **816-817**, S. 211–215
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.816-817.211
- Haider et al. 1989** Haider, A; Levenspiel, O., 1989. Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. *Powder Technology*, S. 63–70
- Hartmann 2012** Hartmann, D., 2012.
Delamination an Bauteilkanten beim Umrissfräsen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe.
Wissen schafft Innovation - 17
Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2012
- He et al. 2018** He, Y; Bayly, A. E; Hassanpour, A., 2018. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows. *Powder Technology* **325**, S. 620–631
DOI: 10.1016/j.powtec.2017.11.045
- Heisel et al. 1998** Heisel, U; Tröger, J; Müller, S; Dressler, M., 1998. Späneentsorgung durch Sedimentation, Deutsch-tschechische Fachtagung anlässlich des Tages der deutschen Umwelttechnik. *Innovative Technologien des Umweltschutzes*, S. 87–103
- Heisel et al. 1999** Heisel, U; Dressler, M., 1999. Spänestrahls gezielt leiten. *HK Holz- und Kunststoffverarbeitung* **34** (10), S. 78–81
- Heisel et al. 2000a** Heisel, U; Tröger, J; Müller, S; Haag, M., 2000. Bearbeitungszentren entsorgungsgerecht gestalten. *Maschinenmarkt. MM, das Industriemagazin* **106** (40), S. 30–36

- Heisel et al. 2000b** Heisel, U; Tröger, J; Müller, S; Haag, M., 2000. Späneerfassung an Bearbeitungszentren Teil 1. *HOB – Die Holzbearbeitung* **53** (6), S. 90–93
- Heisel et al. 2000c** Heisel, U; Tröger, J; Müller, S; Haag, M., 2000. Effiziente Späneerfassung ergänzt Bearbeitungszentren. *Maschinenmarkt. MM, das Industriemagazin* **106** (36), S. 36–40
- Heisel et al. 2000d** Heisel, U; Tröger, J; Müller, S; Haag, M., 2000. Späneerfassung an Bearbeitungszentren Teil 2. *HOB – Die Holzbearbeitung* **53** (7/8), S. 60–65
- Heisel et al. 2000e** Heisel, U; Tröger, J; Müller, S; Haag, M., 2000. Späneerfassung an Bearbeitungszentren Teil 3. *HOB – Die Holzbearbeitung* **53** (10), S. 79–84
- Heisel et al. 2001a** Heisel, U; Dressler, M., 2001. Späne durch Federspirale. *HK Holz- und Kunststoffbearbeitung* **36** (6), S. 51–53
- Heisel et al. 2001b** Heisel, U; Dressler, M., 2001. Späne durch Federspirale. *HK Holz- und Kunststoffbearbeitung* **36** (5), S. 75–78
- Heisel et al. 2001c** Heisel, U; Dressler, M., 2001. *Auslegung von Absaughauben bezüglich der Späneerfassung durch Simulationsrechnung: Abschlussbericht zum BMWi/ AiF -Forschungsvorhaben 12311*
- Heisel et al. 2001d** Heisel, U; Dressler, M; Bamberger, K., 2001. Effektive Absaugung bei der Bohr- und Fräsbearbeitung. *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **96** (9), S. 458–462

- Heisel et al. 2004a** Heisel, U; Dressler, M., 2004. Werkzeugnahe Späneerfassung- kostengünstig und flexibel: Perspektiven für die Holz- und Möbelindustrie. 12.
In: Braunschweiger Holztechnisches Kolloquium: *Flexible Fertigung- effektiv und kundenorientiert*
Braunschweig, 1.-3.03.2004
- Heisel et al. 2004b** Heisel, U; Tröger, J; Martynenko, S., 2004. Den Spänen auf der Spur: Lösungen zur Erfassung in Hochleistungsbearbeitungszentren, Teil1.
HK Holz und Kunststoffverarbeitung (12), S. 71–73
- Heisel et al. 2005** Heisel, U; Tröger, J; Martynenko, S., 2005. Den Spänen auf der Spur: Lösungen zur Erfassung in Hochleistungsbearbeitungszentren, Teil 2.
HK Holz und Kunststoffverarbeitung (01), S. 71–73
- Heisel et al. 2006** Heisel, U; Dressler, M., 2006. Neue Lösungen sind gefragt.
MM Maschinenmarkt (27), S. 24–25
- Heisel et al. 2007a** Heisel, U; Tröger, J; Schneider, M., 2007. Späneerfassung in 5-Achs-Bearbeitungszentren Teil 1.
HOB – Die Holzbearbeitung (06), S. 62–65
- Heisel et al. 2007b** Heisel, U; Tröger, J; Schneider, M., 2007. Genug Wind um Staub, Staub- und Späneerfassung an Holzbearbeitungsmaschinen.
dds – das Magazin für Möbel und Ausbau (10), S. 82–87
- Heisel et al. 2007c** Heisel, U; Tröger, J; Schneider, M., 2007. Späneerfassung in 5-Achs-Bearbeitungszentren - Teil 2.
HOB – Die Holzbearbeitung (07/08), S. 56–59

- Heisel et al. 2008** Heisel, U; Birenbaum, C., 2008.
Simulation der Spanbewegungen im Spanraum des Werkzeugs: Abschlussbericht zum BMWil AiF - Forschungsvorhaben 15016 N
- Heisel et al. 2009** Heisel, U; Birenbaum, C., 2009. Absaughauben optimal eingesetzt.
HK Holz- und Kunststoffverarbeitung (2), S. 108–113
- Heisel et al. 2011** Heisel, U; Schneider, M; Großmann, M., 2011. Steigerung der Energieeffizienz durch gezielte Beeinflussung von Späneflug und Späneerfassung.
HOB Die Holzbearbeitung (6), S. 58–60
- Heisel et al. 2016** Heisel, U; Schneider, M; Gebhardt, A., 2016.
Analysis of particles and chips during drilling and milling operations of CFRP with respect to health protection and dust extraction.
In: *CIRP: 2016 CIRP Winter Meeting: Collaborative Working-Group on Composite Materials Parts Manufacturing*
Paris, 17.-19.02.2016, 11 Folien
- Heißler 1986** Heißler, H., 1986.
Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik.
Stuttgart: Kohlhammer.
ISBN 9783170088368
- Herdegen 2014** Herdegen, N.
Wenn Carbon auf Elektronik trifft.
In: *Hofer Vliesstofftage*
Hof, 31.10.2014, 30 Folien

-
- Herwig et al. 2018** Herwig, H; Schmandt, B., 2018.
Strömungsmechanik: Physikalisch-mathematische Grundlagen und Anleitung zum Lösen von Aufgaben.
Berlin: Springer
ISBN 9783662577738
- Hintze 2013** Hintze, W., 2013. Optimierungspotenziale für die CFK-Bearbeitung.
MM MaschinenMarkt CompositesWorld (11), S. 12–15
- Hintze 2021** Hintze, W., 2021.
CFK-Bearbeitung.
Berlin: Springer.
ISBN 978-3-662-63264-2
- Hintze et al. 2012** Hintze, W; Kober, H; Kothe, S.-M; Ograbisz, P; Schütte, C., 2012. Temperaturen beim Fräsen von Composites beherrschen - Mit neuen Analysemethoden zu optimalen Prozessen.
Unter Span - Das Magazin des Machining Innovations Network e.V. (1), S. 10–11
- Hohensee 1992** Hohensee, V., 1992.
Umrißbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe durch Fräsen und Laserschneiden
Düsseldorf: VDI
Verein Deutscher Ingenieure: Fortschrittberichte VDI / Reihe 2, Fertigungstechnik ; Nr. 251
Hannover, Univ., Diss., 1992
ISBN 3181451029

- Hunt 2010** Hunt, S. D., 2010.
Marketing theory: Foundations, controversy, strategy, resource-advantage theory.
London: Routledge.
DOI: 10.4324/9781315702537
- Hupe 1985** Hupe, H.-R., 1985.
Staub- u. Späneerfassung und Abscheidung in der holzbe- und -verarbeitenden Industrie.
In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Erfassungsanlagen für luftfremde Stoffe*: VDI Verlag, S. 359–400
- Kaneeda 1991** Kaneeda, T., 1991. CFRP Cutting Mechanism (3rd report) — Effects of Tool Edge Roundness and Relief Angle on Cutting Phenomena.
Seimitsu Kōgakkashi **57** (3), S. 491–496
- Kloss et al. 2012** Kloss, C; Goniva, C; Hager, A; Amberger, S; Pirker, S., 2012. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD–DEM.
Progress in computational fluid dynamics **12** (2-3), S. 140–152
- König et al. 1993** König, W; Rummenhüller, S., 1993. Technological and Industrial Safety Aspects in Milling FRPS: Presented at the 1993 ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, November 28-December 3, 1993.
Machining of Advanced Composites **66**, S. 1–14
- Königsreuther 2017** Königsreuther, P., 2017. CFK sorgloser zerspanen: CFK mechanisch bearbeiten.
Maschinenmarkt (37), S. 18–21

-
- Koplev et al. 1980** Koplev, A; Bunsell, A., 1980.
Cutting of CFRP with Single Edge Tools.
In: *Advances in Composite Materials*: Pergamon Press, S.
1597–1605
- Koplev et al. 1983** Koplev, A; Lystrup, A; Vorm, T., 1983. The cutting process,
chips, and cutting forces in machining CFRP.
Composites **14** (4), S. 371–376
DOI: 10.1016/0010-4361(83)90157-X
- Körkel 2015** Körkel, G. K., 2015.
*Zerspanbarkeitsbewertung von Faserverbundkunststoffen
bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Bauteile in der
Großserie.*
Wissen schafft Innovation. - Band: (24). - 1613-8244
Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2015
- Kowtsch et al. 2011** Kowtsch, C; Herzberg, C; Kleicke, R., 2011.
Gewebe Halbzeuge und Webtechniken.
In: Cherif, Chokri (Hrsg.): *Textile Werkstoffe für den
Leichtbau.*
Berlin: Springer, S. 171–224
ISBN 3642179916
- Kroll 2019** Kroll, L. (Hrsg.), 2019.
*Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen:
Ressourceneffizienz durch die Schlüsseltechnologie
"Leichtbau".*
Berlin: Springer
ISBN 978-3-662-54734-2

- Lachenmayr et al. 2006** Lachenmayr, G; Kreimes, H., 2006.
Energietechnik für die Holzindustrie.
Weyarn: Retru
ISBN 978-3-662-47438-9
- Lackmann 2011** Lackmann, J., 2011.
Mechanik - Hydro- und Aerodynamik.
In: Dubbel, H; Grote, K.-H; Feldhusen, J. (Hrsg.):
Taschenbuch für den Maschinenbau.
Berlin: Springer
ISBN 978-3-642-17306-6
- Laurien et al. 2018** Laurien, E; Oertel, H., 2018.
Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
DOI: 10.1007/978-3-658-21060-1
- Lensing et al. 2014** AUDI AG.
Verfahren und Vorrichtung zum Absaugen von Materialabrieb.
DE 10 2014 017 379 B4 2019.01.03
- Lim et al. 2012** Lim, S. S; Vos, T; Flaxman, A. D; Danaei, G; et al., 2012. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010.
The Lancet **380** (9859), S. 2224–2260
DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61766-8

- Loibl et al. 2015** Loibl, S; Nickl, J. A., 2015.
Abschätzung der Brandexposition und des Faserabbaus von faserverstärktem Kunststoff (CFK): Technische Mitteilung 20150914
In: GWP Gesellschaft für Werkstoffprüfung mbH (Hrsg):
Technische Mitteilung 20150914
- Lopresto et al. 2016** Lopresto, V; Caggiano, A; Teti, R., 2016. High Performance Cutting of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials.
Procedia CIRP **46**, S. 71–82
- Luchtel et al. 1989** Luchtel, D. L; Martin, T. R; Boatman, E. S., 1989. Response of the rat lung to respirable fractions of composite fiber-epoxy dusts.
Environmental Research **48** (1), S. 57–69
DOI: 10.1016/S0013-9351(89)80085-4
- MAK 2014** Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2014.
MAK- und BAT-Werte-Liste 2014: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 50.
Weinheim: Wiley.
ISBN 3527337377
- Mangelsdorf 1993** Mangelsdorf, I., 1993.
Sachstandsbericht zur Einstufung von faserförmigen Stäuben durch die MAK-Kommission.
In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Faserförmige Stäube: Vorschriften, Wirkungen, Messung, Minderung.*
Düsseldorf: VDI
ISBN 3-18-091075-5

- Martin 2011** Martin, H., 2011.
Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik: Grundlagen und Methoden.
Berlin: Springer.
ISBN 9783642172083
- Martínez et al. 2005** Martínez, A. B; Sánchez-Soto, M; Velasco, J. I; Maspoch, M. Ll; Santana, O. O; Gordillo, A., 2005. Impact characterization of a carbon fiber-epoxy laminate using a nonconservative model.
Journal of applied polymer science **97** (6), S. 2256–2263
- Martynenko 2007** Martynenko, S., 2007.
Beitrag zur Steigerung der Effektivität und Prozesssicherheit der Hochleistungsbearbeitung von Holz- und Holzwerkstoffen mittels Bearbeitungszentren.
Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen / Konstruktion und Fertigung Bd. 33.
Stuttgart, Univ.; Diss, 2007
ISBN 3000215093
- Masters 1987** Masters, J. E., 1987.
Characterization of Impact Damage Development in Graphite/Epoxy Laminates: ASTM International
West Conshohocken: ASTM International
- Matsson 2021** Matsson, J. E., 2021.
An introduction to ANSYS Fluent 2020.
Mission: SDC Publications.
ISBN 1630574627

-
- McMullin 1984** McMullin, E., 1984.
A Case for Scientific Realism.
In: Leplin, J. (Hrsg.): *Scientific Realism*.
Berkeley, Los Angeles, London: University of California
Press, S. 41–82
- Menges 2011** Menges, G., 2011.
Werkstoffkunde Kunststoffe.
München: Hanser.
ISBN 9783446427624
- Menges et al. 1988** Menges, G; Ziegler, G., 1988. Faserverbundwerkstoffe:
Grundlagen und Einführung in die Besonderheiten {Teil I}.
MAGAZIN NEUE WERKSTOFFE (4), S. 26–30
- Michaeli et al. 1989** Michaeli, W; Wegener, M., 1989.
Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe.
München: Hanser.
ISBN 9783446157866
- N. N. 2008** N. N., 2008. Energiespar-Idee.
HOB – Die Holzbearbeitung (5), S. 66
- N. N. 2016** N. N., 2016. Staubfrei für die Windkraft: Handhabung und
Bearbeitung von GFK.
mav (10), S. 78–81
- Noll 1993** Noll, B., 1993.
Numerische Strömungsmechanik: Grundlagen.
Berlin: Springer.
DOI: 10.1007/978-3-642-84960-2

- Oberdörster 1995** Oberdörster, G., 1995. Lung particle overload: implications for occupational exposures to particles.
Regulatory toxicology and pharmacology : RTP **21** (1), S. 123–135
DOI: 10.1006/rtph.1995.1017
- Oertel et al. 2001** Oertel, M; Fischer, R., 2001. Development of Innovative Milling Tools with Interior Disposal of Chips and the Implementation into Industrial Practice.
15th International Wood Machining Seminar, Los Angeles, S. 49–56
- Pfeiffer 1982** Pfeiffer, W., 1982. Absaugluftmengen von Erfassungseinrichtungen offener Bauart.
Staub - Reinhaltung der Luft **42** (8), S. 303–308
- Pöhler et al. 2017** Pöhler, D; Thümmeler, J. (Hrsg.), 2017.
CFK-Bearbeitung - Schutz der elektrischen Ausrüstung.
In: Carbon Composites e.V. (Hrsg.): *CCeV-Thementag „Ertüchtigung von Werkzeugmaschinen für die CFK Bearbeitung“*
Fulda, 15.02.2017, 14 Folien
- Popper 2005** Popper, K. R., 2005.
Logik der Forschung.
11., durchgesehene und ergänzte Auflage.
Tübingen: Mohr Siebeck.
ISBN 3161481119

- Pott et al. 1993** Pott, F; Roller, M; Althoff, G. H; Kamino, K., Bellmann, B; Ulm, K., 1993.
Beurteilung der Kanzerogenität von inhalierbaren Fasern.
In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Faserförmige Stäube: Vorschriften, Wirkungen, Messung, Minderung*.
Düsseldorf: VDI
ISBN 3-18-091075-5
- Psillos 2006** Psillos, S., 2006.
Scientific realism.
In: Borchert, D. (Hrsg.): *Encyclopedia of philosophy*.
Detroit: Macmillan, S. 688–694
- Puck 1996** Puck, A., 1996.
Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis.
München: Hanser.
ISBN 9783446181946
- Purslow 1988** Purslow, D., 1988. Fractography of fibre-reinforced thermoplastics, Part 3. Tensile, compressive and flexural failures.
Composites **19** (5), S. 358–366
DOI: 10.1016/0010-4361(88)90123-1
- Quintelier et al. 2005** Quintelier, J; Samyn, P; Baets, P. de; Ost, W; van Paepegem, W., 2005. Wear of steel against carbon fibre reinforced PPS.
Tribology in industry **27** (3-4), S. 29–35
- Rackwitz 1967** Rackwitz, G., 1967. Die Sichtung im senkrechten Strömungsrohr.
Holz als Roh- und Werkstoff : European journal of wood and wood products **25** (5), S. 188–193

- Ramulu 1997** Ramulu, M., 1997. Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites.
Sadhana **22** (2), S. 449–472
- Reimann 1991** Reimann, W., 1991.
Hochgeschwindigkeitsfräsen von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen.
München: Hanser.
Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung.
Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss., 1990
ISBN 9783446165571
- Roos et al. 2011** Roos, E.; Maile, K., 2011.
Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung.
Heidelberg: Springer.
ISBN 3642174647
- Rötscher 1954** Rötscher, H., 1954. Industrielle Absauganlagen.
Gesundheits-Ingenieur **75** (19/20), S. 311–318
- Rummenhüller 1996** Rummenhüller, S., 1996.
Werkstofforientierte Prozessauslegung für das Fräsen kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffe.
Aachen: Shaker.
Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 96,8.
Aachen, Techn. Univ., Diss, 1996
ISBN 9783826514296
- Sadek et al. 2012** Sadek, A; Meshreki, M; Attia, M. H., 2012. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates.
CIRP Annals **61** (1), S. 123–126
DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.089

-
- Sauer et al. 2021** Sauer, M; Schüppel. D., 2021.
Marktbericht 2021 - der globale Markt für Carbonfasern und Carbon Composites: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen.
Augsburg: Composites United e.V.
- Scheuch 1990** Alois Scheuch GmbH.
Absaugsystem für den Bereich der Holzbearbeitung.
DE4004717C2
- Schledjewski et al. 2014** Schledjewski, R; Blinzler, M; Hildebrandt, K., 2014.
Bearbeitung, Oberflächenbehandlung.
In: Neitzel, Manfred; Mitschang, Peter; Breuer, Ulf (Hrsg.):
Handbuch Verbundwerkstoffe.
München: Hanser, S. 433–453
ISBN 9783446436961
- Schneider et al. 2012** Schneider, M; Birenbaum, C; Forbes, A; Mayer, T;
Burkhardt, J., 2012.
*Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen:
Einführung und Überblick.*
Stuttgart.
Verfügbar unter:
https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Spanende_Bearbeitung_von_Leichtbauwerkstoffen.pdf
Zugriff am: 25.10.2022
- Schneider et al. 2018** Schneider, M; Gebhardt, A., 2018. Späne- und
Staubfassung bei der CFK-Zerspanung: Untersuchung zur
CFK-Trockenzerspanung in der industriellen Anwendung.
wt Werkstattstechnik online **108** (6), S. 473–478

- Schön 2004** Schön, J., 2004. Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite.
Wear **257** (3), S. 395–407
- Schulte 1992** Schulte, K., 1992.
Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Verbundwerkstoffe.
In: *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*.
Düsseldorf: VDI
- Schürmann 2007** Schürmann, H., 2007.
Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden.
Berlin: Springer.
ISBN 9783540402831
- Schurz 2014** Schurz, G., 2014.
Philosophy of Science: A Unified Approach.
London: Taylor & Francis Group.
DOI: 10.4324/9780203366271
- Schütte 2014** Schütte, C., 2014.
Bohren und Hobeln von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Schneide-Faser-Lage.
Wissen schafft Innovation ; Bd. 20
Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2013
- Schwarze 2013** Schwarze, R., 2013.
CFD-Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen.
Berlin: Springer.
DOI: 10.1007/978-3-642-24378-3

-
- Sheikh-Ahmad 2009** Sheikh-Ahmad, J. Y., 2009.
Machining of polymer composites.
New York: Springer.
ISBN 978-0-387-68619-6
- Siebenpfeiffer 2014** Siebenpfeiffer, W., 2014.
*Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe -
Fertigung - Konzepte.*
Wiesbaden: Springer Vieweg.
DOI: 10.1007/978-3-658-04025-3
- Singer et al. 2002** Singer, R; Willimczik, K. (Hrsg.), 2002.
*Sozialwissenschaftliche Forschungsmethoden in der
Sportwissenschaft: Eine Einführung.*
Hamburg: Czwalina.
ISBN 3880204144
- Stahmer 2015** Stahmer, K. W., 2015. GESTIS-STaub-Ex: 6000 Datensätze
zu Explosionskenngrößen von Stäuben.
Technische Sicherheit **5** (11/12), S. 27–33
- Tech et al. 2003** Tech, T; Bodden, P; Albert, J., 2003.
*Rationelle Energienutzung im holzbe- und verarbeitenden
Gewerbe: Leitfaden für die betriebliche Praxis.*
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
ISBN 3322904725
- Thompson et al. 1991** Thompson, T. L; Clark, N. N., 1991. A holistic approach to
particle drag prediction.
Powder Technology **67** (1), S. 57–66
DOI: 10.1016/0032-5910(91)80026-F

- Tölle et al. 2022** Tölle, L; Hopp, M; Bünger, J; Westphal, G; Rosenkranz, N; Monsé, C., 2022. Faserstäube beim FVK-Recycling: Mechanisches Recycling von faserverstärkten Kunststoffen. *Kunststoffe* **112** (5), S. 52–55
- Töpfer 2010** Töpfer, A., 2010.
Erfolgreich Forschen: Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden.
Berlin: Springer
ISBN 9783642139024
- Tran-Cong et al. 2004** Tran-Cong, S; Gay, M; Michaelides, E. E., 2004. Drag coefficients of irregularly shaped particles. *Powder Technology* **139**, S. 21–32
- TRGS 521.** TRGS521:2008-02
Technische Regeln für Gefahrstoffe 521: Arbeitsplatzgrenzwerte
- Ulrich 2001** Ulrich, H., 2001.
Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich.
Bern: Haupt.
ISBN 3258063591
- Ulrich et al. 1976** Ulrich, P; Hill, W., 1976. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). *Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* (8), S. 304–309
- van Gertten 1981** van Gertten, E., 1981.
Handlingsplaner för bättre Arbetsmiljö och lägre Energiförbrukning (Aktionspläne für eine bessere Arbeitsumgebung und einen geringeren Energieverbrauch).
Jönköping: Träcentrum Utvecklings Aktiebolag

-
- Vazquez Martinez et al. 2016** Vazquez Martinez, H; Esch, P; Patel, K., 2016.
Finite Element Simulation of Delamination Processes when
Side Milling the Edges of Cross-Ply CFRP.
In: *14. Deutsches LS-DYNA Forum*
Bamberg, 10.-12.10.2016, 22 Folien
- VDI 2262** VDI 2262-4:2006-03.
*Luftbeschaffenheit am Arbeitsplatz - Minderung der
Exposition durch luftfremde Stoffe.*
- VDI 3462** VDI 3462:2014-12.
*Emissionsminderung - Holzbearbeitung und -verarbeitung,
Rohholzbearbeitung und -verarbeitung.*
- VDI 6005** VDI/DVS 6005:2018-02.
Gefahrstoffe und Lüftungstechnik beim Schweißen.
- Voß et al. 2014** Voß, R.; Henerichs, M.; Kuster, F.; Wegener, K., 2014. Chip
Root Analysis after Machining Carbon Fiber Reinforced
Plastics (CFRP) at Different Fiber Orientations.
*6th CIRP International Conference on High Performance
Cutting* **14**, S. 217–222
DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.013
- Wang et al. 1995** Wang, D. H; Ramulu, M; Arola, D., 1995. Orthogonal
cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II:
Multi-directional laminate.
International Journal of Machine Tools and Manufacture **35**
(12), S. 1639–1648
DOI: 10.1016/0890-6955(95)00015-P

- Wang et al. 2003** Wang, X. M; Zhang, L. C., 2003. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics.
International Journal Of Machine Tools & Manufacture **43** (10), S. 1015–1022
- Westermann 2016** Westermann, J., 2016. Improving quality control through effective particle characterisation of metal powders.
Powder Metallurgy Review **5** (3), S. 95–99
- Westkämper et al. 1991** Westkämper, E; Bertling, L; Freytag, J; Fuß, M; Prekwinkel, F., 1991.
Konstruktive Massnahmen zur Reduzierung der Staubemission an spanenden Holzbearbeitungsmaschinen.
Essen: Vulkan.
ISBN 3-8027-8605-1
- Westkämper et al. 1995** Westkämper, E.; Riegel, A., 1995. Auslegung von Staub- und Späneerfassungseinrichtungen, S. 394–395.
Holz-Zentralblatt (24), 24.02.1995
- Westkämper et al. 2004** Westkämper, E; Warnecke, H.-J., 2004.
Einführung in die Fertigungstechnik.
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
DOI: 10.1007/978-3-322-92890-0
- WHO 2014** World Health Organization (WHO), 2014.
Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012
Verfügbar unter:
http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/AAP_BoD_results_March2014.pdf
Zugriff am: 15.09.2022

-
- Wiedemann 2022** Wiedemann, M., 2022.
Systemleichtbau für die Luftfahrt.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-38479-1
- Wieland 2004** Wieland, P., 2004.
*Ein Beitrag zur Gestaltung der Spanentsorgung bei der
Trockenbearbeitung.*
Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten
Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005
- Willrett 2012** Willrett, H., 2012.
*Magnesiumzerspanung: Sicher und wirtschaftlich durch
interne Späneabsaugung: Selbst in tiefen Kavitäten gibt es
für Späne kein Entkommen*
Verfügbar unter:
<https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/selbst-in-tiefen-kavitaeten-gibt-es-fuer-spaene-kein-entkommen/>
Zugriff am: 30.12.2020
- Wirtschaftsministerium BW et al. 1999** Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg;
Fraunhofer ISI, 1999.
*Stromeinsparungspotentiale in der Holzverarbeitenden
Industrie.*
Verfügbar unter:
https://www.energieverbraucher.de/files_db/dl_mg_1079558904.pdf
Zugriff am: 25.10.2022
- Wulfhorst 1989** Wulfhorst, B., 1989. Faserstoff-Tabellen: Carbonfaser.
Chemiefasern/Textilindustrie **91** (39), S. 1277–1288

- Würtz 2000** Würtz, C., 2000.
Beitrag zur Analyse der Staubemissionen bei der Fräsbearbeitung von Bauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen.
Berichte aus der Produktionstechnik; 2000, 13.
Aachen, Techn. Univ., Diss, 2000
ISBN 3-8265-7304-8
- Xu et al. 2016** Xu, W; Zhang, L., 2016. Mechanics of fibre deformation and fracture in vibration-assisted cutting of unidirectional fibre-reinforced polymer composites.
International Journal Of Machine Tools & Manufacture **103**, S. 40–52
- Zeilinger 1985** Zeilinger, H., 1985.
Verbund- und Hybridwerkstoffe: Definition, Zusammensetzung, Anwendung.
In: *VDI Berichte: Definition, Zusammensetzung, Anwendung*, S. 1–11
- Zemann 2014** Zemann, R., 2014.
Initiative Fibrecut - Spanbildung bei der Bearbeitung von CFK.
In: Bleicher, F. (Hrsg.): *2. Workshop Fibrecut*.
Wien, 16.10.2014, 25 Folien
- Zenker 1972** Zenker, P., 1972. Untersuchungen über die Staubverteilung turbulent strömender Staub- Luft-Gemische in Rohrleitungen.
Staub - Reinhaltung der Luft **32** (1), S. 1–9

Zierep 1991

Zierep, J., 1991.

Strömungsmechanik.

Berlin: Springer.

DOI: 10.1007/978-3-642-88296-8

Zimmermann et al. 2016

Zimmermann, M; Heberger, L; Schneider, F; Effgen, C;

Aurich, J. C., 2016. Investigation of Chip Formation and Workpiece Load When Machining Carbon-fiber-reinforced-polymer (CFRP).

*16th Machining Innovations Conference for Aerospace**Industry - MIC 2016* **6**, S. 124–131

Anhang

A1: Installation einer Raumabsauganlage mit Prozessluftführung bei der Firma *POLYTEC Germany* in Gochsheim



Bauteil auf Spannvorrichtung (1); Fräsroboter (2); Absaughaube (3); höhenverstellbare Blasdüsen (4)



Entstauber mit Prozessluftrückführung

A2: Integration von Blasdüsen und Absaughauben in eine Portalfräsmaschine vom Typ DMU 340G für die Verbundwerkstoff- und Leichtmetallzerspanung



Verstellbare Blasdüseneinheiten in ausgefahrenem Zustand (links); Blasdüseneinheit in Seitenwand eingefahren (rechts)



Absaughauben in Maschinenrückwand integriert (links); Absaughauben für Zerspanung mit Kühlschmierstoff verschlossen (rechts)

