

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Parameterstudien und Prozessmodelle für das
Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien**

Manuel Marcel Voit

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann

Die Dissertation wurde am 19.12.2019 an der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.06.2020 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die stets wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, dem Leiter des Instituts für Spanende Fertigung der Technischen Universität Dortmund, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats sehr herzlich bedanken.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des *iwb* und des Fraunhofer-Instituts für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) für die wertschätzende Zusammenarbeit sowie die prägende und lehrreiche Zeit. Mein ausdrücklicher Dank gilt Dr.-Ing. Johannes Glasschröder und den vielen Freunden aus dem Studentenwohnheim im Priesterseminar Augsburg für die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Studierenden, insbesondere Michael Bertele und Thomas Metzger, bedanken, die mich bei der Ausarbeitung meiner Dissertation und im Institutsalltag unterstützt haben.

Ein großer Dank gilt dem Leiter der mechanischen Werkstatt des Fraunhofer IGCV, Herrn Kurt Hartmann, für den großen persönlichen Einsatz bei der Realisierung verschiedenster Vorhaben an der Wasserstrahlanlage sowie den vielen angenehmen Gesprächen. Des Weiteren möchte ich mich bei allen meinen Freunden, mit denen ich während meiner Zeit in Schwabmünchen und Augsburg so viel erleben durfte, sehr herzlich bedanken. Ohne diese schönen Erinnerungen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein größter und herzlichster Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern Tania und Stefan sowie meiner Freundin Julia. Eure großzügige Unterstützung, unbegrenzte Geduld und liebevollen Aufmunterungen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Euch ist diese Arbeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Verzeichnis der Formelzeichen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Stand von Technik und Wissenschaft	7
2.1 Vorgehen im Kapitel	7
2.2 Grundlagen der Faserverbundtechnologie	7
2.2.1 Grundkenntnisse der Kohlenstofffaser-Textilien	8
2.2.1.1 Herstellungsverfahren der Kohlenstofffaser-Halbzeuge	9
2.2.1.2 Physikalische Eigenschaften	14
2.2.1.3 Mechanische Eigenschaften	14
2.2.2 Fazit	15
2.3 Trenntechnologien	17
2.3.1 Laserstrahltrennen	18
2.3.1.1 Charakterisierung einer Laserstrahlanlage	19
2.3.1.2 Zerteilen von Kohlenstofffasern	20
2.3.2 Mechanischer Schnitt mit metallischer Klinge	21
2.3.2.1 Beschreibung der Technologieanwendung	22
2.3.2.2 Trennen von Kohlenstofffasern	24
2.3.3 Wasserstrahltrennen	24
2.3.3.1 Wasserstrahlschneidanlage und Verfahrensarten	26
2.3.3.2 Anwendungen	31
2.3.3.3 Eingrenzung auf Kohlenstofffasern	33
2.4 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf	37

3	Parameterstudien	39
3.1	Statistische Versuchsplanungsmethodik	39
3.1.1	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	40
3.1.1.1	Präzisierung des Systemverhaltens	40
3.1.1.2	Auswertemethoden der statistischen Versuchsplanung	42
3.1.2	Versuchsplanungsmethodik nach Taguchi	44
3.1.2.1	Identifikation des Systemverhaltens	45
3.1.2.2	Definition der Versuchsparameter	47
3.1.2.3	Untersuchung der unterschiedlichen Parameterstufen	51
3.1.3	Präzisieren der Versuchsmatrix und der Ausgangswerte	53
3.1.4	Fazit	55
3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung	56
3.2.1	Allgemeines zum Versuchsaufbau	57
3.2.2	Vorgehensweise zur Auswertung der Zielgrößen	61
3.2.3	Analyse der Parametereffekte	64
3.2.3.1	Parametereinfluss bei der Betrachtung der Schnittkantenqualität	65
3.2.3.2	Einfluss der Maschinenparameter auf die Wasserabsorption	67
3.2.3.3	Protokoll der Umwelteinflüsse	69
3.2.4	Quantifizierung der Parameterbedeutung	70
3.2.5	Nachweis der Unabhängigkeit der Parameter	72
3.2.6	Charakterisierung des Düsenpaket-Schwingungsprofils	73
3.2.6.1	Analyse der statischen Vibrationsuntersuchungen	77
3.2.6.2	Auswertungen der dynamischen Versuchsreihen	80
3.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	83
4	Prozessmodelle	87
4.1	Physikalisches Prozessmodell	89
4.1.1	Betrachtung der Wirkung des Wasserdrucks	89

4.1.1.1	Berechnung der Dichte des Wassers ρ_{Real} bei hohen Druckverhältnissen	89
4.1.1.2	Gleichungssystem für den Druckverlust im Rohraufbau Δp_R	90
4.1.1.3	Druckverlust in der Düse Δp_D	97
4.1.1.4	Kalkulation der Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse v_{Strahl}	98
4.1.2	Identifikation der Einflüsse des Düsenabstands	101
4.1.3	Ableiten des physikalischen Prozessmodells	105
4.2	Empirisches Prozessmodell	109
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	112
5	Bewertung und Anwendungsbeispiel	115
5.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	115
5.1.1	Definition der Anwendungsszenarien	115
5.1.1.1	Reinwasserstrahltrennen	116
5.1.1.2	CNC-Automat mit metallischer Rundmesser Klinge	117
5.1.1.3	Laserstrahltrennen mittels CO ₂ -Laser	118
5.1.2	Wirtschaftlichkeitsbewertung verschiedener Prozesse für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien	119
5.2	Bewertung des Technologiereifegrads	125
5.2.1	Grundlagen und Auswahl einer Methodik zur Technologiebewertung	125
5.2.2	Technologiereifegrad des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien	129
5.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse	134
6	Schlussbetrachtung	137
6.1	Zusammenfassung der Arbeit	137
6.2	Diskussion der Ergebnisse	139
6.3	Ausblick	140
	Literaturverzeichnis	143
	Studienarbeitsverzeichnis	157

Anhang	159
A.1 Angaben zur Versuchsplanung nach Taguchi	159
A.2 Mikroskopaufnahmen der Schnittkanten	160
A.3 Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität	169
A.4 Faktorwirkungen der Wasserabsorption	171
A.5 Ergebnisse der Wasserabsorption der Textilien	173
A.6 Angaben zum Nachweis der Unabhängigkeit	174
A.7 Dichte von Wasser bei hohen Druckverhältnissen	177
A.8 Grundlagen zur Berechnung des Wasserdruckes	178
A.9 Informationen zur Identifikation des Düsenabstandes	179
A.10 Fragebögen zur Bestimmung des Technologiereifegrades	181

Abkürzungsverzeichnis

1-D	eindimensional
2-D	zweidimensional
3-D	dreidimensional
A.	Anhang
ANOM	<i>analysis of means</i> (dt.: Mittelwertanalyse)
ANOVA	<i>analysis of variance</i> (dt.: Varianzanalyse)
AVK	Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.
BMF	Bundesministerium der Finanzen
CAD	<i>computer-aided design</i> (dt.: rechnerunterstütztes Konstruieren)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	<i>computerized numerical control</i> (dt.: rechnerunterstützte numerische Steuerung)
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
FHG	Gesamtfreiheitsgrad
HM	<i>high modulus</i> (dt.: hoher E-Modul)
HT	<i>high tenacity</i> (dt.: hohe Zugfestigkeit)
IM	<i>intermediate modulus</i> (dt.: mittlerer E-Modul)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
PAN	Polyacrylnitril
Prepreg	vorimprägniertes Faserhalbzeug
rel.	relativ

Abkürzungsverzeichnis

RTM	<i>resin transfer moulding</i> (dt.: Harzinjektionsverfahren)
TRL	<i>technology readiness level</i> (dt.: Technologiereifegrad)
UD	unidirektional
UHM	<i>ultra-high modulus</i> (dt.: sehr hoher E-Modul)
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
x-Pos.	Position der x-Achse
y-Pos.	Position der y-Achse

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
<i>Lateinische Symbole</i>		
A	mm^2	Querschnittsfläche
$A_{\text{Kohlenstofffaser}}$	mm^2	Querschnittsfläche einer Kohlenstofffaser
A_{Strahl}	mm^2	Querschnittsfläche des Wasserstrahls
A_{Rohr}	mm^2	Querschnittsfläche eines Rohrsegments
c	–	Kernzonenkoeffizient
d_D	mm	Durchmesser der Düse
d_R	mm	Durchmesser eines Rohrsegments
d_{Strahl}	mm	Durchmesser des Freistrahls
d_Z	mm	Durchmesser der Freistrahlsströmung
E	Pa	Kompressibilitätsmodul
$F_{\text{Wasserstrahl}}$	N	resultierende Kraft des Wasserstrahls
f	–	Freiheitsgrad eines Faktors
g	m/s^2	Gewichtskraft
I_{Gesamt}	$\text{N} \cdot \text{s}$	Impuls des Wasserstrahls
$I_{\text{Min.}}$	$\text{N} \cdot \text{s}$	Minimal notwendiger Impuls des Wasserstrahls zum Trennen der Kohlenstofffasern
k	mm	Wandrauigkeit
l	mm	Länge eines Rohrsegments
l_0	mm	Ausgangswert der Betrachtung
l_D	mm	Länge der Düse
l_{Da}	mm	Düsenabstand zum Material
l_{Gesamt}	mm	Länge des gesamten Rohrsystems

Verzeichnis der Formelzeichen

$l_{Spez,i}$	%	spezifische Reifegradgrenze
M_T	%	Technologiereifegrad
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
$m_{TRL,i}$	%	Technologiereifegradstufe
n	–	Anzahl der durchgeführten Versuche
p_0	bar	Umgebungsdruck
p_{max}	bar	maximaler Wasserdruck zum Trennen von Fasern
p_{min}	bar	minimaler Wasserdruck zum Trennen von Fasern
p_p	bar	Pumpendruck
p_X	%	prozentuale Bedeutung eines Faktors
Δp_D	bar	Druckverlust in der Düse
Δp_R	bar	Druckverlust im Rohrsystem
q_i	–	Gewichtung der Reifegradstufe
Re	–	Reynolds-Zahl
S_T	mm	Düsenabstand anhand des Stands der Technik
SL_η	dB	Summe der Werte aller Messreihen
SQ_G	dB ²	Summe aller Faktoren mit der geringsten quadrierten Abweichung
SQ_{Gesamt}	dB ²	totale Fehlerquadratsumme
SQ_m	dB ²	Mittelwertquadrate aller Zielwerte
SQ_X	dB ²	quadrierte Abweichung aller Faktoren
T_{Wasser}	°C	Temperatur des Wassers
$U_{Geometrie}$	m	Umfang der Versuchsgeometrie
V	dB ²	Varianz der einzelnen Faktoren
v	m/s	Geschwindigkeit eines Mediums
V_{F2}	dB ²	Streuungsfehler
$v_{Freistrah}$	m/s	Geschwindigkeit des Freistrahls

Verzeichnis der Formelzeichen

v_{max}	m/s	maximale Geschwindigkeit zum Trennen von Fasern
v_{Strahl}	m/s	verlustbehaftete Strahlgeschwindigkeit
v_{Theo}	m/s	theoretische Strahlgeschwindigkeit
$v_{Vorschub}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets
We	–	Weber-Zahl
x	m	Trennlänge einer Geometrie
y_i	–	Messwert der Zielfunktion
y_m	μm	mittlere Schwingungsamplitude
y_v	μm	mittlerer Amplitudenversatz
z	mm	Abstand vom Düseneintritt zum Material
z_A	mm	Länge der Kernströmung
z_F	mm	Länge des Freistrahls

Griechische Symbole

ε	–	Verlustwert aufgrund der Querschnittsverengung
η	dB	Signal-Rausch-Verhältnis
η_i	dB	Summe der einzelnen Messpunkte einer Messreihe
η_j	dB	Wert eines Messpunkts
η_{Wasser}	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	dynamische Viskosität von Wasser unter Laborbedingungen
λ	–	Rohrreibungszahl
μ_D	–	Kontraktionsziffer der Düse
ρ_{Frei}	kg/m^3	Dichte des Wasser-Luftgemischs einer Freistrahlsströmung
ρ_{Real}	kg/m^3	Dichte von Wasser bei hohen Drücken
ρ_{Wasser}	kg/m^3	Dichte von Wasser unter Laborbedingungen
σ_{Wasser}	N/m^2	Oberflächenspannung des Wassers

Verzeichnis der Formelzeichen

$\tau_{Vor.}$	N/m ²	Vorherrschende Scherspannung an einer Kohlenstofffaser
$\tau_{Zul., quer}$	N/m ²	Zulässige Scherspannung einer Kohlenstofffaser quer zur Faserrichtung

Indizes

$1, 2, 3, \dots$	–	<i>Laufindizes</i>
n	–	<i>Laufindex</i>
i, j	–	<i>Laufindizes</i>
X	–	<i>Faktorstufe</i>

1 Einleitung

1.1 Motivation

Angesichts der stetig wachsenden weltweiten Wirtschaftsbeziehungen ergeben sich für die globale Produktion wie auch für die deutsche Forschungslandschaft vielfältige Herausforderungen (ABELE & REINHART 2011). Ein Aspekt dieser Gegebenheit ist der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen zur Reduktion der Bauteilmasse (DRECHSLER 2010). Essenzielle Bereiche für den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen sind die Luft- und Raumfahrt sowie die Automobilindustrie (FRIEDRICH 2017). Die Reduktion der Bauteilmasse, welche durch den Einsatz faserverstärkter Kunststoffe erreicht werden kann, bewirkt eine Minderung des Energieverbrauchs von Fortbewegungsmitteln im Betriebszustand. Als Beispiel hierfür ist die Kerosineinsparung eines konventionellen Flugzeugs nach HERRMANN (2011) mit 300 Tonnen pro 100 Kilogramm eingesparter Masse über die gesamte Betriebszeit angegeben. Weiter noch erfolgt bei einer Massenreduktion von 100 Kilogramm eines Personenkraftwagens eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 0,5 Liter pro 100 Kilometer (GRAF 2018, KBA 2017). Mit dem Einsatz von faserverstärkten Kunststoffbauteilen lassen sich Gewichtseinsparungen von bis zu 80 % gegenüber Stahl und bis zu 50 % im Vergleich zu Aluminium bei erhöhter Festigkeit und Steifigkeit realisieren (NEITZEL ET AL. 2014). Diese Beispiele zeigen auf, dass der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen zur Massenreduktion ein hohes Potenzial zur Energieeinsparung bietet.

Mittels einer Lebenszyklusanalyse der faserverstärkten Kunststoffe ist nach HOHMANN ET AL. (2018) ersichtlich, dass sich das Einsparpotenzial von der Nutzungsphase der Leichtbaukomponenten in die Herstellungsphase der Bauteile verschiebt. Dies bedeutet, dass optimierte bzw. neuartige Herstellungsverfahren der faserverstärkten Kunststoffbauteile eine erhöhte Produktionsmenge und somit Kosteneinsparungen ermöglichen. Die technologische Weiterentwicklung der industriellen Produktion von faserverstärkten Kunststoffen trägt weiter noch dazu bei, neue Handlungsfelder in unterschiedlichen Branchen zu erfassen und zu realisieren (LEOHOLD 2011). Dabei ist die wirtschaftliche und ressourceneffiziente Herstellung von Leichtbaustrukturen, insbesondere von faserverstärkten Kunststoffen, eine weitreichende Herausforderung (FRIEDRICH 2017).

Bei der Herstellung faserverstärkter Kunststoffe werden unter anderem Kohlenstofffasern verwendet (CHERIF 2011). Diese werden aufgrund ihrer mechanischen Vorteile gegenüber anderen technischen Textilien, wie beispielsweise der Glasfaser,

1 Einleitung

vermehrt eingesetzt (SCHÜRMAN 2007). Nach WITTEN ET AL. (2018) ist der weltweite Bedarf an Kohlenstofffasern stetig wachsend. Diese Entwicklung zeigt Abbildung 1.1.

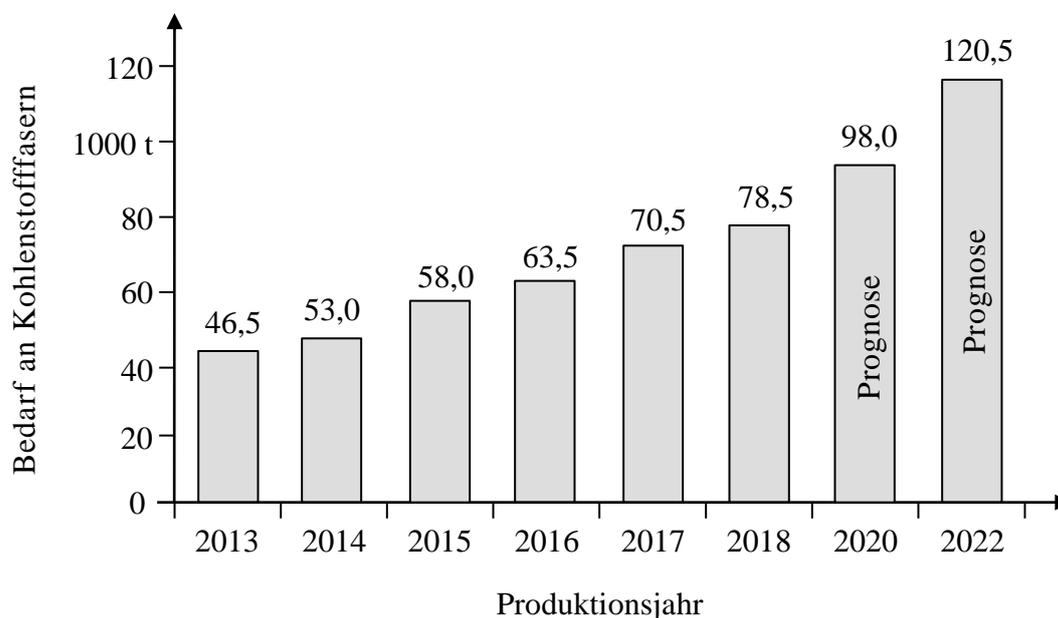


Abbildung 1.1: Entwicklung des globalen Bedarfs an Kohlenstofffasern in Anlehnung an WITTEN ET AL. (2018)

Ein Großteil des globalen Bedarfs an Kohlenstofffasern besteht auf dem nordamerikanischen sowie europäischen Markt (WITTEN ET AL. 2018). Die bedeutendsten Marktsegmente der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) sind die Luft- und Raumfahrt und die Automobilindustrie. Die Herstellungskosten von CFK-Bauteilen dieser Industriezweige betragen durchschnittlich 307 US\$/kg in der Luft- und Raumfahrt sowie 87 US\$/kg in der Automobilindustrie (WITTEN ET AL. 2017). Der Mehrpreis der Bauteile in der Luft- und Raumfahrt ist auf den hohen Qualitätsanspruch hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sowie die umfangreichen Testverfahren an den Komponenten zurückzuführen.

Die hohen Herstellungskosten hemmen trotz der hervorragenden strukturellen und mechanischen Eigenschaften eine weitere Marktdurchdringung der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (LÄSSIG ET AL. 2012). Im Vergleich zu den konventionell eingesetzten Materialien wie Stahl und Aluminium sind die Herstellungskosten eines CFK-Bauteils um den Faktor 2,5 bis 4 höher. Dabei weisen die CFK-Bauteile entlang der Wertschöpfungskette einen Anteil von 64 % der Fertigungskosten auf (GRAF 2018). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

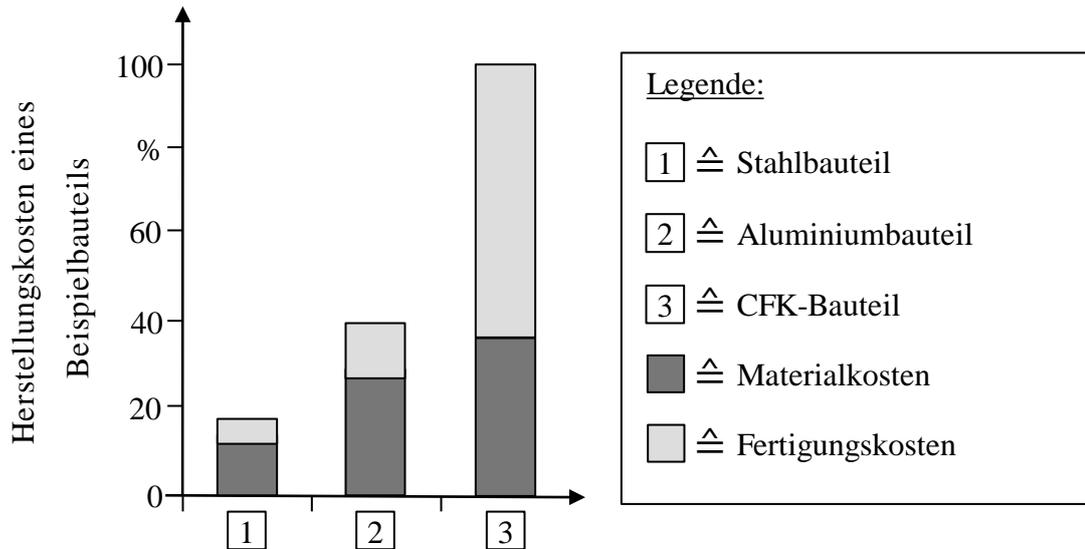


Abbildung 1.2: Kostenstruktur eines Beispielbauteils aus CFK im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen in Anlehnung an GRAF (2018) und LÄSSIG ET AL. (2012)

Aufgrund der dargelegten Gegebenheiten ist die Reduktion der Fertigungskosten von CFK-Komponenten eine wichtige Zielsetzung. Zur Herstellung eines CFK-Bauteils können unterschiedliche Verfahrensarten, wie beispielsweise das Harzinjektionsverfahren (*resin transfer moulding* – RTM), angewandt werden. Die Fertigungsschritte des RTM-Verfahrens sind dabei wie folgt aufgeteilt: Zuschnitt der 2-D-Textillagen, Einlegen und Stapeln der Fasergelege in ein Werkzeug, Injektion eines duroplastischen Harzsystems, Aushärten des Bauteils unter Zufuhr von Wärme und Druck sowie die abschließende Nachbearbeitung der Bauteilkontur (AVK 2013, DRECHSLER 2010). Eine Herangehensweise zur Reduktion der Fertigungskosten ist die Verminderung der Aufwände im Bereich des Zuschnitts der Kohlenstofffaser-Halbzeuge. Dabei müssen die Textilien bei gleichbleibender Qualität jedoch reduzierter Prozesszeit im Vergleich zum Stand der Technik getrennt werden, was eine erhöhte Ausbringung der Textilschnitte und eine Reduktion der Gesamtkosten zur Folge haben soll. Nach CHERIF (2011) ist ein Automat mit metallischer Rundmesserklänge das industriell weitverbreitetste Verfahren für das Zerteilen von Kohlenstofffaser-Halbzeugen. Des Weiteren wird in verschiedenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen das Laserstrahltrennen als alternatives Verfahren für den Konturbeschnitt von Kohlenstofffasern untersucht.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

In dieser Dissertation wird ein Beitrag zum Konturbeschnitt von Kohlenstofffaser-Textilien erarbeitet. Dabei wird die Wasserstrahltechnologie als Alternative zu den Trenntechnologien des Stands der Technik und der Wissenschaft untersucht. Die Zielsetzung dieser Abhandlung ist die Identifikation optimaler Maschinenparameter der Wasserstrahltechnologie für das Trennen einer Auswahl an Kohlenstofffaser-Halbzeugen. Des Weiteren sollen der Einfluss der Fertigungsparameter auf das Schneidgut anhand physikalischer Zusammenhänge aufgezeigt und die Wasserstrahltechnologie im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren bewertet werden. Die Vorgehensweise dieser Ausarbeitung orientiert sich an der dargelegten Zielsetzung. Hierbei soll anhand von Experimenten ein Erkenntnisgewinn erzielt werden. Dies bedeutet, dass die allgemeinen Maschinenparameter der Wasserstrahltechnologie durch Deduktion auf den speziellen Anwendungsfall für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien empirisch überprüft werden. Die Einflüsse der Maschinenparameter beim Zerteilen von Materialien, wie beispielweise Stahl oder Aluminium, jedoch nicht von Kohlenstofffaser-Textilien, wurden bereits durch mehrere Autoren untersucht. Die Erkenntnisse der Empirie werden anschließend mittels Induktion zu einem physikalischen und einem empirischen Prozessmodell für das Wasserstrahl-trennen von Kohlenstofffaser-Textilien überführt. Abbildung 1.3 stellt diese Zusammenhänge dar.

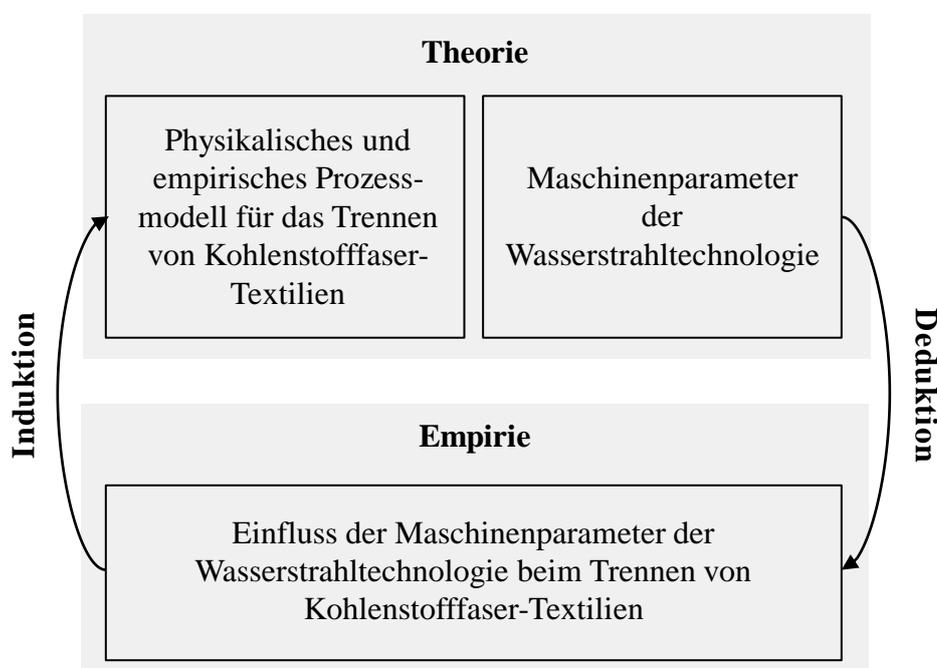


Abbildung 1.3: Darstellung der wissenschaftlichen Vorgehensweise der Arbeit

Bei den Prozessmodellen ist es die Zielsetzung, die experimentellen Beweise anhand von mathematischen Gleichungssystemen zu validieren. Der Aufbau des Inhaltsverzeichnisses dieser Arbeit orientiert sich an der Vorgehensweise wie in Abbildung 1.3 dargestellt. Die folgenden Ausführungen leiten mit der Beschreibung des für diese Arbeit relevanten Stands der Technik und der Wissenschaft in Kapitel 2 ein. Dabei werden die Grundlagen der Faserverbundtechnologie sowie die Trennverfahren für technische Textilien erläutert. Des Weiteren wird die Wasserstrahltechnologie als zentraler Betrachtungsaspekt dieser Arbeit gewählt und charakterisiert. Der Erkenntnisgewinn anhand der Empirie ist ein wesentliches Element dieser Arbeit. Aus diesem Grund werden in Kapitel 3 die grundlegenden Methoden der statistischen Versuchsplanung erläutert und das Systemverhalten der Anwendung definiert. Dabei ist es die Prämisse, geeignete Systemgrößen auszuwählen, sodass eine reproduzierbare Aussage über die Einflüsse der Maschinenparameter auf das Schneidergebnis getroffen werden kann. Weiter noch wird in Kapitel 3 die Versuchsdurchführung mithilfe des erarbeiteten Versuchsplans beschrieben. Hierfür wird der allgemeine Versuchsaufbau erläutert und die Erkenntnisse der mathematischen Analysen der Versuche werden wiedergegeben. Das Ergebnis dieses Kapitels sind die experimentell ermittelten Maschinenparameter der Wasserstrahltechnologie für ein optimales Trennergebnis der Kohlenstofffaser-Textilien. Um eine übertragbare Aussage der Einflussgrößen zu erzielen, werden in Kapitel 4 das physikalische und das empirische Prozessmodell der Einflussgrößen hergeleitet. Dabei werden die Maschinenparameter der Wasserstrahltechnologie mithilfe physikalischer Sachverhalte validiert. Des Weiteren werden die aus der Empirie gewonnenen Erkenntnisse in eine allgemeingültige Darstellung überführt. Diese induktive Vorgehensweise soll anhand der ausgearbeiteten Versuchsergebnisse zu einem Erkenntnisgewinn beitragen, um die motivierte Kostenstruktur der CFK-Bauteile aufgrund eines alternativen Trennverfahrens zu senken. Kapitel 5 bewertet die Wasserstrahltechnologie für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien im Vergleich zu den Verfahren des Stands der Technik und der Wissenschaft. In diesem Rahmen ist eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchzuführen. Ferner soll der Reifegrad der Wasserstrahltechnik für die Anwendung des Trennens von Kohlenstofffaser-Textilien bestimmt werden. In diesem Kapitel soll ermittelt werden, ob diese alternative Trenntechnologie für Kohlenstofffasern eine industrielle Relevanz aufweist. Die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Abhandlung werden abschließend in Kapitel 6 unter der Nennung weitergehender Handlungsfelder zusammengefasst.

Die dargelegten Zusammenhänge der Zielsetzung und Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit sind in Abbildung 1.4 beschrieben.

1 Einleitung

Zielsetzung:

Identifikation optimaler Maschinenparameter für das Trennen ausgewählter Kohlenstofffaser-Textilien mittels der Wasserstrahltechnologie sowie Ermittlung eines übertragbaren Zusammenhangs anhand eines physikalischen und eines empirischen Prozessmodells sowie Bewertung der Anwendung.

Vorgehensweise:

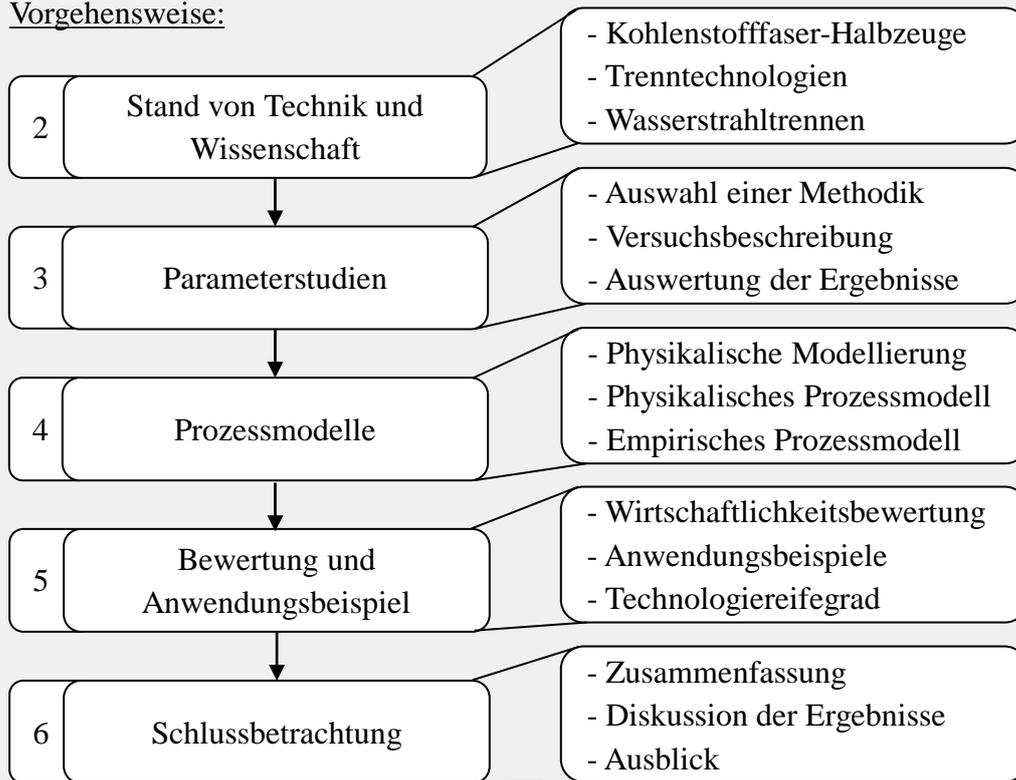


Abbildung 1.4: Zusammenfassung der Zielsetzung und Vorgehensweise

2 Stand von Technik und Wissenschaft

2.1 Vorgehen im Kapitel

Um das Trennen von Kohlenstofffaser-Halbzeugen zu ermöglichen, ist eine fundierte Kenntnis des Ausgangsstoffs und der Trenntechnologien erforderlich. Die Gliederung in diesem Kapitel orientiert sich am Prozessablauf des Beschneidens von Kohlenstofffaser-Textilien (siehe Abschnitt 2.2). Beginnend mit den Kohlenstofffaser-Halbzeugen (siehe Abschnitt 2.2.1), werden sodann die anwendbaren Trenntechnologien für diese Materialien besprochen (siehe Abschnitt 2.3). Die Wasserstrahltechnologie (siehe Abschnitt 2.3.3) für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien (siehe Abschnitt 2.3.3.3) wird anschließend betrachtet. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Schlussfolgerung (siehe Abschnitt 2.4).

2.2 Grundlagen der Faserverbundtechnologie

Das Fasermaterial ist ein wesentlicher Bestandteil der faserverstärkten Kunststoffe, wobei es durch Zugabe eines Harzsystems und durch einen formgebenden Prozess das faserverstärkte Kunststoffbauteil bildet. Die Herstellung eines faserverstärkten Kunststoffbauteils ist durch den Infiltrationsprozess des Harzsystems und das Aushärteverfahren in einem Werkzeug beschrieben. Dabei können unterschiedliche Fertigungsverfahren gewählt werden, die sich in Ablauf und Aufbau unterscheiden (DRECHSLER 2010, NEITZEL ET AL. 2014). Die einzelnen Herstellungsverfahren der faserverstärkten Kunststoffe sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Bei der weiteren Betrachtung des Gesamtprozesses werden die Fertigungsprozesse der faserverstärkten Kunststoffe sowie die Endbearbeitung der Bauteilkonturen als bekannt vorausgesetzt. Diese sind in einschlägigen Literaturquellen zu finden (etwa AVK 2013, DRECHSLER 2010, EHRENSTEIN 2006).

Die Prozesskette der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffkomponenten teilt sich nach NEITZEL ET AL. (2014) allgemein in vier Prozesse auf. Das Verfahren beginnt mit der Erzeugung der Kohlenstofffaser-Halbzeuge (siehe Abschnitt 2.2.1), die im Anschluss durch ein geeignetes Trennverfahren (siehe Abschnitt 2.3 und 2.4) in die gewünschte 2-D-Kontur separiert werden. Anschließend werden die Zuschnitte durch das jeweilige Fertigungsverfahren mittels eines Harzsystems und der jeweiligen Faserhalbzeuge zu einem faserverstärkten Kunststoffbauteil verarbeitet. Die faserverstärkten Kunststoffbauteile müssen nach EHRENSTEIN (2006) und REYNE

(2008) abschließend bearbeitet werden, sodass die erwünschte Bauteilkontur resultiert. Abbildung 2.1 zeigt schematisch den Gesamtprozess der Herstellungsreihenfolge eines faserverstärkten Kunststoffbauteils.

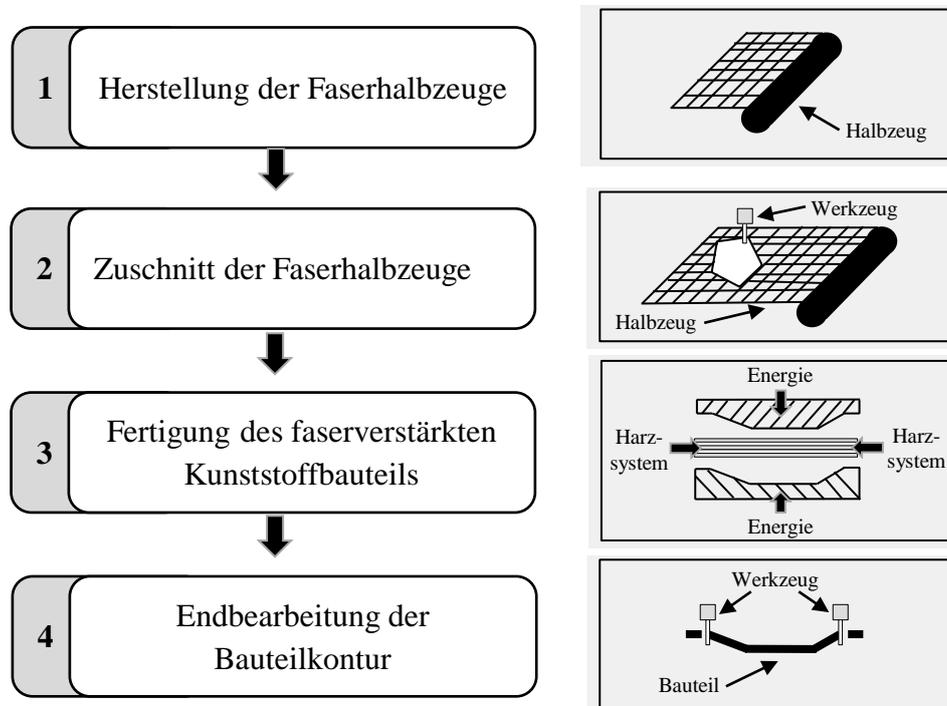


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses eines faserverstärkten Kunststoffbauteils in Anlehnung an NEITZEL ET AL. (2014)

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Separationsprozess der Kohlenstofffaser-Halbzeuge, der in Abbildung 2.1 als Zuschnitt bezeichnet ist. Für das weitere Verständnis des Trennvorgangs müssen die Eigenschaften der Kohlenstofffaser-Textilien charakterisiert werden, weshalb die Herstellung sowie die Eigenschaften der Kohlenstofffaser näher beschrieben werden.

2.2.1 Grundkenntnisse der Kohlenstofffaser-Textilien

Die Kohlenstofffasern haben innerhalb der faserverstärkten Kunststoffe bei mechanischer Beanspruchung die Aufgabe, die Kräfte entlang der Fasern zu leiten. Diese besitzen im Vergleich zu dem ausgehärteten Harzsystem eine höhere Steifigkeit (AVK 2013). Aus diesem Grund werden CFK-Bauteile aus unterschiedlich orientierten Textillagen aufgebaut, sodass verschiedene Belastungsfälle von den Fasern weitergeleitet werden können. Durch die starke atomare Bindungsenergie des Kohlenstoffs sind die theoretischen Festigkeitswerte der Kohlenstofffasern hoch (SCHÜRMAN 2007). Nach EHRENSTEIN (2006) besitzen die Kohlenstofffasern eine starke

Anisotropie, die aus dem Herstellungsprozesses resultiert. Dabei werden die Molekülketten der Kohlenstoffatome gezielt in Faserlängsrichtung orientiert. Nachfolgend werden die Herstellung und die physikalischen sowie die mechanischen Eigenschaften der Kohlenstofffasern näher beschrieben.

2.2.1.1 Herstellungsverfahren der Kohlenstofffaser-Halbzeuge

Nach DOMININGHAUS ET AL. (2012), KLEIN (2013) und SCHÜRMAN (2007) ist die Kohlenstofffaser der Gruppe der technischen Textilien zuzuordnen und besteht aus einem Polyacrylnitril (PAN)-Ausgangsmaterial. Zur Faserherstellung wird der Werkstoff PAN chemisch umgewandelt, was in Abbildung 2.2 verdeutlicht wird.

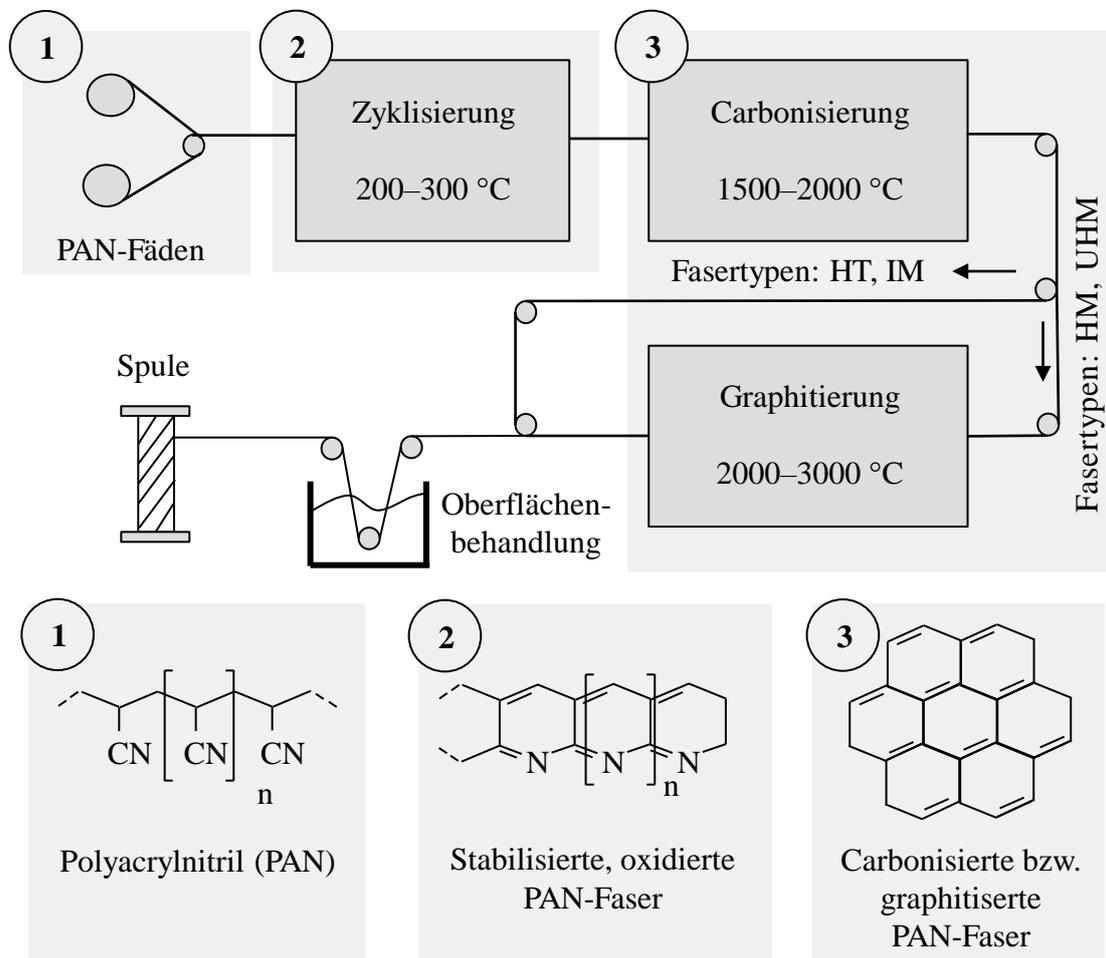


Abbildung 2.2: Darstellung der Herstellung von Kohlenstofffasern in Anlehnung an ADAMOW (2014) und EHRENSTEIN (2006)

Das PAN-Ausgangsmaterial, auch Precursor genannt, besteht aus 90–93 % Acrylnitril, 6–9 % Methacrylat und 1 % Itaconsäure (AVK 2013). Für die Herstellung der

Kohlenstofffasern ist nach STOCK (2017) das Faserspinnen vorteilhaft, da hierbei unerwünschte Querrillen auf der Fasermantelfläche ausbleiben. Der Herstellungsprozess ist ein energetisch aufwändiges Verfahren. Dabei wird schrittweise der Ausgangswerkstoff PAN chemisch umgewandelt. Als Erstes erfolgt die Zyklisierung des Ausgangswerkstoffs bei Temperaturen zwischen 200 °C und 300 °C, wobei das Fasermaterial thermisch stabilisiert wird. Anschließend beginnt die Dehydrierung des Materials, bei der den Molekülen Wasserstoff entzogen wird. Im weiteren Verlauf erfolgt die Carbonisierung bei 1500 °C bis 2000 °C. Dabei werden Fremdatome abgespalten, die meist als Stickstoff vorhanden sind. Nach diesem Schritt haben sich die Schichtebenen vorwiegend parallel zur Faserachse ausgerichtet und es resultieren, je nach Prozesseinstellung, Fasern mit hoher Festigkeit (*high tensile* – HT) sowie Fasern mit mittlerem Elastizitätsmodul (*intermediate modulus* – IM). Für eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erfolgt die Graphitierung bei 2000 °C bis 3000 °C, wobei Gitterfehler der Graphitebenen abgebaut werden und sich diese Ebenen weitgehend parallel zur Faserachse ausbilden. Dabei resultieren Faserarten mit einem hohen Elastizitätsmodul (*high modulus* – HM) sowie einem sehr hohen Elastizitätsmodul (*ultra-high modulus* – UHM). Der erweiterte Herstellungsprozess der Graphitierung hat zur Folge, dass die Kosten der HM- und UHM-Fasern im Vergleich zu einer HT-Faser um ein Vielfaches höher sind. Die mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Faserarten werden im weiteren Verlauf näher erläutert (ADAMOW 2014, AVK 2013, CHERIF 2011, EHRENSTEIN 2006, SCHÜRMAN 2007).

Durch den Herstellungsprozess entstehen starke kovalente Bindungen innerhalb der Graphitebenen, weshalb der E-Modul der Kohlenstofffasern in Faserlängsrichtung um etwa eine Zehnerpotenz höher ist als in Faserquerrichtung (SCHÜRMAN 2007). Dieser Sachverhalt ist bei der weiteren Betrachtung des Trennprozesses von entscheidender Bedeutung und wird in Kapitel 5 näher beschrieben.

Im letzten Schritt des Herstellungsprozesses erfolgt die chemische Oberflächenbehandlung der Fasern. Dabei entstehen an der Oberfläche stabile Oxide, die eine chemische Verbindung mit den Matrixpolymeren bei der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen eingehen (CHERIF 2011, SCHÜRMAN 2007). Der Durchmesser einzelner Kohlenstofffaser-Filamente beträgt nach SCHÜRMAN (2007) sowie JÄGER und HAUKE (2010) etwa 5 µm bis 10 µm. Beim Herstellungsprozess von Kohlenstofffaser-Halbzeugen werden die einzelnen Filamente zu Faserbündeln zusammengefasst – einem sogenannten Roving. Industriell werden Faserhalbzeuge nach der Anzahl der Filamente unterschieden, die ein Faserbündel bilden. Nach SCHÜRMAN (2007) sind handelsüblich 1000, 3000, 6000, 12 000 und 24 000 Filamente pro Ro-

ving am Markt verfügbar. Diese Faserbündel werden am Ende des Halbzeug-Herstellungsprozesses in ein gewünschtes textiles Gebilde überführt. Den Zusammenhang zwischen Filament, Faserbündel und textilem Gebilde zeigt Abbildung 2.3.

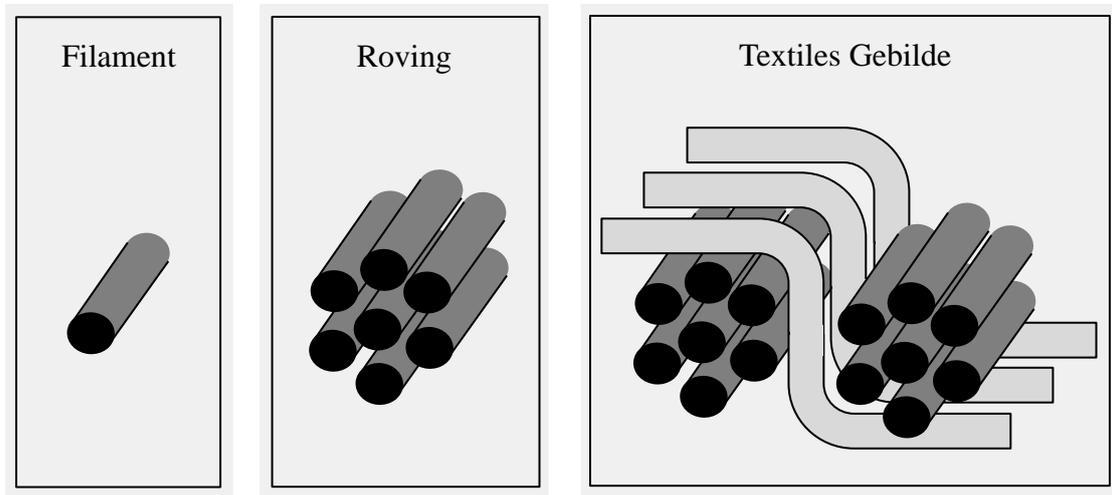


Abbildung 2.3: Darstellung des schematischen Aufbaus eines Kohlenstofffaser-Halbzeugs in Anlehnung an CHERIF (2011)

In faserverstärkten Kunststoffen nehmen nach JÄGER und HAUKE (2010) die in dem ausgehärteten Harzsystem eingebetteten Faserbündel die im Bauteil wirkenden Zugkräfte auf. Aus diesem Grund muss das Fasermaterial belastungsorientiert angeordnet sein. Da ein faserverstärktes Bauteil unterschiedlichen Belastungsfällen ausgesetzt ist, müssen nach EHRENSTEIN (2006) textile Gebilde mit Filamentgarnen als Verstärkungskomponenten eingesetzt werden. Diese textilen Gebilde können nach SCHÜRMAN (2007) und CHERIF (2011) in Gewebe, Gewirke, Geflechte, Gestricke und Gelege unterschieden werden.

Nach SCHÜRMAN (2007) beeinflussen sich übereinanderliegende Faserbündel, was zu unerwünschten Wechselwirkungen bei der Materialanalyse führt. Diese Wechselwirkungen haben eine nicht identifizierbare Auswirkung auf den Trennprozess, sodass eine qualitative Angabe der relevanten Maschineneinflussparameter nicht möglich ist. Unidirektionale Fasergelege sind der einfachste Materialanwendungsfall und somit können die unerwünschten Wechselwirkungen minimiert bzw. ausgeschlossen werden. Abbildung 2.4 zeigt schematisch den Vergleich eines unidirektionalen Geleges mit einem Gewebe. Der Aufbau und die Herstellung von Gewirken, Geflechten und Gestricken können der Literatur entnommen werden (etwa AVK 2013, CHERIF 2011, SCHÜRMAN 2007).

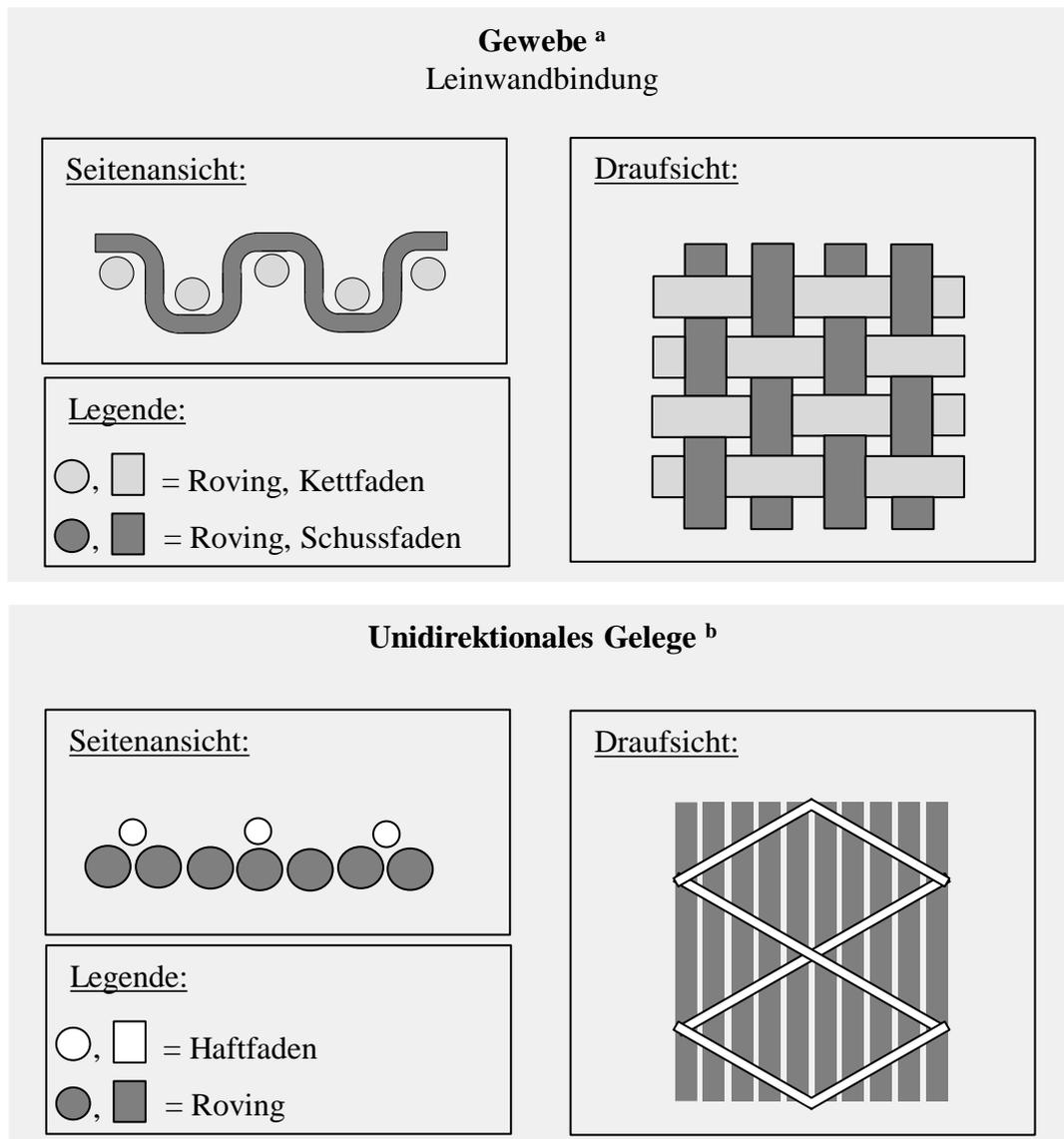


Abbildung 2.4: Vergleich eines unidirektionalen Geleges und eines Gewebes in Anlehnung an (a) CHERIF (2011) und (b) AVK (2013)

Gewebe werden als Flächengebilde definiert, die aus rechtwinklig kreuzenden Fäden zweier Fadensysteme, Kette und Schuss, hergestellt werden (DIN 60 000). Die Gruppierung von Kett- und Schussfaden wird als Bindung bezeichnet (AVK 2013). In Abbildung 2.4 ist eine Leinwandbindung schematisch dargestellt. Die Leinwandbindung ist nach AVK (2013) eine Grundbindung und zeichnet sich durch hohe Festigkeit gegenüber Verschiebungen der Rovings aus. Textile Gebilde, wie die Leinwandbindung, bieten im Vergleich zu unidirektionalen Gelegen für die Verarbeitung in faserverstärkten Kunststoffen eine verbesserte Handhabbarkeit. Der wellenförmige Fadenverlauf bei textilen Gebilden hat eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften der gesamten textilen Struktur zur Folge (SCHÜRMAN 2007).

Unidirektionale Gelege werden als textile Strukturen definiert, die aus einer oder mehreren Lagen gestreckter, nicht gewebter Fäden bestehen (DIN EN 13473-1). Dabei sind alle verarbeiteten Faserbündel in einer Vorzugsrichtung orientiert. Fixiert werden die Rovings untereinander durch ein Maschensystem oder durch chemische Bindsysteme (AVK 2013). Hierbei werden die Haftsysteeme generell nach einfachen Schussfäden, einseitigem Haftgitter sowie beidseitigem Haftgitter unterschieden. Die Art der Haftsysteeme bestimmt den Zusammenhalt der Faserbündel; beidseitig aufgebraachte Haftgitter besitzen den höchsten Zusammenhalt der Fasern. Diese sind bei der Handhabung der Textilien und während des Trennprozesses vor Verschiebungen der Faserbündel unempfindlicher. Aufgrund ihrer gestreckten Rovings zeichnen sich unidirektionale Gelege durch höchste Festigkeit sowie Steifigkeit aus und stellen somit den Vergleichsmaßstab für alle textilen Halbzeuge dar (CHERIF 2011).

2.2.1.2 Physikalische Eigenschaften

Die thermische Beständigkeit der Kohlenstofffasern ist aufgrund des Hauptbestandteils an Kohlenstoff hoch, da diese unterhalb 4000 °C nicht schmelzbar sind (STOCK 2017). Nach EHRENSTEIN (2006) und SCHÜRMAN (2007) liegt der Anteil an Kohlenstoff in einer Kohlenstofffaser bei etwa 90 %, weshalb der Wärmeausdehnungskoeffizient der Fasern sehr gering ist. Des Weiteren besitzen die Kohlenstofffasern nach SCHÜRMAN (2007) eine hohe elektrische Leitfähigkeit und einfallendes Licht wird von ihnen nahezu vollständig absorbiert, weshalb sie schwarz erscheinen. Überdies sind Kohlenstofffasern beständig gegen die meisten Säuren sowie Alkalien und weisen hervorragende Verträglichkeiten mit allen synthetischen Polymeren auf. Im Gegensatz zu Glas- und Aramidfasern nehmen Kohlenstofffasern nur minimal Wasser auf. Eine erhöhte Wasseraufnahme der Fasern beeinflusst die mechanischen Eigenschaften negativ (EHRENSTEIN 2006, SCHÜRMAN 2007).

2.2.1.3 Mechanische Eigenschaften

Bei der Herstellung der Kohlenstofffasern bestimmen unterschiedliche Prozessparameter, wie Temperatur sowie Dauer der Carbonisierung bzw. Graphitierung, die mechanischen Eigenschaften (CHERIF 2011, JÄGER & HAUKE 2010). Die daraus resultierenden Kohlenstofffaserarten werden, wie vorab beschrieben, in HT-, IM-, HM- und UHM-Fasern unterteilt. Die Eigenschaften der Kohlenstofffaserarten sind in Tabelle 2.1 näher erläutert. Des Weiteren existieren weitere Unterarten der genannten Kohlenstofffasern. Diese Unterarten stehen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit, da die Faserarten in Tabelle 2.1 vorwiegend in der Industrie eingesetzt werden (SCHÜRMAN 2007).

Tabelle 2.1: Übersicht der unterschiedlichen Kohlenstofffaserarten in Anlehnung an (a) CHERIF (2011), (b) EHRENSTEIN (2006)

Parameter	Faserarten			
	HT	HM	IM	UHM
Filament- durchmesser in μm	7–8 ^a	4–8 ^a	5–7 ^a	5–10 ^b
Dichte in g/cm^3	1,74–1,80 ^a	1,76–1,96 ^a	1,73–1,80 ^a	1,90–2,18 ^b
E-Modul, axial in GPA	200–250 ^a	300–500 ^a	250–400 ^a	440–830 ^b
Zugfestigkeit, axial in MPa	2 700–3 750 ^a	1 750–3 200 ^a	3 400–5 900 ^a	3 400–4 500 ^b
Bruchdehnung in %	1,20–1,60 ^a	0,35–1,00 ^a	1,10–1,93 ^a	0,30–0,50 ^b
Wasserauf- nahme in %	$\leq 0,1$ ^a	$\leq 0,1$ ^a	$\leq 0,1$ ^a	$\leq 0,1$ ^a

Kohlenstofffasern haben im Vergleich zu Glas- oder Aramidfasern mehrere Vorteile – etwa eine geringere Dichte mit äußerst hohen Festigkeiten und höchsten Elastizitätsmodulen (SCHÜRMAN 2007). Dem stehen nachteilige Eigenschaften, wie beispielsweise ein sprödes Bruchverhalten, verursacht durch die geringe Bruchdehnung, gegenüber (STOCK 2017).

2.2.2 Fazit

Kohlenstofffasern sind aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften eine praktikable Lösung, um die Festigkeiten von Bauteilen zu erhöhen und gleichzeitig Gewicht einzusparen (NEITZEL ET AL. 2014). Das Herstellverfahren dieser Fasern verursacht durch den energieintensiven Prozess hohe Kosten, was einem wirtschaftlichen Einsatz in vielen Strukturanwendungen entgegensteht. Kohlenstofffasern besitzen eine starke Anisotropie, weshalb der E-Modul in Faserlängsrichtung um etwa eine Zehnerpotenz höher ist als in Faserquerrichtung (SCHÜRMAN 2007). Am Markt sind

verschiedene Kohlenstofffaserarten verfügbar, die sich in den jeweiligen mechanischen Eigenschaften unterscheiden. Einen schematischen Vergleich der Kohlenstofffaserarten zeigt Abbildung 2.5.

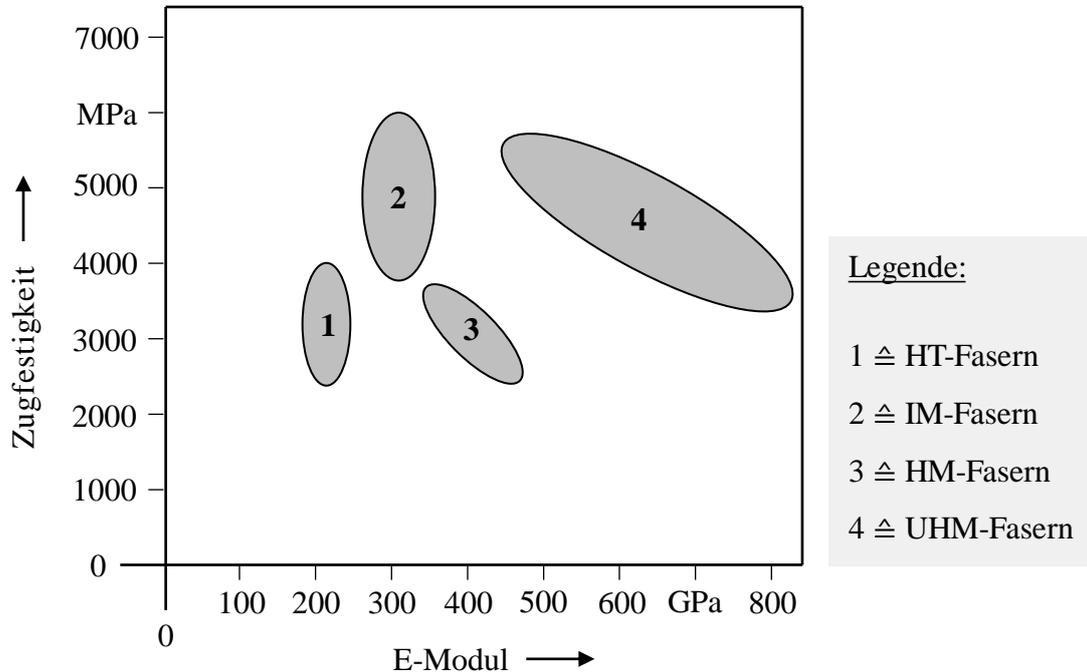


Abbildung 2.5: Schematischer Vergleich der unterschiedlichen Kohlenstofffaserarten in Anlehnung an EHRENSTEIN (2006) und CHERIF (2011)

Der Einsatz von hochfesten und hochsteifen Fasern in unidirektionaler Ausrichtung im Verbund aus Fasern und ausgehärtetem Harzsystem birgt nach STOCK (2017) großes Potenzial für den Strukturleichtbau. Des Weiteren beeinflussen sich nach EHRENSTEIN (2006) einzelne Rovings, die durch die textile Formgebung eines multiaxialen Gewebes übereinander liegen, sodass eine gezielte Aussage über den Trennprozess nicht mehr möglich ist. Aus den genannten Gründen wird in dieser Arbeit nur das Wasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien betrachtet. Für dieses Spektrum kann eine gezielte Aussage über den Trennprozess mittels der Wasserstrahltechnologie getroffen werden, da Wechselwirkungen einzelner Faserbündel untereinander ausgeschlossen sind.

2.3 Trenntechnologien

Die Trenntechnologien sind nach DIN 8580 den Fertigungsverfahren zuzuordnen, die sich in der Hauptgruppe 3 *Trennen* untergliedern. Dabei definiert die DIN 8580 den Begriff *Trennen* wie folgt:

„Fertigen durch Aufheben des Zusammenhalts von Körpern [...], wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird.“

Für ein besseres Verständnis der folgenden Kapitel ist die Einordnung der Trenntechnologien in Abbildung 2.6 dargestellt.

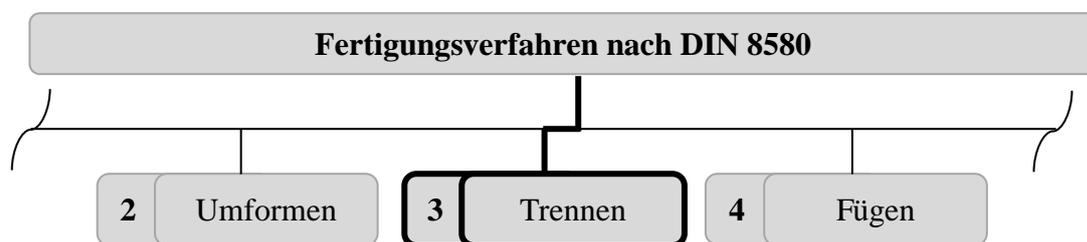


Abbildung 2.6: Ausschnitt zur Einteilung der Fertigungsverfahren in Anlehnung an DIN 8580

Die Trennverfahren der faserverstärkten Kunststoffe und speziell der technischen Textilien lassen sich generell in zwei Technologiearten einteilen: die thermischen sowie mechanischen Schnitte. Nach CHERIF (2011) ist das Schneiden mittels Ultraschallsonotroden, Plasmastrahlen sowie Laserstrahlen in die Gruppe des thermischen Schnitts einzuordnen. Aufgrund der wissenschaftlichen Relevanz und der direkten Konkurrenz zum Wasserstrahltrennen wird das Laserstrahltrennen in Kapitel 2.3.1 näher erläutert. Die Funktionsprinzipien des Trennens mittels Ultraschallsonotroden sowie Plasmastrahlen können in der Literatur nachgelesen werden (etwa CHERIF 2011, DIN E. V. 2016, FRITZ & SCHULZE 2015, WECK & BRECHER 2005).

Zu den Technologien des mechanischen Schnitts lassen sich nach FRITZ und SCHULZE (2015) eine Vielzahl an Verfahrensarten zuordnen, wie beispielweise das Zerspanen des Werkstoffs mittels eines metallischen Schneidwerkzeugs. Das industriell am weitesten verbreitete Verfahren für das Trennen von technischen Textilien, insbesondere für Kohlenstofffasern, ist der mechanische Schnitt mittels metallischer Klingen (CHERIF 2011). Aus diesem Grund wird diese Trenntechnologie in Kapitel 2.3.2 näher charakterisiert. Das Wasserstrahltrennen ist in die Kategorie *mechanischer Schnitt durch abrasive Wirkung* einzuordnen und wird in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

Die Kapitel der jeweiligen Trenntechnologien sind dabei wie folgt aufgebaut:

1. Charakterisierung der Verfahrensart,
2. Erläuterung der Systemkomponenten einer ausgewählten Trennmaschine,
3. Erkenntnisse zum Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien.

2.3.1 Laserstrahltrennen

Das Laserstrahltrennen ist ein Trennverfahren mittels thermischen Abtrags (DIN 8590). Nach DIN 8580 und DIN 8590 wird die Laserstrahltechnologie der Hauptgruppe 3 *Trennen* sowie den Untergruppen 3.4 *Abtragen*, 3.4.2 *Thermisches Abtragen* und 3.4.2.5 *Thermisches Abtragen durch Strahl* zugeordnet. Abbildung 2.7 zeigt diesen Zusammenhang.

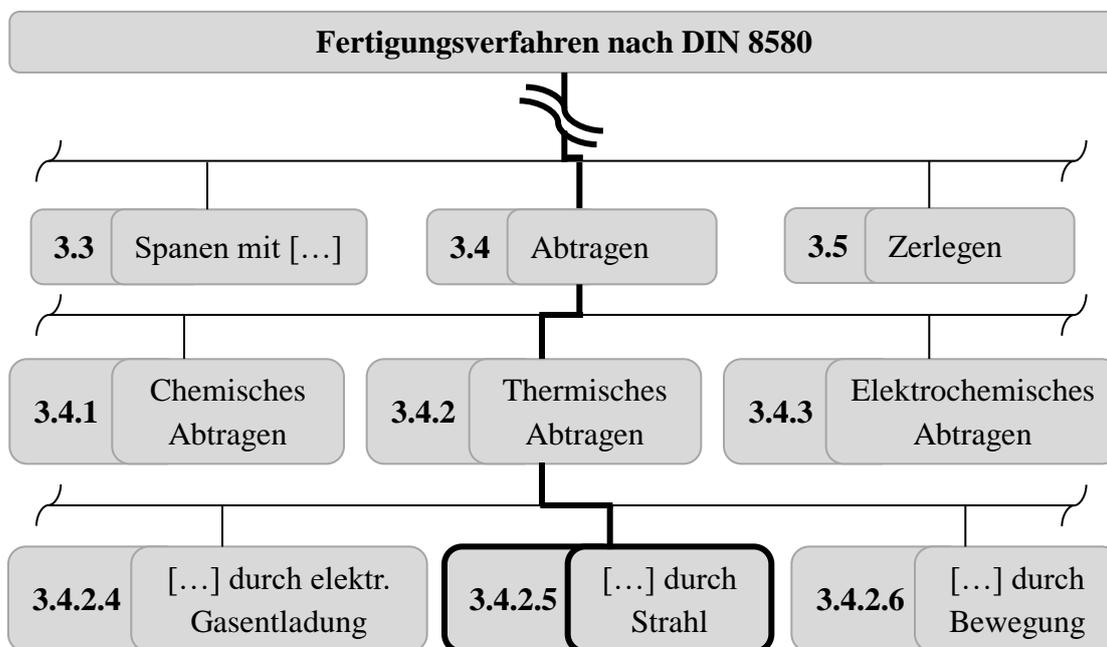


Abbildung 2.7: Einordnung der Laserstrahltechnologie in Anlehnung an DIN 8580 und DIN 8590

Beim Laserstrahltrennen wird der Werkstoff durch lokale Energieeinbringung in den schmelzflüssigen sowie in den gasförmigen Zustand überführt und verlässt unter Druck die Schnittfuge (STOCK 2017). Der Begriff *Laser* ist eine Abkürzung für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* und beschreibt sowohl das grundlegende physikalische Prinzip als auch die Verfahrenstechnologie. Ein Laserstrahl besteht aus einer speziellen elektromagnetischen Welle, die durch eine weitgehend

monochrome Wellenlänge mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Kohärenz sowie einer hohen spektralen Energiedichte charakterisiert ist (BLIEDTNER ET AL. 2013). Die Erzeugung des Laserstrahls sowie das physikalische Prinzip werden in der einschlägigen Literatur umfassend beschrieben und sind nicht Fokus dieser Arbeit (etwa EICHLER & EICHLER 2010, POPRAWA 2005).

Die Vorteile des Laserstrahltrenns sind der sehr geringe Werkzeugverschleiß, die geringe Schnittfugenbreite und die sehr hohe Trenngeschwindigkeit. Als Nachteile können die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten, der thermische Einfluss sowie eine mögliche Schadstoffemission angesehen werden (CHERIF 2011, FRITZ & SCHULZE 2015).

2.3.1.1 Charakterisierung einer Laserstrahlanlage

Zur Erläuterung der Systemkomponenten einer Laserstrahlanlage wird ein Portaltrennsystem beschrieben. Dieses System besteht aus einer Strahlquelle, einer Strahlführung durch Spiegelmechaniken, einer Bearbeitungsfläche und diversen Sicherheitseinrichtungen.

Die Laserstrahlquelle ist eine der wichtigsten Systemkomponenten. Zur Erzeugung des Laserstrahls können unterschiedliche Laserklassen, wie beispielweise ein Kohlenstoffdioxidlaser (CO₂-Laser), verwendet werden (FRITZ & SCHULZE 2015). Das in Abbildung 2.8 schematisch dargestellte Laserstrahl-Portaltrennsystem verwendet einen CO₂-Laser als Laserstrahlquelle. Die Strahlführung von der Laserstrahlquelle zum Schneidkopf erfolgt durch Spiegelsysteme. Dadurch wird eine räumliche Trennung der Bearbeitungseinheit von der Strahlerzeugung ermöglicht. Aufgrund der Strahlführung, insbesondere durch optische Systeme, können kurze Bearbeitungszeiten realisiert werden (CHERIF 2011). Der Schneidkopf ist auf einer Portaleinheit appliziert, was eine Bearbeitung von 2-D-Konturen ermöglicht. Der Schneidisch kann konstruktiv der jeweiligen Schneidaufgabe angepasst werden und dient als Auflage der Bauteile. Die Energiedichte des erzeugten Laserstrahls ist dabei so gering, dass die Bearbeitungsfläche nicht beschädigt wird (TROTEC 2016). Da beim Laserstrahltrennen von speziellen Werkstoffen, wie beispielsweise kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, gesundheitsschädliche Dämpfe entstehen, müssen eine Absaugung und eine Filterung des Luftgemisches vorgesehen werden (CHERIF 2011). Zudem muss das gesamte System durch eine Einhausung von der Umgebung ausgeschlossen werden. Das erläuterte Laserstrahl-Portaltrennsystem ist in Abbildung 2.8 schematisch dargestellt.

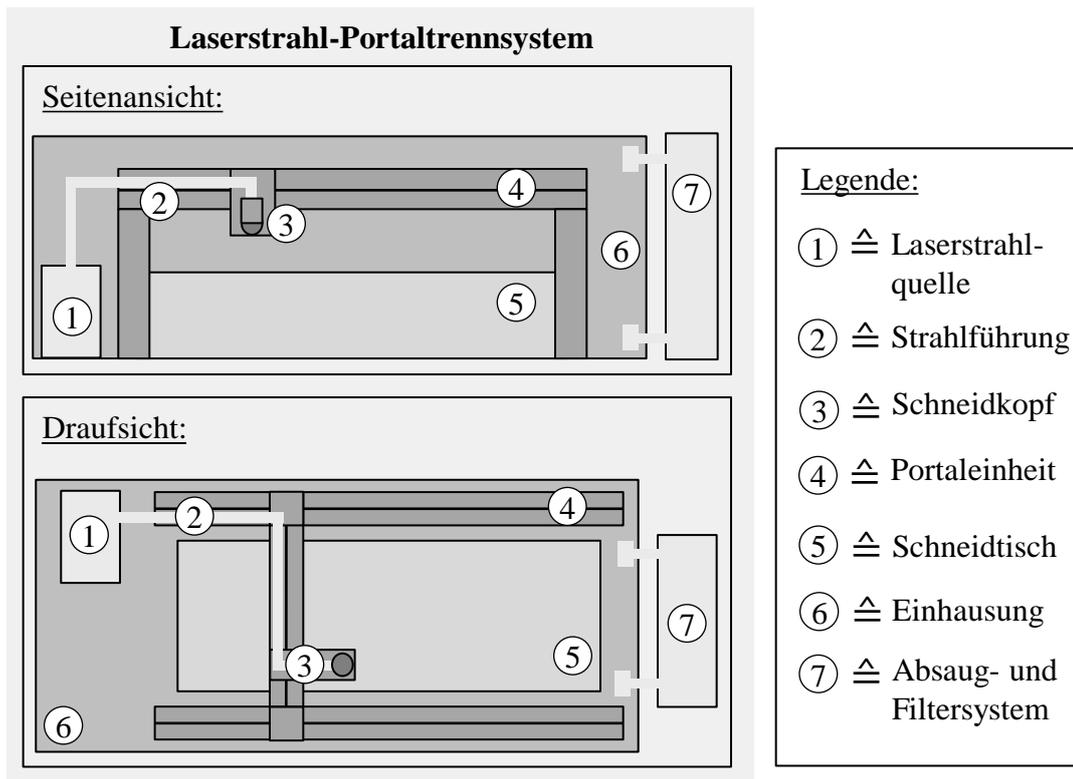


Abbildung 2.8: Aufbau eines Laserstrahl-Portaltrennsystems in Anlehnung an TRO-TEC (2016)

2.3.1.2 Zerteilen von Kohlenstofffasern

Für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien werden in der Industrie aufgrund der Laserleistung vermehrt CO₂-Laser verwendet (ROOKS 2004). Ein wichtiger Aspekt für das Trennen von Kohlenstofffasern mittels eines Laserstrahls ist die Emission von Schadstoffen. Dabei sublimiert der Laserstrahl die Kohlenstofffaser, wobei für den Menschen giftige Schadstoffe entstehen (DAVIM 2015, FUCHS ET AL. 2013). Grundsätzlich kann bei der Bearbeitung von Kohlenstofffasern ein Schutzgas verwendet werden. Dieses wird unter Druck abgegeben und dient dazu, die geschmolzenen und verdampften Werkstoffrückstände aus der Schnittfuge zu reinigen (LIEBELT 1998).

Das Laserstrahltrennen von technischen Textilien wurde bereits in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten betrachtet. Dabei konnte eine qualitative Aussage über den Trennprozess von Kohlenstofffasern durch die eingebrachte Energie in das Fasersystem getroffen werden (FUCHS ET AL. 2015). Generell können mehrere Lagen aus Kohlenstofffasern geschnitten werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Lagen aufgrund der Schmelze des Materials an der Schnittkante miteinander verbunden sein

können. Diese Technologie hält aufgrund des hohen Ausbringungsgrads verstärkt Einzug in die industrielle Anwendung, bedarf aber noch weiterer wissenschaftlicher Betrachtungen (CHERIF 2011). Aus diesen Gründen wird das Laserstrahltrennen als direkte Alternative zum Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien angesehen, was in Kapitel 5.1 näher erläutert wird.

2.3.2 Mechanischer Schnitt mit metallischer Klinge

Der mechanische Schnitt mittels einer metallischen Klinge ist ein Fertigungsverfahren zum Zerteilen von Werkstücken mit einer keilförmigen Schneide (DIN 8588). Nach DIN 8580 und DIN 8588 ist diese Technologie in die Hauptgruppe 3 *Trennen* und die Untergruppen 3.1 *Zerteilen* sowie 3.1.2 *Messerschneiden* eingeordnet. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

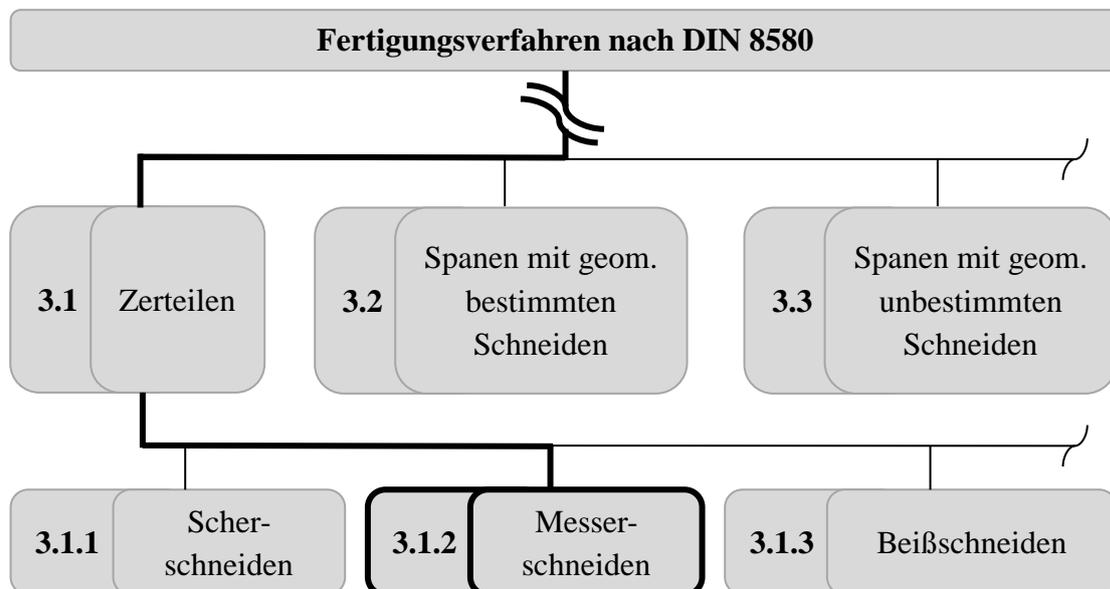


Abbildung 2.9: Einordnung des mechanischen Schnittes mit metallischer Klinge in Anlehnung an DIN 8580 und DIN 8588

Die Untergruppe 3.1.2 *Messerschneiden* ist nach DIN 8588 in die Verfahrensarten *einhubig*, *mehrhubig fortschreitend* und *kontinuierlich* aufgeteilt. Dabei beschreiben diese Verfahrensarten den Ablauf des Trennprozesses. Aufgrund der Ausführungszeit ist das *kontinuierliche* Verfahren für einen industriellen Einsatz von besonderer Bedeutung und wird im weiteren Verlauf näher betrachtet. Die Bewegung der Klinge kann dabei senkrecht zur Schneide oder entlang der Schneidachse erfolgen (DIN 8588).

Das *kontinuierliche* Verfahren unterteilt sich in handgeführte Zuschnitte sowie Schnitte unter Einsatz von CNC-Automaten. Die Vorteile dieser Schneidsysteme sind der vergleichsweise geringe Anschaffungspreis, der fehlende thermische Einfluss auf das Schneidmaterial sowie die gute Umweltverträglichkeit aufgrund der nicht vorhandenen Schadstoffemission. Als Nachteile können der Werkzeugverschleiß, die im Vergleich zu den thermischen Verfahren relativ große Schnittfugenbreite sowie die hohen Schneidkräfte angesehen werden (CHERIF 2011).

2.3.2.1 Beschreibung der Technologieanwendung

Bei den handgeführten Technologien ist generell zwischen Scheren mit einem faserstoffspezifischen Anschliff, Elektrohandscheren für den Einlagenzuschnitt, Rundmessermaschinen, Vertikalmessermaschinen sowie Bandmessermaschinen zu unterscheiden (CHERIF 2011). Der faserstoffspezifische Anschliff beschreibt die Eigenschaft und Beschaffenheit der Klinge. Für das Zerteilen von technischen Textilien muss die Klinge speziell gehärtet werden, sodass sie bei Benutzung nicht zu schnell abstumpft. Die handgeführte Option der Trennmöglichkeit wird aufgrund der damit verbundenen schnellen Verfügbarkeit meist in Kleinstserien sowie in Prototypenfertigung verwendet. Abbildung 2.10 zeigt eine Auswahl handgeführter Trenntechnologien.

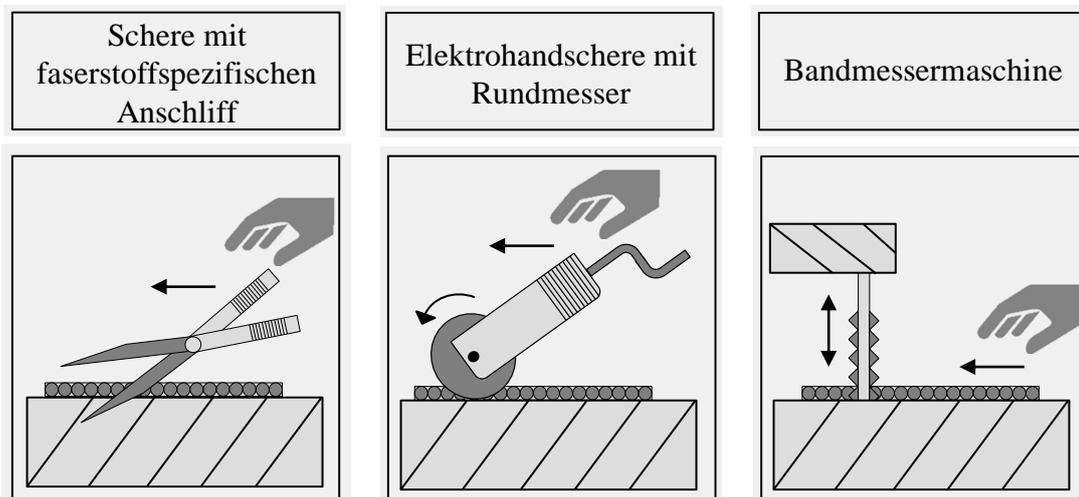


Abbildung 2.10: Auswahl an handgeführten Trenntechnologien

Für einen industriellen Einsatz in der Fließfertigung werden aufgrund der Automatisierbarkeit des Verarbeitungsprozesses überwiegend CNC-Automaten verwendet. Dabei werden meist Stichmesser oder angetriebene Rundmesser als Werkzeug ver-

wendet (CHERIF 2011). Die gesteuerten Trenntechnologien nutzen einen Arbeitstisch, auf dem das Fasermaterial liegt und über angetriebene Vorrichtungen von einer Rolle abgewickelt wird. Die Schneide wird mittels eines rechnergesteuerten Portalsystems entlang der vorgegebenen Bahn bewegt. Die zerteilte 2-D-Kontur kann entweder durch ein automatisiertes System oder durch manuelle Handarbeit vom Arbeitstisch absortiert werden. Der verbleibende Ausschnitt ist in dem sogenannten Verschnittbehälter zu entsorgen. Mit CNC-Automaten ist eine optimale Ausnutzung des Fasermaterials möglich, da die Zuschnitte vorab von einem Anwender oder einem automatisierten Algorithmus optimal angeordnet werden können.

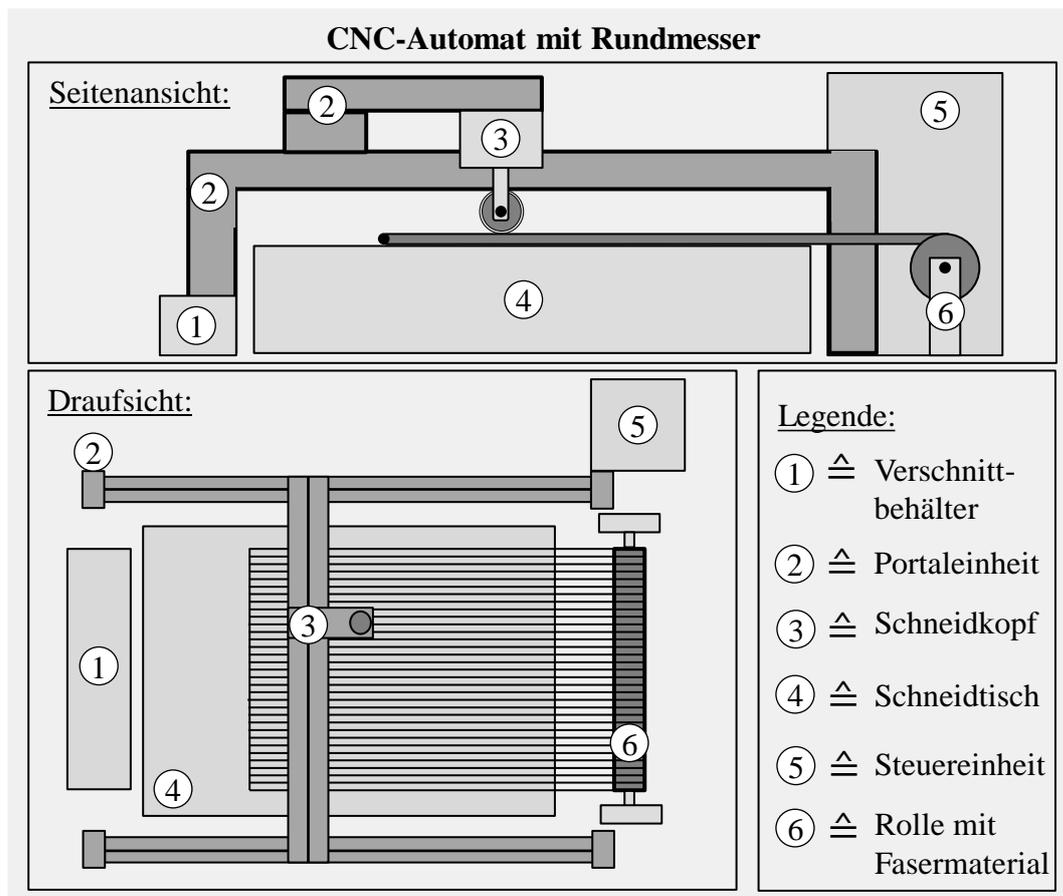


Abbildung 2.11: Schematischer Aufbau eines CNC-Automaten für das Trennen von technischen Textilien in Anlehnung an BULLMER (2017)

Abbildung 2.11 zeigt den schematischen Aufbau eines CNC-Automaten mit Rundmesser für das mechanische Trennen von technischen Textilien. Dabei entzweit ein rotierendes Rundmesser das Material, das durch ein gesteuertes Portalsystem geführt wird. Das Zuführsystem des Fasermaterials kann manuell oder automatisch gesteuert werden.

2.3.2.2 Trennen von Kohlenstofffasern

Das Zerteilen von Kohlenstofffaser-Textilien mittels eines kontinuierlichen Trennprozesses mit einer metallischen Klinge ist Stand der Technik. Dieser Trennprozess wurde von verschiedenen Autoren eingehend betrachtet (etwa CHERIF 2011). Dafür wurden verschiedene Anwendungsfälle und Materialien untersucht. Die Vorteile dieser Anwendung sind der kostengünstige Einsatz und die einfache Integrierbarkeit der Anlagen in die industrielle Fertigungsumgebung. Ein Nachteil dieser Möglichkeit des Trennens von Kohlenstofffasern ist der Werkzeugverschleiß, der dazu führt, dass das Fasermaterial in einigen Fällen nicht durchtrennt wird, was während des Absortierprozesses zu Ausschüssen führen kann.

Überdies ist ein mehrlagiger Zuschnitt von Kohlenstofffaser-Textilien nur mit speziellen Zusatzaufbauten möglich, was mit signifikanten Herausforderungen verbunden ist (BULLMER 2017, CHERIF 2011). Die hohe Schneidkraft – eingebracht durch das Werkzeug – kann die Textillagen ggf. verschieben, was zu Qualitätsverlusten während der weiteren Verarbeitung führen kann (CHERIF 2011). Das Zerteilen mittels CNC-Automaten mit metallischer Klinge ist aufgrund der intensiven industriellen Anwendung ein direkter technologischer Konkurrent für das Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 5.1 weiter erläutert.

2.3.3 Wasserstrahltrennen

Das Wasserstrahltrennen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem ein Wasserstrahl als Trennwerkzeug benutzt wird. Der unter hohem Druck – meist bis zu 6000 bar – stehende Wasserstrahl wird durch eine spezielle Düse fokussiert und zertrennt das Material (HASHISH 1997, LORINCZ 2009).

Nach DIN 8580 ist die Wasserstrahltechnologie der Hauptgruppe 3 *Trennen* sowie den Untergruppen 3.3 *Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden* und 3.3.6 *Strahlspanen* zugeordnet. Abbildung 2.12 zeigt diesen Zusammenhang.

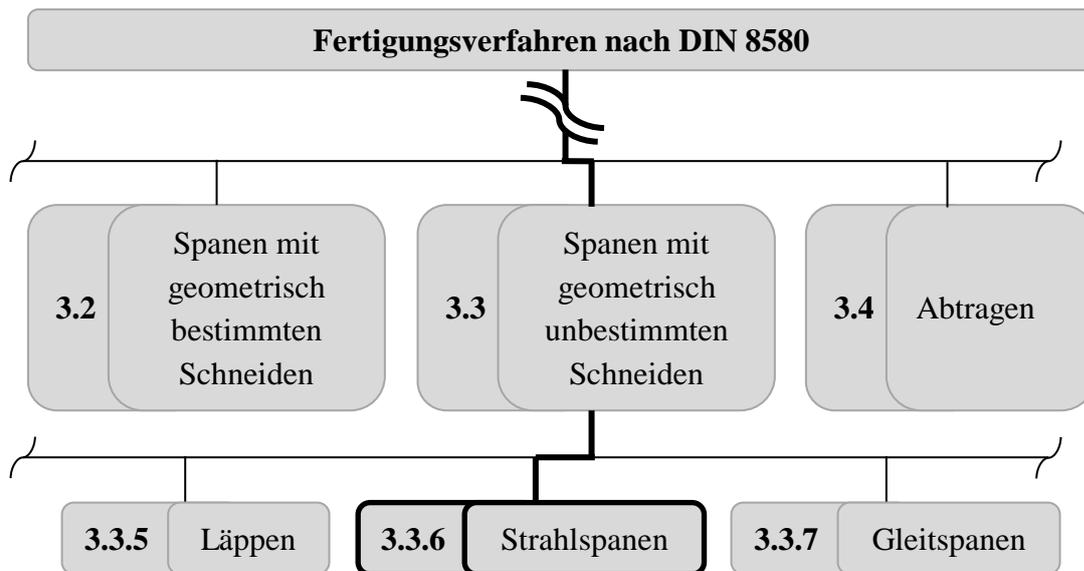


Abbildung 2.12: Ausschnitt zur Einteilung der Fertigungsverfahren in Anlehnung an DIN 8580

Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden wird nach DIN 8589-0 konkret als „Spanen, bei dem ein Werkzeug verwendet wird, dessen Schneidanzahl, Geometrie der Schneidkeile und Lage der Schneiden zum Werkstück unbestimmt sind“ definiert.

Für das Strahlspanen ist derzeit keine aktuelle Norm vorhanden (SCHNEIDAU 2010). In der zurückgezogenen DIN 8200 wurde das Strahlspanen in *Abtragstrahlen*, *Trennstrahlen* und *Entgratstrahlen* unterteilt. Das Wasserstrahltrennen ist als Druckflüssigkeitsstrahlen eine Form des Trennstrahlens. Allgemein definiert die DIN 8200 Strahlen wie folgt:

„Strahlen ist ein Fertigungsverfahren, bei welchem das Strahlmittel (als Werkzeug) in Strahlgeräten unterschiedlicher Strahlensysteme beschleunigt und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Werkstückes (Strahlgut) gebracht wird.“

Erwiesene Vorteile der Wasserstrahltechnologie sind die Folgenden: Kein schädigender, thermischer Einfluss auf das Werkstück, eine geringe Schnittfugenbreite sowie eine nur senkrecht auf das Werkstück gerichtete Schneidkraft (HOOGSTRATE ET AL. 1997). Der wesentliche Nachteil dieses Trennverfahrens liegt darin, dass eventuelle Wasserrückstände auf dem Werkstück verbleiben könnten (KLOCKE & KÖNIG 2007, KOLB 2013, RISSE 2012).

2.3.3.1 Wasserstrahlschneidanlage und Verfahrensarten

Eine Wasserstrahlanlage setzt sich nach KLOCKE und KÖNIG (2007) generell aus verschiedenen Systemkomponenten zusammen: Hochdruckpumpe, Düsenpaket, Düsenpaket-Führungssystem, Auffangbehälter und sonstige Apparaturen. Dies ist in Abbildung 2.13 näher dargestellt.

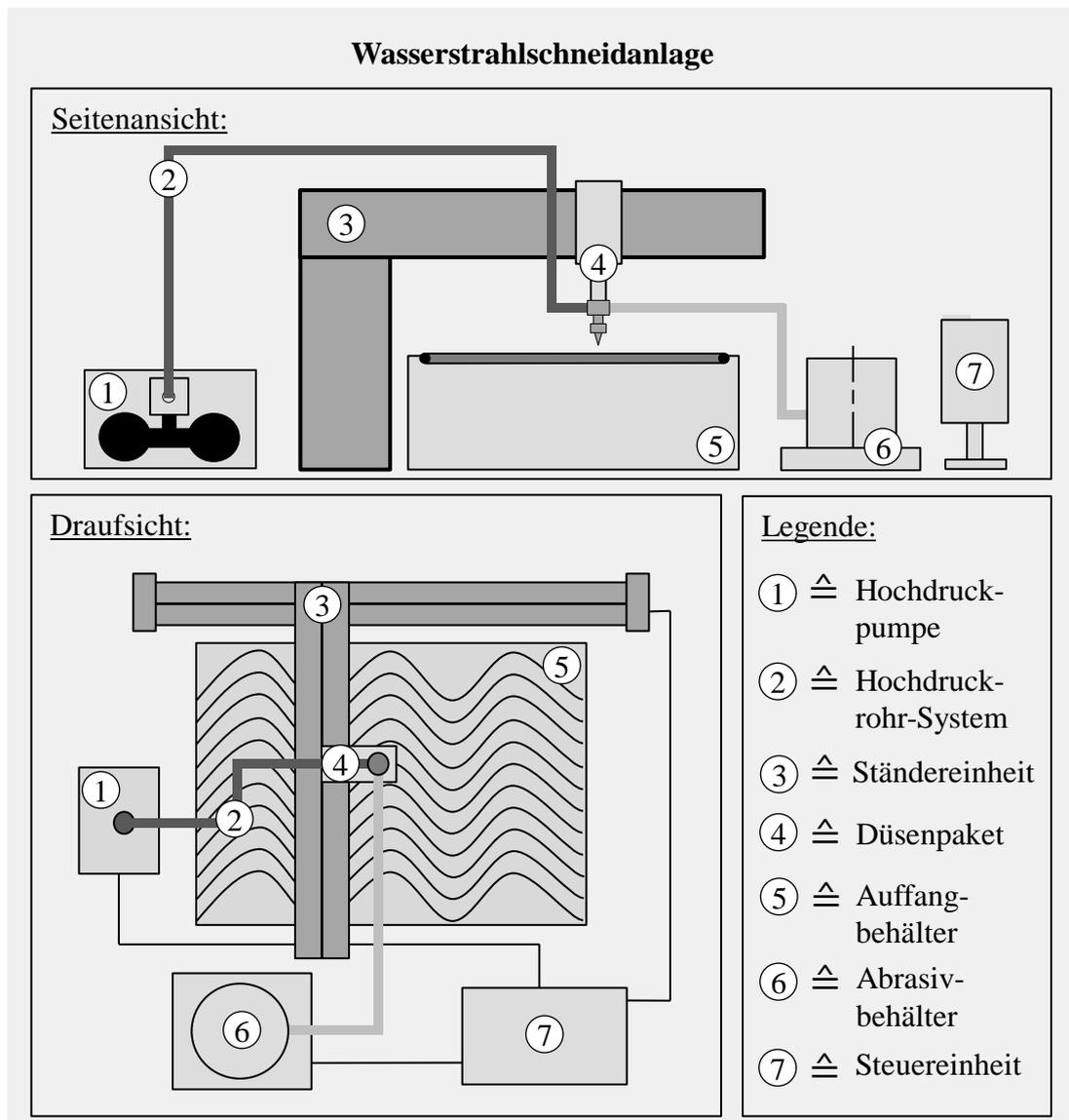


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung einer Wasserstrahlanlage

Die Hochdruckpumpe erzeugt den hochenergetischen Wasserstrahl, indem das Zuführwasser mittels einer Drehkolbenpumpe oder eines Druckübersetzers mit Druck beaufschlagt wird (KOLB 2013). Der hochenergetische Wasserstrahl wird anschließend durch Hochdruckrohre an das Düsenpaket weitergeleitet. Das Düsenpaket unterscheidet sich je nach Verfahrensart. Das Führungssystem des Düsenpakets kann

entweder als Ständersystem oder unter Verwendung eines Industrieroboters realisiert werden. Des Weiteren können Wasserstrahlanlagen als sogenannte 2-D- bzw. 3-D-Kinematiken ausgeführt werden. Bei einer 2-D-Anlage ist das Düsenpaket nicht schwenkbar, sodass lediglich plane Oberflächen bearbeitet werden können. Ferner ist es möglich, mehrere Düsenpakete durch ein Führungssystem zu steuern oder das Düsenpaket an einen Industrieroboter zu applizieren (BIERMANN ET AL. 2016, RISSE 2012). Der Auffangbehälter, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, bremst den beschleunigten Wasserstrahl ab und dient als Auflage für das zu bearbeitende Werkstück. Die Auflage wird meist durch Metallstreben realisiert, die in Lamellenform mit einem festgelegten Abstand angeordnet sind. Diese Lamellenanordnung verspannt die Metallstreben, was in einer höheren Stabilität der Auflage resultiert. Als sonstige Apparaturen sind Einheiten definiert, die den Betrieb der Anlage aufrechterhalten. Hierzu zählen im Allgemeinen das Wasseraufbereitungssystem für das Zuführwasser, der Abrasiv-Zulauf und die Systemsteuerung (KLOCKE & KÖNIG 2007).

Das Wasserstrahltrennen lässt sich in die beiden Verfahrensarten *Reinwasserstrahl-trennen* und *Abrasiv-Wasserstrahl-trennen* gliedern (RISSE 2012). Diese Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Erzeugung und Zusammensetzung des Schneidwerkzeugs. Beide Verfahren werden nachfolgend näher erläutert, wobei die physikalischen Grundlagen in Kapitel 4.1 beschrieben werden.

Nach KLOCKE und KÖNIG (2007) sowie WESTKÄMPER und WARNECKE (2010) dient beim Abrasiv-Wasserstrahl-trennen der Wasserstrahl als Trägermedium für den ihm zugeführten Feststoff. Als Feststoffe werden üblicherweise Quarzsandpartikel mit definierten Granularitäten verwendet (FRITZ & SCHULZE 2015). Die einzelnen Feststoffpartikel rufen beim Aufprall auf die Werkstückoberfläche einen Materialabtrag im Mikrobereich hervor. Die Summe der Einzelergebnisse dieses Vorgangs hat den eigentlichen Abtrag zur Folge.

Das Abrasiv-Wasserstrahl-trennen lässt sich wiederum in zwei Verfahrensprinzipien unterteilen: per Injektorstrahl sowie per Suspensionsstrahl. In der weiteren Betrachtung wird ausschließlich das Injektorstrahlverfahren fokussiert, da diese Verfahrenart aufgrund des geringeren apparativen Aufwands und des kontinuierlichen Betriebs eine höhere industrielle Relevanz als das Suspensionsstrahlverfahren besitzt (AWISZUS ET AL. 2016, ZAREMBA 2017). Der Verfahrensablauf des Suspensionsstrahlverfahrens kann in der Literatur nachgelesen werden (etwa KOLB 2013, RISSE 2012). In Abbildung 2.14 ist das Injektorstrahlverfahren dargestellt.

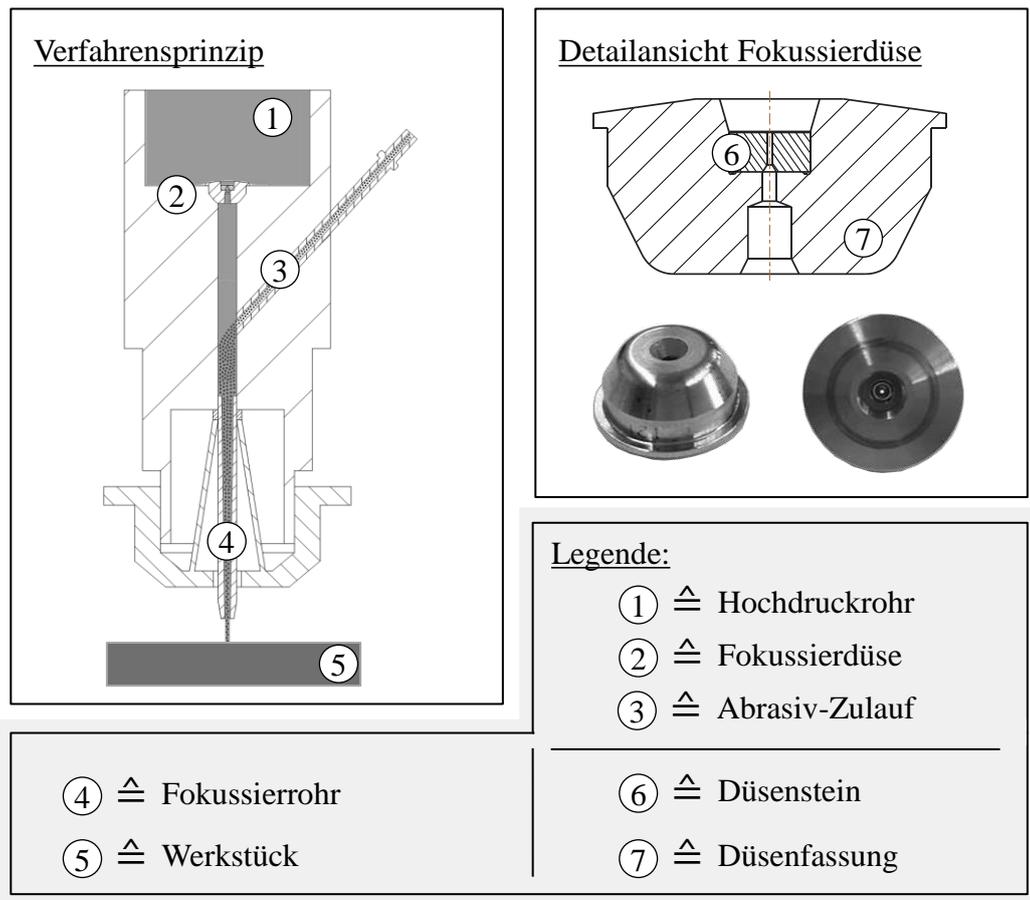


Abbildung 2.14: Verfahrensprinzip der Abrasiv-Wasserstrahltechnologie

Beim Abrasiv-Wasserstrahltrennen nach dem Injektorprinzip wird der Wasserstrahl durch eine Fokussierdüse beschleunigt. Der beschleunigte Wasserstrahl erzeugt in der nachfolgenden Mischkammer einen Unterdruck, durch den das Abrasiv angesaugt und mit dem Wasserstrahl durchmenget wird (KOLB 2013). Die Fokussierdüse besteht aus einem Düsenstein und einer Düsenfassung. Der Düsenstein ist aus einem Saphirmaterial gefertigt und hat einen Durchmesser zwischen 0,10 mm und 0,33 mm (FLOW 2018). Es werden nach der Materialart des Trennguts ausgewählte Abrasivmittel mit unterschiedlichen Körnungen eingesetzt. Dabei haben Art, Korngröße und Menge des Abrasivs sowie der Düsendurchmesser einen direkten Einfluss auf die Schneidleistung (DENKENA & BIERMANN 2014, KOLB 2013). Das Wasser-Abrasivgemisch wird durch ein Fokussierrohr aus Hartmetall auf das Werkstück geleitet. Die Schneidleistung des Abrasiv-Wasserstrahltrennens ist von der Endgeschwindigkeit der Abrasivpartikel abhängig (RISSE 2012). Dies bedeutet, dass der Wasserstrahl nur als Träger- und Beschleunigungsmedium für die Abrasivpartikel dient. Der kontinuierliche Materialabtrag erfolgt durch eine Mikrozerspanung, hervorgerufen durch das

auf der Werkstückoberfläche auftreffende Abrasiv. Der Strahldurchmesser des Abrasiv-Wasser-Gemischs – und damit auch die Breite des Schnittspalts – ist nach KOLB (2013) sowie NEUGEBAUER (2012) zwischen 0,5 mm und 1,5 mm einzuordnen. Je weiter das Werkstück vom Fokussierrohr entfernt ist, desto breiter fächert sich der Wasserstrahl aufgrund der Luftreibung auf (KRISMANN 1994). Daher muss ein definierter Abstand zwischen Fokussierrohr und Werkstück hergestellt werden. Bei der Abrasiv-Wasserstrahlbearbeitung bestimmen folgende Maschinenparameter die Schnittkantenqualität: Vorschubgeschwindigkeit, Wasserdruck, Düsendurchmesser, Düsenabstand, Abrasivart und Abrasivmenge (AKKURT ET AL. 2004, KOLB 2013). Das Abrasiv-Wasserstrahltrennen eignet sich aufgrund der genannten Vorteile sowohl für Kleinmengen als auch für eine Serienfertigung (KOLB 2013). Nach RISSE (2012) wird beim Reinwasserstrahltrennen nur die reine Energie des Wasserstrahls als Trennwerkzeug genutzt. Hierbei fehlt im Gegensatz zum Abrasiv-Wasserstrahltrennen der Abrasiv-Zulauf, wodurch die Belastung auf das Material durch einen kontinuierlich am Werkstück wirkenden Wasserdruck verursacht wird. Diese Verfahrenart wird in Abbildung 2.15 näher beschrieben.

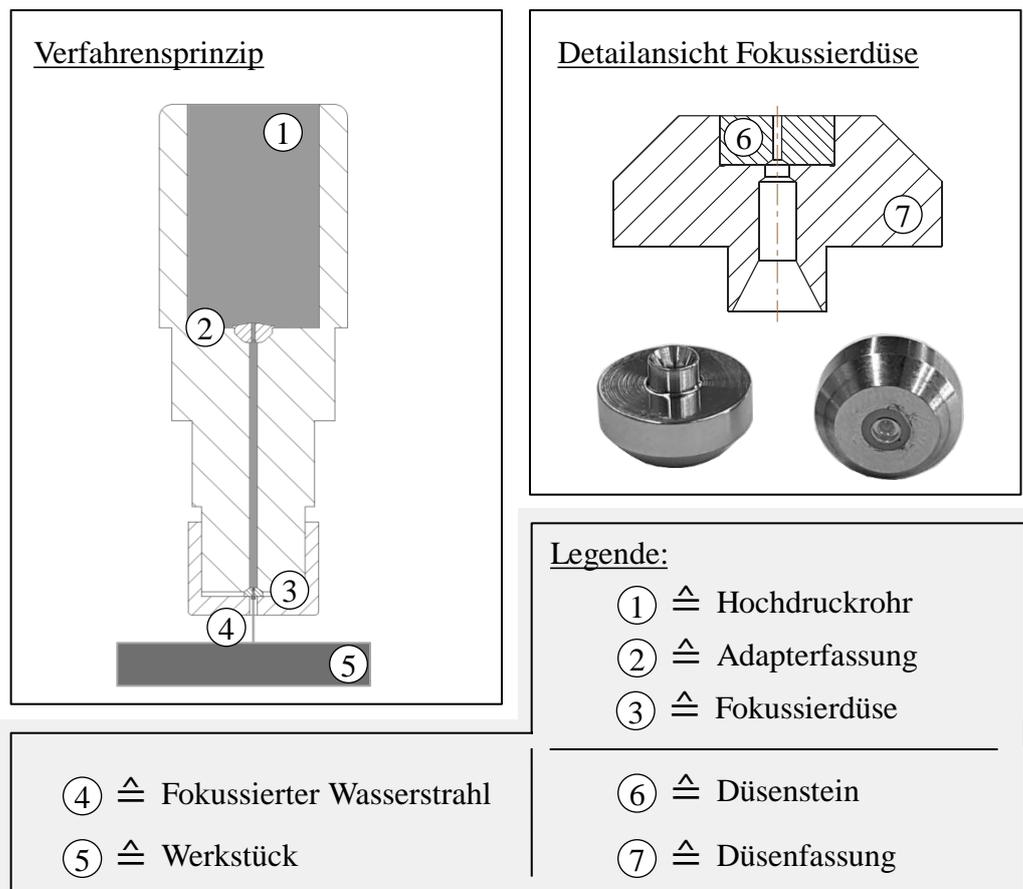


Abbildung 2.15: Verfahrensprinzip der Reinwasserstrahltechnologie

Das hochenergetische Wasser wird durch Hochdruckrohre von der Hochdruckpumpe an das Düsenpaket geleitet, was in Abbildung 2.15 dargestellt ist. Hierbei ist eine Adapterfassung realisiert, da das Düsenpaket des Reinwasserstrahlprinzips auf derselben Plattform wie dasjenige des Abrasiv-Wasserstrahltrennens angebracht wird. Der Wasserstrahl wird am Ende des Düsenpaketlaufs durch eine Fokussierdüse beschleunigt. Letztere besteht aus einer Düsenfassung, die aus einem metallischen Werkstoff gefertigt ist, und einem Düsenstein. Die Art der Werkstoffwahl beeinflusst die Lebensdauer des Düsensteins. Dabei kann zwischen Diamant- und Saphirmaterialien gewählt werden, wobei das Diamantmaterial im Vergleich zum Saphirmaterial einen geringeren Werkzeugverschleiß und einen höheren Anschaffungspreis aufweist (KOLB 2013). Der Durchmesser der Düsensteinbohrung liegt beim Reinwasserstrahltrennen zwischen 0,076 mm und 0,33 mm (FLOW 2018).

Bezüglich des Abstands des Düsenaustritts zum Werkstück gilt die gleiche Analogie wie beim Abrasiv-Wasserstrahltrennen. Der kontinuierlich wirkende Wasserstrahl ruft beim Aufprall auf das Werkstück einen Mikroabtrag am Material hervor. Aufgrund der fehlenden Abrasivpartikel ist dieser im Vergleich zum Abrasiv-Wasserstrahltrennen signifikant geringer. Beim Reinwasserstrahltrennen bestimmen folgende Maschinenparameter das Schneidergebnis: Vorschubgeschwindigkeit, Wasserdruck, Düsendurchmesser und Düsenabstand zum Werkstück. Der Vorteil dieser Verfahrensart ist die hohe Präzision aufgrund der geringen Schnittfugenbreite von bis zu 0,08 mm (KOLB 2013). Dies erlaubt eine Herstellung komplexer Geometrien.

2.3.3.2 Anwendungen

Mit dem Abrasiv-Wasserstrahl können kompakte, harte und spröde Materialien, wie etwa sämtliche Metalle, Glas, Keramik, Gestein, Holz und verschiedene Kunststoffe, bis zu einer Härte von 9 gemäß der Härteskala nach Mohs getrennt werden (AWISZUS ET AL. 2016, FRITZ & SCHULZE 2015). Bei diesem Verfahren können Bauteilhöhen bis zu einem definierten Grenzwert realisiert werden. Ausschlaggebend dafür ist die resultierende Beschaffenheit der Schnittkante. Hinsichtlich einer optimalen Schnittkante können Materialien wie Glas und Stein bis zu einer Höhe von 120 mm sowie Metalle bis zu einer Materialstärke von 80 mm getrennt werden (AWISZUS ET AL. 2016). Das Abrasiv-Wasserstrahltrennen wird des Weiteren für die Fertigung von sogenannten Blisken (*blade integrated disk*), die im Triebwerk- und Turbinenbau eingesetzt werden, verwendet (KOCKE ET AL. 2015). Dabei muss der Wasserstrahl Hochtemperaturwerkstoffe, wie beispielsweise Inconel 718, zerteilen.

Bei der Anwendung des Abrasiv-Wasserstrahlrensens muss das sogenannte Kerbspitzenverhältnis beachtet werden, das aufgrund der Mikrozerspanung des Werkstoffs durch das Abrasivmediums entsteht (AWISZUS ET AL. 2016, FRITZ & SCHULZE 2015). Das Kerbspitzenverhältnis wird durch die Schnittfugenbreite am Ein- und Austritt definiert und beschreibt den Quotienten aus oberer Kerbweite K_O zur unteren Kerbweite K_U , was in Abbildung 2.16 zu sehen ist. Bei sehr großen Schneidgeschwindigkeiten ist die obere Kerbweite größer als die untere Kerbweite, bei kleinen Schnittgeschwindigkeiten verhält es sich umgekehrt (FRITZ & SCHULZE 2015). Der Abrasiv-Wasserstrahl verliert mit wachsender Schnitttiefe aufgrund der Reibungsverluste an den Schnittflächen ständig an Energie (RISSE 2012). Ausgehend von dieser Gegebenheit verringert sich die Güte der Schnittkante kontinuierlich mit der Schnitttiefe, was bei kompakten und harten Materialien zum sogenannten Rillennachlauf führt. Dies bedingt, dass die Oberflächengüte der Schnittkante bei hohen Werkzeugvorschüben abnimmt. Die beschriebenen Einflussfaktoren des Abrasiv-Wasserstrahlrensens sind in Abbildung 2.16 schematisch dargestellt.

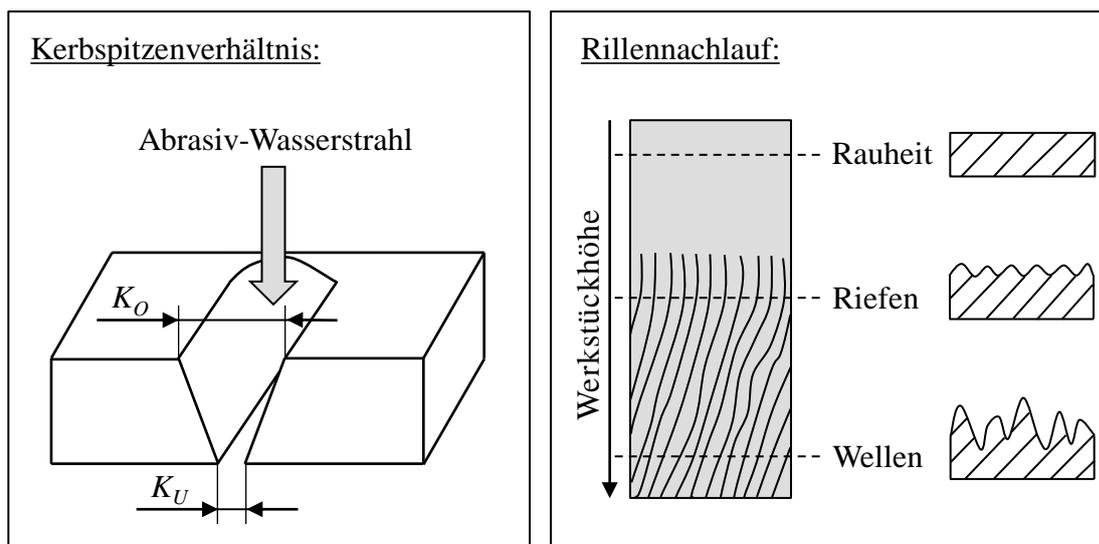


Abbildung 2.16: Kerbspitzenverhältnis und Rillennachlauf beim Abrasiv-Wasserstrahlrennen in Anlehnung an FRITZ und SCHULZE (2015) sowie AWISZUS ET AL. (2016)

Das Abrasiv-Wasserstrahlverfahren wird für das Trennen von faserverstärkten Kunststoffen industriell eingesetzt (BABU RAO ET AL. 2009, BIERMANN ET AL. 2008, UHLMANN ET AL. 2014). Es ist zu beachten, dass falsch gewählte Verfahrensparameter innerhalb des zu bearbeitenden faserverstärkten Kunststoffs zu einer Schichtablösung führen (sog. Delamination). Dabei schwimmen die Abrasivpartikel das ausgehärtete Harzsystem aus, was zur Delamination führt (SHANMUGAM ET AL. 2008).

Das Reinwasserstrahltrennen eignet sich aufgrund der begrenzten Schneidleistung durch das fehlende Abrasivmedium zum Zerteilen von dünnwandigen Metallen bzw. Kunststoffen, Papier, Schaumstoffen, Lebensmitteln und Textilien (RISSE 2012). Nach ZAREMBA (2017) wird dieses Verfahren auch bei Arbeitsabläufen wie dem Reinigen, Entschichten oder selektiven Abtragen angewandt. Die trennbaren Materialstärken bei kompakten und harten Werkstoffen betragen beim Reinwasserstrahltrennen nur wenige Millimeter, jedoch können diese mit sehr hohen Werkzeugvorschüben im Vergleich zur Abrasiv-Wasserstrahltechnologie zerteilt werden (AWISZUS ET AL. 2016).

Das Kerbspitzenverhältnis und der Rillennachlauf müssen beim Reinwasserstrahltrennen nicht beachtet werden, da der Prozess der Mikrozerspanung nicht besteht (RISSE 2012). Das Material wird aufgrund der extremen Energiedichte des Wasserstrahls zerteilt. Dabei bricht das Material auf der Oberfläche des angeströmten Körpers infolge des vorherrschenden Staudrucks. Der Wasserstrahl übt dabei keinen direkten Anpressdruck auf den Werkstoff aus, weshalb das Material nicht deformiert wird (FRITZ & SCHULZE 2015). Ausgehend von diesem Effekt können duktile Werkstoffe mit der Reinwasserstrahltechnologie nur bedingt getrennt werden (KOLB 2013).

Das Zerteilen von faserverstärkten Kunststoffen ist mit dem Reinwasserstrahltrennen nicht möglich. Zum einen führt der lokal eingebrachte Staudruck des Wassers zu einer sichtbaren Delamination des Werkstoffs, zum anderen ist die Schneidleistung für einen Trennvorgang zu gering.

2.3.3.3 Eingrenzung auf Kohlenstofffasern

Das Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien unterscheidet sich vom Schneidprozess solider Materialien wie Stahl oder Aluminium (KOLB 2013). Aufgrund der Anisotropie der Kohlenstofffasern ist dies beim Trennprozess zu berücksichtigen (CHERIF 2011). Ausgehend von dieser Prämisse muss zu jeder Kohlenstofffaserart eine gesonderte Untersuchung der Maschinenparameter durchgeführt werden.

Laut VOIT ET AL. (2014) ist das Abrasiv-Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffasern nicht in der Praxis anwendbar. Die Abrasivpartikel lagern sich zwischen den Fasern ein, was im weiteren Verarbeitungsprozess bei der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen zu Ausschuss führen kann. Dabei verhindern die Abrasivpartikel die vollständige Vernetzung der Fasern mit dem Harzsystem. Dies kann bei intensiver

Beanspruchung des Materialverbunds zu einer Schichtablösung innerhalb des Kunststoffes führen (EHRENSTEIN 2006). Verdeutlicht wird dies in Abbildung 2.17 – es wurden mehrere Probeschnitte mit den unterschiedlichen Verfahrenstechnologien des Wasserstrahltrennens durchgeführt.

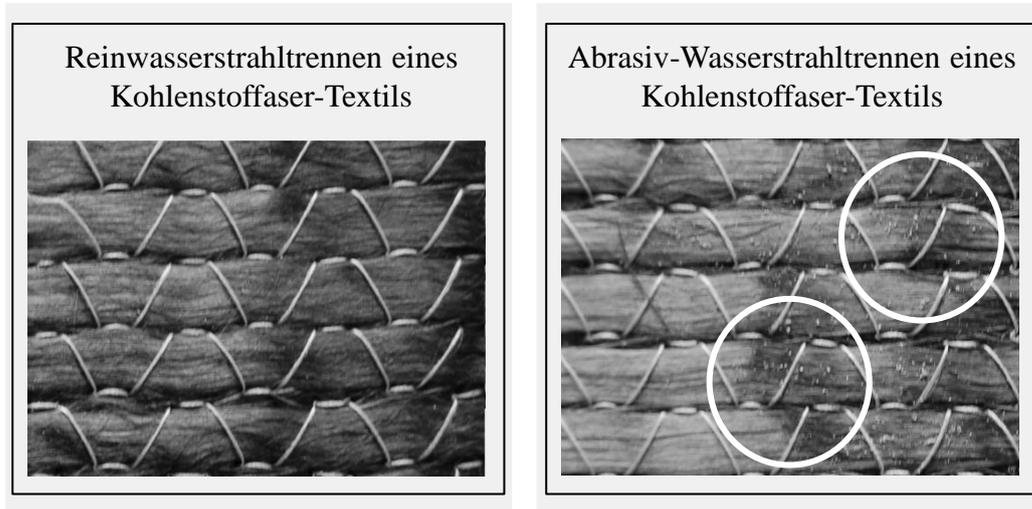


Abbildung 2.17: Vergleich der Oberflächen der Rein (links)- und der Abrasiv-Wasserstrahlzuschnitte (rechts); Abrasivablagerungen eingekreist

Das im Abrasiv-Verfahren geschnittene Kohlenstoffaser-Textil weist sichtbare Rückstände der Abrasivpartikel auf, die in Abbildung 2.17 durch eine Markierung gekennzeichnet sind. Diese Rückstände sind nur mit unverhältnismäßigem Aufwand vollständig und ohne Beschädigung des Textils zu entfernen. Aus diesen Gründen wird das Untersuchungsspektrum der vorliegenden Arbeit auf das Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstoffaser-Textilien eingegrenzt.

Generell ist das Abrasiv-Wasserstrahlschneiden, wie in Kapitel 2.3.3 erläutert, in das Fertigungsverfahren *Strahlspanen* einzuordnen. Beim Trennen von Textilien, im Speziellen von Kohlenstoffasern, kann die Einordnung der Reinwasserstrahltechnologie in das Fertigungsverfahren *Strahlspanen* nicht getroffen werden. Der Grund hierfür ist der Aufbau eines Kohlenstoffaser-Halbzeugs, wie in Kapitel 2.2 beschrieben. Trifft der erzeugte hochenergetische Wasserstrahl auf eine Kohlenstoffaser, schert er diese aufgrund des hohen Drucks am Material ab. Dabei erfolgt die Zerteilung des Materials durch Abscheren und nicht – wie etwa bei Metallblechen – durch erosiven Abtrag des Materials. Durch den Aufbau der Kohlenstoffaser-Halbzeuge erfolgt somit ein kontinuierlicher Scherschnitt der Kohlenstoffaser quer zur Faserichtung. Aufgrund dieser Tatsache ist das Wasserstrahltrennen von technischen Textilien, zu denen auch die Kohlenstoffaser zählt, nach DIN 8580 und DIN 8588 der

Hauptgruppe 3 *Trennen*, den Untergruppen 3.1 *Zerteilen* und 3.1.1 *Scherschneiden* zugeordnet. Verdeutlicht wird dieser Sachverhalt in Abbildung 2.18.

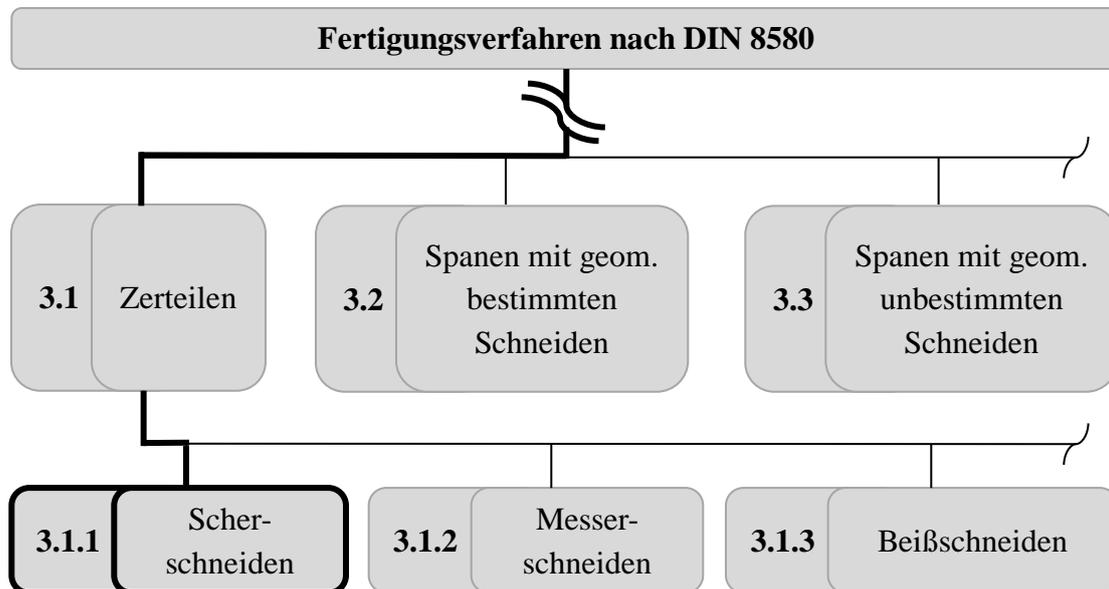


Abbildung 2.18: Ausschnitt der Einordnung des Wasserstrahltrennens von technischen Textilien in Anlehnung an DIN 8588

Nach DIN 8588 erfolgt das Scheren des Materials durch zwei sich aneinander vorbeibewegenden Klingen, wobei eine Schneide durch ein Wirkmedium ersetzt werden kann. In diesem Betrachtungsfall ist der Reinwasserstrahl das Wirkmedium und die Schneidauflage die gegenläufige Schneide. Dabei erfolgt die Krafteinleitung durch das Wirkmedium, welches das Material aufgrund der Schneidauflage abschert. Diese Einordnung des Reinwasserstrahltrennens von Kohlenstofffaser-Textilien ist für das physikalische Prozessmodell in Kapitel 4 essenziell.

Das Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien findet in der industriellen Praxis aufgrund fehlender wissenschaftlicher Betrachtung generell keine Berücksichtigung: Bis dato sind keine weiteren wissenschaftlichen Abhandlungen zur Thematik des Wasserstrahltrennens von Kohlenstofffaser-Textilien bekannt. Das Wasserstrahltrennen ist lediglich für das Trennen von faserverstärkten Kunststoffen wissenschaftlich intensiv untersucht worden (ALBERDI ET AL. 2013, DGUV 2014, LEMMA ET AL. 2002, RAMULU & AROLA 1993, WANG 1999). Diesen Umstand belegt beispielsweise ein allgemeiner Überblick (siehe dazu Abbildung 2.19) bezüglich wissenschaftlicher Quellen zur genannten Thematik: Die Resultate einer nationalen Recher-

che in der Datenbank *SpringerLink* sowie einer internationalen Recherche in der Datenbank *Scopus* durch den Autor verdeutlichen die wissenschaftliche Durchdringung der Thematik.

Weder im deutschsprachigen noch im internationalen Bereich konnten demnach bis zum Jahr 2018 Abhandlungen identifiziert werden, die nicht durch den Autor dieser Dissertation getätigt wurden und das Wasserstrahltrennen als Trenntechnologie für Kohlenstofffasern betrachten. Generell sind keine nennenswerten Untersuchungen für das Wasserstrahltrennen von technischen Textilien feststellbar. Zwar sind Trenntechnologien für Kohlenstofffasern allgemein bekannt (siehe Kapitel 2.3), doch lassen sich dahingehend keine Veröffentlichungen für das Wasserstrahltrennen finden. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 2.19 dargestellt.

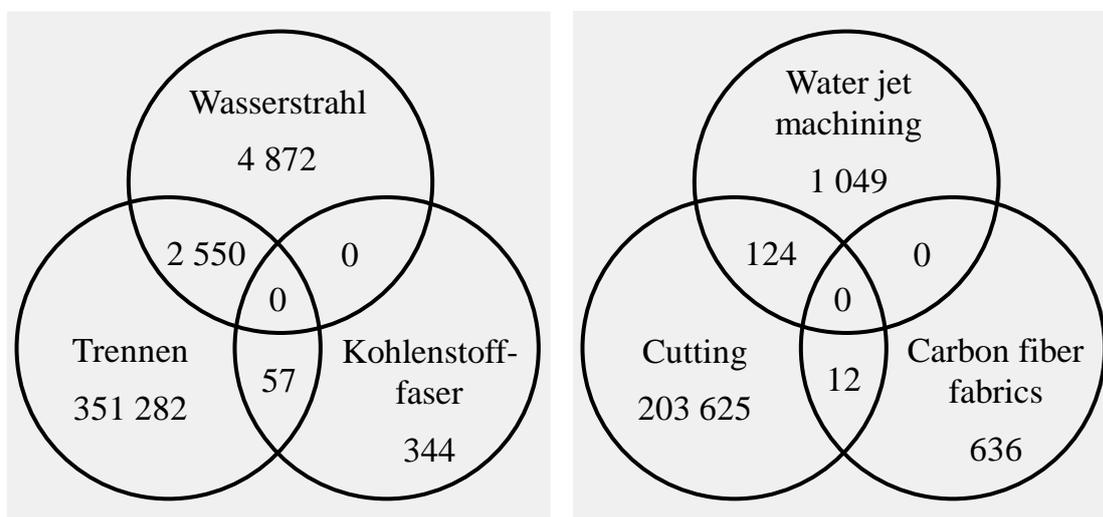


Abbildung 2.19: Ergebnis einer Literaturrecherche zum Kenntnisstand Wasserstrahltrennen, Kohlenstofffaser, Trenntechnologien für technische Textilien (Quellen: *Scopus* und *SpringerLink*, Stand: 11.03.2018)

Abbildung 2.19 muss wie folgt gelesen werden: Die einzelnen Stichpunkte der Kreise spiegeln die angefragten Suchwörter wider und die dazugehörige Zahl die Menge der ermittelten Veröffentlichungen. Hierfür erfolgte eine Recherche der einzelnen Stichwörter sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch. Als Beispiel wurden zum Zeitpunkt der Recherche 351 282 Veröffentlichungen mit dem Schlagwort *Trennen* festgestellt. Die Schnittpunkte der Kreise sowie die eingeschlossene Zahl repräsentieren die Summe der Veröffentlichungen, bei welchen als Beispiel die Schlagworte *Trennen* und *Wasserstrahl* verwendet wurden.

Die wissenschaftliche Betrachtung des Wasserstrahltrennens als zentralen Prozess für das Trennen von Kohlenstofffasern stellt somit ein Novum dar. Hierbei kann weder

auf Untersuchungen geeigneter Trennparameter, wie Vorschubgeschwindigkeit oder Wasserdruck, zurückgegriffen werden, noch können Rückschlüsse zum Prozessverständnis des Trennvorgangs der Kohlenstofffasern getroffen werden. Aus diesen Gründen muss der einfachste Fall eines Kohlenstofffaser-Textils betrachtet werden, um eindeutige Erkenntnisse zum Trennprozess gewinnen zu können. Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, ist die unidirektionale Anordnung der Kohlenstofffaserbündel dabei die einfachste Ausführung dieses Materials.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen auf Grundlage dieser Überlegungen geeignete Trennparameter des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien identifiziert und beschrieben werden; ferner soll ein allgemeingültiger Zusammenhang der Maschinenparameter auf den Trennvorgang der Kohlenstofffaser-Textilien hergestellt werden.

2.4 Schlussfolgerungen und Handlungsbedarf

Der Stand von Technik und Wissenschaft zeigt auf, dass das Trennen von Kohlenstofffasern ein wesentlicher Bestandteil der Prozesskette für die Herstellung faserverstärkter Kunststoffe ist. Des Weiteren sind am Markt verschiedenste Kohlenstofffaser-Textilarten verfügbar. Diese unterscheiden sich aufgrund des Herstellungsverfahrens sowie der jeweiligen Verarbeitungsmethode zum Halbzeug in ihren mechanischen Eigenschaften.

Für das Trennen von technischen Textilien, im Speziellen der Kohlenstofffaser, wird generell zwischen thermischen und mechanischen Verfahren unterschieden. Das Laserstrahltrennen ist dabei ein thermisches Verfahren, bei dem ein Laserstrahl die Kohlenstofffasern sublimiert. Dieses Verfahren zum Trennen von Kohlenstofffasern ist Gegenstand mehrerer wissenschaftlicher Betrachtungen und hält zunehmend Einzug in die industrielle Praxis. Zu den mechanischen Trennverfahren zählt unter anderem das Trennen mittels metallischer Schneide. Dabei zerteilt ein rotierendes Messer die Kohlenstofffaser. Diese Technologie ist in der industriellen Anwendung weit verbreitet.

Als eine weitere mechanische Trenntechnologie gilt das Wasserstrahltrennen. Es wird in zwei Verfahrensarten unterteilt: zum einen das Abrasiv-Wasserstrahltrennen, bei dem Abrasivpartikel zugemischt und durch einen hochenergetischen Wasserstrahl beschleunigt werden, zum anderen das Reinwasserstrahltrennen, bei dem ein Wasserstrahl ohne Zusätze den Materialabtrag hervorruft. Voruntersuchungen ergaben,

2 Stand von Technik und Wissenschaft

dass das Abrasiv-Wasserstrahltrennen für das Trennen von technischen Textilien ungeeignet ist, da die Abrasivpartikel zu Fehlstellen im faserverstärkten Kunststoff führen können. Daher wird das Untersuchungsspektrum dieser Arbeit eingeschränkt und nur das Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien bewertet.

Eine wissenschaftliche Recherche ergab, dass das Wasserstrahltrennen von technischen Textilien, im Speziellen hinsichtlich der Kohlenstofffaser, wissenschaftlich noch nicht ausreichend beleuchtet wurde. Aufgrund der vermuteten Vorteile der Wasserstrahltechnologie ist hier wissenschaftlicher Handlungsbedarf vorhanden, diese Technologie für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien zu beurteilen. Dabei sind die Aufnahme von Wasser durch das Textil sowie die Schnittkantenbeschaffenheit als Herausforderung anzusehen. Aufgrund der Wechselwirkungen übereinanderliegender Faserbündel wird das Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Halbzeugen betrachtet. Dabei lautet die Prämisse, die Materialparameter so einfach wie möglich zu wählen, um eine Aussage über die Maschinenparameter der Wasserstrahltechnologie zu ermöglichen.

Anhand der dargelegten Erkenntnisse zum Stand der Technik und der Wissenschaft wird in dieser Arbeit das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaserarten untersucht.

3 Parameterstudien

3.1 Statistische Versuchsplanungsmethodik

Für das Verständnis der Erläuterungen in diesem Kapitel ist ausschlaggebend, die verwendeten Begrifflichkeiten der Versuchsplanungsmethodik näher zu bestimmen.

In diesem Kapitel ist der *Prozess* als die verarbeitende Einheit und das *System* als die eingesetzte Technologie definiert. Dabei verursachen die jeweiligen Einflussgrößen, die auf den Prozess wirken, eine Änderung des Systemverhaltens. Das *System* oder der *Prozess* wird nur in den jeweiligen Systemgrenzen betrachtet. Dies führt dazu, dass vor- und nachgelagerte Bearbeitungsschritte der Fertigungskette, beispielsweise das Absortieren der Zuschnitte, nicht betrachtet werden müssen. Hierbei ist es jedoch die Prämisse, dass die vor- und nachgelagerten Bearbeitungsschritte durch die Auswirkungen des Systems oder des Prozesses nicht negativ beeinflusst werden. Beispielsweise muss das Absortieren der Zuschnitte ohne behindernde Einflüsse, wie das Anheften mehrerer Lagen untereinander, möglich sein.

Der Begriff *Einflussgröße* beschreibt nach DREYER und MALIG (1993) einen Einstellparameter, der die Änderung eines Systemverhaltens hervorruft. Dabei ist die *Einflussgröße* als Ursache für die Änderung anzusehen. Ferner definiert KLEIN (2014), dass die *Einflussgrößen* in *Stell-* und *Steuergrößen* unterteilt werden. Dabei sollen *Stellgrößen* den angestrebten Wert oder Zustand eines Systems herbeiführen. Die Auswirkungen von *Steuergrößen* auf das System sind nur bedingt erkennbar und sollen optimale Werte der *Zielgrößen* des Systems bewirken.

Zielgrößen wiederum definieren nach KLEPPMANN (2016) den Wert oder Zustand eines Systems, der durch die Veränderung von *Einflussgrößen* hervorgerufen wird. Für die Auswertung der *Zielgrößen* werden *Messwerte* verwendet. Als *Messwerte* sind nach EIREINER (2006) Experimentaldaten bestimmt, die anhand eines Vergleichs mit einem äquidistanten Maßstab ermittelt werden. Zu deren Ermittlung können Skalen mit und ohne absoluten Nullpunkt verwendet werden.

Abschließend ist die *Störgröße* als eine negative Wirkung auf die jeweilige Zielgröße eines Systems beschrieben. *Störgrößen* des Systems können nur bedingt beeinflusst werden (KLEIN 2014).

3.1.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, haben beim Trennen mittels Wasserstrahl verschiedene Einflussgrößen Auswirkungen auf das Schneidgut. Diese Einflussgrößen sind der erzeugte Wasserdruck, die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets, der Düsenabstand zum Werkstück sowie der Düsendurchmesser. Die Vielzahl der zu berücksichtigenden Einflussgrößen erschwert bei der Ein-Faktor-Versuchsmethodik die experimentelle Ermittlung der kausalen Zusammenhänge (EIREINER 2006). Bei dieser Versuchsmethodik variiert nur eine Einflussgröße. Aus diesem Grund steigt der Versuchsaufwand exponentiell an. Soll zum Beispiel das Schneidergebnis in Abhängigkeit der vier genannten Maschinenparameter untersucht und dies jeweils mit sechs verschiedenen Einstellungen vorgenommen werden, ist dafür eine Versuchsreihe mit 6^4 – also 1296 – Messpunkten erforderlich. Diese Beispielrechnung verdeutlicht, weshalb die Ein-Faktor-Methode bei der experimentellen Analyse des Wasserstrahlprozesses von Kohlenstofffaser-Textilien an die gegebenen Grenzen stößt.

Unter den genannten Gegebenheiten wurde die Versuchsdurchführung im Rahmen dieser Arbeit nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung vorgenommen. Diese Methoden erlauben es, komplexe technische Prozesse sowie Systeme zu untersuchen, die von einer Vielzahl an Größen beeinflusst werden. Die Merkmale der statistischen Versuchsmethodik sind, im Unterschied zur Ein-Faktor-Methode, die methodische Anordnung der Messpunkte im Versuchsfeld und die gleichzeitige Variation der Einstellwerte aller Einflussgrößen (EIREINER 2006). Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, den Versuchsaufwand erheblich zu senken und die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu steigern (KLEIN 2014, SCHEFFLER 2001). Die Anwendbarkeit der statistischen Versuchsplanung kann der Literatur entnommen werden (etwa EIREINER 2006, KLEPPMANN 2016, SCHEFFLER 2001).

In den folgenden Abschnitten werden die Kenntnisse der statistischen Versuchsplanung zusammengefasst; in Kapitel 3.1.2 wird eine geeignete Methodik ausgewählt und in Kapitel 3.1.3 auf die Aufgabenstellung angewandt.

3.1.1.1 Präzisierung des Systemverhaltens

Weitere wichtige Aspekte der statistischen Versuchsplanung sind die Beschreibung sowie Präzisierung des zu untersuchenden Systems. Nach DREYER und MALIG (1993) ist für die Präzisierung des Systemverhaltens das Ursache-Wirkung-Prinzip anzuwenden. Dabei werden die Einflussgrößen erfasst, die für eine Änderung des Systemverhaltens verantwortlich sind. Für die Charakteristik des Systemverhaltens müssen zuerst die Zielgrößen bestimmt werden (KLEPPMANN 2016). Letztere hängen von der

zu analysierenden Problemstellung ab. Für unterschiedliche Fragestellungen des Systems müssen jeweilige Zielgrößen definiert werden (SIEBERTZ 2010). Abbildung 3.1 verdeutlicht die Zusammenhänge der einzelnen Parameter des Ursache-Wirkungs-Modells.

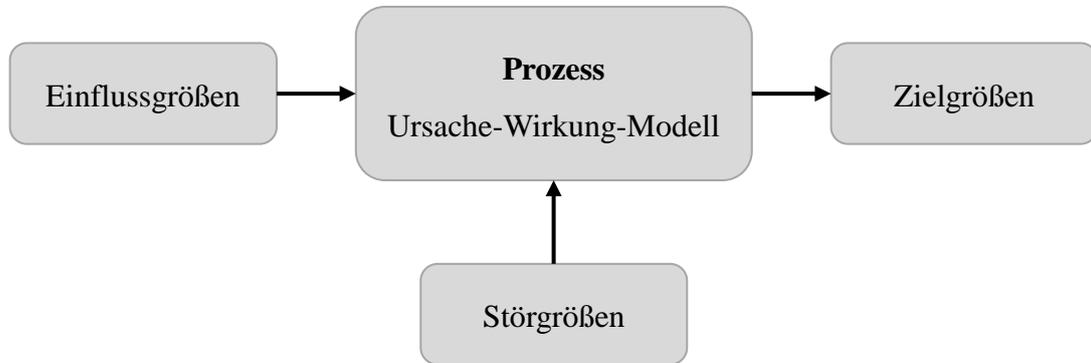


Abbildung 3.1: Beschreibung des Systemverhaltens durch das Ursache-Wirkungs-Modell nach DREYER und MALIG (1993)

Nach dem Ermitteln der Zielgrößen erfolgt die Definition der Einfluss- und Störgrößen des zu untersuchenden Systems (KLEPPMANN 2016). Ausschlaggebend ist dabei, dass alle Ursachen identifiziert werden, die das Systemverhalten beeinflussen. Liegt keine ganzheitliche Identifikation der Einfluss- und Störgrößen vor, kann das zu analysierende System nur unvollständig abgebildet und optimiert werden (EIREINER 2006). Des Weiteren muss ausgeschlossen werden, dass es zu einer Überlagerung von Einfluss- und Störgrößen kommt. Eine solche Überlagerung verhindert eine eindeutige Aussage des Systemverhaltens (SCHEFFLER 2001).

Ein weiterer Aspekt ist die Eingrenzung der Ursachen, da der Versuchsaufwand exponentiell mit Zunahme der Einflussgrößen ansteigt. Dabei ist es von Relevanz, nur Einflussgrößen zu untersuchen, die einen signifikanten Einfluss auf das Systemverhalten besitzen. Diese Auswahl setzt voraus, dass ein detailliertes Prozesswissen vorliegt (KLEPPMANN 2016). Nach DREYER und MALIG (1993) liefern Vorversuche ein erweitertes Prozessverständnis, falls das Systemverhalten nicht eindeutig ist.

Für die Beschreibung des Systemverhaltens ist es zusätzlich erforderlich, den Versuchsraum einzugrenzen. Hierfür sind minimale und maximale Einstellwerte der gewählten Einflussgrößen zu ermitteln, die den Versuchsraum definieren (EIREINER 2006). Die minimalen und maximalen Einstellwerte können entweder durch Vorversuche oder durch theoretische Überlegungen zu den Grundlagen des Funktionsprinzips bestimmt werden (DREYER & MALIG 1993).

Die Charakteristik des Systemerhaltens ist, wie beschrieben, eine wichtige Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Versuchsmethodik, da das Systemverhalten analysiert und eingegrenzt wird. Zu beachten ist dabei, dass die Beschreibung des Systemverhaltens eindeutig sein sollte, da Fehler in dieser Phase im weiteren Verlauf der Versuchsplanung nicht mehr korrigiert werden können. Zusammenfassend ist der grundlegende Ablauf der Charakteristik des Systemverhaltens wie folgt: Festlegen der Zielfunktionen, Definition der Einfluss- und Störgrößen, Reduktion der Einflussgrößen und Konkretisierung des Versuchsraums.

3.1.1.2 Auswertemethoden der statistischen Versuchsplanung

Die Ergebnisse einer Versuchsreihe können aufgrund verschiedener Einflüsse aus Umwelt und gewählter Vorgehensweise unterschiedlich sein (KLEPPMANN 2016). Für die Ermittlung der Aussage einer Versuchsreihe können verschiedene Auswerteverfahren herangezogen werden. Bei der statistischen Versuchsplanung werden die ermittelten Werte mittels der Varianz- oder der Regressionsanalyse betrachtet (KLEIN 2014). Hierbei ist zu beachten, dass alle Versuchsergebnisse aufgrund der Anwendbarkeit der Methodik als Messwerte vorliegen (DREYER & MALIG 1993).

Die Varianzanalyse ist in dieser Arbeit aufgrund ihrer qualitativen Aussage von besonderer Bedeutung. Daher wird die Varianzanalyse nachfolgend genauer beschrieben. Vorgehensweise und Bedeutung der Regressionsanalyse können der Literatur entnommen werden (etwa DREYER & MALIG 1993, EIREINER 2006, KLEPPMANN 2016, MONTGOMERY 2012, SCHEFFLER 2001). Die Regressionsanalyse wird durchgeführt, wenn quantitative Faktoren vorliegen (KLEPPMANN 2016).

Die Varianzanalyse, in der Literatur auch ANOVA (*analysis of variance*) genannt, liefert direkte Rückschlüsse der Bedeutungen von Faktoren für eine Wirkung (KLEIN 2014). Des Weiteren können beliebig viele Messwerte miteinander verglichen werden, ohne dass das Ergebnis durch die Anzahl der Messwerte verfälscht wird (KLEPPMANN 2016). Die Auswertung kann als einfaktorielle oder mehrfache Varianzanalyse erfolgen.

Für die Auswertung der vorliegenden Versuche wird die einfaktorielle Varianzanalyse herangezogen. Nach CZADO & SCHMIDT (2011), HUBER ET AL. (2014) und KLEIN (2014) berechnet die Varianzanalyse im ersten Schritt die Gesamtsummen der einzelnen Messreihen SL_{η} :

$$SL_{\eta} = \sum \eta_i. \quad (3.1)$$

Dabei entspricht η_i der Summe der einzelnen Messpunkte einer Messreihe. Bei mehreren Messreihen müssen die Summen der einzelnen Messreihen zu SL_η aufaddiert werden. Im Anschluss daran können die Mittelwertquadrate aller Zielwerte SQ_m gebildet werden:

$$SQ_m = \frac{(SL_\eta)^2}{n}. \quad (3.2)$$

Hierbei ist n die Anzahl der Messreihen. Ausgehend davon kann die Totalsumme der quadrierten Fehlerabweichung SQ_{Gesamt} gebildet werden:

$$SQ_{Gesamt} = \sum \eta_j^2 - SQ_m. \quad (3.3)$$

Der Wert η_j beschreibt den einzelnen Messwert einer Messreihe. Das bedeutet, dass die Summe aller quadrierten Messwerte gebildet und von den Mittelwertquadraten aller Zielwerte subtrahiert wird. Im nächsten Schritt erfolgt die Bildung der Summe der quadrierten Abweichungen aller Faktoren SQ_X :

$$SQ_X = \frac{(\sum \eta_{i_1})^2}{n_1} + \frac{(\sum \eta_{i_2})^2}{n_2} + \dots + \frac{(\sum \eta_{i_X})^2}{n_x} - SQ_m. \quad (3.4)$$

Dabei entspricht $\sum \eta_{i_1}$ der Summe der Messwerte der ersten Messreihe und n_1 der Anzahl der Messpunkte der ersten Messreihe. Ausgehend von der Summe der quadrierten Abweichungen aller Faktoren kann die Schätzung der Varianzen der einzelnen Faktoren V_X durchgeführt werden:

$$V_X = \frac{SQ_X}{f_X}. \quad (3.5)$$

Der Wert f_X beschreibt den Freiheitsgrad des jeweiligen Faktors X . Neben der Schätzung der Varianz muss auch eine Fehlerdiskussion durchgeführt werden. Hierbei wird generell zwischen Einstell- und Streuungsfehlern unterschieden. Der Einstellfehler nimmt den Wert 0 an, wenn die Stufeneinstellungen der Versuchsmatrix nach Plan durchgeführt wurden. Signifikanter ist der Wert des Streuungsfehlers V_{F2} . Dieser ist wie folgt bestimmt:

$$V_{F2} = \frac{SQ_G}{f_G}. \quad (3.6)$$

Bei dieser Gleichung beschreibt der Wert SQ_G die Summe aller Faktoren mit den geringsten quadrierten Abweichungen und der Wert f_G die Summe der Freiheitsgrade

dieser Parameter. Im letzten Schritt der Varianzanalyse kann die prozentuale Bedeutung des jeweiligen Faktors ermittelt werden:

$$p_X = \frac{SQ_X - f_X \cdot V_{F2}}{SQ_{Gesamt}} \cdot 100. \quad (3.7)$$

Der Wert p_X bestimmt die prozentuale Bedeutung eines Parameters im System. Zeigt der Wert einer Einflussgröße im System die größte prozentuale Bedeutung, ist dieser Wert für die untersuchte Zielfunktion am einflussreichsten.

Anhand der dargestellten Grundlagen der statistischen Versuchsplanung ist erkennbar, dass die Auswahl einer geeigneten Methodik unerlässlich ist. Für die Analyse des Systemverhaltens der Wasserstrahltechnologie auf den Anwendungsfall der unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien bietet die Vorgehensweise nach TAGUCHI (1989) mehrere Vorteile. Für die Benutzung dieser Versuchsmethodik müssen die grundlegenden Maschinenparameter bekannt sein, was bei dieser Betrachtung zutrifft. Des Weiteren müssen die Einflussgrößen voneinander prozesssicher einstellbar sein. Das heißt, dass die jeweiligen Maschinengrößen unabhängig voneinander durch den Anwender eingestellt werden können. Diese Voraussetzung ist bei der Versuchsanlage gegeben, sodass die Versuchsplanungsmethodik angewendet werden kann. Anhand von Matrixexperimenten lässt sich der Versuchsumfang bei gleichbleibender Systemaussage signifikant reduzieren. Diese Vorgehensweise der Versuchsplanung nach Taguchi wird im Folgenden näher beschrieben.

3.1.2 Versuchsplanungsmethodik nach Taguchi

Die Versuchsmethodik nach Gen'ichi Taguchi wurde von diesem zur statistischen Qualitätsplanung auf Basis der sogenannte Robust-Design-Philosophie entwickelt (TAGUCHI 1989). Nach HOLST (1995) ist die Vorgehensweise der Taguchi-Methode wie folgt: Nach der Parameteridentifikation werden Matrixexperimente mit hochvermengten Feldern durchgeführt und mit einer statistischen Beweisführung abgeschlossen. Eine Voraussetzung für die Durchführung der Taguchi-Methode besteht darin, dass die Parameter voneinander unabhängig sind und keine Wechselwirkungen vorliegen (TAGUCHI 1989). Als Beweis muss daher die Unabhängigkeit der Parameter geprüft werden. Nach KLEIN (2014) kann ein Prozess nur dann gezielt beeinflusst werden, wenn die Wirkung einzelner Parameter bekannt ist. Aus diesem Grund müssen zu Beginn einer Robust-Design-Analyse eine Parameteridentifikation sowie eine Parametereingrenzung durchgeführt werden. Für die Identifikation der Parameter erfolgt die Klassifizierung anhand von Stell-, Steuer- und Störgrößen, wie in Kapitel 3.1.1.1 beschrieben.

Zur Planung der jeweiligen Versuchsreihen wird ein abgewandeltes Konzept für hochvermengte Matrixexperimente unter Verwendung orthogonaler Felder herangezogen, die teilfaktorielle Versuchspläne beschreiben (QUENTIN 1994). Ein Matrixexperiment stellt einen minimalen Umfang erforderlicher Kombinationen der Parameter dar. Nach KLEIN (2014) lässt sich der Versuchsaufwand dadurch mehr als halbieren. Für die Versuchsplanung kann aus vorgefertigten Versuchsmatrizen gewählt werden, deren Selektion anhand der Anzahl der Steuergrößen erfolgt.

Zur Auswertung der Matrixexperimente wurde das sogenannte Signal-Rausch-Verhältnis eingeführt. Die Einheit dB des Signal-Rausch-Verhältnisses nutzt die Taguchi-Methode als verallgemeinerte physikalische Quantifizierung (KLEIN 2014). Die Vorgehensweise zur Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses ist in Kapitel 3.2.3 näher erläutert.

Zur statistischen Beweisführung werden das ANOM (*analysis of means*)- und das ANOVA-Verfahren herangezogen (CZADO & SCHMIDT 2011). Das ANOM-Verfahren ermittelt die Optimierungsrichtung der einzelnen Steuergrößen. Durch Auftragung der Matrixexperimentergebnisse können Rückschlüsse auf die Bedeutung eines Faktors bezüglich dessen Wirkung gezogen werden (KLEIN 2014). Eine große Spannweite der Faktorwerte ist gleichbedeutend mit einer starken Wirkung auf das System. Eine kleine Spannweite der Faktoren weist auf eine schwache Einflussnahme hin. Nach BLOBEL und LOHRMANN (2012) ist dabei entscheidend, ob es sich um ein Minimierungs- oder ein Maximierungsproblem handelt. Ist bei einem Maximierungsproblem mit Daten zwischen 0 und $-\infty$ der Faktor nahe 0, so ist nach dem ANOM-Verfahren der Wert eines Faktors am einflussreichsten. Das nach KLEIN (2014) inhaltsreichere Auswerteverfahren ist jedoch die Varianzanalyse.

3.1.2.1 Identifikation des Systemverhaltens

Für die Untersuchung des Systemverhaltens des Reinwasserstrahltrenns von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien ist die Ermittlung der Zielgrößen ausschlaggebend. Diese wurden auf Basis der Ausführungen zum Stand der Wissenschaft und Technik definiert; sie sind nachfolgend näher erläutert.

Beschaffenheit der Schnittkante

Die Beschaffenheit der Schnittkante ist für den weiteren Verarbeitungsprozess der faserverstärkten Kunststoffe von hoher Bedeutung (siehe Kapitel 2.2). Nach SCHÜR-MANN (2007) beeinflusst vor allem die Ausrichtung der Faserbündel die Struktureigenschaften der Bauteile. Daher ist es notwendig, einen Verzug von Fasern innerhalb

3 Parameterstudien

der Textilstruktur zu minimieren. Dieser Verzug ist schon während des Trennprozesses der Halbzeuge zu vermeiden. Eine geradlinige Beschaffenheit der Schnittkante sowie ein geringer Faserauszug des Kohlenstofffaser-Textils sind für die Qualität der resultierenden Bauteilkante des faserverstärkten Kunststoffes unerlässlich. Nach CHERIF (2011) kann diese Bauteilkante zwar mittels Fräsen oder Wasserstrahltrennen nachgearbeitet werden, doch ist dies mit zusätzlichen Kosten verbunden. Aus diesem Grund ist schon während des Trennprozesses der Halbzeuge auf eine ausreichende Qualität der Schnittkante zu achten. Abbildung 3.2 zeigt den Zusammenhang zwischen einer geplanten und einer resultierenden Schnittkante eines verarbeiteten Kohlenstofffaser-Textils. Die Schnittkantenqualität muss für die erläuterten Kriterien bestmöglich sein. Dies bedeutet, dass eine geradlinige Beschaffenheit der Schnittkante, ein möglichst geringer Auszug von Faserbündeln und eine nahezu parallele Anordnung der Faserbündel angestrebt werden.

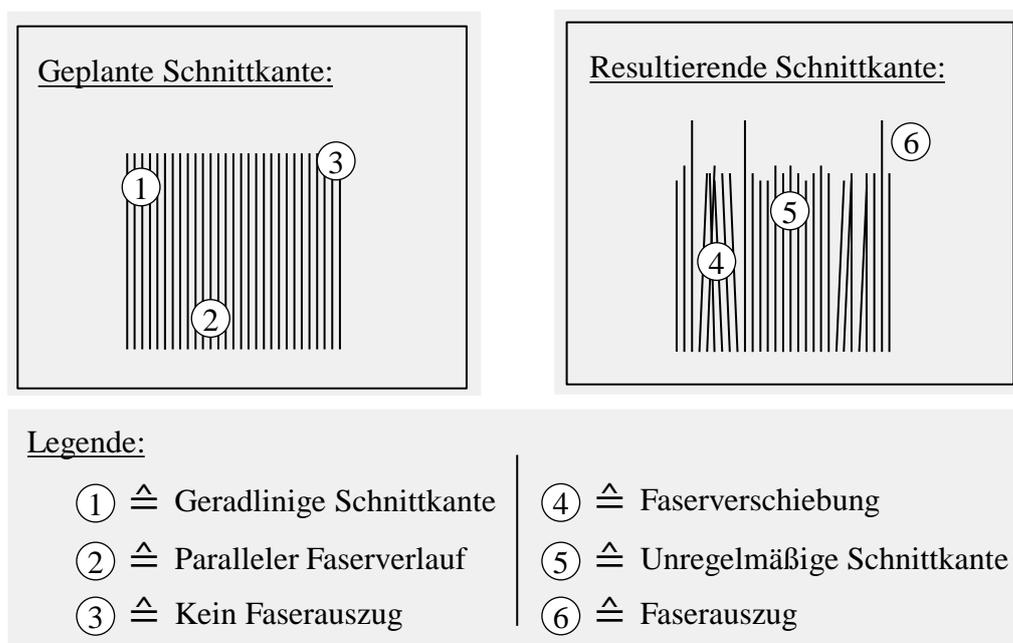


Abbildung 3.2: Schematischer Vergleich einer vorab definierten und einer resultierenden Schnittkante eines Kohlenstofffaser-Textils

Wasserabsorption der Faserstruktur

Die Technologie des Wasserstrahltrennens verursacht in der Faserstruktur der Kohlenstoffbündel Feuchtigkeitsablagerungen. Diese sind zu minimieren, da nach ADAMOW (2014) beim Verarbeitungsprozess zu einem faserverstärkten Kunststoff die Wasserablagerung im Textil zu unerwünschten Reaktionen mit dem Harzsystem füh-

ren können. Dabei kann dieses die Rovings nicht ausreichend vernetzen, was bei Beanspruchung des faserverstärkten Kunststoffes nach EHRENSTEIN (2006) zu Delaminationen der einzelnen Faserschichten führt. Ist ein Wassereintrag in ausreichender Menge vorhanden, muss eine Methode angewendet werden, die die Wasserrückstände vollständig aus dem Textil entfernt. Aufgrund dessen muss die Wasserabsorption der unidirektionalen Kohlenstofffaser-Halbzeuge minimal sein.

Ausgehend von den definierten Zielgrößen *Schnittkantenqualität* und *Wasserabsorption* können die jeweiligen Versuchsparameter der Bearbeitungsaufgabe bestimmt werden.

3.1.2.2 Definition der Versuchsparameter

Die Identifikation der Versuchsparameter ist sowohl für die Maschinen- als auch für die Materialparameter ausschlaggebend.

Im weiteren Vorgehen ist es die Zielsetzung, das Ursache-Wirkung-Modell nach DREYER und MALIG (1993) zu erweitern. Das erweiterte Ursache-Wirkung-Modell lässt sich nach KLEIN (2014) in Stell-, Steuer- und Störgrößen einteilen. Diese Parameter haben Einfluss auf den zu untersuchenden Prozess und erzeugen eine identifizierbare Wirkung auf das System. Verdeutlicht ist dieses Verhalten in Abbildung 3.3. Nachfolgend werden die genannten Parameter näher beschrieben.

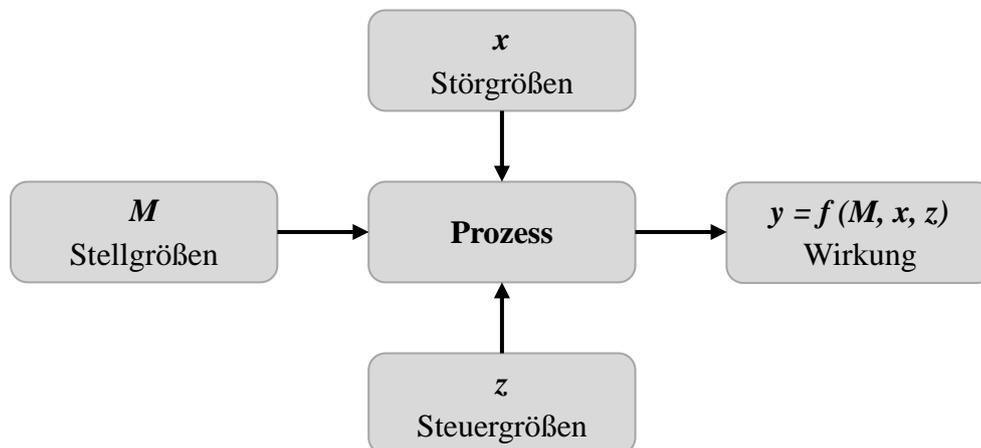


Abbildung 3.3: Parameterdiagramm der Stell-, Steuer- und Störgrößen in Anlehnung an KLEIN (2014)

Die Stellgrößen sind vom Anwender aus dessen Erfahrung heraus eingestellte Parameter. Diese Größen sollen den angestrebten Wert des Prozesses verursachen. Die Einstellung erfolgt nach dem Stand der Technik und ist bestmöglich vorzuzwählen.

3 Parameterstudien

Die Steuergrößen sind frei wählbar. Durch variable Einstellungen der Steuergrößen lassen sich optimale Werte des Prozesses erzielen. Die Auswirkungen der Steuergrößen auf den Prozess sind indessen nur bedingt erkennbar, da Störgrößen die Auswirkungen der Steuergrößen beeinflussen (DREYER & MALIG 1993, KLEIN 2014, KLEPPMANN 2016).

Zur Identifikation der Stell- und Steuergrößen ist ein Vergleich der Maschinenparameter mittels einer Intensitätsbeziehungsmatrix notwendig. Die Validierung erfolgt anhand der Erkenntnisse des Stands der Technik der Wasserstrahltechnologie. Die Intensitätsbeziehungsmatrix der Maschinenparameter für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien wird in Tabelle 3.1 erläutert.

Tabelle 3.1: Intensitätsbeziehungsmatrix der Maschinenparameter der Wasserstrahltechnologie für das Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien

	Düsen- abstand	Wasser- druck	Durch- messer	Vor- schub	Aktiv- summe	Rang
Düsenabstand		0	2	0	2	3
Wasserdruck	2		2	0	4	2
Durchmesser	0	0		0	0	4
Vorschub	2	2	2		6	1
Passivsumme	4	2	6	0	<u>12</u>	
0 $\hat{=}$ geringerer Einfluss		1 $\hat{=}$ gleichwertiger Einfluss		2 $\hat{=}$ höherer Einfluss		

Wie in Tabelle 3.1 ersichtlich, ist der Maschinenparameter *Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets* die einflussreichste Variable. Er hat aufgrund der Verweildauer einen signifikanten Einfluss auf die Schnittkantenqualität und die Wasserabsorption sowie auf die Prozesskosten (KOLB 2013). Der eingestellte Wasserdruck hat laut KRISMANN (1994) einen hohen Einfluss auf die Strahlleistung und somit auf das gesamte Schneidergebnis. Die Strahlleistung muss ausreichend hoch gewählt werden, sodass das Material trennbar ist. Durch Variation des Düsenabstands zum Werkstück

verändert sich die Energiedichte des resultierenden Wasserstrahls (RISSE 2012). Der Düsenabstand muss während der Bearbeitung konstant sein, sodass eine qualitative Aussage getroffen werden kann. Aufgrund der Konstruktion des Düsenpakets und des im Vergleich zu anderen Verfahren geringen Materialverschleißes des Düsensteinmaterials, wird dieser Maschinenparameter als konstante Stellgröße festgelegt. Hierbei ist es ausschlaggebend, dass die Materialien mit einer gleichbleibenden Düsenqualität getrennt werden. Die Maschinenparameter *Wasserdruck*, *Vorschubgeschwindigkeit* und *Düsenabstand* sind für diesen Anwendungsfall als Steuergrößen festgelegt.

Störgrößen haben, wie in Abbildung 3.3 aufgezeigt, eine Wirkung auf das Gesamtsystem. Nach KLEIN (2014) lassen sich Störgrößen nur bedingt beeinflussen. Aus diesem Grund müssen die relevanten Störgrößen identifiziert und ausreichend minimiert bzw. eliminiert werden. Unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik wurden durch Vorversuche mehrere Störgrößen identifiziert, die in Tabelle 3.2 aufgeführt sind.

Tabelle 3.2: Störgrößen des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien

Ermittelte Störgröße des Systems	Auswirkung auf das Material
Entstehung von Wasserdampf	Hohe Auswirkung
Rückstrahlen von Wasser auf das Material	Hohe Auswirkung
Diskrepanz des Wasserdrucks	Niedrige Auswirkung
Differenz der Umgebungstemperatur	Niedrige Auswirkung
Verschleiß der Wasserdüse	Hohe Auswirkung

Als eine der Störgrößen konnte der Wasserdampf identifiziert werden, der durch den Trennprozess im Rahmen der Wasserstrahltechnologie entsteht. Dieser Dampf setzt sich an den Textilien ab und hat somit eine große Auswirkung auf das Material, da dieses durchnässt wird. Der Wasserdampf kann aufgrund der offenen Konstruktion der Wasserstrahlanlage nur bedingt reduziert werden. Aus diesem Grund wird die Luftfeuchtigkeit der Versuchsumgebung protokolliert.

3 Parameterstudien

Auch das Rückstrahlen von Wasser aus dem Auffangbecken beeinflusst die Textilien: Es konnte beobachtet werden, dass die Textilstruktur durch die Energie des rückstrahlenden Wassers zerstört wird. Diese Störgröße hat eine sehr große Auswirkung auf das Material und sollte daher durch eine geeignete Maßnahme eliminiert werden.

Als weitere Störgröße wurde die Schwankung des erzeugten Wasserdrucks ermittelt. Nach FLOW (2014) pendelt der durch die Hochdruckpumpe erzeugte Wasserdruck in einem Bereich zwischen 20 bar und 60 bar. Aufgrund des Verhältnisses zwischen resultierendem und vorab eingestelltem Wasserdruck besitzt diese Störgröße eine geringe Auswirkung auf das Gesamtsystem und wird daher vernachlässigt.

Die Differenz der Umgebungstemperatur besitzt eine geringe Auswirkung auf das System und wird aus diesem Grund für die vorliegende Betrachtung vernachlässigt.

Als letzte Störgröße konnte der Verschleiß der Wasserdüse ermittelt werden. Da es bei dieser Betrachtung die Prämisse ist, dass der Düsendurchmesser einen konstanten Wert behält, muss ein möglicher Verschleiß der Wasserdüse verhindert werden. Eine stark abgenutzte Wasserdüse hat einen negativen Einfluss auf das Schneidgut (PUTZ ET AL. 2016). Nach FLOW (2018) ist ein anhaltender Düsendurchmesser bis zu einer Betriebszeit von 40 Stunden garantiert. Als Sicherheitsfaktor muss die verwendete Wasserdüse bei dieser Betrachtung zu jeder 20. Betriebsstunde gewechselt werden. Durch diese Maßnahme wird die Störgröße des Düsenverschleißes eliminiert.

Tabelle 3.3: Ausgewählte unidirektionale Kohlenstofffaser-Textilien

Art der Faser	Flächengewicht in g/m²	E-Modul in GPa	Zugfestigkeit in MPa	Fixierung der Rovings
HT	50	242	4 137	Einseitiges Haftgitter
HT	80	242	4 137	Einseitiges Haftgitter
HT	120	242	4 137	Einseitiges Haftgitter
HT	200	242	4 137	Einseitiges Haftgitter
HM	100	377	4 410	Beidseitiges Haftgitter
UHM	250	640	2 600	Beidseitiges Haftgitter

Wie in Kapitel 2.3.3.3 beschrieben, werden in dieser Arbeit unidirektionale Kohlenstofffaser-Textilien analysiert. Es wurden diesbezüglich folgende Materialparameter

berücksichtigt: die Art der Faser, das Flächengewicht, die Anzahl der Filamente, die Zugfestigkeit der Faser, der E-Modul der Faser und der Typus der Roving-Fixierung. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurden die in Tabelle 3.3 dargestellten unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien ausgewählt. Die Versuche nach der Taguchi-Methode müssen für jedes ausgewählte unidirektionale Kohlenstofffaser-Textil durchgeführt werden. Ein Bestreben dabei ist es, den Einfluss unterschiedlicher Flächengewichte auf das Ergebnis aufzuzeigen. Des Weiteren müssen verschiedene Arten der Kohlenstofffaser betrachtet werden, sodass eine qualitative Aussage möglich ist. Nach VOIT ET AL. (2014) ist für das Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien die Fixierung der Rovings ausschlaggebend. Fasern mit einer Fixierung durch Schussfäden, die im Vergleich zu den anderen Bindungsarten die geringste Textilfestigkeit aufweisen, können für das Wasserstrahltrennen nicht betrachtet werden. Dabei ist die Adhäsion der Fasern, verursacht durch die Schussfäden, so gering, dass während des Trennprozesses ein drastischer Versatz der Faserbündel beobachtet werden konnte (VOIT ET AL. 2017). Aus diesem Grund ist eine Fixierung der Fasern mittels einseitigem Haftgitter die unabdingbare Voraussetzung für das Trennen von unidirektionalen Fasern unter Einsatz der Wasserstrahltechnologie. Ausgehend von den ermittelten Steuergrößen sind geeignete Parameterstufen zu definieren. Dieses Vorgehen wird nachfolgend näher erläutert.

3.1.2.3 Untersuchung der unterschiedlichen Parameterstufen

Für die ausgewählten Maschinenparameter als Steuergrößen des Systems müssen geeignete Parameterstufen festgelegt werden. Für dieses Vorgehen ist es notwendig, die Grenzen des Gesamtsystems zu bestimmen, da bisher, wie in Kapitel 2.3.3.3 erläutert, keine wissenschaftlichen Untersuchungen zur vorliegenden Thematik bekannt sind. Dafür wurden Voruntersuchungen der in Tabelle 3.3 genannten Kohlenstofffaser-Textilien durchgeführt. Hierbei konnten Grenzparameter ermittelt werden, die für alle getesteten Kohlenstofffaser-Textilien gültig sind. Diese sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

Das schraffierte Areal des Graphen aus Abbildung 3.4 stellt den Bereich dar, innerhalb dessen ein Trennen der Kohlenstofffaser-Textilien möglich ist. Außerhalb dieses Bereichs konnten lediglich unzureichende Ergebnisse erzielt werden. Dazu zählte unter anderem, dass die Textilien nicht vollständig durchtrennt wurden, was beim Ab-sortierprozess zu einer Zerstörung des Textils führte. Ausgehend von diesen Untersuchungen konnten eine maximale Trenngeschwindigkeit $v_{max} = 1000$ mm/min sowie ein minimaler Wasserdruck $p_{min} = 2000$ bar für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffasern ermittelt werden.

3 Parameterstudien

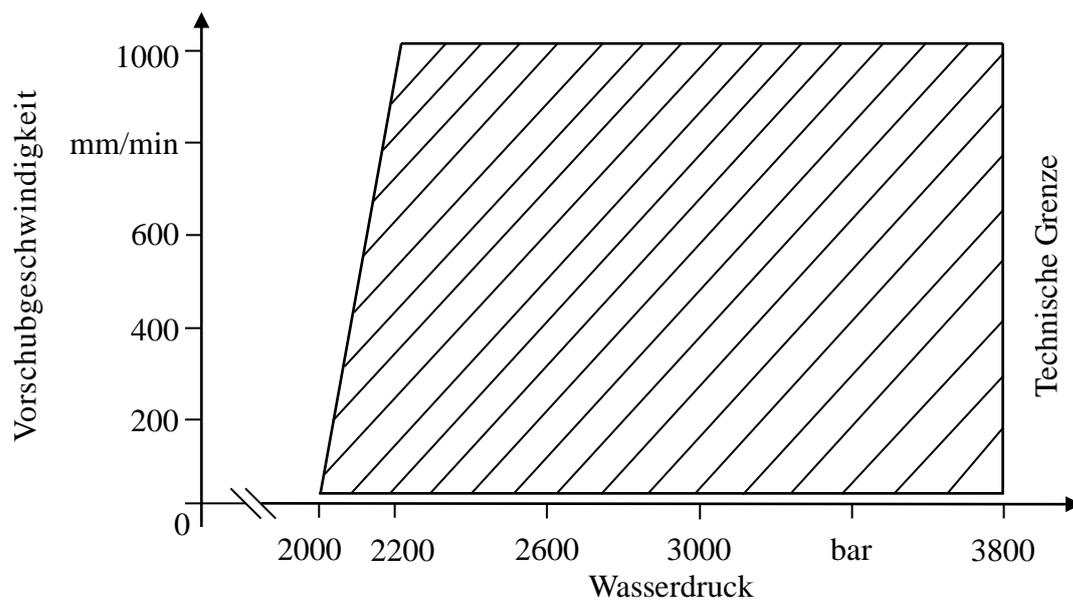


Abbildung 3.4: Ergebnis der Grenzuntersuchungen der Maschinenparameter für unterschiedliche Kohlenstofffaser-Textilien

Um den Einfluss der Maschinenparameter auf die Zielfunktionen zu charakterisieren, wurden anhand der Grenzuntersuchungen vier Faktorstufen gewählt, um die Wirkungsweise der Parameter aufzuzeigen und den Versuchsumfang so gering wie möglich zu gestalten. Des Weiteren sind, wie Abbildung 3.4 darstellt, den jeweiligen Maschinenparametern sinnvolle Abstufungen im Sinne der Systemgrenzen zuzuordnen. Dieser Zusammenhang wird in Tabelle 3.4 aufgezeigt.

Tabelle 3.4: Definition der Parameterstufen

Faktor	Stufen			
	1	2	3	4
A. Wasserdruck	$p_{\min} + 600 \text{ bar}$	$p_{\min} + 1\,000 \text{ bar}$	$p_{\max} - 400 \text{ bar}$	p_{\max}
B. Düsenabstand	$S_T - 2 \text{ mm}$	$S_T - 1 \text{ mm}$	S_T	$S_T + 1 \text{ mm}$
C. Vorschub	$0,2 \cdot v_{\max}$	$0,4 \cdot v_{\max}$	$0,6 \cdot v_{\max}$	$0,8 \cdot v_{\max}$
Ermittelte Werte aus den Vorversuchen (Abbildung 3.4):		$p_{\min} = 2\,000 \text{ bar}; p_{\max} = 3\,800 \text{ bar}$		
		$v_{\max} = 1\,000 \text{ mm/min}$		
Düsenabstand aus KOLB (2013):		$S_T = 5 \text{ mm}$		

Der Wasserdruck muss vom minimalen Druck $p_{min} + 600 \text{ bar}$, bei dem ein Sicherheitsfaktor von 600 bar berücksichtigt ist, bis zum maximalen Wasserdruck p_{max} variiert werden. Dabei ist jeweils eine Abstufung des Wasserdrucks von 400 bar vorgesehen. Diese Unterteilung ermöglicht es, eine Aussage über den gesamten Druckbereich zutreffen.

Der Düsenabstand S_T muss anhand des Stands der Technik ermittelt werden und divergiert um 1 mm. Überdies soll dabei der Stand der Technik bestätigt werden, indem bei Stufe 4 ein größerer Düsenabstand als vom Stand der Technik empfohlen verwendet wird. Dies bedeutet, dass für die letzte Stufe der schlechteste Wert erwartet wird.

Die maximale Vorschubgeschwindigkeit v_{max} des Düsenpakets wurde anhand von Vorversuchen ermittelt. Als Abstufungen sollen Geschwindigkeiten von 20 % bis 80 % der maximalen Vorschubgeschwindigkeit für das Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffasern verwendet werden. Sinn und Zweck des Vorgangs ist es, eine Aussage über den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Zielfunktionen zu treffen.

3.1.3 Präzisieren der Versuchsmatrix und der Ausgangswerte

Für das Verständnis der folgenden Erläuterungen ist eine Begriffsdefinition notwendig. Als Spalte ist dabei die Art des Maschinenparameters beschrieben, als Faktor bzw. Faktorstufe die jeweilige Einstellung des Maschinenparameters.

Aufgrund der gewählten Methode nach Taguchi sind Matrixexperimente nach dem Hochvermischungsprinzip durchzuführen (TAGUCHI 1989). Dabei müssen die Spalten eines Versuchsfelds gegenseitig orthogonal sein, sodass in jeder Spalte alle Faktorstufenkombinationen mit gleicher Häufigkeit auftreten, wodurch kein Faktor bevorzugt wird. Nach KLEIN (2014) ist dabei vorausgesetzt, dass die Faktoren voneinander unabhängig sind und keine Wechselwirkungen vorliegen. Für die Planung der Matrixexperimente ist es weiter noch erforderlich, die Anzahl der Freiheitsgrade für den Gesamtmittelwert der einzelnen Faktoren zu bestimmen (KLEPPMANN 2016).

Der Freiheitsgrad für den Gesamtmittelwert ist eine Konstante mit dem Wert 1. Die Freiheitsgrade der einzelnen Faktoren sind dabei um dem Wert 1 geringer als die Anzahl der Faktorstufen. Da keine Wechselwirkungen angenommen werden, ist die Wertigkeit der Freiheitsgrade der Wechselwirkungen gleich 0 (KLEIN 2014).

3 Parameterstudien

Aus den vorab genannten Schlussfolgerungen ergibt sich ein Gesamtfreiheitsgrad $FHG = 1 + 3 \cdot (4 - 1) = 10$. Nach SCHEFFLER (2001) müssen mindestens zehn Einstellungen vorhanden sein, um die Wirkung der Faktoren zu analysieren. Bei drei Spalten und vier Faktoren ist nach KLEIN (2014) das standardisierte Taguchi-Versuchsfeld $L'_{16} (4^5)$ anzuwenden. Dieses Feld umfasst 16 Zeilen und es können maximal vier Spalten mit fünf verschiedenen Faktoren analysiert werden. Das Versuchsfeld muss für den vorliegenden Fall angepasst werden; es ist dem Anhang A.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.5: Ausgearbeitetes allgemeines Versuchsfeld

Nummer	Parameter		
	A. Druck	B. Düsenabstand	C. Vorschub
1	$p_{min} + 600 \text{ bar}$	$S_T - 2 \text{ mm}$	$0,2 \cdot v_{max}$
2	$p_{min} + 600 \text{ bar}$	$S_T - 1 \text{ mm}$	$0,4 \cdot v_{max}$
3	$p_{min} + 600 \text{ bar}$	S_T	$0,6 \cdot v_{max}$
4	$p_{min} + 600 \text{ bar}$	$S_T + 1 \text{ mm}$	$0,8 \cdot v_{max}$
5	$p_{min} + 1\,000 \text{ bar}$	$S_T - 2 \text{ mm}$	$0,4 \cdot v_{max}$
6	$p_{min} + 1\,000 \text{ bar}$	$S_T - 1 \text{ mm}$	$0,2 \cdot v_{max}$
7	$p_{min} + 1\,000 \text{ bar}$	S_T	$0,8 \cdot v_{max}$
8	$p_{min} + 1\,000 \text{ bar}$	$S_T + 1 \text{ mm}$	$0,6 \cdot v_{max}$
9	$p_{max} - 400 \text{ bar}$	$S_T - 2 \text{ mm}$	$0,6 \cdot v_{max}$
10	$p_{max} - 400 \text{ bar}$	$S_T - 1 \text{ mm}$	$0,8 \cdot v_{max}$
11	$p_{max} - 400 \text{ bar}$	S_T	$0,2 \cdot v_{max}$
12	$p_{max} - 400 \text{ bar}$	$S_T + 1 \text{ mm}$	$0,4 \cdot v_{max}$
13	p_{max}	$S_T - 2 \text{ mm}$	$0,8 \cdot v_{max}$
14	p_{max}	$S_T - 1 \text{ mm}$	$0,6 \cdot v_{max}$
15	p_{max}	S_T	$0,4 \cdot v_{max}$
16	p_{max}	$S_T + 1 \text{ mm}$	$0,2 \cdot v_{max}$

Mithilfe der Definition der Parameterstufen in Tabelle 3.4 und des standardisierten Versuchsfelds kann die resultierende Versuchsmatrix ermittelt werden. Diese ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Anhand des ausgearbeiteten Versuchsfelds und der aus den Vorversuchen zum Trennen von Kohlenstofffasern mittels der Reinwasserstrahltechnologie gewonnenen Daten kann die Versuchsdurchführung in Kapitel 3.2 realisiert werden.

3.1.4 Fazit

Um den vollfaktoriellen Versuchsumfang eines zu untersuchenden Systems bei einer vergleichbaren Aussage zu minimieren, wurden geeignete mathematische Modelle und Methoden von unterschiedlichen Autoren ausgearbeitet. Als anwendbare Methode für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien konnte die Vorgehensweise nach TAGUCHI (1989) identifiziert werden. Dabei ist mit dieser Methode eine signifikante Reduktion des Aufwands im Vergleich zu einem vollfaktoriellen Versuchsumfang möglich. Voraussetzung für die Anwendung der Taguchi-Methode ist, dass die Wirkungen der Einflussparameter des Systems bekannt sind. Die Versuchsplanung wird dabei anhand hochvermenger Matrixexperimente und vorgefertigter Versuchsfelder realisiert.

Als Zielfunktionen für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien konnten die Schnittkantenqualität sowie die Wasserabsorption der Kohlenstofffasern identifiziert werden. Dabei müssen die Schnittkantenqualitäten maximal und die Wasserabsorptionen minimal sein. Anhand des Stands der Technik und der Wissenschaft wurden der Wasserdruck, die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets sowie der Düsenabstand zum Material als Steuergrößen definiert. Diese sollen den angestrebten Wert des Systems verursachen. Aufgrund der geringen Auswirkung des Düsendurchmessers auf das System wurde dieser Maschinenparameter, der im Fortlauf der Versuchsdurchführung konstant ist, als Stellgröße identifiziert. Die relevanten Störgrößen der Technologie wurden bestimmt und geeignete Maßnahmen abgeleitet. Die Störgrößen haben Einfluss auf die Wirkung des Systems und sollen aus diesem Grund eliminiert bzw. reduziert werden.

Anhand des Stands der Technik und der Wissenschaft wurden sechs unterschiedliche unidirektionale Kohlenstofffaser-Textilien ausgewählt. Diese unterscheiden sich in ihren mechanischen und strukturellen Eigenschaften. Dabei ergaben Grenzuntersuchungen eine maximale Vorschubgeschwindigkeit sowie einen minimalen Wasserdruck für das Trennen dieser ausgewählten Kohlenstofffaser-Textilien.

3 Parameterstudien

Ausgehend von den dargestellten Grundlagen und Ergebnissen wurde zu jeder Materialart ein angepasstes Versuchsfeld nach TAGUCHI (1989) ausgearbeitet. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 3.5 verdeutlicht.

Aufgrund der ausgearbeiteten und angepassten Versuchspläne nach der Taguchi-Methode kann die Versuchsdurchführung und -auswertung beschrieben werden. Dies ist Inhalt des folgenden Kapitels.

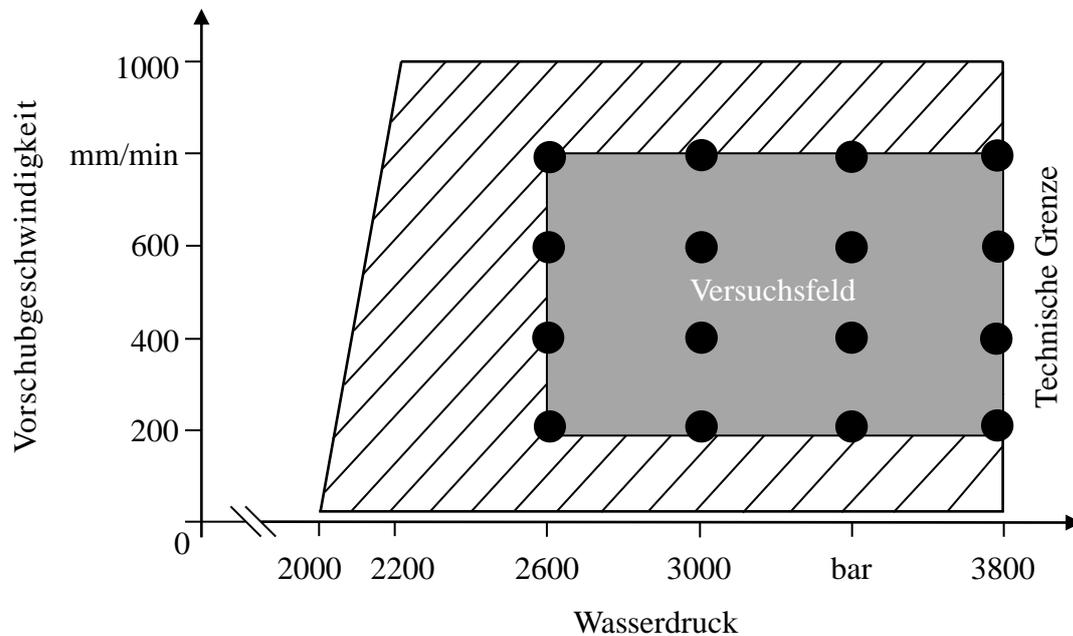


Abbildung 3.5: Darstellung des ausgearbeiteten Versuchsfelds anhand der Grenzüntersuchungen der jeweiligen Materialien

3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

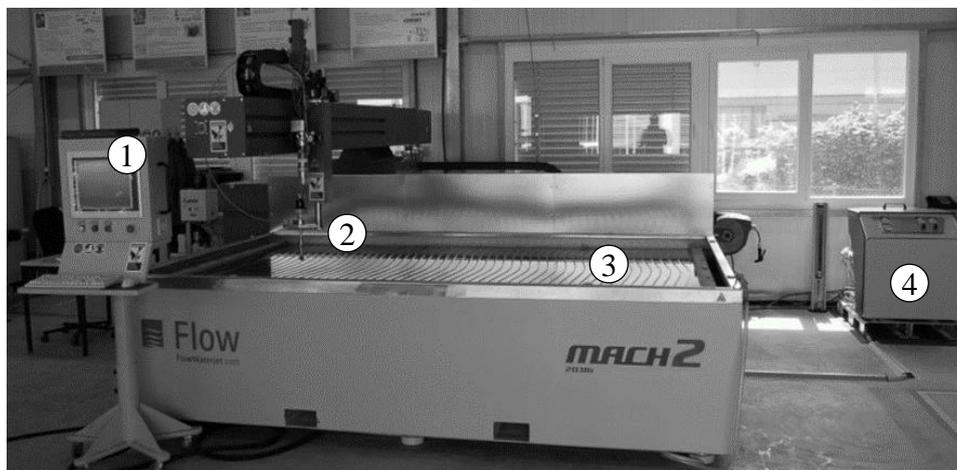
Das in Kapitel 3.1.3 ausgearbeitete Versuchsfeld wird anhand eines Versuchsaufbaus abgearbeitet und ausgewertet. Dazu werden der Versuchsaufbau und die gegebenen Rahmenbedingungen in Kapitel 3.2.1 spezifiziert. In Kapitel 3.2.2 wird eine geeignete Vorgehensweise zur Auswertung der Zielgrößen des Systems erläutert. Kapitel 3.2.3 analysiert die Parametereffekte mit der Taguchi-Methode, während die Auswertung der identifizierten Parametereffekte in den Kapiteln 3.2.4 sowie 3.2.5 erfolgt. Abschließend wird in Kapitel 3.2.6 der Einfluss des Düsenpaket-Schwingungsprofils, welcher durch die Maschinenvorschubgeschwindigkeit verursacht wird, untersucht.

3.2.1 Allgemeines zum Versuchsaufbau

Das beschriebene Versuchsspektrum wurde an einer handelsüblichen Wasserstrahl-schneidanlage des Typs *MACH 2 M2-2031b* der Firma *Flow Europe GmbH* durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine in starrer Bauweise gefertigte und in mehreren Konfigurationen erhältliche Wasserstrahl-schneidmaschine in Ständerbauweise. Die Versuchsanlage ist als 2-D-Kinematik ausgeführt, bei der das Düsenpaket nicht schwenkbar ist. Die verbaute Drehkolbenpumpe des Typs *HyPlex Prime 30* kann einen maximalen Betriebsdruck von 3800 bar erzeugen (FLOW 2014). Die technischen Daten der Versuchsanlage werden in Tabelle 3.6 aufgelistet.

Tabelle 3.6: Technische Daten der Versuchsanlage M2-2031b (FLOW 2013)

Technisches Detail	Werte
Arbeitsbereich in X x Y x Z	3,10 m x 2,00 m x 0,18 m
Positionsgenauigkeit in X und Y	± 0,13 mm/m bei 20,00 °C
Wiederholgenauigkeit in X und Y	± 0,035 mm bei 20,00 °C
Maximale Vorschubgeschwindigkeit	10 140,00 mm/min



Legende: ① ≙ Bedieneinheit	③ ≙ Auffangbehälter
② ≙ Düsenpaket	④ ≙ Hochdruckpumpe

Abbildung 3.6: Versuchsanlage des Typs MACH 2 M2-2031b

3 Parameterstudien

Die Ausführung der Versuchsanlage umfasst ein Auffangbecken, das mit einer Flüssigkeit gefüllt werden kann. Als Schneidauflage dienen Metallstreben, die in einer beliebigen Form angeordnet sein können. Der Aufsatz des Düsenpakets ist modular gestaltet, sodass Abrasiv- wie auch Reinwasserstrahl-Düsenpakete Verwendung finden können. Abbildung 3.6 zeigt die Versuchsanlage des Typs *MACH 2 M2-2031b*.

Für die Durchführung der geplanten Versuchsreihen musste eine geeignete Trägerkonstruktion zwecks Aufnahme und Fixierung der Kohlenstofffaser-Textilien entwickelt werden. Hierfür wurde eine Struktur aus standardisierten sowie korrosionsbeständigen Elementen angefertigt. Dieses System aus Schneidunterlage und Elementen zur Fixierung der Fasern ermöglicht einen schnellen Umbau. Abbildung 3.7 zeigt die so angefertigte Trägerkonstruktion.

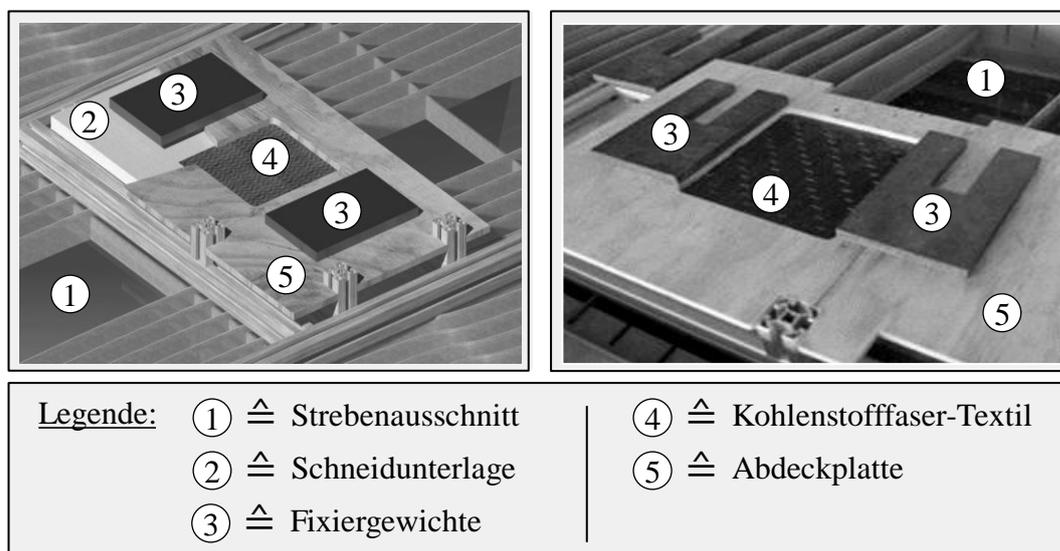


Abbildung 3.7: Darstellung der Trägerkonstruktion für die Kohlenstofffaser-Textilien in einer CAD-Umgebung (links) sowie in der Realität (rechts)

Die Trägerkonstruktion ist modular gestaltet und direkt auf den Streben des Wasserauffangbehälters appliziert. Der Bereich, in dem die Kohlenstofffasern aufliegen, ist von jeglichen Streben befreit, sodass keine Wasserrückstrahlungen entstehen. Die Schneidunterlage ist problemlos und schnell austauschbar. Des Weiteren wurden Dämpfungselemente unterhalb der Konstruktion angebracht, um Vibrationen zu minimieren. Ein Materialanschlag garantiert eine optimale Orientierung der Gelege. Die Kohlenstofffaser-Textilien werden direkt auf die Schneidunterlage aufgelegt und mittels einer Platte sowie Gewichten fixiert. Der Wasserstand des Beckens wurde während der Versuche auf ein minimales Niveau abgesenkt, sodass die Energie eventueller Rückstrahlungen sehr gering ist.

Laut VOIT ET AL. (2017) hat die Unterlage, auf die die Textilien aufgelegt werden, entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis des Trennvorgangs. Sie dient als Fixierung für das Fasermaterial sowie als Schutz vor Umgebungseinflüssen, beispielsweise vor rückstrahlendem Wasser.

Voruntersuchungen ergaben, dass das Material der Schneidunterlage den Wasserstrahl absorbieren muss, was zur lokalen Zerstörung des Unterlagenmaterials führt. Ist die Unterlage so konzipiert, dass der Wasserstrahl aufgrund der mechanischen Eigenschaften des Materials lokal auf das Textil zurückgeworfen wird, führt dies zu einer Deformation des Fasermaterials. Aus diesem Grund muss das Material der Unterlage durch den Wasserstrahl trennbar sein.

Zur Ermittlung eines geeigneten Unterlagenwerkstoffs wurden unterschiedliche Materialien mit folgenden Maschinenparametern getestet: 3800 bar Wasserdruck, 100 mm/min Vorschubgeschwindigkeit, 3 mm Düsenabstand und 0,2 mm Düsendurchmesser. Der resultierende Textilausschnitt wurde optisch mittels eines Lasermikroskops untersucht, sodass die unterschiedlichen Parametereinflüsse ersichtlich wurden. Abbildung 3.8 zeigt verschiedene metallische Wabenkonstruktionen, die als Schneidunterlage getestet wurden. Die Ausführungen der Wabendurchmesser variierten dabei zwischen 5 mm und 20 mm in Stufen von 5 mm.

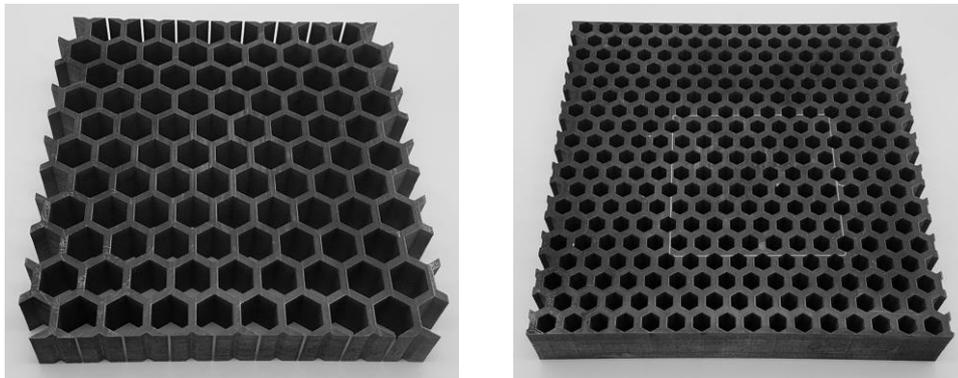


Abbildung 3.8: Additiv gefertigte, metallische Wabenkonstruktionen

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 3.7 dargestellt. Dabei ist die Kategorie *Schutz vor Einflüssen* definiert als Abschirmung des Textils durch Einflüsse aus der Umgebung, etwa durch das Rückstrahlen von Schneidwasser. Des Weiteren beschreibt der *Kostenfaktor* den monetären Aufwand für die Anschaffung von 1 m² Material der Schneidunterlage. Abschließend ist die *Fixierung des Materials* durch

3 Parameterstudien

die Beschaffenheit der Oberfläche des Materials definiert; dies ist wichtig, damit die Textilien während des Schneidvorgangs ihre lokale Position nicht verändern.

Tabelle 3.7: Bewertung der unterschiedlichen Materialien als Schneidunterlage für das Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstofffasern

Material	Schutz vor Einflüssen	Kostenfaktor	Fixierung des Materials
Kunststoffwaben	--	-	++
Metallwaben	--	--	++
Schaumstoff	-	-	+
Styropor	+	++	++
Sperrholz	-	+	++
++ $\hat{=}$ sehr gut	+ $\hat{=}$ gut	- $\hat{=}$ schlecht	-- $\hat{=}$ sehr schlecht

Alle getesteten Materialien zeigten eine gute Fixierung der Kohlenstofffaser-Gelege. Lediglich die Instabilität des Schaumstoffmaterials führte bei der Entnahme der Textilien zu einem Faserverzug. Den günstigsten Anschaffungspreis wies das *Styropor* auf, gefolgt vom Material *Sperrholz*. Dabei wurden die Preise anhand des Einzelhandels ermittelt. Einen sehr hohen Kostenfaktor zeigten die *Metallwaben*, da die Herstellung mittels additiver Fertigung äußerst kostenintensiv ist. Bei Betrachtung der Kategorie *Schutz vor Einflüssen* wiesen die Kunststoff- und Metallwaben die schlechtesten Ergebnisse auf. Die Wabenkonstruktion ermöglicht es dem rückstrahlenden Wasser, die Textilien fast ungehindert zu beeinflussen, was zu Qualitätsverlusten wie etwa Faserverzug führt. Eine Wasserabsorption der Schneidunterlage konnte nur bei den Materialien *Schaumstoff* sowie *Sperrholz* beobachtet werden; dies ist in der Kategorie *Schutz vor Einflüssen* berücksichtigt. Das beste Ergebnis zum Schutz vor Umwelteinflüssen bot das Material *Styropor*. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass dabei eine Materialstärke von mindestens 20 mm verwendet werden muss. Unterhalb dieser Grenze zeigte sich ein Ausbrechen des Schnittmusters aus der Unterlage, was zu einem Verlust der Kohlenstofffaser-Gelege führte. Anhand dieser Untersuchungen wurde für die Versuche das Material *Styropor* mit einer Materialstärke von 40 mm als Schneidunterlage verwendet. Dieses Medium bietet eine gute Fixierung des Materials sowie einen akzeptablen Schutz vor Umgebungseinflüssen und kann kostengünstig beschafft werden.

Die Einstellung der unterschiedlichen Maschinenparameter erfolgt sowohl an den Anlagenkomponenten als auch anhand einer speziellen Maschinensteuerung. Die Parameter *Vorschubgeschwindigkeit* und *Düsenabstand zum Schneidgut* werden mittels einer Software eingestellt, die mit der Maschinensteuerung interagiert. Der Wasserdruck muss für die jeweilige Versuchsreihe konstant sein, sodass Fehler bei der Einstellung des Wasserdrucks ausgeschlossen werden können.

Als Schnittmuster wurde eine rechteckige Grundfläche (75 mm auf 100 mm) gewählt. Diese Geometrie ermöglicht die Betrachtung der Schnittkanten mit einem Winkel von 0° und 90° zur Faserrichtung. Abbildung 3.9 stellt die gewählte Geometrie mit Abmaßen dar.

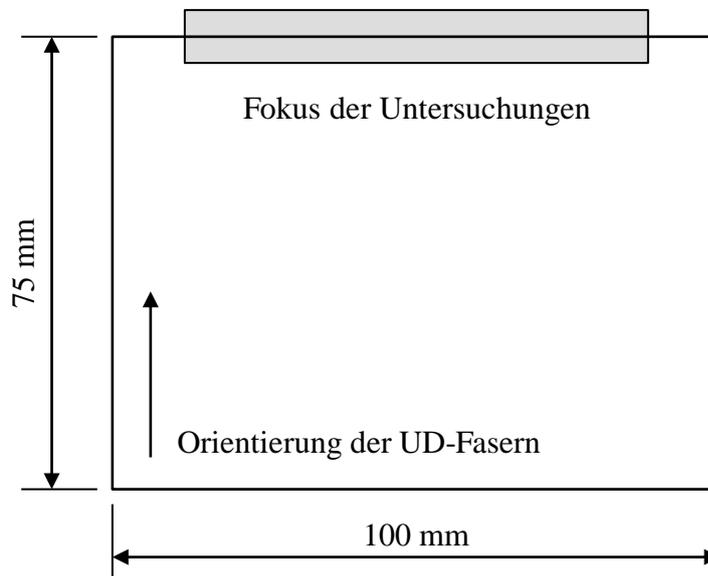


Abbildung 3.9: Schnittmustergeometrie für die Auswertung der Versuchsreihen

Anhand der erläuterten Schnittmustergeometrie werden die jeweiligen Zielgrößen ausgewertet. Dabei ist der Fokus der Untersuchungen auf die Schnittkanten senkrecht zur Faserrichtung gesetzt. Kapitel 3.2.2 beschreibt das Vorgehen zur Auswertung der Zielgrößen.

3.2.2 Vorgehensweise zur Auswertung der Zielgrößen

Für eine Aussage zum Einfluss der Maschinenparameter der Reinwasserstrahltechnologie auf die Zielfunktionen der Kohlenstofffaser-Textilien gilt es, die Zielfunktionen in numerischen Werten auszudrücken (KLEIN 2014). Anhand dieser Werte kann die Auswirkung der einzelnen Maschinenparameter auf die Zielfunktionen berechnet werden.

3 Parameterstudien

Nach SCHÜRMAN (2007) sowie NEITZEL ET AL. (2014) ist es das Ziel, dass Schnittkanten von Kohlenstofffaser-Textilien folgende Merkmale aufweisen: Geradlinige Beschaffenheit der Schnittkante, möglichst geringer Auszug von Faserbündeln und eine nahezu parallele Anordnung der Faserbündel. Eine Abweichung der Struktur der Kohlenstofffaser-Textilien hat dabei negativen Einfluss auf die resultierende Qualität des faserverstärkten Kunststoffs (CHERIF 2011). Aus diesen Gründen wird eine optimale Schnittkantenqualität angestrebt, bestehend aus einer geradlinigen Beschaffenheit, möglichst geringem Faserauszug und einer nahezu parallelen Anordnung der Faserbündel.

Zur Untersuchung der Schnittkantenqualität erfolgt eine Betrachtung der Schnittkanten der durch die Wasserstrahltechnik getrennten Kohlenstofffaser-Textilien mithilfe eines 3-D-Farblasermikroskops vom Typ *VK-9710K* der Firma *Keyence*. Die Bilder wurden in zehnfacher Vergrößerung erstellt. Die Aufnahmen der jeweiligen Schnittkanten können Anhang A.2 entnommen werden. Die Beurteilung der einzelnen Schnittkantenqualitäten erfolgt anhand einer Intensitätsbeziehungsmatrix. Dabei werden die Schnittkantenqualitäten zweier Versuchsexemplare gegeneinander bewertet. Je ein Beispiel für eine besser bzw. für eine schlechter bewertete Schnittkante eines Kohlenstofffaser-Textils, das mithilfe der Reinwasserstrahltechnologie getrennt wurde, zeigt Abbildung 3.10.

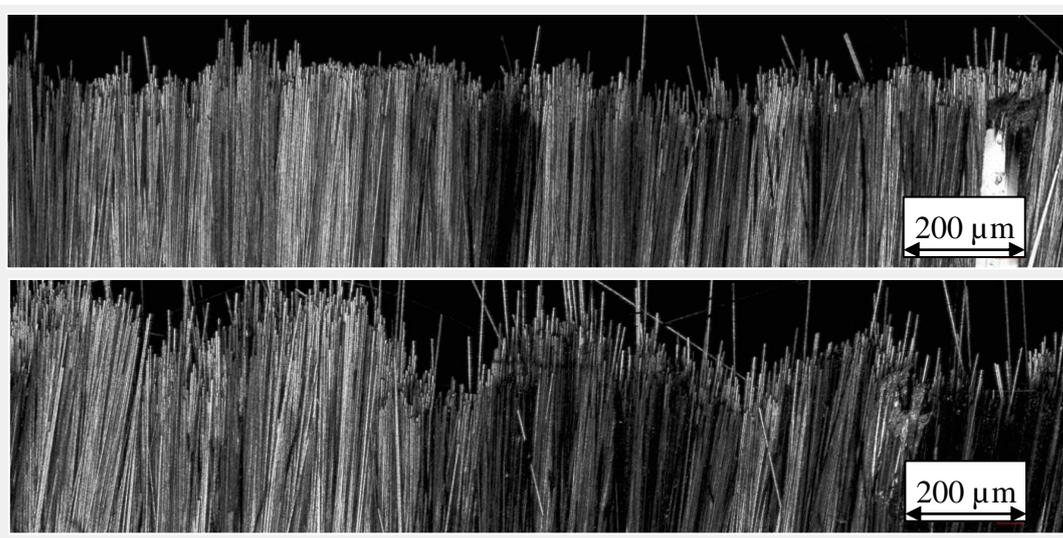


Abbildung 3.10: Mikroskopaufnahmen einer bessern (oben) sowie schlechteren (unten) Schnittkante eines Kohlenstofffaser-Textils

Die Ermittlung der Zielfunktion *Wasserabsorption* erfolgt mithilfe einer Präzisionswaage vom Typ *PLJ 360-3NM* der Firma *Kern*. Die Waage zeigt eine Teilung von

0,001 g sowie einen Eichwert von 0,01 g. Dabei ist zur Ermittlung der Wasserabsorption der Kohlenstofffaser-Textilien in folgender Weise vorzugehen: Das Gewicht des Textils muss direkt nach dem Schneidvorgang sowie nach einer angemessenen Trockenzeit erfasst werden. Vorversuche haben gezeigt, dass sich das Gewicht der Textilien nach einer Trocknungszeit von 24 Stunden nach dem Schneidvorgang nicht verändert. Für die Auswertung der vorliegenden Versuche wurde daher eine Trocknungszeit von 24 Stunden veranschlagt. Anhand des aufgenommenen Schneidwassers und des Trockengewichts der jeweiligen Kohlenstofffasern ist die relative Wasserabsorption zu bestimmen.

Die erläuterten Vorgehensweisen zur Ermittlung der jeweiligen Zielgrößen für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien sind in Abbildung 3.11 schematisch zusammengefasst.

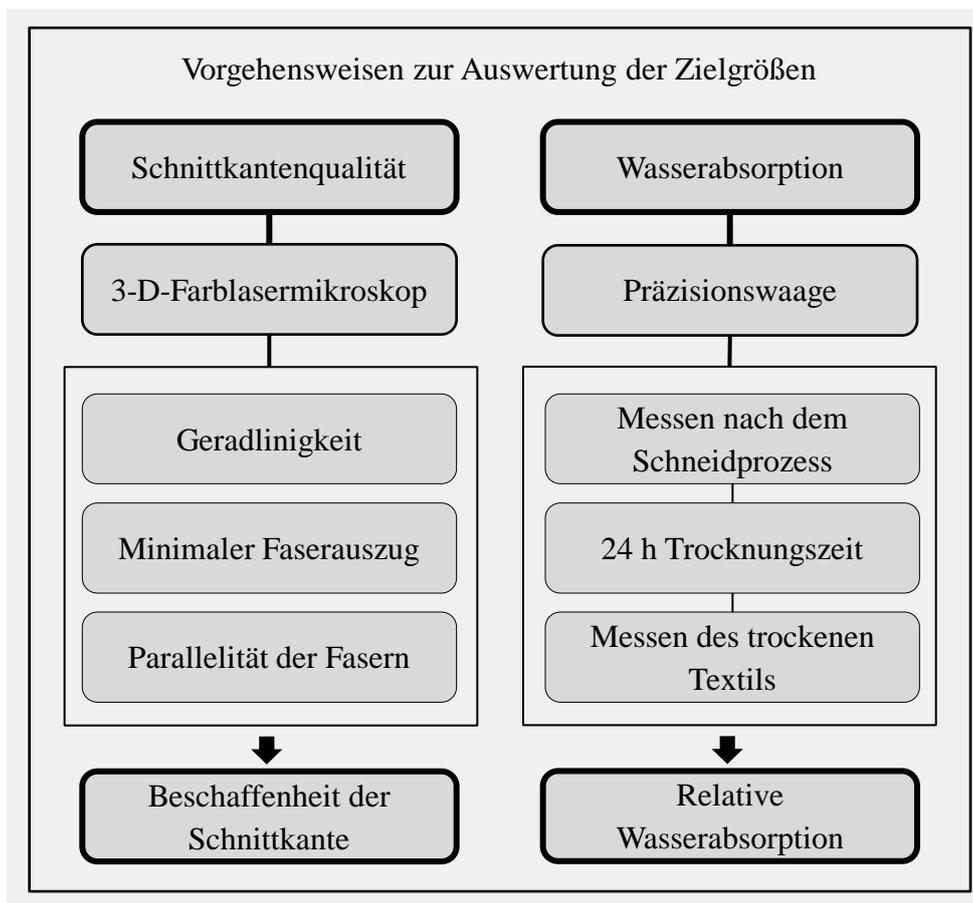


Abbildung 3.11: Zusammenfassung der Vorgehensweisen zur Ermittlung der Ziel-funktionen

3.2.3 Analyse der Parametereffekte

Die Zielfunktionen für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien sind als Maximierungsproblem charakterisiert. Nach KLEIN (2014) können für den Anwendungsfall des Maximierungsproblems die Zielfunktionen einen Wert zwischen 0 und $-\infty$ annehmen, wobei der Idealwert 0 ist. Die Analyse der Parametereffekte kann mithilfe des Signal-Rausch-Verhältnisses η_i in dB vorgenommen werden (TAGUCHI 1989). Dieses wird wie folgt berechnet:

$$\eta_i = -10 \cdot \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \rightarrow \text{MAXIMUM}. \quad (3.8)$$

In Formel 3.8 ist n die Anzahl der durchgeführten Versuche je Parametereinstellung und y_i die Messwerte der jeweiligen Zielfunktion. Des Weiteren beschreibt η_i die Funktion einer Faktoreinstellung, was einer Zeile des ausgearbeiteten Versuchsplanes entspricht.

Um die Wirkung einzelner Maschinenparameter auf die Zielfunktionen zu bestimmen, müssen diese aus den Messdaten abgeleitet werden. Die Wirkung eines Maschinenparameters X sowie dessen Einstellung i wird durch $\eta_{X,i}$ in dB beschrieben und berechnet sich aus:

$$\eta_{X,i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i. \quad (3.9)$$

Rückschlüsse über den Einfluss der einzelnen Maschinenparameter auf die Zielfunktionen sind durch den Abtrag des Signal-Rausch-Verhältnisses $\eta_{X,i}$ in ein Diagramm zu erhalten. Je mehr sich der Wert des Signal-Rausch-Verhältnisses $\eta_{X,i}$ dem Idealwert 0 annähert, desto besser ist die Einstellung der Maschinenparameter für die jeweilige Zielfunktion. Des Weiteren erlaubt die Spannweite der Auftragung Rückschlüsse auf die Wirkung der Maschinenparameter. Eine große Spannweite bedeutet eine starke, eine geringe Spannweite hingegen eine schwächere Wirkung der Maschinenparameter (BLOBEL & LOHRMANN 2012, DREYER & MALIG 1993, KLEIN 2014).

Die beschriebenen Faktorwirkungen η_i sowie $\eta_{X,i}$ wurden jeweils für die Zielfunktionen *Schnittkantenqualität* und *Wasserabsorption* aller getesteten unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien ermittelt. Diese Daten finden sich in den Anhängen A.3 und A.4. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst.

3.2.3.1 Parametereinfluss bei der Betrachtung der Schnittkantenqualität

Bei der Auswertung der Maschinenparameter des Reinwasserstrahltrenns von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien für die Zielfunktion *Schnittkantenqualität* konnten unterschiedliche Optimierungsrichtungen festgestellt werden. Die Optimierungsrichtung gibt an, wie ein Prozessparameter verändert werden muss, um einen positiven Effekt auf die Zielfunktion zu erzielen.

Generell wurden bei allen Gelegen eine optimale Schnittkantenqualität bei einem Düsenabstand von 3 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 800 mm/min festgestellt. Kapitel 4 analysiert die Ursachen der jeweiligen Maschinenparameter. Bei Betrachtung des Einflusses des Wasserdrucks auf die Schnittkantenqualität konnten Unterschiede zwischen den jeweiligen Kohlenstofffaser-Gelegen ermittelt werden. Dies wird in Abbildung 3.12 verdeutlicht. Dabei sind die Faktorwirkungen einer HT-Faser mit 120 g/m² Flächengewicht sowie einer HT-Faser mit 200 g/m² Flächengewicht dargestellt.

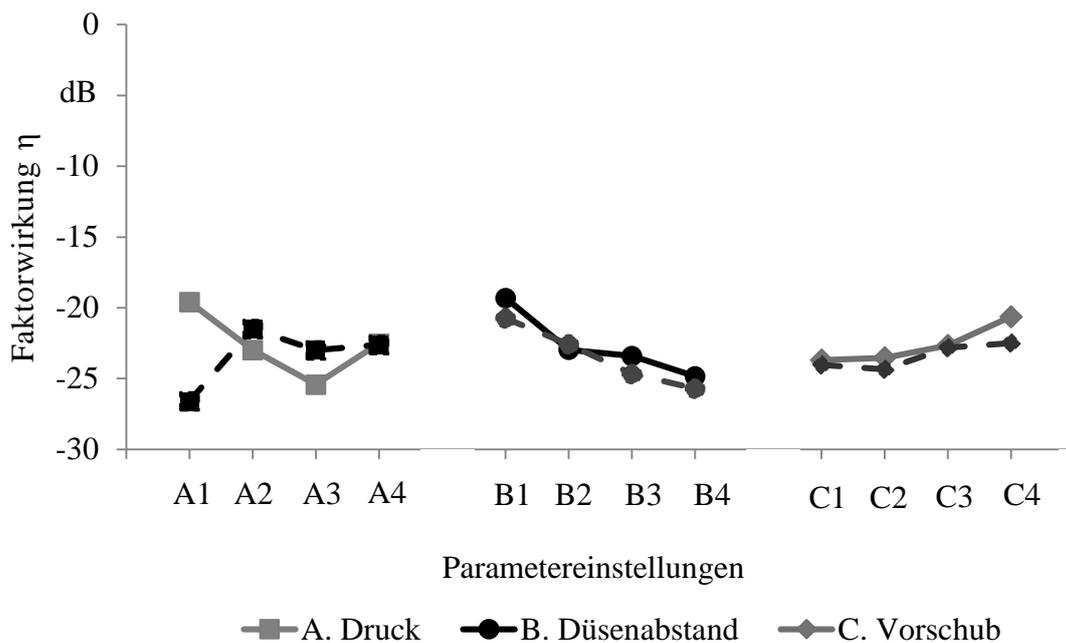


Abbildung 3.12: Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität einer HT-Faser mit 120 g/m² (volle Linie) und 200 g/m² (unterbrochene Linie) Flächengewicht

Dieser Trend der Abweichung der Optimierungsrichtung zeigte sich auch nach Durchführung zweier Bestätigungsexperimente der gesamten Versuchsreihe. Dabei beeinflusst der jeweilige Wasserdruck die resultierende Kraft am Textil, weshalb sich keine Optimierungsrichtung anhand des ANOM-Verfahrens feststellen lässt. Aus den

3 Parameterstudien

erstellten Diagrammen der Faktorwirkungen in Anhang A.3 können die optimalen Maschinenparameter für die Zielfunktion *Schnittkantenqualität* abgeleitet werden. Diese sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Tabelle 3.8: Maschinenparameter für eine optimale Schnittkantenqualität

Gelege	Optimale Maschinenparameter		
	Wasserdruck in bar	Düsenabstand in mm	Vorschub in mm/min
HT 50 g/m ²	3 000	3	800
HT 80 g/m ²	2 600	3	800
HT 120 g/m ²	2 600	3	800
HT 200 g/m ²	3 000	3	800
HM	2 600	3	800
UHM	3 000	3	800

Auf Basis der ermittelten optimalen Maschinenparameter für eine maximale Schnittkantenqualität kann ein Bestätigungsexperiment durchgeführt werden. Die Schnittkanten dieser Maschinenparameter sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

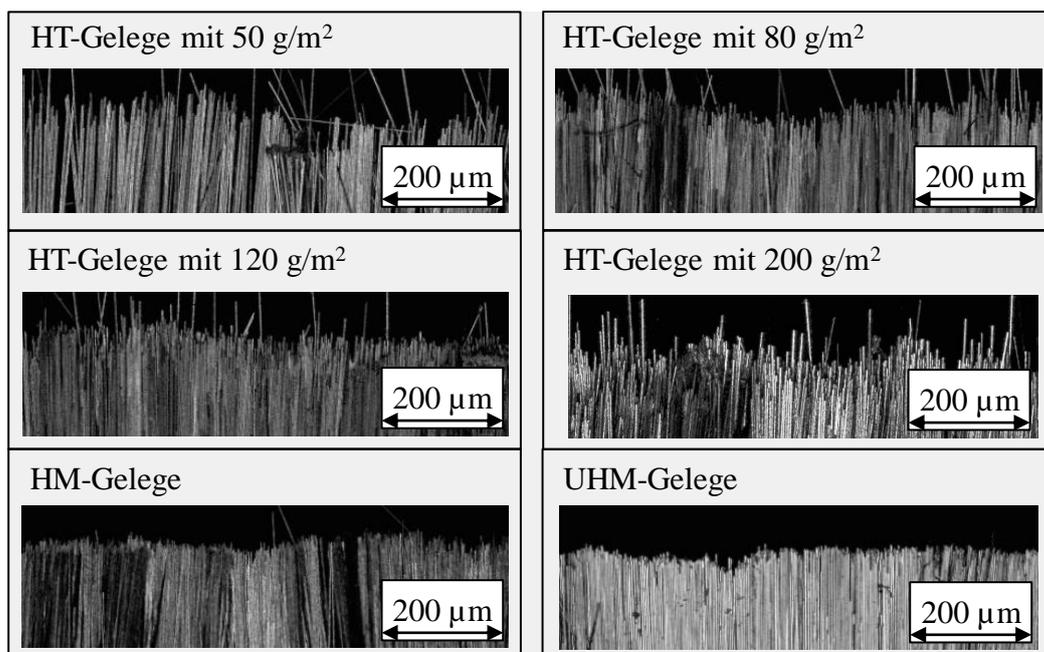


Abbildung 3.13: Schnittkantenqualitäten der optimalen Maschinenparameter

Dabei wird ersichtlich, dass die Schnittkantenqualitäten der optimalen Maschinenparameter im Vergleich mit den Darstellungen der jeweiligen Schnittkanten aus Anhang A.2 die bestmöglichen Ergebnisse erzeugen. Des Weiteren liefern die Schnittkanten der unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien HM und UHM die qualitativ besten Ergebnisse.

3.2.3.2 Einfluss der Maschinenparameter auf die Wasserabsorption

Im Gegensatz zur Auswertung der Schnittkantenqualität von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Gelegen konnte für die Zielfunktion *Wasserabsorption* eine gleichbleibende Optimierungsrichtung festgestellt werden. Die geringste Wasserabsorption bei allen getesteten unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien konnte bei einem Wasserdruck von 2600 bar, einem Düsenabstand von 3 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 800 mm/min erzielt werden. Zur Verdeutlichung der Optimierungsrichtung zeigt Abbildung 3.14 die Faktorwirkung eines HT-Geleges mit 120 g/m² und 200 g/m² Flächengewicht. Die Ergebnisse der Wasserabsorption der gesamten Versuchsreihe können dem Anhang A.4 entnommen werden. Dabei wurden die jeweiligen Faktorwirkungen anhand dreier Versuchsdurchläufe des gesamten Versuchsfelds ermittelt.

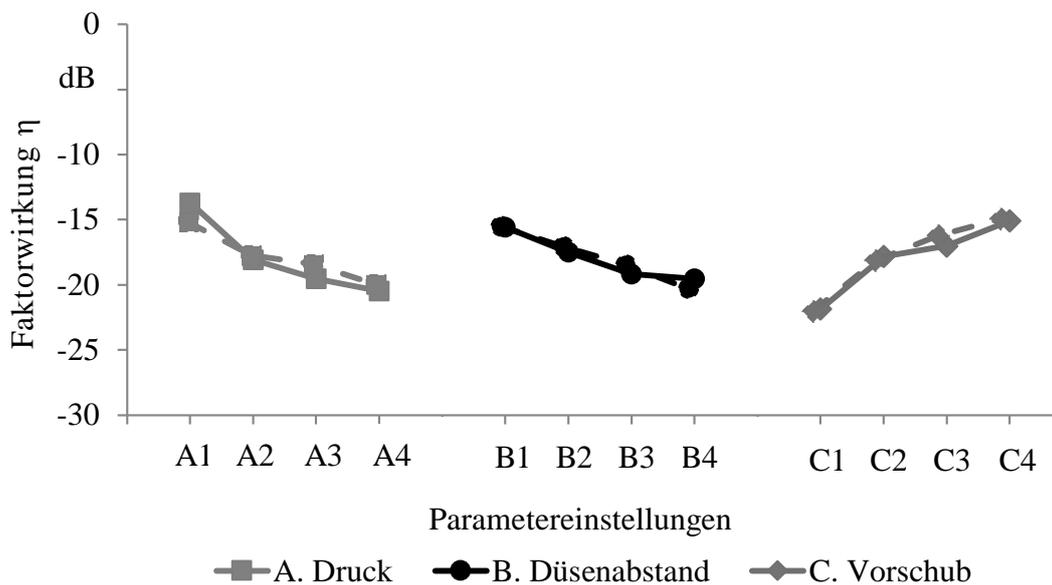


Abbildung 3.14: Faktorwirkungen der Wasserabsorption eines HT-Geleges mit 120 g/m² (volle Linie) und 200 g/m² (unterbrochene Linie) Flächengewicht

Mithilfe der ausgewerteten Diagramme der Faktorwirkungen aller getesteten unidirektionalen Gelege in Anhang A.4 können die optimalen Maschinenparameter für

3 Parameterstudien

eine geringe Wasserabsorption der Textilien bestimmt werden. Diesen Zusammenhang zeigt Tabelle 3.9 auf. Die Ergebnisse der gemittelten Wasserabsorptionen aller getesteten Gelege sind in Anhang A.5 beschrieben.

Tabelle 3.9: Maschinenparameter für eine minimale Wasserabsorption

Gelege	Optimale Maschinenparameter		
	Wasserdruck in bar	Düsenabstand in mm	Vorschub in mm/min
HT 50 g/m ²	2 600	3	800
HT 80 g/m ²	2 600	3	800
HT 120 g/m ²	2 600	3	800
HT 200 g/m ²	2 600	3	800
HM	2 600	3	800
UHM	2 600	3	800

Hinsichtlich der ermittelten optimalen Maschinenparameter für eine minimale Wasserabsorption kann ein Bestätigungsexperiment durchgeführt werden. Die prozentualen Wasserabsorptionen der jeweiligen Textilien mit den Maschinenparametern aus Tabelle 3.9 sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

Tabelle 3.10: Wasserabsorption der Textilien aufgrund der optimalen Maschinenparameter

Gelege	Wasserabsorption
HT 50 g/m ²	3,25 %
HT 80 g/m ²	2,95 %
HT 120 g/m ²	2,87 %
HT 200 g/m ²	2,83 %
HM	1,40 %
UHM	1,10 %

Durch einen Vergleich der gemittelten Wasserabsorptionen aus Anhang A.5 mit den optimalen Werten aus Tabelle 3.9 wird ersichtlich, dass die optimalen Maschinenparameter die geringstmögliche Wasserabsorption erzielen.

3.2.3.3 Protokoll der Umwelteinflüsse

Während der Experimente wurden die Umweltfaktoren protokolliert, etwa Umgebungstemperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Die Verläufe der Umweltfaktoren, die während unterschiedlicher Versuchsreihen aus Tabelle 3.5 aufgenommen wurden, sind in Abbildung 3.15 dargestellt.

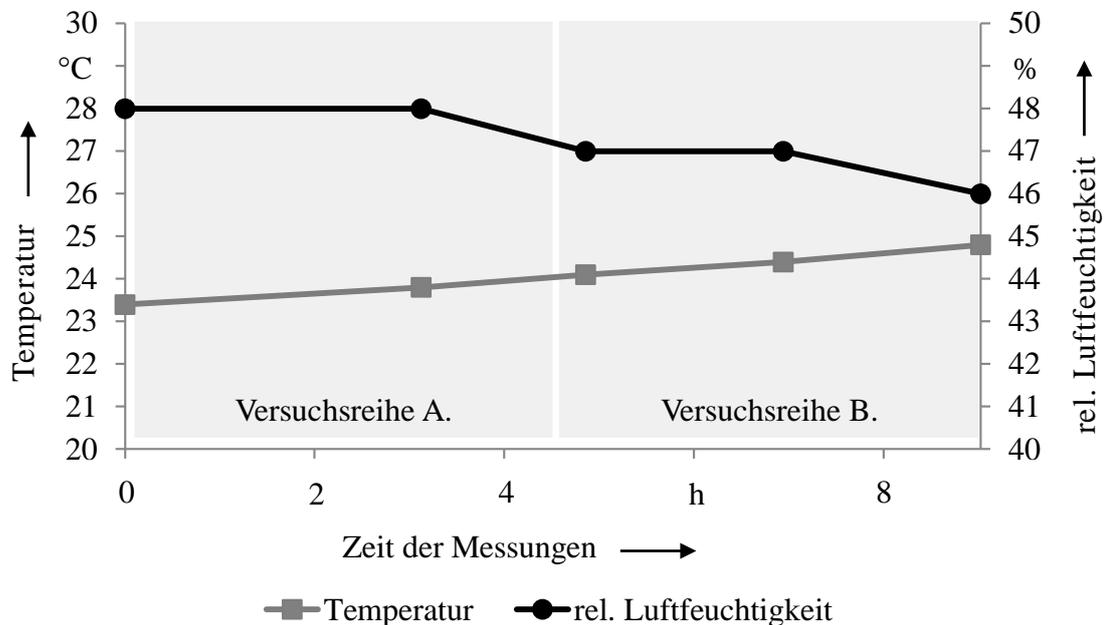


Abbildung 3.15: Protokollierte Umweltfaktoren während zwei Versuchsreihen

Sowohl die Temperatur der Umgebung als auch die Luftfeuchtigkeit unterliegen natürlichen Schwankungen. Es konnte eine maximale Veränderung der Umgebungstemperatur von 1,5 °C sowie der relativen Luftfeuchtigkeit von 2 % festgestellt werden. Aufgrund dieser sehr geringen Differenzen kann nicht von einem Einfluss der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ausgegangen werden.

3.2.4 Quantifizierung der Parameterbedeutung

Wie in Kapitel 3.1.1.2 erläutert, erfolgt eine Analyse der Parameterbedeutung der Zielfunktionen mittels der Varianzanalyse. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 3.11 zusammengefasst.

Tabelle 3.11: Prozentuale Bedeutungen der Maschinenparameter auf die jeweiligen Zielfunktionen (der höchste Wert ist hervorgehoben)

Gelege	Schnittkantenqualität in %			Wasserabsorption in %		
	Druck	Düsen- abstand	Vorschub	Druck	Düsen- abstand	Vorschub
HT 50 g/m ²	22,06	9,71	-9,71	-10,99	10,99	31,96
HT 80 g/m ²	19,86	8,30	-8,30	12,85	-11,84	11,84
HT 120 g/m ²	7,00	6,47	-6,47	15,79	-11,78	11,78
HT 200 g/m ²	15,35	14,12	-15,35	-0,45	0,45	30,57
HM	19,97	-12,83	-19,97	-7,03	7,03	63,60
UHM	33,40	-25,98	-33,40	-14,60	14,60	28,66

Bezogen auf die Schnittkantenqualität weisen alle Gelege die höchste Abhängigkeit vom Maschinenparameter *Druck* auf. Die Bandbreite der Parameterbedeutung schwankt zwischen 7,00 % und 33,40 %. Die Einflüsse des Düsenabstands sowie der Vorschubgeschwindigkeit weisen bei allen getesteten Gelegen eine geringe Bedeutung der Schnittkantenqualität auf. Bei Betrachtung der Zielfunktion *Wasserabsorption* ist ein großer Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit zu erkennen. Dieser Einfluss bewegt sich in einem Wertebereich von 28,66 % bis 63,60 %. Lediglich die HT-Gelege mit 50 g/m² und 120 g/m² Flächengewicht weichen von diesem Trend ab. Hier kann der Maschinenparameter *Wasserdruck* mit einem geringen Abstand als einflussreichster Parameter identifiziert werden. Eine detaillierte Untersuchung zu den verschiedenen Auswirkungen der Maschinenparameter findet sich in Kapitel 5.

Aufgrund der Quantifizierung der jeweiligen Parameterbedeutung können die optimalen Maschinenparameter der Zielfunktionen bestimmt werden. Hinsichtlich beider Zielfunktionen werden optimale Ergebnisse beim geringsten Düsenabstand und der höchsten Vorschubgeschwindigkeit erzielt. Bei Betrachtung des Wasserdrucks muss für das UHM- und für die HT-Gelege mit einem Flächengewicht von 50 g/m² sowie

200 g/m² vom Idealwert der Wasserabsorption abgewichen werden. Der kombinierte Wert ist dabei auf 3000 bar Wasserdruck zu korrigieren. Da für die Wasserabsorption der Vorschub als wichtigster Faktor ermittelt wurde, ist der Einfluss dieser Korrektur gering. Tabelle 3.12 zeigt die optimalen kombinierten Maschinenparameter für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien.

Tabelle 3.12: Optimale Prozessparameter der Kombination aus Schnittkantenqualität und Wasserabsorption

Gelege	Optimale Maschinenparameter		
	Wasserdruck in bar	Düsenabstand in mm	Vorschub in mm/min
HT 50 g/m ²	3 000	3	800
HT 80 g/m ²	2 600	3	800
HT 120 g/m ²	2 600	3	800
HT 200 g/m ²	3 000	3	800
HM	2 600	3	800
UHM	3 000	3	800

3.2.5 Nachweis der Unabhängigkeit der Parameter

Bei der Erstellung der Planmatrix in Kapitel 3.1.3 galt die Prämisse, dass alle Parameter voneinander unabhängig sind und keine Wechselwirkungen vorliegen. Nach DREYER und MALIG (1993) muss daher ein Nachweis der Unabhängigkeit der jeweiligen Maschinenparameter erbracht werden. Dieser Nachweis erfolgt anhand der Faktorwirkungen sowie der Wechselwirkungen (KLEIN 2014). Überlagern sich Faktorwirkungen mit Wechselwirkungen, ist der Einfluss nicht mehr eindeutig. Starke Wechselwirkungen führen zu falschen Rückschlüssen der Systemoptimierung (SCHEFFLER 2001). Die Analyse der Faktor-Wechselwirkungen für eine HT-Faser mit 120 g/m² Flächengewicht mit Bezug zu den jeweiligen Zielfunktionen ist in Abbildung 3.16 dargestellt. In Anhang A.6 werden die weiteren Faktor-Wechselwirkungen der jeweiligen unidirektionalen Kohlenstofffaser-Gelege abgebildet.

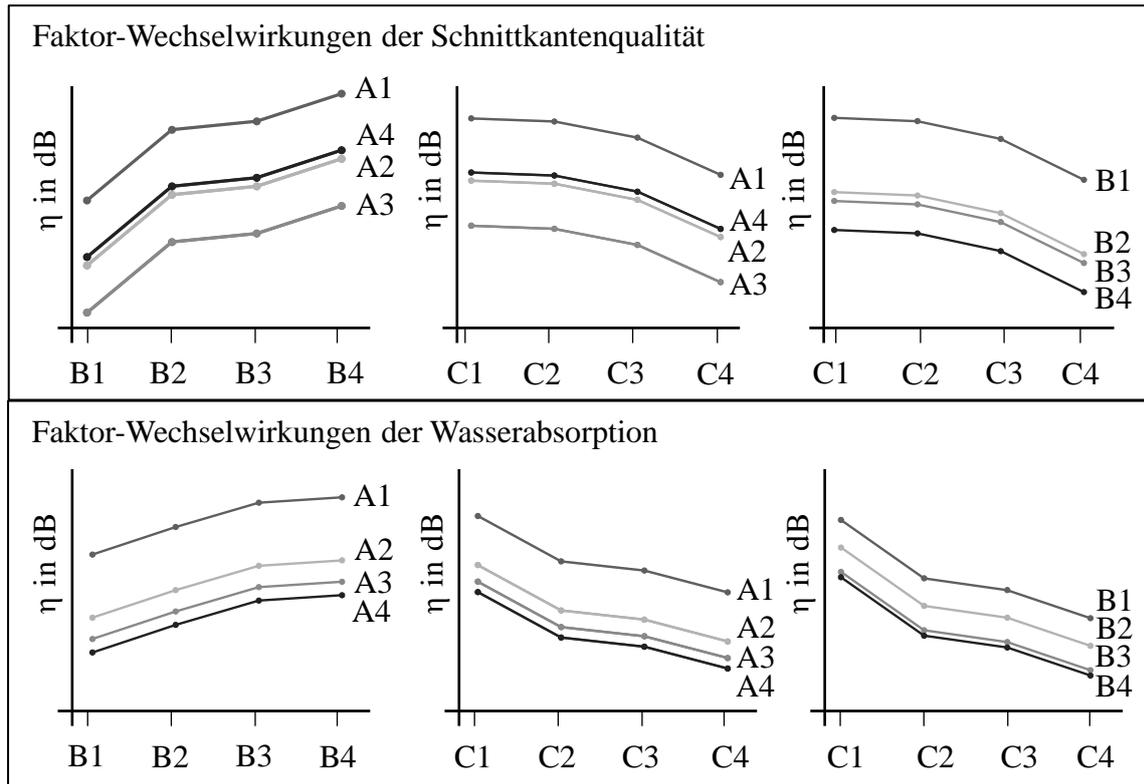


Abbildung 3.16: Faktor-Wechselwirkungen einer HT-Faser mit 120 g/m^2 Flächen-
gewicht

Zur Analyse der Faktor-Wechselwirkungen werden die Ergebnisse der Faktorwirkungen der jeweiligen Maschinenparameter untereinander subtrahiert. Diese Vorgehensweise kann der Literatur entnommen werden (etwa DREYER & MALIG 1993, KLEIN 2014, KLEPPMANN 2016).

Es ist zu erkennen, dass die Pfade jeder Kombination der Faktorwirkung parallel zueinander verlaufen, sodass keine Wechselwirkungen der Faktoren untereinander vorliegen (KLEIN 2014). Das für diese Arbeit gewählte Modell ist somit korrekt. Diese Erkenntnis kann bei allen getesteten unidirektionalen Kohlenstofffaser-Gelegen festgestellt werden.

3.2.6 Charakterisierung des Düsenpaket-Schwingungsprofils

Dieses Unterkapitel befasst sich mit der Betrachtung des Düsenpaket-Schwingungsprofils, verursacht durch die Maschinenvorschubgeschwindigkeit, auf die Zielfunktionen der unidirektionalen Kohlenstofffaser-Gelege. Im Rahmen von Vorversuchen wurde ersichtlich, dass das Schwingungsprofil des Düsenpakets sowie die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilabschnitt eine mögliche Ursache für das jeweilige Schnittkantenprofil sowie für den Wassereintrag in das Textil ist. Um einen

der genannten Einflüsse auszuschließen, muss das Schwingungsprofil als erste mögliche Ursache betrachtet werden. Die Vibrationen des Düsenpakets werden maßgeblich durch den Maschinenvorschub, die Schwingungen der Hochdruckpumpe sowie den ausströmenden Wasserstrahl beeinflusst. Für die Untersuchungen ist es notwendig, die Schwingungen des Düsenpakets bei unterschiedlichen Parametereinstellungen zu erfassen.

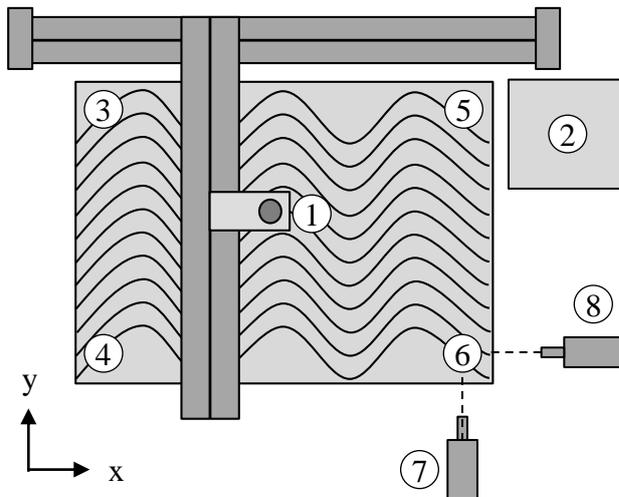
Für diese Zielsetzung wurden berührungslose Messungen mit einem 1-D-Vibrometer des Typs *OVF 505* der Firma *Polytec* durchgeführt. Die Messeinheit des Vibrometers sendet Laserstrahlen mit einer hohen Frequenz aus, die von der Bauteiloberfläche reflektiert werden (LITFIN 2005). Die Vibration des Düsenpakets bewirkt aufgrund des Dopplereffekts eine Frequenzverschiebung zwischen der initiierten und der reflektierten Lichtwelle. Durch die Auswertung der Frequenzverschiebung kann der Wert der Amplitudenausschläge ermittelt werden. Eine detailliertere Erläuterung der Funktionsweise sowie der Messgenauigkeiten eines 1-D-Vibrometers kann der Literatur entnommen werden (etwa SCHMIDTCHEN 2013, SELIGER 1995).

Ausgehend von der skizzierten Grundlage ist es notwendig, eine umfassende Planung der Versuchsreihen vorzunehmen. Es sind sowohl statische als auch dynamische Anwendungsfälle zu analysieren. Für die statischen Untersuchungen soll an unterschiedlichen Messpunkten der jeweilige Einfluss des Messorts, der Hochdruckpumpe und des ausströmenden Massenstroms analysiert werden. Bei den dynamischen Untersuchungen besagt die Prämisse, dass zusätzlich der Effekt des Maschinenvorschubs betrachtet werden soll. Abbildung 3.17 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsreihen im Versuchsraum.

Die statischen Messungen sind anhand eines Versuchsspektrums mit und ohne ausströmenden Massenstrom charakterisiert. Bei den jeweiligen Messpunkten erfolgen Untersuchungen demnach sowohl mit als auch ohne ausströmenden Wasserstrahl bei unterschiedlichen Wasserdrücken. Dabei müssen die Druckbereiche, die in Kapitel 3.1.2.2 ausgearbeitet wurden, angewandt werden. Für die Ermittlung der Vibrationen des Düsenpakets ohne Massenstrom ist der Einfluss der Schwingungen der Hochdruckpumpe aufzuzeigen, die über den Hallenboden übertragen werden. Die dynamischen Messungen sollen eine Aussage über den Einfluss der Vibrationen der Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets in Zusammenhang mit unterschiedlichen Wasserdrücken ermöglichen.

3 Parameterstudien

Draufsicht:



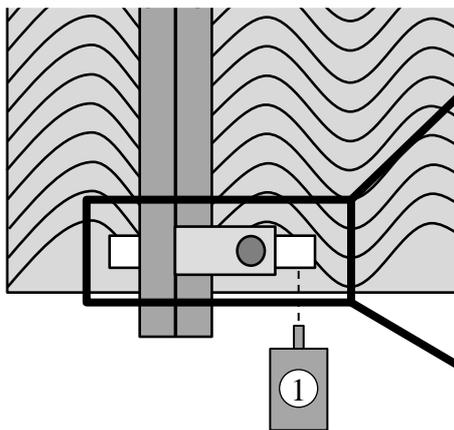
Legende:

- ① ≙ Bearbeitungsraum
- ② ≙ Hochdruckpumpe
- ③ ≙ Messposition 1 (Pos. 1)
- ④ ≙ Messposition 2 (Pos. 2)
- ⑤ ≙ Messposition 3 (Pos. 3)
- ⑥ ≙ Messposition 4 (Pos. 4)
- ⑦ ≙ Vibrometer y-Schwingung
- ⑧ ≙ Vibrometer x-Schwingung

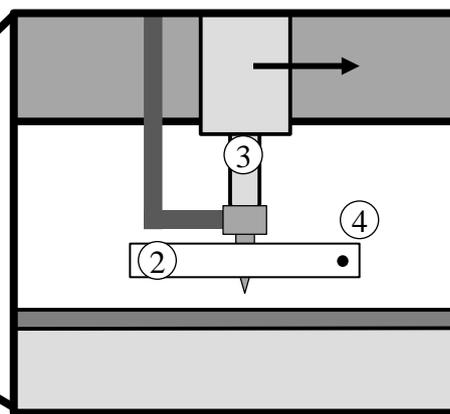
Abbildung 3.17: Darstellung der statischen und dynamischen Messpunkte

Da die Versuche mit einem 1-D-Vibrometer durchgeführt werden sollen, muss eine Vorrichtung auf das Düsenpaket appliziert werden, sodass die Untersuchung der Vibration der Vorschubgeschwindigkeit möglich ist. Dabei ist es notwendig, die Dämpfung der Vorrichtung zu berücksichtigen. Abbildung 3.18 zeigt den schematischen Versuchsaufbau für die dynamische Messung der Vibration des Düsenpakets.

Draufsicht:



Seitenansicht:



Legende:

- | | |
|---------------------|-----------------|
| ① ≙ Laservibrometer | ② ≙ Vorrichtung |
| ③ ≙ Düsenpaket | ④ ≙ Laserstrahl |

Abbildung 3.18: Darstellung des dynamischen Versuchsaufbaus

Der Laserstrahl des Vibrometers wird statisch an der rechten Seite der Vorrichtung fokussiert. Anschließend bewegen sich das Düsenpaket sowie die Vorrichtung mit der entsprechenden Vorschubgeschwindigkeit horizontal zum applizierten Laserstrahl. Das resultierende Schwingungsprofil soll Aufschlüsse über den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit liefern. Der beschriebene Messprozess muss dreifach durchlaufen und ein Mittelwert der Ergebnisse gebildet werden. Dadurch sollen mögliche Fehleinflüsse minimiert werden.

Ausgehend von der Planung der Messreihen kann die Auswertung der einzelnen Vibrationsuntersuchungen beschrieben werden. Das Ergebnis der statischen wie auch der dynamischen Vibrationsmessungen kann einem Schwingungsdiagramm entnommen werden. Dabei sind die Ergebnisse der dynamischen Messungen hinsichtlich der gemittelten Schwingungsamplitude y_m sowie des mittleren Amplitudenversatzes y_v auszuwerten. Die statischen Versuche sollen die grundlegenden Schwingungseinflüsse aufzeigen; sie werden daher nur hinsichtlich der Schwingungsamplitude y_m bewertet. Abbildung 3.19 erläutert den beschriebenen Sachverhalt im Rahmen einer dynamischen Messung.

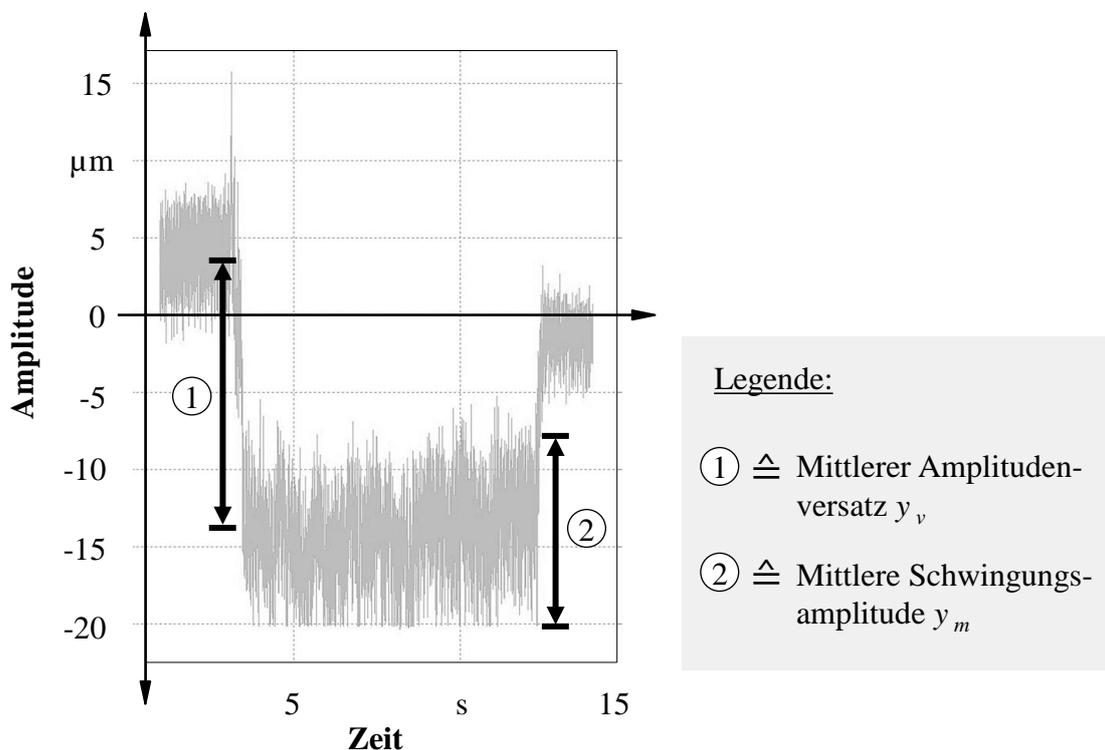


Abbildung 3.19: Vorgehensweise zur Auswertung der dynamischen Vibrationsuntersuchungen

In Abbildung 3.19 ist ein Schwingungsverlauf bei strömendem Wasserstrahl mit 2600 bar Wasserdruck und einer Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets von 400 mm/min dargestellt. Dabei zeigt die erste Schwingungsamplitude das ruhende Düsenpaket mit strömendem Wasserstrahl. Der erste Amplitudenversatz wird durch die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets hervorgerufen und resultiert im nachfolgenden Schwingungsverlauf. Der anschließende Amplitudenversatz wird aufgrund der Aufhebung des Vorschubs und des fehlenden Massenstroms verursacht. Diese Amplitudenverschiebung ist nicht Gegenstand der Betrachtungen dieser Arbeit, da dies den Abschluss des Bearbeitungsvorgangs darstellt. Die Schwingungsversuche der gesamten Versuchsreihe wurden nach einer festgelegten Einpendelzeit des Düsenpakets von 10 Sekunden durchgeführt.

Aufgrund der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse der Schwingungsamplitude und des Amplitudenversatzes in Tabellenform dargestellt. Dabei wurden die Resultate, wie beschrieben, als Mittelwerte aus drei identischen Messeinstellungen gebildet. Diese sind nachfolgend sowohl für die statischen als auch für die dynamischen Messungen erläutert.

3.2.6.1 Analyse der statischen Vibrationsuntersuchungen

Wie vorab beschrieben, werden die statischen Versuchsreihen an vier verschiedenen Positionen im Bearbeitungsraum mit unterschiedlichen Wasserdrücken durchgeführt. Ein wichtiger Aspekt dabei ist es, den Einfluss der Schwingungen des Düsenpakets im Ruhezustand aufzuzeigen. Dabei muss die Hochdruckpumpe in Betrieb sein – jedoch ohne strömenden Massenstrom des Wassers aus der Düse. Die statischen Versuchsreihen werden nur anhand der mittleren Schwingungsamplitude y_m ausgewertet. Ein initialer Amplitudenversatz nach Zustandsänderung ist nur beim Übergang vom ruhenden Düsenpaket zum strömenden Massenstrom vorhanden. Dieser erfolgt jedoch vor dem Schneidvorgang und wird aus diesem Grund vernachlässigt. Abbildung 3.20 zeigt beispielhaft einen Schwingungsverlauf bei strömendem Wasserstrahl an Position 1 mit einem Wasserdruck von 3400 bar. Dabei stellt die erste Schwingungsamplitude den Ruhezustand des Düsenpakets dar. Der anschließende Amplitudenversatz wird durch den strömenden Wasserstrahl aus der Düse verursacht.

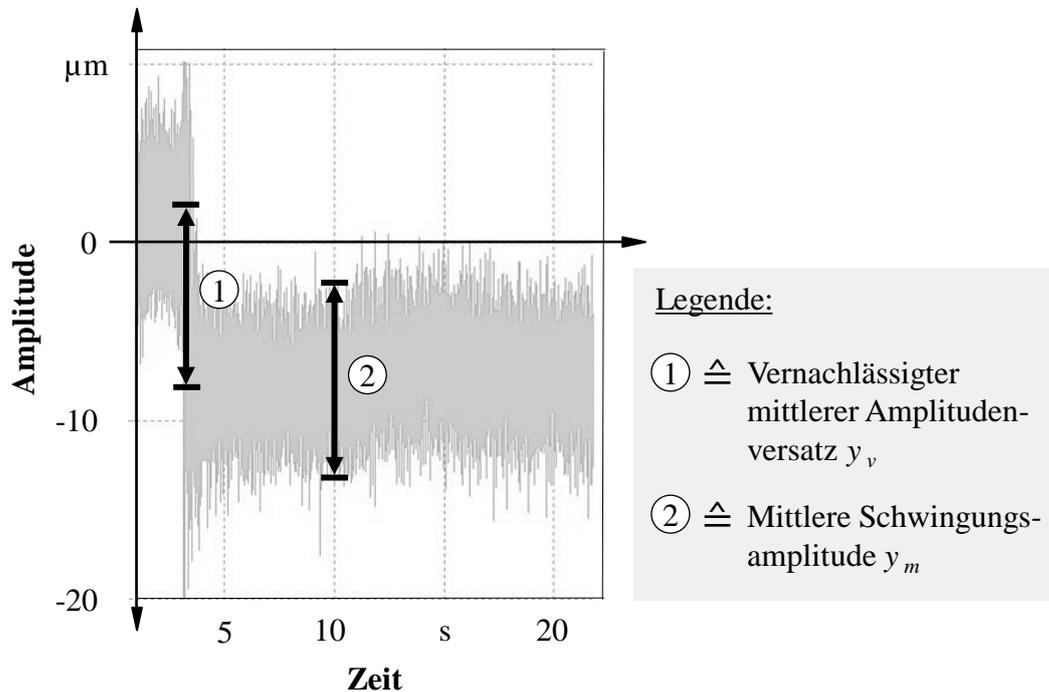


Abbildung 3.20: Schwingungsverlauf einer statischen Messung an Position 1 der x-Achse mit strömenden Massenstrom bei 3400 bar Wasserdruck

Die Zielsetzung der Versuche ist eine Objektivierung der jeweiligen Schwingungen mit ruhendem Massenstrom sowie der Hochdruckpumpe im Betriebszustand. Dadurch wird eine Aussage über die verschiedenen Positionen im Bearbeitungsraum möglich. Die Ergebnisse der Versuche im Ruhezustand sind in Tabelle 3.13 dargestellt.

Die Ergebnisse der statischen Messungen im Ruhezustand zeigen ein nachvollziehbares Muster auf. Die geringste Schwingung des Düsenpakets in x- und y-Richtung herrscht an Position 2, was die linke untere Ecke des Bearbeitungsraums widerspiegelt. Die hohen Schwingungen an Position 3 sind auf die Lage der Hochdruckpumpe zurückzuführen, da diese in unmittelbarer Nähe zu Position 3 platziert ist. Dieser Einfluss der Hochdruckpumpe wird überdies durch die Ergebnisse der unterschiedlichen Betriebszustände der Hochdruckpumpe gestützt. Bei höheren Arbeitsvolumina der Hochdruckpumpe resultieren größerer Schwingungsamplituden im Ruhezustand des Düsenpakets. Aufgrund der Bauarten des Düsenpakets bzw. der Antriebsmechanismen resultiert eine größere Schwingung der x- im Vergleich zur y-Achse.

3 Parameterstudien

Tabelle 3.13: Mittelwerte der statischen Messungen der mittleren Schwingungsamplitude y_m bei ruhendem Massenstrom an verschiedenen Positionen

2 600 bar				3 000 bar			
y-Pos.1:	8 μm	y-Pos.2:	6 μm	y-Pos.1:	8 μm	y-Pos.2:	7 μm
x-Pos.1:	16 μm	x-Pos.2:	13 μm	x-Pos.1:	15 μm	x-Pos.2:	12 μm
y-Pos.3:	10 μm	y-Pos.4:	8 μm	y-Pos.3:	10 μm	y-Pos.4:	8 μm
x-Pos.3:	21 μm	x-Pos.4:	17 μm	x-Pos.3:	19 μm	x-Pos.4:	15 μm
3 400 bar				3 800 bar			
y-Pos.1:	7 μm	y-Pos.2:	6 μm	y-Pos.1:	9 μm	y-Pos.2:	7 μm
x-Pos.1:	16 μm	x-Pos.2:	13 μm	x-Pos.1:	18 μm	x-Pos.2:	15 μm
y-Pos.3:	10 μm	y-Pos.4:	8 μm	y-Pos.3:	11 μm	y-Pos.4:	9 μm
x-Pos.3:	21 μm	x-Pos.4:	18 μm	x-Pos.3:	24 μm	x-Pos.4:	19 μm

Tabelle 3.14: Statische Messungen der mittleren Schwingungsamplitude y_m bei strömendem Wasserstrahl an verschiedenen Positionen

2 600 bar				3 000 bar			
y-Pos.1:	10 μm	y-Pos.2:	8 μm	y-Pos.1:	11 μm	y-Pos.2:	8 μm
x-Pos.1:	19 μm	x-Pos.2:	16 μm	x-Pos.1:	20 μm	x-Pos.2:	15 μm
y-Pos.3:	14 μm	y-Pos.4:	9 μm	y-Pos.3:	14 μm	y-Pos.4:	11 μm
x-Pos.3:	27 μm	x-Pos.4:	18 μm	x-Pos.3:	28 μm	x-Pos.4:	23 μm
3 400 bar				3 800 bar			
y-Pos.1:	10 μm	y-Pos.2:	8 μm	y-Pos.1:	11 μm	y-Pos.2:	8 μm
x-Pos.1:	19 μm	x-Pos.2:	15 μm	x-Pos.1:	21 μm	x-Pos.2:	15 μm
y-Pos.3:	15 μm	y-Pos.4:	11 μm	y-Pos.3:	16 μm	y-Pos.4:	12 μm
x-Pos.3:	29 μm	x-Pos.4:	21 μm	x-Pos.3:	31 μm	x-Pos.4:	23 μm

Die statischen Messungen mit strömendem Wasserstrahl aus der Düse sollen den Einfluss des ausströmenden Massenstroms auf das Schwingungsprofil des Düsenpakets ermitteln. Dabei werden wie beschrieben die initialen Amplitudenversätze vernachlässigt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 3.14 dargestellt.

Die Informationen der statischen Messungen mit strömendem Wasserstrahl bestätigen die Messungen aus Tabelle 3.13. Dabei sind die Schwingungen in x- und y-Richtung, verursacht durch den ausströmenden Wasserstrahl bei Erhöhung der Druckstufe, von der jeweiligen Position im Bearbeitungsraum abhängig. Bei Vergleich der Werte aus Tabelle 3.13 und 3.14 ist ersichtlich, dass die Schwingungsamplitude des Düsenpakets, hervorgerufen durch den strömenden Massenstrom, sowohl für die x- als auch für die y-Achse nur minimal höher ist.

Die Versuche der statischen Schwingungsmessungen haben eine signifikante Bedeutung der Position im Bearbeitungsraum aufgezeigt. Der Einfluss der unterschiedlichen Druckparameter sowie des Massenstroms wirkt sich minimal auf eine steigende Schwingungsamplitude aus. Aus diesen Gründen werden die dynamischen Messungen an Position 2 durchgeführt. Des Weiteren wurden an dieser Position des Bearbeitungsraums die Versuchsergebnisse aus Kapitel 3.2 ermittelt.

3.2.6.2 Auswertungen der dynamischen Versuchsreihen

Wie erläutert, soll die Schwingungsdämpfung der Vorrichtung an der Düse aufgezeigt werden. Dafür wurden Vorversuche mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Als Ergebnis konnte ermittelt werden, dass bei einer Vorrichtung aus dem Material *Styropor* mit einer Länge von 300 mm die Dämpfung vernachlässigt werden kann. Bei jedem Längenabschnitt der Vorrichtung herrschen die gleichen Schwingungsbedingungen. Zudem konnte kein Unterschied der statischen Amplitudenauslässe des Düsenpakets mit sowie ohne Vorrichtung ermittelt werden. Die Ergebnisse der dynamischen Schwingungsmessung an Position 2 der x- und der y-Achse mit strömendem Wasserstrahl bei unterschiedlichen Wasserdrücken sowie Vorschubgeschwindigkeiten sind in Tabelle 3.15 dargestellt.

3 Parameterstudien

Tabelle 3.15: Dynamische Schwingungsmessungen des Düsenpakets

Wasserdruck	Vorschub- geschwindigkeit	Mittlere Schwingungs- amplitude y_m		Mittlere Amplitudenversatz y_v	
		x-Pos.:	y-Pos.:	x-Pos.:	y-Pos.:
2 600 bar	200 mm/min	16 μm	10 μm	23 μm	20 μm
	400 mm/min	17 μm	12 μm	25 μm	21 μm
	600 mm/min	20 μm	15 μm	25 μm	22 μm
	800 mm/min	22 μm	15 μm	29 μm	25 μm
3 000 bar	200 mm/min	17 μm	12 μm	29 μm	24 μm
	400 mm/min	18 μm	12 μm	28 μm	20 μm
	600 mm/min	20 μm	15 μm	33 μm	28 μm
	800 mm/min	23 μm	16 μm	30 μm	23 μm
3 400 bar	200 mm/min	17 μm	12 μm	26 μm	21 μm
	400 mm/min	17 μm	11 μm	32 μm	29 μm
	600 mm/min	20 μm	15 μm	31 μm	25 μm
	800 mm/min	20 μm	16 μm	32 μm	26 μm
3800 bar	200 mm/min	18 μm	13 μm	26 μm	22 μm
	400 mm/min	20 μm	13 μm	29 μm	27 μm
	600 mm/min	22 μm	15 μm	25 μm	20 μm
	800 mm/min	23 μm	16 μm	31 μm	28 μm

Aus Abbildung 3.19 wird ersichtlich, dass ein Amplitudenversatz y_v sowohl in x- als auch in y-Richtung vorhanden ist, sobald der Maschinenvorschub startet oder stoppt. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde nur der initiale Amplitudenversatz berücksichtigt. Dabei folgt die Höhe des Amplitudenversatzes y_v keiner Konvention. Es wird angenommen, dass dieser Versatz aufgrund der Fertigungs- und Montagetoleranzen des Antriebsstrangs der Wasserstrahlanlage hervorgerufen wird. Das maximale Toleranzband der Verbindungsstellen des Düsenpakets sowie des Antriebsstrangs wird aufgrund der Kraft des ausströmenden Wasserstrahls aus der Düse und der Vorschubgeschwindigkeit erreicht. Analog zu den Werten der statischen Messungen sind die Ergebnisse der x-Achsen der dynamischen Versuchsreihen höher als jene

der y-Achsen. Die Ursache ist die konstruktive Ausführung des Systems. Die Ergebnisse hinsichtlich der mittleren Schwingungsamplitude y_m zeigen auf, dass aus einer hohen Vorschubgeschwindigkeit eine größere Schwingungsamplitude resultiert.

Die Erkenntnisse des Düsenpaket-Schwingungsprofils, hervorgerufen durch die Vorschubgeschwindigkeit, müssen auf die jeweiligen Zielfunktionen der Versuchsaufgabe angewandt werden. Die Versuchsergebnisse aus Kapitel 3.2.3 belegen, dass bei hohen Maschinenvorschüben optimale Ergebnisse hinsichtlich einer minimalen Wasserabsorption und einer maximalen Schnittkantenqualität erzielt werden. Diese Ergebnisse decken sich nicht mit den Aufschlüssen des Schwingungsprofils des Düsenpakets und sind somit nicht als Ursache zu werten. Des Weiteren ist das Düsenpaket-Schwingungsprofil im Vergleich zu dem Betrachtungsspektrum der Schnittkantenqualität so gering, dass die Schwingungen des Düsenpakets vernachlässigt werden können.

Da die Schwingungsprofile des Düsenpakets keinen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse zeigen, kann die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilabschnitt als Ursache identifiziert werden. Hinsichtlich der Versuchsergebnisse lässt sich festhalten, dass eine geringe Verweildauer des Wasserstrahls optimale Ergebnisse der Zielfunktionen zeigt. Aus der Betrachtung der Zielfunktion *Wasserabsorption* folgt ein logischer Zusammenhang zwischen dem Wassereintrag des Textils und der Verweildauer des Wasserstrahls: Je kürzer der Wasserstrahl auf einem Textilabschnitt verweilt, desto geringer ist der Wassereintrag in das Kohlenstofffaser-Textil. Diese Schlussfolgerung deckt sich mit den Versuchsergebnissen.

Während den Versuchsdurchführungen konnte ein signifikanter Einfluss der unterschiedlichen Ausführungen des Faserzusammenhalts beobachtet werden, beispielsweise aus einem doppelseitig aufgetragenen Haftgitter. Die besten Versuchsergebnisse hinsichtlich der Schnittkantenqualität konnten mit einem sehr guten Zusammenhalt der Faserbündel erzielt werden. Des Weiteren ist Folgendes festzuhalten: Je kürzer die Verweildauer auf einem Textilabschnitt ausfällt, desto weniger Energie wird in die Faserstruktur eingebracht. Aufgrund dieser Erkenntnisse sind der Faserzusammenhalt sowie die Verweildauer des Wasserstrahls für eine optimale Schnittkantenqualität ausschlaggebend.

Die Erkenntnisse der Parameterstudien des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien werden im Folgenden zusammengefasst.

3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Parameterstudien wurden in Kapitel 3.1 anhand einer Methode zur statistischen Versuchsplanung analysiert und festgelegt. Dabei war es ausschlaggebend, die Maschinenparameter der Reinwasserstrahltechnologie nach Stell- und Steuergrößen zu definieren und mögliche Störgrößen des Systems zu identifizieren. Als Steuergrößen konnten der Wasserdruck, die Vorschubgeschwindigkeit und der Düsenabstand zum Werkstück beschrieben werden. Der Düsendurchmesser wurde aufgrund der Einflüsse der Störgrößen als Stellgröße erarbeitet. Die möglichen Störgrößen wurden analysiert und durch geeignete Maßnahmen eliminiert.

In Kapitel 3.1.2 konnte die Taguchi-Methode als Vorgehensweise zur statistischen Versuchsplanung ausgewählt werden. Zur Festlegung geeigneter Parameterabstufungen der Versuchsplanung wurden Grenzuntersuchungen der Maschinenparameter zum Zerteilen der ausgewählten Kohlenstofffaser-Textilien durchgeführt. Dabei zeigte sich für alle getesteten unidirektionalen Textilien, dass ein minimaler Wasserdruck von 2000 bar notwendig ist, um die Textilien prozesssicher zu trennen. Ein maximaler Wasserdruck von 3800 bar zum Zerteilen der Fasern ist aufgrund der Maschinengrenze bedingt. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass alle getesteten Kohlenstofffaser-Textilien mit einer maximalen Vorschubgeschwindigkeit von 1000 mm/min getrennt werden können. Anhand dieser Grenzwerte konnten geeignete Parameterabstufungen beschrieben werden, die in einen standardisierten Versuchsplan der Taguchi-Methode übertragen wurden.

Diese geplanten Versuchsreihen wurden an einer Wasserstrahlanlage des Typs *MACH 2 M2-2013b* durchgeführt. Diese Anlage kann einen maximalen Wasserdruck von 3800 bar sowie einen maximalen Vorschub des Düsenpakets von 10 140 mm/min erzeugen. Für das Trennen der Kohlenstofffaser-Textilien wurde in Kapitel 3.2.1 eine geeignete Trägerkonstruktion mit unterschiedlichen Schneidunterlagen untersucht, entwickelt und validiert. Eine notwendige Eigenschaft der Schneidunterlage für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien ist die Absorptionsfähigkeit des Materials für die Energie des Wasserstrahls, sodass die Fasern keine Qualitätsverluste erleiden. Für die Auswertung der Zielfunktionen wurde eine geeignete Vorgehensweise festgelegt. Die Zielfunktion *Schnittkantenqualität* muss dabei mittels eines 3-D-Farblasermikroskops und die Wasserabsorption der Textilien anhand einer Präzisionswaage bewertet werden.

Die Parametereffekte der Steuergrößen wurden mit dem Signal-Rausch-Verhältnis objektiviert. Hierbei konnten für jedes getestete unidirektionale Kohlenstofffaser-Textil optimale Maschinenparameter für eine maximale Schnittkantenqualität und eine minimale Wasserabsorption ermittelt werden. Die vorhandenen Störgrößen wurden anhand der Vorgehensweise der Versuchsplanungsmethodik ermittelt und vorab minimiert oder eliminiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Abweichungen der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit so gering sind, dass diese keine Auswirkungen auf die Zielfunktionen besitzen.

Anhand der Quantifizierung der Parameterbedeutung mittels der Varianzanalyse konnte aufgezeigt werden, dass der Wasserdruck maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis der Schnittkantenqualität hat. Des Weiteren beeinflusst die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets die Wasserabsorption der Textilien signifikant höher als die der weiteren Maschinenparameter. Aus diesen Erkenntnissen resultieren die kombinierten optimalen Maschinenparameter für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien. Die Maschinenparameter der optimalen Werte der Zielfunktionen sind in Tabelle 3.12 aufgeführt. Diese Ergebnisse konnten durch den Nachweis der Unabhängigkeit der Parameter bestätigt werden. Dabei wird ersichtlich, dass keine Faktor-Wechselwirkungen vorliegen, die die Ergebnisse negativ beeinflussen. Weiter noch konnte aufgezeigt werden, dass das Schwingungsprofil des Düsenpakets, verursacht durch die Vorschubgeschwindigkeit, keinen signifikanten Einfluss auf die Zielfunktionen ausübt. Ausschlaggebend für die weitere Betrachtung ist die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilabschnitt.

Als Schlussfolgerung dieses Kapitels kann festgehalten werden, dass ein qualitatives Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien mittels der Reinwasserstrahltechnologie anwendbar ist. Bei einer kritischen Betrachtungsweise des Reinwasserstrahltrennens von Kohlenstofffasern ist die Wassereinlagerung in das Textil als Nachteil zu werten. Diese Ablagerung des Schneidmediums ist jedoch nach einer Trocknungszeit von 24 Stunden nicht mehr nachweisbar und das Werkstück kann weiterverarbeitet werden. Für einen industriellen Einsatz des Wasserstrahltrennens von Kohlenstofffaser-Textilien sind die Schneidvorrichtung sowie das Unterlagenmaterial von entscheidender Bedeutung. Um die industrielle Einsatzmöglichkeit des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien objektiv bewerten zu können, ist eine wirtschaftliche wie auch analytische Betrachtung notwendig. Hierfür wird im nachfolgenden Kapitel das empirische und physikalische Prozessmodell der Einflussgrößen der Maschinenparameter auf die Zielfunktionen näher thematisiert. Abbildung 3.21 fasst die dargelegten Zusammenhänge in diesem Kapitel zusammen.



Abbildung 3.21: Zusammenfassung der Parameterstudien

4 Prozessmodelle

Um eine objektive Aussage über den Einfluss der unterschiedlichen Maschinenparameter auf die Zielgrößen zu erhalten, ist ein physikalisches und empirisches Prozessmodell erforderlich. Laut VDI 3633 ist ein Modell eine vereinfachte Nachbildung eines Systems. Die Reduktion auf die relevanten Eigenschaften für das Modellierungsziel ist dabei als vereinfachtes Modell charakterisiert. Nach DENKENA und TÖNSHOFF (2011) muss zur Untersuchung komplexer technischer Vorgänge ein Prozessmodell aufgestellt werden. Hierfür müssen die einzelnen Prozessschritte abstrahiert werden, um eine Reduktion der Komplexität zu erhalten. Dabei definieren DENKENA und TÖNSHOFF (2011) den Begriff *Prozessmodell* als eine abstrakte Darstellung eines Vorgangs, um die Ursache und Wirkung miteinander zu verknüpfen. Die Anwendung dieses Modells liefert eine Prognose über das reale Systemverhalten.

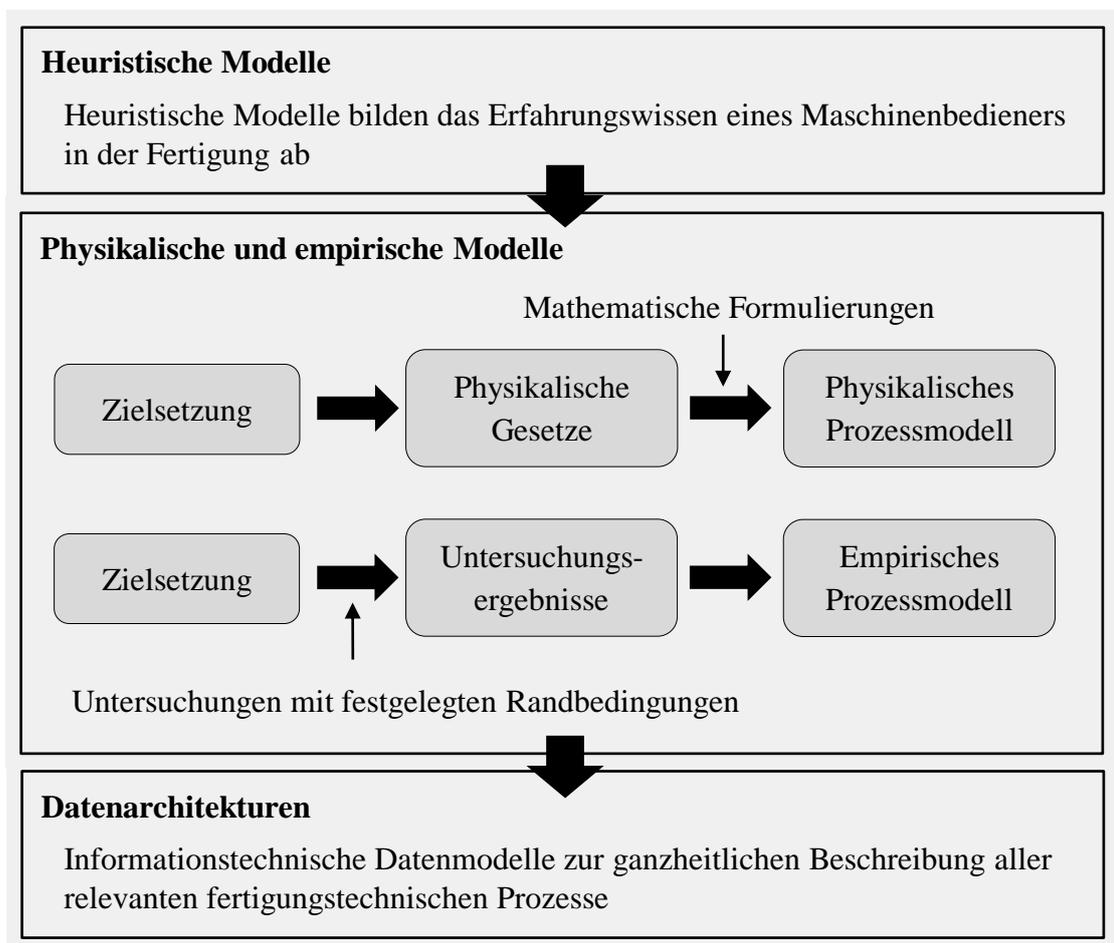


Abbildung 4.1: Einordnung des physikalischen und empirischen Prozessmodells in Anlehnung an DENKENA und TÖNSHOFF (2011)

Die Einordnung des physikalischen und empirischen Prozessmodells wird in Abbildung 4.1 veranschaulicht. Die Definition einer Datenarchitektur und eines heuristischen Prozessmodells, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, kann der Literatur entnommen werden (etwa DENKENA & TÖNSHOFF 2011). Anhand von physikalischen Prozessmodellen lassen sich technologische Abhängigkeiten mit mathematischen Algorithmen beschreiben (DENKENA & TÖNSHOFF 2011). Zur Bildung eines physikalischen Prozessmodells müssen die Vorgänge mittels physikalischer Gesetze abgeleitet werden. Das Modell stellt dabei die quantitativen Abhängigkeiten zwischen den gewählten Steuergrößen und dem Arbeitsergebnis dar. Der Nutzen dieses Prozessmodells ist nach DENKENA und TÖNSHOFF (2011) die Ableitung eines verfahrensunabhängigen Prozessverständnisses und der damit gegebenen Übertragbarkeit auf veränderte Bearbeitungsbedingungen. Die Werte des empirischen Prozessmodells werden anhand von Methoden, wie der statistischen Versuchsplanung, ermittelt und in eine allgemeine Aussage des Systems überführt (DENKENA & TÖNSHOFF 2011). Hierfür werden festgelegte Randbedingungen definiert, in denen das empirische Prozessmodell gültig ist. Anhand der erhobenen Prozesswerte kann eine Aussage über das untersuchte System getroffen werden. Das Ziel dabei ist es, die ausgewerteten Prozessparameter in ein Modell zu überführen.

Zur Ableitung des physikalischen Prozessmodells für das Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien muss zunächst der Einfluss des Wasserdrucks auf das Arbeitsergebnis beschrieben werden. Mit dem Arbeitsergebnis ist hierbei das Zerteilen der Kohlenstofffasern gemeint. Der Effekt des Düsenabstands auf die Zielfunktionen muss im Anschluss betrachtet werden. Die Vorschubgeschwindigkeit muss für die Herleitung des physikalischen Prozessmodells nicht betrachtet werden, da das Zerteilen der Kohlenstofffasern das Arbeitsergebnis ist. Dabei wird angenommen, dass der Wasserstrahl ausreichend Zeit erhält um die Faser zu trennen. Im Gegensatz dazu müssen für die Ableitung des empirischen Prozessmodells alle getesteten Maschinenparameter der Reinwasserstrahltechnologie betrachtet werden.

Nachfolgend werden das physikalische und empirische Prozessmodell für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffasern gebildet.

4.1 Physikalisches Prozessmodell

4.1.1 Betrachtung der Wirkung des Wasserdrucks

Bei der Untersuchung des Wasserdrucks muss zunächst ermittelt werden, welche Auswirkung dieser auf die Schnittkantenqualität sowie auf die Wasserabsorption hat. Dabei ist ausschlaggebend, in welcher Höhe der Wasserdruck an den jeweiligen Kohlenstofffaser-Textilien vorherrscht, sodass ein Faserbruch die Folge ist. Des Weiteren muss festgestellt werden, in welchem Ausmaß der Wasserdruck den Wassereintrag in das Textil beeinflusst. Für die analytische Vorgehensweise muss zunächst die verlustbehaftete Durchströmung des Düsenpakets betrachtet werden. Im Anschluss werden die resultierende Strahlaustrittsgeschwindigkeit aus dem Düsenpaket sowie die ausströmende Wassermenge bestimmt.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Beschreibung des physikalischen Prozesses ist, wie beschrieben, die Kenntnis der verlustbehafteten Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} . Nach RISSE (2012) lässt sich die theoretische Strahlgeschwindigkeit v_{Theo} bei einem Pumpendruck p_p sowie der Dichte von Wasser ρ_{Real} wie folgt berechnen:

$$v_{Theo} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_p}{\rho_{Real}}}. \quad (4.1)$$

Bei Betrachtung der theoretischen Strahlgeschwindigkeit v_{Theo} werden die vorherrschenden Druckverluste vernachlässigt. Nach KRISMANN (1994) müssen die Verluste – verursacht durch die Rohrreibung, die Querschnittsveränderung im Rohr, die Strahleinschnürung im Düsen Eintritt sowie die Kompressibilität des Wassers unter hohem Druck – betrachtet werden. Diese Sachverhalte werden im Folgenden näher erläutert.

4.1.1.1 Berechnung der Dichte des Wassers ρ_{Real} bei hohen Druckverhältnissen

Bei der Ermittlung der resultierenden Strahlgeschwindigkeit v_{Strahl} im Düsenaustritt ist die Kenntnis der exakten Dichte des Wassers ρ_{Real} bei einem hohen Druck erforderlich, zum Beispiel bei 3800 bar. Nach ATKINS und DE PAULA (2008) ist Wasser unter Laborbedingungen, $T_{Wasser} = 20 \text{ °C}$ sowie $p_0 = 1,013 \text{ bar}$, als inkompressibles Fluid definiert. Die Dichte des Wassers ist generell von der Temperatur T_{Wasser} und dem Umgebungsdruck p_0 abhängig (OERTEL 1995). Das Wasser, das wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben in die reale Versuchsanlage eingespeist wurde, hatte eine konstante Temperatur von $T_{Wasser} = 20 \text{ °C}$. Deshalb muss bei dieser Betrachtung nur der eingestellte Wasserdruck, verursacht durch die Hochdruckpumpe p_p , berücksichtigt werden. Die

Änderung der Dichte von Wasser bei Betriebsdrücken bis 8800 bar ist nach CARREÑO-OLEJUA (2014) wie folgt beschrieben:

$$\rho_{Real} = \rho_{Wasser} \cdot e^{\frac{p_p}{E}}. \quad (4.2)$$

Die Dichte von Wasser $\rho_{Wasser} = 1021,03 \text{ kg/m}^3$ und das Kompressibilitätsmodul $E = 4,09 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ wurden unter Laborbedingungen ermittelt (CARREÑO-OLEJUA 2014). Die Eulersche Gleichung aus Formel 4.2 zur Bestimmung der resultierenden Dichte ist eine vereinfachte Form der Theorie nach Navier-Stokes (OERTEL 1995). Dabei wird der Wasserstrahl als ideales Newtonsches Fluid betrachtet, das als inkompressibel, nicht viskos sowie reibungsfrei beschrieben ist (DURST 2006, OERTEL 1995). Der resultierende Graph der Dichte von Wasser bei hohen Drücken nach Gleichung 4.2 ist in Anhang A.7 dargestellt.

Für die Berechnung der resultierenden Geschwindigkeit des Wasserstrahls am Düsenaustritt v_{Strahl} wird die Dichte des Wassers ρ_{Real} verwendet. Die Werte der Dichte von Wasser ρ_{Real} bei unterschiedlichen Pumpendrücken p_p zeigt Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Dichte von Wasser ρ_{Real} bei unterschiedlichen Pumpendrücken p_p

ρ_{Real} bei $p_p = 3\ 800,00 \text{ bar}$	1 120,44 kg/m^3
ρ_{Real} bei $p_p = 3\ 400,00 \text{ bar}$	1 109,54 kg/m^3
ρ_{Real} bei $p_p = 3\ 000,00 \text{ bar}$	1 098,54 kg/m^3
ρ_{Real} bei $p_p = 2\ 600,00 \text{ bar}$	1 088,04 kg/m^3

Für das Gleichungssystem der resultierenden Strahlgeschwindigkeit v_{Strahl} nach Austritt aus der Düse ist es notwendig, die Druckverluste im Rohrsystem und in der Düse zu ermitteln. Diese Sachverhalte werden nachfolgend näher beschrieben.

4.1.1.2 Gleichungssystem für den Druckverlust im Rohraufbau Δp_R

Die Druckverluste im Rohrsystem setzen sich aus der Rohrreibung und den Einbauten im Rohr zusammen (BÖSWIRTH & BSCHORER 2014). Der Aufbau des Rohrsystems ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt. Dabei wird nur das sogenannte Düsenpaket betrachtet, bei dem der konstante Pumpendruck am Einlass anliegt. In

diesem Düsenpaket sind ausschließlich Querschnittsverengungen realisiert. Aufgrund des Anlagenaufbaus finden Blenden, Verzweigungen, Krümmen und Ventile bei dieser Betrachtung keine Verwendung.

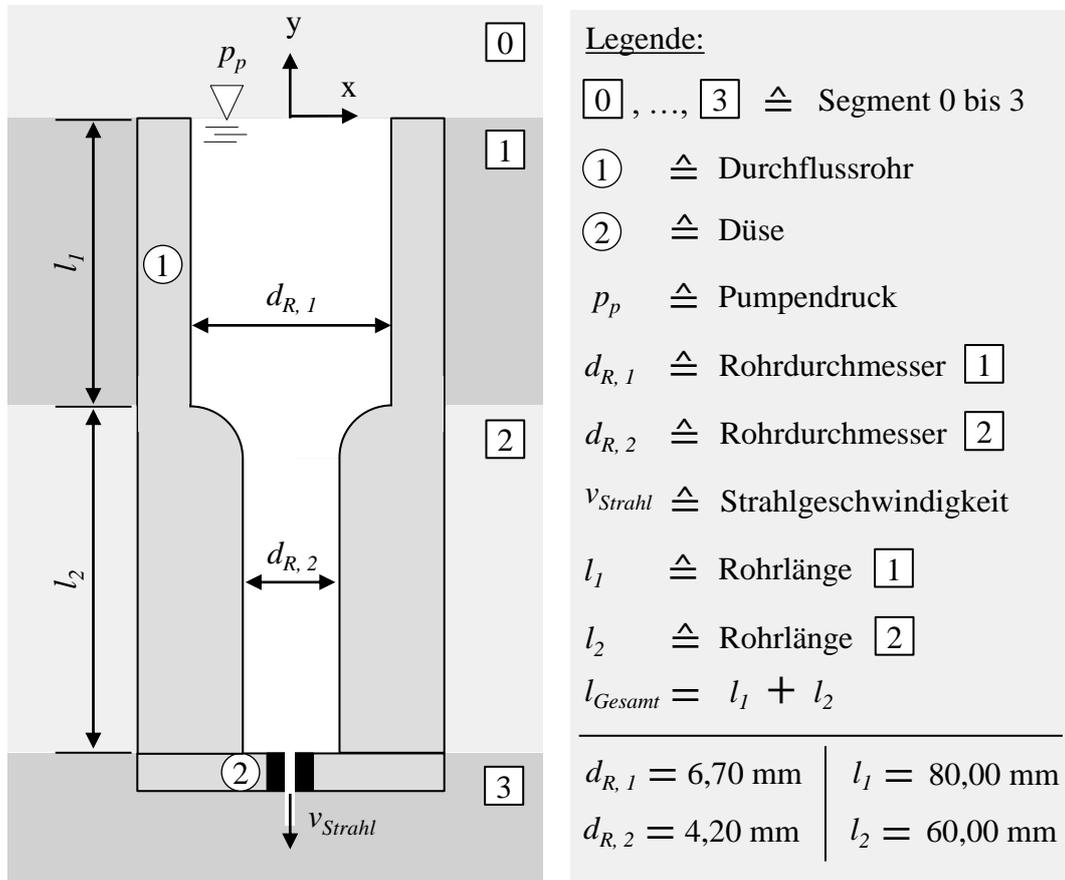


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Düsenpakets der Versuchsanlage

Für die Berechnung der resultierenden mittleren Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} ist die Art der Rohrströmung ausschlaggebend. Nach DURST (2006) wird dabei zwischen einer laminaren und einer turbulenten Strömung unterschieden. Anhand der Reynolds-Zahl Re , die nach ROTTA (2010) als Verhältnis von spezifischer Impulskonvektion zu Impulsdiffusion im System definiert ist, wird die Art der Rohrströmung determiniert. Für die Berechnung der resultierenden Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} muss anfänglich der Wert der theoretischen Strahlgeschwindigkeit v_{Theo} ermittelt werden, da zuerst eine Aussage über die Strömungsart zu treffen ist. Die Reynolds-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl und wird wie folgt berechnet:

$$Re = \frac{\rho_{Real} \cdot v_{Theo} \cdot d_R}{\eta_{Wasser}}. \quad (4.3)$$

Für die Berechnung der Reynolds-Zahl Re müssen der jeweilige Durchmesser d_R des Rohrsystems und die dynamische Viskosität von Wasser η_{Wasser} bei $T_{Wasser} = 20\text{ °C}$ verwendet werden (BÖSWIRTH & BSCHORER 2014). Dieser Wert kann dem Anhang A.8 entnommen werden. Nach DURST (2006) resultiert bei $Re < 2320$ eine laminare und bei $Re > 2320$ eine turbulente Strömung. Abbildung 4.3 zeigt den Zusammenhang zwischen laminarer und turbulenter Strömung.

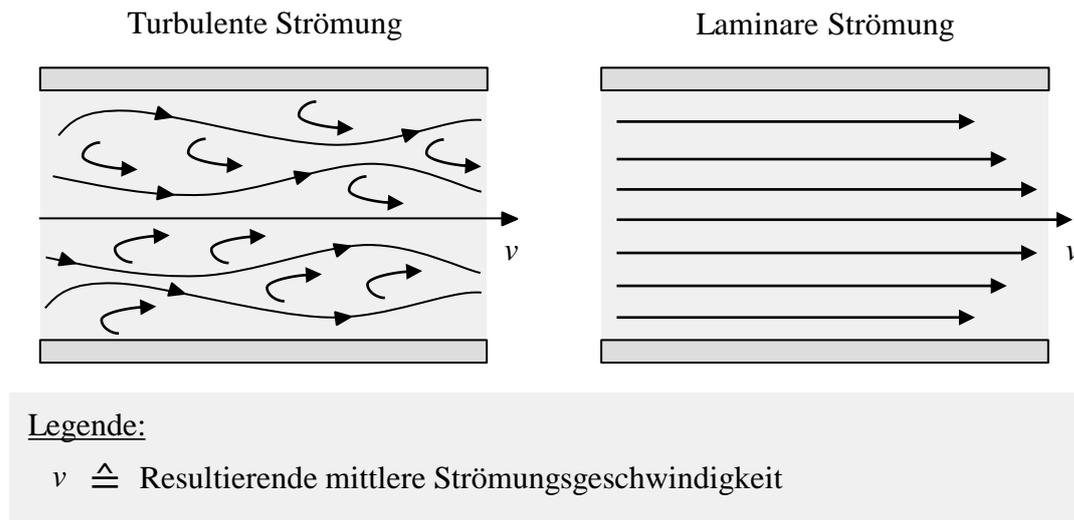


Abbildung 4.3: Darstellung der laminaren und der turbulenten Strömung nach DURST (2006)

Eine laminare Rohrströmung ist durch Strömungsschichten gekennzeichnet, die sich parallel zur Rohrlängsachse bewegen. Hierbei resultieren keine Durchmischungen und Verwirbelungen einzelner Strömungsschichten, da keine Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zur Rohrachse vorhanden sind. Die turbulente Rohrströmung ist durch Strömungsschichten definiert, die in willkürliche Richtungen verlaufen. Dabei ist die Hauptgeschwindigkeitskomponente zwar in Richtung der Rohrachse ausgebildet, besitzt aber auch Geschwindigkeitskomponenten senkrecht dazu (BÖSWIRTH & BSCHORER 2014, DURST 2006, HERWIG 2004). Dabei kommt es zur Durchmischung und Verwirbelung der Strömungsschichten.

Mittels Berechnung der theoretischen Strahlaustrittsgeschwindigkeit anhand der Formel 4.1 kann mithilfe der Kontinuitätsgleichung aus Formel 4.4 die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der verschiedenen Rohrsegmente bestimmt werden. Diese ist ausschlaggebend für die Ermittlung der Druckverluste im Rohrsystem. Nach HERWIG (2004) beschreibt die Kontinuitätsgleichung den Erhalt des Massenstroms \dot{m} im Rohr bei einer stationären, reibungsfreien Strömung und ist wie folgt definiert:

$$\dot{m} = \rho_{Real} \cdot v \cdot A = \text{konstant.} \quad (4.4)$$

Durch Umformen der Kontinuitätsgleichung kann mithilfe der Querschnittsflächen-differenz A der einzelnen Segmente die theoretische Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden. Dabei wird der Massenstrom \dot{m}_3 des dritten Segments, bei dem die theoretische Strahlgeschwindigkeit durch Gleichung 4.1 bekannt ist, mit dem Massenstrom \dot{m}_2 gleichgesetzt. Somit ergibt sich die theoretische Strahlgeschwindigkeit im Segment 2. Tabelle 4.2 zeigt die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten v_{Theo} der einzelnen Rohrsegmente bei Variation des Pumpendrucks.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der theoretischen Strömungsgeschwindigkeit einzelner Segmente bei unterschiedlichen Pumpendrücken p_p

	<i>Segment 0</i>	<i>Segment 1</i>	<i>Segment 2</i>	<i>Segment 3</i>
$p_p = 3\ 800\ \text{bar}$	0,00 m/s	0,62 m/s	1,57 m/s	832,59 m/s
$p_p = 3\ 400\ \text{bar}$	0,00 m/s	0,66 m/s	1,68 m/s	782,86 m/s
$p_p = 3\ 000\ \text{bar}$	0,00 m/s	0,70 m/s	1,78 m/s	738,97 m/s
$p_p = 2\ 600\ \text{bar}$	0,00 m/s	0,73 m/s	1,87 m/s	691,32 m/s

Ausgehend von Tabelle 4.2 und der Gleichung aus Formel 4.3 resultieren die Reynolds-Zahlen der verschiedenen Rohrsegmente, die in Tabelle 4.3 wiedergegeben sind.

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Berechnung der Reynolds-Zahlen einzelner Rohrsegmente bei unterschiedlichen Pumpendrücken p_p

	<i>Segment 0</i>	<i>Segment 1</i>	<i>Segment 2</i>	<i>Segment 3</i>
$p_p = 3\ 800\ \text{bar}$	0,00	4 490,65	7 163,66	150 436,76
$p_p = 3\ 400\ \text{bar}$	0,00	4 847,38	7 732,72	162 387,18
$p_p = 3\ 000\ \text{bar}$	0,00	5 185,76	8 272,52	173 722,90
$p_p = 2\ 600\ \text{bar}$	0,00	5 509,15	8 788,41	184 556,64

Aus Tabelle 4.3 ist ersichtlich, dass in jedem Rohrsegment eine turbulente Strömung vorherrscht. Für die Bestimmung der Rohrströmungsart muss ein Druckgleichgewicht zwischen dem Druckeinbringungspunkt in Segment 0 und dem Strahlaustrittspunkt in Segment 3 aufgestellt werden. Die Intention dieses Druckgleichgewichts ist die Ermittlung der resultierenden Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} . Das Druckgleichgewicht wird nach Bernoulli wie folgt beschrieben (OERTEL 1995):

$$p_p + g \cdot l_0 \cdot \rho_{Real} = p_0 + \frac{\rho_{Real} \cdot v_{Strahl}^2}{2} + \Delta p_R + \Delta p_D + g \cdot l_{Gesamt} \cdot \rho_{Real} \quad (4.5)$$

Dabei ist die Länge l_0 als Ausgangswert bestimmt und mit der Wertigkeit $l_0 = 0$ mm festgelegt. Die Gewichtskraft g entspricht in dieser Gleichung $9,81 \text{ m/s}^2$. Der Umgebungsdruck p_0 ist als $p_0 = 1,013 \text{ bar}$ definiert. Die Gesamtlänge l_{Gesamt} entspricht dem Abstand des Ausgangswerts l_0 bis zum Düsenaustrittspunkt in Segment 3 (siehe auch Abbildung 4.2). Die Gesamtlänge wurde dabei anhand der realen Versuchsanlage festgelegt und ist determiniert als $l_{Gesamt} = 0,14 \text{ m}$. Ausgehend von einer ganzheitlichen, turbulenten Strömung kann der Druckverlust Δp_R des gesamten Rohrsystems ermittelt werden. Der Druckverlust in der Düse Δp_D wird im Fortlauf separat weiter beschrieben. Die Druckverluste aller Rohrsegmente ergeben die Summe Δp_R , welche charakterisiert ist als:

$$\Delta p_R = \frac{\rho_{Real} \cdot v_{Strahl}^2}{2} \cdot \left(\left(\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{l_j}{d_j} \cdot \frac{A_{Strahl}^2}{A_j^2} \right) + \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot \frac{A_{Strahl}^2}{A_i^2} \right) \right) \quad (4.6)$$

Die Summe des Druckverlusts im Rohrsystem setzt sich generell aus der Rohrreibung und der Querschnittsverengung zusammen. Die Rohrreibung ist durch die Dichte des Wasser unter hohem Druck ρ_{Real} , die Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} , der Rohrreibungszahl λ_j , das Verhältnis der Länge des Rohrsegments l_j zum Durchmesser des Rohrsegments d_j und das Verhältnis der Querschnittsfläche des Austrittsstrahls A_{Strahl} zur Querschnittsfläche der einzelnen Rohrsegmente A_j beschrieben. Die Rohrreibungszahl λ_j wird anhand der Reynolds-Zahl der einzelnen Rohrsegmente bestimmt. Für die Ermittlung der Rohrreibungszahl λ_j sind ferner die Wandrauigkeit k_j und der Rohrdurchmesser d_j ausschlaggebend. Tabelle 4.4 zeigt die Bestimmung der Rohrreibungszahl λ_j .

Tabelle 4.4: Berechnungen der Rohrreibungszahl nach (a) BLASIUS, (b) NIKURADSE, (c) PRANDTL und KARMAN, (d) PRANDTL und COLEBROOK, (e) NIKURADSE in Anlehnung an BÖSWIRTH und BSCHORER (2014) sowie HERWIG (2004)

Reynolds-Zahl-Bereich	Rohrbeschaffenheit	Rohrreibungszahl	
$2320 < Re < 10^5$	$Re \cdot \frac{k_j}{d_j} < 65$	$\lambda_j = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}$	(a)
$10^5 < Re < 10^6$	$Re \cdot \frac{k_j}{d_j} < 65$	$\lambda_j = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}$	(b)
$Re > 10^6$	$Re \cdot \frac{k_j}{d_j} < 65$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} = 2 \cdot \lg \left(Re \cdot \sqrt{\lambda_j} \right) - 0,8$	(c)
$Re > 2320$	$65 < Re \cdot \frac{k_j}{d_j} < 1300$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda_j}} + \frac{k_j}{d_j} \cdot 0,269 \right)$	(d)
$Re > 2320$	$Re \cdot \frac{k_j}{d_j} > 1300$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} = 2 \cdot \lg \left(\frac{d_j}{k_j} + 1,14 \right)$	(e)

Nach Angaben des Anlagenherstellers ist die Wandrauigkeit k_j in jedem Rohrsegment der Versuchsanlage mit $k_{1,2} = 0,05$ mm bestimmt (FLOW 2013). Die berechneten Werte der Rohrbeschaffenheit sind in Tabelle 4.5 wiedergegeben.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Berechnung der Rohrbeschaffenheit an den Segmenten 1 und 2 bei unterschiedlichen Pumpendrücken

	Rohrbeschaffenheit $Re \cdot (k_j / d_j)$	
	Segment 1	Segment 2
$p_p = 3\,800,00$ bar	41,11	104,62
$p_p = 3\,400,00$ bar	38,70	96,48
$p_p = 3\,000,00$ bar	36,17	92,06
$p_p = 2\,600,00$ bar	33,51	85,28

Wie aus den Tabellen 4.4 und 4.5 ersichtlich wird, muss die Rohrreibungszahl λ_1 durch die Formel nach *BLASIUS* für hydraulisch glatte Rohre sowie die Rohrreibungszahl λ_2 durch die Berechnungen nach *PRANDTL* und *COLEBROOK* für Rohre im Übergangsbereich bestimmt werden. Für die Ermittlung der Rohrreibungszahl λ_2 ist auf das Colebrook-Diagramm zurückzugreifen (HERWIG 2004). Tabelle 4.6 zeigt die Rohrreibungszahlen $\lambda_{1,2}$ der unterschiedlichen Segmente beim jeweiligen Wasserdruck.

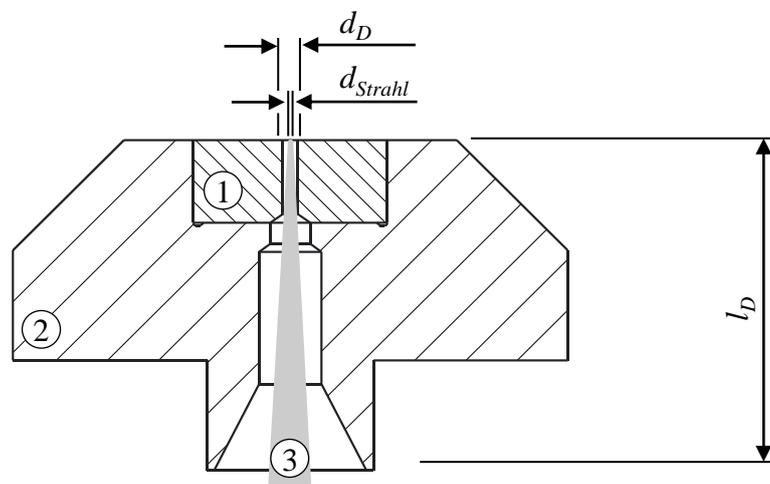
Tabelle 4.6: Werte der Rohrreibungszahl λ_j der Segmente 1 und 2 bei unterschiedlichen Pumpendrücken

	Rohrreibungszahl λ_j	
	Segment 1	Segment 2
$p_p = 3\ 800,00$ bar	0,036	0,0433
$p_p = 3\ 400,00$ bar	0,037	0,0432
$p_p = 3\ 000,00$ bar	0,038	0,0431
$p_p = 2\ 600,00$ bar	0,039	0,0430

Die Druckverluste der Querschnittsverengungen werden anhand der Dichte des Wassers unter hohem Druck ρ_{Real} , der Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} , des Verhältnisses der Querschnittsfläche des Austrittsstrahls A_{Strahl} zur Querschnittsfläche der einzelnen Rohrsegmente A_j und des Verlustwerts ε_i beschrieben. Aufgrund des in Abbildung 4.2 aufgezeigten Rohrsystems resultiert lediglich eine Querschnittsverengung im Übergang von Rohrsegment 1 zu Rohrsegment 2. Der Verlustwert ε_1 wird anhand des Querschnittsverhältnisses und der Form der Querschnittsverengung ermittelt (HERWIG 2004). Die Querschnittsverengung ist im vorliegenden Fall aufgrund der Ausprägung des Übergangs von Segment 1 zu Segment 2 eine stetige Verengung und besitzt den Wert $\varepsilon_1 = 0,075$ (HERWIG 2004). Als stetige Verengung wird der kontinuierliche Übergang von einem großen zu einem kleinen Durchmesser verstanden. Dieser Wert ist anwendbar, da die Strömungsgeschwindigkeiten im Übergang von Segment 1 zu Segment 2 zwischen 0,6 m/s und 2 m/s betragen. Ausgehend von der Berechnung der Druckabnahme im Rohrsystem Δp_R muss auch der Druckverlust in der Düse Δp_D ermittelt werden.

4.1.1.3 Druckverlust in der Düse Δp_D

Nach DURST (2006) wird der Druckverlust in einer Düse durch die Strahleinschnürung im Düseneintritt verursacht. Dabei findet eine Umsetzung der potenziellen Energie des Wassers in kinetische Energie des Wasserstrahls statt. Beim Einströmen des Hochdruckwasserstrahls in die Düse mit dem Durchmesser d_D kontrahiert dieser auf den Strahldurchmesser d_{Strahl} . Dieser Vorgang führt nach KRISMANN (1994) zu hohen Druckverlusten. Der Wasserstrahl kann nach dem Düseneintritt aufgrund des hohen Querschnittsverhältnisses A_{Rohr} von Segment 2 zur Düse $A_{Düse}$ sowie der kurzen Durchlaufstrecke l_D als Freistahlströmung angesehen werden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4.4 näher beschrieben.



Legende:

① $\hat{=}$ Düsenstein

② $\hat{=}$ Düsenumfassung

③ $\hat{=}$ Freistahlströmung

$d_D \hat{=}$ Düsenum-
durchmesser

$l_D \hat{=}$ Düsenumlänge

$d_{Strahl} \hat{=}$ Strahl-
durchmesser

Abbildung 4.4: Schematische Beschreibung der verwendeten Wasserdüse

Die Düse, die in der Versuchsanlage eingesetzt wurde, besitzt eine Durchlaufstrecke von $l_D = 6$ mm. Aufgrund des kontrahierten Wasserstrahls erfolgt keine Berührung des Strahls mit der Düsenumwand. Nach BÖSWIRTH und BSCHORER (2014) wird das Verhältnis zwischen Düsenumdurchmesser d_D und kontrahiertem Wasserstrahldurchmesser d_{Strahl} als Kontraktionsziffer μ_D bezeichnet.

Folglich errechnet sich der Druckverlust in der Düse Δp_D als:

$$\Delta p_D = \frac{l}{2} \cdot (1 - \mu_D)^2 \cdot \frac{\rho_{Real}}{2} \cdot v_{Strahl}^2 \quad \text{mit } \mu_D = \frac{d_{Strahl}^2}{d_D^2}. \quad (4.7)$$

KRISMANN (1994) beschreibt, dass alle Kontraktionsziffern μ_D der Düsendurchmesser, die für das Wasserstrahltrennen verwendet werden, einen Wert zwischen 0,61 und 0,64 einnehmen. Diese Aussage deckt sich mit der Angabe nach BÖSWIRTH und BSCHORER (2014), die besagt, dass bei plötzlichen Querschnittsverengungen für die Quotienten der Querschnittsflächen $A_{Düse}/A_{Rohr} < 0,01$ Kontraktionsziffern in einem Wertebereich von 0,61 bis 0,62 resultieren. Im vorliegenden Fall liegt der beschriebene Quotient bei 0,002. Aufgrund einer konservativen Betrachtung des Anwendungsfalls wird mit einer Kontraktionsziffer von $\mu_D = 0,62$ gerechnet.

Ausgehend von den Gleichungssystemen 4.5, 4.6 und 4.7 kann die resultierende Düsenaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} ermittelt werden. Dieser Sachverhalt ist in den nachfolgenden Absätzen beschrieben.

4.1.1.4 Kalkulation der Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse v_{Strahl}

Anhand der Berechnung nach BERNOULLI und der Gegebenheiten der Druckverluste Δp_R und Δp_D kann die resultierende Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls aus der Düse bestimmt werden. Das umgeformte Gleichungssystem lautet wie folgt:

$$v_{Strahl} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot (p_p - p_0)}{\rho_{Real}} - 2 \cdot g \cdot (l_{Gesamt} - l_0) \right) \cdot Verl.} \quad (4.8)$$

Zur Übersichtlichkeit wurde ein Faktor für die Verluste $Verl.$ im Rohrsystem und in der Düse eingeführt. Dieser berechnet sich als:

$$Verl. = \frac{l}{\left(1 + 0,5 \cdot (1 - \mu_D)^2\right) + \left(\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{l_j}{d_j} \cdot \frac{A_{Strahl}^2}{A_j^2}\right) + \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot \frac{A_{Strahl}^2}{A_i^2}\right)} \quad (4.9)$$

Anhand den Gleichungen 4.8 und 4.9 kann die verlustbehaftete Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} bestimmt werden. Dabei sind alle benötigten Variablen bekannt. Diese können Anhang A.8 entnommen werden. Tabelle 4.7 zeigt die Ergebnisse der verlustbehafteten Strahlaustrittsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Pumpendrücken.

Tabelle 4.7: Ergebnisse der Berechnung der verlustbehafteten mittleren Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl}

v_{Strahl} bei $p_p = 3\,800,00$ bar	795,27 m/s
v_{Strahl} bei $p_p = 3\,400,00$ bar	755,63 m/s
v_{Strahl} bei $p_p = 3\,000,00$ bar	713,44 m/s
v_{Strahl} bei $p_p = 2\,600,00$ bar	667,34 m/s

Da die verlustbehafteten Strahlaustrittsgeschwindigkeiten v_{Strahl} bekannt sind, können anhand der Gleichungssysteme 4.6 und 4.7 sowie der Variablen aus Anhang A.8 die jeweiligen Druckverluste berechnet werden. Dabei zeigt Tabelle 4.8 den Druckverlust Δp_R im Rohr und Tabelle 4.9 den Druckverlust Δp_D in der Düse.

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Berechnungen des Druckverlusts Δp_R

Δp_R bei $p_p = 3\,800,00$ bar	0,014 bar
Δp_R bei $p_p = 3\,400,00$ bar	0,012 bar
Δp_R bei $p_p = 3\,000,00$ bar	0,011 bar
Δp_R bei $p_p = 2\,600,00$ bar	0,0094 bar

Tabelle 4.9: Ergebnisse der Berechnungen des Druckverlusts Δp_D

Δp_D bei $p_p = 3\,800,00$ bar	255,81 bar
Δp_D bei $p_p = 3\,400,00$ bar	228,70 bar
Δp_D bei $p_p = 3\,000,00$ bar	201,94 bar
Δp_D bei $p_p = 2\,600,00$ bar	175,01 bar

Es ist ersichtlich, dass der Druckverlust im Rohr im Vergleich zum Druckverlust in der Düse sehr gering ist. Die Ursache ist dabei der beträchtliche Unterschied des

Rohrquerschnitts zum Düsenquerschnitt. Infolge der abrupten Verkleinerung des Querschnitts resultiert ein Druckverlust von 6,73 %. Die Druckverluste im Rohrsystem sind dabei im Vergleich zum Pumpendruck äußerst gering.

Aufgrund der Berechnungen der unterschiedlichen Austrittsgeschwindigkeiten bei Verlassen der Düse kann eine Aussage über den Einfluss des Wasserdrucks auf die Zielfunktionen getroffen werden. Für die Zielfunktion *Wasserabsorption* ist der Massenstrom aus der Düse ausschlaggebend. Ein geringer Massenstrom aus der Düse bedeutet, dass ein geringeres Wasservolumen das Textil benetzt. Dabei kann Folgendes festgehalten werden: Je geringer der Massenstrom aus der Düse, desto geringer ist die Wasserabsorption des Textils. Anhand des analytischen Beweises mithilfe der Formel 4.4 sowie den Ergebnissen aus Tabelle 4.7 und Anhang A.8 kann der Massenstrom aus der Düse bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 4.10 dargestellt.

Tabelle 4.10: Ergebnisse der Berechnungen des Massenstroms aus der Düse

$p_p = 3\,800,00$ bar	0,017 kg/s
$p_p = 3\,400,00$ bar	0,016 kg/s
$p_p = 3\,000,00$ bar	0,015 kg/s
$p_p = 2\,600,00$ bar	0,014 kg/s

Hieraus resultiert bei einem geringeren Wasserdruck ein minimaler Massenstrom. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.3, bei denen eine minimale Wasserabsorption bei einem möglichst niedrigen Wasserdruck erzielt wurde.

Eine Aussage über den Einfluss des Wasserdrucks auf die Zielfunktion *Schnittkantenqualität* kann noch nicht getroffen werden, da die analytische Modellierung lediglich die Wasserstrahlgeschwindigkeit nach dem Austritt aus der Düse betrachtet. Aus diesem Grund muss der Einfluss des Wasserdrucks auf die Zielfunktion *Schnittkantenqualität* in Kombination mit dem Düsenabstand betrachtet werden. Anhand der verlustbehafteten Strahlaustrittsgeschwindigkeit kann der Freistrahle nach Düsenaustritt weiter erörtert werden. Dieser Sachverhalt wird im nachfolgenden Kapitel behandelt.

4.1.2 Identifikation der Einflüsse des Düsenabstands

Die Freistrahströmung umfasst die Geschwindigkeitsverteilung eines Wasserstrahls in Abhängigkeit der Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} . Der Übergang eines Fluids mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit in ein gasförmiges Medium wird als *turbulenter Freistrah* bezeichnet (ROTTA 2010). Dabei resultiert aus der Reibung zwischen dem Fluid und dem gasförmigen Medium eine Grenzschichtströmung. Das gasförmige Medium, im vorliegenden Betrachtungsfall die Umgebungsluft, wird während des Strahlvorgangs vom Fluidstrahl mitgerissen. Dies hat zur Folge, dass sich mit steigendem Abstand zum Düsenaustritt der Massenstrom und der Strahldurchmesser erhöhen (KRISMANN 1994).

Die turbulente Freistrahströmung beim Wasserstrahlrennen wird nach der Grenzschicht-Theorie als freie, turbulente Strömung mit formloser Grenzschicht bezeichnet (AIGNER & CARSTENSEN 2015). Hierbei wird jedoch kein fester Körper umströmt; vielmehr tritt der Wasserstrahl direkt in die Umgebungsluft ein. Nach OHNESORGE (1936) lässt sich eine turbulente Freistrahströmung hinsichtlich des Zerfalls nach Eintritt in das gasförmige Medium in drei Mechanismen unterteilen. Abbildung 4.5 zeigt die drei genannten Strahlzerfallsprozesse.

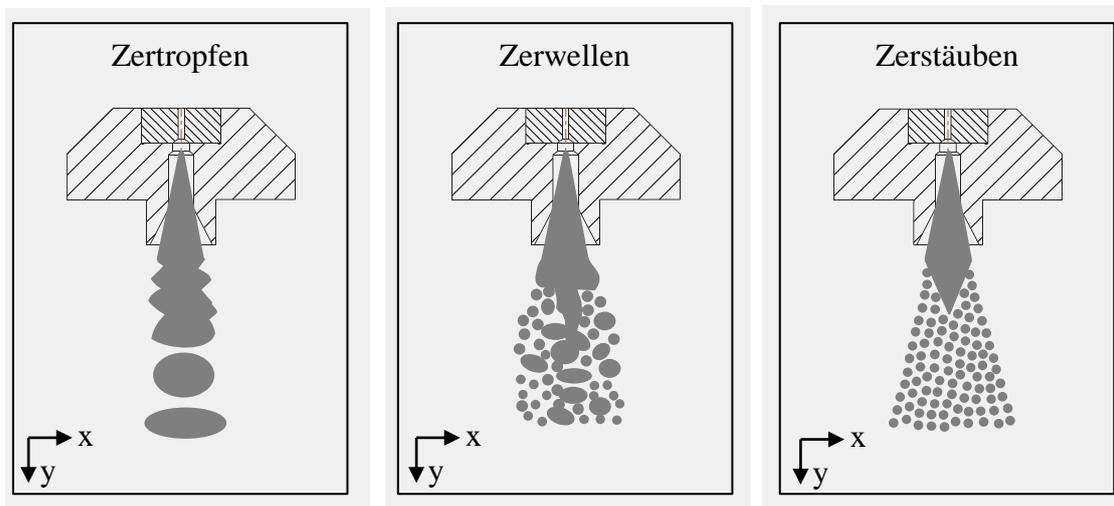


Abbildung 4.5: Darstellung der Strahlzerfallsarten in Anlehnung an PFEIFER (2010)

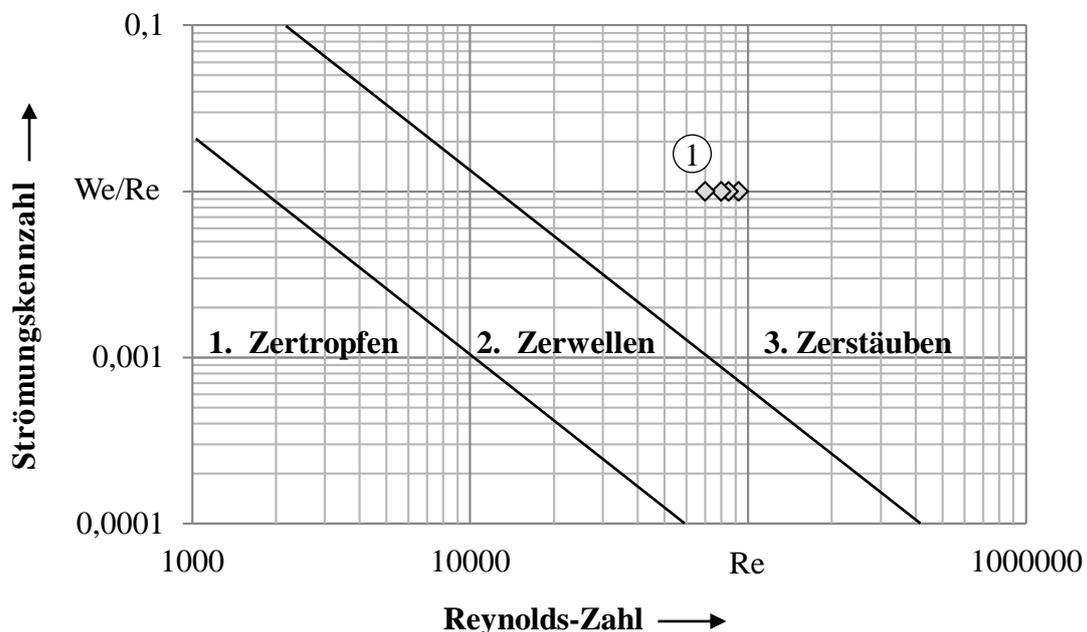
Der erste aufgezeigte Effekt ist das *Zertropfen*. Dabei verursachen achsensymmetrische Oberflächenschwingungen eine rotationssymmetrische Auflösung des Freistrahls. Der zweite Mechanismus ist das *Zerwellen* des Freistrahls. Dabei ist die schraubensymmetrische Schwingung der Strahlmasse für eine rotationssymmetrische Auflösung des Strahls ausschlaggebend. Der letzte dargestellte Effekt ist das *Zerstäuben*. Bei diesem Vorgang ist keine intakte Strahloberfläche vorhanden und der Zerfall

in kleine Tropfen erfolgt unmittelbar nach dem Verlassen der Düse (AIGNER & CARSTENSEN 2015, OHNESORGE 1936, PFEIFER 2010, WEBER 1931).

Zur Bestimmung der Art des Strahlzerfalls für das Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffasern muss die dimensionslose Kennzahl We/Re bestimmt werden. Diese Kennzahl berechnet sich wie folgt:

$$\frac{We}{Re} = \frac{\eta_{Wasser}}{\sqrt{\sigma_{Wasser} \cdot \rho_{Real} \cdot d_{Strahl}}}. \quad (4.10)$$

Der Quotient aus Weber-Zahl We und der Reynolds-Zahl Re beschreibt die Charakterisierung der Zerstäubung eines Fluids in einem gasförmigen Medium (AIGNER & CARSTENSEN 2015). Hierbei ist Folgendes zu beachten: Je größer der berechnete Quotient ist, desto stärker zerfällt der Wasserstrahl in der Umgebungsluft. Für die Bestimmung des Strahlzerfalls sind außerdem die Dichte des Wassers ρ_{Real} , der Strahlaustrittsdurchmesser d_{Strahl} , die dynamischen Viskosität des Wassers η_{Wasser} und die Oberflächenspannung des Wasserstrahls σ_{Wasser} ausschlaggebend. Für die Oberflächenspannung des Wassers bei Laborbedingungen σ_{Wasser} wurde nach WAGNER und KRUSE (1998) eine Wertigkeit von $\sigma_{Wasser} = 0,073 \text{ N/m}$ bestimmt.



Legende:

① ; $\diamond \triangleq$ Druckbereich von 2600 bar bis 3800 bar in Abständen von 400 bar, beginnend bei 2600 bar

Abbildung 4.6: Bestimmung der Zerfallsart nach OHNESORGE (1936)

Durch die Berechnung der Kennzahl We/Re und den anschließenden Abtrag in das doppellogarithmische Diagramm nach OHNESORGE (1936) kann die Zerfallsart des Wasserstrahls bestimmt werden. Dieser Vorgang wird in Abbildung 4.6 näher verdeutlicht. Die einzelnen Werte der We/Re -Kennzahlen können Anhang A.9 entnommen werden. Wie in Abbildung 4.6 ersichtlich, lässt sich der beschriebene Wasserstrahlprozess in den Bereich des Zerstäubens einordnen. Nach OHNESORGE (1936) ist für den Effekt des Zerstäubens die Theorie des turbulenten Freistrahls anwendbar. Ausgehend von dieser Erkenntnis kann die Geschwindigkeitsverteilung des Freistrahls näher beschrieben werden.

Nach ROTTA (2010) wird der Wasserstrahl nach dem Austritt aus der Düse zunächst als Kernströmung definiert. Diese setzt sich aus einem gebündelten Kernstrahl und einer Freistrahlsströmung zusammen. Besteht der Wasserstrahl nur aus einer Freistrahlsströmung, wird dieser als voll ausgebildet angesehen. Die Länge der Kernströmung z_A verhält sich proportional zum Düsendurchmesser d_D und ist wie folgt beschrieben:

$$z_A = c \cdot d_D. \quad (4.11)$$

Laut BOLLRICH (2013) ist der Kernzonenkoeffizient c für den vorliegenden Betrachtungsfall (Eintritt eines Fluides in die Umgebungsluft) mit $c = 50$ definiert. Dieser Koeffizient berechnet sich näherungsweise mittels der Dichte der Umgebungsluft und der Dichte des Wasserstrahls. Hierbei ergibt sich nach Berechnung der Länge der Kernströmung z_A bei einem Düsendurchmesser von $d_D = 0,2 \text{ mm}$ der Wert $z_A = 10 \text{ mm}$.

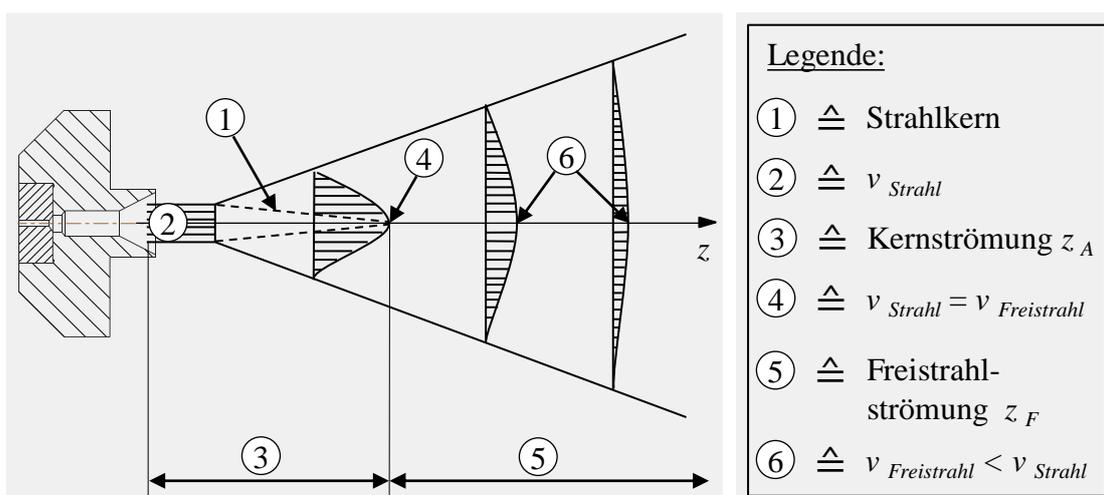


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs einer turbulenten Freistrahlsströmung in Anlehnung an ROTTA (2010)

Laut ROTTA (2010) ist die Geschwindigkeit des Freistrahls $v_{Freistrah}$ im Bereich der Kernströmung gleich der Strahlaustrittsgeschwindigkeit v_{Strahl} . Abbildung 4.7 zeigt den beschriebenen Geschwindigkeitsverlauf einer turbulenten Freistrahlsströmung.

Im Bereich der ausgebildeten Freistrahlsströmung $z_F > z_A$ geht die Geschwindigkeit des Freistrahls $v_{Freistrah}$ mit steigendem Abstand zum Düsenaustritt zurück. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit resultiert im Verlauf der Strahlachse z . Die Geschwindigkeit des voll ausgebildeten Freistrahls $v_{Freistrah}$ wird nach OHNESORGE (1936) wie folgt berechnet:

$$v_{Freistrah} = 50 \cdot v_{Strahl} \cdot \frac{d_{Strahl}}{z}. \quad (4.12)$$

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, beträgt die Durchlaufstrecke der Düse $l_D = 6$ mm. Anhand der Düsenabstände zur Textiloberfläche von 3 mm bis 6 mm (siehe Kapitel 3.1.2.2) sowie durch Addition der Düsendurchlaufstrecke l_D kann der jeweilige Gesamtabstand z vom Düsenaustritt errechnet werden. Abbildung 4.8 zeigt beispielhaft den Abfall der Strahlgeschwindigkeit bei einem Pumpendruck von 3800 bar für die jeweiligen Düsenabstände zur Textiloberfläche.

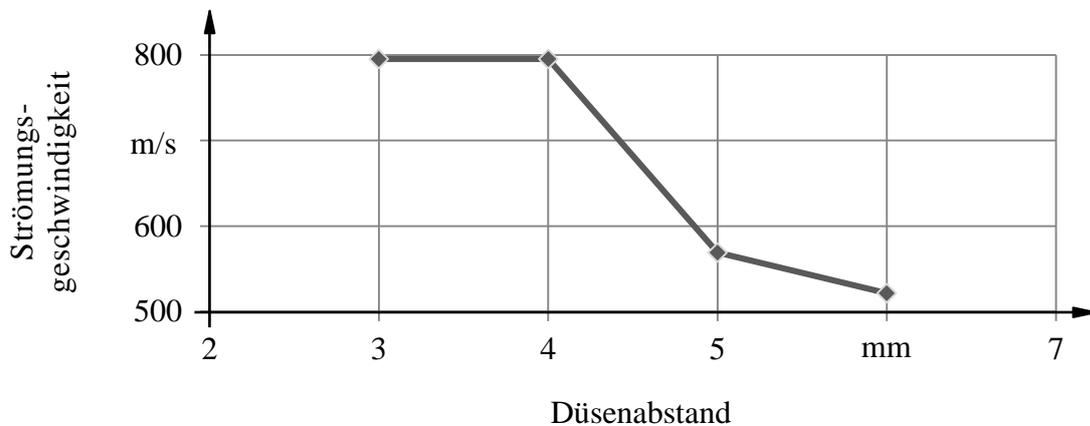


Abbildung 4.8: Darstellung des Geschwindigkeitsabfalls der mittleren Freistrahlsströmung bei 3800 bar Wasserdruck

Hierbei wird ersichtlich, dass die Freistrahlgeschwindigkeit im Bereich der voll ausgebildeten Freistrahlsströmung abnimmt. Diese Beobachtung wird durch die Versuche nach ROTTA (2010) bestätigt. Die Geschwindigkeitsverläufe aller getesteten Druckbereiche sind qualitativ kongruent. Die Werte der jeweiligen Freistrahlgeschwindigkeiten können Anhang A.9 entnommen werden.

Neben der Berechnung der Abnahme der Strahlgeschwindigkeit ist die Bestimmung des Strahldurchmessers d_z in Abhängigkeit des Abstands z zum Düsen Eintritt zu berücksichtigen. Der Strahldurchmesser d_z steigt dabei proportional zur Distanz z an (KRISMANN 1994). Für die Ableitung eines allgemeingültigen Zusammenhangs wurden nach ROTTA (2010) verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Hierbei konnte folgende Kausalität festgestellt werden:

$$d_z = d_{Strahl} + (0,352 \cdot z). \quad (4.13)$$

Das in Gleichung 4.13 dargestellte Verhältnis ist durch das Gleichungssystem nach KRISMANN (1994) zur Bestimmung der Strahlbreite bei einer Reduktion der Strahlgeschwindigkeit um 50 % gestützt.

Anhand dieser erarbeiteten Erkenntnisse kann das physikalische Prozessmodell für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien abgeleitet werden. Diese Vorgehensweise ist im nachfolgenden Kapitel beschrieben

4.1.3 Ableiten des physikalischen Prozessmodells

Für eine Aussage über den Einfluss des Düsenabstands auf die Zielfunktion *Wasserabsorption* konnte aufgezeigt werden, dass aus einem zunehmenden Düsenabstand ein erhöhter Massenstrom erfolgt. Bei Zunahme des Düsenabstands ergeben sich sowohl eine Reduktion der Freistrahlgeschwindigkeit als auch eine Erhöhung des Strahldurchmessers. Dies hat zur Folge, dass eine erhöhte Wasserabsorption aus einem zunehmenden Düsenabstand resultiert. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.3. Die Resultate haben Folgendes aufgezeigt: Je niedriger der Düsenabstand zum Werkstück, desto geringer ist die Wasseraufnahme durch das Textil.

Für den Einfluss des Düsenabstands auf die Zielfunktion *Schnittkantenqualität* ist ausschlaggebend, dass eine möglichst hohe Strahlgeschwindigkeit auf dem Textil vorliegt, sodass die Fasern prozesssicher durchtrennt werden können. Dahingehend konnte durch die analytische Betrachtung des Düsenabstands aufgezeigt werden, dass innerhalb der Kernzone des Freistrahls die Strahlaustrittsgeschwindigkeit aus der Düse v_{Strahl} vorherrscht. Aufgrund dieser Tatsache ist ein optimales sowie prozesssicheres Trennen nur innerhalb der Kernzone des Freistrahls möglich. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Versuchsergebnissen aus Kapitel 3.2.3. Dabei wurden die optimalen Versuchsparameter mit einem geringen Düsenabstand erreicht.

Eine Aussage über den Einfluss des Wasserdrucks ist, wie vorab beschrieben, nur in Kombination mit einer Berücksichtigung des Düsenabstands möglich. Diese Annahme kann nur innerhalb der Kernzone des Freistrahls getroffen werden. Der Wasserdruck, der die Freistrahlggeschwindigkeit des Wassers beeinflusst, ist dabei groß genug zu wählen, sodass die Fasern durchtrennt werden. Für diesen Umstand sind die Materialparameter der Kohlenstofffasern senkrecht zur Faserrichtung ausschlaggebend: Nach CHERIF (2011) besitzen Kohlenstofffasern dieser Orientierung eine geringe Querfestigkeit und damit eine hohe Scherempfindlichkeit. Dies hat zur Folge, dass es bei einer Scherbeanspruchung senkrecht zur Faserrichtung zu einem Materialbruch der Fasern kommt. Eine exakte Bestimmung der Materialkennwerte senkrecht zur Faserrichtung ist mit einem sehr hohen Mess- sowie Materialaufwand verbunden (EHRENSTEIN 2006). Die Literatur gibt einen Wert von 28 000 N/mm² für das E-Modul einer HT-Faser senkrecht zur Faserrichtung an (SCHÜRMAN 2007). Für diesen Wert ist ein minimaler Wasserdruck von 2600 bar ausreichend, um die Fasern zu trennen.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen und den physikalischen Randbedingungen aus den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 kann das allgemeine physikalische Prozessmodell gebildet werden. Wie aufgezeigt, müssen neben den einstellbaren Maschinenparametern weitere physikalische Größen beachtet werden. Die vorherrschende Kraft des Wasserstrahls $F_{Wasserstrahl}$, die auf eine Kohlenstofffaser einwirkt, ist dabei von besonderer Bedeutung, da diese den Materialbruch hervorruft. Diesbezüglich wird nach ROTTA (2010) die Kraft des Wasserstrahls wie folgt charakterisiert:

$$F_{Wasserstrahl} = \rho_{Real} \cdot A_{Wasserstrahl} \cdot v_{Strahl}^2. \quad (4.14)$$

Dabei setzt sich die Kraft des Wasserstrahls aus der Dichte des Wassers bei hohen Drücken ρ_{Real} , der Querschnittsfläche des Wasserstrahls A_{Strahl} und der verlustbetroffenen Strahlgeschwindigkeit v_{Strahl} zusammen. Die Kraft des Wasserstrahls wirkt hierbei auf die gesamte Fläche, welche die Kohlenstofffaser kontaktiert. Anhand der Einordnung des Reinwasserstrahltrennens von Kohlenstofffasern in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 in Kapitel 2.3.3.3 als Scherschneiden, muss die zulässige Scherspannung der Kohlenstofffaser betrachtet werden. Um die Fasern zu zerteilen, muss die vorherrschende Scherspannung $\tau_{Vor.}$ höher sein als die zulässige Scherspannung der Kohlenstofffaser quer zur Faserrichtung $\tau_{Zul., quer}$. Dieser Sachverhalt ist wie folgt beschrieben:

$$\tau_{Vor.} = \frac{F_{Wasserstrahl}}{A_{Kohlenstofffaser}} > \tau_{Zul., quer}. \quad (4.15)$$

Die vorherrschende Scherspannung berechnet sich aus der am Querschnitt einer Kohlenstofffaser anliegenden Kraft des Wasserstrahls. Dabei besitzen sowohl der Düsenabstand zum Material als auch der eingestellte Wasserdruck einen hohen Einfluss auf die Kraft des Wasserstrahls. Zur besseren Einordnung werden die jeweiligen Kräfte des Wasserstrahls bei unterschiedlichen Pumpendrücken und Düsenabständen in Tabelle 4.11 aufgezeigt.

Tabelle 4.11: Wasserstrahlkräfte bei unterschiedlichen Wasserdrücken und Düsenabständen

		Wasserdruck			
		2 600,00 bar	3 000,00 bar	3 400,00 bar	3 800,00 bar
Düsenabstand	3,00 mm	4 210,75 N	4 859,04 N	5 505,30 N	6 157,97 N
	4,00 mm	5 145,93 N	5 938,21 N	6 727,00 N	7 525,62 N
	5,00 mm	3 166,33 N	3 653,93 N	4 139,84 N	4 630,65 N
	6,00 mm	3 146,85 N	3 631,45 N	4 114,31 N	4 602,19 N

Es wird ersichtlich, dass die Kraft des Wasserstrahls mit zunehmenden Wasserdruck steigt. Anhand von Abbildung 4.7 wird verdeutlicht, dass die Geschwindigkeit des Wasserstrahls innerhalb der Kernzone gleichbleibend ist. Daher steigt die Kraft des Wasserstrahls innerhalb der Kernzone mit zunehmendem Düsenabstand an. Außerhalb der Kernzone nimmt die Kraft des Wasserstrahls aufgrund der abnehmenden Dichte des Wasser-Luftgemisches sowie der sinkenden Geschwindigkeit des Wasserstrahls stark ab. Dieses Verhalten konnte auch bei der Auswertung der Parameterstudien festgestellt werden. Dabei ergaben sich hinsichtlich der Zielfunktionen die qualitativ besten Ergebnisse innerhalb der Kernzone.

Die Formel 4.15 stellt somit die allgemeingültige physikalische Bedingung für das Zerteilen von Kohlenstofffasern mittels eines Reinwasserstrahls dar. Ist die vorherrschende Scherspannung höher als die zulässige Scherspannung der Kohlenstofffaser quer zur Faserrichtung, wird die Faser zerteilt. Es muss generell beachtet werden, dass dabei eine einzelne Kohlenstofffaser berücksichtigt wird. Wie in Kapitel 2.2.1.1 erläutert, setzt sich ein Roving aus mehreren einzelnen Kohlenstofffasern zusammen. Dabei wirkt die Kraft des Wasserstrahls auf das Faserbündel ein und verteilt sich auf die einzelnen Fasern.

Für die Anwendung der eingestellten Maschinenparameter der Reinwasserstrahltechnologie kann die Formel 4.15 weiter ausformuliert werden, sodass der Einfluss der einstellbaren Maschinenparameter erkennbar ist. Dieser Sachverhalt stellt sich für die Betrachtung innerhalb der Kernzone wie folgt dar:

$$\frac{\rho_{Real} \cdot \frac{\pi \left(\sqrt{\mu_D \cdot d_D^2 + (0,352 \cdot z)} \right)^2}{4} \cdot v_{Strahl}^2}{A_{Kohlenstofffaser}} > \tau_{Zul., quer} \quad (4.16)$$

Hierbei ist ρ_{Real} die Dichte von Wasser bei hohen Drücken, v_{Strahl} die verlustbehaftete Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls, μ_D die Kontraktionsziffer der Düse, d_D der Düsendurchmesser und z der Gesamtabstand vom Düseneintritt zum Fasermaterial. Aufgrund der Übersichtlichkeit wird die Gleichung der verlustbehafteten Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls v_{Strahl} nicht angegeben und kann den Formeln 4.8 und 4.9 entnommen werden. Der Gesamtabstand z wird durch Addition der Durchlaufstrecke der Düse l_D mit dem jeweiligen eingestellten Düsenabstand l_{Da} gebildet. Das physikalische Prozessmodell für die Betrachtung außerhalb der Kernzone des Wasserstrahls, wobei der Wasserstrahl als voll ausgebildete Freistrahlsströmung vorliegt, ist nachfolgend aufgezeigt:

$$\frac{\rho_{Frei} \cdot \frac{\pi \left(\sqrt{\mu_D \cdot d_D^2 + (0,352 \cdot z)} \right)^2}{4} \left(50 \cdot v_{Strahl} \cdot \frac{\sqrt{\mu_D \cdot d_D^2}}{z} \right)^2}{A_{Kohlenstofffaser}} > \tau_{Zul., quer} \quad (4.17)$$

Bei einer Freistrahlsströmung muss anstatt der Dichte des Wassers bei hohen Drücken die Dichte des Wasser-Luftgemisches ρ_{Frei} berücksichtigt werden. Anhand der Gleichungssysteme 4.8, 4.9, 4.16 und 4.17 können die einstellbaren Maschinenparameter der Reinwasserstrahltechnologie für das Trennen von Kohlenstofffasern objektiviert werden. Dabei ist zu beachten, dass das Gleichungssystem 4.16 für die Betrachtungen innerhalb der Kernzone des Wasserstrahls und die Formel 4.17 für eine vollausgebildete Freistrahlsströmung gelten. Somit lässt sich das allgemeine physikalische Prozessmodell für das Zerteilen der Fasern darstellen. Die aus den Versuchen (siehe Kapitel 3.2) gewonnenen Erkenntnisse können mittels eines empirischen Prozessmodells aufgezeigt werden. Diese Vorgehensweise ist nachfolgend beschrieben.

4.2 Empirisches Prozessmodell

Die erarbeiteten analytischen Erkenntnisse der jeweiligen Maschinenparameter hinsichtlich der definierten Zielfunktionen decken sich mit den Erkenntnissen der Versuchsauswertung aus Kapitel 3.2.3. Dennoch wird angestrebt, eine Aussage über das Gesamtsystem zu treffen, sodass ein Anwender die Versuche auf weitere Wasserstrahlanlagen applizieren kann. Für diese Vorgehensweise ist es ausschlaggebend, dass die empirisch festgestellten Ergebnisse mittels eines Prozessmodells wiedergegeben werden. Für diese Zielstellung ist der eingebrachte Impuls in das Gesamtsystem zu berücksichtigen. Anhand des Impulses, der durch die jeweiligen Maschinenparameter beeinflusst wird, ist es möglich, eine allgemeingültige Aussage zu treffen.

Der Impuls des Gesamtsystems setzt sich aus der aufgebrachten Kraft des Wasserstrahls $F_{Wasserstrahl}$, dem Umfang der Versuchsgeometrie $U_{Geometrie}$, die den zurückgelegten Weg beschreibt, und der jeweiligen Vorschubgeschwindigkeit $v_{Vorschub}$ des Düsenpakets zusammen. Hierbei kann eine allgemeingültige Aussage über das Systemverhalten getroffen werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets über den gesamten Umfang des Trennobjekts konstant ist. Der Impuls des Gesamtsystems berechnet sich wie folgt:

$$I_{Gesamt} = \frac{F_{Wasserstrahl} \cdot U_{Geometrie}}{v_{Vorschub}}. \quad (4.18)$$

Dabei wird ersichtlich, dass je höher die Vorschubgeschwindigkeit gewählt wird, desto kleiner der eingebrachte Impuls in das Gesamtsystem wird. Anhand der Parameterstudien wurde ermittelt, dass optimale Ergebnisse hinsichtlich der besten Schnittkantenqualität und der geringsten Wasserabsorption mit der höchsten Vorschubgeschwindigkeit erzielt wurden. Des Weiteren wurde erarbeitet, dass die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilabschnitt die Zielfunktionen eminent beeinflusst.

Anhand der Berechnung aus Formel 4.18 und der Ergebnisse aus Kapitel 3.2.3 zu den Untersuchungen der Trennparameter können die optimalen Impulse mit Bezug zu den jeweiligen Zielfunktionen ermittelt werden. Des Weiteren kann die Grenzuntersuchung aus Kapitel 3.1.2.3 anhand des Impulses in eine allgemeingültige Form überführt werden. Die Berechnung des Gesamtimpulses ist in Tabelle 4.12 für die jeweiligen unidirektionalen Textilien zusammengefasst.

4 Prozessmodelle

Tabelle 4.12: Berechnung der Impulse der optimalen Maschinenparameter hinsichtlich der Zielfunktionen aus den Tabellen 3.8 und 3.9 sowie der minimal notwendigen Impulse

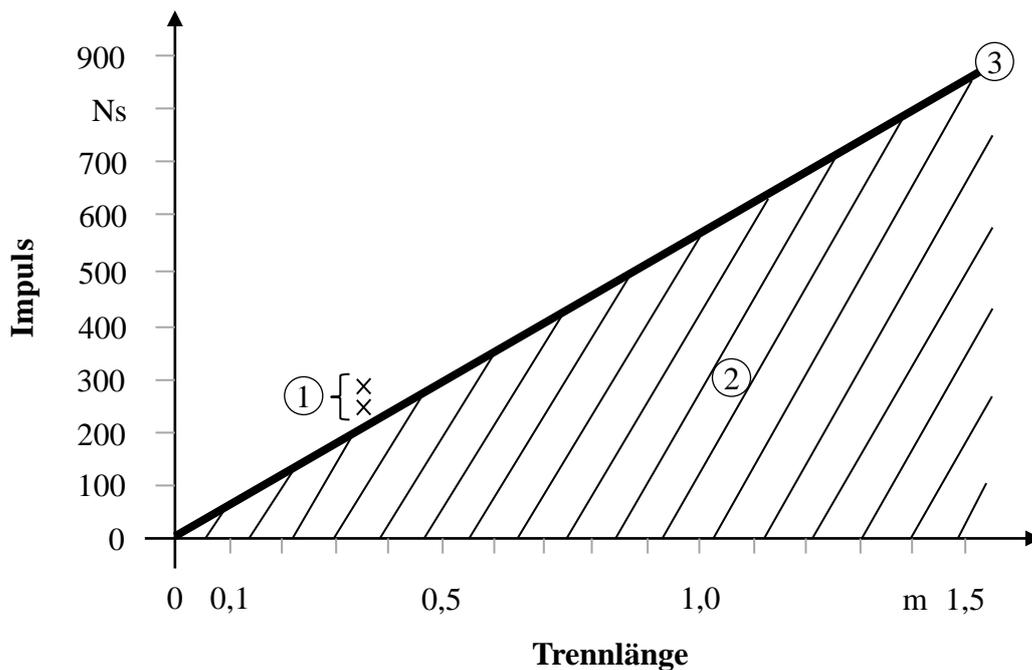
Gelege	Impuls Schnittkantenqualität	Impuls Wasserabsorption	Minimal Impuls
HT 50 g/m ²	284,75 Ns	246,76 Ns	196,99 Ns
HT 80 g/m ²	246,76 Ns	246,76 Ns	196,99 Ns
HT 120 g/m ²	246,76 Ns	246,76 Ns	196,99 Ns
HT 200 g/m ²	284,75 Ns	246,76 Ns	196,99 Ns
HM	246,76 Ns	246,76 Ns	196,99 Ns
UHM	284,75 Ns	246,76 Ns	196,99 Ns

Nach ROTTA (2010) ist der Impuls innerhalb des Kernzonenbereichs z_A konstant. Daher wird in der nachfolgenden Betrachtung nur die berechnete Kraft des Wasserstrahls im Kernzonenbereich berücksichtigt. Eine Berechnung der Kraft der voll ausgebildeten Freistahlströmung z_F ist aufgrund der unbekanntenen Dichte des Wasser-Luft-Gemisches nicht möglich. Für die Bestimmung dieser Dichte muss eine computergestützte Simulation durchgeführt werden. Wie in Tabelle 4.12 ersichtlich, muss ein minimaler Impuls von 196,99 Ns bei einer festgelegten Versuchsgeometrie (siehe Abbildung 3.9) in das Gesamtsystem eingebracht werden, sodass ein Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien möglich ist. Zu beachten sind dabei die Randbedingungen des Gesamtsystems – etwa der minimale Wasserdruck, der benötigt wird, um die Fasern gerade noch zu trennen. Die ermittelten Impulse sind von der betrachteten Geometrie des Schneidmusters abhängig. Der geometrieunabhängige minimale Impulswert I_{Min} für das Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffasern beträgt hierbei 562,84 Ns/m. Das heißt, dass ein minimaler Impuls von 562,84 Ns für die Strecke von 1 m aufgebracht werden muss. Ausgehend von diesem Wert kann der Anwender die erforderlichen Maschinenparameter für das Trennen der aufgeführten unidirektionalen Kohlenstofffaser-Gelege für eine beliebige Geometrie ermitteln.

Aufgrund dieser Erkenntnisse kann das empirische Prozessmodell für das Zerteilen der ausgewählten unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien mittels der Reinwas-
 serstrahltechnologie abgeleitet werden:

$$I_{Min.} = 562,84 \frac{N_s}{m} \cdot x. \quad (4.19)$$

Hierbei ist x die Trennlänge einer beliebigen Geometrie. Anhand des Gleichungssystems 4.19 und der Grenzuntersuchung aus Abbildung 3.4 kann ein grafischer Zusammenhang des empirischen Prozessmodells dargestellt werden. Die Funktion der Formel 4.19 entspricht dabei einer Grenze. Unterhalb dieser Grenze ist ein Zerteilen der ausgewählten Kohlenstofffasern nicht möglich. Die ermittelten optimalen Impulse liegen, wie dargestellt, oberhalb der Grenzfunktion. Anhand der Darstellung 4.9 ist ersichtlich, dass ein Anwender den minimalen Impuls mittels der Trennlänge einer Geometrie bestimmen muss. Das heißt, dass für jede Geometrie ein separater minimaler Impuls zu ermitteln ist.



- Legende:
- ① $\hat{=}$ Empirisch ermittelte Impulse aus Tabelle 4.12
 - ② $\hat{=}$ Impulsbereich, bei dem ein Trennen nicht möglich ist
 - ③ $\hat{=}$ Funktion aus Gleichung 4.19

Abbildung 4.9: Darstellung des empirischen Prozessmodells sowie der optimalen Impulse zum Trennen der ausgewählten Kohlenstofffasern

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zur Ermittlung eines übertragbaren Zusammenhangs für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien wurde das Vorgehen nach DENKENA und TÖNSHOFF (2011) gewählt. Dabei werden anhand der Versuchsergebnisse und physikalischen Gesetze ein empirisches und ein physikalisches Prozessmodell abgeleitet, sodass eine allgemeingültige Aussage über den Trennprozess möglich ist. Daraus ergeben sich folgende Zielstellungen: Das physikalische Prozessmodell muss das Zerteilen der Fasern charakterisieren und das empirische Prozessmodell muss einen übertragbaren Zusammenhang der Versuchsergebnisse beschreiben.

Anhand der physikalischen Gleichungssysteme wird ersichtlich, dass der eingestellte Wasserdruck und der Düsendurchmesser die Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls aus der Düse beeinflussen. Dabei müssen die Verluste des Wasserdrucks aufgrund der Querschnittsverengung und Rohrreibung berücksichtigt werden. Nach ROTTA (2010) wird angenommen, dass die Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls aus der Düse innerhalb einer definierten Kernzone gleichbleibend ist. Außerhalb dieser Kernzone ist die Geschwindigkeit des Wasserstrahls aufgrund der Reibung des Wasser-Luftgemischs hohen Verlusten ausgesetzt.

Der Düsenabstand zum Material übt einen eminenten Einfluss auf das Schneidergebnis aus. Ist der Düsenabstand zu hoch gewählt, sodass sich das zu trennende Material außerhalb der Kernzone des Wasserstrahls befindet, so ist ein Zerteilen nicht mehr möglich. Anhand dieser Gegebenheit ist ein prozesssicheres Trennen der Kohlenstofffaser nur innerhalb der Kernzone möglich. Diese Erkenntnis deckt sich mit den empirisch ermittelten Ergebnissen aus Kapitel 3.2. Zu beachten ist dabei, dass die Kernzone bei Eintritt des Wasserstrahls in die Düse beginnt. Das heißt, dass die Durchlaufstrecke der Düse berücksichtigt werden muss.

Die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets evoziert die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilabschnitt. Dieser Maschinenparameter wird für die Ableitung des empirischen Prozessmodells benötigt, jedoch nicht für das physikalische Prozessmodell. Anhand der Zielsetzung des physikalischen Prozessmodells ist ersichtlich, dass lediglich das Zerteilen der Fasern ausschlaggebend ist. Dabei hat die Vorschubgeschwindigkeit innerhalb des physikalischen Prozessmodells keine Auswirkung auf das Zerteilen der Kohlenstofffasern.

Das physikalische Prozessmodell ist durch die anliegende Kraft des Wasserstrahls an der Querschnittsfläche einer Kohlenstofffaser beschrieben. Die Kraft des Wasser-

strahls berechnet sich aus der Dichte des Wassers bei hohen Drücken, dem Querschnitt des Wasserstrahls und der Strahlgeschwindigkeit. Um die Zielstellung des physikalischen Prozessmodells zu erreichen, muss die vorherrschende Scherspannung größer sein als die zulässige Scherspannung der Kohlenstofffaser quer zur Faserichtung. Hierfür wurde sowohl ein physikalisches Prozessmodell innerhalb als auch außerhalb der Kernzone des Wasserstrahls abgeleitet. Anhand dieser Gleichungssysteme ist das Zerteilen der Kohlenstofffasern charakterisiert und ein übertragbarer Zusammenhang der Einflüsse der Maschinenparameter erkennbar.

Das empirische Prozessmodell leitet sich anhand der Schlussfolgerungen aus Kapitel 3.2 ab. Für die Darstellung eines allgemeingültigen Zusammenhangs der Ergebnisse muss der in das Gesamtsystem eingebrachte Impuls betrachtet werden. Der Impuls berechnet sich aus der Kraft des Wasserstrahls, der Trennlänge und der Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets. Aufgrund der Grenzuntersuchungen aus Kapitel 3.1 konnte ein minimaler Impuls ermittelt werden, der benötigt wird, um die Kohlenstofffasern gerade noch zu trennen. Dabei ist der berechnete minimale Impuls von der jeweiligen Trennlänge abhängig. Diese Trennlänge charakterisiert den Umfang der gewählten Trenngeometrie. Ausgehend von diesem minimalen Impuls konnte das empirische Prozessmodell hergeleitet werden. Hierfür zeigt die Funktion des empirischen Prozessmodells auf, dass ein Trennen der Kohlenstofffasern unterhalb der Grenze des minimalen Impulses nicht möglich ist.

5 Bewertung und Anwendungsbeispiel

Die Zielstellung dieser Abhandlung umfasst die Qualifizierung des Reinwasserstrahl-trennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien, was eine Alternative so-wohl zu konventionellen mechanischen Trennverfahren als auch zum Laserstrahl-trennen darstellt. Dazu ist es notwendig, das Reinwasserstrahltrennen im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren anhand eines Anwendungsszenarios wirtschaftlich zu bewerten sowie den Technologiereifegrad zu bestimmen. Dies wird nachfolgend erläutert.

5.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Als Vergleichskriterium für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die Kosten eines Arbeitsauftrags herangezogen. Diese sind von den Zeitaufwänden zur Durch-führung der Schneidaufgabe sowie den monetären Werten für die Maschinenbele-gung abhängig. Anhand der Vorgehensweise nach HORSCH (2015) zur Berechnung des Maschinenstundensatzes wie auch der Personalkosten kann eine wirtschaftliche Aussage getroffen werden. Der Aufwand einer Schneidaufgabe ist durch die aufad-dierte Konturlänge verschiedener Bauteile beschrieben. Ausgehend von einem initi-alen Zeitabschnitt zum Einrichten der jeweiligen Arbeitsaufgabe können die monetä-ren Aufwendungen je Konturlänge ermittelt werden. Dabei soll die Zielsetzung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung um den mehrlagigen Trennprozess erweitert werden, da dieser für eine industrielle Einsatzmöglichkeit der Technologien interessant ist. Dazu ist es notwendig, die jeweiligen Anwendungsszenarien herauszuarbeiten.

5.1.1 Definition der Anwendungsszenarien

Bei den nachfolgenden Szenarien werden lediglich die relevanten Technologiepro- zesse betrachtet und die initialen Vorgehensweisen berücksichtigt, etwa das einma-lige Einrichten der jeweiligen Anlage sowie die Programmierung der entsprechenden Anwendung. Diese Aufwände werden bei allen Trennverfahren in gleichem Umfang bemessen, sodass ein Vergleich der unterschiedlichen Prozesse möglich ist. Nachge-lagerte Verfahrensschritte, zum Beispiel die weitere Verarbeitung der Textilien oder die benötigten Puffermöglichkeiten, werden vernachlässigt. Eine HT-Faser mit 120 g/m^2 soll als Referenzmaterial zur Ermittlung der jeweiligen Trenngeschwindig-keiten herangezogen werden. Zur Bestimmung der Konturgeschwindigkeiten soll da-bei die Länge von einem Materialmeter berücksichtigt werden. Dabei kann der An-wender die unterschiedlichen Bauteilkonturlängen aufaddieren und so eine Aussage

über die entsprechenden Bauteilkosten tätigen. Des Weiteren soll, falls es das jeweilige Verfahren ermöglicht, der mehrlagige Materialschnitt berücksichtigt werden. Das heißt, es sollen mehrere Textillagen übereinander geschnitten werden, was in einer höheren Ausbringung resultiert. Die Möglichkeit der Separation der einzelnen Textillagen ist eine Voraussetzung für einen prozesssicheren Verfahrensablauf und stellt somit eine Prämisse dar. Die einzelnen Verfahren werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

5.1.1.1 Reinwasserstrahltrennen

Als erstes Anwendungsszenario wird die Reinwasserstrahltechnologie, wie in den Kapiteln 2.3.3.1 und 3.2.1 beschrieben, für das Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien gewählt. Dafür soll die erläuterte Versuchsanlage in den Fokus gerückt werden. Die benötigten Vorschubgeschwindigkeiten für den einlagigen Materialzuschnitt sind in Kapitel 3.2.4 ausgearbeitet. Die Konturgeschwindigkeit des Düsenpakets der Wasserstrahlschneidanlage wurde dabei mit 800 mm/min für einen einlagigen Anwendungsfall eingestellt. Die weiteren Maschinendetails wie elektrische Leistungsaufnahme, Raumbedarf und monetäre Aufwände sind den Herstellerdetails zu entnehmen (FLOW 2013).

Aufgrund der Vorteile der Wasserstrahltechnologie ist ein mehrlagiges Trennen möglich; dies wurde bisher jedoch wissenschaftlich nicht betrachtet. Deshalb wurden im Rahmen dieser Dissertation Vorversuche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass mit der Reinwasserstrahltechnologie unidirektionale HT-Kohlenstofffaserlagen bis zu einer maximalen Anzahl von 110 Textilschichten prozesssicher getrennt werden können. Ab dieser Grenze war die Energie des Wasserstrahls nicht mehr in ausreichendem Maße vorhanden, sodass einzelne Faserbündel nicht durchtrennt wurden. Dabei entsprach die Höhe des Faserstapels ca. 3,5 cm. Anhand des allgemeinen physikalischen Prozessmodells aus Kapitel 4.1.3 liegt an der untersten Faserlage des Stapels bei einem Wasserdruck von 2600 bar eine Kraft von 2988,43 N an. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Faserlagen in den untersten Schichten aufgrund des komprimierenden Wasserdrucks nicht mehr zu separieren sind. Die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets musste aufgrund der Materialdicke des Lagenpakets auf 600 mm/min gesenkt werden. Bei der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird von einer maximalen Zahl von 90 Lagen für einen mehrlagigen Schnitt mittels der Reinwasserstrahltechnologie ausgegangen. Dabei ist ein Sicherheitsfaktor von 20 Lagen berücksichtigt, sodass ein prozesssicheres Separieren der unterschiedlichen Textillagen möglich bleibt. Weitere Untersuchungen des mehrlagigen Schneidens von Kohlenstofffasern mittels der Reinwasserstrahltechnologie waren anhand

der statistischen Versuchsplanungsmethodik erforderlich, um wissenschaftlich fundierte Aussagen über den mehrlagigen Trennprozess zu erarbeiten. Die Ergebnisse der Vorversuche des mehrlagigen Trennens mithilfe der Reinwasserstrahltechnologie sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

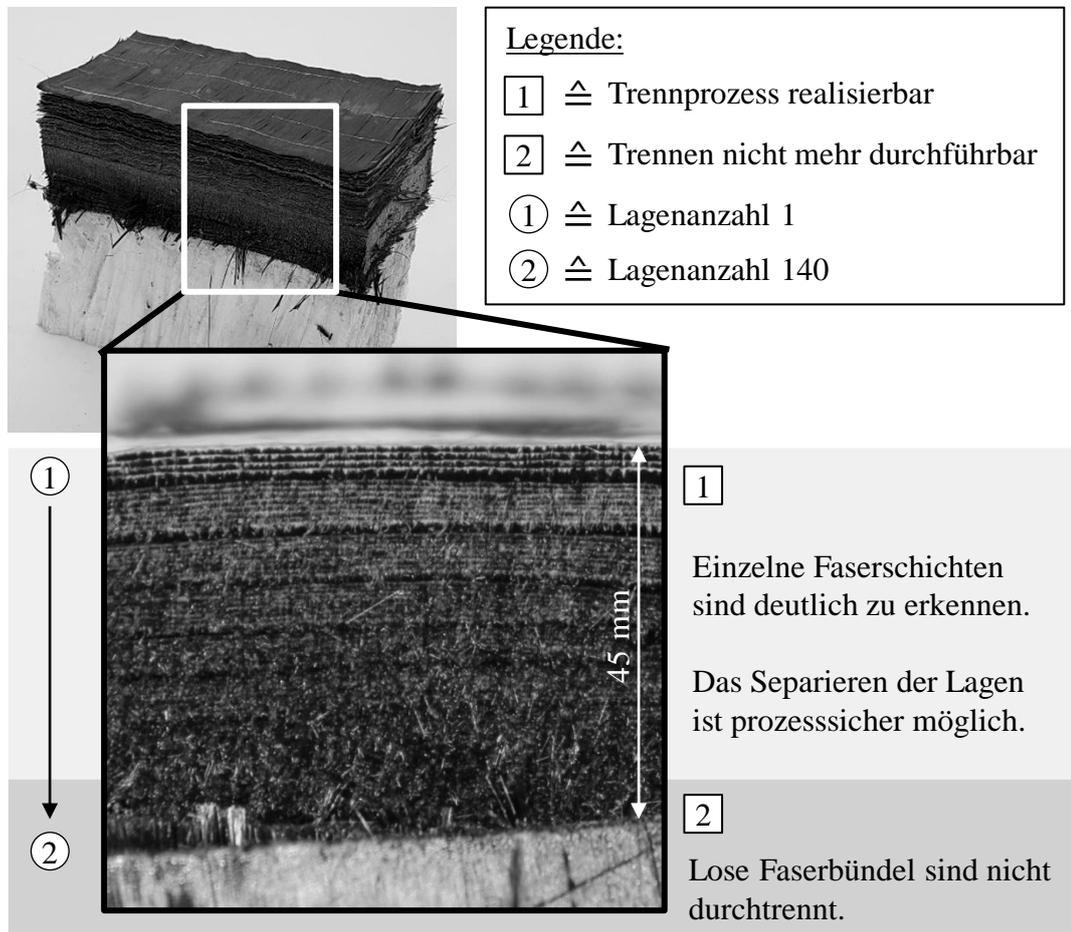


Abbildung 5.1: Ergebnis des mehrlagigen Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaserlagen

5.1.1.2 CNC-Automat mit metallischer Rundmesser Klinge

Wie erläutert, ist das mechanische Trennen unter Verwendung eines CNC-Automaten mit metallischer Klinge der Stand der Technik für das Schneiden von Kohlenstofffasern. Dieser ist hinsichtlich Aufbau und Prozessablauf in Kapitel 2.3.2.1 näher spezifiziert. Für das Anwendungsszenario werden die Maschineninformationen eines handelsüblichen CNC-Automaten verwendet (BULLMER 2017). Dabei ist für das einlagige Trennen von Kohlenstofffasern eine Vorschubgeschwindigkeit von

3000 mm/min definiert. Das Ausgangsmaterial wird über ein Zuführband transportiert und durch ein rotierendes Rundmesser getrennt. Des Weiteren ist eine Vakuuvorrichtung für die Sicherung der Textilposition notwendig.

Ein mehrlagiges Trennen der Kohlenstoffaser-Textilien ist nur mit zusätzlichen Aufbauten möglich (BULLMER 2017). Dabei wird das Textilpaket mittels einer Vakuumfolie und der Vakuuvorrichtung komprimiert, sodass der Faserverzug beim mehrlagigen Trennen gering ist. Aufgrund der in Vorschubrichtung wirkenden Trennkraft, verursacht durch das Rundmesser, ist lediglich eine maximale Lagenanzahl von 15 Faserschichten möglich. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit des Rundmessers ist aufgrund der Vakuuzusatzaufbauten auf 2000 mm/min limitiert.

5.1.1.3 Laserstrahltrennen mittels CO₂-Laser

Der thermische Schnitt wird anhand einer Laserstrahlanlage mit einem CO₂-Laser wirtschaftlich bewertet. Dabei wird auf Informationen zu einer am Markt verfügbaren Anlage zurückgegriffen (TROTEC 2016). Bei dieser Variante ist keine Verwendung eines Prozessgases vorgesehen, sodass keine weiteren Betriebsstoffe benötigt werden. Wie erläutert, ist für das Trennen der Kohlenstoffasern eine zusätzliche Absaugung des Luftgemischs notwendig. Abgeleitet von den Versuchsdaten nach BLIEDTNER ET AL. (2013) sowie FUCHS ET AL. (2013) wird für das Trennen von unidirektionalen Kohlenstoffaser-Textilien eine Vorschubgeschwindigkeit von 20 000 mm/min angenommen.

Bei einem mehrlagigen Schnitt können aufgrund des Energieeintrags durch den Laserstrahl einzelne Bündel an der Schnittkante miteinander verschmelzen. Anhand dieses Umstands ist ein prozesssicheres Separieren der einzelnen Faserschichten nur sehr eingeschränkt möglich. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Laserstrahltrennens wird daher nur für den einlagigen Schnitt bewertet, da ein Separationsprozess der Faserschichten gefordert ist. FUCHS ET AL. (2013) zeigen in ihrer Abhandlung, dass ein mehrlagiges Trennen eines vorgefertigten Lagenpakets generell möglich ist. Aufgrund der resultierenden imprägnierten Schnittkante ist eine Separation der einzelnen Textilschichten jedoch nicht mehr durchführbar.

Anhand der beschriebenen Anwendungsszenarien sowie der Herstellerinformationen der Versuchsanlagen kann die Berechnung des Maschinenstundensatzes nach HORSCH (2015) durchgeführt werden.

5.1.2 Wirtschaftlichkeitsbewertung verschiedener Prozesse für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien

Die Ermittlung des Maschinenstundensatzes erfolgt anhand der aufaddierten Kosten, die bei der Benutzung der einzelnen Technologien anfallen; die Summe wird durch die Laufzeit der Anlagen geteilt. Tabelle 5.1 stellt die jeweiligen Eingangsgrößen der unterschiedlichen Anwendungen dar.

Tabelle 5.1: Eingangsgrößen der Maschinenstundensatzrechnung der jeweiligen Trenntechnologien

Grunddaten	Einheit	Wasserstrahl	CNC-Automat	Laserstrahl
Anschaffungskosten	€	99 400,00	99 500,00	114 800,00
<i>Versuchsanlage</i>	€	<i>90 000,00</i>	<i>85 000,00</i>	<i>100 300,00</i>
<i>Zusatzaufbauten</i>	€	<i>3 200,00</i>	<i>6 200,00</i>	<i>6 600,00</i>
<i>Schutzeinrichtung</i>	€	<i>5 200,00</i>	<i>7 800,00</i>	<i>6 900,00</i>
<i>Inbetriebnahme</i>	€	<i>1 000,00</i>	<i>500,00</i>	<i>1 000,00</i>
Nutzungsdauer	Jahre	10,00	10,00	10,00
Maschinenlaufzeit	h/Jahr	3 204,00	3 204,00	3 204,00
Raumbedarf	m ²	25,00	45,00	15,00
Leistungsbedarf	kW	10,00	20,00	6,00
Betriebsstoffkosten	€/Jahr	2 500,00	–	–
Instandhaltungskosten	%/Jahr	4,00	4,00	4,00
Zinssatz	%	2,00	2,00	2,00
Raumkostensatz	€/ (m ² · Jahr)	60,00	60,00	60,00
Energiekosten	€/kWh	0,1712	0,1712	0,1712

Bei den Anschaffungskosten handelt es sich um die Kosten, die für die jeweilige Trenntechnologie einmalig zum Erwerb aufgewendet werden müssen. Darin enthalten sind neben dem Kaufpreis der jeweiligen Anlage auch Schutzeinrichtungen und

5 Bewertung und Anwendungsbeispiel

Zusatzaufbauten sowie die Inbetriebnahme. Die betriebliche Nutzungsdauer ist allgemein unter Berücksichtigung der besonderen betrieblichen Verhältnisse zu schätzen. Das Bundesfinanzministerium stellt in den Abschreibungstabellen für allgemein verwendbare Anlagengüter die gewöhnliche Nutzungsdauer eines Wirtschaftsgutes dar. Bei stationären Trenntechnologien ist ein Wert von zehn Jahren anzusetzen (BMF 2000). Die betriebliche Maschinenlaufzeit resultiert aus den in Tabelle 5.2 dargestellten Gegebenheiten.

Tabelle 5.2: Kalkulation der Maschinenlaufzeit

	Tage	Stunden pro Tag	Stunden pro Jahr
Gesamte Maschinenlaufzeit	365,25	24,00	8 766,00
Arbeitsfreie Tage im Jahr	115,00	24,00	2 760,00
Stillstand pro Jahr	250,25	8,00	2 002,00
Betriebsbedingte Stillstandzeiten			800,00
Maschinenlaufzeit pro Jahr			3 204,00

Die Anzahl der Tage pro Kalenderjahr ist mit 365,25 angesetzt, da jedes vierte Kalenderjahr ein Schaltjahr ist. Als arbeitsfreie Tage pro Jahr sind Wochenenden sowie Feiertage definiert. Es wurden die Jahre 2015 bis 2020 betrachtet und hieraus der Mittelwert für die arbeitsfreien Tage in Bayern ermittelt. Die Stillstandzeiten pro Jahr resultieren aus einem Zweischichtbetrieb mit einer Kapazitätsnutzung von 16 Stunden pro Tag. Bei den betriebsbedingten Stillstandzeiten handelt es sich um die Periode, die für Krankheitsausfälle, Instandhaltung und auftragsbedingte Rüstzeiten anfällt.

Der Leistungsbedarf der jeweiligen Trenntechnologie ergibt sich aus dem Verbrauch der einzelnen elektrischen Komponenten. Dieser Wert wurde anhand der Maschinendatenblätter der Anlagenhersteller ermittelt. Die Betriebsstoffkosten sind nur für die Wasserstrahlanlage anzusetzen, da jegliche Betriebsstoffe des Laserstrahl- sowie des mechanischen Trennens mit metallischer Klinge im Leistungsbedarf berücksichtigt wurden. Als Betriebsstoff ist dabei der Wasserverbrauch der Wasserstrahlanlage beschrieben. Diese Kosten setzen sich aus variablen sowie fixen Aufwendungen zusammen, beispielsweise der Gebühr für die Abwasserreinigung.

Der Instandhaltungskostensatz beträgt für jede Trenntechnologie 4 %. Dies bedeutet, dass jährlich 4 % der Anschaffungskosten für die Instandhaltung aufgewendet werden. Hierbei sind die Kosten der Ersatz- sowie der Verschleißteile berücksichtigt. Der Instandhaltungskostensatz ist von der Laufzeit der Maschinen abhängig. Die Höhe des kalkulatorischen Zinssatzes wiederum hängt von der jeweiligen Finanzierungsart ab. Der angegebene Zinssatz von 2 % orientiert sich an den Effektivzinssätzen für nichtfinanzielle Kapitalgesellschaften (DEUTSCHE BUNDESBANK 2018). Bei der Ermittlung des Raumkostensatzes erfolgte eine Recherche der durchschnittlichen Monatsmietpreise im Raum Augsburg je m² von industriell genutzter Fläche im Jahr 2018. Die Energiekosten der Industriebetriebe in Deutschland sind vom jährlichen Energieverbrauch abhängig. Der Energiepreis für Industrien mit einem jährlichen Verbrauch von über 160 000 kWh/Jahr beträgt nach BDEW (2018) 17,20 ct/kWh.

Ausgehend von den Eingangsgrößen in Tabelle 5.1 kann die Maschinenstundensatzrechnung nach HORSCH (2015) durchgeführt werden. Bei der Berechnung der kalkulatorischen Zinssätze wurde der Restwert der jeweiligen Trenntechnologie nach Nutzungsdauer vernachlässigt. Die Ergebnisse sowie die Angaben zum Personalstundensatz sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Berechnung des Maschinenstundensatzes sowie Angaben zum Personalstundensatz

Grunddaten	Einheit	Wasserstrahl	CNC-Automat	Laserstrahl
Abschreibungen	€/h	3,1024	3,1055	3,5830
Zinsen	€/h	0,3102	0,3105	0,3583
Raumkosten	€/h	0,4682	0,8427	0,2809
Fixer Maschinenstundensatz	€/h	3,8808	4,2587	4,2222
Instandhaltungskosten	€/h	1,2409	1,2422	1,4332
Energiekosten	€/h	1,7200	3,4400	1,0320
Betriebsstoffkosten	€/h	0,7803	0,0000	0,0000
Variabler Maschinenstundensatz	€/h	3,7412	4,6822	2,4652
Maschinenstundensatz $K_{M, rate}$	€/h	7,6220	8,9409	6,6874
Personalstundensatz $K_{P, rate}$	€/h	70,0000	70,0000	70,0000

5 Bewertung und Anwendungsbeispiel

Anhand simulierter Versuche und durch Befragung erfahrener Technologieanwender der einzelnen Trennverfahren wurden die in Tabelle 5.4 dargestellten Zeitaufwände ermittelt. Die Zeit für das Einrichten der Anlage t_{Pre} beinhaltet das einmalige Einschalten der jeweiligen Maschinen sowie grundlegende Tätigkeiten vor Produktionsbeginn. Neben diesen Aufgaben sind die Programmieraufwände der Anwendungen t_{Pro} und die Dauer des Aufspannens der Textilien t_{Auf} zu berücksichtigen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die jeweiligen Textilbahnen bereits vorausgewählt bereitgestellt sind, sodass diese ohne Zusatzarbeit in die Anlage eingelegt werden können. Die benötigte Zeit für einen Konturschnitt t_{Kont} mittels der jeweiligen Trenntechnologie ist für einen Materialmeter angegeben und wurde anhand von Fallbeispielen ermittelt. Abschließend sind Handhabungsschritte t_{Hand} durch den Anlagenbediener notwendig, um die Materialien von der Versuchsmaschine zu entfernen.

Tabelle 5.4: Zeitaufwände für den einlagigen Materialzuschnitt je Anwendung

	Wasserstrahl	CNC-Automat	Laserstrahl
Einrichten der Anlage t_{Pre}	120 s	120 s	120 s
Programmierzzeit der Aufgabe t_{Pro}	180 s	180 s	180 s
Aufspannen der Werkstücke t_{Auf}	60 s	60 s	60 s
Zeit für 1 m Konturschnitt t_{Kont}	75 s	20 s	3 s
Maximale Lagenanzahl n_{Max}	1	1	1
Handhabungsschritte t_{Hand}	30 s	30 s	40 s

Die Zeiten für das Einrichten der Anlagen sowie die jeweilige Programmierung der Anwendung sind bei allen drei betrachteten Technologien gleich, wie in der Definition des Anwendungsszenarios gefordert. Lediglich beim Einspannen der Werkstücke und bei der Entnahme der Textilien divergieren die Zeiten der Laserstrahlanlage, da die Einhausung der Maschine zusätzliche Arbeitsschritte erfordert. Des Weiteren muss nach der Schneidaufgabe des Laserstrahls die Umgebungsluft aufgrund der gesundheitsschädlichen Dämpfe abgesaugt werden.

Analog zu den benötigten Zeiten eines einlagigen Materialzuschnitts wurden die Aufwände für einen mehrlagigen Trennvorgang der jeweiligen Technologien ermittelt. Bei der Wasserstrahlschneidanlage ist eine Mehrarbeit des Anwenders aufgrund der vernachlässigten vor- und nachgelagerten Arbeitsschritte, wie die benötigte Zeit für das Trocknen der Textilien, nicht erforderlich. Beim CNC-Automat mit metallischer

Klinge sind aufgrund des Mehrlagenschnittes Zusatzaufbauten notwendig, die weitere Zeit in Anspruch nehmen. Die Aufwände für den mehrlagigen Materialzuschnitt können Tabelle 5.5 entnommen werden.

Tabelle 5.5: Zeitaufwände für den mehrlagigen Materialzuschnitt je Anwendung

	Wasserstrahl	CNC-Automat	Laserstrahl
Einrichten der Anlage t_{Pre}	120 s	120 s	120 s
Programmierzeit der Aufgabe t_{Pro}	180 s	180 s	180 s
Aufspannen der Werkstücke t_{Auf}	60 s	120 s	60 s
Zeit für 1 m Konturschnitt t_{Kont}	100 s	30 s	3 s
Maximale Lagenanzahl n_{Max}	90	15	1
Handhabungsschritte t_{Hand}	30 s	50 s	40 s

Anhand der Stundensätze der jeweiligen Trenntechnologien $K_{M, rate}$ und des Anlagenbedieners $K_{P, rate}$ sowie der Zeitaufwände in den Tabellen 5.4 und 5.5 können die Kosten der Konturschnitte je Längenabschnitt l_{Kont} ermittelt werden. Dieser Sachverhalt ist in den nachfolgenden Formeln 5.1, 5.2 sowie 5.3 dargestellt:

$$K_M = \left(t_{Pre} + t_{Pro} + t_{Auf} + \frac{t_{Kont} \cdot l_{Kont}}{n_{Max}} \right) \cdot K_{M, rate} \quad (5.1)$$

$$K_P = (t_{Pre} + t_{Pro} + t_{Auf} + t_{Hand}) \cdot K_{P, rate} \quad (5.2)$$

$$K_{Amw} = K_M + K_P \quad (5.3)$$

Die dargelegten Gleichungen können sowohl für den ein- als auch den mehrlagigen Anwendungsfall betrachtet werden. Der grafische Zusammenhang dieser Gegebenheiten ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Hierbei werden die Kosten der Trenntechnologien K_{Amw} für Konturschnittlängen l_{Kont} von 100 m bis 1000 m ermittelt. Diese Fallstudie zeigt auf, dass das einlagige Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien im Vergleich zu den konkurrierenden Schneidtechnologien unwirtschaftlich ist. Ein monetärer Vorteil ist aufgrund der geringeren Vorschubgeschwindigkeit nicht vorhanden.

5 Bewertung und Anwendungsbeispiel

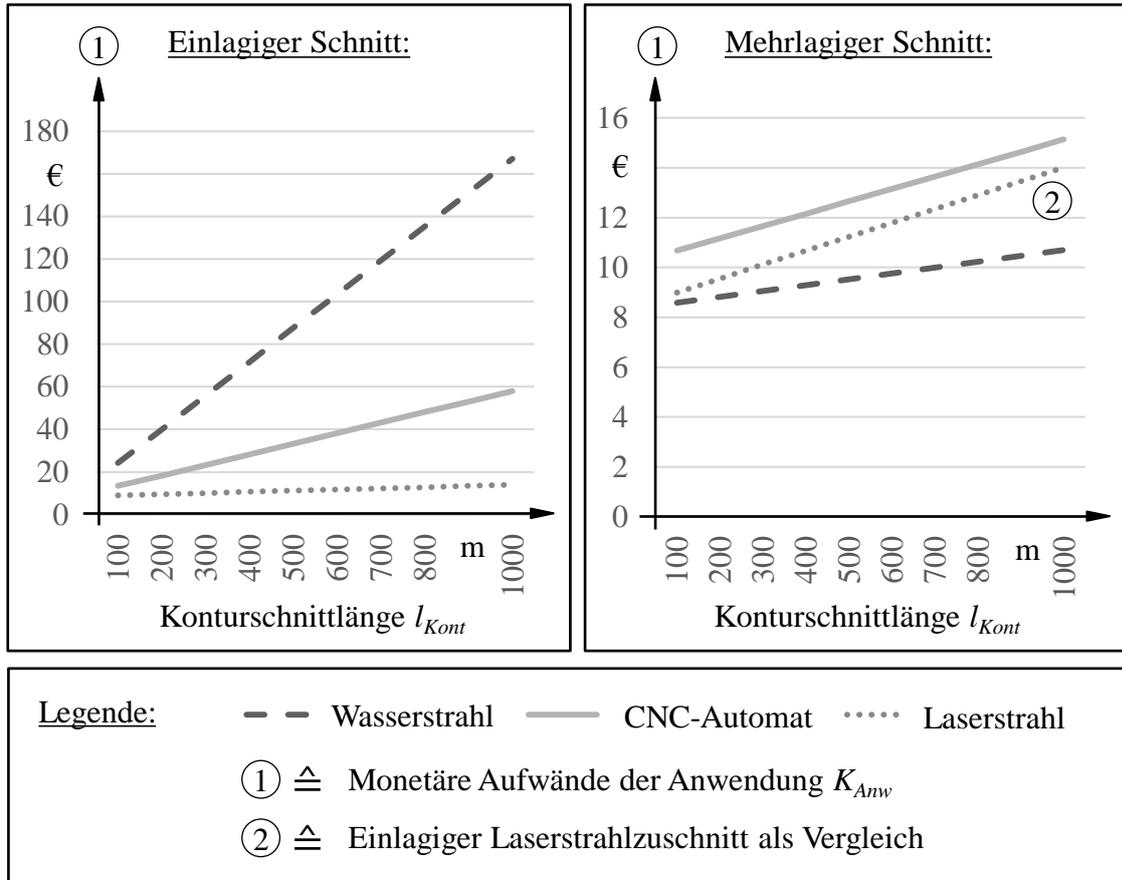


Abbildung 5.2: Darstellung der monetären Aufwände eines ein- sowie eines mehrlagigen Konturschnitts unterschiedlicher Trenntechnologien

Das Laserstrahltrennen ist für den einlagigen Schnitt gegenüber dem CNC-Automaten mit metallischer Klinge sowie dem Wasserstrahltrennen vorteilhafter. Dieser Umstand basiert auf dem geringsten Maschinenstundensatz $K_{M, rate}$ und der sehr hohen Trenngeschwindigkeit. Bei Betrachtung des mehrlagigen Schnittes ist das unrentabelste Verfahren der CNC-Automat mit metallischer Klinge – bedingt durch die zusätzlich nötigen Zeitaufwände sowie die geringe Anzahl der Lagen, die gleichzeitig durchtrennt werden können. Ein mehrlagiges Trennen mit dem Laserstrahl ist aufgrund der physikalischen Vorgänge nur bedingt möglich und hierbei nicht berücksichtigt. Das rentabelste Verfahren für einen mehrlagigen Materialschnitt ist daher die Wasserstrahltechnologie. Die sehr große Lagenanzahl, die hiermit durchtrennt werden kann, ist ein entscheidender Vorteil dieser Technologie.

Diese Beispielrechnung gilt unter der Voraussetzung, dass die Maschinenparameter auf die jeweilige Aufgabe angepasst sind und die nachgelagerten Bearbeitungsschritte durch Puffer aufgefangen werden. Dieser Umstand ist bei der Wasserstrahltechnologie von Bedeutung, da die Textilien zusätzlich getrocknet werden müssen.

Bei einer Fertigung mit großen Puffermöglichkeiten ist diese Gegebenheit aufgrund der langen Verweilzeit der Textilien unerheblich.

Als Schlussfolgerung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien kann festgehalten werden, dass diese Technologie nur für den mehrlagigen Materialschnitt rentabel ist. Neben der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien ist die Bewertung des Maschinenreifegrads ausschlaggebend. Dies wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

5.2 Bewertung des Technologiereifegrads

Das Ziel dieses Kapitels ist die Bewertung der Technologie *Wasserstrahltrennen* für die Anwendung *Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien* im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren. Hierfür muss eine geeignete Bewertungsmethodik ausgewählt und ggf. angepasst werden.

5.2.1 Grundlagen und Auswahl einer Methodik zur Technologiebewertung

Die Technologiebewertung ist nach SCHUH und KLAPPERT (2011) als Teilprozess des Technologiemanagements einzuordnen. Die Verwendung des Begriffs *Reife von Technologien* wurde in der wissenschaftlichen Literatur erstmals von FORD und RYAN (1981) verwendet. Dabei wird unter dem Begriff *Reifephase* ein Abschnitt des Technologielebenszyklus verstanden. Die Theorie des Technologielebenszyklus gibt dabei Handlungsempfehlungen für den strategischen Umgang mit Technologien. Die Phase der Technologiereife ist nach FORD und RYAN (1981) davon geprägt, dass die Technologien bereits weitestgehend beherrscht werden und einsatzfähig für die Serienproduktion sind. Eine Abstufung verschiedener Reifegrade treffen die genannten Autoren nicht.

Reifegradbewertungen mit einer Abstufung bis zum Erreichen der Anwendbarkeit einer Technologie oder eines Produkts wurden zuerst in der Luft- und Raumfahrt eingeführt, um Raumfahrtprojekte mit möglichst geringem Risiko durchzuführen. Eine bedeutende Einleitung zur Bewertung von Reifegraden sind die sogenannten *Technology Readiness Level (TRL)* nach MANKINS (1995). Diese beinhalten neun Reifegradstufen, die eine Technologie durchlaufen muss. Neben dem Einsatz in der Luft- und Raumfahrtindustrie werden die TRL in weiteren Industriebereichen angewandt

(CONROW 2009). Die entwickelten Reifegradmodelle werden in der jüngeren wissenschaftlichen Literatur aufgegriffen und modifiziert. Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten konzentrieren sich auf die Bestimmung des Reifegrads von Produkten (KREHMER 2012, VDA 2009, WEINZIERL 2006) und Produktionstechnologien (etwa KRÖLL 2007, SCHINDLER 2014, SCHMITZ 1996, SCHÖNING 2006). Im Rahmen dieser Dissertation soll der Reifegrad der Produktionstechnologie *Wasserstrahltrennen* für die Anwendung *Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien* bestimmt werden.

REINHART und SCHINDLER (2012) entwickelten ein Reifegradmodell zur Bestimmung der Technologiereife, das auf den Vorgehensweisen von MANKINS (1995) und BROUSSEAU ET AL. (2009) aufbaut. Das entwickelte Reifegradmodell enthält sieben Reifegradstufen, die der Bewertung des Entwicklungsstands einer einzelnen Technologie dienen. Zu jedem Reifegrad werden bestimmte Kriterien erfragt, deren Erfüllung den jeweiligen Reifegradfortschritt festlegt.

Die Bewertung des Technologiereifegrads erfolgt im Rahmen dieser Arbeit anhand eines Fragebogens, der von SCHINDLER (2014) ausgearbeitet wurde. Das Reifegradmodell nach SCHINDLER (2014) dient zur Festlegung des Reifegrades bei der Entwicklung einer Technologie. Dabei soll der Reifegrad einer bereits am Markt verfügbaren Technologie für eine spezielle Anwendung ermittelt werden. Aus diesem Grund ist das Reifegradmodell nach SCHINDLER (2014) anwendbar. Die zu betrachtende Technologie *Wasserstrahltrennen* ist heute, wie in Kapitel 2.3.3 erläutert, bereits in mehreren Branchen Stand der Technik. Aus diesem Grund muss die Reifegradstufe 6, die SCHINDLER (2014) als *Produktionsstruktur* bezeichnet, zu *vergleichbare Serienproduktionsstruktur* abgeändert werden. Die abgefragten Werte können aus Versuchen an einem technischen Prototypen oder einer vergleichbaren Serienproduktion stammen. Als *vergleichbare Serienproduktion* wird im Rahmen dieser Arbeit eine Produktion mit der Technologie *Reinwasserstrahltrennen* für eine artfremde Anwendung wie das *Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien* bezeichnet. Die verwendeten sieben Reifegradstufen werden im Folgenden in Anlehnung an SCHINDLER (2014) erläutert.

Reifegradstufe 1 *Grundlagenforschung*: Grundlegende Wirkprinzipien der Einzelaktionen der Technologie müssen mittels Patenten, Dissertationen oder auch Veröffentlichungen beschrieben werden. Das Ergebnis dieser Reifegradstufe ist die Erfüllung der prinzipiellen Funktionsweise der Technologie.

Reifegradstufe 2 *Machbarkeitsstudie*: In diesem Schritt muss die Anwendbarkeit der Technologie nachgewiesen werden. Die Randbedingungen für den Einsatz der Technologie sind zu beschreiben und Anforderungen sind abzuleiten. Das Ziel dieser Stufe besteht darin, die grundsätzliche Machbarkeit der Technologie sicherzustellen.

Reifegradstufe 3 *Technologieentwicklung*: Für die Umsetzung der Technologie müssen die Einflussparameter mit den jeweiligen Wechselwirkungen beschrieben werden. Des Weiteren muss es möglich sein, Prozessfenster für verschiedene Anwendungen zu definieren. Abschließend muss es dem Anwender möglich sein, einen Funktionsprototyp zu erstellen.

Reifegradstufe 4 *Technologiedemonstrator*: Das Ziel dieser Stufe ist der Aufbau eines Funktionsprototyps, an dem alle benötigten Komponenten sowie deren Funktionen getestet werden müssen. Des Weiteren muss das definierte Prozessfenster anhand von Versuchen validiert werden.

Reifegradstufe 5 *Integration in die Betriebsmittel*: In diesem Schritt muss der Funktionsprototyp in ein Betriebsmittel integriert werden. Dafür muss die Integration der Technologie in die Betriebsmittel mit der jeweiligen Anwendung validiert werden. Betriebsmittel werden nach VDI 2815 als Anlagen, Geräte und Einrichtungen definiert, die zur betrieblichen Leistungserstellung dienen. Anhand von Versuchen müssen die Kennzahlen zur Bestimmung der Prozesssicherheit und der Wirtschaftlichkeit erarbeitet werden.

Reifegradstufe 6 *vergleichbare Serienproduktionsstruktur*: Für das Erfüllen dieses Reifegrads muss die Funktionsweise der Technologie innerhalb einer Produktionsstruktur getestet werden. Dies beinhaltet neben der Integration der Technologie in die Betriebsmittel auch die jeweiligen vor- und nachgelagerten Produktionsprozesse. Des Weiteren müssen die Kennzahlen der gesamten Produktionsstruktur anhand eines technischen Prototyps oder einer vergleichbaren Serienproduktion erarbeitet werden.

Reifegradstufe 7 *Serienproduktion*: Die zu untersuchende Technologie in Verbindung mit der jeweiligen Anwendung befindet sich bereits in der Serienproduktion eines Unternehmens. Die wirtschaftlichen und technischen Einflussparameter sind bekannt. Weiterentwicklungen der Technologie finden nur noch in geringem Maße statt. Das Ziel der weiteren Vorgehensweise ist die Optimierung des laufenden Produktionsbetriebs.

5 Bewertung und Anwendungsbeispiel

Bei der Betrachtung der Technologiereifegradstufen nach SCHINDLER (2014) wird grundsätzlich zwischen M_T und $m_{TRL,i}$ unterschieden. Dabei ist M_T als Technologiereifegrad beschrieben, der sich aus den einzelnen gewichteten Werten der Reifegradstufen $m_{TRL,i}$ zusammensetzt. Bei dieser Betrachtung muss für jede einzelne Reifegradstufe $m_{TRL,i}$ ein Expertenfragebogen evaluiert werden. Die Gewichtungen q_i der einzelnen Reifegradstufen sind sinnvoll anhand des Stands der Technik zu definieren. Eine Übersicht zur Vorgehensweise der Ermittlung des Technologiereifegrads nach SCHINDLER (2014) mit einem beispielhaften Reifegradfortschritt ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

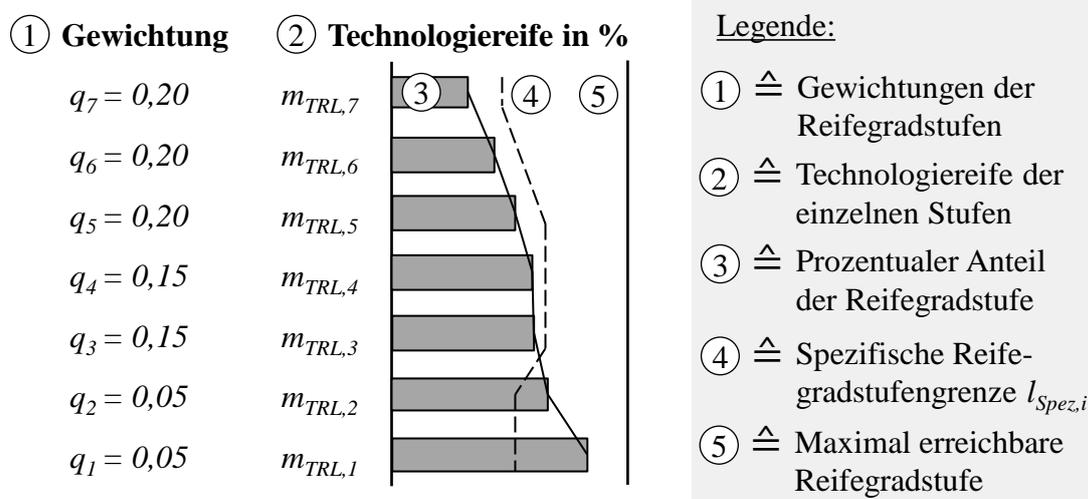


Abbildung 5.3: Erläuterung des Grundkonzepts der Technologiereifegradbewertung in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Der Wechsel von einer Technologiereifegradstufe in die nächsthöhere ist von der spezifischen Reifegradstufengrenze $l_{Spez,i}$ abhängig. Nach SCHINDLER (2014) muss für die Einführung einer Fertigungstechnologie in eine Produktionsumgebung der Technologiereifegrad nicht 100 % betragen. Eine Anwendung ist jedoch nur sinnvoll, wenn die spezifische Reifegradgrenze $l_{Spez,i}$ der einzelnen Reifegradstufen mindestens erreicht wird. Diese spezifische Reifegradgrenze muss von Technologieanwendern eines Unternehmens selbst definiert werden und ist daher nicht der Fokus dieser Arbeit.

Wie erwähnt, setzt sich der Technologiereifegrad M_T aus sieben Reifegradstufen $m_{TRL, i}$ zusammen. Die mathematische Beschreibung des Technologiereifegrads M_T ist nach SCHINDLER (2014) wie folgt definiert:

$$M_T = \left(1 - \left(\sum_{i=1}^7 (1 - m_{TRL, i}) \cdot q_i \right) \right) \cdot 100 \%. \quad (5.4)$$

Das Ergebnis der Technologiereifegradbewertung M_T erlaubt somit Rückschlüsse auf das Reifeprofil einer Technologie oder Anwendung für die Integration in eine Produktionsumgebung. Die Reifegradbewertung des Reinwasserstrahltrenns von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien wird im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben.

5.2.2 Technologiereifegrad des Reinwasserstrahltrenns von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien

Die Bewertung des Technologiereifegrads des Reinwasserstrahltrenns von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien wird anhand eines Fragebogens für jede einzelne Reifegradstufe nach SCHINDLER (2014) durchgeführt. Dabei ist es die Prämisse, dass die einzelnen Reifegradstufen für die jeweilige Produktionsaufgabe gewichtet werden müssen, sodass eine aussagekräftige Bestimmung des Gesamtreifegrads möglich ist. Das Ziel der Produktionsaufgabe *Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien* ist ein Einsatz in der Serienproduktion. Aus diesem Grund muss die Reifegradstufe 7 *Serienproduktion* die höchste Gewichtung erhalten. Tabelle 5.6 zeigt die Gewichtung der einzelnen Reifegradstufen, die durch paarweisen Vergleich ermittelt wurden.

Wie in Tabelle 5.6 dargestellt, besitzen die Reifegradstufen *Grundlagenforschung* und *Machbarkeitsstudie* den geringsten Einfluss auf das Ergebnis. Diese Aspekte wurden in den Kapiteln 3.2 und 4 näher beschrieben; daher werden sie für die Integration der Anwendung in eine Produktionsumgebung als abgeschlossen betrachtet. Aufgrund dieser Gegebenheit besitzen diese beiden Reifegradstufen eine Gewichtung von lediglich 4 %.

5 Bewertung und Anwendungsbeispiel

Tabelle 5.6: Übersicht der Gewichtungen der Reifegradstufen für das Wasserstrahl-trennen von Kohlenstofffaser-Textilien

Reifegradstufen	Gewichtungen
1. Grundlagenforschung	$q_1 = 0,04$
2. Machbarkeitsstudie	$q_2 = 0,04$
3. Technologieentwicklung	$q_3 = 0,14$
4. Technologiedemonstrator	$q_4 = 0,10$
5. Integration in die Betriebsmittel	$q_5 = 0,20$
6. Produktionsstruktur/vergleichbarer Serieneinsatz	$q_6 = 0,20$
7. Serienproduktion	$q_7 = 0,28$

Die Reifegradstufe der *Technologieentwicklung* ist, wie in den Kapiteln 2.3.3 und 3.2.1 aufgezeigt, ein essenzieller Faktor zur Integration in eine Produktionsumgebung und wird mit einer Gewichtung von 14 % bewertet. Ein *Technologiedemonstrator* wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und unterschiedliche Prozessfenster wurden validiert. Die Reifegradstufe *Technologiedemonstrator* ist für die beschriebene Anwendung mit einer Gewichtung von 10 % charakterisiert. Für die Implementierung des Reinwasserstrahltrennens von Kohlenstofffasern in eine Produktionsumgebung sind die Möglichkeit der *Integration in die Betriebsmittel* sowie die Funktionsweise der Technologie innerhalb der *Produktionsstruktur* ausschlaggebend. Daher werden die Reifegradstufen 5 und 6 mit einer Gewichtung von 20 % bewertet. Wie erläutert, soll die betrachtete Anwendung der Reinwasserstrahltechnologie für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien in eine Serienproduktion integriert werden. Anhand dieser Zielsetzung wird die Reifegradstufe *Serienproduktion* mit einer Gewichtung von 28 % beschrieben.

Ausgehend von diesen Gewichtungen der einzelnen Reifegradstufen müssen die jeweiligen Fragebögen nach SCHINDLER (2014) abgearbeitet werden. Die ausgefüllten Fragebögen sind dem Anhang A.10 zu entnehmen. Nachfolgend werden die Ergebnisse zusammengefasst. Dabei bewerten die Stufen 1 bis 3 die Trenntechnologie und die Stufen 4 bis 7 die Anwendung für das Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien.

Die erste Reifegradstufe befasst sich mit der *Grundlagenforschung* der Wasserstrahltechnologie. Dieses Verfahren ist, wie in Kapitel 2.3.3 aufgezeigt, eine etablierte Vorgehensweise für das Trennen von unterschiedlichen Materialien. Zu dieser Thematik sind zahlreiche Veröffentlichungen und Dissertationen vorhanden. Die Grundlagen des Wasserstrahltrennens von Kohlenstofffasern wurden in dieser Arbeit untersucht. Die Einflüsse der Maschinenparameter Wasserdruck, Vorschubgeschwindigkeit, Düsenabstand und Düsendurchmesser auf das jeweilige Material sind bekannt. Aus diesen Gründen ist die Reifegradstufe *Grundlagenforschung* mit 100 % bewertet.

Die zweite Reifegradstufe beschreibt die Anwendbarkeit der Wasserstrahltechnologie. Diese Thematik umfasst die Betrachtung der Technologie mittels analytischer sowie experimenteller Studien. Die wesentlichen Entwicklungsschritte der Wasserstrahltechnologie sind sowohl empirisch als auch physikalisch untersucht worden. Randbedingungen wie die Wasseraufbereitung oder die Erfordernisse von Schutzeinrichtungen wurden identifiziert und ausgearbeitet. Anhand von Versuchen wurde der technologische Nutzen vollständig validiert. Die Reifegradstufe *Machbarkeitsstudie* ist für die Technologie Wasserstrahltrennen aufgrund der genannten Aspekte mit 100 % charakterisiert.

Der dritte Reifegrad beurteilt die *Technologieentwicklung*. Die Beschreibung der Wasserstrahltechnologie einschließlich der physikalischen Effekte, wie der strömungsmechanische Prozess des hochenergetischen Wasserstrahls, wurde bereits detailliert in Kapitel 4 betrachtet. Eine Wasserstrahlanlage ist Stand der Technik und wird von verschiedenen Maschinenherstellern zum kommerziellen Erwerb angeboten. Lediglich Lösungskonzepte zu verschiedenen Problematiken, zum Beispiel hinsichtlich der Wechselwirkung des Wasserdrucks während des Schneidprozesses, sind nicht vollständig beschrieben. Aufgrund dieser fehlenden Bausteine der Lösungskonzepte ist die Reifegradstufe *Technologieentwicklung* mit 75 % bemessen.

Die vierte Reifegradstufe bewertet einen vorhandenen *Technologiedemonstrator* für die Anwendung des Reinwasserstrahltrennens von Kohlenstofffaser-Textilien. Dafür wurde in Kapitel 3.2.1 ein Funktionsprototyp entwickelt, der eine Wasserstrahlanlage nach dem Stand der Technik und eine Trägerkonstruktion für die technischen Textilien umfasst. Anhand von Matrixexperimenten in Kapitel 3.2.3 wurde der Einfluss der unterschiedlichen Maschinenparameter auf die Zielfunktionen aufgezeigt. Dabei wurde jedoch nicht das gesamte Prozessfenster getestet, weshalb die Reifegradstufe *Technologiedemonstrator* mit 75 % bewertet ist.

Der fünfte Reifegrad untersucht die *Integration* des Anwendungsfalls *in die Betriebsmittel* eines Beispielunternehmens. Dafür wurden Testreihen durchgeführt, um diese

Integration auf Basis der vorhergehenden Reifegradstufen zu simulieren. Dieses Vorgehen ist in Kapitel 3.1.3 und in Abschnitt 5.1 näher erläutert. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Wechselwirkungen wie auch die Störgrößen das System beeinflussen und somit für die Integration in die Betriebsmittel näher betrachtet werden müssen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird für die Reifegradstufe *Integration in die Betriebsmittel* eine Gewichtung von 79 % festgelegt.

Der sechste Reifegrad bewertet die Funktionalität des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien innerhalb der *Produktionsstruktur*. Dabei werden neben der Integration der Technologie in eine Produktionsumgebung vor allem die vor- und nachgelagerten Prozesse bewertet. Hierzu zählen unter anderem die Ausschussrate, der Energieverbrauch und die Bearbeitungskosten pro Bauteil. Die Anwendung *Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien* zeigt eine dem Wasserstrahltrennen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen vergleichbare *Produktionsstruktur*. In einer Standardproduktionsumgebung eines produzierenden Unternehmens wurde jedoch noch kein finales Schneidmuster der Kohlenstofffasern getrennt. Somit liegt die Reifegradstufe *Produktionsstruktur* bei 86 %.

Die Reifegradstufe *Serienproduktion* bewertet den Einsatz des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien in einer Produktionsumgebung. Dies bedeutet, dass sich die Anwendung im industriellen Einsatz befindet und mit einer annehmbaren Prozesssicherheit arbeitet. Das Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstofffasern wird derzeit nicht in einer *Serienproduktion* angewandt. Die Gründe dafür sind zum einen die Investitionskosten einer Wasserstrahlanlage sowie die notwendigen Nachbearbeitungsschritte. Die Anwendung *Wasserstrahlschneiden von Kohlenstofffaser-Textilien* bietet jedoch großes Potenzial – insbesondere für das mehrlagige Trennen der Textilien. Aufgrund der fehlenden Integration der Anwendung in eine *Serienproduktion* ist die siebte Reifegradstufe mit 19 % bewertet.

Nach Auswertung der individuellen gewichteten Reifegradstufen des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien kann eine Technologiereife von 65 % ermittelt werden. Dieser Reifegrad bedeutet, dass die grundlegenden Untersuchungen der Anwendung betrachtet wurden und die Wasserstrahltechnologie eine Alternative zu den etablierten Verfahren für das Trennen von Kohlenstofffasern darstellt. Dennoch sind weitere Forschungsansätze notwendig, um diese Anwendung der Wasserstrahltechnologie in ein industrielles Umfeld zu integrieren – beispielsweise eine automatisierte Textilzuführung. Basierend auf der Technologie-

reifegradbewertung des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien kann ein Technologieprofil entwickelt werden. Dieses Profil dient der besseren Übersicht und Einordnung in das Produktionsumfeld (SCHÖNMANN ET AL. 2015). Abbildung 5.4 zeigt das Technologieprofil für das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien.

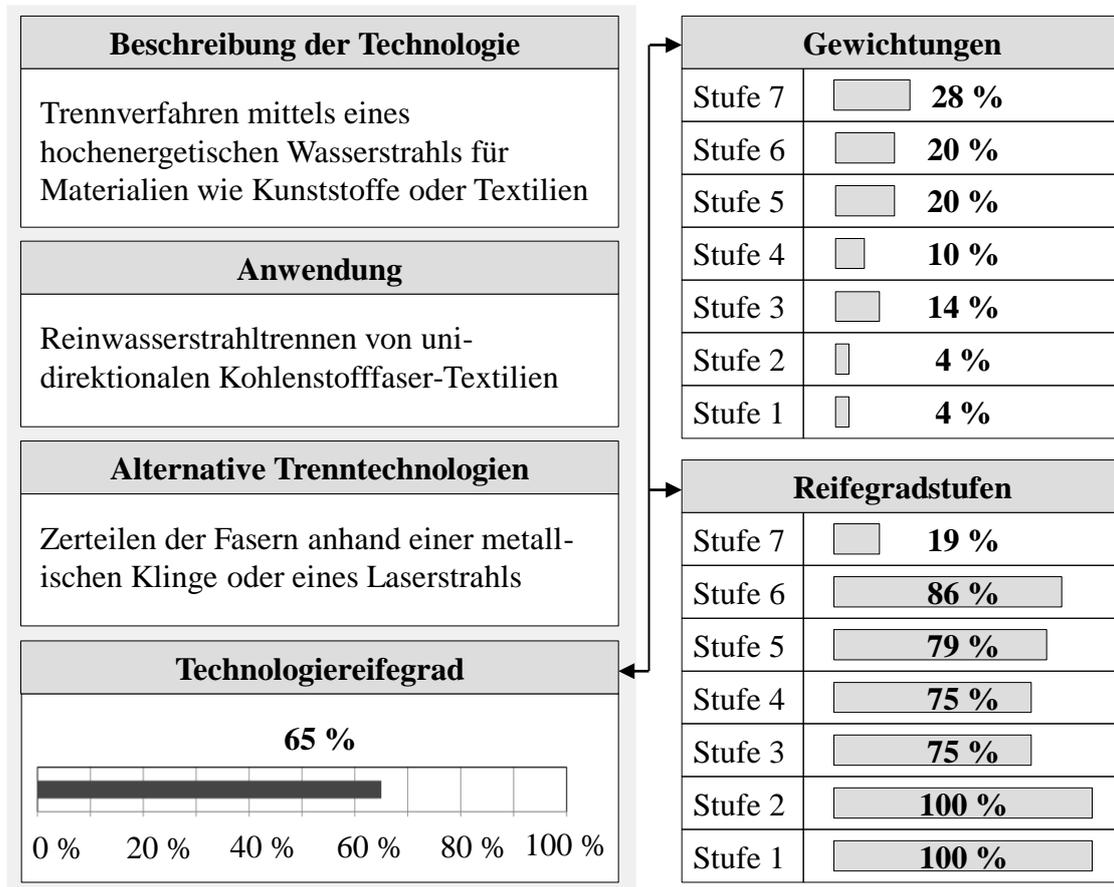


Abbildung 5.4: Technologieprofil des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien

Die dargelegten Informationen und Erkenntnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und des Technologiereifegrads der Anwendung *Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien* sind im Folgenden zusammengefasst.

5.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Für die Bewertung des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien konnten verschiedene Anwendungsszenarien ausgearbeitet werden. Dabei wurden die Maschinenstundensätze des Laserstrahltrennens mit CO₂-Laser, des mechanischen Trennens mittels CNC-Automat mit metallischer Rundklinge und der Reinwasserstrahltechnologie berechnet. Als Referenzszenario ist der ein- sowie der mehrlagige Konturschnitt einer HT-Kohlenstofffaser mit 120 g/m² Flächengewicht charakterisiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass für den einlagigen Anwendungsfall unter Berücksichtigung der Systemgrenzen das Laserstrahltrennen, gefolgt vom CNC-Automat und der Reinwasserstrahltechnologie, wirtschaftlich am profitabelsten ist. Bei Betrachtung des mehrlagigen Szenarios wurde das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien als rentabelstes Verfahren ermittelt. Dabei ist die Möglichkeit einer hohen Ausbringung aufgrund der Vielzahl an Textillagen, die durch die Reinwasserstrahltechnologie getrennt werden können, ein erheblicher Vorteil.

Zur Bestimmung des Technologiereifegrads der Anwendung wurde die Methode nach SCHINDLER (2014) ausgewählt. Diese Vorgehensweise unterscheidet sieben Reifegradstufen, die anhand der Zielsetzung mittels Expertenfragebögen bewertet werden. Dabei konnte ein Technologiereifegrad des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien von 65 % ermittelt werden. Dieser Wert zeigt auf, dass grundlegende technologische Untersuchungen bereits durchgeführt wurden und der Prozess praktikabel ist. Für eine Integration dieser Anwendung in ein industrielles Umfeld müssen weitere Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden, beispielsweise eine automatisierte Textilzuführung.

Anhand dieser Erkenntnisse kann festgehalten werden, dass das Reinwasserstrahltrennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien nur für den mehrlagigen Anwendungsfall bei einer Neuanschaffung dieser Technologie gegenüber den konkurrierenden Verfahren rentabel ist. Das Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstofffasern kann das Auftragsportfolio eines Unternehmens erweitern und hierdurch der besseren Auslastung einer im Unternehmen verfügbaren Wasserstrahlanlage dienen. Abbildung 5.5 fasst die Ergebnisse der Bewertung des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien zusammen.

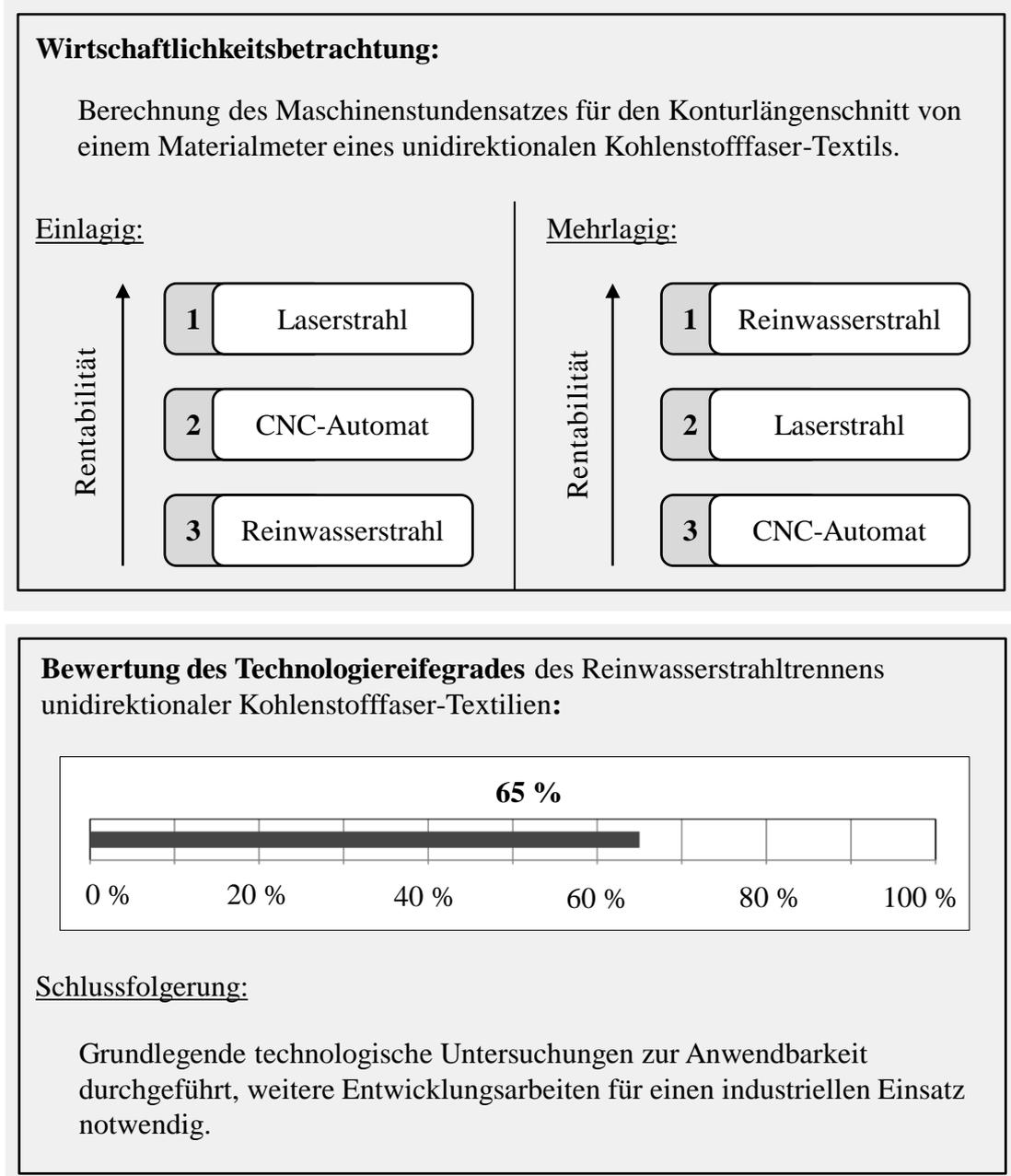


Abbildung 5.5: Zusammenfassung der Bewertung des Reinwasserstrahltrenns von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien

6 Schlussbetrachtung

6.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die faserverstärkten Kunststoffe erleben in der globalen Produktion aufgrund der strukturellen Vorteile ein starkes Wachstum. Ein essenzieller Bestandteil der faserverstärkten Kunststoffe sind die Kohlenstofffasern, deren weltweiter Bedarf stetig wächst. Die hohen Herstellungskosten von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen hemmen eine weitere Marktdurchdringung, weshalb die Fertigungskosten anhand einer erhöhten Ausbringung der Textilizuschnitte gesenkt werden sollten. Aufgrund dieses Handlungsbedarfs verfolgte die vorliegende wissenschaftliche Abhandlung das Ziel, die Wasserstrahltechnologie für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien anhand von Parameterstudien und Prozessmodellen zu qualifizieren sowie zu bewerten.

Neben der Auswahl und Anpassung einer Versuchsplanungsmethodik sowie der Bewertung der genannten Anwendung stellen die Ermittlungen der optimalen Maschinenparameter und das Ableiten eines physikalischen bzw. empirischen Prozessmodells den Schwerpunkt der Untersuchungen dar. Die Wasserstrahltechnologie unterteilt sich in zwei Verfahrensarten, wobei das Abrasiv-Wasserstrahltrennen für das Trennen von Kohlenstofffaser-Textilien aufgrund der Ablagerung der Abrasivpartikel ungeeignet ist. Diese können im weiteren Herstellungsprozess der faserverstärkten Kunststoffe zu Bauteilfehlern führen. Anhand der Vielzahl an Materialparametern, die zu Wechselwirkungen und somit zu fehlerhaften Rückschlüssen führen können, muss die Reinwasserstrahltechnologie mittels verschiedener unidirektionaler Kohlenstofffaser-Textilien qualifiziert werden. Die unidirektionale Ausrichtung der Fasern ist der einfachste Anwendungsfall und somit können unzutreffende Schlussfolgerungen minimiert werden.

Zur Identifikation der optimalen Maschinenparameter der Reinwasserstrahltechnologie wurde die Versuchsplanungsmethode nach TAGUCHI (1989) ausgewählt. Anhand des Stands der Technik und der Wissenschaft sind die Schnittkantenqualität sowie die Wasserabsorption der Textilien als Zielfunktionen beschrieben. Zur Ermittlung der Maschinenparametereinstellungen wurden Grenzuntersuchungen für das Reinwasserstrahltrennen von sechs unterschiedlichen unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien durchgeführt und eine Parameterabstufung festgelegt. Als relevante Maschinenparameter konnten der Wasserdruck, der Düsenabstand zum Material sowie die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets ermittelt werden.

Die nach der Versuchsplanungsmethodik ausgearbeiteten experimentellen Studien wurden an einer handelsüblichen Wasserstrahlanlage mit einer angepassten Schneidkonstruktion durchgeführt. Die Effekte der Maschinenparameter wurden mit dem Signal-Rausch-Verhältnis objektiviert und die Parameterbedeutung mittels der Varianzanalyse quantifiziert. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Wasserdruck einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Schnittkantenqualität bzw. die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets eine eminente Wirkung auf die Resultate der Wasserabsorption hat. Die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilausschnitt. Bei einer geringen Verweildauer erfolgt ein begrenzter Energieeintrag in das Textil. Die Verweildauer ist in Abhängigkeit von der jeweiligen Textilbindung für das entsprechende Schnittkantenprofil verantwortlich. Des Weiteren resultiert aus einer möglichst kurzen Verweildauer eine geringe Wasserabsorption des Textils. Die optimalen Maschinenparameter hinsichtlich der Schnittkantenqualität konnten mit dem geringsten Düsenabstand, der höchsten Vorschubgeschwindigkeit sowie einem variablen Wasserdruck erzielt werden. Der optimale Wasserdruck ist dabei von der jeweiligen Kohlenstofffaser abhängig. Hinsichtlich der Wasserabsorption wurden die besten Ergebnisse mit dem geringsten Düsenabstand, der höchsten Vorschubgeschwindigkeit und einem geringen Wasserdruck erreicht. Diese Erkenntnisse konnten durch den Nachweis der Unabhängigkeit der Parameter bestätigt werden. Das bedeutet, dass die Maschinenparameter nicht durch Störgrößen beeinflusst wurden und das gewählte Modell somit korrekt ist.

Bei Betrachtung des Einflusses des Wasserdrucks auf die Zielfunktionen wurden anhand der physikalischen Gegebenheiten verschiedene Ursachen festgehalten. Dabei ist der Massenstrom aus dem Düsenpaket, beeinflusst durch den Wasserdruck, verantwortlich für die *Wasserabsorption der Textilien*. Ein geringer Wasserdruck resultiert in einem geringen Massenstrom, was zu einer minimalen Wasserabsorption führt. Ein gering eingestellter Wasserdruck ist Ursache für eine niedrige Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls. Optimale Schneidergebnisse hinsichtlich der Zielfunktion *Schnittkantenqualität* konnten nur innerhalb der Kernzone des Wasserstrahls erzielt werden. Bei Zunahme des Düsenabstands erfolgt eine Erhöhung des Massenstroms, was zu einem erweiterten Wasserstrahl wie auch zu einem Anstieg der eingebrachten Wassermenge in das Textil führt. Anhand der aufgestellten physikalischen Zusammenhänge konnte sowohl ein allgemeines physikalisches Prozessmodell innerhalb als auch außerhalb der Kernzone des Wasserstrahls abgeleitet werden. Dabei muss die vorherrschende Scherspannung verursacht durch die Kraft des Wasserstrahls, die auf die Querschnittsfläche einer Kohlenstofffaser wirkt, höher sein, als

die zulässige Scherspannung senkrecht zur Faserrichtung. Ein empirisches Prozessmodell konnte anhand der Versuchsergebnisse aus Kapitel 3 sowie der Berechnung des eingebrachten Impulses in das Gesamtsystem abgeleitet werden. Hierfür wurde ein minimal notwendiger Impuls definiert, um die getesteten Kohlenstofffasern prozesssicher zu trennen. Mittels dieses empirischen Prozessmodells ist es einem Anwender möglich, die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse auf weitere Wasserstrahlanlagen zu übertragen.

Mithilfe der wirtschaftlichen Bewertung des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien konnte aufgezeigt werden, dass der Anwendungsfall im Vergleich zum Laserstrahltrennen und dem mechanischen Zerteilen mit metallischer Klinge lediglich für den mehrlagigen Materialschnitt rentabel ist. Dabei können Materiallagen von bis zu 110 Textilschichten getrennt werden, was zu einer höheren Ausbringung der Zuschnitte führt. Der Technologiereifegrad der Anwendung konnte anhand einer spezifischen Methodik sowie durch Expertenfragebögen mit 65 % bewertet werden. Das heißt, dass die Relevanz des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien gegeben ist sowie grundlegende Untersuchungen durchgeführt wurden. Hierfür ist jedoch die Integration des Anwendungsfalls in ein industrielles Umfeld ausstehend.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertungen der Versuchsreihen der Zielfunktion Schnittkantenqualität zeigten unterschiedliche Optimierungsrichtungen anhand der Mittelwertanalyse auf. Dies ist auf einen gegensätzlichen Einfluss des Wasserdrucks auf die Schnittkanten der Kohlenstofffaser-Textilien zurückzuführen. Dieser Aspekt ist kritisch zu werten, da mittels der Versuche eine einheitliche Aussage über die Wirkung des Wasserdrucks nicht getroffen werden kann. Als Ergebnis ist nach Evaluation des Stands der Technik und Wissenschaft eine Abhängigkeit des Wasserdrucks zu den mechanischen Eigenschaften der Kohlestofffasern zu erwarten. Als Ursache für diese Diskrepanz der Resultate zeigte sich der Zusammenhalt der einzelnen Faserbündel. Dabei ist der Wasserdruck bei jeder untersuchten Einstellung der Maschinenparameter ausreichend, um die Fasern prozesssicher zu durchtrennen.

Für die Zielsetzung des industriellen Einsatzes dieser Anwendung ist ein möglichst hoher Zusammenhalt der Kohlenstofffasern zu wählen. Dieser Aspekt zeigte sich bei der Quantifizierung der Parameterbedeutung mittels der Varianzanalyse, bei dem der Wasserdruck den höchsten Einfluss auf das Ergebnis der Schnittkante aufzeigte. Die

Kraft des Wasserdrucks beeinflusst die Schnittkantenqualität in Abhängigkeit von dem jeweiligen Faserzusammenhalt. Die Vorschubgeschwindigkeit des Düsenpakets zeigte bei der Auswertung der Versuche durch die Varianzanalyse den höchsten Einfluss auf die Wasserabsorption der Textilien. Hierfür ist die Verweildauer des Wasserstrahls auf einem Textilabschnitt ausschlaggebend, was durch die analytische Betrachtung bestätigt werden konnte. Lediglich zwei Textilarten zeigten ein abweichendes Ergebnis. Daraus lässt sich schließen, dass der Wasserdruck in Abhängigkeit von dem Flächengewicht der Textilien einen Einfluss auf die Wasseraufnahme aufweist.

Anhand der Prozessmodelle konnte ein nachvollziehbarer Zusammenhang der einzelnen Maschinenparameter aufgezeigt werden. Dabei wurde lediglich auf die Maschinenparameter eingegangen. Eine Würdigung der Materialparameter ist aufgrund der Komplexität nur durch weitere Versuchsreihen sowie durch eine Validierung mit einer Computersimulation möglich. Des Weiteren wurde aufgrund der bisherigen Erkenntnisse nur der einfachste Materialanwendungsfall untersucht. Diese Aspekte sind für einen industriellen Einsatz essenziell, da nur ganzheitliche Betrachtungen zu fundierten Aussagen führen.

Das mehrlagige Wasserstrahltrennen von Kohlenstofffaser-Textilien zeigte sich bei der wirtschaftlichen Bewertung als sehr vielversprechend. Hierbei wurden lediglich die Machbarkeit und die wirtschaftliche Ausbringung untersucht. Eine Aussage über die Qualität der einzelnen Schnittkanten und den resultierenden Wassereintrag wurde nicht getroffen. Für eine fundierte Aussage über den mehrlagigen Anwendungsfall sind diese Informationen bedeutsam und sollten weiterverfolgt werden. Weiter noch erfordert ein industrieller Einsatz weitere Entwicklungsarbeiten hinsichtlich einer automatisierten Verarbeitung durch angepasste Konstruktionen der Wasserstrahlanlage.

6.3 Ausblick

Eine wirtschaftliche Serienproduktion von faserverstärkten Kunststoffen ist nur bei einer prozesssicheren Bauteilfertigung sowie bei einer möglichst hohen Ausbringung möglich. Für diese Vorgehensweise konnte mit der vorliegenden Abhandlung belegt werden, dass das mehrlagige Trennen von Kohlenstofffasern mittels der Reinwasserstrahltechnologie ein vielversprechender Ansatz ist, um die Ausbringung der Textilzuschnitte zu erhöhen. Dabei müssen weitere wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich der Prozessparameter für das mehrlagige Trennen sowie einer automatisierten Fertigung mittels der Wasserstrahltechnologie durchgeführt werden. Hierbei sollte der Fokus auf die Erhöhung des Technologiereifegrads dieser Anwendung gerichtet werden, sodass diese in einer industriellen Fertigung einsetzbar wird.

Für eine industrielle Verarbeitung ist es notwendig, eine geeignete Schneidkonstruktion zu entwickeln, die die Textilien prozesssicher aufnimmt, sodass diese Vorrichtung in einer automatisierten Fertigung eingesetzt werden kann. Dabei ist die Wahl der Schneidunterlage entscheidend. In dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass die Schneidunterlage beim Reinwasserstrahltrennen von Kohlenstofffasern zerstört werden muss, sodass die Energie des Wasserstrahls absorbiert wird. Diese Feststellung muss bei der Entwicklung der Schneidvorrichtung berücksichtigt werden.

Für ein vertieftes Verständnis der Parametereinflüsse können weitere Erkenntnisse erarbeitet werden. Anhand von computergestützten Simulationsmodellen, die die verschiedenen Prozessparameter modellieren, sind weitere Rückschlüsse auf den Einfluss der Maschinenparameter auf die Kohlenstofffaser-Textilien möglich. Dabei sollte die Übertragbarkeit der allgemeinen Vorgehensweise sichergestellt sein. Des Weiteren wird es anhand dieser Modelle möglich, die Materialparameter zu variieren, sodass neben den unidirektionalen Textilien auch weitere Halbzeuge qualifiziert werden können. Ein Hauptaugenmerk sollte dabei auf die Wechselwirkungen der einzelnen Faserbündel während des Trennprozesses mit der Wasserstrahltechnologie gelegt werden.

Das Trennen von Prepregs anhand der Reinwasserstrahltechnologie ist aufgrund der Beschaffenheit des Schneidwerkzeugs eine vielversprechende Anwendung. Diese Textilien weisen jedoch auf Basis des vorimprägnierten Harzsystems in ihrer Textilstuktur einige Nachteile beim Trennen mittels eines Laserstrahls oder einer metallischen Klinge auf. Dies betrifft etwa die verminderte Schneidleistung aufgrund des zähen Harzsystems bzw. die Aushärtung des vorimprägnierten Harzes bei thermischen Einflüssen. Angesichts der Verwendung des Wasserstrahls als Schneidwerkzeug ist eine gleichbleibende Qualität der Schneidleistung ohne jeden thermischen Einfluss möglich. Eine Prämisse bei diesen Untersuchungen sollte die Analyse der Wechselwirkungen des Schneidwassers mit dem vorimprägnierten Harzsystem sein.

Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ADAMOW 2014

Adamow, K. M.: *Einfluss von Wasser auf die Kohlenstofffaser/Epoxid-Polymermatrix Wechselwirkung*. Dissertation. Universität Bremen. Bremen: 2014.

AIGNER & CARSTENSEN 2015

Aigner, D.; Carstensen, D.: *Technische Hydromechanik 2: Spezialfälle*. 2. Aufl. Berlin: Beuth 2015. ISBN: 978-3-41022-210-1.

AKKURT ET AL. 2004

Akkurt, A.; Kulekci, M. K.; Seker, U.; Ercan, F.: *Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications*. Journal of Materials Processing Technology (2004), Nr.: 147, S. 389-396.

ALBERDI ET AL. 2013

Alberdi, A.; Suárez, A.; Artaza, T.; Escobar-Palafox, G. A.; Ridgway, K.: *Composite Cutting with Abrasive Water Jet*. Procedia Engineering (2013), Nr.: 13, S. 421-429.

ATKINS & DE PAULA 2008

Atkins, P. W.; de Paula, J.: *Kurzlehrbuch Physikalische Chemie*. 4. Aufl. Weinheim: Wiley 2008. ISBN: 978-3-527-31807-0.

AVK 2013

Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (AVK): *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-658-02754-4.

AWISZUS ET AL. 2016

Awiszus, B.; Bast, J.; Dürr, H.; Mayr, P.: *Grundlagen der Fertigungstechnik*. 6. Aufl. München: Carl Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-44779-0.

BABU RAO ET AL. 2009

Babu Rao, D.; Baskey, D.; Rawat, R. S.: *Water Jet Cutter: An Efficient Tool for Composite Product Development*. National Conference on Scientific Achievements of SC & ST Scientists & Technologists (2009), S. 104-107.

BDEW 2018

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW): *Strompreisanalyse Januar 2018*. <https://www.bdew.de/media/documents/180109_BDEW_Strompreisanalyse_Januar_2018.pdf> 13.05.2018.

BIERMANN ET AL. 2008

Biermann, D.; Hufenbach, W.; Seliger, G.: *Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe*. Dresden: Progressmedia 2008. ISBN: 978-3-00-026217-3.

BIERMANN ET AL. 2016

Biermann, D.; Aßmuth, R.; Schurmann, S.; Rieger, M.; Kuhlenkötter, B.: *Wet Abrasive jet machining to prepare and design the cutting edge micro shape*. CIRP Procedia 2016. Nr.: 45, S. 195-198.

BLIEDTNER ET AL. 2013

Bliedtner, J.; Müller, H.; Barz, A.: *Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Beispiele*. München: Carl Hanser 2013. ISBN: 978-3-44642-168-4.

BLOBEL & LOHRMANN 2012

Blobel, V.; Lohrmann, E.: *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner 2012. ISBN: 978-3-935-70266-9.

BMF 2000

Bundesministerium der Finanzen (BMF): *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter*. <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf> 13.05.2018.

BOLLRICH 2013

Bollrich, G.: *Technische Hydromechanik I: Grundlagen*. 7. Aufl. Berlin: Beuth 2013. ISBN: 978-3-410-21123-5.

BÖSWIRTH & BSCHORER 2014

Böswirth, L.; Bschorer, S.: *Technische Strömungslehre: Lehr- und Übungsbuch*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-05667-4.

BROUSSEAU ET AL. 2009

Brousseau, E. B.; Barton, R.; Dimov, S.; Bigot, S.: *Technology maturity assessment of micro and nano manufacturing processes*. 4M/ICOMM - The Global Conference on Micro Manufacture. Karlsruhe 2009.

BULLMER 2017

Bullmer GmbH: *Broschüre Premium Cut Composites: Technische Details*.
<<https://www.bullmer.de/wp-content/uploads/2014/02/bullmer-ELC-de.pdf>>
02.12.2017.

CARREÑO-OLEJUA 2014

Carreño-Olejua, R.: *Entwicklung eines Verfahrens zum Schneiden und Schälen von Obst mit Hochdruckwasserstrahlen*. Dissertation. Universität Kassel. Kassel 2014.

CHERIF 2011

Cherif, C. (Hrsg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-17991-4.

CONROW 2009

Conrow, E.: *Estimating Technology Readiness Level Coefficients*. AIAA Space 2009 Conference & Exposition. Pasadena, California: American Institute Aeronautics and Astronautics 2009. ISBN: 978-1-60086-980-8.

CZADO & SCHMIDT 2011

Czado, C.; Schmidt, T.: *Mathematische Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-17261-8.

DAVIM 2015

Davim, J. P. (Hrsg.): *Machinability of Fibre-Reinforced Plastics*. Berlin: De Gruyter 2015. ISBN: 978-3-11029-222-0.

DENKENA & BIERMANN 2014

Denkena, B.; Biermann, D.: *Cutting edge geometries*. CIRP-Annals Manufacturing Technology 2014. Nr.:63 (2), S. 631-653.

DENKENA & TÖNSHOFF 2011

Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: *Spanen - Grundlagen*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-19772-7.

DEUTSCHE BUNDESBANK 2018

Deutsche Bundesbank: *Effektivzinssätze Banken: Kredite an nichtfinanzielle Kapitalgesellschaften*. <https://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Geld_und_Kapitalmaerkte/geld_und_kapitalmaerkte_list_node.html?listId=www_s510_bk2> 13.05.2018.

DGUV 2014

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): *Bearbeitung von CFK Materialien*. Ausgabe 10/2014. <https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen-dokumente/infoblaetter/infobl_deutsch/074_cfk_materialien.pdf> 13.05.2018.

DIN E.V. 2016

DIN e. V.: *Schweißtechnik 2: Autogenverfahren, thermisches Schneiden*. Normen und Merkblätter. 12. Aufl. Berlin: Beuth 2016. ISBN: 978-3-410-26272-5.

DIN EN 13473-1

DIN EN 13473-1, ICS 01.040.25: *Verstärkungen: Spezifikation für Multiaxialgelege: Teil 1: Bezeichnung*. Berlin: Beuth 2001.

DIN 60000

DIN 60000, ICS 01.040.25: *Textilien: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth 1969.

DIN 8200

DIN 8200, ICS 01.040.25: *Strahlverfahrenstechnik: Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren*. Berlin: Beuth 1982.

DIN 8580

DIN 8580, ICS 01.040.25; 25.020: *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8588

DIN 8588, ICS 01.040.25; 25.020; 25.120.99: *Fertigungsverfahren Zerteilen*. Berlin: Beuth 2013.

DIN 8589-0

DIN 8589-0, ICS 01.040.25; 25.020; 25.100.01: *Fertigungsverfahren Spanen Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung und Begriffe*. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8590

DIN 8590, ICS 01.040.25: *Fertigungsverfahren Abtragen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth 2003.

DOMININGHAUS ET AL. 2012

Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T. (Hrsg.): *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-16173-5.

DRECHSLER 2010

Drechsler, K.: *Einführung in die Werkstoffe und Fertigungstechnologien von Carbon Composites*. Vorlesung der Technischen Universität München. München: Lehrstuhl für Carbon Composites 2010.

DREYER & MALIG 1993

Dreyer, H.; Malig, H. J.: *Statistische Versuchsmethodik*. Q-DAS GmbH 1993.
<<https://d-nb.info/948996595/04>> 13.05.2018.

DURST 2006

Durst, F.: *Grundlagen der Strömungsmechanik*. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-31324-3.

EHRENSTEIN 2006

Ehrenstein, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. 2. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-446-22716-3.

EICHLER & EICHLER 2010

Eichler, J.; Eichler, H. J.: *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-10462-6.

EIREINER 2006

Eireiner, D.: *Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding*. Dissertation. Technische Universität München: Utz 2006. ISBN: 978-3-8316-0650-4.

FLOW 2013

Flow Europe GmbH: *Maschinendaten MACH 2 M2-2013b*. Handbuch. Weiterstadt: 2013.

FLOW 2014

Flow Europe GmbH: *Technische Daten: Hochdruckpumpen Model HyPlex 30 und 50*. Weiterstadt: 2014. <<https://www.flowwaterjet.de/Pumpen/4150-bar-Direktantrieb>> 13.05.2018.

FLOW 2018

Flow Europe GmbH: *Angebotsübersicht der Wasserdüsen*. Broschüre und internes Angebot für die Technische Universität München. Weiterstadt: 2018.

FORD & RYAN 1981

Ford, D.; Ryan, C.: *Taking technology to market*. Harvard Business Review 59. Boston: 1981.

FRIEDRICH 2017

Friedrich, H. E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer 2017. ISBN: 978-3-658-12295-9.

FRITZ & SCHULZE 2015

Fritz, A. H.; Schulze, G.: *Fertigungstechnik*. 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2015. ISBN: 978-3-662-46555-4.

FUCHS ET AL. 2013

Fuchs, A. N.; Schoeberl, M.; Tremmer, J.; Zaeh, M. F.: *Laser cutting of carbon fiber fabrics*. Physics Procedia 2013. Nr.: 41, S. 372-380.

FUCHS ET AL. 2015

Fuchs, A. N.; Woldrich, T.; Heimhilger, M. K.; Zaeh, M. F.: *Analytical Model for Laser Cutting of Carbon Fiber Fabrics –Maximum Cutting Speed and the Heat Affected Zone*. Lasers in Manufacturing Conference. Munich: 2015.

GRAF 2018

Graf, J.: *Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge*. Dissertation. München: Technische Universität München 2018.

HASHISH 1997

Hashish, M.: *Machining with super-pressure (690 MPa) waterjets*. International Journal of Machine Tools and Manufacture (1997). Nr.: 37, S. 465-479.

HERWIG 2004

Herwig, H.: *Strömungsmechanik A-Z: Eine systematische Einordnung von Begriffen und Konzepten der Strömungsmechanik*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2004. ISBN: 978-3-528-03974-5.

HOHMANN ET AL. 2018

Hohmann, A.; Drechsler, K.; Albrecht, S.; Lindner, J. P.; Voring, B.; Wehner, D. Leistner, P.: *Resource efficiency and environmental impact of fiber reinforced plastic processing technologies*. Production Engineering 2018. Nr.: 12, S. 405-417.

HOLST 1995

Holst, G.: *Systematisierung der Planungsphase der statistischen Versuchsmethodik für die industrielle Anwendung*. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Hamburg. Aachen: Shaker 1995. ISBN: 978-3-8265-0919-3.

HOOGSTRATE ET AL. 1997

Hoogstrate, A. M.; Van Luttervelt, C. A.; Gosger, P.; Momber, A. W.; Tönshoff, H. K.; Louis, H.; Klocke, F.; Riviere, D.; Magnusson, A. C.; Gardner, J.: *Opportunities in abrasive water-jet machining*. CIRP-Annals Manufacturing Technology 1997. Nr.:46 (2), S. 697-714.

HORSCH 2015

Horsch, J.: *Kostenrechnung: Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer 2015. ISBN: 978-3-65807-312-1.

HUBER ET AL. 2014

Huber, F.; Meyer, F.; Lenzen, M.: *Grundlagen der Varianzanalyse: Konzeption, Durchführung und Auswertung*. Wiesbaden: Springer 2014. ISBN: 978-3-658-05666-7.

JÄGER & HAUKE 2010

Jäger, H.; Hauke, T.: *Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe: Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung*. München: Verlag Moderne Industrie 2010. ISBN: 978-3-862-36001-7.

KBA 2017

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA): *Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017*. <https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html> 13.05.2018.

KLEIN 2013

Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2013. ISBN: 978-3-658-02272-3.

KLEIN 2014

Klein, B.: *Versuchsplanung DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. 4. Aufl. Oldenbourg: De Gruyter 2014. ISBN: 978-3-110-34384-7.

KLEPPMANN 2016

Kleppmann, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 9. Aufl. München: Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-44716-5.

KLOCKE ET AL. 2015

Klocke, F.; Schmitt, R.; Zeis, M.; Heidemanns, L.; Kerkhoff, J.; Heinen, D.; Klink, A.: *Technological and Economical Assessment of Alternative Process Chains for Blisk Manufacture*. Procedia CIRP 2015. Nr.: 35, S. 67-72.

KLOCKE & KÖNIG 2007

Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*. 4. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-48954-2.

KOLB 2013

Kolb, M.: *Wasserstrahlschneiden: Materialbearbeitung mit einem Hochdruckwasserstrahl*. 2. Aufl. München: Verlag Moderne Industrie 2013. ISBN: 978-3-862-36047-5.

KREHMER 2012

Krehmer, H.: *Vorgehensmodell zum Iterations- und Produktreifegradmanagement in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung*. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg. Düsseldorf: VDI 2012. ISBN: 978-3-18-341601-1.

KRISMANN 1994

Krismann, U.: *Laser- und Wasserstrahlschneiden endlosfaserverstärkter Thermoplaste*. Dissertation. Technische Universität Berlin. München: Hanser 1994. ISBN: 978-3-446-17798-7.

KRÖLL 2007

Kröll, M.: *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*. Dissertation. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2007. ISBN: 978-3-939890-26-3.

LÄSSIG ET AL. 2012

Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T.; Begemann, W.: *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen und Anlagenbau*. Studie. München: 2012.

LEMMA ET AL. 2002

Lemma, E.; Chen, L.; Siores, E.; Wang, J.: *Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation*. Composite Structures 2002. Nr.: 57, S. 297-303.

LEOHOLD 2011

Leohold, J.: *Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil*. CCEV Automotive Forum 2011 Ingolstadt: Volkswagen AG.

LIEBELT 1998

Liebelt, S.: *Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen*. Dissertation. Berlin: IPK 1998. ISBN: 978-3-8167-5190-8.

LITFIN 2005

Litfin, G.: *Technische Optik in der Praxis*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-26709-6.

LORINCZ 2009

Lorincz, J.: *Waterjets: Evolving from Macro to Micro*. Manufacturing Engineering 2009. Nr.: 147, S. 47-53.

MANKINS 1995

Mankins, J. C.: *Technology Readiness Levels: A White Paper*. Washington, DC: 1995. <http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf> 13.05.2018.

MONTGOMERY 2012

Montgomery, D. C.: *Design and analysis of experiments*. 8. Aufl. New York: Wiley 2012. ISBN: 978-1-118-14692-7.

NEITZEL ET AL. 2014

Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. 2. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43696-1.

NEUGEBAUER 2012

Neugebauer, R.: *Werkzeugmaschinen: Aufbau, Funktion und Anwendung von spannenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-30078-3.

OERTEL 1995

Oertel, H.: *Strömungsmechanik: Methoden und Phänomene*. Berlin, Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 978-3-540-57007-3.

OHNESORGE 1936

Ohnesorge, W. V.: *Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen*. ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 1936. Nr.: 16, S. 355-358.

PFEIFER 2010

Pfeifer, C.: *Experimentelle Untersuchungen von Einflußfaktoren auf die Selbstzündung von gasförmigen und flüssigen Brennstofffreistrahlen*. Dissertation. Karlsruhe: KIT Scientific 2010. ISBN: 978-3-86644-525-3.

POPRAWA 2005

Poprawa, R.: *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-26435-4.

PUTZ ET AL. 2016

Putz, M.; Dittrich, M.; Dix, M.: *Process Monitoring of Abrasive Waterjet Formation*. Procedia CIRP 2016. Nr.: 46, S. 43-46.

QUENTIN 1994

Quentin, H.: *Versuchsmethoden im Qualitäts-Engineering*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner 1994. ISBN: 978-3-322-90919-0.

RAMULU & AROLA 1993

Ramulu, M.; Arola, D.: *Water jet and abrasive water jet cutting of unidirectional graphiteepoxy composite*. Composites 1993. Nr.: 24, S. 299-308.

REINHART & SCHINDLER 2012

Reinhart, G.; Schindler, S.: *Strategic Evaluation of Technology Chains for Producing Companies*. Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV 2011). Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 391-396. ISBN: 978-3-642-23859-8.

REYNE 2008

Reyne, M.: *Verbundwerkstoffe-Lösungen: Duroplaste und Thermoplaste*. Paris: JEC Group 2008. ISBN: 978-2-9526276-2-7.

RISSE 2012

Risse, A.: *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätektechnik*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner 2012. ISBN: 978-3-8348-1519-4.

ROOKS 2004

Rooks, B.: *Laser processing of plastics*. Industrial Robot: An International Journal 2004. Nr.: 31, S. 338-342.

ROTTA 2010

Rotta, J. C.: *Turbulente Strömungen: Eine Einführung in die Theorie und ihre Anwendung*. Hochschulschrift. Göttingen: Univ.-Verl. Göttingen 2010. ISBN: 978-3-941875-74-6.

SCHEFFLER 2001

Scheffler, E.: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung: Eine Einführung für Praktiker*. Stuttgart: Wiley 2001. ISBN: 978-3-5273-0957-3.

SCHINDLER 2014

Schindler, S.: *Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion*. Dissertation. Technische Universität München: Utz 2014. ISBN: 978-3-8316-7105-2.

SCHMIDTCHEN 2013

Schmidtchen, S.: *Aufbau eines Laser-Vibrometer-Messsystems zur Hochtemperatur-Charakterisierung von Sensorkomponenten*. Dissertation. Clausthal-Zellerfeld: Univ.-Bibliothek 2013. ISBN: 978-3-945086-09-4.

SCHMITZ 1996

Schmitz, W. J.: *Methodik zur strategischen Planung von Fertigungstechnologien: Ein Beitrag zur Identifizierung und Nutzung von Innovationspotentialen*. Dissertation. Aachen: Shaker 1996. ISBN: 978-3-8265-1180-6.

SCHNEIDAU 2010

Schneidau, V.: *Strahlen von Stahl*. Merkblatt. Düsseldorf: Strahl-Informations-Zentrum 2010. <<http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/MB-212-Strahlen-von-Stahl.pdf>> 13.05.2018.

SCHÖNING 2006

Schöning, S.: *Potenzialbasierte Bewertung neuer Technologien*. Dissertation. Aachen: Shaker 2006. ISBN: 978-3-8322-4912-0.

SCHÖNMANN ET AL. 2015

Schönmann, A.; Panzer, N.; Reinhart, G.; Intra, C.; Wildmoser, T.: *Bewertung des Einsatzes von Lasertechnologien in der Nutzfahrzeugindustrie*. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2015. Nr.: 11, S. 725-729.

SCHUH & KLAPPERT 2011

Schuh, G.; Klappert, S.: *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-12530-0.

SCHÜRMAN 2007

Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 978-3-5407-2189-5.

SELIGER 1995

Seliger, H. G.: *Laservibrometer: Erfassung mechanischer Schwingungen mit CO₂-Lasern*. Dissertation. Aachen: Shaker 1995. ISBN: 978-3-8265-0406-8.

SHANMUGAM ET AL. 2008

Shanmugam, D. K.; Nguyen, T.; Wang, J.: *A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2008. Nr.: 39, S. 923-929.

SIEBERTZ 2010

Siebertz, K. (Hrsg.): *Statistische Versuchsplanung: Design of experiments*. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05493-8.

STOCK 2017

Stock, J. W.: *Remote-Lasterstrahltrennen von kohlenstofffaserstärktem Kunststoff*. Dissertation. Technische Universität München: Herbert Utz Verlag 2017. ISBN: 978-3-8316-4662-3.

TAGUCHI 1989

Taguchi, G.: *Einführung in Quality Engineering: Introduction to quality engineering*. München: Gesellschaft für Management und Technologie 1989. ISBN: 978-3-906156-15-6.

TROTEC 2016

Trotec Laser Deutschland GmbH: *Großformat Laser Cutter SP-Serie*. Ismaning: 2016. <https://www.troteclaser.com/fileadmin/content/images/Laser_Machines/SP_Series/SP-Serie-Grossformat-Laserschneider.pdf> 13.05.2018.

UHLMANN ET AL. 2014

Uhlmann, E.; Sammler, F.; Richarz, S.; Heitmüller, F.; Bilz, M.: *Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics*. Procedia CIRP 2014. Nr. 24, S. 19-24.

VDA 2009

VDA: *Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette: Produktentstehung: Reifegradabsicherung für Neuteile*. 2. Aufl. Oberursel: 2009.

VDI 2815

VDI 2815: *Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung: Einführungen, Grundlagen*. Berlin: Beuth 1978.

VDI 3633

VDI 2815: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*. Berlin: Beuth 2018.

VOIT ET AL. 2014

Voit, M.; Graf, J.; Dietrich, S.; Reinhart, G.: *Effiziente Fertigung von Faserverbundbauteilen*. Wt Werkstatttechnik online 2014. Nr.: 104, S. 517-521.

VOIT ET AL. 2017

Voit, M.; Reinhart, G.; Metzger, T.: *Experimental Study on Water Jet Cutting of Unidirectional Carbon Fiber Fabrics*. Procedia CIRP 2017. Nr.: 66, S. 221-226.

WAGNER & KRUSE 1998

Wagner, W.; Kruse, A.: *Properties of Water and Steam / Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf* Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin: Springer 1998. ISBN: 978-3-662-03529-0.

WANG 1999

Wang, J.: *Abrasive Waterjet Machining of Polymer Matrix Composites: Cutting Performance, Erosive Process and Predictive Models*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 1999. Nr.: 15, S. 757-768.

WEBER 1931

Weber, C.: *Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles*. ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 1931. Nr.: 11, S. 136-154.

WECK & BRECHER 2005

Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 1: Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-28085-9.

WEINZIERL 2006

Weinzierl, J.: *Produktreifegrad-Management in unternehmensübergreifenden Entwicklungsnetzwerken: Ein ganzheitlicher Ansatz zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Anlaufmanagement*. Dissertation. Dortmund: Verl. Praxiswissen 2006. ISBN: 978-3-89957-041-0.

WESTKÄMPER & WARNECKE 2010

Westkämper, E.; Warnecke, H. J.: *Einführung in die Fertigungstechnik*. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg und Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-9798-5.

WITTEN ET AL. 2017

Witten, E.; Kraus, T.; Kühnel, M.: *Composites-Marktbericht: Marktentwicklungen, Trend, Ausblicke und Herausforderungen*. Studie. Frankfurt am Main: 2017.

WITTEN ET AL. 2018

Witten, E.; Kühnel, M.; Sauer, M.: *Composites-Marktbericht: Marktentwicklungen, Trend, Ausblicke und Herausforderungen*. Studie. Frankfurt am Main: 2018.

ZAREMBA 2017

Zaremba, D.: *Reparaturstellenvorbereitung von multidirektionalen CFK-Gelegen durch Wasserstrahlen*. Dissertation. Garbsen: TEWISS 2017. ISBN: 978-3-95900-162-5.

Studienarbeitsverzeichnis

Im Rahmen dieser Arbeit entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors nachfolgende Studienarbeiten. Die erzielten Ergebnisse sind teilweise in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Der Autor dankt den Studierenden für das hohe Engagement und den fachlichen Austausch.

Name	Studienarbeit	Zeitraum	Kapitel
	<u>Masterarbeit Hochschule Augsburg:</u>		
Thomas Metzger	Wissenschaftliche Parameterstudien für das Schneiden von faserverstärkten Kunststoffen mittels der Wasserstrahltechnik	05/2014 -11/2014	3
	<u>Masterarbeit Technische Universität München:</u>		
Volker Nitsche	Entwicklung eines Wirtschaftlichkeitsmodells für das Schneiden von technischen Textilien	09/2016 -03/2017	5
	<u>Bachelorarbeit Technische Universität München:</u>		
Felix Werner	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des mehrlagigen Trennens von Kohlenstofffaser-Textilien mittels der Reinwasserstrahltechnologie	12/2016 -12/2017	5
	<u>Bachelorarbeit Hochschule Augsburg:</u>		
Michael Bertele	Wissenschaftliche Analyse der Maschinenparameter des Wasserstrahltrennens von Kohlenstofffasern	09/2017 -03/2018	4

Anhang

A.1 Angaben zur Versuchsplanung nach Taguchi

Anbei dargestellt ist das orthogonale Feld L'_{16} nach der Taguchi-Methode, das für den vorliegenden Fall angepasst wurde.

Tabelle A.1.1: Angepasstes orthogonales Feld L'_{16} nach KLEIN (2014)

Experiment Nummer	Spalten Nummer		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

A.2 Mikroskopaufnahmen der Schnittkanten

Die einzelnen Aufnahmen der Schnittkanten der Versuchsreihen sind nachfolgend dargestellt.

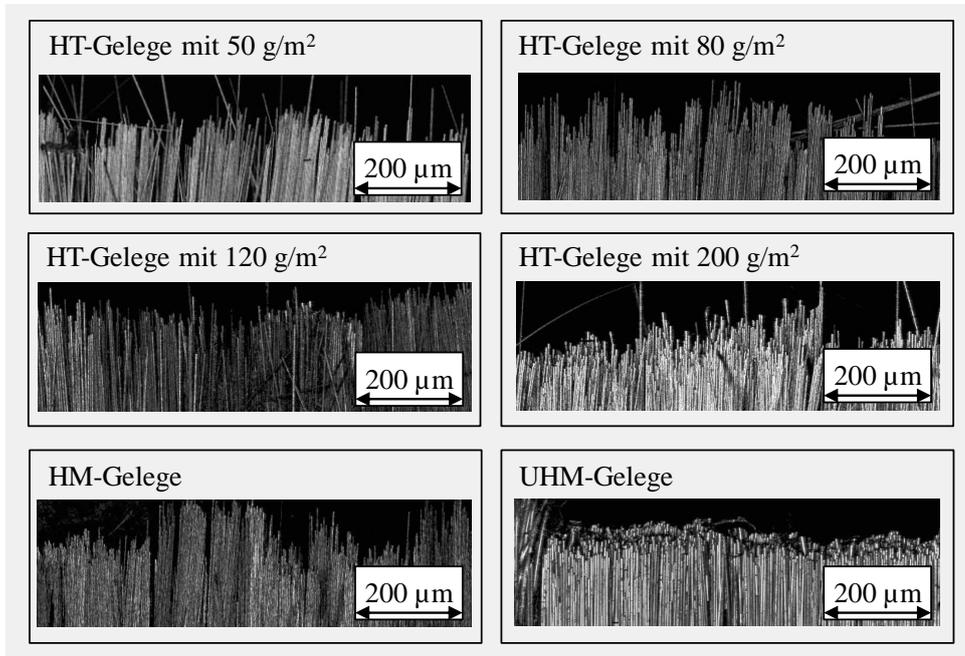


Abbildung A.2.1: Schnittkantenbilder bei 2600 bar, 3 mm und 200 mm/min

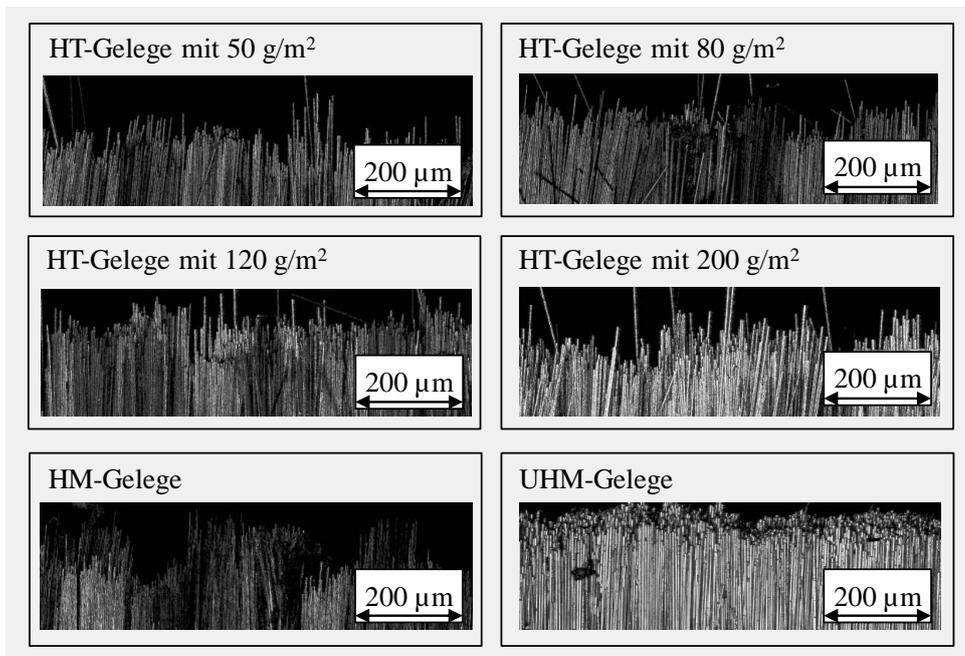


Abbildung A.2.2: Schnittkantenbilder bei 2600 bar, 4 mm und 400 mm/min

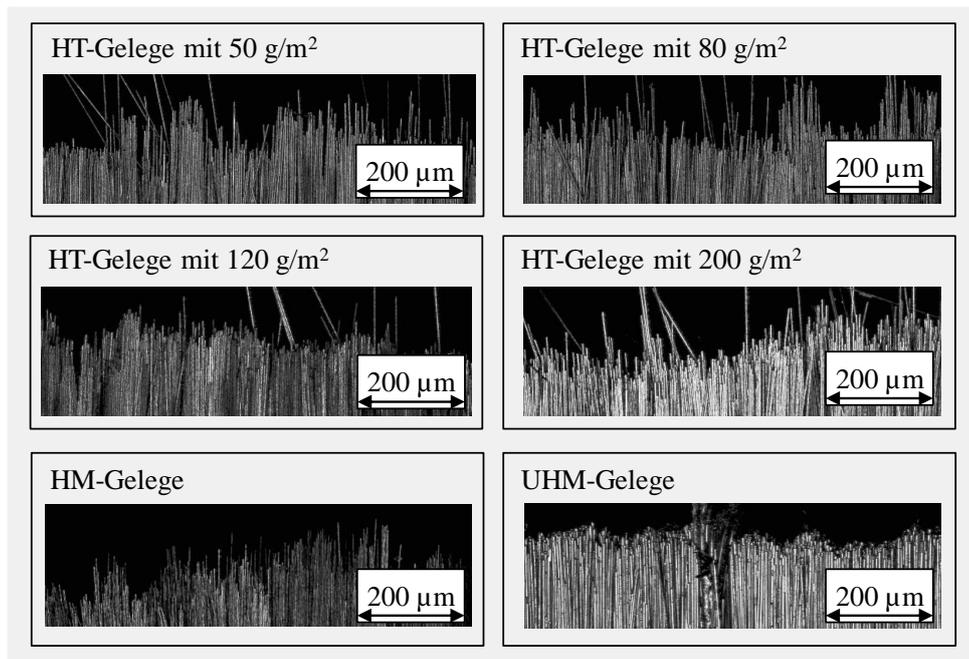


Abbildung A.2.3: Schnittkantenbilder bei 2600 bar, 5 mm und 600 mm/min

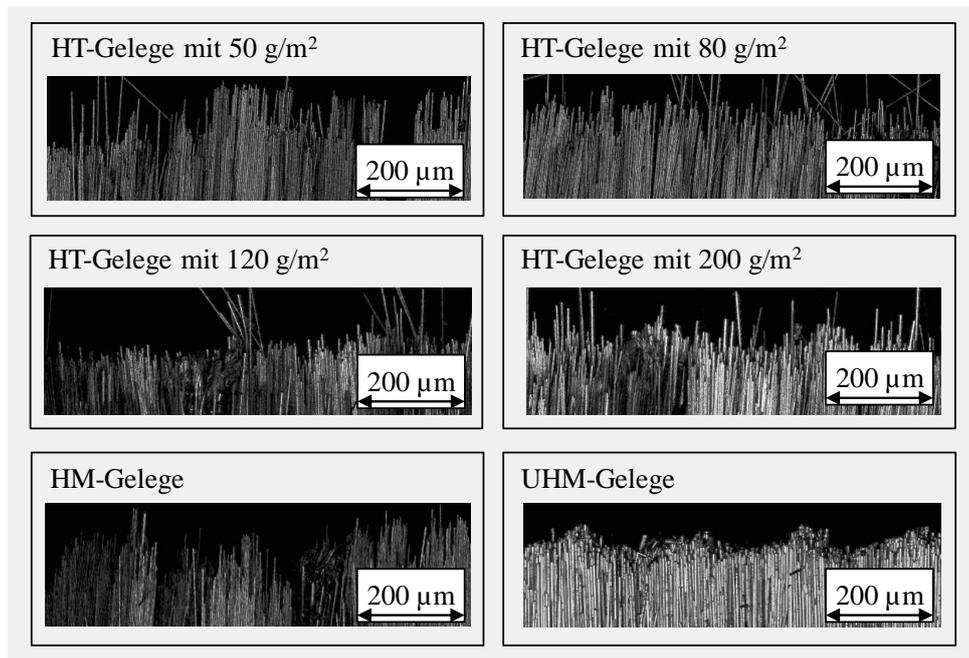


Abbildung A.2.4: Schnittkantenbilder bei 2600 bar, 6 mm und 800 mm/min

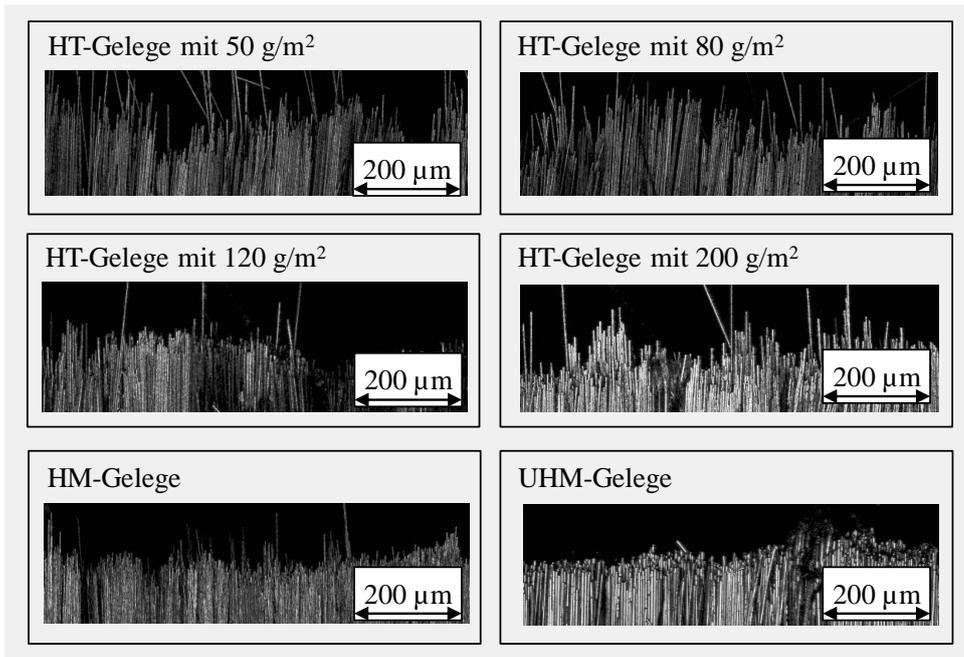


Abbildung A.2.5: Schnittkantenbilder bei 3000 bar, 3 mm und 400 mm/min

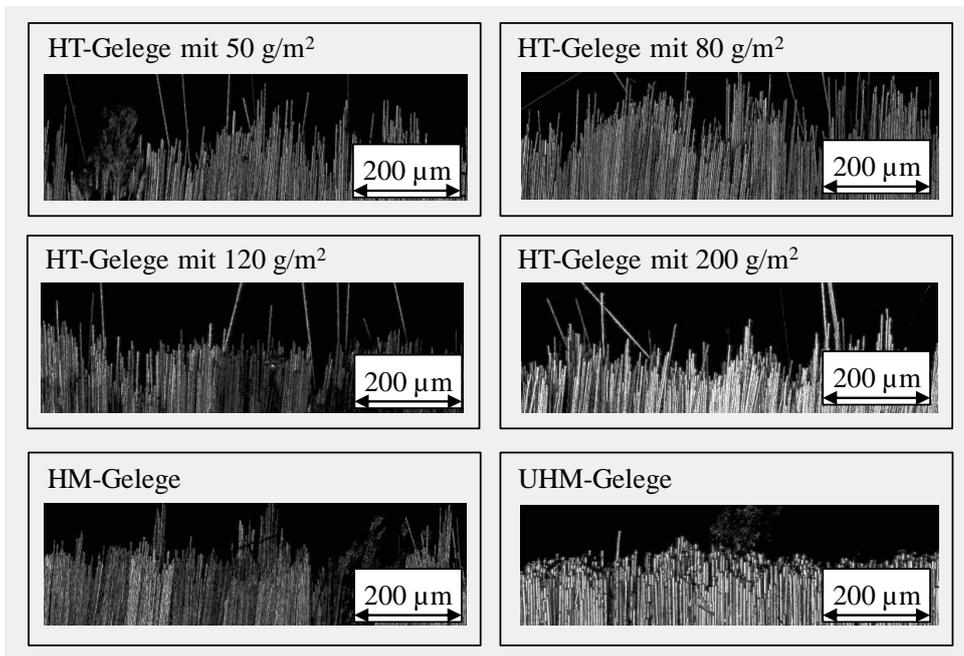


Abbildung A.2.6: Schnittkantenbilder bei 3000 bar, 4 mm und 200 mm/min

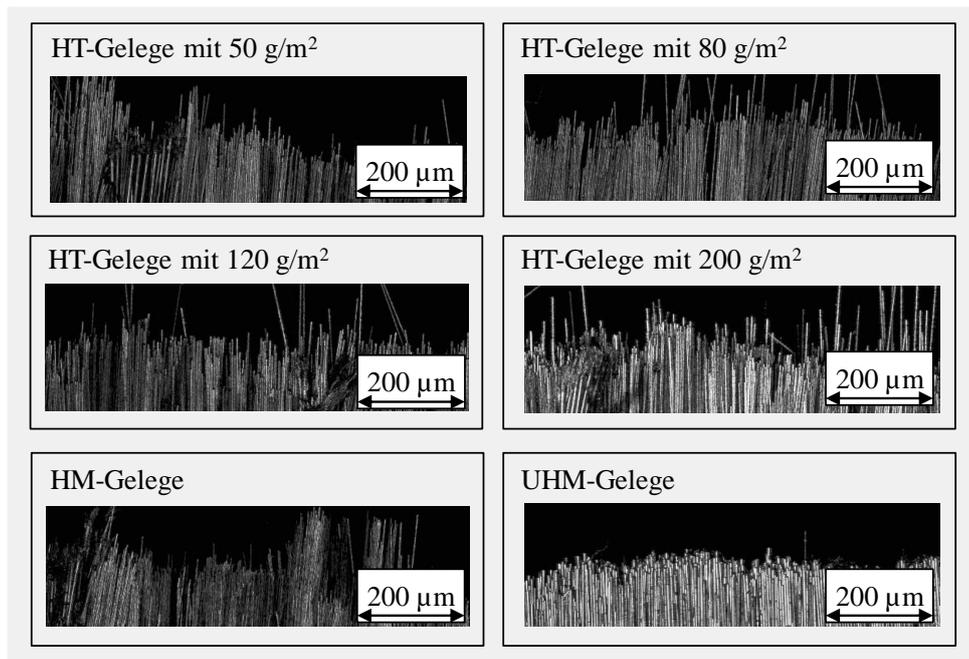


Abbildung A.2.7: Schnittkantenbilder bei 3000 bar, 5 mm und 800 mm/min

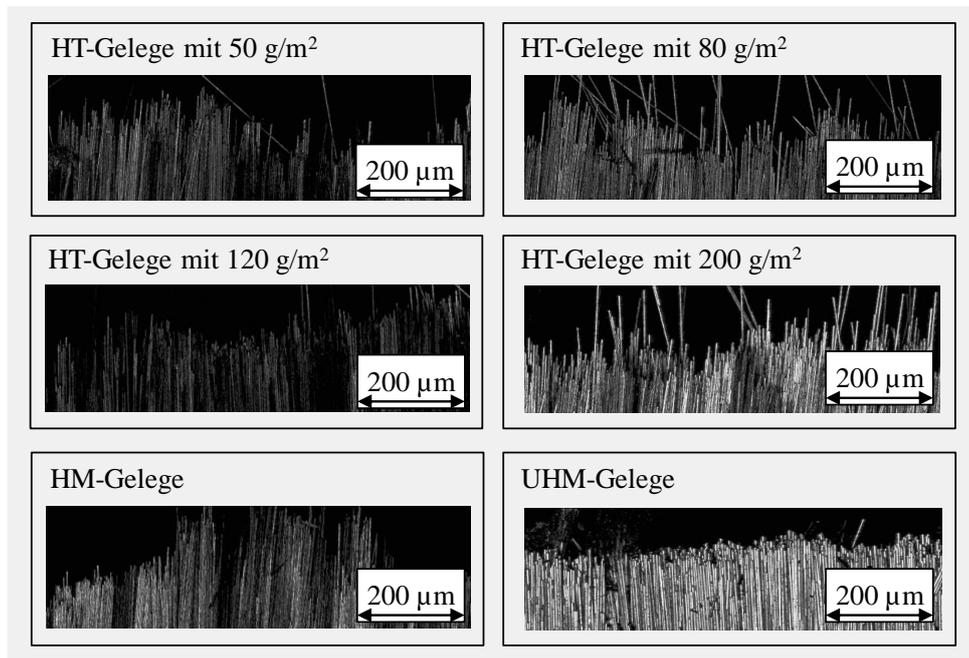


Abbildung A.2.8: Schnittkantenbilder bei 3000 bar, 6 mm und 600 mm/min

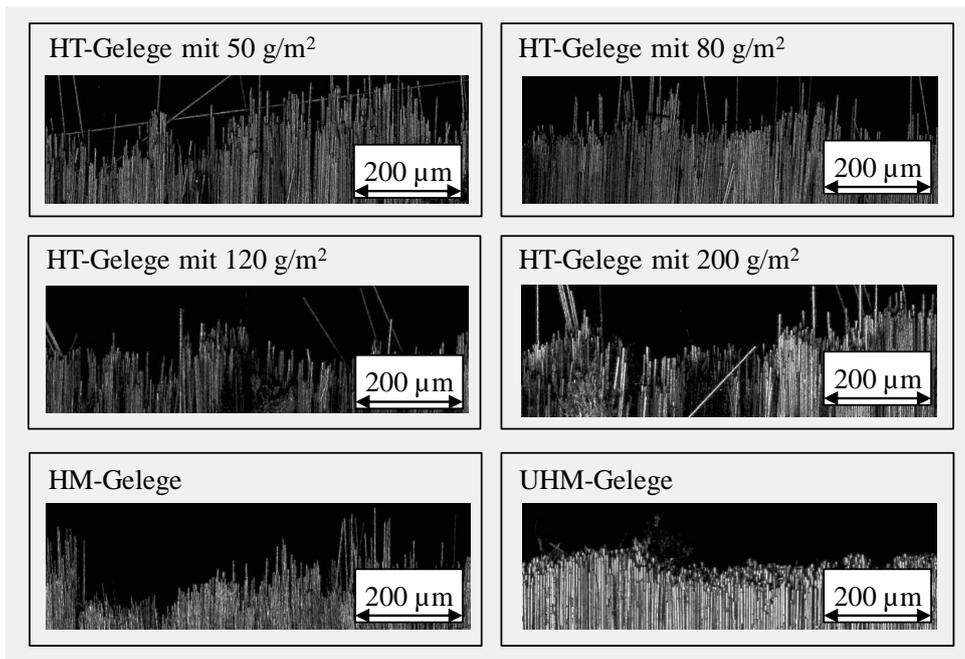


Abbildung A.2.9: Schnittkantenbilder bei 3400 bar, 3 mm und 600 mm/min

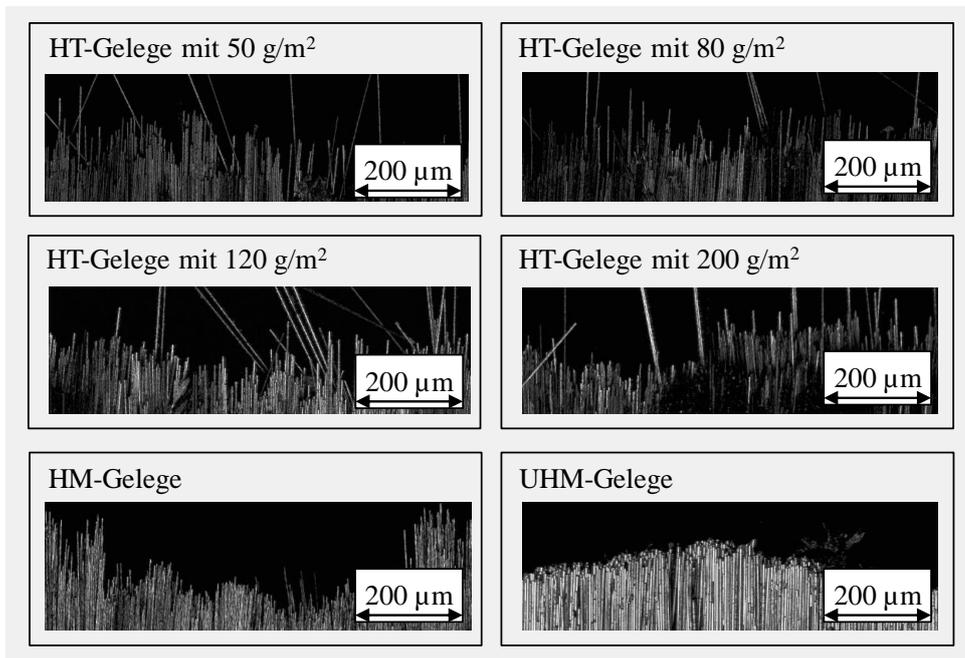


Abbildung A.2.10: Schnittkantenbilder bei 3400 bar, 4 mm und 800 mm/min

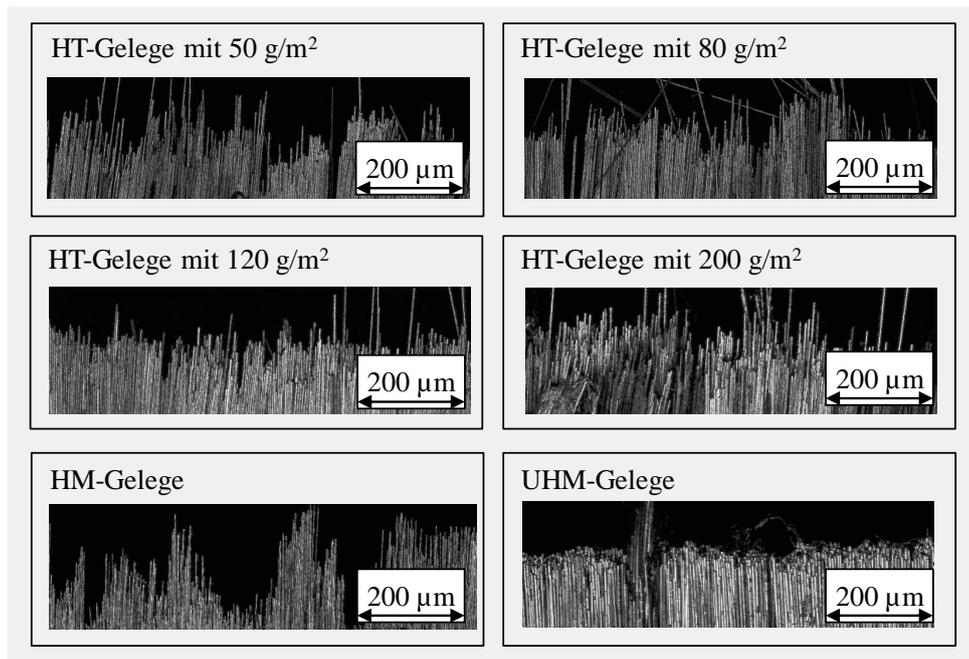


Abbildung A.2.11: Schnittkantenbilder bei 3400 bar, 5 mm und 200 mm/min

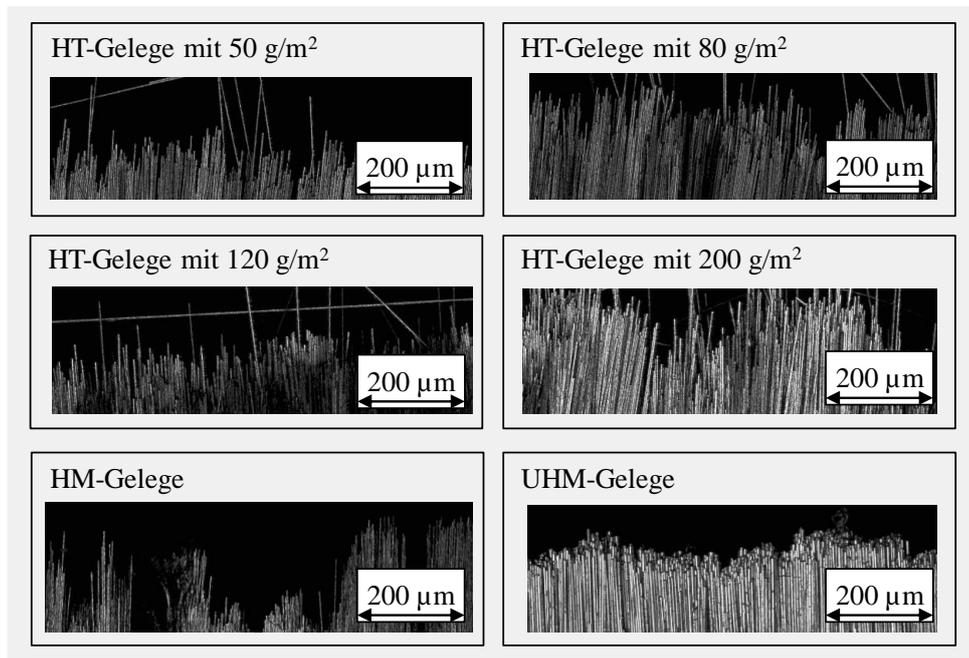


Abbildung A.2.12: Schnittkantenbilder bei 3400 bar, 6 mm und 400 mm/min

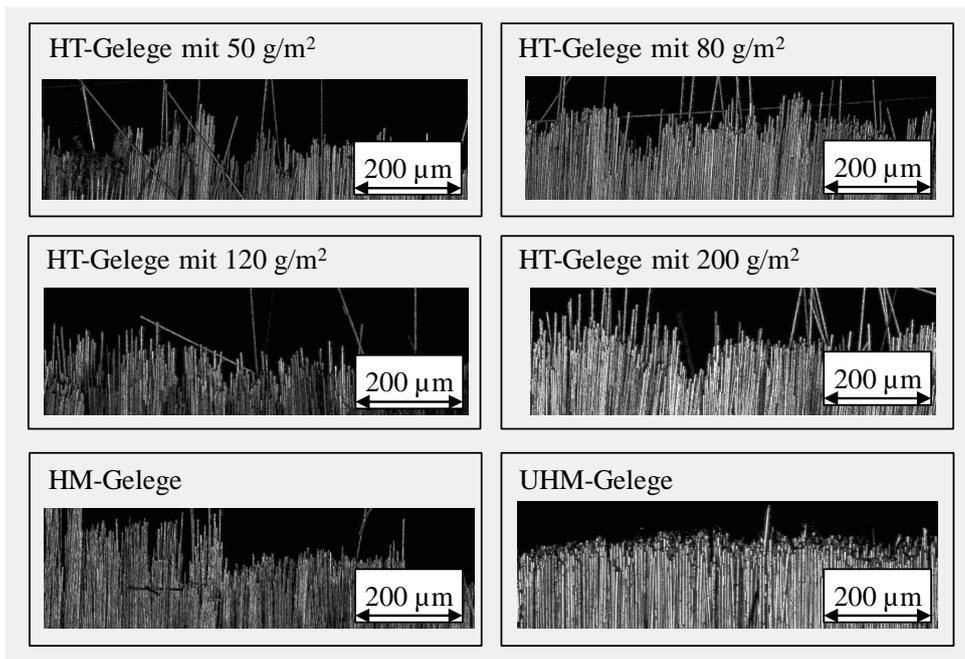


Abbildung A.2.13: Schnittkantenbilder bei 3800 bar, 3 mm und 800 mm/min

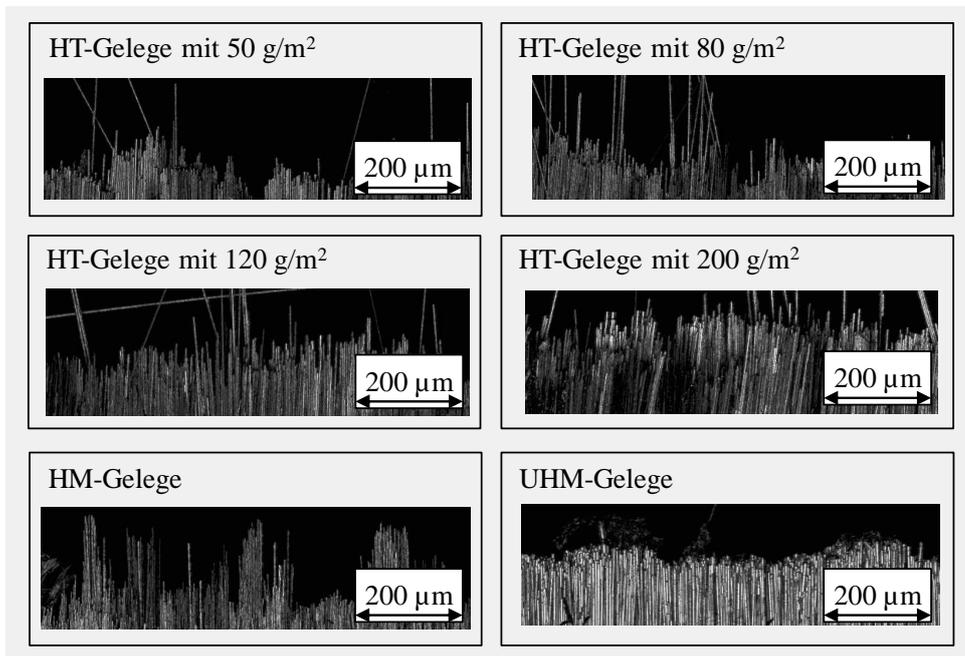


Abbildung A.2.14: Schnittkantenbilder bei 3800 bar, 4 mm und 600 mm/min

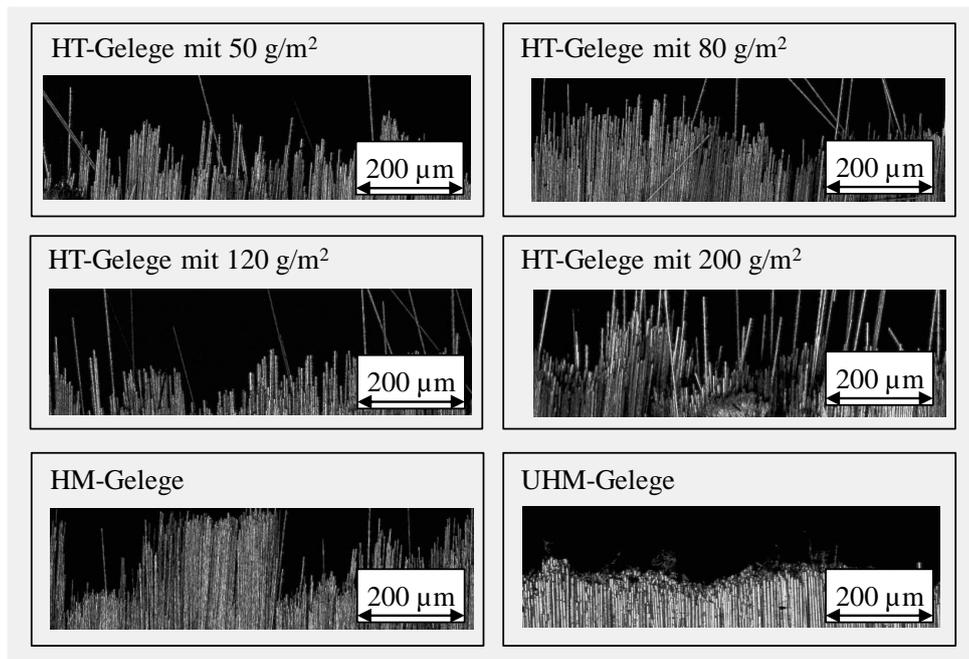


Abbildung A.2.15: Schnittkantenbilder bei 3800 bar, 5 mm und 400 mm/min

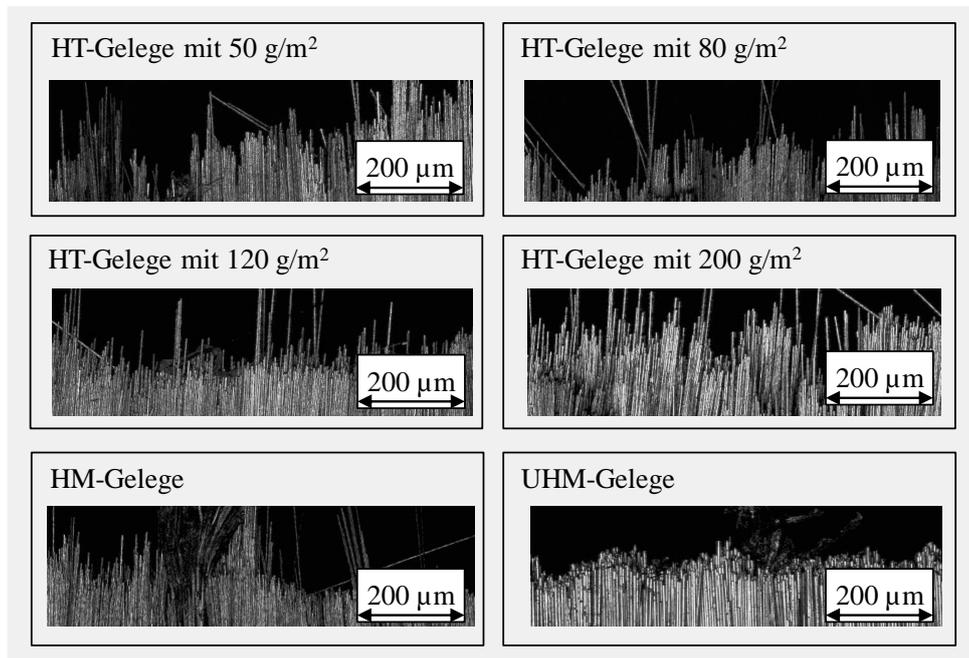


Abbildung A.2.16: Schnittkantenbilder bei 3800 bar, 6 mm und 200 mm/min

A.3 Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Auswertung des Signal-Rausch-Verhältnisses der unidirektionalen Kohlenstofffaser-Gelegen aufgezeigt.

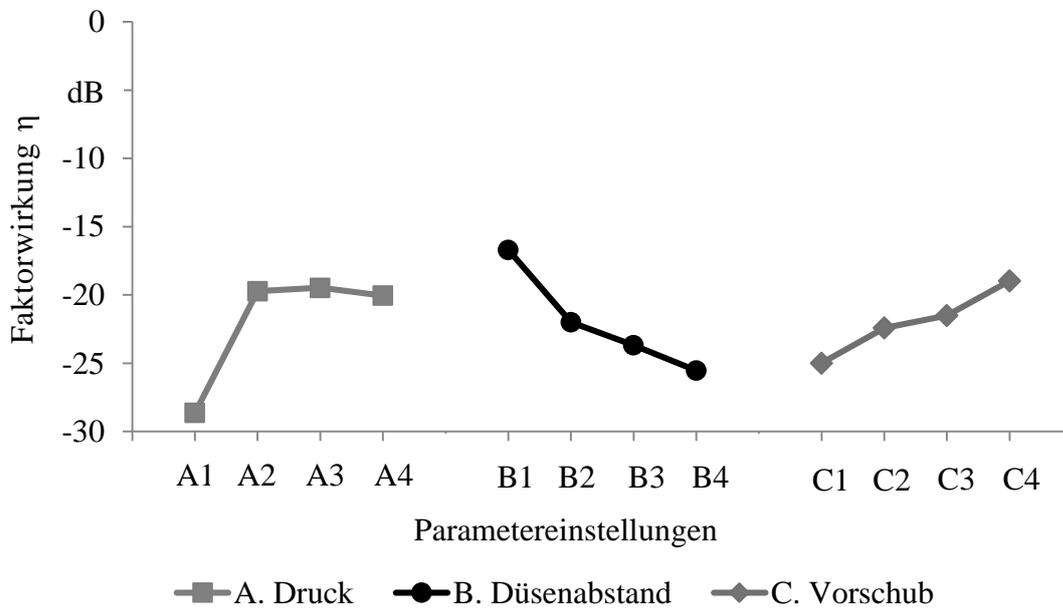


Abbildung A.3.1: Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität einer HT-Faser mit 50 g/m²

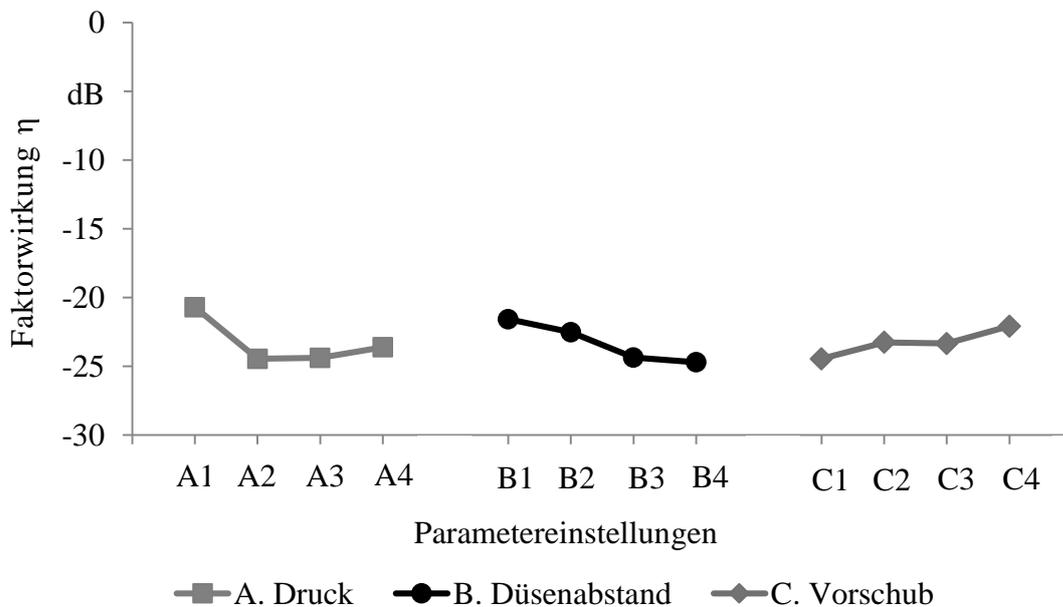


Abbildung A.3.2: Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität einer HT-Faser mit 80 g/m²

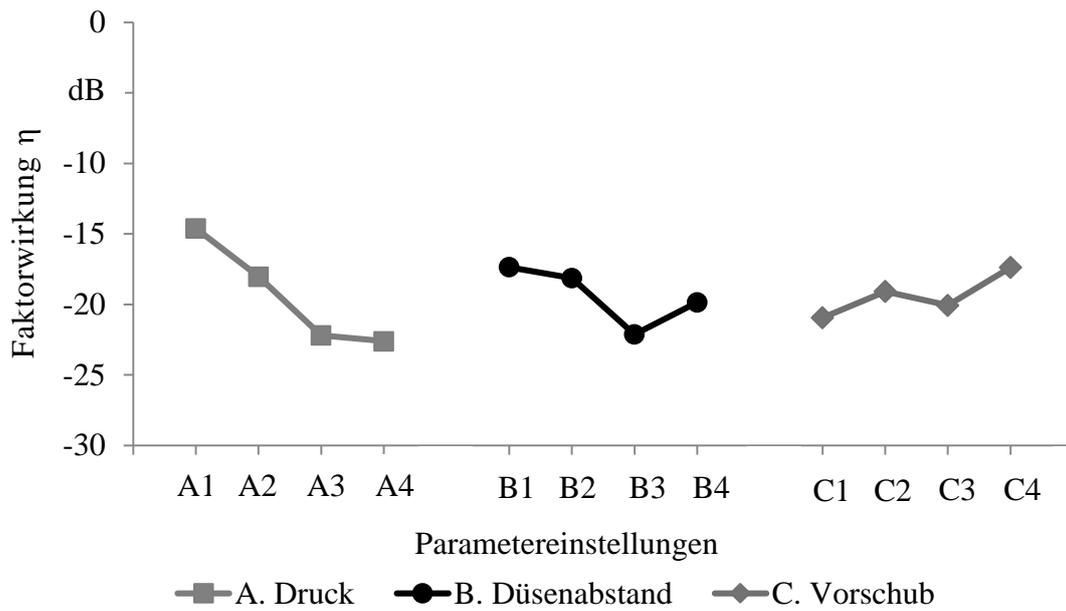


Abbildung A.3.3: Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität einer HM-Faser

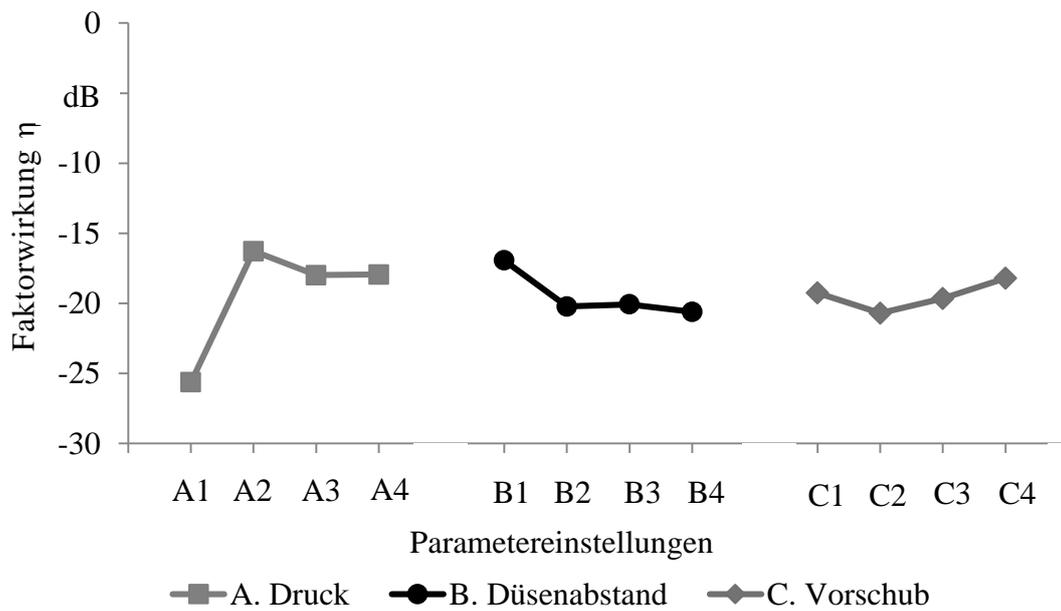


Abbildung A.3.4: Faktorwirkungen der Schnittkantenqualität einer UHM-Faser

A.4 Faktorwirkungen der Wasserabsorption

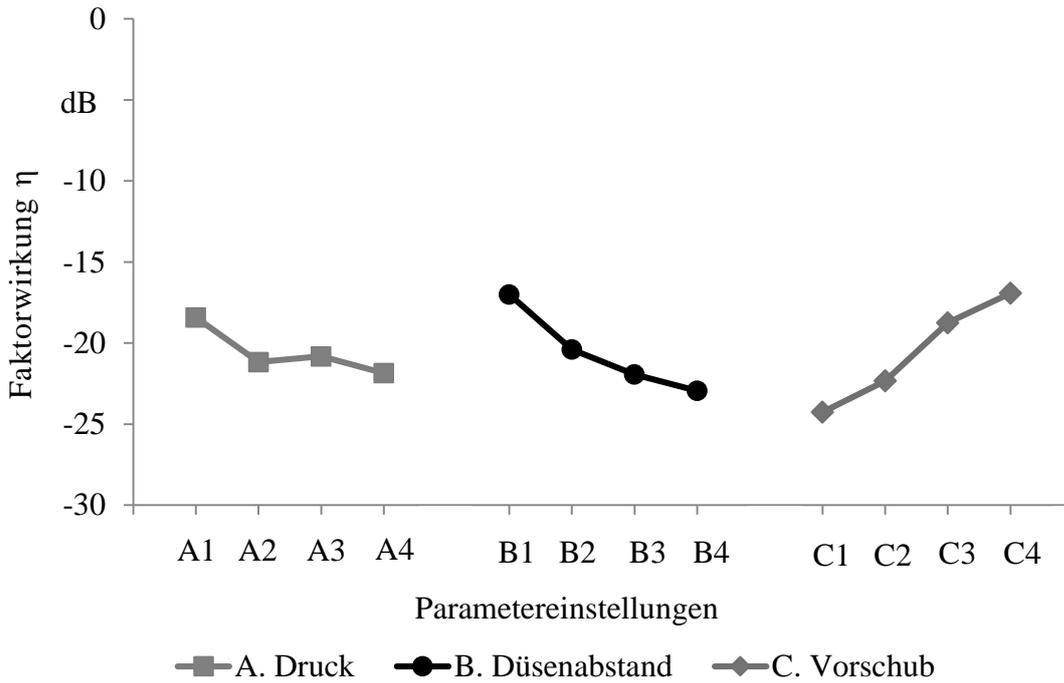


Abbildung A.4.1: Faktorwirkungen der Wasserabsorption einer HT-Faser mit 50 g/m²

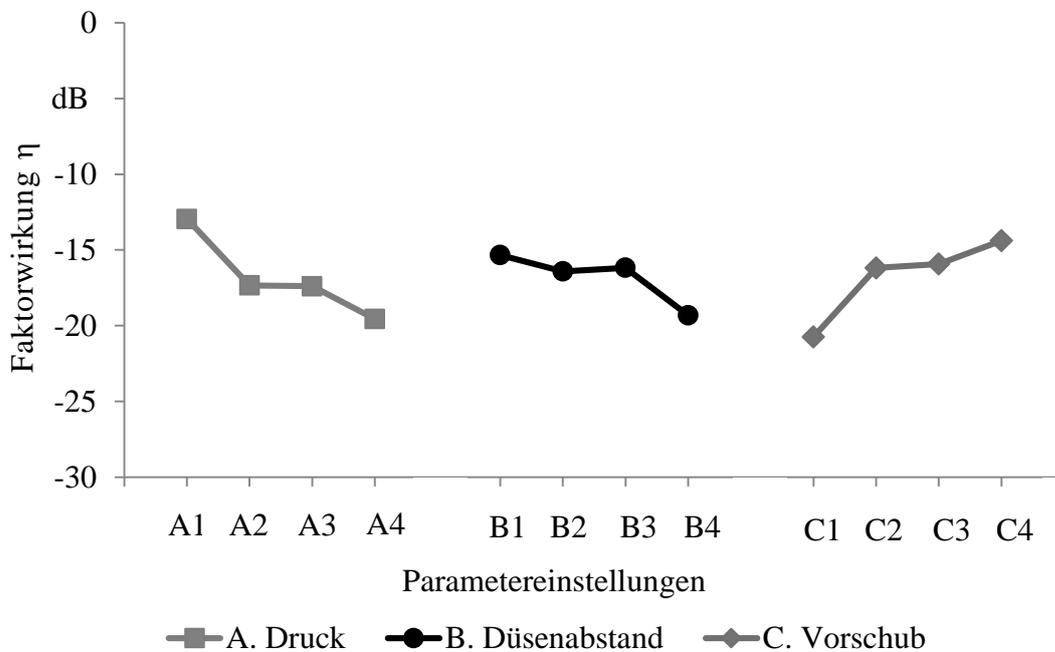


Abbildung A.4.2: Faktorwirkungen der Wasserabsorption einer HT-Faser mit 80 g/m²

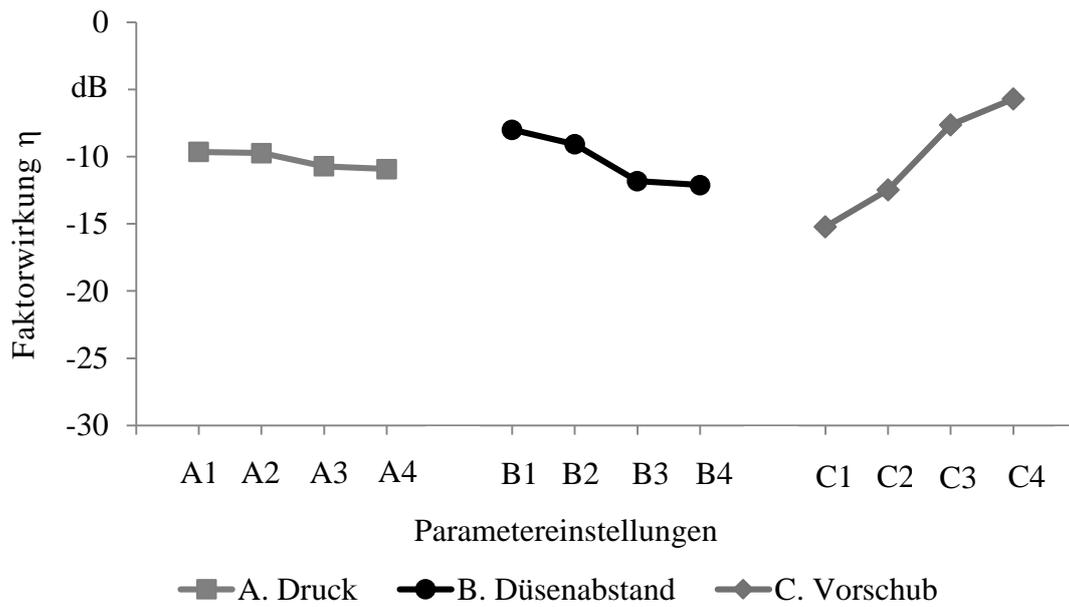


Abbildung A.4.3: Faktorwirkungen der Wasserabsorption einer HM-Faser

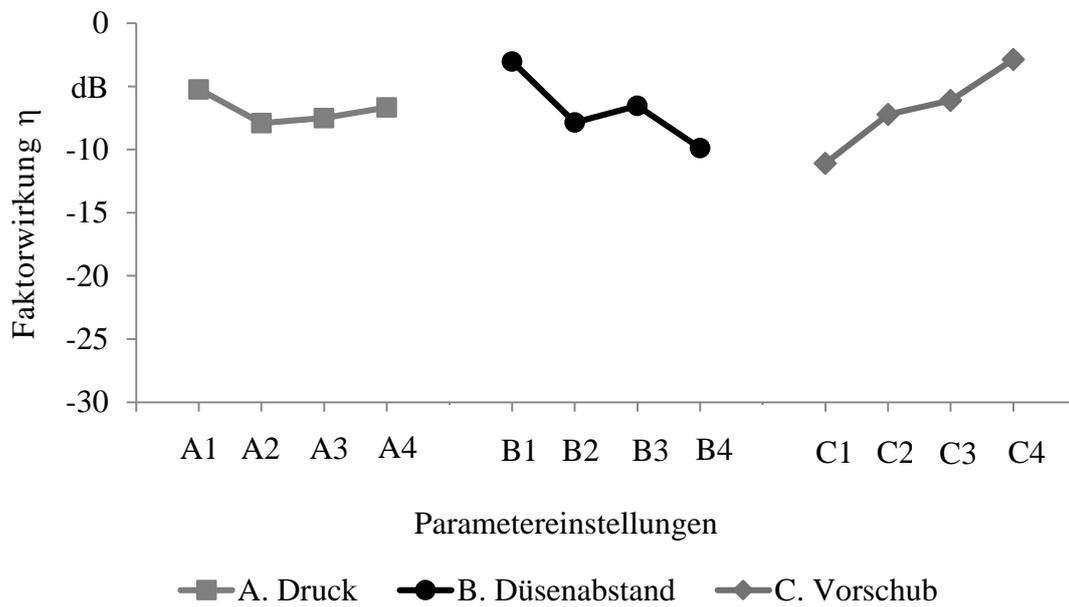


Abbildung A.4.4: Faktorwirkungen der Wasserabsorption einer UHM-Faser

A.5 Ergebnisse der Wasserabsorption der Textilien

Die Werte der Wasserabsorption wurden anhand eines Mittelwertes, bestehend aus insgesamt drei Versuchsdurchläufen des Versuchsfeldes, ermittelt. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle A.5.1 Ergebnisse der Mittelwerte der Wasserabsorption

Versuchs- nummer	Wasserabsorption der Textilien					
	HT 50	HT 80	HT 120	HT 200	HM	UHM
1	8,12 %	6,17 %	5,05 %	6,63 %	5,78 %	1,84 %
2	7,34 %	4,63 %	3,65 %	5,26 %	3,46 %	2,94 %
3	6,64 %	3,35 %	4,11 %	5,02 %	2,31 %	1,53 %
4	5,77 %	4,06 %	3,26 %	4,90 %	1,85 %	1,34 %
5	7,38 %	5,01 %	4,63 %	5,99 %	2,21 %	1,47 %
6	14,99 %	10,37 %	8,74 %	9,96 %	4,63 %	4,01 %
7	9,11 %	6,20 %	5,35 %	5,91 %	2,66 %	1,71 %
8	11,49 %	9,10 %	6,93 %	7,87 %	3,23 %	3,78 %
9	5,39 %	5,99 %	4,78 %	5,25 %	1,91 %	1,34 %
10	7,50 %	4,73 %	5,24 %	5,66 %	1,73 %	1,47 %
11	17,80 %	10,91 %	12,32 %	12,64 %	6,24 %	4,40 %
12	18,95 %	9,78 %	9,18 %	10,37 %	6,71 %	3,62 %
13	4,89 %	6,32 %	4,74 %	4,91 %	1,62 %	1,11 %
14	10,23 %	8,43 %	7,12 %	6,87 %	2,36 %	2,14 %
15	17,62 %	7,60 %	8,93 %	10,32 %	6,04 %	1,77 %
16	24,71 %	20,13 %	14,03 %	21,52 %	6,60 %	5,12 %

A.6 Angaben zum Nachweis der Unabhängigkeit

Wie in Kapitel 3.2.5 aufgezeigt, muss ein Nachweis der Unabhängigkeit der Maschinenparameter erbracht werden. Dieser Nachweis erfolgt anhand der Faktor-Wechselwirkungen. Die Faktor-Wechselwirkungen sind für die restlichen unidirektionalen Textilien anbei aufgeführt.

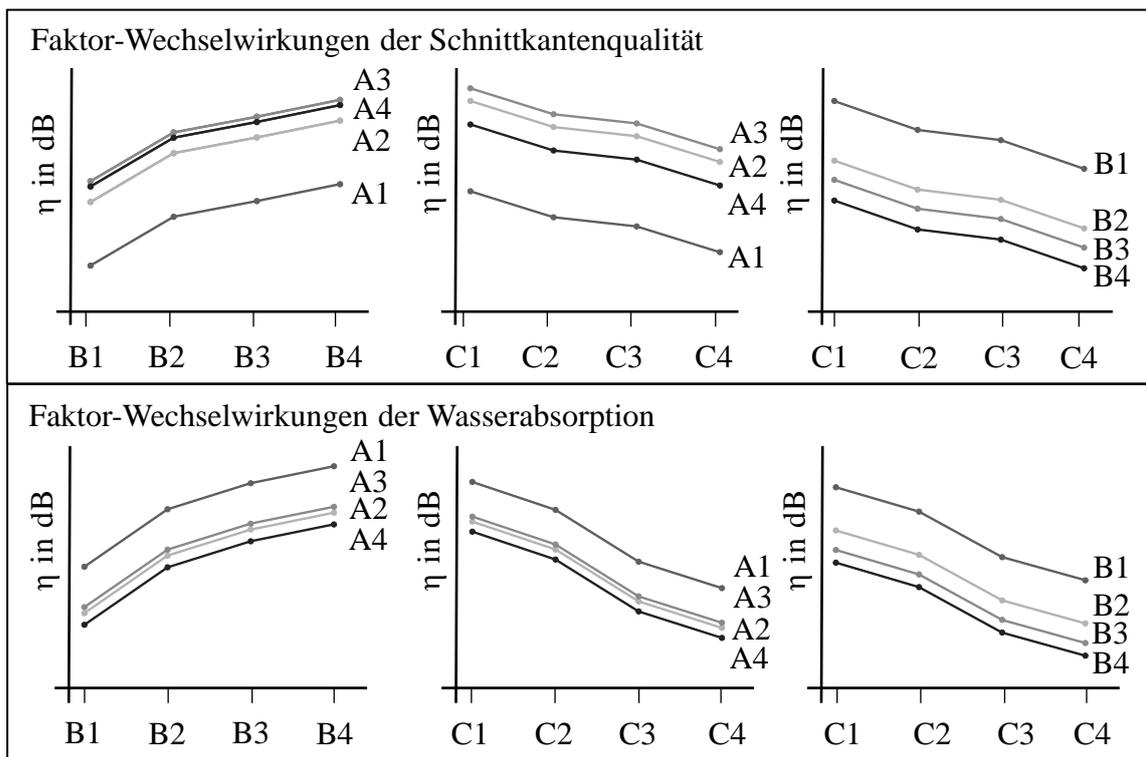


Abbildung A.6.1: Faktor-Wechselwirkungen einer HT-Faser mit 50 g/m²

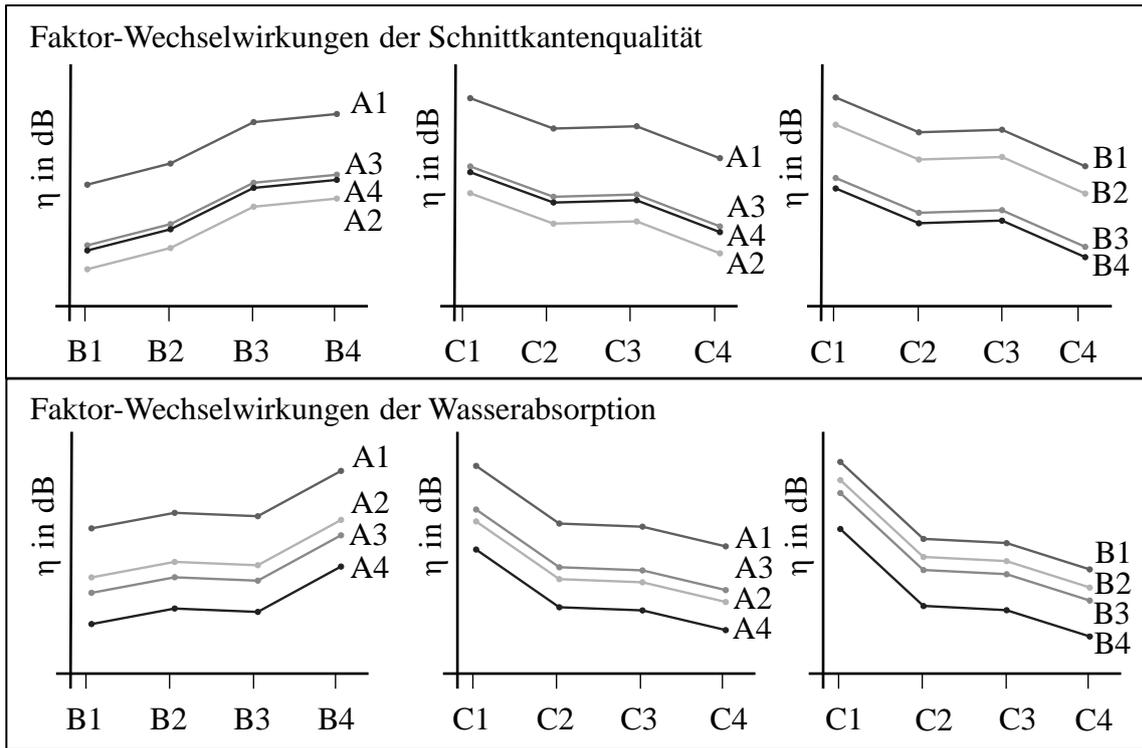


Abbildung A.6.2: Faktor-Wechselwirkungen einer HT-Faser mit 80 g/m²

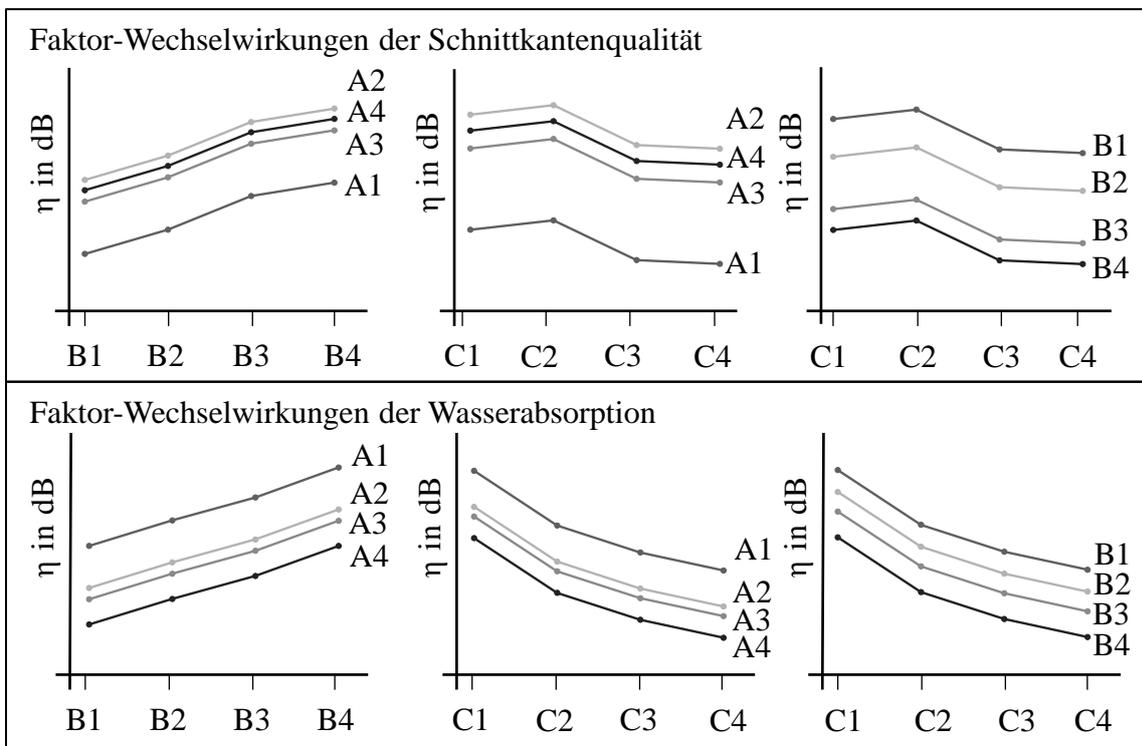


Abbildung A.6.3: Faktor-Wechselwirkungen einer HT-Faser mit 200 g/m²

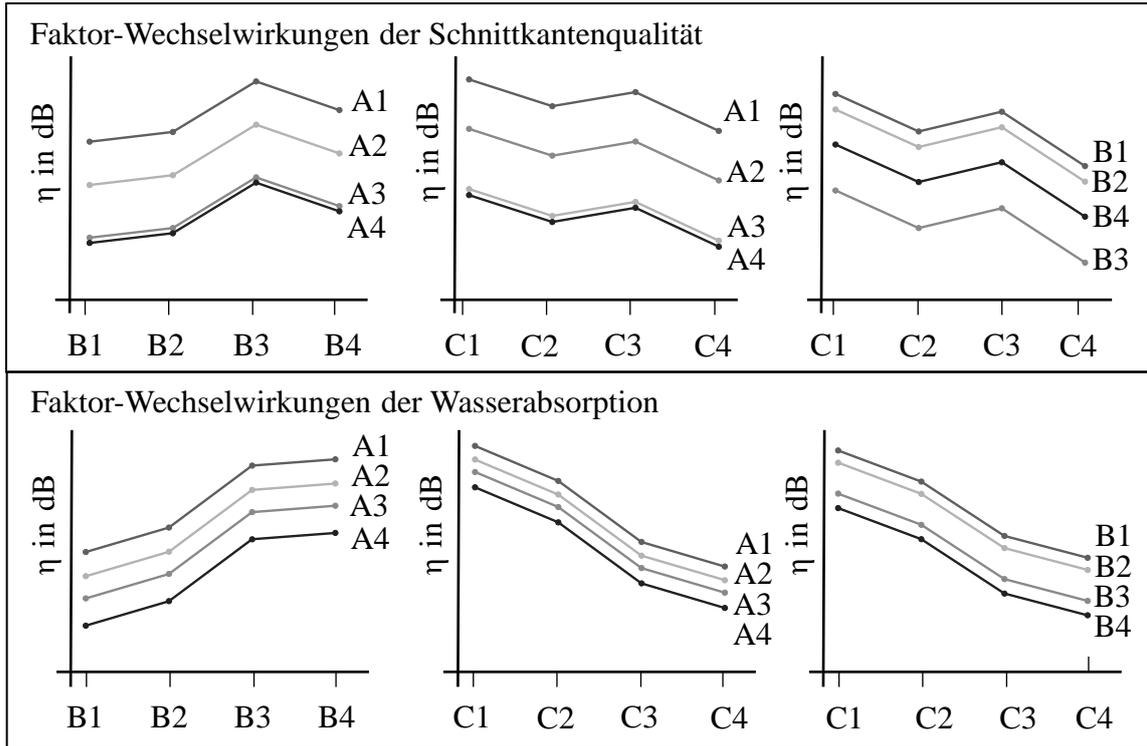


Abbildung A.6.4: Faktor-Wechselwirkungen einer HM-Faser

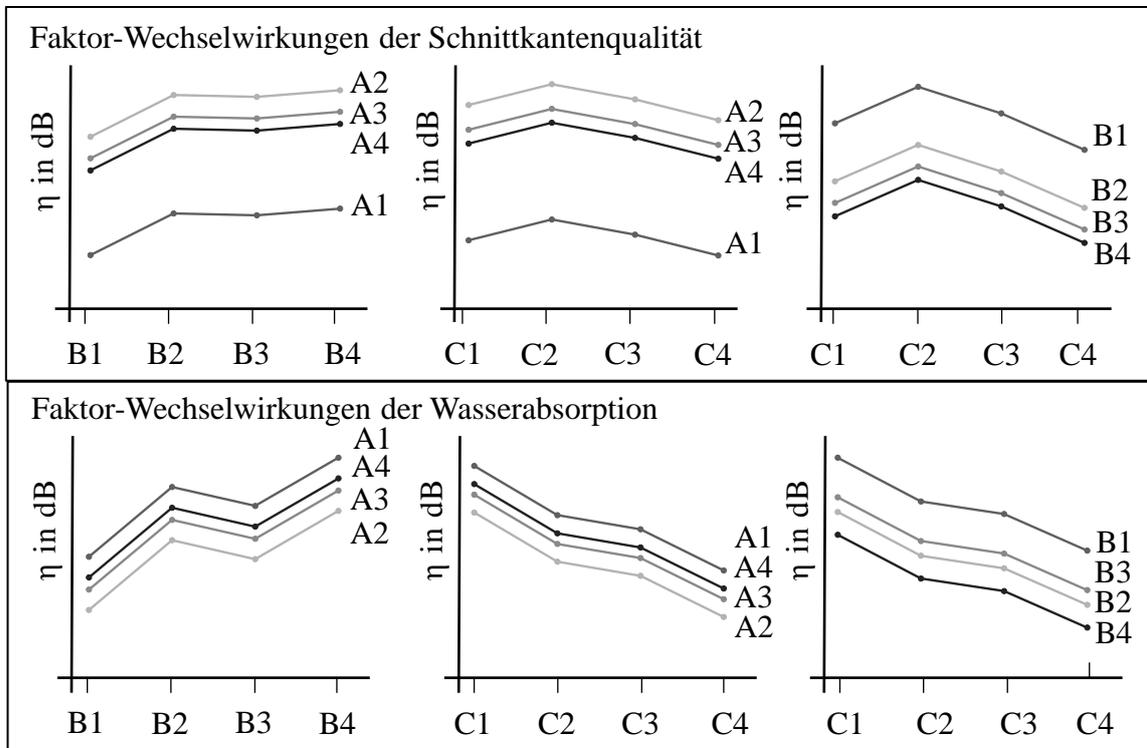


Abbildung A.6.5: Faktor-Wechselwirkungen einer UHM-Faser

A.7 Dichte von Wasser bei hohen Druckverhältnissen

Nachfolgend in Abbildung A.7.1 ist das Diagramm aus Gleichung 4.2 zur Berechnung der Dichte von Wasser bei hohen Drücken dargestellt.

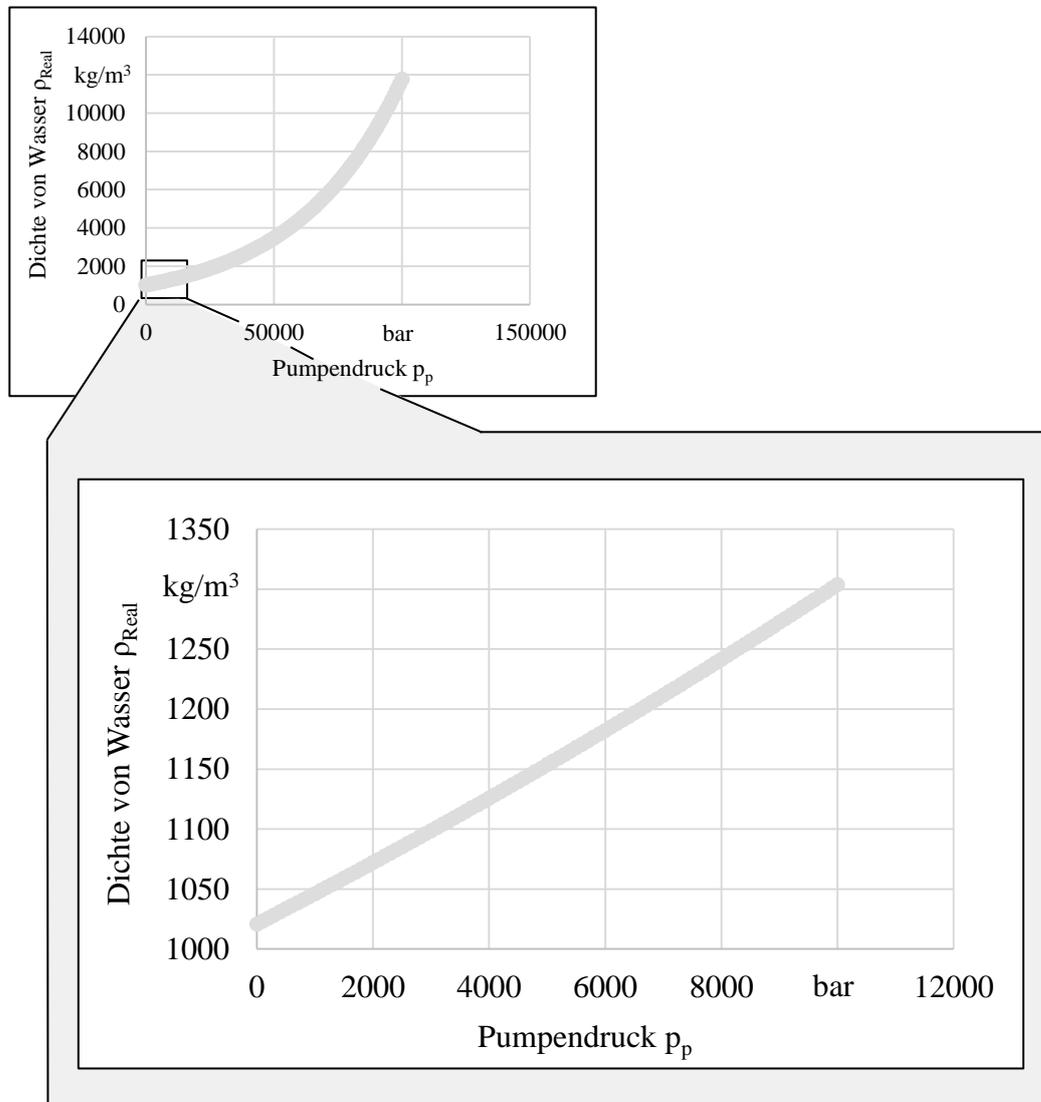


Abbildung A.7.1: Darstellung der Dichte von Wasser bei hohen Drücken (oberhalb) sowie im Fokus des Druckbereiches dieser Arbeit (unterhalb)

A.8 Grundlagen zur Berechnung des Wasserdruckes

Für die Berechnungen des Wasserdruckes zur Ermittlung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit wurden folgenden Werte verwendet:

Tabelle A.8.1: Berechnungsgrundlagen für die Verluste innerhalb des Rohrsystems

Bezeichnung	Wert	Quelle
Querschnittsfläche Rohr $_1 A_1$	35,257 mm ²	(FLOW 2013)
Querschnittsfläche Rohr $_2 A_2$	13,854 mm ²	(FLOW 2013)
Querschnittsfläche Strahl A_{Strahl}	0,0194 mm ²	–
Durchmesser Düse d_d	0,2 mm	(FLOW 2013)
Durchmesser Rohr $_1 d_{R,1}$	6,70 mm	(FLOW 2013)
Durchmesser Rohr $_2 d_{R,2}$	4,20 mm	(FLOW 2013)
Durchmesser Strahl d_{Strahl}	0,157 mm	Formel 4.7
Kompressibilitätsmodul E	4,09 GPa	(CARREÑO-OLEJUA 2014)
Gewichtskraft g	9,81 m/s ²	–
Länge l_0	0 mm	–
Länge Rohr $_1 l_1$	80 mm	(FLOW 2013)
Länge Rohr $_2 l_2$	60 mm	(FLOW 2013)
Länge Rohr Gesamt l_{Gesamt}	140 mm	–
Umgebungsdruck p_0	1,013 bar	–
Verlustwert ε	0,075	(HERWIG 2004)
Viskosität von Wasser η_{Wasser}	0,001 Pa s	(BÖSWIRTH & BSCHORER 2014)
Kontraktionsziffer μ_D	0,62	(KRISMANN 1994)
Dichte von Wasser ρ_{Wasser}	1021,03 kg/m ³	(CARREÑO-OLEJUA 2014)
Oberflächenspannung Wasser σ_{Wasser}	0,073 N/m	(WAGNER & KRUSE 1998)

A.9 Informationen zur Identifikation des Düsenabstandes

Berechnung der Kennzahl We/Re für das Ohnesorge-Diagramm

Für die Berechnung der Kennzahl We/Re muss die Formel 4.10 in Verbindung mit den Werten aus den Tabellen 4.1 und A.8.1 angewandt werden. Dabei ergeben sich folgende Daten.

Tabelle A.9.1: Werte der Kennzahl We/Re

Wasserdruck p_p	Kennzahl We/Re
2 600 bar	0,00895
3 000 bar	0,00890
3 400 bar	0,00886
3 800 bar	0,00881

Für den Abtrag der Kennzahl We/Re in das Ohnesorge-Diagramm ist die Ermittlung der tatsächlichen Reynolds-Zahl am Düsenaustritt erforderlich. Dafür müssen die Werte der Strahlgeschwindigkeit nach dem Düsenaustritt v_{Strahl} aus Tabelle 4.7 und der Durchmesser des Wasserstrahls d_{Strahl} aus Tabelle A.8.1 in die Formel 4.3 eingesetzt werden. Das Ergebnis ist in Tabelle A.9.2 dargestellt.

Tabelle A.9.2: Daten der Reynolds-Zahlen bei unterschiedlichen Wasserdrücken

Wasserdruck p_p	Reynolds-Zahl Re
2 600 bar	114 287
3 000 bar	123 384
3 400 bar	131 964
3 800 bar	140 251

Anhand den Werten aus den Tabellen A.9.1 sowie A.9.2 kann die Zerfallsart mit dem Ohnesorge-Diagramm bestimmt werden.

Berechnung der Freistrahlgeschwindigkeit $v_{\text{Freistrah}}$

Für die Berechnung der Freistrahlgeschwindigkeit wird Formel 4.11 verwendet. Dabei ist der Abstand z von Düse zum Schneidmaterial ausschlaggebend. Dieser Wert errechnet sich wie folgt:

$$z = l_D + l_{Da}. \quad (\text{A.9.1})$$

Für die Berechnung ist die Länge der Fokussierdüse l_D und der jeweilige Düsenabstand zum Material l_{Da} notwendig. Die Werte dieser Variablen können der Tabelle A.9.3 entnommen werden.

Tabelle A.9.3: Längenabstände der Freistrahlsströmung

Bezeichnung	Wert
Länge der Düse l_D	6 mm
Düsenabstand zum Material l_{Da}	3, 4, 5 und 6 mm

Ausgehend von den Formeln 4.11 und A.9.1 sowie den Werte aus Tabelle A.9.3 können die jeweiligen Werte der Freistrahlgeschwindigkeiten $v_{\text{Freistrah}}$ berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Kalkulation sind in Tabelle A.9.4 wiedergegeben.

Tabelle A.9.4: Berechnung der Freistrahlgeschwindigkeit des Wasserstrahls

	Düsenabstand			
	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
$v_{\text{Freistrah}}$, 2600 bar	667,34 m/s	667,34 m/s	477,45 m/s	437,66 m/s
$v_{\text{Freistrah}}$, 3000 bar	713,44 m/s	713,44 m/s	510,43 m/s	467,90 m/s
$v_{\text{Freistrah}}$, 3400 bar	755,63 m/s	755,63 m/s	540,62 m/s	495,57 m/s
$v_{\text{Freistrah}}$, 3800 bar	795,27 m/s	795,27 m/s	568,98 m/s	521,56 m/s

Für die Betrachtung der Freistrahlgeschwindigkeit ist die Länge der Kernzone ausschlaggebend, in welcher die Geschwindigkeit des Wasserstrahls der Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse entspricht. Dabei beträgt die Länge der Kernzone bei diesem Anwendungsfall 10 mm.

A.10 Fragebögen zur Bestimmung des Technologiereifegrades

Für die Analyse des Technologiereifegrades des Reinwasserstrahltrenns für den Anwendungsfall Trennen von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien wurde zur Ermittlung der ersten Reifegradstufe folgender Fragebogen bearbeitet.

1. Grundlagenforschung	
Kurzbeschreibung: Grundlagenforschung ist die erste Stufe der Reifeskala. Theorien und Wirkprinzipien werden im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung entworfen und überprüft. Auf dieser Grundlage beginnt die anwendungsbezogene Forschung. Dabei werden praktische Anwendungen identifiziert und es erfolgt die Formulierung und Beschreibung von Problemen und Lösungskonzepten. Die Anwendung ist in dieser Stufe jedoch noch rein spekulativ und nicht durch Experimente virtueller oder physischer Art untermauert.	
1.1	Existiert eine technische Beschreibung des Funktionsprinzips der Technologie in Form von Patenten, Dissertationen, Veröffentlichungen, etc.? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Titel, Autor, Erscheinungsjahr	
Patente	Etabliertes Verfahren. Diverse Patente, auch international, vorhanden.
Dissertationen	Diverse Dissertationen in unterschiedlichen Branchen vorhanden
Veröffentlichungen	Zahlreiche nationale als auch internationale Veröffentlichungen vorhanden
1.2	Existiert ein produktionstechnisches Anwendungsgebiet? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Fertigungsverfahren, Branche	
Anwendungsgebiet	Trennen mittels geometrisch unbestimmter Schneide (siehe DIN 8580)
1.3	Existieren produktionstechnische Anwendungsgebiete in mehreren Branchen? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Branche 1, Branche 2, ...	
Branchen	Metall, Kunststoff, Lebensmittel, Gestein, usw.
1.4	Sind die wesentlichen Parameter zur Beeinflussung der Technologie bekannt? (Werkstoffe, Energieeinbringung, z.B. erste Einschätzung der benötigten Laserleistung) <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Parameter 1, Parameter 2, ...	
Parameter	Wasserdruck, Vorschub, Düsenabstand, Düsendurchmesser
Fortschritt Reifegrad 1: 100%	
<p>0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%</p>	

Abbildung A.10.1: Fragebogen zur ersten Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Zur Ermittlung des zweiten Reifegrades *Machbarkeitsstudie* wurde nachfolgende Expertenbefragung verwendet.

2. Machbarkeitsstudie	
Kurzbeschreibung: Ziel der Phase der Machbarkeitsstudie ist der Nachweis der in Stufe eins prognostizierten Anwendung. Dazu werden sowohl analytische Studien, zum Beispiel in Form von virtuellen Modellen, als auch Experimente zu wesentlichen Funktionen durchgeführt.	
2.1	Sind die wesentlichen Entwicklungsschritte für die Realisierung der Technologie bekannt? (Ist bekannt, was experimentell oder simulativ untersucht werden muss, um die Realisierbarkeit der Technologie darzustellen?) <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
2.2	Sind alle Randbedingungen für eine Realisierung der Systemanwendung identifiziert? (z.B. Gesetze zu Schutzvorrichtungen etc.) <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Randbedingung 1, Randbedingung 2, ...	
Randbedingungen	Schutzeinrichtung, Wasseraufbereitung, usw.
2.3	Sind alle weiteren Technologien (z.B. Robotertechnologie zur Führung der Optik) und Ressourcen (z.B. Finanzen, Wissen, etc.) identifiziert, die notwendig sind, um die Technologie zu realisieren? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Technologie 1, Technologie 2, ...	
Technologien	Steuerungstechnik sowie strömungsmechanische Grundlagen zur Beschreibung des Wasserstrahls
Ressource 1, Ressource 2, ...	
Ressourcen	Wasser, Strom und Druckluft
2.4	Existieren alle relevanten virtuellen oder physischen Teilfunktionsprototypen zum Nachweis der wesentlichen Funktionen der Technologie? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
2.5	Existiert theoretisch ein Prozessfenster ¹ ? (Existieren analytische oder experimentelle Analysen, die zeigen, dass es eine Kombination der Parameter zur Realisierung der Technologie gibt?) <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Parameter	Wertebereich des Parameters, in dem der Prozess stabil ist
Vorschub	100 mm/min bis 2000 mm/min
Wasserdruck	1500 bar bis 4000 bar
Düsenabstand	2 mm bis 7 mm
2.6	Ist die technologische Machbarkeit der Funktionen durch grundlegende Experimente, experimentell oder analytisch z.B. durch Simulation, validiert worden? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Fortschritt Reifegrad 2: 100%	

Prozessfenster¹: Das Prozessfenster beschreibt eine Kombination von Parametern, bei denen eine fehlerfreie Anwendung der Technologie möglich ist. (z.B. die Beschreibung der möglichen Vorschubgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Laserleistung)

Abbildung A.10.2: Fragebogen zur zweiten Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Für die Betrachtung der dritten Reifegradstufe *Technologieentwicklung* wurde nachfolgender Fragebogen abgearbeitet.

3. Technologieentwicklung			
Kurzbeschreibung: Im Rahmen der Technologieentwicklung werden Konzepte zur Umsetzung der Technologie erarbeitet. Der gesamte Aufbau des Prototypen wird beschrieben. Ergebnis der Technologieentwicklung sind alle benötigten Daten für den Aufbau eines Funktionsprototypen.			
3.1 Ist die Umsetzung der Technologie in der Realität inklusive aller Funktionen (z.B. <i>Aufschmelzung, Bahnführung, etc.</i>) und der wesentlichen physikalischen Effekte (z.B. <i>Energieinkopplung, Ausbildung der Dampfkapillare, etc.</i>) beschrieben?			<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Funktion		Physikalische Effekte / Umsetzung	
Durchtrennen		Materialabtrag durch Reibung	
3.2 Sind alle wesentlichen Problemstellungen erkannt und existiert jeweils ein Lösungskonzept?			<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Problemstellung	Lösungskonzept	Grad der Problemlösung in %	
Wechselwirkung des Wasserdruckes	Versuche mit einem Vibrometer	50	
Sicherheitsaspekte bezüglich des Wasserstrahls	Schutzvorrichtung vorhanden	100	
Rückstrahlen von Schneidwasser	Schneidunterlage	100	
Wasseraufbereitung	Wasseraufbereitung vorhanden	100	
3.3 Sind alle Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Parameter bekannt? (z.B. <i>Interaktionen zwischen Einsatzumgebungen, Leistungsanforderungen und bestehenden Technologien</i>)			<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Wechselwirkung / Abhängigkeit		Parameter 1	Parameter 2
zb. Wasserabsorption/ bei hohem Vorschub gering, bei hohem Wasserdruck hoch		Vorschub	Wasserdruck
3.4 Existiert ein Plan für den gesamten Aufbau des Prototypen in Form von Dokumenten? (z.B. <i>CAD-Zeichnungen, Beschreibungen</i>)			<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Fortschritt Reifegrad 3: 75%			

Abbildung A.10.3: Fragebogen zur dritten Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Die Bestimmung der vierten Reifegradstufe *Technologiedemonstrator* wurde nach dem nachfolgenden Schema durchgeführt.

4. Technologiedemonstrator	
Kurzbeschreibung: In dieser Stufe wird ein Funktionsprototyp mit allen zur Realisierung der Technologie notwendigen Funktionen aufgebaut. Es erfolgen Tests zur Validierung von Komponenten und deren Funktionsnachweis im Gesamtverbund des Prototypen in Laborumgebung unter realistischen Bedingungen. Die grundsätzlichen Prozessfenster können ermittelt werden.	
4.1 Existiert ein Gesamtfunktionsprototyp?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
4.2 Wurde das ermittelte Prozessfenster abgefahren, getestet und ggf. erweitert?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
4.3 Wurden alle Funktionen der Technologie innerhalb des gesamten Prozessfensters getestet?	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
4.4 Wurde bei den Versuchen die reale Produktionsumgebung ausreichend abgebildet? (z.B. Luftfeuchtigkeit, Temperatur, etc.)	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Fortschritt Reifegrad 4: 75%	
	
0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%	

Abbildung A.10.4: Fragebogen zur vierten Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Zur Ermittlung der fünften Reifegradstufe wurde eine Expertenbefragung anhand eines folgenden Auswerteverfahrens durchgeführt.

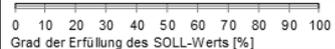
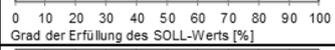
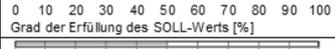
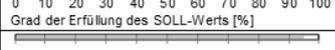
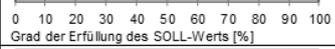
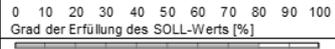
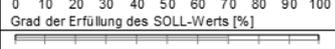
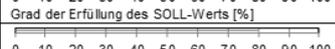
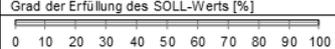
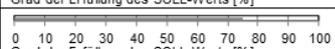
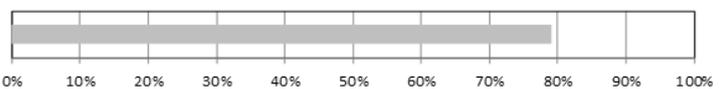
5. Integration in die Betriebsmittel			
Kurzbeschreibung: Die Stufe fünf beinhaltet die Integration der Technologie in ein Betriebsmittel. Darunter wird die Zuordnung und Eingliederung des Funktionsprototypen in ein Betriebsmittel wie beispielsweise eine Werkzeugmaschine verstanden. Die Funktionen des Prototypen der Technologie werden im Betriebsmittel nachgewiesen. Es erfolgen Tests zur Validierung der Ergebnisse aus vorangehenden Stufen bezüglich Funktionen und Wechselwirkungen von Komponenten im Gesamtverbund des Betriebsmittels. Die grundsätzlichen Prozessfenster können ermittelt werden.			
5.1	Existiert ein Betriebsmittel, in das die Technologie integriert werden kann?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
5.2	Wurde das ermittelte Prozessfenster, nach Integration in das Betriebsmittel, abgefahren und getestet? (Dies beinhaltet die Untersuchung von Auswirkungen des Betriebsmittels auf das bisher ermittelte Prozessfenster)	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
5.3	Gibt es Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Technologien innerhalb des Systems? Wurden deren Auswirkungen verstanden?	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	
5.4	Füllen Sie bitte die SOLL- bzw. IST-Werte für folgende Kennzahlen zur Prozesssicherheit aus. <i>Falls möglich sollen exakte Werte angegeben werden. Wenn diese nicht verfügbar sind, ist die Erfüllung des SOLL-Werts in Prozent anzugeben.</i>		
5.4.1	Arbeitsgenauigkeit (z.B. Wiederhol-, bzw. Positioniergenauigkeit)	SOLL: 10 IST: 10	
5.4.2	Prozessfähigkeit	SOLL: 10 IST: 8	
5.4.3	Verfügbarkeit	SOLL: 10 IST: 8	
5.4.4	Automatisierungsgrad	SOLL: 10 IST: 5	
5.4.5	Ausschussrate	SOLL: 10 IST: 10,5	
5.5	Füllen Sie bitte die SOLL- bzw. IST-Werte für folgende wirtschaftliche Kennzahlen aus. <i>Falls möglich sollen exakte Werte angegeben werden. Wenn diese nicht verfügbar sind, ist die Erfüllung des SOLL-Werts in Prozent anzugeben.</i>		
5.5.1	Prozessgeschwindigkeit	SOLL: 1 IST: 1	
5.5.2	Auslastung	SOLL: 10 IST: 8	
5.5.3	Energieverbrauch	SOLL: 10 IST: 12	
5.5.4	Ressourcenverbrauch	SOLL: 10 IST: 13	
5.5.5	Mengenleistung	SOLL: 10 IST: 8	
5.5.6	Investition	SOLL: 10 IST: 10	
5.5.7	Bearbeitungskosten pro Stück	SOLL: 10 IST: 12,5	
Fortschritt Reifegrad 5:		79%	

Abbildung A.10.5: Fragebogen zur fünften Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Eine Expertenbefragung anhand eines Fragebogens wurde zur Bestimmung der sechsten Reifegradstufe des Reinwasserstrahltrennens von unidirektionalen Kohlenstofffaser-Textilien durchgeführt. Diese ist nachfolgend dargestellt.

6. Produktionsstruktur / Vergleichbarer Serieneinsatz			
Kurzbeschreibung: Während dieses Reifegrads ist die Funktionsweise der Technologie im Rahmen der Produktionsstruktur zu testen. Dies beinhaltet neben der vorherigen Integration der Technologie in das Betriebsmittel alle vor- und nachgelagerten Prozesse. Die Ermittlung der Kennzahlen kann anhand eines technischen Prototypen erfolgen, in den die Produktionsstruktur integriert ist, oder anhand einer vergleichbaren Serienproduktion.			
6.1	Wurden erfolgreiche Versuche der Produktionsaufgabe in der realen Produktionsumgebung durchgeführt? Oder ist die Technologie im Serieneinsatz in einer vergleichbaren Produktionsstruktur ² ?	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
6.2 Füllen Sie bitte die SOLL- bzw. IST-Werte für folgende Kennzahlen zur Prozesssicherheit aus. Falls möglich sollen exakte Werte angegeben werden. Wenn diese nicht verfügbar sind, ist die Erfüllung des SOLL-Werts in Prozent anzugeben.			
6.2.1	Arbeitsgenauigkeit (z.B. Wiederhol-, bzw. Positioniergenauigkeit)	SOLL 10 IST 10	
6.2.2	Prozessfähigkeit	SOLL 10 IST 7	
6.2.3	Verfügbarkeit	SOLL 10 IST 9	
6.2.4	Automatisierungsgrad	SOLL 10 IST 6	
6.2.5	Ausschussrate	SOLL 10 IST 8	
6.3 Füllen Sie bitte die SOLL- bzw. IST-Werte für folgende wirtschaftliche Kennzahlen aus. Falls möglich sollen exakte Werte angegeben werden. Wenn diese nicht verfügbar sind, ist die Erfüllung des SOLL-Werts in Prozent anzugeben.			
6.3.1	Prozessgeschwindigkeit	SOLL 10 IST 10	
6.3.2	Auslastung	SOLL 10 IST 15	
6.3.3	Energieverbrauch	SOLL 10 IST 13	
6.3.4	Ressourcenverbrauch	SOLL 10 IST 13	
6.3.5	Mengenleistung	SOLL 10 IST 13	
6.3.6	Investition	SOLL 10 IST 12	
6.3.7	Bearbeitungskosten pro Stück	SOLL 10 IST 12	
6.4	Wurde ein Erstmuster ³ erstellt?	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	
Fortschritt Reifegrad 6:		86%	

Vergleichbare Produktionsstruktur²: Als vergleichbare Produktionsstruktur wird hierbei eine Produktion in derselben übergeordneten Branche bezeichnet. Dabei muss ein ähnliches Produkt mit vergleichbaren Anforderungen an Festigkeit und Genauigkeit, in einer vergleichbaren Produktionsumgebung mit denselben Werkstoffen hergestellt werden. (Konkret ist hier der serienmäßige Einsatz der Technologie in der Pkw-Industrie gemeint. Die Reifegradbewertung findet für ein Unternehmen der Nutzfahrzeugindustrie statt)

Erstmuster³: Ein Erstmuster ist ein Erzeugnis, das erstmals unter serienmäßigen Fertigungsbedingungen erzeugt wurde. Es verfügt über alle Produkteigenschaften und Funktionalitäten und dient der Produktions- und Produktfreigabe

Abbildung A.10.6: Fragebogen zur sechsten Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)

Abschließend wurde der siebte Technologiereifegrad *Serienproduktion* anhand eines Auswerteschemas ermittelt. Dieses ist in der nachfolgenden Abbildung erläutert.

7. Serienproduktion	
Kurzbeschreibung: Die Technologie befindet sich im industriellen Einsatz und kann mit der erwarteten Prozesssicherheit betrieben werden. Alle technologischen und wirtschaftlichen Parameter sind bekannt. Das Risiko beim Einsatz der Technologie ist gering und abschätzbar.	
7.1	Ist die Technologie in der realen Produktion des betrachteten Unternehmens im Einsatz? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
7.1.1	Bewegen sich die Kennzahlen zur Prozesssicherheit (6.2) und die wirtschaftlichen Kennzahlen (6.3) innerhalb des erwarteten Spielraums? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
7.1.2	Sind regelmäßige Service- Leistungen wie Wartung, Condition-Monitoring oder Software-Updates etabliert? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
7.2	Ist die Technologie durch Herstellungs- und Betriebsunterlagen hinreichend beschrieben? (z.B. Patente, Zertifikate, Richtlinien, (DIN-) Normen, usw.) <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Titel, Autor, Erscheinungsjahr	
Patente	Diverse Patente vorhanden
Zertifikate	
Richtlinien / Normen	DIN 8580
Weiteres	
7.3	Sind weitere quantifizierbare Rationalisierungseffekte zu erwarten oder können Verbesserungsvorschläge formuliert werden? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
7.4	Ist das Know-How über die Technologie ausreichend gesichert und für die Mitarbeiter verfügbar? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
7.5	Nutzen die Kernwettbewerber die Technologie? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
7.6	Ist die Technologie in anderen Branchen im Einsatz? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Branche 1, Branche 2, ...	
Branche	Metallbranche, Lebensmittelbranche
7.7	Ist die Technologie im Sinne einer Buy-Entscheidung verfügbar? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
Fortschritt Reifegrad 7: 19%	
 <p>0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%</p>	

Abbildung A.10.7: Fragebogen zur siebten Reifegradstufe in Anlehnung an SCHINDLER (2014)