

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten  
Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-  
Freiform Verfahren**

Band 229



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten  
Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform  
Verfahren**

Band 229



# Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

bei der Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene  
DISSERTATION  
von

M. Sc. Florian Baumann

Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2019

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7234-1

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Zunächst gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats, die fachliche Betreuung der Thematik, die konstruktiven und freundschaftlich geführten Diskussionen und das entgegengebrachte Vertrauen bei meinen verschiedenen Tätigkeiten am Institut. Unter seiner Anleitung konnte ich am wbk sehr viel lernen und mich sowohl beruflich als auch persönlich weiterentwickeln.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen in Stuttgart dafür danken, dass er die Übernahme des Korreferats angeboten und bereitwillig übernommen hat, mich bereits in einem frühen Stadium der Arbeit mit konstruktiver Kritik unterstützt hat und in verschiedenen Projekten und Arbeitsgruppen für eine angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt hat.

Ein besonderer Dank geht auch an die ARBURG GmbH, in deren Auftrag die in dieser Arbeit vorgestellte Faserzuführung entstand und welche mich auf vielfältige Weise bei den Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten unterstützt hat. Insbesondere möchte ich hier dem damaligen technischen Geschäftsführer Herrn Heinz Gaub, dem Entwicklungsleiter Herrn Dr. Eberhard Duffner, dem Leiter der freeformer-Abteilung Herrn Martin Neff, Frau Dr. Agnes Kloke, Herrn Marcus Wörner, Herrn Lothar Link und Herrn Wolfgang Gebele für die herausfordernde, aber stets freundschaftliche Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen danken.

Auch allen Kollegen am wbk, sowohl aus den verschiedenen Arbeitsgruppen, als auch den Servicecentern für Werkstatt, IT, Personal und Finanzen sowie aus den Sekretariaten möchte ich für ihre Unterstützung danken. Vor allem die Kollegen aus der Gruppe Leichtbaufertigung und die Bürokollegen konnten mir stets mit Fachwissen und neuen Blickwinkeln weiterhelfen.



In diesem Zusammenhang möchte ich auch allen Studenten und Studentinnen danken, die durch ihre Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskraft oder durch das Anfertigen ihrer Abschlussarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere möchte ich hier Herrn Benjamin Wirth danken, der in seiner Bachelorarbeit die Inbetriebnahme eines ersten Prototyps der Faserzuführung bearbeitete, mich danach als wissenschaftliche Hilfskraft bei der Weiterentwicklung unterstützte und letztendlich in seiner Masterarbeit eine erste Möglichkeit zur automatischen Erzeugung der Fertigungsdaten für additiv zu fertigende faserverstärkte Bauteile entwickelte.

Zudem möchte ich mich beim KA-Racing Team bedanken, dass es mir mit dem DRS-Aktorgehäuse einen Demonstrator zur Verfügung gestellt hat.

Schlussendlich gilt ein ganz besonderer Dank meiner Familie:

Meinen Schwiegereltern Margret und Rolf Kirschbaum inkl. Oma Lotte, welche durch ihre Unterstützung das alltägliche Leben vereinfachen und welche einen großen Teil dazu beigetragen haben, dass ich auch abseits des Instituts gut mit dem Schreiben der Arbeit vorwärtsgekommen bin.

Meinem Bruder Jens-Stefan Baumann, seiner Frau Esra und Tochter Amira, welche mir immer wieder eine willkommene Abwechslung vom Arbeitsalltag bieten.

Meinen Eltern Dr. Anne-Kristina Baumann und Dr. Uwe Baumann, die mir das Studium und die Promotion erst ermöglicht haben, mir stets mit Rat und Tat zur Seite stehen und mich bei allen Entscheidungen unterstützen.

Meiner Frau Julia, die mit viel Liebe, Verständnis und Geduld dafür gesorgt hat, dass ich die Arbeit auch zu Hause konzentriert fertig schreiben konnte.

Murrhardt, Dezember 2019

Florian Baumann



## Abstract

Over the last few years additive manufacturing (AM) processes underwent a development from a niche process for rapid prototyping to a well-established manufacturing process for end-user parts. Opposed to conventional manufacturing processes like subtractive (milling, drilling) or formative (casting, forging) processes, where material is taken away or just formed into another shape, in additive manufacturing processes new material is added to the part during the production without the need for any tools or molds. Therefore AM-processes offer a high degree of part complexity and freedom of design combined with low costs for single parts and low volume production.

Most AM-processes for metal parts can produce components which can compete with conventionally manufactured parts in regard to mechanical properties like Young's modulus or tensile strength. Parts made from polymers like thermoplastics however are inferior to conventionally manufactured parts in regard to mechanical properties. Therefore, the aim of this doctoral dissertation is the development, commissioning and parameter analysis of an AM-process for thermoplastics with superior mechanical properties.

This goal can be achieved by implementing continuous fiber reinforcements during the AM-process of an ARBURG freeformer by use of a fiber-feeding-module. In order to develop the aforementioned module, the current state of the art of additively manufactured fiber-reinforced-polymers (FRP) is evaluated and different assessment-criteria are defined. Based on those criteria and the boundary conditions given by the ARBURG freeformer and a demonstration-part from the formula student team *KA-RaceIng* the fiber-feeding-module is developed and commissioned.

Using an analysis of variances (ANOVA) approach, a study of dependence between different manufacturing parameters and mechanical values is conducted. The best Young's modulus of 16.2 GPa is achieved with an fibre-volume-content (FVC) of 21.1 %. The best tensile strength of 168 MPa is achieved with an FVC of 9.7 %. With this, 94 % of the calculated Young's modulus (FVC 21.1 %) and 56 % of the calculated tensile strength (FVC 9.7 %) were achieved. Processes from the state of the art achieved a maximum of 69 % (Young's modulus) and 62 % (tensile strength).



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Faserverstärkte Kunststoffe	4
2.1.1 Kunststoffmatrices	4
2.1.2 Verstärkungsfasern	5
2.1.3 Wirkungsweise	5
2.1.4 Berechnung mechanischer Eigenschaften von FVK	6
2.1.5 Fertigungsverfahren für FVK	8
2.2 Additive Fertigung	8
2.2.1 Allgemeines Funktionsprinzip der additiven Fertigung	9
2.2.2 Auswahl additiver Fertigungsprozesse für Thermoplaste	12
2.2.3 Aufbau des Maschinencodes für AKF	16
2.3 Additive Fertigung von FVK	19
2.3.1 Additive Fertigung von kFVK	20
2.3.2 Additive Fertigung von eFVK	25
2.3.3 Weitere Forschungsarbeiten zur additiven Fertigung von FVK	30
2.4 Prozessvergleich	30
2.4.1 Additiv gefertigte kFVK 0°-Orientierung	33
2.4.2 Additiv gefertigte kFVK 90°-Orientierung	34
2.4.3 Additiv gefertigte eFVK	35
<b>3 Bewertung des Stands der Technik</b>	<b>37</b>
<b>4 Zielsetzung</b>	<b>43</b>

---

<b>5</b>	<b>Lösungsansatz</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>49</b>
6.1	Definition einer Demonstratorgeometrie	49
6.1.1	Analyse der Randbedingungen und Anforderungen	49
6.1.2	DRS-Aktorgehäuse	51
6.2	Verfahrensentwicklung	53
6.2.1	Ableitung der Anlagengrundstruktur	54
6.2.2	Prozessentwicklung	55
6.2.3	Mechanik für die Zuführung von Endlosfasern	57
6.3	Parameterstudie an UD-Probekörpern	75
6.3.1	Definition der Zielgrößen	75
6.3.2	Definition der Einflussfaktoren	76
6.3.3	Versuchsplan	89
6.3.4	Beschreibung der Zugprobekörper	90
6.3.5	Herstellung der Probekörper	93
6.3.6	Ermittlung der Probeneigenschaften	94
6.3.7	Auswertung der Parameterstudie	96
6.3.8	Diskussion der Ergebnisse	109
6.3.9	Zusammenfassung der Parameterstudie	112
6.4	Auswahl der optimalen Verarbeitungsparameter	113
6.5	Validierung	114
6.5.1	Ermittlung mechanischer Kennwerte	114
6.5.2	Vergleich zwischen AKF-FVK und Stand der Technik	117
6.5.3	Fertigung des Demonstrators	122
<b>7</b>	<b>Bewertung</b>	<b>126</b>
7.1	Methodik	126
7.1.1	Verfahrensentwicklung	126
7.1.2	Parameterstudie	127
7.2	Anlage und Prozess	127

---

7.2.1	Modul für die Faserimplementierung	128
7.2.2	Prozess für lineare FVK-Pfade	129
7.2.3	Prozess für nicht-lineare FVK-Pfade	130
7.2.4	Bewertung auf Basis der Zielsetzung	131
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>136</b>
8.1	Zusammenfassung	136
8.2	Ausblick	138
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XVIII</b>

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ABS	Acrylnitrilbutadienstyrol
AF	Aramidfasern
AKF	ARBURG Kunststoff-Freiformen
ANOVA	Analysis of Variances / Varianzanalyse
B/H	Aspektverhältnis eines Tropfens, Breite zu Höhe
BF	Bewertungsfaktor
CAD	Computer Aided Design
CF	Kohlenstofffaser
CFF	Continuous Filament Fabrication
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computer Numerical Control
CNT	Carbonnanotube
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Design of Experiments / Statistische Versuchsplanung
DRS	Drag Reduction System
E	Kurzzeichen für E-Modul
E-Modul	Zugsteifigkeit
eFVK	Endlosfaserverstärkte Kunststoffe
EP	Epoxidharz
FDM	Fused Deposition Modelling
FEAM	Fiber Encapsulation Additive Manufacturing
FFG	Faserflächengehalt, Anteil der Fasern an der Querschnittsfläche
FLM	Fused Layer Manufacturing / Fused Layer Modelling
FMG	Fasermassengehalt
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
GCode	Maschinenlesbarer Code für die Steuerung von Bewegungen

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
GF	Glasfaser / Gewichtungsfaktor
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
I/O	Input / Output, Schnittstelle für Signalübertragung
K	Filamentanzahl eines Rovings oder Garns in 1000 Filamente (1K $\hat{=}$ 1000 Filamenten)
kFVK	Kurzfaserverstärkte Kunststoffe
IFVK	Langfaserverstärkte Kunststoffe
LS	Lasersintern
PA, PA6, PA66, PA12	Verschiedene Polyamid-Sorten
PE	Polyesterharz
PEI	Polyetherimid
PETG	Polyethylenterephthalat mit Glycol modifiziert
PLA	Polylactide Acid, Polymilchsäure
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
rpm	Umdrehungen pro Minute
SLS	Selektives Lasersintern
STL	Dateiformat Standard Tessellation Language
tex	Längengewicht von Fasern in [g/km]
UD	Unidirektional
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VGCF	Vapour Grown Carbon Fibre
vol%	Volumenprozent
wt%	Weight-percent, Gewichtsprozent

---

## Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$A_F$	Querschnittsfläche der Verstärkungsfaser (inkl. Schlichte)	[mm <sup>2</sup> ]
$A_E$	Prozentualer Anteil am erreichbaren E-Modul	[%]
$A_{Faser}$	Querschnittsfläche der Fasern (ohne Schlichte)	[mm <sup>2</sup> ]
$A_M$	Querschnittsfläche eines Matrix-Elements	[mm <sup>2</sup> ]
$A_R$	Prozentualer Anteil an der erreichbaren Zugfestigkeit	[%]
$A_{Schlichte}$	Querschnittsfläche der auf der Faser aufgetragenen Schlichte	[mm <sup>2</sup> ]
$B_{Faserlinie}$	Breite der Faserlinie bzw. Abstand der Faserlinien	[mm]
$b_{gesamt}$	Breite des gesamten Probekörpers	[mm]
$B_{Linie}$	Variable Breite der Tropfenlinie	[mm]
$B_{Probekörper}$	Breite des Probekörpers	[mm]
$d_{Förderrolle}$	Durchmesser der Förderrolle	[mm]
$e$	Erfüllung des Potentials der Steigerung des E-Moduls	[%]
$e_{actual}$	Tatsächlich erreichte Erhöhung des E-Moduls	[%]
$E_F$	E-Modul der Faser	[MPa]
$E_{FVK}$	E-Modul des Verbundwerkstoffs	[MPa]
$E_M$	E-Modul der Matrix	[MPa]
$E_R$	Gemessener E-Modul der Referenz-Proben	[MPa]
$e_{theoretical}$	Theoretisch erreichbare Erhöhung des E-Moduls	[%]
$E_{Versuchsergebnis}$	Tatsächlich erreichbarer E-Modul	[MPa]
$E_{Voigt}$	Theoretisch erreichbarer E-Modul mit Voigt-Modell	[MPa]
$E_{Xn}$	Gemessener E-Modul der Proben Xn	[MPa]
$h_{gesamt}$	Höhe des gesamten Probekörpers	[mm]

<b>Formelzeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$i_{\text{Getriebe}}$	Gesamtübersetzung zwischen Motor und Förderrolle	[-]
$L_F$	Länge der Verstärkungsfaser	[mm]
$L_{t,neu}$	Tropfenabstand längs zur Austragsrichtung	[mm]
$m_F$	Fasermasse	[g]
$m_M$	Matrixmasse	[g]
$n_{B/H}$	Breite zu Höhe Verhältnis des Tropfens	[-]
$n_{\text{Fasern}}$	Anzahl an Faserlinien pro Ebene	[-]
$n_{K\text{-Linien}}$	Anzahl an unverstärkten Kunststofflinien pro Ebene	[-]
$n_{\text{Motor}}$	Motordrehzahl	[1/min]
$R$	Radiale Abweichung der Verstärkungsfasern vom Extrusionspunkt des Kunststoffs	[mm]
$R_F$	Zugfestigkeit der Faser	[MPa]
$R_{\text{FVK}}$	Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs	[MPa]
$R_{\text{Versuchsergebnis}}$	Tatsächlich erreichte Zugfestigkeit	[MPa]
$R_{\text{Voigt}}$	Theoretisch erreichbare Zugfestigkeit mit Voigt-Modell	[MPa]
$SD$	Schichtdicke	[mm]
$S_{F,mittel}$	Mittlere gemessene ausgetragene Faserlänge	[mm]
$S_{F,n}$	Ausgetragene Faserlänge bei Versuch $n$	[mm]
$S_{F,soll}$	Berechnete ausgetragene Faserlänge	[mm]
$s_u$	Pro Motorumdrehung ausgetragene Faserlänge	[mm]
$S_{sF}$	Standardabweichung der ausgetragenen Faserlänge	[%]
$V_F$	Faservolumen	[mm <sup>3</sup> ]
$v_{\text{Faser}}$	Fördergeschwindigkeit der Fasern	[mm/s]
$V_{\text{gesamt}}$	Gesamtvolumen eines FVK-Elements	[mm <sup>3</sup> ]
$V_M$	Matrixvolumen	[mm <sup>3</sup> ]

<b>Formelzeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$X_n$	Probenbezeichnung C1-C3, G1-G3	[-]
$X$	Abstand Düse - Verstärkungsfasern in X-Richtung	[mm]
$Y$	Abstand Düse - Verstärkungsfasern in Y-Richtung	[mm]
$\delta$	Korrekturfaktor für die Berücksichtigung von Schlupf	[-]
$\varphi_F$	Faservolumengehalt	[%]
$\varphi_M$	Matrixvolumengehalt	[%]
$\rho_F$	Faserdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{gesamt}$	Dichte des gesamten Verbundwerkstoffs	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_M$	Matrixdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\psi$	Fasermassengehalt (FMG)	[%]
$\varnothing_{Garn}$	Durchmesser des Verstärkungsgarns	[mm]
$\varnothing_{Tropfen}$	Durchmesser eines Tropfens	[mm]

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die additiven Fertigungsverfahren haben in den vergangenen Jahren ein sehr großes Wachstum erfahren. Die Gründe hierfür sind vielfältig und lassen sich zum einen durch auslaufende Patente (Bourell et al. 2017, S. 659), zum anderen durch die großen Vorteile, welche die additive Fertigung gegenüber herkömmlichen Verfahren bietet, begründen.

So können sehr komplexe Bauteile durch additive Verfahren günstiger gefertigt werden (Hagemann und Zäh 2006, S. 4), (Breuninger et al. 2013, S. 113), Kleinserien lassen sich wirtschaftlicher fertigen (Royal Academy of Engineering, S. 8) und die time-to-market, also die Zeit, die von der Entwicklung bis zur Platzierung eines Produkts auf dem Markt verstreicht, ist geringer (Royal Academy of Engineering, S. 9), (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 7) als bisher. Folglich lassen sich somit die Entwicklungskosten und Entwicklungszeit für neue Produkte reduzieren (Marchese et al. 2015, S. 9). Allerdings weisen additiv gefertigte Kunststoffbauteile im Vergleich zu konventionell mittels Spritzguss gefertigten Bauteilen mindestens 20 % schlechtere mechanische Eigenschaften auf (Völkner 2015).

Dem gegenüber stehen faserverstärkte Kunststoffe (FVK) mit sehr guten gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften, zu unterscheiden in kurzfaserverstärkte Kunststoffe (kFVK), langfaserverstärkte Kunststoffe (lFVK) und endlosfaserverstärkte Kunststoffe (eFVK), (Henning und Moeller 2011, S. 383), (Schürmann 2008, S. 4–5).

Gängige Technologien für die industrielle FVK-Fertigung, wie z. B. der Resin Transfer Moulding Prozess, benötigen hierbei jedoch nicht nur ein Formwerkzeug, sondern oftmals zusätzlich auch noch ein Preformwerkzeug und komplexe Automatisierungslösungen, die je nach Bauteilform aufwändig umprogrammiert bzw. rekonfiguriert werden müssen. FVK, welche durch Spritzgießen oder Pressen von Sheet-Moulding-Compound oder Bulk-Moulding-Compound hergestellt werden, benötigen ebenfalls bauteilspezifische Werkzeuge. (Henning und Moeller 2011, S. 607–665)

FVK-Komponenten sind auf Grund der sehr hohen Materialkosten, die bis zu 60% am Gesamtbauteil betragen können, sehr teuer (Lerch et al. 2014, S. 18). Berücksichtigt

ist hierbei auch schon der Verschnitt von Fasermaterialien, welcher bis zu 30% betragen kann (Henning und Moeller 2011, S. 636). Dies schränkt die Wirtschaftlichkeit der Fertigung von FVK weiter ein.

Dem gegenüber stehen wieder die additiven Fertigungsverfahren, die auf Grund des Prinzips des Hinzufügens von Material an den Stellen, an denen es im Bauteil benötigt wird, eine sehr große Effizienz bei der Materialausnutzung aufweisen (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 4). Die Materialvielfalt ist für die meisten Verfahren jedoch sehr gering (Gebhardt 2013, S. 306), (Royal Academy of Engineering, S. 13), (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 11), auch ist das Material vergleichsweise teuer (Lanza et al. 2017, S. 16), (Gebhardt 2013, S. 502–503).

Der Forderung nach einer größeren Materialauswahl und günstigeren Materialien ist die ARBURG GmbH & Co KG mit der Vorstellung des freeformers und des zugehörigen Prozesses ARBURG Kunststoff-Freiformen (AKF) im Jahr 2013 nachgekommen. Das AKF bietet die additive Fertigung unter Verwendung von Standardgranulaten, wie sie bisher im Spritzguss verwendet werden (ARBURG GmbH + Co. KG 2013, S. 7).

Aber auch die im freeformer additiv gefertigten Bauteile unterliegen ähnlichen Einschränkungen der mechanischen Eigenschaften wie die aus anderen additiven Verfahren (ARBURG GmbH + Co. KG 2014b, S. 13).

Eine Verbindung der Vorteile aus der additiven Fertigung, insbesondere der Wirtschaftlichkeit für Kleinserien, der kurzen time-to-market und der großen Materialeffizienz, mit den überlegenen mechanischen Eigenschaften von FVK könnte den Markt für die Kleinserienproduktion revolutionieren, da hiermit erstmals höherfeste Kunststoffbauteile wirtschaftlich additiv gefertigt werden können.

Die Nutzung des ARBURG freeformers stellt dabei die Verfügbarkeit einer möglichst großen Auswahl günstiger Materialien sicher.

## **1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

Das Ziel dieser Dissertation ist somit die Entwicklung und Validierung eines auf dem AKF basierten Verfahrens, welches die Fertigung von höherfesten FVK-Bauteilen ermöglicht. Hierbei soll der Ansatz des freeformers, Standardgranulate zu verwenden, auch für die Fasermaterialien weiterverfolgt werden. Dabei ist auf einen effizienten Materialeinsatz insbesondere bei den hochpreisigen Verstärkungsfasern zu achten. Die

weiteren Vorteile additiver Fertigungsprozesse, z. B. die hohe erzielbare Bauteilkomplexität und die geringe time-to-market, sollen dabei auch weiterhin erhalten bleiben.

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen der faserverstärkten Kunststoffe und der additiven Fertigung erläutert sowie der aktuelle Stand der Technik der additiven Fertigung von kFVK und eFVK dargestellt. Hierbei wird sowohl auf Prozessbeschreibungen als auch auf tatsächlich erreichte mechanische Eigenschaften der additiv gefertigten FVK eingegangen. Abgeschlossen wird der Stand der Technik mit einem Vergleich der Zugfestigkeit und Zugsteifigkeit von Probekörpern aus allen vorgestellten Verfahren.

Darauffolgend wird in Kapitel 3 der Stand der Technik bewertet. Hierfür werden die relevanten Bewertungskriterien aus den vorigen Kapiteln zusammengefasst und gewichtet. Auf Basis dieser Kriterien werden die im Stand der Technik vorgestellten Verfahren analysiert und bewertet, um so den tatsächlichen Forschungsbedarf ermitteln zu können. Im darauffolgenden Kapitel 4 wird die Zielsetzung für den zu entwickelnden Prozess mit der zugehörigen Hardware anhand der gewichteten Bewertungskriterien und den bewerteten Lösungen des Stands der Technik abgeleitet.

Der Lösungsansatz in Kapitel 5 beschreibt den innerhalb dieser Dissertation verfolgten Weg, um die Fertigung von FVK mit dem ARBURG freeformer zu ermöglichen. So werden dort die aufeinander aufbauenden Teile des Ergebniskapitels 6 von der Auswahl des Demonstrators über die Verfahrensentwicklung, die Parameterstudie anhand unidirektional verstärkter Probekörper und die Auswahl der optimalen Verarbeitungsparameter bis zur Validierung des Gesamtansatzes und der Fertigung des Demonstrators beschrieben und in einen Gesamtzusammenhang gebracht, bevor diese Themen in Kapitel 6 ausgiebig behandelt und die Resultate mit dem Stand der Technik verglichen werden.

In Kapitel 7 folgt die Bewertung der durchgeführten Arbeiten und des entwickelten Verfahrens. So werden sowohl die verwendeten Methoden bei der Entwicklung der Anlagenmechanik und der Durchführung der Parameterstudie als auch die Mechanik für die Faserimplementierung und die jeweiligen Prozesse für die Implementierung der Endlofasern bewertet.

Die Dissertation schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung der gesamten Arbeit und einem Ausblick auf die zukünftige Verwendung des entwickelten Verfahrens sowie benötigter Prozesse für die sinnvolle Anwendung des entwickelten Verfahrens ab.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In den folgenden Kapiteln werden die Grundlagen beschrieben, welche für das Themenfeld der additiven Fertigung von FVK benötigt werden. Hierbei wird zunächst allgemein auf die Bestandteile und Wirkungsweise von FVK eingegangen und wie sich deren mechanische Kennwerte berechnen lassen. Darauf folgend wird die additive Fertigung allgemein beschrieben und detailliert auf das Verfahren des ARBURG freeformers, der als Basis für die in dieser Dissertation durchgeführte Verfahrensentwicklung und die dazugehörige Parameterstudie dient, eingegangen. Eine Beschreibung bereits existierender Lösungen für die additive Fertigung von FVK sowie ein Vergleich der Prozesse und der mit den Prozessen erreichbaren mechanischen Eigenschaften schließen das Grundlagenkapitel ab.

### 2.1 Faserverstärkte Kunststoffe

FVK zählen zu der Gruppe der Verbundwerkstoffe, welche auch unter dem Namen Composites bekannt sind. Sie bestehen aus Verstärkungsfasern, welche in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind und welche sie durch ihre Einbettung verstärken. (Schürmann 2008, S. 13), (Henning und Moeller 2011, S. 341)

#### 2.1.1 Kunststoffmatrices

Das Matrixmaterial von FVK besteht in der Regel aus Duromeren oder Thermoplasten. Duromere sind aushärtbare Kunststoffe, die erst durch eine Vernetzungsreaktion von Harz und Härter entstehen. Weit verbreitete Duromere sind beispielsweise Epoxid (EP) und Polyester (PE). In der Regel weisen sie höhere mechanische Eigenschaften, insbesondere eine höhere Steifigkeit, als Thermoplaste auf. (Schürmann 2008, S. 84–86)

Thermoplastische Matrices, wie beispielsweise Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), verschiedene Polyamide (PA, PA6, PA66, etc.) oder Polypropylen (PP), bieten im Gegensatz zu den duromeren Matrices den Vorteil der nachträglichen Plastifizierung bzw. Umformbarkeit. Allerdings ist eine vollständige Infiltrierung von Fasern mit zähflüssigen Thermoplasten deutlich schwieriger zu erreichen als mit dünnflüssigen Reaktionsharzen. (Schürmann 2008, S. 129–130)

### 2.1.2 Verstärkungsfasern

Die Verstärkungsfasern sind hauptsächlich für die guten mechanischen Eigenschaften verantwortlich. Die technisch relevanten Fasern sind Glasfasern, Kohlenstofffasern, und Aramidfasern. (Henning und Moeller 2011, S. 344)

Glasfasern sind vergleichsweise günstig herstellbar und bieten dabei gute mechanische Eigenschaften bei einem moderaten Gewicht. Eingesetzt werden glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) unter anderem im Flugzeugbau, Fahrzeugbau, Schiffsbau, für die Rotorblattfertigung von Windkraftwerken und aufgrund der guten elektrischen Isolationseigenschaften für die Fertigung von Platinen. Kohlenstofffasern bieten bei einem sehr geringen Gewicht die besten mechanischen Eigenschaften (Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit, je nach Faserart), sind aber durch den benötigten sehr großen Energieaufwand teuer in der Herstellung. Eingesetzt werden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in der Luft- und Raumfahrt, in der Automobilindustrie und im Rennsport. Aramidfasern bieten gute mechanische Eigenschaften auf einem Niveau zwischen Glas- und Kohlenstofffasern, dabei jedoch eine mehr als doppelt so große Bruchdehnung und Schlagzähigkeit bei nochmals reduzierter Dichte. Verwendet werden Aramidfasern beispielsweise für schusssichere Westen oder Sicherheitsseile. (Henning und Moeller 2011, S. 344–351)

### 2.1.3 Wirkungsweise

Einen erfolgreichen Verbundwerkstoff zeichnet aus, dass die verwendeten Materialien im Verbund bessere Eigenschaften aufweisen als jedes Material für sich. (Schürmann 2008, S. 13)

Im Verbundwerkstoff übernehmen die Verstärkungsfasern einen Großteil der mechanischen Spannungen. Die Kunststoffmatrix hat die Aufgabe, die Verstärkungsfasern in Position zu halten, diese vor äußeren Einflüssen zu schützen und Lasten in die Fasern einzuleiten und zwischen den Fasern zu übertragen. (Henning und Moeller 2011, S. 341)

Die mechanische Belastbarkeit von FVK ist einerseits vom Faservolumengehalt (FVG) und andererseits von der Länge der Fasern im Verbundwerkstoff abhängig, was in Abbildung 2-1 ersichtlich wird.

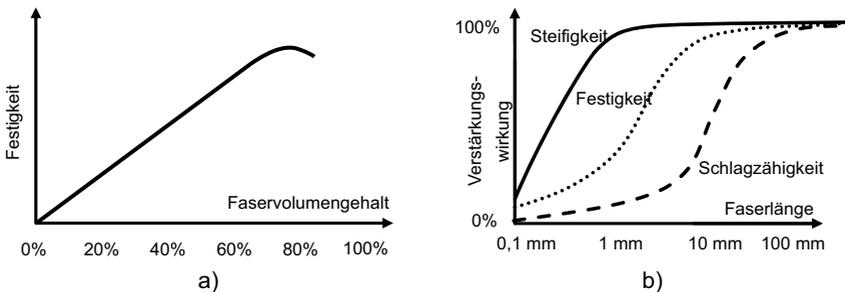


Abbildung 2-1: Abhängigkeit der Verstärkungswirkung a) vom Faservolumengehalt, eigene Darstellung nach (Henning und Moeller 2011, S. 380) und b) von der Faserlänge, eigene Darstellung nach (Bürkle et al. 2003, S. 48)

Für die Herstellung von FVK mit besten mechanischen Eigenschaften sind folglich ein möglichst hoher FVG (realistisch ca. 60 % (Henning und Moeller 2011, S. 389)) und möglichst langen Verstärkungsfasern zu realisieren, immer unter der Voraussetzung, dass die Verstärkungsfasern entlang der Lastpfade orientiert sind.

## 2.1.4 Berechnung mechanischer Eigenschaften von FVK

Für diese Arbeit wird lediglich eine grobe Abschätzung der mechanischen Eigenschaften für unidirektional verstärkte FVK benötigt, um die Qualität der Probekörper und damit des gesamten Prozesses zu bestimmen. Mit Hilfe der Berechnungsmodelle für Verbundwerkstoffe von Voigt und Reuss lassen sich die mechanischen Eigenschaften auf Basis idealer Verbundwerkstoff-Eigenschaften abschätzen. Hierbei werden jedoch keine negativen Effekte beispielsweise durch schlechte Infiltration oder mangelhafte Faser-Matrix-Haftung berücksichtigt, sodass kein realistisch erreichter Wert berechnet wird, sondern das theoretisch mögliche Maximum. Für eine erste Abschätzung und als Vergleichsbasis für die hergestellten Probekörper eignen sich die Modelle trotzdem.

### 2.1.4.1 Zugsteifigkeit

Die Berechnung der Zugsteifigkeit (E-Modul oder E) von FVK wird durch die Modelle von Voigt (Voigt 1889) und Reuss (Reuss 1929) beschrieben, welche auch als Mischungsregeln bekannt sind. Im Modell von Voigt wird der E-Modul eines Verbunds entlang der Faserorientierung berechnet und basiert auf der Annahme gleicher Deh-

nungen im Faser- und im Matrixbereich. Beide Komponenten tragen somit in Abhängigkeit ihres volumetrischen Anteils ihren Teil zum E-Modul des Verbunds bei. Dies wird in folgender Formel 2-1 dargestellt.

$$E_{FVK} = \varphi_F * E_F + (1 - \varphi_F) * E_M \quad \text{Formel 2-1}$$

mit

$E_{FVK} \triangleq E$  – Modul des Verbundwerkstoffs

$\varphi_F \triangleq$  Faservolumengehalt (FVG)

$E_F \triangleq E$  – Modul der Fasern

$E_M \triangleq E$  – Modul der Matrix

Das Modell nach Reuss gibt die Berechnung des E-Moduls quer zur Faserrichtung wieder und ist innerhalb dieser Arbeit nicht von Relevanz.

#### 2.1.4.2 Zugfestigkeit

Für die Berechnung der Zugfestigkeit eines unidirektional verstärkten (UD) Verbundwerkstoffs entlang der Faserorientierung wird analog zum Voigt-Modell eine gleiche Dehnung innerhalb der Faser- und Matrix-Komponente angenommen. Zudem gilt diese Berechnung nur unter der Voraussetzung, dass ausschließlich Zugversagen auftritt. Unter der weiteren Annahme, dass der E-Modul der Fasern um ein Vielfaches größer ist als der E-Modul der Matrix, wird die Formel vereinfacht und stellt sich dann wie in Formel 2-2 beschrieben dar. (Schürmann 2008, S. 348–349)

$$R_{FVK} = \varphi_F * R_F \quad \text{Formel 2-2}$$

mit

$R_{FVK} \triangleq$  Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs

$R_F \triangleq$  Zugfestigkeit der Fasern

Zu beachten ist an dieser Stelle jedoch, dass die berechneten Werte in Versuchen nicht erreicht werden können, da in der Regel eine Vorschädigung der Fasern, eine ungleiche Lastverteilung und/oder eine Streuung der Zugfestigkeit der Fasern auftreten. Dies führt dazu, dass nicht alle Fasern auf einmal, sondern nach und nach reißen. Somit kündigt sich ein anstehender Bruch durch das Reißen erster einzelner Fasern an, was in vielen Anwendungsfällen auch so erwünscht ist. Um die tatsächliche Zugfestigkeit eines Materials zu berechnen, müssen experimentell Abminderungsfaktoren ermittelt

werden, welche die zuvor genannten Fehler im FVK berücksichtigen. (Schürmann 2008, S. 348–349)

### **2.1.5 Fertigungsverfahren für FVK**

In diesem Kapitel werden kurz die wichtigsten Prozesseigenschaften und -randbedingungen der FVK-Fertigung umrissen, damit diese im weiteren Verlauf als Vergleichsbasis zur Verfügung stehen. Zudem findet auch nur eine Betrachtung der später relevanten Informationen statt.

Weit verbreitete Verfahren für die Herstellung von FVK sind beispielsweise das Pressen von Sheet Moulding Compound und Bulk Moulding Compound, die Organoblech-Umformung, verschiedene Ausführungen des Resin Transfer Moulding Verfahrens und Spritzguss von kurzfaserverstärkten Kunststoffen. Alle Prozesse setzen die Verwendung von Werkzeugen und Formen voraus, in denen die FVK-Halbzeuge abgeformt oder umgeformt werden. (Henning und Moeller 2011, S. 607–665)

Für die benötigten Werkzeuge entstehen zudem Kosten durch deren Konstruktion und Fertigung. Auch muss einkalkuliert werden, dass hierdurch mehrere Wochen Zeit verstreichen, bis schließlich die FVK-Produkte gefertigt werden können.

Bei der industriellen Fertigung der FVK fallen zudem Faserabfälle von bis zu 30 % der ursprünglich eingesetzten Fasermenge an (Henning und Moeller 2011, S. 636). Der Verschnitt und die hochpreisigen Faserwerkstoffe sind dafür verantwortlich, dass ca. 60% der Bauteilkosten auf das Material entfallen (Lerch et al. 2014, S. 18).

## **2.2 Additive Fertigung**

Die additive Fertigung ist ein Überbegriff für Technologien, welche Bauteile durch das Hinzufügen von Material erzeugen. Diese Verfahren stellen somit den Gegensatz zu subtraktiven Verfahren wie bspw. Fräsen oder Bohren dar, bei denen Material entfernt wird. (VDI-Richtlinie 3405, S. 6)

Seit 2009 hat sich die additive Fertigung sehr schnell entwickelt (s. Abbildung 2-2) und ist immer bekannter geworden. Vor allem aufgrund des Ablaufens von Schutzrechten konnten seither die additiven Fertigungsverfahren auch in günstigen Anlagen umgesetzt und somit sehr schnell verbreitet werden, z. B. im Heimwerkerbereich. (Bourell et al. 2017, S. 659)

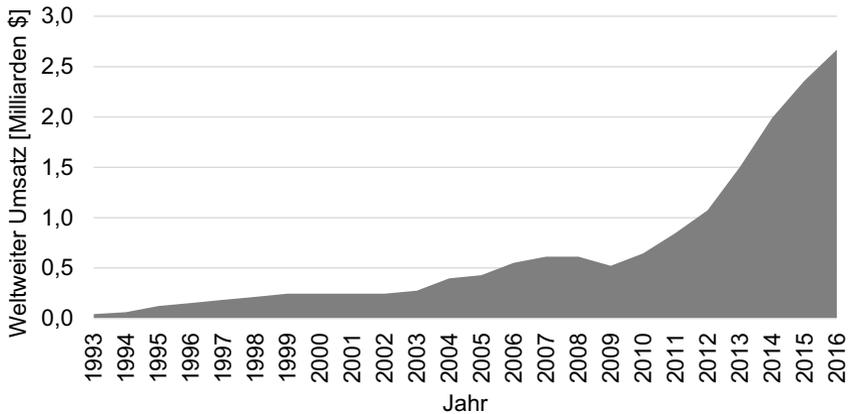


Abbildung 2-2: Entwicklung des weltweiten Umsatzes mit additiven Fertigungsverfahren in [\$], basierend auf (Wohlers Associates 2017)

Die Forschungsarbeiten in der vorliegenden Dissertation werden mit dem ARBURG freeformer durchgeführt, einem industriellen additiven Fertigungssystem, welches die additive Fertigung unter Verwendung von thermoplastischen Kunststoffgranulaten beherrscht (ARBURG GmbH + Co. KG 2013, S. 7). Somit werden nach der allgemeinen Beschreibung der additiven Fertigung in Kapitel 2.2.1 im darauf folgenden Kapitel 2.2.2 für einen geeigneten Vergleich ausschließlich die Verfahren für die additive Fertigung von thermoplastischen Kunststoffen beschrieben. Andere additive Fertigungsverfahren, die beispielsweise duromere Kunststoffe, Metall oder Keramik verarbeiten, werden im Rahmen dieser Dissertation nicht betrachtet. Im Anschluss wird in Kapitel 2.2.3 genauer auf den allgemeinen Aufbau des Maschinencodes für den freeformer eingegangen, da dieser im späteren Verlauf der Arbeit von besonderem Interesse ist.

### 2.2.1 Allgemeines Funktionsprinzip der additiven Fertigung

Das allgemeine Funktionsprinzip der additiven Fertigung wird an dieser Stelle hauptsächlich aus der Richtlinie 3405 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) wiedergegeben. Wie bereits zuvor beschrieben, werden bei der additiven Fertigung Bauteile durch das schicht- oder elementweise Hinzufügen von Material erzeugt (Gebhardt 2013, S. 21), (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 4). Durch die Art des Hinzufügens von neuem Material unterscheiden sich die verschiedenen Fertigungsprozesse.

### 2.2.1.1 Standardisierter Prozessablauf

Der Prozessablauf bei den additiven Fertigungsverfahren kann ausgehend von den Daten aus dem Computer Aided Design (CAD) allgemein in den *Pre-Prozess*, den *In-Prozess* und den *Post-Prozess* unterteilt werden. Im *Pre-Prozess* erfolgt neben kleinen begleitenden Tätigkeiten, wie bspw. dem Reinigen des Bauraums oder dem Nachfüllen von neuem Material, hauptsächlich die Datenaufbereitung. Bei dieser werden alle zu fertigenden Bauteile als Konstruktionsmodell (meist als flächenbasiertes Standard Tessellation Language (STL) Modell) virtuell im zur Verfügung stehenden Bauraum positioniert. Falls Stützstrukturen notwendig sind, werden diese eingefügt und anschließend erfolgt das sogenannte Slicing. (VDI-Richtlinie 3405, S. 6–7)

Das Slicing bezeichnet die Unterteilung der Bauteile in einzelne ebene Fertigungsschichten, die in der Regel parallel zueinander mit gleichem Abstand in Z-Richtung angeordnet sind. In jeder Schicht werden die Befehle für das Erzeugen der Bauteilstruktur über maschinenlesbare Bewegungsbefehle in X/Y/Z-Koordinaten (Pfadherzeugung) dargestellt und in einem maschinenlesbaren Code, dem sogenannten GCode, gespeichert. Dieser Vorgang wird in Bezug auf den GCode des freeformers in Kapitel 2.2.3 näher beschrieben. (VDI-Richtlinie 3405, S. 6–7)

Das Slicing und die Pfaderzeugung werden in Abbildung 2-3 dargestellt.

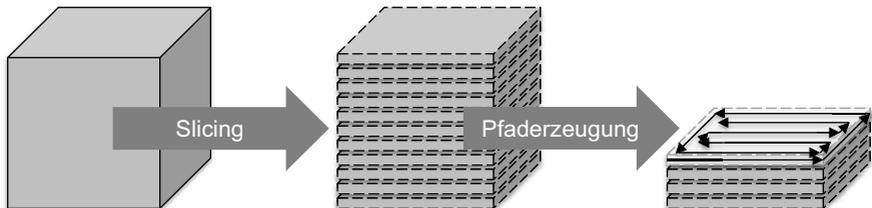


Abbildung 2-3: Slicing und Pfaderzeugung

Im Anschluss wird der GCode auf die Fertigungsmaschine geladen und es folgt der *In-Prozess*. Dabei führt die Fertigungsmaschine die im GCode beschriebenen Befehle aus und die einzelnen Bauteile werden schichtweise generiert. Der *Post-Prozess* beginnt nach dem Herausnehmen der Bauteile aus dem Bauraum. Hierunter wird insbesondere die Reinigung und das Entfernen von Stützstruktur verstanden. (VDI-Richtlinie 3405, S. 6–7)

Unter den Begriff des *Post-Prozesses* fallen jedoch auch weitere Bearbeitungsschritte wie die Bauteilaushärtung (bspw. bei additiven Verfahren mit Duromeren), ein nachträgliches Infiltrieren poröser Strukturen (bspw. aus dem 3D-Printing Prozess) oder eine allgemeine Nachbearbeitung zur Erlangung der gewünschten Bauteileigenschaften (bspw. Fräsen, Schleifen, Lackieren). (VDI-Richtlinie 3405, S. 6–7)

### **2.2.1.2 Vor- und Nachteile der additiven Fertigung**

Der große Vorteil von additiven Verfahren liegt, wie schon beschrieben, in der Flexibilität des Fertigungsprozesses und der großen Gestaltungsfreiheit der zu fertigenden Komponenten. Die große Gestaltungsfreiheit erlaubt die Fertigung von Bauteilen, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren technisch oder wirtschaftlich nicht gefertigt werden könnten (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 4), (Breuninger et al. 2013, S. 113). Der großen Flexibilität des additiven Fertigungsprozesses liegt der Verzicht auf Werkzeuge zur Formgebung zugrunde (Lanza et al. 2017, S. 6), (VDI-Richtlinie 3405, S. 6), (Gebhardt 2013, S. 17). Somit können Bauteile wie im zuvor beschriebenen Ablauf direkt aus den CAD-Daten heraus gefertigt werden. Hieraus resultiert allgemein der Vorteil, dass im Produktentstehungsprozess weder Zeit noch Geld für die Konstruktion und Fertigung von Werkzeugen aufgewendet werden muss (Royal Academy of Engineering, S. 9), (Marchese et al. 2015, S. 9). Vor allem für Einzelstücke und Kleinserien (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 6) oder auch für die Individualisierung von Produkten (Gebhardt 2013, S. 429–433) kann so ein großer wirtschaftlicher Vorteil generiert werden.

Einen großen Nachteil, vor allem bei der additiven Fertigung von Kunststoffen, stellen die im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren oftmals deutlich schlechteren mechanischen Eigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit dar. (Bettini et al. 2017, S. 843), (Verein Deutscher Ingenieure 2014, S. 12), (Oxman 2011, S. 13)

So wird davon ausgegangen, dass diese mechanischen Eigenschaften maximal 80 % der Eigenschaften aus herkömmlichen Verfahren erreichen. (ARBURG GmbH + Co. KG 2014b, S. 13), (Völkner 2015)

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, stellen FVK eine Möglichkeit für die Fertigung hochbelastbarer Bauteile dar. Es gibt auch erste Ansätze, FVK in der additiven Fertigung zu verwenden, um die schlechten mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Diese sind jedoch nur teilweise erfolgreich bzw. anwendbar. Die verschiedenen Ansätze für die Verwendung von FVK in der additiven Fertigung werden in Kapitel 2.3

näher erläutert, wobei auch die jeweilige Verstärkungswirkung, welche mit den einzelnen Verfahren und den jeweiligen Materialien realisiert werden kann, beschrieben wird.

## 2.2.2 Auswahl additiver Fertigungsprozesse für Thermoplaste

Einer Umfrage der Firma Sculpteo zufolge sind derzeit weltweit das Fused Layer Manufacturing (FLM, 46 %) und das Laser Sintern (LS, 38 %) die am weitesten verbreiteten additiven Fertigungsverfahren (Sculpteo 2018). Dies sind auch die beiden einzigen Verfahren, für welche die additive Fertigung von FVK zumindest in der Forschung bisher umgesetzt wurde (s. Kapitel 2.3). Somit werden auch nur die Funktionsweise für diese und für das AKF-Verfahren, auf dem die Forschungsarbeiten innerhalb dieser Dissertation basieren, näher erläutert.

### 2.2.2.1 Laser Sintern

Das auch unter dem markenrechtlich geschützten Begriff „Selektives Laser Sintern“ (SLS) bekannte Verfahren wird nach der Richtlinie 3405 des Deutschen Instituts für Normung (DIN) korrekt Laser-Sintern (LS) genannt. Nach der Verfahrensdefinition wird hierbei Pulver mit Hilfe eines Lasers schichtweise gesintert. In Abbildung 2-4 wird das Verfahren dargestellt. (VDI-Richtlinie 3405, S. 9)

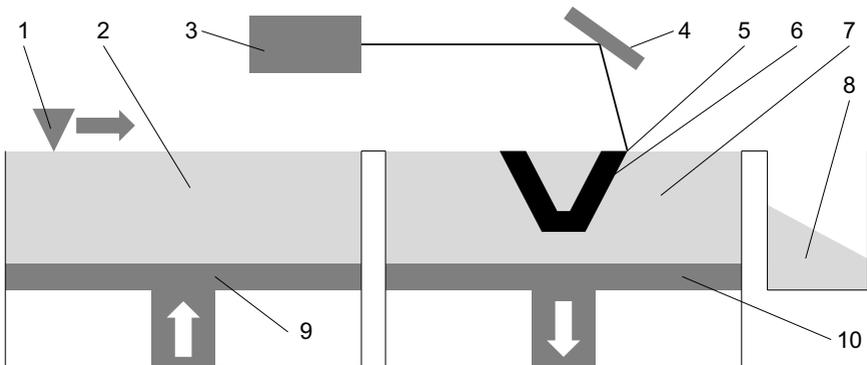


Abbildung 2-4: LS-Prozess, eigene Darstellung nach (VDI-Richtlinie 3405, S. 9)

Aus dem Pulvervorratsbehälter (2) wird mit Hilfe eines Rakels (1) das Pulver vom ersten Hubtisch (9) auf den zweiten Hubtisch (10) bzw. auf die oberste Lage des Pulverbetts

(7) und der im Bau befindlichen Komponente (6) geschoben und darauf verteilt. Überschüssiges Material wird in den Überlaufbehälter (8) geschoben. Ein Laser (3) wird über eine Scan-Optik (4) auf die verschiedenen Bereiche der neu aufgetragenen Pulverschicht abgelenkt und bringt somit Wärmeenergie für das Sintern oder Verschmelzen in der Verfestigungszone (5) ein. Überhänge können einfach realisiert werden, da diese durch das Pulverbett abgestützt werden. Wenn alle Bereiche einer Schicht bestrahlt wurden, fährt der zweite Hubtisch (10) um eine Schichtdicke herab, der erste Hubtisch (9) mit dem Pulvervorrat (2) um eine entsprechende Strecke hoch.

Der gesamte Vorgang wird so oft wiederholt, bis das Bauteil bzw. der Baujob mit allen Bauteilen fertiggestellt ist.

### 2.2.2.2 Fused Layer Manufacturing

Das in der VDI Richtlinie 3405 als „Fused Layer Manufacturing“ (FLM) bezeichnete Verfahren ist auch unter der Bezeichnung „Fused Layer Modelling“ oder unter der geschützten Markenbezeichnung „Fused Deposition Modelling“ (FDM) bekannt. Hierbei wird Schicht für Schicht thermoplastisches Material in einer Düse aufgeschmolzen und ausgetragen. Das Verfahren wird in Abbildung 2-5 dargestellt. (VDI-Richtlinie 3405, S. 12)

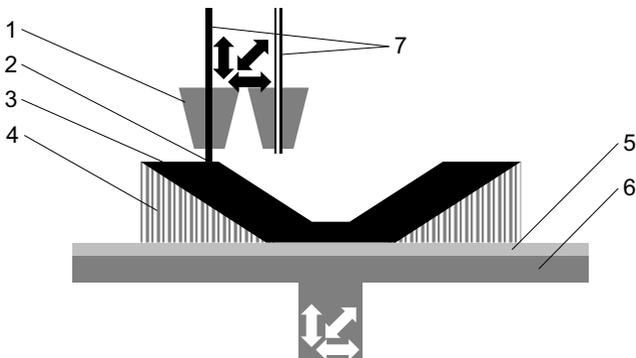


Abbildung 2-5: FLM-Prozess, eigene Darstellung nach (VDI-Richtlinie 3405, S. 12)

Die Austrageeinheit mit den beheizten Düsen (1) sowie der Bauteilträger (6) sind in alle translatorischen Richtungen relativ zueinander beweglich. Je nach Ausführung der Anlage kann die Bewegung in X-, Y- und Z-Koordinate nur über die Austrageeinheit, nur

über die Bauplattform oder beliebig über beide verteilt realisiert werden. Das drahtförmige Material (7) wird in der Düse aufgeschmolzen und linienweise in der Ebene auf der Bauplatte (5) oder den bereits generierten Bereichen des Bauteils (3) ausgetragen (2). Wenn der Kunststoff in allen notwendigen Bereichen in der Ebene ausgetragen wurde, verfährt der Bauteilträger mit Bauplatte und Bauteil um eine Schichtdicke nach unten (bzw. die Austrageinheit nach oben) und der Prozess beginnt von neuem. Große Überhänge können nur mit Hilfe einer separaten Stützstruktur (4) generiert werden.

### **2.2.2.3 ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Da die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Arbeiten mit Hilfe eines ARBURG freeformers durchgeführt werden, wird das zugehörige Verfahren „ARBURG Kunststoff-Freiformen“ detaillierter beschrieben als das LS oder FLM.

Das AKF-Verfahren zählt wie das FLM-Verfahren zu den austragenden additiven Fertigungsverfahren, basiert jedoch auf dem Spritzgussprozess. Folglich werden für das AKF handelsübliche thermoplastische Kunststoffgranulate verwendet, welche normalerweise im Spritzgussverfahren verarbeitet werden. Im Gegensatz zum FLM wird beim AKF der Kunststoff für die additive Fertigung des Bauteils nicht strangweise, sondern wegen des getakteten Düsenverschlusses durch ein Nadelventil tropfenweise ausgetragen. (ARBURG GmbH + Co. KG 2013, S. 7)

Ein Querschnitt durch die Anlage zur Darstellung der einzelnen Funktionen ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

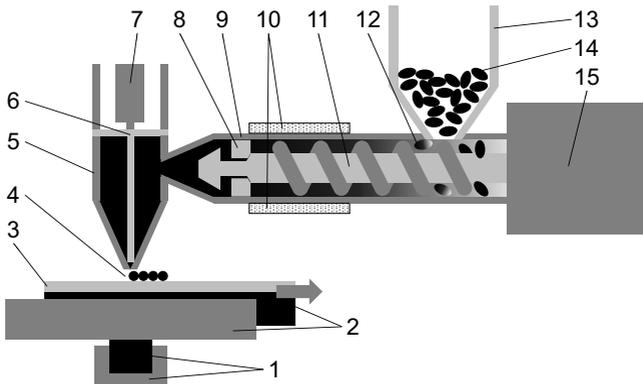


Abbildung 2-6: Schnittbild der Materialaufbereitung und des Materialaustrags des AR-BURG freeformers, eigene Darstellung nach (ARBURG GmbH + Co. KG 2017, S. 5)

Das Kunststoffgranulat (14) rutscht aus dem Vorratsbehälter (13) in den Zylinder der Spritzguss-einheit (9) und wird beim Aufdosieren der Schnecke (11) und unter zusätzlichem Aufheizen durch eine Heizmanschette (10) plastifiziert. Die Bewegung für Rotation und Translation der Schnecke erfolgt durch den Motor (15). Beim Aufdosieren wird die Thermoplastschmelze an der Rückstromsperre (8) vorbei gefördert, die Schnecke bewegt sich dabei nach hinten (in Abbildung 2-6 nach rechts). Sobald der erforderliche Dosierweg erreicht ist, fährt die Schnecke wieder nach vorne (bzw. nach links). Hierbei schließt die Rückstromsperre, sodass die Thermoplastschmelze nicht zurückfließen kann, sondern in der Austragsdüse unter Druck gesetzt wird. Die Bauplattform (3) wird über die Linearmotoren für die X-Achse (1) und Y-Achse (2) und einen Spindeltrieb für die Z-Achse (nicht dargestellt) so unter der beheizten Austragsdüse (5) positioniert, dass die Kunststofftropfen auf ihr platziert werden können (4). Der Piezoaktor (7) hebt und senkt die Nadelmembran (6), sodass aus der Düsenöffnung Material ausgetragen werden kann. Sobald alle Tropfen in einer Schicht abgesetzt sind, fährt die Z-Achse die Bauplattform um eine Schichtdicke hinab und der Prozessablauf beginnt erneut für die nächste Schicht.

Zu beachten ist, dass sich aufgrund des sehr geringen Spalts zwischen Nadel und Düsenöffnung in der Regel keine Füllstoffe im Kunststoff befinden dürfen. Die Herstellung von kurzfaserverstärkten Kunststoffbauteilen bei Verwendung von kurzfaserverstärkten Granulaten ist durch das AKF-Verfahren somit nicht möglich.

Da selbst Kunststoff aus derselben Charge keine konstant gleichen Eigenschaften besitzt und es zu Viskositätsschwankungen im Material kommen kann, welche oftmals durch eine hohe Verweilzeit des Materials im Zylinder noch verstärkt werden, wird eine Regelung des Kunststoffsaustrags benötigt. (Kraibühler et al. 2012, S. 2–3)

Die Regelung des AKF-Verfahrens basiert auf der Tropfenkennzahl, auch Austragszahl genannt, welche eine lineare Proportionalität mit dem Volumen jedes einzelnen Tropfens aufweist und die Regelgröße darstellt. Hierbei wird über eine große Anzahl an Tropfen der mittlere Vorschub der Schnecke im Spritzgusszylinder mit dem Durchmesser des Zylinders verrechnet und so ein Durchschnittswert für das Volumen der einzelnen Tropfen ermittelt. Die Steuergröße stellt der Druck im Spritzgusszylinder dar, der das geschmolzene Material je nach Viskosität, welche vom Material und der Temperatur abhängig ist, unterschiedlich schnell aus der Düsenöffnung drückt. Dieser Sachverhalt und insbesondere die Regelung sind in der zugehörigen Patentschrift von Kraibühler und Duffner noch genauer beschrieben. (Kraibühler et al. 2012)

Durch die beschriebenen veränderlichen Eigenschaften der Kunststoffschmelze kann es bei der Ermittlung der Verarbeitungsparameter eventuell zu einer Langzeitdrift der Bauteileigenschaften kommen. Bei der Ermittlung der Material- und Verarbeitungsparameter ist dies zu berücksichtigen und gegebenenfalls sind Versuchspläne zu wählen, welche diese Effekte berücksichtigen.

Die Tropfenkennzahl ist ein ausschließlich manuell am freeformer einstellbarer Wert und kann nicht aus dem GCode heraus verändert werden.

### **2.2.3 Aufbau des Maschinencodes für AKF**

Alle Befehle, die der freeformer für die additive Fertigung eines Bauteils benötigt, werden im Maschinencode, dem GCode, beschrieben. Dieser basiert auf der allgemeinen CNC-Programmierung (Computer Numerical Control)(DIN 66025-1). Der GCode wird von einem Fertigungssystem der Reihe nach abgearbeitet und die einzelnen Befehle werden an der jeweiligen Position durchgeführt.

Generell ist beim CNC-Code für den freeformer zwischen einfachen Fahrbefehlen, Fahrbefehlen, welche der Bauteilgenerierung dienen, und den Schaltbefehlen, die der Steuerung des freeformers weitere Informationen liefern, zu unterscheiden.

Die Besonderheit beim CNC-Code des freeformers ist, dass nur die Fertigung auf einer Geraden (Befehl G01) unterstützt wird. Zudem wird mit dem T-Befehl nicht nur zwischen verschiedenen Werkzeugen, sondern auch zwischen einem Schichtwechsel, einem diskreten Tropfenaustrag oder einem kontinuierlichen Tropfenaustrag gewählt und der S-Befehl gibt anstatt einer Spindeldrehzahl den Abstand der Tropfen beim kontinuierlichen Austrag an.

Im folgenden Abschnitt wird ein Satz eines freeformer GCodes detailliert beschrieben (ARBURG GmbH + Co. KG 2015):

G01 F[x] X[a] Y[b] Z[c] T[d] (S[e]) M1001

- G01: Fahrbefehl
- x: Geschwindigkeit, mit welcher der neue Punkt angefahren werden soll in [10000 m/min]
- a: X-Position des anzufahrenden Punkts in [mm]
- b: Y-Position des anzufahrenden Punkts in [mm]
- c: Z-Position des anzufahrenden Punkts in [mm]
- d: Art der Bauplattformbewegung beim Tropfenaustrag (1=diskret, die Bauplattform steht beim Austrag still; 2=kontinuierlich, der Tropfen wird auf die bewegte Bauplattform abgesetzt)
- e: nur bei d=2, Schrittweite beim kontinuierlichen Tropfenaustrag
- M1001: Signalform, Auswahl der Steuerkurve des Piezoaktors

Befehle mit einem T oder M am Anfang dienen nicht direkt der Bauteilfertigung sondern zusätzlichen Funktionen (ARBURG GmbH + Co. KG 2015):

- T4S{M[f]}: Wechsel auf Masseaufbereitung f (in der Regel stehen zwei Austrags-einheiten zur Verfügung, somit f=1 oder f=2)
- T7: Ein Schichtwechsel wird eingeleitet
- M30: Auftragsende

In GCode 2-1 ist ein Beispiel für einen solchen Maschinencode in Auszügen dargestellt.

*GCode 2-1: Beispiel für einen GCode*

```

// Materialien
// M1 ID: {02c2ef76-3b7f-4fc8-adcb-f55037f7e714}
// M1 Versions ID: {00000000-0000-0000-0000-000000000000}
// -----
T4S{M1}
// -->bLowerBegin=true, constituent
//BeginOuterContour
G01 F9000 Z0.2500
G01 F24000 X18.6479 Y9.9650 Z0.2500 T1 M1001
G01 F24000 X18.3979 Y9.9650 Z0.2500 T1 M1001
G01 F24000 X18.1479 Y9.9650 Z0.2500 T1 M1001
.
.
.
G01 F24000 X19.1241 Y9.8197 Z0.2500 T1 M1001
G01 F24000 X18.8850 Y9.8926 Z0.2500 T1 M1001
G01 F24000 X18.6479 Y9.9650 Z0.2500 T1 M1001
//EndOuterContour
G01 F9000 Z1.2500
G01 F48000 X0.1875 Y9.5489 Z1.2500
G01 F9000 Z0.2500
G01 F24000 X0.1875 Y9.5489 Z0.2500
G01 F24000 X0.5411 Y9.9025 Z0.2500 T2 S250 M1001
G01 F24000 X0.8062 Y9.8141 Z0.2500 C45.0000
G01 F24000 X0.2759 Y9.2838 Z0.2500 C45.0000 T2 S250 M1001
G01 F24000 X0.1875 Y8.8418 Z0.2500 C45.0000
G01 F24000 X1.2482 Y9.9025 Z0.2500 C45.0000 T2 S250 M1001
.
.
.
M30

```

Im aufgezeigten Beispiel wird zunächst das Material für den Bauauftrag definiert und die entsprechende Masseaufbereitung am freeformer ausgewählt, bevor durch den Befehl „//BeginnOuterContour“ das Abfahren der Kontur eingeleitet und im ersten Fahrbefehl die Z-Achse auf Position gefahren wird. Ein Verfahren der Z-Achse erfolgt hier separat und nicht in Kombination mit der X- und Y-Achse, da die Z-Achse als Spindeltrieb keine so schnellen Bewegungen zulässt wie die Linearmotoren der X- und Y-Achse. Mit dem zuvor angegebenen Berechnungsfaktor entspricht die Geschwindigkeit F9000 genau 15 mm/s. Im Anschluss daran wird die erste Position mit der Geschwindigkeit F24000 (40 mm/s) mit dem T1 Befehl für den diskreten Tropfenaustrag angefahren, das heißt, dass bei Erreichen der Position die Bauplattform angehalten und ein Tropfen ausgetragen wird. Die gesamte Kontur wird mit Hilfe des T1 Befehls erzeugt. Im Gegensatz zum T2 Befehl, bei dem ein Tropfen während der Plattformbewegung abgesetzt wird und somit verschmieren kann, wird beim T1 Befehl eine hohe Positioniergenauigkeit erreicht, sodass eine sehr genaue Außengeometrie des Bauteils entsteht. Nach Vollendung der Kontur, was mit „//EndOuterContour“ angezeigt wird, beginnt die

Fertigung der Bauteilfüllung. Hier wird nicht mehr jede Position, an der ein Tropfen ausgetragen wird, separat angefahren, sondern die Tropfen werden während der Bewegung mit dem im S Befehl angezeigten Abstand abgesetzt, was zudem durch den Befehl T2 signalisiert wird. Bei S250 wird alle 250 µm ein Tropfen auf die bewegte Plattform ausgetragen. Zwischen den einzelnen Bahnen mit T2 Befehl gibt es noch Bewegungsbefehle ohne Austrag, um die Bahn zu wechseln, bzw. die Bauplattform korrekt zu positionieren. Sobald eine Schicht beendet ist, wird mit dem Befehl T7 ein Schichtwechsel eingeleitet. Das Auftragsende wird letztendlich mit M30 gekennzeichnet.

Es gilt zu beachten, dass die Austragsdüse des freeformers zwar einzelne Tropfen annähernd in Ellipsoid-Form austrägt, diese jedoch beim Absetzen noch zähflüssig sind. Somit können sie zwischen die bereits abgesetzten Tropfen fließen und mit ihnen verschmelzen. Auf diese Weise wird anstatt der dichtesten Kugelpackung von ca. 74 % bereits in frühen Untersuchungen ein Füllgrad von 86 % erreicht. (ARBURG GmbH + Co. KG 2014a, S. 15)

Weitere seither erfolgte Parameteroptimierungen führen zu einer nahezu vollständigen Füllung von annähernd 100 %. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Form, in der ein ausgetragenes Kunststoffelement am Ende im Bauteil vorliegt, nicht mehr ellipsoidförmig ist. Da zudem bei der Erzeugung des GCodes keine Kugelpackung berücksichtigt wird bzw. keine Berücksichtigung der genauen Position auf Basis der in vorigen Linien oder Schichten ausgetragenen Tropfen erfolgt und die einzelnen ausgetragenen Tropfen zudem ineinander fließen und verschmelzen, kann für spätere Berechnungen bei maximalem Füllgrad (100 %) von quaderförmigen Kunststoffelementen ausgegangen werden.

### **2.3 Additive Fertigung von FVK**

Wie bereits in Kapitel 2.2.1.2 beschrieben, weisen additiv gefertigte Bauteile aus thermoplastischen Kunststoffen oftmals schlechtere mechanische Eigenschaften als herkömmlich gefertigte Bauteile auf.

Um diesem Nachteil entgegenzuwirken, können Verstärkungsfasern verwendet werden, was zu einer deutlichen Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führt. Einen Überblick bezüglich der additiven Fertigung von FVK bieten die Review-Artikel von (Kumar und Kruth 2010), (Frketic et al. 2017), (Hofstätter et al. 2017), (Parandoush und Lin 2017) und (Wang et al. 2017). In allen Artikeln kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die additive Fertigung von FVK großes Potential aufweist.

(Parandoush und Lin 2017) berichten zudem, dass manche additiv gefertigten FVK bessere spezifische Eigenschaften als Aluminium aufweisen.

Obwohl in den genannten Quellen eine sehr große Anzahl verschiedener Prozesse beschrieben wird, sind für diese Arbeit ausschließlich die Verfahren mit thermoplastischen Kunststoffen interessant, sodass in der Folge auch nur diese betrachtet werden. Basierend auf den genannten Quellen sind die additiven Fertigungsverfahren von FVK sinnvollerweise anhand der Länge der verwendeten Verstärkungsfasern zu unterteilen.

Weiterhin ist zu beachten, dass in den folgenden Unterkapiteln nur für die Zugeigenschaften mit insgesamt 73 beschriebenen Versuchen über alle Literaturquellen hinweg eine genügend große Datenbasis ermittelt werden konnte. Biegeeigenschaften werden in den Quellen lediglich viermal genannt und werden somit nicht weiter berücksichtigt.

Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Ergebnisse für Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit des jeweiligen Fasergehalts der Probe werden in Kapitel 2.4 zusammengefasst. Volumenanteile werden in der Folge mit vol% abgekürzt, Gewichtsanteile mit wt%.

### **2.3.1 Additive Fertigung von kFVK**

Bei der additiven Fertigung von kurzfaserverstärkten Kunststoffen werden die Kurzfasern in der Regel dem Ausgangsmaterial beigemischt, indem bspw. die Kurzfasern einem LS-Pulver zugemischt werden oder die Herstellung der Pulver bzw. Filamente direkt unter Verwendung eines kurzfaserverstärkten Granulats stattfindet.

In den beiden folgenden Kapiteln wird die Verwendung der kFVK in den Verfahren FLM und LS aufgezeigt.

#### **2.3.1.1 Fused Layer Manufacturing mit kFVK**

In vielen verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten wurde bereits die Veränderung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Erhöhung der Zugfestigkeit und Zugsteifigkeit, durch das Hinzufügen von Verstärkungsfasern in das FLM-Filament untersucht. Zudem gibt es auch diverse Anbieter von kurzfaserverstärkten FLM-Filamenten. In der Folge wird eine Auswahl an aktuellen Forschungsarbeiten und Materialdatenblättern wiedergegeben, welche konkret vergleichbare Materialdaten oder Versuchsergebnisse benennen.

Mit Protoplant existiert ein Materialhersteller, der kurzfaserverstärkte FLM-Filamente anbietet. Hier wird Polymilchsäure (PLA) mit 15 wt% Kohlenstofffasern verstärkt, was zu einer Verbesserung der Steifigkeit um 44 % führen soll. (Protoplant 2014)

In der Arbeit von (Tekinalp et al. 2014) wird für Probekörper aus ABS mit 10 wt% bis 40 wt% Kohlenstofffaser-Anteil eine Erhöhung der Zugfestigkeit um bis zu 115 % und der Zugsteifigkeit um bis zu 700 % erreicht. Hierbei wird nachgewiesen, dass die Fasern zu 91,5 % entlang der Druckrichtung orientiert sind, also keine isotrope Verstärkung erreicht wird. Weiterhin wird dargestellt, dass die Anbindung zwischen Kohlenstofffasern und Matrix noch Optimierungsbedarf aufweist und die Probekörper viele Poren enthalten. Zudem wird gezeigt, dass sich die Zugeigenschaften mit zunehmendem Fasergehalt verbessern und die Faserlänge bei der Herstellung des FLM-Filaments durch die mechanische Belastung während des Mischvorgangs deutlich abnimmt.

Mit Kohlenstofffasern verstärkte ABS-Proben mit einem Faseranteil von 3 wt%, 5 wt%, 7,5 wt%, 10 wt% und 15 wt% werden von (Ning et al. 2015) hergestellt und geprüft. Die besten Ergebnisse für Zugfestigkeit und Zugsteifigkeit werden entgegen der eigentlichen Erwartung nicht bei 15 wt%, sondern bei 5 wt% bis 7,5 wt% erreicht. Dies kann auf eine verringerte Qualität oder Fläche der Anbindung zwischen Faser und Matrix hinweisen. Im Vergleich zum reinen ABS kann hier eine Erhöhung der Zugfestigkeit um 25 % und eine Erhöhung der Zugsteifigkeit um 32 % bei verringerter Duktilität erreicht werden. Gleichzeitig wird festgestellt, dass bei der Verarbeitung von längeren Fasern höhere Werte erreicht werden können.

Mit einem Makerbot Replicator 2 stellen (Jiang und Smith 2016) mit Kohlenstofffasern gefüllte Probekörper aus PLA, ABS und PETG (Polyethylenterephthalat mit Glycol modifiziert) her und untersuchen den Einfluss der Orientierung der Füllstruktur auf die mechanischen Eigenschaften. Es werden Probekörper mit 0,2 mm Schichtdicke mit einer Orientierung der Füllstruktur in 0° (entlang der Zugrichtung des Probekörpers), 45°, alternierend +45° und -45° und 90° (quer zur Zugrichtung) gefertigt. Die verstärkten ABS Proben enthalten 16,8 wt% Fasern und liefern hiermit eine um 33,4 % erhöhte Zugfestigkeit und eine um 213 % erhöhte Zugsteifigkeit. Die verstärkten PLA Proben enthalten 12,6 wt% Fasern und erreichen eine um 4,5 % höhere Zugfestigkeit und um 59,8 % erhöhte Zugsteifigkeit. Die mit 17,7 wt% Kohlenstofffasern verstärkten PETG Probekörper erreichen eine um 48,8 % höhere Zugfestigkeit und eine um 313 % höhere Zugsteifigkeit. Allgemein werden bei einer Orientierung der Füllstruktur entlang der Prüfrich-

tung der Probe die besten Werte erreicht. Die Zugsteifigkeit der Probekörper aller Materialien wird auch bei 45°, ±45° und 90° Orientierung der Füllstruktur mäßig erhöht, wohingegen die Zugfestigkeit bei PETG leicht steigt, bei PLA in etwa gleichbleibt oder bei ABS sogar reduziert wird. Alle Probekörper weisen eine geringere Duktilität auf und es wird festgestellt, dass die Anbindung zwischen Matrix und Kohlenstofffasern nicht optimal ist.

In der zweiten Arbeit von (Ning et al. 2017) wird von der Herstellung und Prüfung von Probekörpern aus ABS mit 5 wt% Kohlenstofffasern berichtet. Da es sich um die weitergeführte Arbeit der zuvor beschriebenen Versuche handelt, findet in dieser Arbeit kein Vergleich zwischen unverstärkten und verstärkten Proben statt, diese Arbeit wird somit ebenfalls nicht in Kapitel 2.4 mit den anderen verglichen. Der Fokus liegt bei dieser Arbeit vielmehr auf der Auswirkung der Verarbeitungsparameter auf die Bauteileigenschaften. So liefert eine Füllstruktur mit alternierend 0° und 90° bessere Bauteileigenschaften als eine zwischen -45° und +45° alternierende Füllstruktur, eine zu langsame oder zu schnelle Fertigungsgeschwindigkeit führt zu schlechten Eigenschaften (Optimum bei 25 mm/s) und eine zu warme oder zu kalte Extruderdüse führt ebenfalls zu schlechten Eigenschaften (Optimum bei 220 °C).

(Liao et al. 2018) beschreiben für ein mit verschiedenen Anteilen (2 wt% bis 10 wt%) an Kohlenstofffasern verstärktes PA12 die Untersuchung der Zug- und Biegefestigkeit. Das am höchsten gefüllte Material schneidet hierbei mit einer Steigerung der Zugfestigkeit um 102% und Biegefestigkeit um 251% am besten ab.

In der Arbeit von (Brenken et al. 2018) wird zudem ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik der additiven Fertigung von kurz- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen gegeben, in dem auch zum Teil die Ergebnisse aus den zuvor genannten Arbeiten aufgegriffen werden. Insgesamt werden die Ergebnisse von 32 verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten zusammengetragen, ohne jedoch den Zusammenhang zwischen dem Fasergehalt und den mechanischen Eigenschaften der Probekörper darzustellen. Dieser Vergleich wird, ergänzt um die hier zusätzlich genannten Ergebnisse, in Kapitel 2.4 wiedergegeben.

### **Zusammenfassung FLM mit kFVK:**

Wie bereits zuvor beschrieben, befinden sich bei allen Arbeiten die Kurzfasern bereits vor der Verarbeitung im FLM-Verfahren im zu verarbeitenden FLM-Filament. So kommt es, dass viele Autoren davon berichten, dass entlang des ausgetragenen Materials

deutlich bessere mechanische Eigenschaften erreicht werden können als quer dazu, da sich die Fasern beim Austragen aus der Extruderdüse im Kunststoffstrom entlang der Strömungsrichtung orientieren. Die Zug-Eigenschaften können folglich in Austragsrichtung stark verbessert werden, quer dazu liegt jedoch nur eine leichte oder gar keine Verbesserung vor.

### **2.3.1.2 Lasersintern mit kFVK**

Die Implementierung von Kurzfaserverstärkungen wird auch für das additive Fertigungsverfahren LS in der Literatur betrachtet.

In (Zhu et al. 2015) wird beschrieben, dass mit einer HK S320 LS Anlage mit Kohlenstofffasern verstärkte PA12 Proben hergestellt werden. Die Kohlenstofffasern sind 10 µm bis 100 µm lang und werden mit 20 vol% dem PA12 in einer Lösung beigemischt und anschließend verpulvert. Das Bauteil wird im Anschluss absichtlich porös gefertigt und mit Harz infiltriert. Hauptsächlicher Inhalt der Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses der Fertigungsparameter auf die Biegeeigenschaften. Das Optimum wird ermittelt und liegt bei einer Schichtdicke von 0,15 mm, einer Laserleistung von 3,61 W und einer Scangeschwindigkeit von 2,481 m/s. Es werden weder Zugeigenschaften geprüft, noch ein Vergleich zu unverstärktem Material gegeben. Sowohl durch die Harz-Füllung als auch durch die alleinige Untersuchung der Biegeeigenschaften können Kapitel 2.4 die Ergebnisse dieser Arbeit nicht mit denen der anderen Arbeiten verglichen werden.

(Jansson und Pejryd 2016) berichten, wie mit einer EOS P396 bei einer Schichtdicke von 0,15 mm ein ebenfalls von EOS angebotenes mit Kohlenstofffasern gefülltes PA12 Material verarbeitet wird. Hierbei wird insbesondere der Effekt der Probenorientierung im Bauraum auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile betrachtet. Die besten Eigenschaften werden erzielt, wenn die Proben in Richtung der Bewegungsrichtung des Rakels orientiert werden. So wird die Zugfestigkeit im Vergleich zu gleich orientierten unverstärkten PA12 Proben um 28 % gesteigert, die Zugsteifigkeit sogar um 73 %. Die guten Materialeigenschaften entlang der Bewegungsrichtung des Rakels werden damit begründet, dass die 100 µm bis 200 µm langen Fasern bei der Bewegung des Rakels entlang dessen Bewegungsrichtung ausgerichtet werden. Zudem wird darauf hingewiesen, dass die Duktilität der verstärkten Proben im Vergleich zu den unverstärkten Proben um ca. 80 % reduziert wird und gleichzeitig eine um 3 bis 7 Prozentpunkte erhöhte Porosität vorliegt. Ein genauer Fasergehalt wird nicht angegeben, wurde aber

mit Hilfe des Datenblatts (EOS GmbH 2010) und der später hergeleiteten Formel 2-8 zu ca. 3,8 vol% berechnet.

In (Jing et al. 2017) wird der Effekt einer Vorbehandlung von Kohlenstofffasern durch Salpetersäure auf die Eigenschaften des Verbunds aus Kohlenstofffasern und PA12 ermittelt. Die 150 µm bis 200 µm langen Fasern werden, gegebenenfalls nach Vorbehandlung, mit dem PA12 Pulver vermischt und anschließend direkt im LS-Prozess verarbeitet. Der Gewichtsanteil der Fasern beträgt hierbei 30 wt%. Eine Anbindung zwischen Faser und Matrix kann also erst beim Laserschmelzen der Matrix erfolgen. Im Vergleich zu reinem PA12 wird die Zugfestigkeit um 60 % erhöht, der E-Modul sogar um 323 %, die Biegefestigkeit um 108 % und die Biegesteifigkeit +298 %. Zudem wird ermittelt, dass allein die Vorbehandlung der Kohlenstofffasern den E-Modul um 11 %, die Zugfestigkeit um 5 %, den Biegemodul um 7 % und die Biegefestigkeit um 11 % erhöht.

(Salazar et al. 2014) berichten von einem Vergleich des Ermüdungsverhaltens zwischen PA12 und PA12 mit 25 wt% Kurzglasfasern. Es wird ermittelt, dass bei -50 °C das verstärkte Material 68 % besser ist als unverstärktes, bei Raumtemperatur jedoch kein Unterschied festgestellt werden kann. Es wird angenommen, dass die unterschiedliche Verstärkungswirkung auf den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Matrix und Faser beruht. Der E-Modul der verstärkten Proben ist bei Raumtemperatur um 57 % besser, bei -50 °C sogar 228 %. Die Zugfestigkeit wird bei Raumtemperatur geringfügig um 3,1 % verschlechtert, bei -50 °C jedoch um 28 % erhöht.

### **Zusammenfassung LS mit kFVK:**

Nur in der Arbeit von (Zhu et al. 2015) findet eine Anbindung zwischen Fasern und Matrix vor dem Verpulvern des Materials statt, es werden jedoch keine mit anderen Werten vergleichbare Versuchsergebnisse angegeben. Sowohl bei (Jansson und Pejryd 2016) als auch (Jing et al. 2017) und (Salazar et al. 2014) liegt im Pulverbett jeweils eine Mischung aus Kunststoffpartikeln und Kurzfasern vor. So kann insbesondere bei (Jansson und Pejryd 2016) ein großer Effekt der Probenorientierung im Bau-raum auf die Bauteileigenschaften nachgewiesen werden. Grundsätzlich werden aber auch die Bauteileigenschaften der LS-Proben durch den Einsatz von Kurzfaserverstärkungen deutlich gesteigert.

### 2.3.2 Additive Fertigung von eFVK

Arbeiten zur additiven Fertigung von eFVK existieren laut aktuellem Stand der Technik ausschließlich für das FLM-Verfahren, somit findet in der Folge keine weitere Prozessunterscheidung statt.

In (Prüß und Vietor 2015a) wird das Prinzip der additiven Fertigung von eFVK in FLM-Prozessen genauer analysiert. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Implementierung der Endlosfasern in die thermoplastische Matrix grundsätzlich auf drei unterschiedliche Arten erfolgen kann, basierend auf dem Zeitpunkt, an dem die Verstärkungsfasern mit der Matrix infiltriert bzw. imprägniert werden.

Eine schematische Darstellung der drei Methoden erfolgt in Abbildung 2-7.

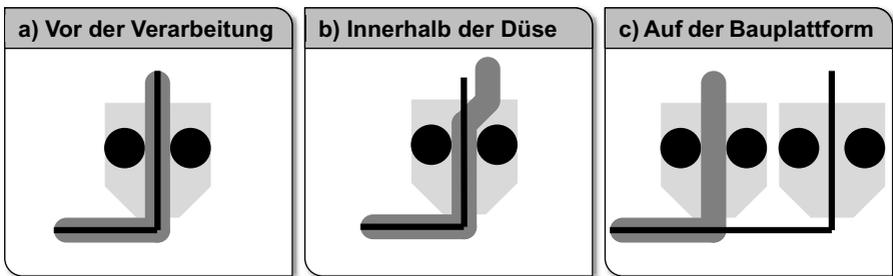


Abbildung 2-7: Verschiedene Möglichkeiten der Faserimplementierung bei Austragsverfahren (insbesondere FLM), in Anlehnung an (Prüß und Vietor 2015b, S. 16)

Die erste Methode sieht eine Imprägnierung der Verstärkungsfasern durch die Matrix in einem separaten, dem eigentlichen additiven Fertigungsprozess vorgeschalteten Prozessschritt vor (vgl. Abbildung 2-7 a). Hierbei wird aus der Kunststoffmatrix und den Verstärkungsfasern ein faserverstärktes FLM-Filament hergestellt, in welchem die Fasern in endloser Form innerhalb des FLM-Filaments entlang desselben vorliegen. Dieses eFVK-Filament wird anschließend dazu genutzt, ein eFVK-Bauteil additiv zu fertigen.

Eine Imprägnierung der Verstärkungsfasern innerhalb der FLM-Austragsdüse stellt die zweite Methode dar (vgl. Abbildung 2-7 b). Hierbei werden die Endlosfasern der FLM-Austragsdüse zugeführt und kommen erst dort zum ersten Mal mit dem plastifizierten Matrixmaterial in Berührung. Die Fasern werden somit erst innerhalb der Austragsdüse

mit der Matrix imprägniert und werden in der Regel vom Strom der flüssigen Matrix durch die Düse ausgetragen.

Eine Imprägnierung der Endlosfasern nach der dritten Methode findet erst auf der Bauteilplattform statt (vgl. Abbildung 2-7 c). Die Endlosfasern werden hier separat und örtlich getrennt von der eigentlichen FLM-Austrageeinheit zugeführt. Der flüssige Kunststoff wird erst im Anschluss daran auf die Bauplattform aufgebracht und kann auch erst dann die Fasern imprägnieren.

Die Vor- und Nachteile der drei Methoden stellen sich nach (Prüß und Vietor 2015a) wie folgt dar. So können bei der ersten Methode eFVK gefertigt werden, ohne dass größere Anpassungen an der Maschine nötig sind. Jedoch geht dies auf Kosten der Flexibilität, da bei einer Austrageeinheit nur ein Material verarbeitet werden kann und man für jeden Wechsel des Verstärkungsanteils einen kompletten Materialwechsel durchführen müsste. In diesem Bereich schneidet die zweite Methode deutlich besser ab, da hier dem Prozess eine variable Menge an Fasern zugeführt werden kann. Jedoch ist eine Anpassung der Austrageeinheit nötig, da eine zusätzliche Öffnung für das Einbringen der Fasern benötigt wird. Weiterhin sind die reinen Fasern mitunter sehr schwer handhabbar und es kann sich als sehr komplex herausstellen, die additive Fertigung und Imprägnierung der Fasern gleichzeitig zu steuern. Für die dritte Methode werden keinerlei Vorteile genannt, stattdessen wird hier die höchste Komplexität aufgrund der für eine freie Faserorientierung benötigten zusätzlichen Achse gesehen. Auch wird eine gute Imprägnierung der Fasern bei diesem Verfahren stark bezweifelt. (Prüß und Vietor 2015a, S. 2–3)

In den drei folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse verschiedener Literaturquellen bezüglich der drei vorgestellten Methoden erläutert. Im Anschluss werden in Kapitel 2.4 die Zugfestigkeit und der E-Modul in Abhängigkeit des Fasergehalts zusammen mit den ermittelten Daten der kurzfaserverstärkten Proben aufgelistet und verglichen.

### **2.3.2.1 Imprägnierung der Endlosfasern vor der Verarbeitung**

Das bekannteste additive Fertigungsverfahren, welches eine Imprägnierung der Endlosfasern in einem separaten, vorgeschalteten Prozess nutzt, ist gleichzeitig auch das einzige Verfahren, welches bisher käuflich erwerbbar ist.

Die Firma MarkForged hat im Jahr 2014 das nach eigener Aussage erste additive Fertigungssystem vorgestellt, welches endlose Faserverstärkungen aus Kohlenstoff, Glas

und Kevlar zusammen mit einer Nylon-Matrix verwenden kann. Das Verfahren basiert auf dem FLM-Prozess und wurde von MarkForged unter der Bezeichnung Continuous Filament Fabrication (CFF) geschützt. (MarkForged 2014)

In verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten werden die Parameter von mit Hilfe des MarkOne hergestellten Probekörper untersucht. Beispielsweise vergleichen (van Der Klift et al. 2016) in sechs von zehn Ebenen mit Kohlenstofffasern verstärktes Nylon mit unverstärktem Nylon. Die Materialien wurden direkt von MarkForged bezogen, die mit Kohlenstofffasern verstärkten Filamente weisen einen gemessenen FVG von 34,5 % auf. Durch die Einbringung dieser verstärkten Filamente in sechs von zehn Ebenen ergibt sich folglich insgesamt ein FVG von 20,7 %. Die Fertigung der verstärkten Bereiche erfolgt im „konzentrischen“ Muster, also schneckenförmig von außen nach innen, immer entlang des Randes. Es fällt auf, dass die Proben bevorzugt an der Stelle reißen, an der es einen Versatz in der Verstärkungslinie gibt, wenn das Verstärkungselement in die nächste Bahn weiterspringt. Der E-Modul steigt durch die Implementierung der Verstärkungsfasern im Vergleich zu dem gemessenen E-Modul der unverstärkten Proben um 3866 %, die Zugfestigkeit im Vergleich zum Materialdatenblatt um 828 %. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass das verwendete Nylon mit einem E-Modul von 940 MPa als recht elastisch anzusehen ist und somit eine große Steigerung einfach erzielt werden kann.

(Melenka et al. 2016) untersuchen ein ebenfalls von MarkForged hergestelltes, mit Kevlar verstärktes Nylon-Filament am MarkOne. Bei einem FVG von 10,1 % wird eine Verbesserung des E-Moduls um 590 % und eine Verbesserung der Zugfestigkeit um 64 % erreicht. Da die Proben eine möglichst hohe gewichtsbezogene Leistung erzielen sollen, wurde eine Infill-Struktur mit geringem Füllgrad genutzt. Somit sind die erzielten Ergebnisse nicht mit denen aus den anderen vorgestellten Arbeiten vergleichbar.

Auch (Dickson et al. 2017) untersuchen das Material von MarkForged am MarkOne. Hier findet ein Vergleich der verschiedenen Materialien untereinander statt. Die mit Kevlar und Glas verstärkten Proben weisen einen FVG von bis zu 10 % auf, die mit Kohlenstofffasern verstärkten Proben 11 %. Zudem werden verschiedene Füllformen betrachtet, die zuvor bereits genannte konzentrische Füllform (Kevlar und Glas nur mit 8 % FVG) und eine als isotrop bezeichnete Füllform, in welcher die Fasern immer hin und her direkt nebeneinander abgelegt werden (nicht für Kohlenstofffasern untersucht). Als erstes Ergebnis wird die höhere Leistungsfähigkeit der isotropen Füllstruktur genannt, die Zugfestigkeit steigt bei den Kevlar-Proben um 45 % und bei den Glasfaser-

Proben um 35 %, der E-Modul um 12 % bzw. 49 %. Wie aussagekräftig diese Werte tatsächlich sind, ist fraglich, da die „isotrope“ Füllung keine 8 %, sondern 10 % Faseranteil hat und somit 25 % mehr Fasern eingebracht wurden. Im Vergleich zu den unverstärkten Nylon-Proben kann die Zugfestigkeit mit Kohlenstofffasern um 225 %, mit Kevlar um 164 % und mit Glasfasern um 248 % erhöht werden, für die E-Moduln wird eine Steigerung von 1496 % (Kohlenstofffasern), 798 % (Kevlar) und 826 % (Glas) gemessen. Es wurde zudem ermittelt, dass mit steigendem FVG der Porengehalt des Bauteils ansteigt.

Auch (Goh et al. 2018) ermitteln mit dem MarkOne und dem von MarkForged bezogenen Kohlenstoff- und Glasfaser-Material die Bauteileigenschaften. Das unverstärkte Nylon-Filament wird jedoch nicht geprüft, die in der Folge angegebenen Nylon-Werte sind aus den zuvor genannten Versuchen von (Dickson et al. 2017) entnommen. Die mit Glasfasern verstärkten Proben weisen einen FVG von 35 % auf, hiermit kann die Zugfestigkeit um 637% und der E-Modul um 1258 % gesteigert werden. Die mit Kohlenstofffasern verstärkten Proben weisen einen FVG von 41 % auf. Hiermit kann die Zugfestigkeit um 884 % und der E-Modul um 2353 % gesteigert werden. Bei beiden Probenarten wird das zuvor genannte isotrope Füllmuster verwendet.

Ebenfalls den MarkOne und das MarkForged Material nutzen (Justo et al. 2018). Die Proben werden im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Versuchen nicht direkt erzeugt, sondern aus einer größeren Probe herausgetrennt, sodass über die gesamte Probenlänge eine parallele Faserstruktur vorliegt, also keine Umkehrpunkte o.ä. vorhanden sind. Die mit Kohlenstofffasern verstärkten Proben erreichen einen FVG von 40 %, die mit Glasfasern verstärkten Proben 50 %. Da auch bei diesen Versuchen die unverstärkte Nylon Matrix nicht geprüft wird, werden wieder die in (Dickson et al. 2017) beschriebenen Werte zugrunde gelegt. Die Zugfestigkeit der mit Glasfasern verstärkten Proben kann um 265 %, der E-Modul um 4786 % gesteigert werden, bei den mit Kohlenstofffasern verstärkten Proben wird die Zugfestigkeit um 1049 % und der E-Modul um 12730 % gesteigert.

### **Fazit zur eFVK-Herstellung mit Imprägnierung vor der Verarbeitung**

Die beschriebenen Verfahren zur eFVK-Herstellung mit einer Imprägnierung mit Hilfe der ersten Methode ermöglichen teilweise sehr hohe Verstärkungswirkungen von bis zu 12730 %.

#### **2.3.2.2 Imprägnierung der Endlosfasern innerhalb der Austragsdüse**

(Mori et al. 2014) beschreiben unter anderem den Versuchsaufbau, mit welchem Endloskohlenstofffasern zusammen mit dem Kunststofffilament durch eine nicht-modifizierte Extruderdüse geführt werden. Hierbei wird lediglich ein FVG von nur 0,2 % erreicht. Trotzdem kann die Zugfestigkeit der verstärkten Probe im Vergleich zu additiv gefertigten unverstärkten Probe um ca. 300 % verbessert werden. Abbildungen zeigen jedoch, dass das verwendete FLM-Verfahren eine sehr grobe Auflösung hat (ca. 1 mm Durchmesser des Extrudats). In (Nakagawa et al. 2017) werden die Forschungsarbeiten von (Mori et al. 2014) weitergeführt, hier lassen sich auch tatsächliche Spannungswerte finden. Laut Datenblatt erreicht das verwendete ABS eine Zugfestigkeit von 30 MPa, additiv gefertigt nur noch eine Zugfestigkeit von ca. 10 MPa und damit nur ein Drittel.

Wie auch von (Mori et al. 2014) zuvor, werden von (Li et al. 2016) Kohlenstofffasern direkt zusammen mit dem FLM Filament durch den Extruder geführt. Verwendet wird hierbei PLA. Zusätzlich zu den Materialtests mit verstärktem und unverstärktem PLA werden in einer weiteren Versuchsreihe auch vorbehandelte Kohlenstofffasern verwendet. Die Vorbehandlung erfolgt durch eine Imprägnierung der Kohlenstofffasern mit einer Lösung aus Methylen-Dichlorid und PLA. Der FVG beträgt in den verstärkten Proben 34 %, wobei die Art der Bestimmung des FVGs fraglich ist, da beim Probenquerschnitt der Anteil des verstärkten Bereichs und nicht der Anteil der Faserquerschnitte am Gesamtanteil berechnet wird. Mit den unbehandelten Fasern lässt sich die Zugfestigkeit des PLAs um 186 % erhöhen, mit vorbehandelten Fasern sogar um 225 %.

### **Fazit zur eFVK-Herstellung mit Imprägnierung innerhalb der Austragsdüse**

Die nach Methode b) hergestellten eFVK-Probekörper erreichen nicht die Verstärkungswirkung der nach Methode a) gefertigten Proben und auch nicht deren Faservolumengehalt. Trotzdem ist eine deutliche Verstärkungswirkung sichtbar.

### 2.3.2.3 Imprägnierung der Endlosfasern auf der Bauplattform

Neben den Untersuchungen zur Methode b) haben (Mori et al. 2014) auch eFVK-Bauteile hergestellt, indem sie Kohlenstofffasern auf der Bauplattform platziert und diese anschließend mit dem ABS einfach „überdruckt“ haben. Die Probekörper weisen einen FVG von 1,4 % auf. Ohne eine Wärmebehandlung kann so die Zugfestigkeit um ca. 10 % gesteigert werden, mit Wärmebehandlung um ca. 100 %. Wie bereits beschrieben, sind die Proben sehr grob gefertigt und weisen unverstärkt nur eine Zugfestigkeit von ca. einem Drittel der Werte aus dem Materialdatenblatt auf.

### Fazit zur eFVK-Herstellung mit Imprägnierung auf der Bauplattform

Die Methode c) zur Imprägnierung der Endlosfasern wurde im Gegensatz zu den Methoden a) und b) in der Literatur nur einmal mit mechanischen Kennwerten genannt, dabei wurden die mechanischen Eigenschaften leicht verbessert.

### 2.3.3 Weitere Forschungsarbeiten zur additiven Fertigung von FVK

Neben den bisher genannten Quellen wird in einigen weiteren Quellen die additive Fertigung von FVK betrachtet. Jedoch werden dort keine mechanischen Kennwerte genannt, sodass der jeweilige Inhalt hier nicht weiter erläutert wird. Um einen vollständigen Abriss des Stands der Technik der additiven Fertigung von FVK zu präsentieren, werden die Quellen trotzdem genannt:

- kFVK: (Girdis et al. 2016), (Zhong et al. 2001), (Molitch-Hou 2014)
- eFVK: (Vaneke 2017), (Tse et al. 2016), (Fischer und Rommel 2013), (Prüß und Vietor 2015a), (Liu et al. 2018), (Tian et al. 2016), (Hou et al. 2018), (Nakagawa et al. 2017), (Yao et al. 2017), (Gardner et al. 2016b)
- Verwendung von Draht statt Fasern, fiber encapsulation additive manufacturing (FEAM): (Saari et al. 2015a), (Saari et al. 2015b), (Saari et al. 2015c), (Cox et al. 2017)

## 2.4 Prozessvergleich

In den Kapiteln 2.4.1 bis 2.4.3 werden zunächst die erreichten Kennwerte aus den bisher genannten Quellen in Abhängigkeit der jeweiligen Verstärkungsart beschrieben. Hierbei wird nach kFVK in 0°-Orientierung (also entlang der Belastungsrichtung der Zugproben) und 90° (quer zur Belastungsrichtung der Zugproben) sowie den eFVK (nur 0°) unterschieden.

Wie aus der Auflistung in den vorigen Kapiteln ersichtlich ist, wird der Fasergehalt in der Literatur oftmals auf Basis der Masse und nicht, wie für FVK normalerweise üblich, auf Basis des Volumens angegeben (Schürmann 2008, S. 161). Um die Werte später trotzdem vergleichen zu können, wird in Formel 2-3 eine Umrechnung für den Massenanteil in den Volumenanteil beschrieben (Schürmann 2008, S. 164).

$$\varphi_F = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-\Psi}{\Psi}\right) * \frac{\rho_F}{\rho_M}} * 100\% \quad \text{Formel 2-3}$$

mit

$\Psi = \text{Fasermassengehalt (FMG)}$

$\rho_F, \rho_M = \text{Dichte der Fasern bzw. Matrix}$

Zudem wird insbesondere bei der Verwendung von FVK als Ausgangsmaterial manchmal auch die Dichte des FVKs anstatt des FVGs genannt. Auch diese lassen sich ineinander umrechnen. Die Dichte des FVKs lässt sich wie in Formel 2-4 darstellen.

$$\rho_{gesamt} = \frac{m_F + m_M}{V_F + V_M} \quad \text{Formel 2-4}$$

mit

$\rho_{gesamt} \triangleq \text{Dichte des FVK}$

$m_F, m_M = \text{Masse von Fasern bzw. Matrix}$

$V_F, V_M = \text{Volumen von Fasern bzw. Matrix}$

Entsprechend der Dichteberechnung für Matrix und Fasern nach der Masse aufgelöst und in Formel 2-4 eingesetzt ergibt sich Formel 2-5. Der Bruch im ersten Term ergibt den FVG, der Bruch im zweiten Term analog dazu den Matrixvolumengehalt.

$$\begin{aligned} \rho_{gesamt} &= \frac{\rho_F * V_F + \rho_M * V_M}{V_F + V_M} = \rho_F * \frac{V_F}{V_F + V_M} + \rho_M * \frac{V_M}{V_F + V_M} \\ &= \rho_F * \varphi_F + \rho_M * \varphi_M \end{aligned} \quad \text{Formel 2-5}$$

mit

$\varphi_M = \text{Matrixvolumengehalt}$

Der FVG und Matrixvolumengehalt sind wie in Formel 2-6 ineinander umzurechnen.

$$1 = \varphi_F + \varphi_M \quad \text{Formel 2-6}$$

Nach Auflösen von Formel 2-6 nach dem Matrixvolumengehalt und Einsetzen in Formel 2-5 ergibt sich Formel 2-7:

$$\rho_{gesamt} = \rho_F * \varphi_F + \rho_M * (1 - \varphi_F) \quad \text{Formel 2-7}$$

Auflösen von Formel 2-7 nach dem FVG ergibt die Berechnungsformel Formel 2-8 für die Ermittlung des FVGs aus der Gesamtdichte des FVKs und der Dichte der Einzelkomponenten:

$$\varphi_F = \frac{\rho_{gesamt} - \rho_M}{\rho_F - \rho_M} * 100\% \quad \text{Formel 2-8}$$

Mit Formel 2-3 und Formel 2-8 lassen sich mit Hilfe der Dichte der einzelnen Materialien und des Massenanteils der Fasern am Gesamtverbund in den folgenden Kapiteln zu allen Untersuchungen die Faservolumenanteile angeben.

Aus den in Kapitel 2.3 gelisteten Literaturquellen werden die Ergebnisse je nach Verstärkungsart und Faserorientierung übersichtlich in den folgenden Kapiteln 2.4.1 bis 2.4.3 in Abbildung 2-8 bis Abbildung 2-12 dargestellt.

Die Werte werden im Anhang in Tabelle 0-2 bis Tabelle 0-4 zusammengefasst. Die erzielten Werte der mechanischen Eigenschaften werden dort dem jeweiligen Material zugeordnet. Zudem werden der FVG, der Massenanteil der Fasern, aus welchem der FVG gegebenenfalls mit Hilfe von Formel 2-3 und den in Tabelle 0-1 im Anhang genannten Dichte-Werten für die verschiedenen Materialien ermittelt wurde, die Zugfestigkeit und der E-Modul unter Angabe der jeweiligen Literaturquelle, aus der die Werte stammen, angegeben.

Die Verbundmaterialien werden durch die Notation „Matrixwerkstoff/Faserwerkstoff“ abgekürzt, beispielsweise steht „ABS/CF“ für einen Verbund aus ABS-Matrix und Kohlenstofffasern. Fast alle Werte stammen aus FLM-Prozessen, Werte, die aus LS Prozessen stammen, werden als solche separat gekennzeichnet. Weiterhin werden Abkürzungen für Glasfasern (GF), Vapour-Grown Carbon Fibres (VGCF) und Aramidfasern (AF) verwendet.

### 2.4.1 Additiv gefertigte kFVK 0°-Orientierung

Die Ergebnis-Übersicht der verschiedenen additiv gefertigten kFVK in 0°-Orientierung wird in Tabelle 0-2 im Anhang gegeben. Die dort gelisteten Daten werden in der folgenden Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Werte für den FVG auf der X-Achse in logarithmischer Skalierung dargestellt, da vor allem Werte unter 10 % FVG stark gehäuft vorkommen.

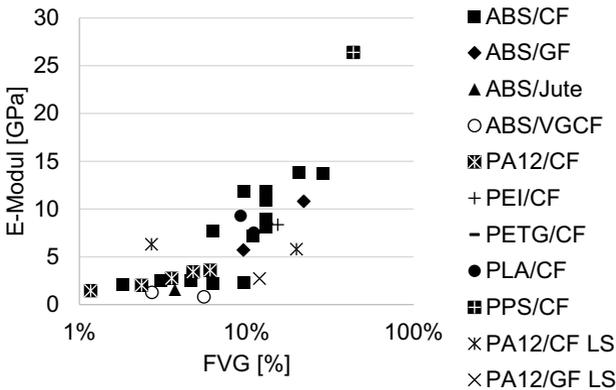


Abbildung 2-8: E-Modul für kFVK in 0°-Orientierung

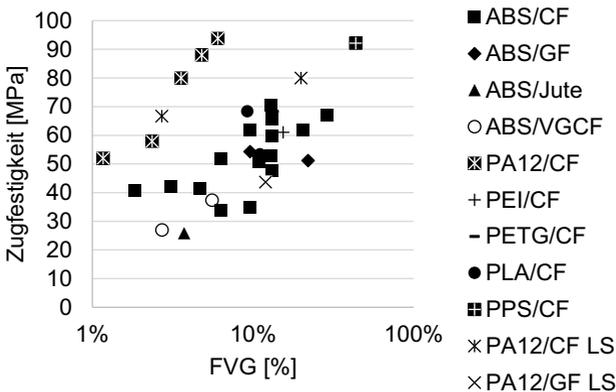


Abbildung 2-9: Zugfestigkeit für kFVK in 0°-Orientierung

Es ist deutlich ein Trend zu erkennen, dass für höhere Faservolumenanteile höhere E-Moduln erreicht werden, auch wenn innerhalb einzelner Versuchsreihen bzw. Materialpaarungen dieser Trend nicht immer zutrifft. Kohlenstofffaserverstärkte Bauteile weisen dabei immer die höchsten Werte auf. Bei Betrachtung der Zugfestigkeit ist eher eine Abhängigkeit vom Material zu erkennen und erst dem untergeordnet eine Abhängigkeit vom FVG. Bei Betrachtung der Werte der einzelnen Materialkombinationen ist auch hier zu erkennen, dass ein höherer FVG höhere Werte liefert.

### 2.4.2 Additiv gefertigte kFVK 90°-Orientierung

Wie im vorigen Kapitel 2.4.1 für additiv gefertigte kFVK in 0°-Orientierung werden in diesem Kapitel die Materialdaten aus der Literatur für die 90°-Orientierung angegeben. Die genauen Werte sind in Tabelle 0-3 im Anhang gelistet und werden in der folgenden Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 dargestellt.

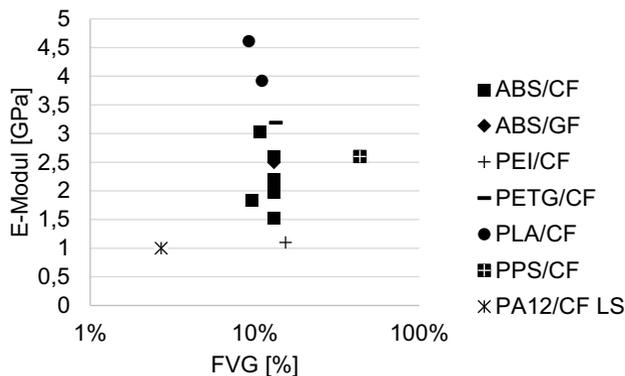


Abbildung 2-10: E-Modul für kFVK in 90°-Orientierung

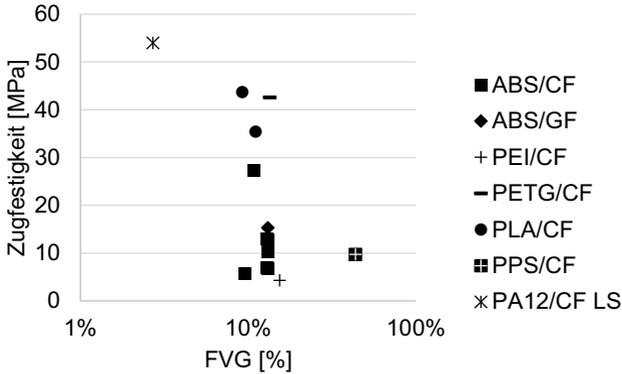


Abbildung 2-11: Zugfestigkeit für kFVK in 90°-Orientierung

Im Gegensatz zu den Werten bei 0°-Orientierung ist sowohl für den E-Modul als auch für die Zugfestigkeit keine Abhängigkeit der Werte vom FVG erkennbar. Dies könnte jedoch daran liegen, dass deutlich weniger Werte als bei der 0°-Orientierung zur Verfügung stehen. Allgemein ist deutlich erkennbar, dass sowohl E-Modul als auch Zugfestigkeit in 90°-Orientierung deutlich geringere Werte aufweisen, als in 0°-Orientierung.

### 2.4.3 Additiv gefertigte eFVK

Wie in den beiden vorigen Kapiteln werden in diesem Kapitel die Materialdaten aus der Literatur für die eFVK angegeben, die genauen Werte sind der Tabelle 0-4 im Anhang zu entnehmen. Für die Berechnung der Einzelwerte gilt das gleiche wie in den beiden Kapiteln zuvor. Im Gegensatz zu den kFVK werden die eFVK nicht in 0° und 90°-Orientierung unterschieden, da für die 90° Orientierung keine Literaturwerte vorliegen.

Die in Tabelle 0-4 gelisteten Daten werden in der folgenden Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13 dargestellt.

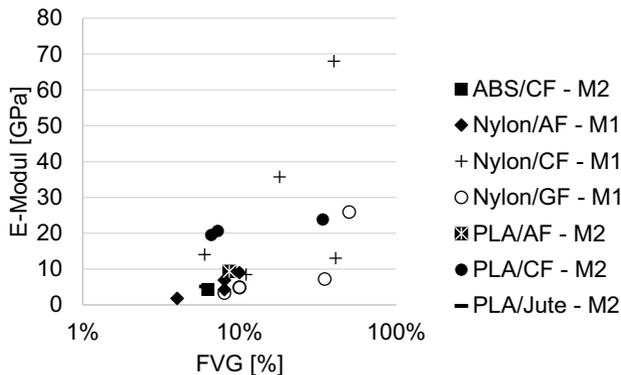


Abbildung 2-12: E-Modul für eFVK

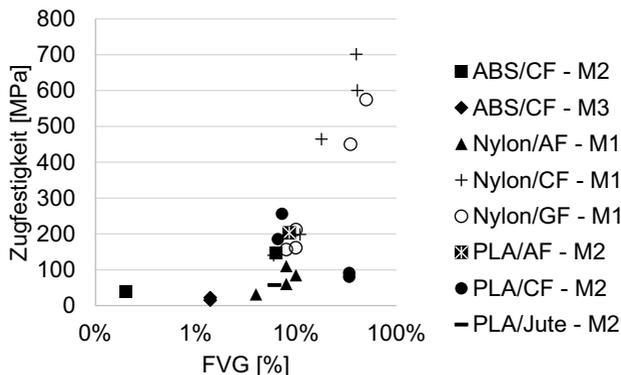


Abbildung 2-13: Zugfestigkeit für eFVK

Wie zuvor bei den kFVK in 0°-Orientierung ist auch bei den eFVK eine Abhängigkeit des E-Moduls vom FVG erkennbar. Gleichzeitig wird auch deutlich, dass die kFVK, je nach FVG, nicht viel geringere E-Moduln als die eFVK aufweisen. Bei Betrachtung der Zugfestigkeit ändert sich dies, hier weisen die eFVK deutlich größere Werte als die kFVK auf. Zudem ist eine deutliche Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom FVG erkennbar.

### 3 Bewertung des Stands der Technik

Der in Kapitel 2 beschriebene Stand der Technik enthält für die additiv gefertigten kFVK und eFVK viele Informationen bezüglich der jeweiligen Prozesse und der erreichbaren Bauteileigenschaften. Um die vorgestellten Prozesse bewerten zu können, sind zunächst geeignete Bewertungskriterien abzuleiten und zu gewichten. Ziel der Bewertung ist hierbei die Eignung für die wirtschaftliche additive Fertigung von Kleinserien im industriellen Umfeld.

Der in Kapitel 2.2 genannte Hauptkritikpunkt für additiv gefertigte Kunststoffe ohne Faserverstärkungen ist die oftmals ungenügende mechanische Performance von bestenfalls 80 % eines vergleichbaren Spritzgussbauteils (Völkner 2015). Dem gegenüber stehen eine hervorragende Flexibilität und Wirtschaftlichkeit für geringe Bauteilzahlen und individualisierte Bauteile, da auf Formen und Werkzeuge verzichtet werden kann. Verbunden wird dies zudem mit einer ausgezeichneten Materialeffizienz, da in der Regel nur an den Stellen Material in das Bauteil eingebracht wird, an denen dies benötigt wird.

Genau entgegengesetzt zu den additiven Fertigungsverfahren stellen sich die in Kapitel 2.1.5 vorgestellten Verfahren für die FVK-Fertigung dar. Es können Bauteile mit höchsten mechanischen Eigenschaften gefertigt werden, was jedoch aufgrund der benötigten Formen und Werkzeuge gerade bei geringen Stückzahlen kostenintensiv ist. Die Ausgangsmaterialien sind sehr teuer und können nicht immer effizient eingesetzt werden, was zum Teil dem hohen Anteil an Faserabfällen geschuldet ist.

Die Kombination der FVK-Materialien mit der Verfahrenstechnologie der additiven Fertigung verspricht hierbei großes Potential, was aus den Kapiteln 2.3 und 2.4 ersichtlich wird. Allerdings zeigt die breite Streuung der beschriebenen Maximalkennwerte, dass dieses Potential aktuell oftmals nur unzureichend erfüllt wird.

Für einen breiten Einsatz der Verfahren muss eine geeignet große Materialauswahl bzw. Materialvariabilität gegeben sein, damit das für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeignete Material auch verarbeitet werden kann. Hinzu kommt, dass, bei einer breiten Verfügbarkeit der Materialien, deren Preise durch die Konkurrenzsituation am Markt reduziert werden. Vorteilhaft ist hier zudem, wenn Materialien ohne weitere Aufbereitung, z.B. durch Verpulvern oder Filamentherstellung, verwendet werden können.

Im Sinne des Leichtbau-Gedankens „das richtige Material an der richtigen Stelle“ und zur Vermeidung unnötiger Kosten ist zudem auf einen effizienten Materialeinsatz, vor

allem bei der Verwendung der meist hochpreisigen Fasern, zu achten. Damit dies möglich ist und damit die Designfreiheit nicht eingeschränkt wird, sollte zudem die erzielbare Bauteilkomplexität im Vergleich zur herkömmlichen additiven Fertigung nicht verringert werden. Gleiches gilt für die Vorlaufzeit, also die Zeit zwischen Konstruktion und Fertigung des ersten Bauteils.

Mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs werden die genannten Kriterien gewichtet. Die mechanischen Eigenschaften werden dabei etwas wichtiger eingeschätzt als die Größe der Materialauswahl oder die Effizienz des Materialeinsatzes und viel wichtiger als die erzielbare Bauteilkomplexität und die Vorlaufzeit. Die Größe der Materialauswahl wird etwas wichtiger als die Effizienz des Materialeinsatzes und der erzielbaren Bauteilkomplexität eingeschätzt, jedoch viel wichtiger als die Vorlaufzeit. Die Effizienz des Materialeinsatzes wird gleich wichtig wie die erzielbare Bauteilkomplexität und die Vorlaufzeit eingeschätzt und die erzielbare Bauteilkomplexität etwas wichtiger als die Vorlaufzeit.

Die Zusammenfassung dieses paarweisen Vergleichs ist in folgender Abbildung 3-1 dargestellt.

	Mechanische Eigenschaften	Materialauswahl	Effizienter Materialeinsatz	Erzielbare Bauteilkomplexität	Vorlaufzeit	Gewichtung [%]
Mechanische Eigenschaften	-	1	1	2	2	<b>35,0</b>
Materialauswahl	-1	-	1	1	2	<b>27,5</b>
Effizienter Materialeinsatz	-1	-1	-	0	0	<b>15,0</b>
Erzielbare Bauteilkomplexität	-2	-1	0	-	1	<b>15,0</b>
Vorlaufzeit	-2	-2	0	-1	-	<b>7,5</b>

Abbildung 3-1: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

In den folgenden Absätzen werden die verschiedenen Verfahren in Bezug auf mechanische Eigenschaften, Materialauswahl, den effizienten Fasereinsatz, die erzielbare

Bauteilkomplexität und die benötigte Vorlaufzeit verglichen und auf Basis der gegebenen Eigenschaften bewertet. Die Bewertungsskala geht hierbei von „0“ (schlecht) bis „4“ (hervorragend). Im Anschluss daran erfolgen eine Zusammenfassung und ein Vergleich der verschiedenen Prozesstechnologien.

Die beschriebenen Eigenschaften werden hierzu komplett aus dem gesamten Kapitel der Grundlagen und des Stands der Technik entnommen, auf einen jeweiligen separaten Hinweis wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

### **Mechanische Eigenschaften**

Additiv gefertigte unverstärkte Kunststoffe weisen oftmals eine niedrigere Steifigkeit und Festigkeit auf als z. B. mit Spritzguss hergestellte Bauteile. Diese Werte lassen sich durch die Implementierung von Kurzfasern ein wenig und von Endlosfasern deutlich verbessern.

Bewertung der mechanischen Eigenschaften:

- Additiv gefertigte unverstärkte Kunststoffe: 0
- Additiv gefertigte kFVK: 2
- Additiv gefertigte eFVK: 4

### **Materialauswahl**

Thermoplaste für die additive Fertigung werden in letzter Zeit immer vielfältiger und variantenreicher. FVK-Materialien für die additive Fertigung befinden sich aktuell, mit Ausnahme der MarkForged-Materialien (eFVK) und wenigen kFVK-Filamenten und Pulvern, in der Entwicklung. Die Materialauswahl ist daher bei den verstärkten Materialien sehr stark eingeschränkt.

Bewertung der Materialauswahl:

- Additiv gefertigte unverstärkte Kunststoffe: 3
- Additiv gefertigte kFVK: 1
- Additiv gefertigte eFVK: 0

### **Effizienter Materialeinsatz**

Die additive Fertigung bietet die Möglichkeit, topologieoptimierte Strukturen zu fertigen und somit ausschließlich an den Stellen Material ins Bauteil zu bringen, an denen dies benötigt wird. Der Materialeinsatz ist hier somit höchst effizient. Grundsätzlich gilt dies

auch für die additive Fertigung von verstärkten Bauteilen, allerdings mit leichten Einschränkungen, da je nach Verfahren nur mit Multimaterial-Systemen unterschiedliche Faservolumenanteile erreicht werden können. Zudem berücksichtigt aktuell noch keine Datenaufbereitungssoftware die richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften der faserverstärkten Materialien, sodass die Position und Orientierung der Fasern bei automatischer Erzeugung des Fertigungs-codes nicht immer belastungsgerecht ist. Da eFVK ein größeres Potential der mechanischen Eigenschaften aufweisen, sinkt die Effizienz folglich stärker bei nicht belastungsgerechter Implementierung. Insgesamt ist die Effizienz des Materialeinsatzes bei additiv gefertigten FVK folglich etwas geringer als bei der additiven Fertigung unverstärkter Kunststoffe einzuschätzen, wobei die eFVK nochmals schlechter abschneiden als die kFVK.

Bewertung der Materialeffizienz:

- Additiv gefertigte unverstärkte Kunststoffe: 4
- Additiv gefertigte kFVK: 3
- Additiv gefertigte eFVK: 2

### **Erzielbare Bauteilkomplexität**

Durch die additive Fertigung lassen sich sehr komplexe Bauteile fertigen, die Grenzen sind hier nur durch das Entfernen möglicher Stützstrukturen bzw. durch die Bauteilgröße gesetzt. Gleiches gilt für die additive Fertigung von kFVK-Bauteilen, allerdings schränkt die aktuelle Art der Faserimplementierung vor allem bei den eFVK-Bauteilen die mögliche Bauteilkomplexität ein, da durch die Implementierung der Fasern auf minimale Biegeradien Rücksicht genommen werden muss und aufgrund der dicken Filamente nur eine grobe Fertigungsauflösung erzielt werden kann.

Bewertung der erzielbaren Bauteilkomplexität:

- Additiv gefertigte unverstärkte Kunststoffe: 4
- Additiv gefertigte kFVK: 4
- Additiv gefertigte eFVK: 2

### **Vorlaufzeit**

Die additive Fertigung bietet durch den Verzicht auf Werkzeuge und nur eine kurz dauernde Datenaufbereitung vor der Fertigung eine tatsächliche Fertigung „on demand“. Ein schnellerer Weg von der Konstruktion zum fertigen Bauteil bzw. von der Entscheidung, ein Bauteil erneut zu fertigen, bis zum Bauteil ist nicht möglich. Gleiches würde

auch für die additive Fertigung von kFVK und eFVK gelten, wenn eine geeignete Möglichkeit der Datenaufbereitung vorliegt, mit welcher insbesondere die mechanischen Eigenschaften der FVK erschlossen werden können. Da diese Möglichkeit aktuell jedoch nur zum Teil gegeben ist, sind die Vorlaufzeiten beider Verfahren aktuell noch größer als bei der additiven Fertigung unverstärkter Kunststoffe. Bei der Vorlaufzeit ist zudem die Verfügbarkeit des Materials zu berücksichtigen, welche vor allem bei den eFVK aufgrund der sehr geringen Verbreitung (mit MarkForged gibt es nur einen Lieferanten) als schlecht einzuschätzen ist.

Bewertung der Vorlaufzeit:

- Additiv gefertigte unverstärkte Kunststoffe: 4
- Additiv gefertigte kFVK: 3
- Additiv gefertigte eFVK: 2

### Prozessvergleich

Eine Zusammenfassung und Auswertung der bewerteten Prozesseigenschaften wird auf Basis der zuvor aufgestellten Bewertungen mit Hilfe einer Nutzwertanalyse in folgender Tabelle 3-1 dargestellt.

*Tabelle 3-1: Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Technik*

Bewertungs- kriterien	Additiv gefertigte Kunststoffe			Additiv gefertigte kFVK		Additiv gefertigte eFVK	
	GF	BF	BF*GF	BF	BF*GF	BF	BF*GF
Mechanische Eigenschaften	35,0	0	0,0	2	70,0	4	140,0
Materialauswahl	27,5	3	82,5	1	27,5	0	0,0
Effizienter Materialeinsatz	15,0	4	60,0	3	45,0	2	30,0
Erzielbare Bau- teilkomplexität	15,0	4	60,0	4	60,0	2	30,0
Vorlaufzeit	7,5	4	30,0	3	22,5	2	15,0
Summe	100		232,5		225,0		215,0
Erfüllungsgrad			<b>58,1 %</b>		<b>56,3 %</b>		<b>53,8 %</b>

Die Bewertungsfaktoren (BF) stellen die zuvor definierten Bewertungen dar, die Gewichtungsfaktoren (GF) werden aus dem paarweisen Vergleich aus Abbildung 3-1 entnommen. Die letzte Zeile gibt den Erfüllungsgrad und damit die Bewertung der verschiedenen Verfahren des Stands der Technik wieder.

Es ist zu erkennen, dass sich der Erfüllungsgrad aller drei Verfahrensarten nicht wesentlich voneinander unterscheidet und somit die uneingeschränkte Eignung für den industriellen Einsatz bei keinem Verfahren gegeben ist. Trotz der schlechten erreichbaren mechanischen Eigenschaften weist die additive Fertigung unverstärkter Kunststoffe noch den besten Erfüllungsgrad auf. Die additive Fertigung von kFVK folgt auf Rang 2, die additive Fertigung von eFVK auf Rang 3.

Bei einem Erfüllungsgrad von nur 58,1 % sind selbst aktuelle additive Fertigungsverfahren für Kunststoffe nicht gut für die wirtschaftliche industrielle Fertigung in Kleinserien geeignet, was hauptsächlich an den schlechten mechanischen Eigenschaften liegt.

Eine bessere Bewertung der additiv gefertigten FVK verhindert hauptsächlich die geringe Materialauswahl dieser Verfahren. Auch eine bessere Materialeffizienz und erhöhte erzielbare Bauteilkomplexität würden insbesondere den additiv gefertigten eFVK zu einer deutlich besseren Bewertung verhelfen.

Den Stand der Technik zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass die bereits sehr weit entwickelte additive Fertigung von Kunststoffen aufgrund der Einschränkungen bei den mechanischen Eigenschaften trotzdem nur eine mittelmäßige Eignung für die wirtschaftliche Fertigung von Kleinserien im industriellen Umfeld aufweist. Diese lässt sich jedoch aufgrund der Materialrestriktionen kaum steigern.

Demgegenüber weisen wenig entwickelte Verfahren wie die additive Fertigung von kFVK und eFVK nahezu die gleiche Eignung auf. Hier besteht jedoch aufgrund der Möglichkeit, die Prozesse weiterzuentwickeln, ein Optimierungspotential, sodass bei diesen Prozessen in Zukunft mit einem höheren Erfüllungsgrad zu rechnen ist.

## 4 Zielsetzung

Basierend auf der in Kapitel 3 beschriebenen Bewertung des Stands der Technik ergibt sich als Zielsetzung für die vorliegende Dissertation die Entwicklung eines Verfahrens, welches in Bezug auf mechanische Eigenschaften, Materialauswahl, den effizienten Fasereinsatz, die erzielbare Bauteilkomplexität und die benötigte Vorlaufzeit durchgehend gute Eigenschaften bietet und sich somit gut für die wirtschaftliche industrielle Kleinserienfertigung eignet.

Die im vorigen Kapitel am höchsten bewerteten Kriterien sind die mechanischen Eigenschaften und die Materialauswahl. Alleine die höchste Erfüllung dieser beiden Kriterien führt zu einer Bewertung von 62,5 %, somit wäre in den anderen Kriterien selbst bei einer schlechten Einstufung die Eignung des Verfahrens größer als bei allen anderen aktuell verfügbaren additiven Fertigungsverfahren. Somit ergeben sich von Anfang an zwei Einschränkungen bei der Auswahl der Lösungsansätze.

1. Für eine maximale mechanische Performance ist die Verwendung von Endlosfaserverstärkungen unumgänglich. Ein neu zu entwickelndes Verfahren muss folglich die Implementierung von Endlosfaserverstärkungen in den Prozess ermöglichen.
2. Um auf Matrixseite die maximal mögliche Materialauswahl zu erreichen, ist als Basis für den Ziel-Prozess das in Kapitel 2.2.2.3 vorgestellte AKF zu verwenden, da hierdurch günstige Standardmaterialien verwendet werden können, welche nicht erst noch zu Pulver oder Filament weiterverarbeitet werden müssen.

Die durchzuführende Verfahrensentwicklung beinhaltet folglich die Entwicklung und Validierung einer geeigneten Anlagen- und Prozesstechnologie auf Basis des ARBURG freeformers, welche die Implementierung von Endlosfasern ermöglicht. Die Ermittlung der am besten geeigneten Prozessparameter für die additive Fertigung von eFVK im zuvor beschriebenen Verfahren sowie die Ermittlung der mechanischen Kennwerte, welche mit dem Stand der Technik verglichen werden können, schließen die Verfahrensentwicklung ab. Am Ende wird das entwickelte Verfahren nochmals mit den bestehenden Verfahren aus Tabelle 3-1 verglichen und sollte die beste Eignung aller Verfahren aufweisen.

Die detaillierten Anforderungen an den beschriebenen Zielprozess werden in den folgenden Absätzen beschrieben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass an dieser Stelle

zunächst nur der additive Fertigungsprozess an sich ohne zugehörige Datenaufbereitung betrachtet wird.

### **Mechanische Eigenschaften**

Für höchste mechanische Eigenschaften ist nicht nur die Verwendung von Endlosfasern relevant, sondern auch der erreichbare FVG und die Orientierung der Verstärkungsfasern entlang der Belastungen. Hier spielt folglich auch die erzielbare Bauteilkomplexität eine Rolle, damit die Verstärkungsfasern auch in kleinen Bereichen und gewundenen Pfaden implementiert werden können.

### **Materialauswahl**

Durch den ARBURG freeformer ist auf Matrix-Seite bereits die in der additiven Fertigung bestmögliche Materialauswahl verfügbar. Bei der Verfahrensentwicklung ist zudem auch bei den zu verwendenden Verstärkungsfasern eine möglichst große Materialvielfalt sicherzustellen. Dies bedeutet, dass auf die Verwendung von speziellen Halbzeugen, wie sie in anderen additiven eFVK Verfahren verwendet werden, zu verzichten ist und stattdessen das zu entwickelnde Verfahren auf allgemein verfügbaren Halbzeugen basieren soll.

### **Effizienter Materialeinsatz**

Da die Verstärkungsfasern im Vergleich zur Kunststoffmatrix meist deutlich teurer und schwerer sind, ist vor allem auf einen effizienten Fasereinsatz zu achten. Eine Verstärkung der Kunststoffmatrix soll nach dem Motto des hybriden Leichtbaus „das richtige Material an der richtigen Stelle“ auch lokal begrenzt erfolgen können, sodass eine Kosten- und Gewichtsreduktion im Vergleich zu einem komplett aus eFVK gefertigten Teil erfolgt. Der Implementierungsmechanismus der Fasern ist somit auf eine Weise zu gestalten, welche ein einfaches An- und Ausschalten der Faserimplementierung erlaubt.

### **Erzielbare Bauteilkomplexität**

Mit dem zuvor genannten effizienten Fasereinsatz geht bei der lokal begrenzten Einbringung der Verstärkungsfasern auch eine Erhöhung der Bauteilkomplexität einher. Mit Einsatz von Endlosfasern sind Strukturen fertigbar, die ohne diese eventuell nicht zu fertigen wären, beispielsweise das Überspannen eines Hohlraumes. Allerdings könnte die Fertigung besonders kleiner bzw. besonders feiner Strukturen durch den Verstärkungsfasereinsatz behindert werden, sodass die maximale Bauteilkomplexität

erst dann erzielbar ist, wenn auch auf die Einbringung der Verstärkungsfasern verzichtet werden kann. Der lokal begrenzte Einsatz der Verstärkungsfasern ist folglich nicht nur für die Materialeffizienz aus vorigem Absatz wichtig, sondern auch für die erzielbare Bauteilkomplexität. Um auch die genannten kleinen und feinen Strukturen mit Verstärkungsfasern zu fertigen, muss die lokale Einbringung möglichst kurzer Fasern ermöglicht werden. Wenn bspw. für eine erfolgreiche Faserimplementierung durch die Anlage mindestens 2 cm Fasern ausgetragen werden müssen, lassen sich keine kleineren faserverstärkten Strukturen fertigen.

### **Vorlaufzeit**

Bei der Bereitstellung von genügend zu verarbeitenden Matrix- und Faserwerkstoffen ist, was die Vorlaufzeit zur Produktion eines Bauteils angeht, keine Steigerung im Vergleich zum additiven Fertigungsprozess ohne Fasern möglich, falls der Fertigungscode vorliegt. Somit ist bereits bei der zuvor definierten großen Materialvielfalt der Faserhalbzeuge der Grundstein für eine geringe Vorlaufzeit gelegt. Die Datenaufbereitung für die additive Fertigung von FVK ist eine sehr komplexe Thematik und wird im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter bearbeitet, auch wenn sie später mit in die Bewertung der Vorlaufzeit einfließt.

### **Zusammenfassung**

Das Ziel dieser Arbeit ist, das AKF-Verfahren so weiter zu entwickeln, dass Bauteile mit einem **hohen FVG** (Anforderung „Mechanische Eigenschaften“) in **gewundenen Pfaden** (Anforderung „Mechanische Eigenschaften“ und „Erzielbare Bauteilkomplexität“) bei der Verwendung von **Endlofasern** (Anforderung „Mechanische Eigenschaften“) gefertigt werden können. Dabei ist zudem die **lokale Einbringung** (Anforderungen „Effizienter Materialeinsatz“ und „Erzielbare Bauteilkomplexität“) von **Standardwerkstoffen**, wie Granulaten und Rovings (Anforderungen „Materialauswahl“ und „Vorlaufzeit“) zu berücksichtigen und gleichzeitig die **voneinander unabhängige Fertigung mit reiner Matrix und eFVK** sicherzustellen (Anforderungen „Effizienter Materialeinsatz“ und „Erzielbare Bauteilkomplexität“).

Die im vorigen Absatz hervorgehobenen Begriffe stellen die aus den Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren abgeleiteten, kombinierten und zusammengefassten Ausprägungen der verschiedenen Zielsetzungen dar und beschreiben die umzusetzenden Eigenschaften des zu entwickelnden Verfahrens.

## 5 Lösungsansatz

In folgender Abbildung 5-1 ist der gesamte Lösungsansatz schematisch dargestellt. Der eigentliche Kern der Arbeit, die detaillierte Studie bezüglich der Abhängigkeit der Bauteileigenschaften von den Prozessparametern, welche die Eigenschaften und Potentiale des Verfahrens aufzeigt, wird in Abbildung 5-2 detailliert dargestellt. Zum Zweck einer besseren Übersicht werden in Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 die jeweiligen Kapitel der einzelnen Arbeitsschritte genannt.

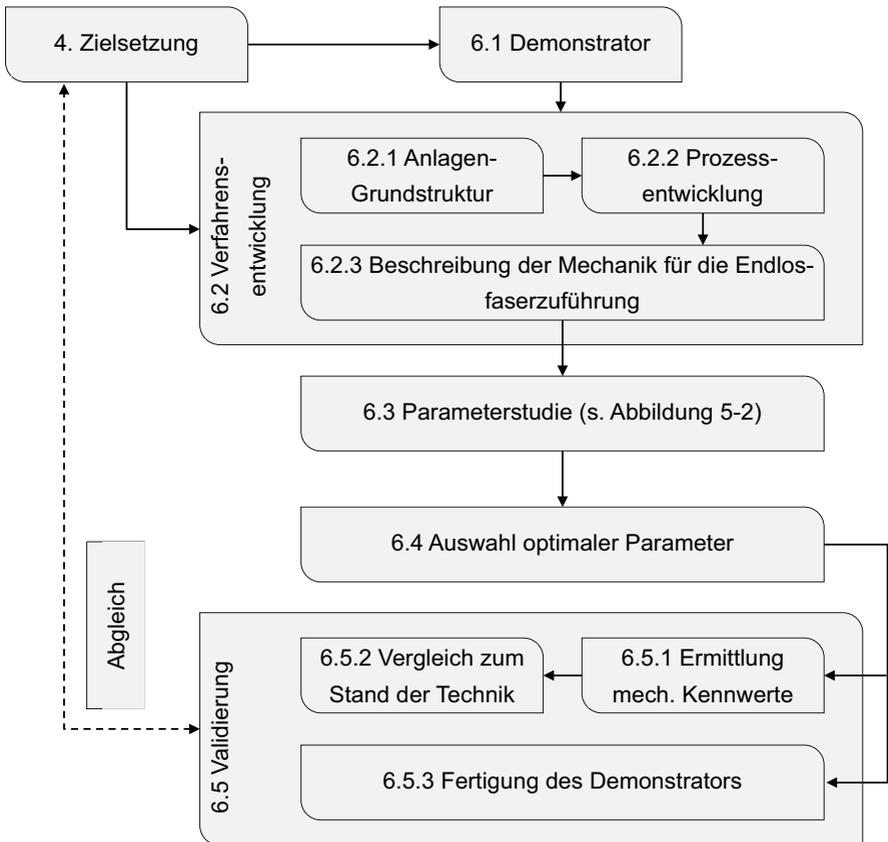


Abbildung 5-1: Lösungsansatz für die Entwicklung eines additiven Fertigungsverfahrens für die Herstellung von eFVK

Für eine zielgerichtete Verfahrensentwicklung ist eine geeignete, anspruchsvolle und allgemeingültige Demonstratorgeometrie notwendig, welche auf Basis der in der Zielsetzung beschriebenen Anforderungen auszuwählen ist. Die Allgemeingültigkeit ist hierbei insbesondere auf den für die Realisierung gewünschter Bauteileigenschaften benötigten Funktionsumfang der Faserimplementierung bzw. der vollständigen Fertigungsanlage zu beziehen.

Basierend auf den Randbedingungen, welche aus der Zielsetzung und dem gewählten Demonstrator abzuleiten sind, erfolgt die Verfahrensentwicklung. Hierbei ist zunächst die Grundstruktur der Anlage zu entwickeln und sicherzustellen, dass die zuvor definierten Anforderungen **Standardwerkstoffe, Endlosfasern, gewundene Pfade und voneinander unabhängige Fertigung mit reiner Matrix und eFVK** in ihren Kernfunktionen implementiert werden können. In der Folge wird der Aufbau und die Funktionsweise der separat entwickelten Mechanik für die Implementierung von Endlosfasern beschrieben.

Mittels der anschließenden Parameterstudie an unidirektional verstärkten Probekörpern werden die verschiedenen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessparametern und den Probeneigenschaften dargestellt. Dies erfolgt mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) und der Varianzanalyse (Analysis of Variances, ANOVA) und wird in Abbildung 5-2 detailliert dargestellt.

Für die Parameterstudie sind zunächst Vorbereitungen zu treffen. Hierzu zählen die Definition der Zielgrößen, also die später zu messenden Werte, die Ermittlung der Faktoren, die den Prozess beeinflussen können, und die Definition eines Versuchsplans.

Basierend auf den Zielgrößen sind die Probekörper genau zu beschreiben und die Verarbeitungsparameter des Versuchsplans entsprechend zu definieren. Um besser abschätzen zu können, ob eine veränderte Probeneigenschaft auf einer veränderten Fasereinbettung beruht oder allein aus einem veränderten Aufbau der Matrix bzw. einem ungewollten äußeren Einfluss, ist jeweils eine eFVK- und eine unverstärkte Kunststoffprobe gleichzeitig mit gleichen Fertigungsparametern herzustellen. Mit Hilfe einer parallelen Betrachtung der jeweiligen Versuchsergebnisse der verstärkten und unverstärkten Probekörperreihen können zudem auch eventuelle weitere Korrelationen ermittelt werden.

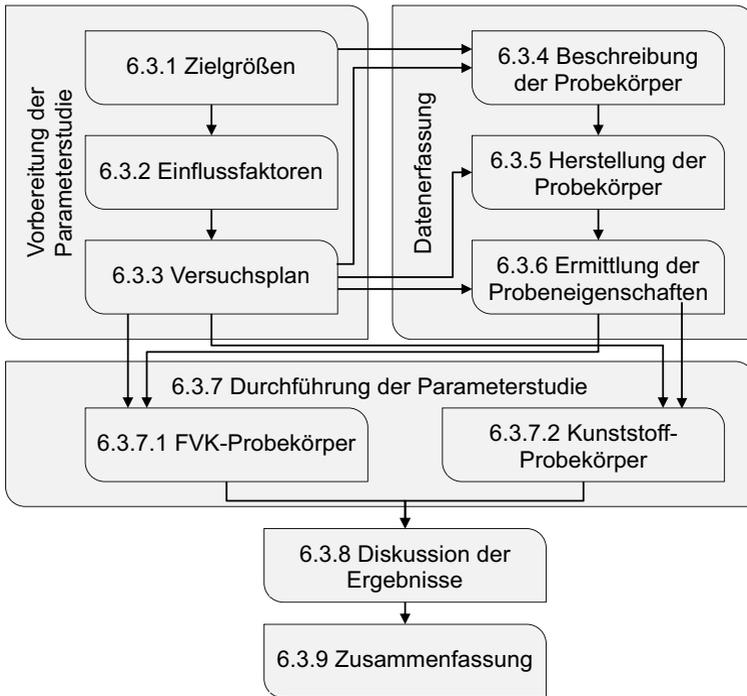


Abbildung 5-2: Vorgehen zur Durchführung der Parameterstudie in Kapitel 6.3

Im Anschluss an die Fertigung der Probekörper auf Basis der zuvor definierten Randbedingungen sind die Probeneigenschaften in geeigneten Versuchen zu ermitteln. Zusammenfassend werden diese Schritte als Datenerfassung beschrieben.

Für die Auswertung der Parameterstudie ist sowohl für eFVK- als auch für Kunststoffproben der Einfluss der Prozessparametervariation auf die Zielgrößen zu ermitteln, zu diskutieren und zusammenzufassen.

Zum Abschluss der gesamten Verfahrensentwicklung aus Abbildung 5-1 ist diese zu validieren. Hierfür sind die tatsächlich erreichbaren mechanischen Eigenschaften zu ermitteln sowie mit dem Stand der Technik zu vergleichen. Einen weiteren Teil der Validierung stellt zudem die Fertigung des Demonstrators dar. Ein Abgleich zwischen den Ergebnissen der Validierung und der Zielsetzung bildet die Grundlage für eine anschließende Bewertung.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Definition einer Demonstratorgeometrie

Die Entwicklung des Prozesses zur Implementierung von Endlosfaserverstärkungen soll mit dem Ziel erfolgen, mit dem entwickelten Prozess und der zugehörigen Anlagentechnologie einen anwendungsnahen Demonstrator zu fertigen. Zunächst sind hierfür in Kapitel 6.1.1 die Randbedingungen der Anlage und die Anforderungen an den Demonstrator zu definieren, bevor in Kapitel 6.1.2 ein geeigneter Demonstrator beschrieben wird.

Bei der Definition des Demonstrators ist zu beachten, dass die zu realisierenden Eigenschaften allgemeingültig sind und sich in unterschiedlichen Ausprägungen in allen potentiell mit diesem Verfahren herstellbaren Bauteilen wiederfinden. Der Demonstrator selbst soll hierbei die höchstmöglichen Anforderungen an das Verfahren stellen, da somit auch Komponenten mit geringeren Anforderungen fertigbar sind.

Für die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Fertigungsparametern und der daraus resultierenden Ermittlung der optimalen Parameterkombination sind jedoch möglichst genormte Probekörper zu verwenden.

#### 6.1.1 Analyse der Randbedingungen und Anforderungen

Die Randbedingungen und Anforderungen für die additive Fertigung von eFVK-Demonstratoren erschließen sich zum einen aus den Restriktionen des ARBURG freeformers und zum anderen aus dem in Kapitel 4 definierten Eigenschaftsprofil.

##### 6.1.1.1 Durch das additive Fertigungssystem gegebene Randbedingungen

Der für die Anlagen- und Prozessentwicklung ausgewählte ARBURG freeformer ist eine 1-Komponenten Maschine in 3-Achs-Ausführung. Die X- und Y-Achse sind als aufeinander aufbauende Linearmotoren ausgeführt. Der Linearmotor der X-Achse ist direkt auf dem Linearmotor der Y-Achse befestigt, welcher wiederum über einen Spindeltrieb in der Z-Koordinate verfahren wird. Der Aufbau wurde bereits in Kapitel 2.2.2.3 in Abbildung 2-6 dargestellt.

Aus diesem Aufbau geht hervor, dass ein Bauteil, wie in der additiven Fertigung üblich, Schicht für Schicht generiert wird und die einzelnen Schichten in Z-Richtung übereinander aufgebaut werden. Somit wird als erste Randbedingung für ein Demonstratorbauteil

definiert, dass die Verstärkungsfasern ausschließlich eben abgelegt werden dürfen und keine Verstärkung in Z-Richtung erfolgen darf.

Die Maximalmaße des Demonstratorbauteils werden ebenfalls durch den Bauraum des freeformers festgelegt und dürfen somit 190 mm \* 135 mm \* 230 mm (X\*Y\*Z) nicht überschreiten.

### **6.1.1.2 Anforderungen aus dem Eigenschaftsprofil für Demonstratoren**

Die in den folgenden Kapiteln genannten Merkmale werden bereits in der Zielstellung in Kapitel 4 definiert und dienen nun der gezielten Bestimmung von Demonstrator-Eigenschaften.

#### **Mechanische Eigenschaften**

Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen ist allgemein nur dann sinnvoll, wenn ihre hervorragenden gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften auch zwingend benötigt werden. Es ist somit ein Demonstrator zu ermitteln, der möglichst leicht sein soll, aber gleichzeitig eine hohe mechanische Belastbarkeit aufweisen soll.

#### **Materialauswahl**

Eine große Auswahl an fertigbaren Materialien ist insbesondere dann sinnvoll, wenn speziell auf einen Anwendungsfall zugeschnittene Materialien erforderlich sind, welche nicht einfach durch andere Materialien substituiert werden können. Eine genaue Restriktion ergibt sich hieraus für einen Demonstrator nicht, da genau das gleiche Bauteil in der Regel nicht aus verschiedenen Materialien gefertigt werden muss.

#### **Effizienter Materialeinsatz**

Da Verstärkungsfasern allgemein hochpreisig sind und weitestgehend nur unter großem Energieaufwand hergestellt werden können, ist sowohl aus Gründen der Wirtschaftlichkeit als auch der Ressourcen-Effizienz ein Demonstrator zu wählen, der keinen durchgehenden Fasereinsatz verlangt, sondern lokal begrenzt zu verstärken ist.

#### **Erzielbare Bauteilkomplexität**

Um die Vorteile der additiven Fertigung auszuspielen zu können, ist als Demonstrator ein Bauteil mit Hinterschnitten auszuwählen. Eine zusätzliche Bauteilkomplexität kann zudem durch eine eventuell notwendige Implementierung von Befestigungselementen (Schrauben oder Muttern) oder Elektronikkomponenten während der additiven Fertigung erzielt werden.

## Vorlaufzeit

Ein weiterer Vorteil, welcher allgemein in der additiven Fertigung begründet liegt, sind die geringen Vorlaufzeiten bei der Bauteilfertigung. Ein geeigneter Demonstrator ist somit so auszuwählen, dass im späteren Anwendungsfall ein nicht vorhersehbarer, plötzlicher Bedarf entstehen kann und somit eine geringe Vorlaufzeit notwendig wird.

### 6.1.2 DRS-Aktorgehäuse

Das Aktorgehäuse für das Drag-Reduction-System (DRS) des *KA-RaceIng* Formula Student Rennwagens für 2018 ist als Demonstratorbauteil für das zu entwickelnde Verfahren prädestiniert. In den folgenden Unterkapiteln wird zunächst das Design der Komponente gezeigt und weitere Hintergrundinformationen dazu gegeben und anschließend die Eignung als Demonstratorbauteil genauer untersucht und bewertet.

#### 6.1.2.1 Design des DRS-Aktorgehäuses

Folgende Abbildung 6-1 zeigt die von *KA-RaceIng* zur Verfügung gestellte Konstruktion des DRS-Aktorgehäuses. Die Maße betragen 135 mm \* 31 mm \* 56 mm (Länge \* Breite \* Höhe).



Abbildung 6-1: DRS-Aktorgehäuse

Das Aktorgehäuse ist direkt im verstellbaren Heckflügel des Formula Student Rennwagens verbaut und beinhaltet den Servomotor, welcher für die Bewegung des Heckflügels verantwortlich ist. In Abbildung 6-2 a) ist der Rennwagen KIT18e des Formula Student Rennteams *KA-RaceIng* zu sehen, rot markiert ist der Heckflügel. Dieser ist in

Abbildung 6-2 b) im Realaufbau detailliert dargestellt, rot markiert sind hier die Positionen für die beiden identischen DRS-Aktorgehäuse innerhalb der verstellbaren Flügel, welche auf der gegenüberliegenden Seite drehbar gelagert sind. Bei Aktivierung des DRS drehen die Aktoren die beiden Flügel flach, sodass der Luftwiderstand gesenkt wird. Aufgrund der geringen Wandstärken, welche auf den Verbau des Aktors zurückzuführen sind, werden nur bei den beiden Aktorgehäusen die Faserverstärkungen benötigt.



a)



b)

Abbildung 6-2: a) Formula Student Rennwagen des KA-Racing Teams; b) Genaue Position der DRS-Aktorgehäuse, Fotos: (KA-Racing e.V. 2018)

Der mit Fasern zu verstärkende Bereich wurde von KA-Racing definiert und wird in folgender Abbildung 6-3 a) dargestellt, Abbildung 6-3 b) zeigt den mit Fasern zu verstärkende Bereich (grau) im Gesamtzusammenbau des Aktorgehäuses (schwarz) implementiert.

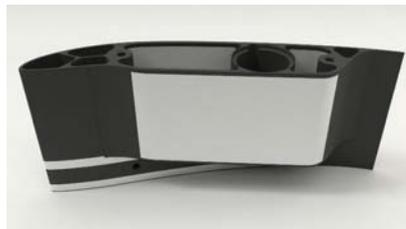


Abbildung 6-3: a) Lasttragende FVK-Struktur; b) FVK-Bereich (grau) zusammen mit der unverstärkten Reststruktur (schwarz) mit Genehmigung entnommen aus (A\_Wirth 2018, S. 55)

### 6.1.2.2 Bewertung des DRS-Aktor-Gehäuses

Da es sich bei dem DRS-Aktor-Gehäuse um ein Bauteil einer Kleinserie handelt, ist es zunächst gut als Demonstrator für eine wirtschaftliche additive Fertigung im industriellen Umfeld geeignet.

Durch die gegebenen Belastungen liegt der in den Randbedingungen geforderte ebene Belastungszustand vor, sodass eine Fasereinbringung jeweils in der X/Y-Ebene der einzelnen Schichten zu erfolgen hat. Weiterhin werden auf Grund des Einsatzes im Rennsport hohe mechanische Anforderungen an das Bauteil gestellt. Die Tragflächenform erfordert dabei eine Ablage in gewundenen, nicht geraden Pfaden. Die Materialauswahl ist zunächst freigestellt und nicht eingeschränkt, wobei es jedoch von Vorteil ist, hier jederzeit andere Materialkombinationen verwenden zu können, falls der Einsatz dies erfordern sollte. Aufgrund der geforderten hohen gewichtsspezifischen Eigenschaften bei Bauteilen für den Rennsport ist in diesem Fall auch die Nachfrage nach einer hohen Materialeffizienz erfüllt. Durch den nachträglichen Einsatz eines Servo-Motors und das direkte Eindringen von Muttern zur Befestigung des Servos ist zudem eine hohe Bauteilkomplexität gegeben, die von anderen Verfahren nicht bzw. nicht ohne weiteres realisiert werden kann. Da es im Rennsport auch immer zu Unfällen kommen kann und dementsprechend auch kurzfristig Ersatzteile benötigt werden, ist die Anforderung der geringen Vorlaufzeit gegeben.

Ein Verfahren, welches ein Produkt mit so komplexen Anforderungen wie die des beschriebenen DRS-Aktor-Gehäuses fertigen kann, kann auch viele andere ähnlich komplexe Produkte fertigen. Wie zuvor bereits beschrieben, wird das DRS-Aktor-Gehäuse für die Verfahrensentwicklung lediglich als komplexer Demonstrator ausgewählt, um die benötigten Anlagen- und Prozesseigenschaften zielführend und anwendungsnah zu entwickeln. Das zu entwickelnde Verfahren ist hierdurch jedoch nicht auf nur ein Produkt oder nur eine Produktkategorie eingeschränkt, sondern vielfältig anwendbar.

## 6.2 Verfahrensentwicklung

In der Regel wird bei der Entwicklung von technischen Systemen im Bereich des Ingenieurwesens auf die Verwendung der „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ (VDI-Richtlinie 2221) hingewiesen. Die darin enthaltenen Methoden bieten einen guten und allgemein anerkannten Ansatz, neue technische Systeme zu entwickeln. Allerdings wird die Kenntnis dieser Richtlinie an dieser Stelle

für eine Dissertation im Maschinenbau als Grundwissen vorausgesetzt. Die in der Richtlinie enthaltenen Handlungsempfehlungen für eine Problemlösung (Problemanalyse, Problemformulierung, Systemsynthese, Systemanalyse, Beurteilung und Entscheidung) und die Aufgliederung eines Gesamtproblems in Teilprobleme und Einzelprobleme, aus welchen Einzellösungen, Teillösungen und die Gesamtlösung abgeleitet werden, werden jedoch trotzdem in den verschiedenen Kapiteln berücksichtigt, auch wenn jeweils nicht auf die Richtlinie verwiesen wird.

Für die Entwicklung eines Verfahrens, welches die additive Fertigung eines so komplexen Bauteils wie der in Kapitel 6.1.2.1 vorgestellten Demonstratorgeometrie ermöglicht, wird zunächst auf Basis der in Kapitel 4 definierten Ziele mit Relevanz für die Maschinenteknik eine grundlegende Struktur der Anlage erarbeitet. Basierend auf dieser Grundstruktur werden im Anschluss verschiedene Prozesse zur Faserimplementierung entwickelt und in praktischen Grundlagenversuchen das am besten geeignete Verfahren für die Faserimplementierung im AKF Prozess ermittelt. Dieses wird auf Basis der zuvor ermittelten Grundstruktur in eine konstruktive Lösung umgesetzt und am freeformer realisiert.

### **6.2.1 Ableitung der Anlagengrundstruktur**

Die grundlegende Anlagenstruktur legt die Funktionsweise der Gesamtanlage fest und ist somit ausschlaggebend für die Erfüllung der in Kapitel 4 beschriebenen Zielsetzung. Einen direkten Bezug auf die grundlegende Anlagenstruktur weisen die in der Zusammenfassung der Zielsetzung genannten Punkte „Verwendung von Standardwerkstoffen“, „Fertigung von eFVK“ und „Fertigung von reiner Matrix und eFVK“ auf.

Wie bereits in Kapitel 2.2.2.3 beschrieben, können mit dem ARBURG freeformer nach einer geeigneten Anpassung der Verarbeitungsparameter grundsätzlich alle ungefüllten thermoplastischen Kunststoffe in granularer Form verarbeitet werden. Die Forderung nach Standardwerkstoffen ist für die Matrix somit bereits bestmöglich erfüllt und muss folglich nur für die Endlosfasern in Kombination mit der Fertigung von reiner Matrix und eFVK genauer analysiert werden.

Die Standardwerkstoffe in der Rubrik „endlose Verstärkungsfasern“ (genaue Beschreibung in Kapitel 2.1.2) werden an dieser Stelle erneut kurz aufgelistet. 1D Faser-Halbzeuge liegen bei Rovings und Garnen vor, 1,5D Faser-Halbzeuge bei Tapes und 2D Faser-Halbzeuge bei Geweben, Gelegen und Organoblech. Die vorimprägnierten Faser-Halbzeuge Tape und Organoblech schränken aufgrund ihrer begrenzten Anzahl

verschiedener verfügbarer Matrixwerkstoffe die Zielsetzung „Standardwerkstoff“ zu sehr ein und werden nicht weiter betrachtet. Weiterhin werden die Anforderungen „Material-Effizienz“ und „Bauteil-Komplexität“ von den flächigen Halbzeugen Gewebe und Gelege zu sehr eingegrenzt, da aufgrund der flächigen Form gewundene Lastpfade nicht abbildbar sind und die Mindestwanddicke der zu fertigen Bauteile hierdurch stark eingegrenzt wird. Die nicht vorimprägnierten Halbzeuge Roving und Garn müssen für die erfolgreiche Herstellung eines eFVKs im Prozess mit einer Matrix benetzt bzw. infiltriert werden. Nur so kann die Faserimplementierung erfolgreich sein und das Bauteil die mechanischen Anforderungen erfüllen.

Unabhängig von der letztendlich verwendeten Form des Faser-Halbzeugs ist es notwendig, die Verstärkungsfasern auf die richtigen Maße zu kürzen und korrekt zu positionieren und zu orientieren.

Zusammengefasst ist folglich eine Bereitstellung von Garnen oder Rovings in den richtigen Abmessungen in der korrekten Position und Orientierung zu gewährleisten sowie den verwendeten Faserwerkstoff mit dem Matrixmaterial zu infiltrieren, ohne dabei die Fertigung mit reinem Thermoplast zu verhindern bzw. zu stören.

Die Grundstruktur der Anlage wird folglich durch den serienmäßigen freeformer und ein zusätzliches und separat ansteuerbares Modul, welches die Aufgabe der Fasereinbringung erfüllt, definiert.

### **6.2.2 Prozessentwicklung**

Wie in Kapitel 2.2.2.3 beschrieben, handelt es sich beim ARBURG freeformer um ein additives Fertigungssystem, welches grundsätzlich auf einem austragenden Verfahren basiert. Die in der Literatur genannten Verfahren zur Implementierung von Endlosfasern in einen additiven Fertigungsprozess wurden in Kapitel 2.3.2 genannt. Da die Austragsdüse des freeformers einen getakteten Verschluss aufweist (s. Kapitel 2.2.2.3) bleibt für eine Implementierung von Garnen oder Rovings lediglich das grundlegende Konzept „c) Auf der Bauplattform“ übrig (s. Abbildung 2-7).

Für eine erfolgreiche Implementierung der Verstärkungsfasern muss eine geeignete Infiltrierung der Fasern mit Matrix-Material gewährleistet werden. Gleichzeitig soll auch die Fertigung von filigranen Strukturen weiterhin möglich sein, sodass während der Fertigung keine hohen Prozesskräfte auf das Bauteil wirken dürfen. Infiltrierungsmethoden,

die mit Hilfe einer Krafteinwirkung funktionieren, beispielsweise Ultraschallschweißen, fallen somit weg und werden nicht weiter betrachtet.

In (Baumann et al. 2017a) werden drei verschiedene Methoden der Faserimplementierung ohne Krafteinwirkung beschrieben, untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen. An dieser Stelle sollen nur die relevanten Ergebnisse dieser Arbeit wiedergegeben werden, für weiterführende Informationen wird direkt auf die Arbeit verwiesen.

Die in (Baumann et al. 2017a) untersuchten Verfahren sind:

- Das direkte Eindringen der Verstärkungsfasern (Reihe C1/G1)
- Das Einfügen der Fasern in eine aufgeschmolzene Oberfläche (Reihe C2/G2)
- Das Einfügen mit Hilfe von Lösungsmitteln (Reihe C3/G3)

Hierfür werden für die Reihe C1-C3 je Probekörper drei Kohlenstofffaserrovings vom Typ Torayca T300 1K (1K = 1000 Einzelfilamente im Roving) und für die Reihe G1-G3 zwei Glasfaserrovings vom Typ 3B Advantex SE 1200 300 tex (tex = Längengewicht in [g/km]) verwendet, welche im relevanten Messbereich der Proben einen FVG von 0,3 % bei Kohlenstofffasern und 0,6 % bei Glasfasern aufweisen. (Baumann et al. 2017a)

Weiterhin werden in (Baumann et al. 2017a, S. 326) Formel 6-1 bis Formel 6-4 beschrieben und hergeleitet, mit denen auf Basis von Versuchsergebnissen und theoretisch erreichbaren Werten berechnet werden kann, wie weit das Potential einer Faserverstärkung ausgeschöpft wird.

Formel 6-1 gibt hierbei den prozentualen Anteil der tatsächlich erreichten Erhöhung des E-Moduls im Vergleich zum mit dem in Formel 6-4 erneut beschriebenen Voigt-Modell (genauere Erläuterung in Formel 2-1) theoretisch erreichbaren E-Modul an.

$$e = \frac{e_{actual}}{e_{theoretical}} \quad \text{Formel 6-1}$$

mit

$e$  = Erfüllung des Potentials der Steigerung des E – Moduls

$e_{actual}$  = tatsächlich erreichte Erhöhung des E – Moduls

$e_{theoretical}$  = theoretisch erreichbare Erhöhung des E – Moduls

und

$$e_{actual} = \left( \frac{E_{X_n}}{E_R} - 1 \right) * 100\% \quad \text{Formel 6-2}$$

mit

$E_{X_n} \triangleq$  gemessener  $E$  – Modul

$X_n \triangleq$  C1, C2, C3, G1, G2, G3 (jeweilige Versuchsreihennummer)

$E_R \triangleq$  gemessener  $E$  – Modul der Referenz – Proben

und

$$e_{theoretical} = \left( \frac{E_X}{E_R} - 1 \right) * 100\% \quad \text{Formel 6-3}$$

und

$$E_X = \varphi_{Faser} * E_{Faser} + (1 - \varphi_{Faser}) * E_{Matrix} \quad \text{Formel 6-4}$$

Die Probenreihe G1 (direktes Eindringen von Glasfasern) zeigt eine Potentialerfüllung von nahezu 80 % und damit das beste Ergebnis aller untersuchten Versuchsreihen (Baumann et al. 2017a, S. 327).

### 6.2.3 Mechanik für die Zuführung von Endlosfasern

Die Entwicklung eines Moduls für den ARBURG freeformer, welches die Implementierung der Endlosfasern wie im vorigen Kapitel beschrieben durch Zuführen mit anschließendem Überdrücken realisiert, wird in (Baumann et al. 2017b) und dem entsprechenden Patent (Baumann und Duffner 2015) beschrieben und kann dort jeweils detailliert nachgelesen werden. Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über den realisierten Aufbau und die genaue Funktionsweise des entwickelten Moduls.

#### 6.2.3.1 Aufbau des Zuführmoduls

In Abbildung 6-4 ist ein Querschnitt der CAD-Konstruktion des entwickelten Moduls in Siemens NX 11 dargestellt, Abbildung 6-5 zeigt dieselbe Konstruktion von schräg unten.

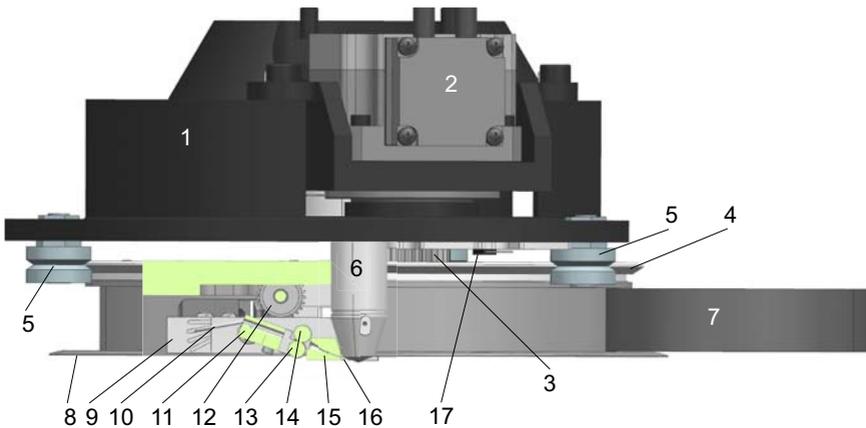
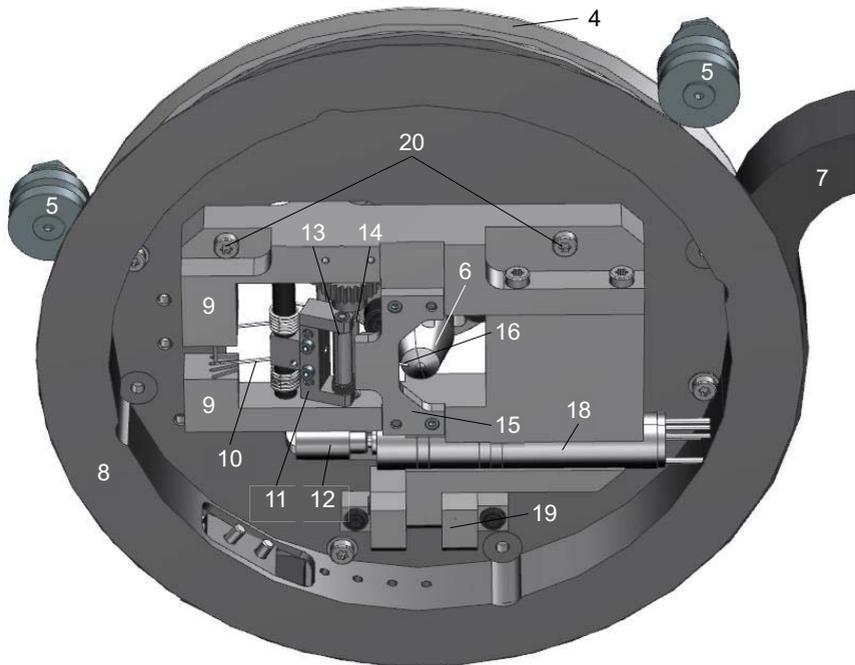


Abbildung 6-4: Querschnittsdarstellung des auskonstruierten Zuführmoduls

Das gesamte Modul wird mit Hilfe der Halterung (1) im freeformer befestigt und mit einem rotatorischen Freiheitsgrad um die senkrechte C-Achse gelagert. Der C-Achsen-Motor (2) treibt das Faserzuführmodul über das Zahnrad (3), welches in die Rundschiene mit Innverzahnung (4) greift, an. Diese wird über insgesamt drei Lagerrollen (5) konzentrisch zur Austragsdüse des freeformers (6) gelagert. Die Zuführung der Motorkabel für den Fördermotor und den Schlauch für die Faserförderung erfolgt durch die Energiekette (7), welche auf der tragenden Struktur des Zuführmoduls (8) beim Abrollen aufliegt. Komponente 9 trägt die zentralen Bestandteile der Zuführung und dient auch als Einstellvorrichtung für die Feder (10), indem diese in verschiedene Nuten eingelegt werden kann. Die Feder (10) presst mit Hilfe der Rollenlagerung (11) die indirekt angetriebene Rolle (13) auf die direkt angetriebene Rolle (14). Die Rotationsbewegung wird durch einen nur in Abbildung 6-5 sichtbaren Motor (18) über ein Schneckengetriebe (12) angetrieben. Die Fasern werden durch die beiden Förderrollen 13 und 14 in den Kanülenträger (15) gefördert und werden durch diesen in die Kanüle (16) eingefädelt. Der Hall-Sensor (17) wird für die Kalibrierung der C-Achse verwendet. Das gesamte an der tragenden Struktur (8) befestigte Zuführmodul kann für bessere Zugänglichkeit um eine Achse in der Halterung (19) gedreht werden, sobald die Schrauben (20) gelöst werden.



*Abbildung 6-5: Zuführmodul von schräg unten*

Die reale Komponente ist in Abbildung 6-6 in der Einbauposition im freeformer dargestellt. Die Nummerierung ist die gleiche wie im zuvor beschriebenen Text und in Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5. Zusätzlich werden in Abbildung 6-6 die ausgetragene Faser (21) und die zugeführten Kabel (22) dargestellt.

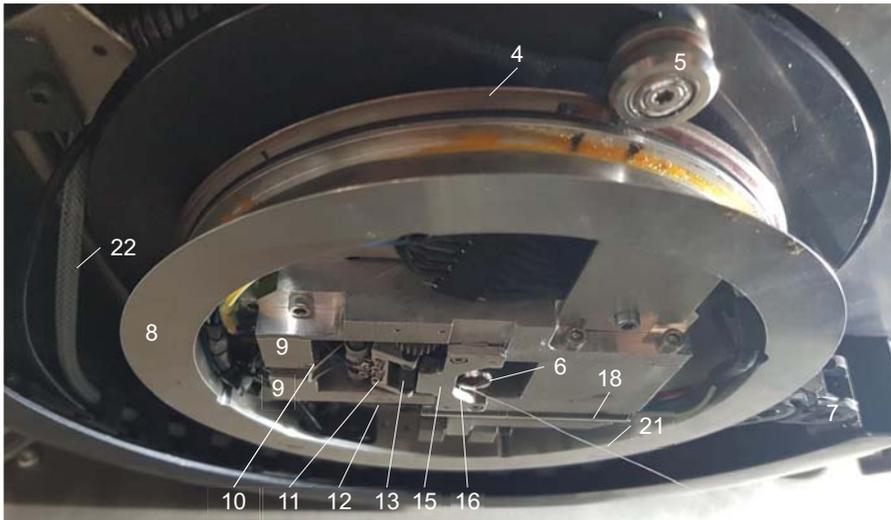


Abbildung 6-6: In den ARBURG freeformer eingebautes Zuführmodul mit bereits ausgetragener Faser

### 6.2.3.2 Ansteuerung der C-Achse

Die Ansteuerung der C-Achse ist direkt in die CNC des freeformers integriert, dies ermöglicht, die C-Achse direkt aus dem GCode heraus mit einem Positionierungsbefehl zu verfahren, wie es auch für die anderen Achsen möglich ist.

### 6.2.3.3 Ansteuerung der Faserförderung

Die Ansteuerung des Faservorschubs erfolgt separat mit Hilfe eines Microcontrollers und eines Motorcontrollers, sodass kein tiefer Eingriff in die Steuerung des freeformers erfolgen muss.

Die Zeitpunkte bzw. die Orte der Faserförderung werden im GCode definiert. Ein von dort aufgerufenes Unterprogramm schaltet einen digitalen Output am freeformer und sendet so das Signal zum Start der Faserförderung über den Microcontroller an den Motorcontroller (Freigabe der eingestellten Drehzahl). Sobald die Förderung unterbrochen werden soll, wird erneut ein Signal über die I/O Schnittstelle des freeformers und den Microcontroller an den Motorcontroller gesendet und die Freigabe wieder entzogen. Die gesamte Signalverarbeitungskette wird in folgender Abbildung 6-7 dargestellt.

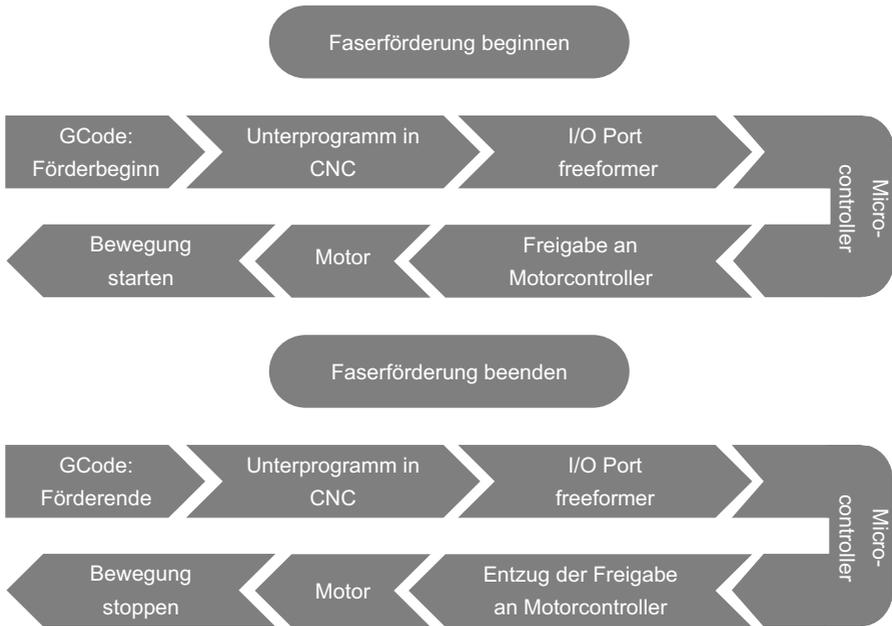


Abbildung 6-7: Signalverarbeitungskette vom GCode bis zum Fördermotor

Da für die Faserförderung im Motorcontroller der Geschwindigkeitswert fest vorgegeben werden muss, sind die Fertigungsgeschwindigkeit des freeformers bei der Verarbeitung von Fasern und die Fördergeschwindigkeit der Fasern aneinander anzupassen (s. Kapitel 6.2.3.7.2).

#### 6.2.3.4 Erstmaliges Implementieren und Trennen der Fasern

Das in Kapitel 6.2.3.1 beschriebene Zuführmodul besitzt keine weiteren Mechanismen zum erstmaligen Implementieren oder zum Trennen der Fasern, sondern realisiert dies durch eine definierte Abfolge verschiedener Prozessschritte.

Die erstmalige Implementierung der Verstärkungsfasern gestaltet sich simpel, da hierbei lediglich die Faserförderung zu starten ist. Durch die korrekte Orientierung und Austragsgeschwindigkeit werden die Fasern automatisch richtig positioniert und können vom durch die freeformer-Düse ausgetragenen Kunststoff in das Bauteil integriert werden. Die Methode für das Trennen der Fasern gestaltet sich komplexer. Hierfür ist der

teilweise im Bauteil eingedruckte Faseroving entgegen seiner eigentlichen Austragsrichtung zu bewegen, sodass er um die Kante der Kanüle gebogen, dabei gebrochen und somit erfolgreich abgetrennt wird.

Diese Art des Trennens ist nur dann erfolgreich, wenn die Faser sowohl innerhalb der Austragseinheit, als auch im Bauteil fixiert ist. Die gummierten Vorschubwalzen lassen hierbei kein Durchrutschen der Fasern zu, jedoch können die Fasern einfach vom Bauteil geschält werden, wenn die Kraft dort entgegen der vorigen Implementierungsrichtung wirkt. Aus diesem Grund wird das Faserimplementierungsmodul um 180° gedreht und die Bauplattform im Anschluss eine bestimmte Strecke in die vor der Drehung eingestellte Richtung des Faseraustrags bewegt. Hierdurch wirken keinerlei Schälkräfte auf die implementierte Faser. Dieser Vorgang wird in Abbildung 6-8 dargestellt.

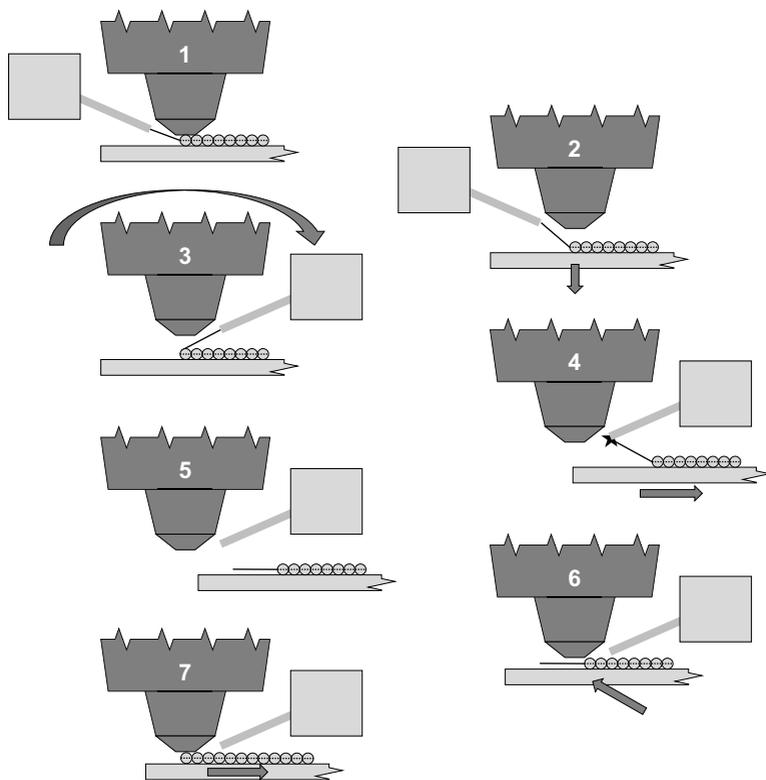


Abbildung 6-8: Trennvorgang für das Brechen der Fasern an der Kanülenkante

Kurz bevor das Ende der Faserimplementierung erreicht ist (1) wird die Bauplattform ein wenig abgesenkt, sodass der Kontakt zwischen Düse und Kunststoff getrennt wird und somit keine Wärme mehr in den Kunststoff übertragen wird (2). Anschließend wird das Faserimplementierungsmodul um 180° gedreht (3). Die Bauplattform verfährt entgegen der Kanülenorientierung, sodass die Faser an der Kante der Kanüle getrennt wird (4) und das überstehende Faserende auf der Bauplattform bleibt (5). Danach wird die Bauplattform wieder auf Ausgangsposition gefahren (6), um so das Faserende auch noch mit Kunststoff zu überdrücken (7).

Es ist zu beachten, dass bei dieser Art des Trennens ein loses Ende der Verstärkungsfasern am Bauteil verbleibt, dessen Länge dem Abstand zwischen Austragspunkt der Düse und dem Ende der Kanüle entspricht. Die Länge beträgt konstruktionsbedingt ca. 2,6 mm, somit ist bei der Fertigung zu berücksichtigen, dass die Fasern mindestens 2,6 mm vor Ende der zu verstärkenden Bahn getrennt werden und das lose Faserende im Anschluss noch vollständig eingedrückt wird. Damit es keinesfalls vorkommt, dass die Fasern aus dem Bauteil herausstehen, werden auf diesen Wert weitere 2,4 mm addiert, sodass insgesamt 5 mm vor dem Ende der Faserimplementierung das Trennen durchgeführt wird.

Im Anhang in GCode 0-1 wird der für einen Trennvorgang benötigte GCode beispielhaft mit allen benötigten Funktionen dargestellt.

### **6.2.3.5 Materialauswahl**

#### **6.2.3.5.1 Matrix-Auswahl und Ermittlung der Prozessparameter**

Als Matrixmaterial dient der Thermoplast ABS Terluran GP35. Aufgrund der Verwendung einer extra für die gegebenen Moduldimensionen angefertigten Sonderform der Kunststoff-Austragsdüse kann nicht auf voreingestellte Werte zurückgegriffen werden, stattdessen ist eine erneute Qualifizierung des Matrixmaterials notwendig.

Von Experten aus der freeformer Abteilung von ARBURG wird für die Verarbeitung von ABS Terluran GP35 mit einer ähnlichen Prototypendüse bei einer Schichtdicke von 0,2 mm eine Tropfenkennzahl von 72 empfohlen. Das zugehörige Breite zu Höhe Verhältnis (B/H) von 1,34 und ein Überlapp zwischen Randkontur und Füllbereich von 25 % wurden in Anlehnung an die Vorgehensweise zur Ermittlung der Verarbeitungsparameter (ARBURG GmbH + Co. KG 2016) in (A\_Muthler 2018) ermittelt.

Die im Vergleich zu den Standard-Parametern veränderten Fertigungsparameter werden in folgender Tabelle 6-1 zusammengefasst und bilden die Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen.

*Tabelle 6-1: Veränderte Fertigungsparameter*

Parameter	Wert
Temperatur Austragsdüse	260 °C
Tropfenkennzahl	72
Schichtdicke	0,2 mm
B/H-Verhältnis	1,34
Überlapp zwischen Füllung und Randbereich	25 %

### 6.2.3.5.2 Auswahl der Verstärkungsfasern

Als Verstärkungsfasern werden Glasfasern verwendet. Für die Ermittlung geeigneter Verarbeitungsparameter soll ein FVG von ca. 25 % realisiert werden.

Die vorgegebene Schichtdicke von 0,2 mm und das B/H Verhältnis von 1,34 führen bei einer Annäherung auf ein quaderförmiges Matrix-Element in Formel 6-5 zu einem Querschnitt des Matrix-Elements von ca. 0,0536 mm<sup>2</sup>. Die Annäherung an die Quaderform ist hier, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, legitim.

$$A_M = SD * SD * n_{B/H} \quad \text{Formel 6-5}$$

mit

$A_M$  = Querschnittsfläche des Matrix – Elements

$SD$  = Schichtdicke = 0,2 mm

$n_{B/H}$  = Breite zu Höhe Verhältnis des Tropfens = 1,34

Zur Veranschaulichung der Maße und Variablen in diesem und in den folgenden Kapiteln dient Abbildung 6-9. Dort werden die ausgetragenen Kunststoffropfen quaderförmig dargestellt, auf der linken Seite ohne Faserverstärkung und auf der rechten Seite mit Faserverstärkung. Ebenfalls zu erkennen sind die aus der für den Kunststoff angenommenen Volumenkonstanz resultierenden Längenunterschiede, welche später genauer beschrieben werden.

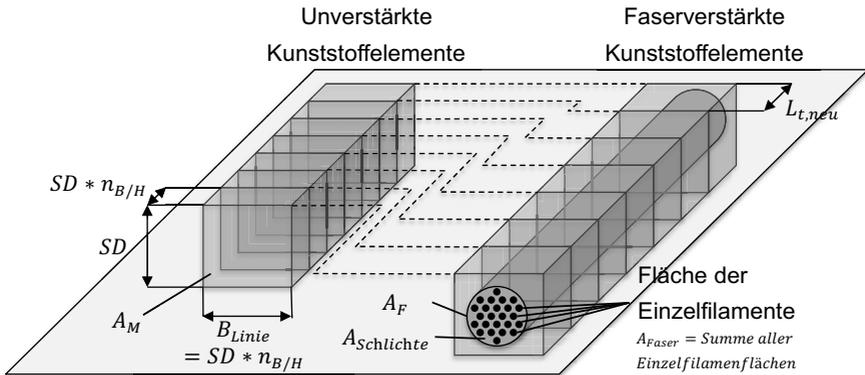


Abbildung 6-9: Darstellung der Maße und Variablen

Wird zudem angenommen, dass der Fasergehalt der Querschnittsfläche eines additiv gefertigten FVK-Elements dem Fasergehalt des Volumens entspricht, so wie es bei einem FVK-Werkstoff üblich ist, kann mit der in (Baumann et al. 2017b) hergeleiteten und beschriebenen Formel 6-6 die benötigte lineare Dichte, also die Tex-Zahl, der zu verwendenden Fasern in Abhängigkeit des gewünschten FVGs berechnet werden.

$$\frac{m_F}{L_F} = A_M * \rho_F * FFG \quad \text{Formel 6-6}$$

mit

$m_F$  = Masse der Verstärkungsfasern

$L_F$  = Länge der Verstärkungsfaser

$\rho_F$  = Dichte der Verstärkungsfasern

$FFG$  = Faserflächengehalt  $\triangleq$  Faservolumengehalt  $\varphi_{Faser}$

Hieraus ergibt sich mit den bereits genannten 0,0536 mm<sup>2</sup> Fläche des Matrix-Elements, der Dichte von Glasfasern von 2,58 g/cm<sup>3</sup> und dem gewünschten Faserflächengehalt bzw. FVG von 25 % ein Längengewicht von ca. 34,5 tex.

Eins entsprechendes Faserhalbzeug ist ein E-Glasfasergarn vom Typ EC9-34Z28, welches ein Längengewicht von 34 tex aufweist. Für die bessere Verarbeitbarkeit wird es am DITF Denkendorf mit Pericoat AC 250 beschichtet, der zusätzliche Auftrag beträgt 12,5 % auf Basis des Fasergewichts.

### 6.2.3.6 Positioniergenauigkeit

Der Messwert für die Positioniergenauigkeit des Moduls ist zum einen dessen Konzentrität zur Düse des freeformers, also die Abweichung in X- und Y-Richtung, zum anderen die Parallelität zwischen Faseraustrag und Fertigungsrichtung, welcher sich als Offset in der C-Achse bemerkbar macht.

#### 6.2.3.6.1 Bestimmung der Konzentrität

Für die erfolgreiche Faserimplementierung ist die Faser so weit in einen Kunststoffropfen zu implementieren, dass diese vom Tropfen vollständig umgeben wird. Eine Abweichung  $R$ , zusammengesetzt aus den Abweichungen in X- und Y-Richtung, beschreibt die Entfernung zwischen dem Zentrum eines Tropfens und dem Zentrum des Garnquerschnitts. Unter der Annahme jeweils perfekter Kreisquerschnitte befinden sich die Zentren somit jeweils bei der Hälfte des Querschnitts. Formel 6-7 beschreibt den Grenzwert für die radiale Abweichung, an dem eine Garneinbringung gerade noch erfolgreich durchgeführt werden kann, indem das Garn gerade nicht seitlich aus dem Tropfen heraussteht.

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} < \frac{\phi_{Tropfen} - \phi_{Garn}}{2} \quad \text{Formel 6-7}$$

mit

$R$  = Radiale Abweichung der Verstärkungsfasern vom Extrusionspunkt des Kunststoffes

$X$  = Abweichung in X – Richtung

$Y$  = Abweichung in Y – Richtung

$\phi_{Tropfen}$ ;  $\phi_{Garn}$  = Durchmesser eines Tropfens, bzw. des Garns

Die Konzentrität des Moduls zur Düse des freeformers wird in Anlehnung an (A\_Sproll 2017, S. 55) eingestellt und gemessen. Die Rotationsachse liegt bei den Koordinaten  $X = -0,014$  mm und  $Y = 0,037$  mm. Die Radiale Abweichung, die sich aus dieser außermittigen Position ergibt, berechnet sich mit Hilfe von Formel 6-7 zu 0,039 mm. Die Fasern würden folglich bei maximaler Ungenauigkeit um 0,039 mm außermittig zur Düse zugeführt werden.

Der Durchmesser des ausgewählten E-Glasfasergarns EC9-34Z28 wird mit Hilfe der Dichte (2,58 g/cm<sup>3</sup>), der tex-Zahl (34 tex) und der dichtesten Kreispackung (= 90,69 %) mit Hilfe von Formel 6-8 berechnet.

$$\phi_{Garn} = 2 * \sqrt{\frac{A_{Faser}}{90,69\% * \pi}} \quad \text{Formel 6-8}$$

mit

$A_{Faser}$  = Querschnittsfläche der Fasern (ohne Schlichte)

und

$$A_{Faser} = \frac{m_F}{L_F} * \frac{1}{\rho_F} \quad \text{Formel 6-9}$$

Hergeleitet in (Baumann et al. 2017b)

Da zuvor die Tropfengeometrie im Bauteil als quaderförmig hergeleitet wurde, ist statt des Tropfendurchmessers mit dessen Breite zu rechnen, welche sich direkt aus der gegebenen Schichtdicke von 0,2 mm und dem ermittelten Formfaktor 1,34 zu 0,268 mm berechnet.

Nach Einsetzen aller Werte wird der Garndurchmesser mit 0,136 mm errechnet. Hierbei wird mit der Querschnittsfläche des Garns ohne Schlichteauftrag gerechnet, da die flüssige Schlichte in die freien Lücken zwischen den Einzelfilamenten fließen kann. In Formel 6-10 wird Formel 6-7 erneut aufgegriffen und die Werte eingesetzt.

$$0,039 \text{ mm} < \frac{\phi_{Tropfen} - \phi_{Garn}}{2} = \frac{0,268 \text{ mm} - 0,136 \text{ mm}}{2} = 0,066 \text{ mm} \quad \text{Formel 6-10}$$

Die durch die Materialauswahl erlaubte radiale Abweichung ist mit 0,066 mm größer als die mit der Zuführeinheit realisierte Abweichung. Die Materialpaarung darf somit ohne eine weitere Optimierung der Positionierung der Zuführeinheit für die weiterführenden Versuche verwendet werden.

### 6.2.3.6.2 Bestimmung des C-Offsets

Um die Winkelabweichung zwischen der 0°-Position des Zuführmoduls und Y-Achse des freeformers, den sogenannten C-Offset, zu ermitteln, werden in (A\_Muthler 2018, S. 52) verschiedene Probekörper in -90° und +90° Orientierung gefertigt und jeweils die Fasern mit verschiedenen Abweichungen um C = -90° und C = 90° implementiert. Im Anschluss wird optisch geprüft, welcher Offset für die C-Achsen-Orientierung zu den besten Ergebnissen geführt hat. In Anlehnung hieran werden die folgenden Werte selbst bestimmt. Der Offset bei -90° beträgt +1°, sodass bei einer Fertigung in -90° Richtung für die C-Achse -89° einzustellen sind. Der Offset bei +90° beträgt ebenfalls

+1°, sodass hier für die C-Achsen-Orientierung 91° einzustellen sind. Der gleiche Offset spricht dafür, dass die Positionierung in X- und Y- Richtung sehr präzise erfolgt ist.

### 6.2.3.7 Anpassung des GCodes

#### 6.2.3.7.1 Anpassung des Kunststoffaustrags an die Verarbeitung von FVK

Da das ausgetragene Kunststoffvolumen je Tropfen durch die Tropfenkennzahl nur manuell einzustellen ist (s. Kapitel 2.2.2.3) und somit nicht durch den GCode variiert werden kann, ist bei der zusätzlichen Implementierung der Verstärkungsfasern eine Kompensation des zusätzlichen Faser-Volumens durch eine entsprechende Reduktion des ausgetragenen Kunststoffvolumens durchzuführen.

Diese Kompensation ist bedingt durch die Art der Fasereinbringung ausschließlich durch die Anpassung des Abstands zwischen den einzelnen Kunststofftropfen in Austragsrichtung und der Abstände der einzelnen Tropfenketten quer zur Austragsrichtung zu erreichen. Eine Veränderung der Abstände zwischen den einzelnen Tropfenketten hätte zur Folge, dass sich die Anzahl der implementierten Verstärkungsfasern ändern würde und somit der FVG insgesamt verändert werden würde. Dieser Parameter ist folglich durch den erforderlichen FVG fest vorgegeben und darf nicht weiter verändert werden.

In Formel 6-11 bis Formel 6-15 wird der Abstand zwischen den einzelnen Kunststofftropfen in Austragsrichtung, welcher für die Implementierung der Fasern nötig ist, in Abhängigkeit des B/H-Verhältnisses  $n_{B/H}$ , der Schichtdicke  $SD$  und des Faserquerschnitts  $A_F$  berechnet. Zur Veranschaulichung wurden die verschiedenen Maße bereits in Abbildung 6-9 dargestellt.

Zunächst wird in Formel 6-11 das gesamte Volumen  $V_{gesamt}$  eines faserverstärkten Tropfens definiert. Zum Volumen des Kunststofftropfens  $V_M$  ist das Volumen der eingebrachten Fasern  $V_F$  zu addieren.

$$V_F + V_M = V_{gesamt} \quad \text{Formel 6-11}$$

mit

$V_F = \text{Faservolumen}$

$V_M = \text{Matrixvolumen}$

$V_{gesamt} = \text{Volumen des FVK} - \text{ELEMENTS}$

Formel 6-12 und Formel 6-13 beschreiben die Berechnung des Faser- und Matrixvolumens. Das Faservolumen berechnet sich direkt aus deren Länge und Querschnittsfläche.

$$V_F = L_F * A_F \quad \text{Formel 6-12}$$

mit

$L_F = \text{Länge der Verstärkungsfasern}$

$A_F = \text{Querschnittsfläche der Verstärkungsfaser (inkl. Schlichte)}$

Das Volumen der Kunststoffropfen  $V_M$  wird mit Hilfe des B/H-Verhältnisses und der Schichtdicke quaderförmig aus Länge ( $n_{B/H} * SD$ ), Breite ( $n_{B/H} * SD$ ) und Höhe ( $SD$ ) des Tropfens angenähert. Da bei der Berechnung des reinen Kunststoffvolumens die Verstärkungsfasern nicht berücksichtigt werden, stimmen die Länge und Breite des Tropfens hier noch überein.

$$V_M = (n_{B/H} * SD)^2 * SD \quad \text{Formel 6-13}$$

Das Volumen der FVK Zelle berechnet sich in Formel 6-14 analog zum Volumen des reinen Kunststoffropfens aus Länge, Breite und Höhe. Als Länge wird hier die gesuchte neue Zell-Länge  $L_{t,neu}$  verwendet, welche den späteren Tropfenabstand längs zur Austragsrichtung wiedergibt.

$$V_{gesamt} = L_{t,neu} * (n_{B/H} * SD) * SD \quad \text{Formel 6-14}$$

mit

$L_{t,neu} = \text{gesuchter Tropfenabstand längs zur Austragsrichtung}$

Einsetzen und Auflösen nach  $L_{t,neu}$  ergibt Formel 6-15, hierbei wird auch  $L_F$  aus Formel 6-12 durch die neue Länge der FVK-Zelle  $L_{t,neu}$  ersetzt.

$$L_{t,neu} = \frac{n_{B/H}^2 * SD^3}{n_{B/H} * SD^2 - A_F} \quad \text{Formel 6-15}$$

Es gilt zu beachten, dass die Querschnittsfläche der Verstärkungsfasern  $A_F$  auch eventuell aufgetragene Bindemittel, Beschichtungen oder in Hybridgarnen vorhandene Kunststoffmatrices umfasst. Weiterhin ist es wahrscheinlich, dass der geschmolzene Thermoplast eine zu hohe Viskosität besitzt, um die Verstärkungsfasern komplett infiltrieren zu können. Somit ist der in Formel 6-15 berechnete Wert als Basis einer Optimierung anzusehen.

### 6.2.3.7.2 Faserförderung

Die Faserförderung wird, wie in Kapitel 6.2.3.4 beschrieben, nicht direkt vom GCode gesteuert, sondern lediglich im GCode gestartet und beendet. Hierfür wird, wie in Abbildung 6-7 dargestellt, mittels der Befehle für den Start der jeweiligen Unterprogramme die digitale I/O Schnittstelle des freeformers angesteuert, welche das Signal für die Förderung der Fasern an den Microcontroller weitergibt. Dieser signalisiert dem Motorcontroller, dass die Förderung starten soll. Die Fördergeschwindigkeit selbst wird im Motorcontroller festgelegt. Mit dem GCode Befehl „T8 U4“ wird das Unterprogramm 4 und damit die Faserförderung gestartet. Mit dem Befehl „T8 U5“ wird die Förderung wieder gestoppt. Die Implementierung der Fasern in das Bauteil erfordert eine mit dem Verfahren und der Verfahrensgeschwindigkeit der Bauplattform synchron erfolgende Faserförderung. Hierbei gilt es die folgenden zwei Fälle zu unterscheiden:

1. einer kontinuierlichen Bewegung der Bauplattform
2. einer diskontinuierlichen Bewegung der Bauplattform (z. B. für Kurven relevant)

#### Fall 1: Gleichmäßige Faserförderung während einer kontinuierlichen Bewegung der Bauplattform

Für die Füllstrukturen werden kontinuierliche Bewegungen verwendet (s. Kapitel 2.2.3). Hier bewegt sich die Bauplattform mit konstanter Geschwindigkeit, während Tropfen auf die bewegte Plattform mit einer definierten Schrittweite abgesetzt werden.

Im Formel 6-16 wird die Berechnung der Faserförderungsgeschwindigkeit auf Basis der Motordrehzahl, der Getriebeübersetzung, des Durchmessers der Förderrolle und eines Korrekturfaktors  $\delta$ , welcher den Schlupf zwischen Faser und Förderrolle sowie die Abweichung des Durchmessers der gummierten Förderrollen durch elastische Verformung wiedergibt, angegeben. Der Korrekturfaktor kann nicht berechnet werden, sondern ist in praktischen Versuchen zu ermitteln.

$$v_{Faser} = n_{Motor} * \frac{1}{i_{Getriebe}} * d_{Förderrolle} * \pi * \delta$$

Formel 6-16

mit

$n_{Motor} = \text{Motordrehzahl} = 21221 \text{ rpm}$

$i_{Getriebe} = \text{Gesamtübersetzung des Getriebes} = 125$

$d_{Förderrolle} = \text{Durchmesser der Förderrolle} = 4,5 \text{ mm}$

$\delta = \text{Korrekturfaktor}$

Der Korrekturfaktor  $\delta$  wird durch Förderversuche bestimmt. Basierend auf der Motordrehzahl 21221 rpm (Umdrehungen pro Minute) für die Faserförderung mit 40 mm/s bei  $\delta = 1$  (schlupffrei) wird die ausgetragene Faserlänge bestimmt. Um keine Abweichung durch das Beschleunigen zu erhalten, wird das Fasergarn während des Austrags am Austrittspunkt getrennt, weiterhin werden für belastbare Ergebnisse jeweils 5 Versuche durchgeführt und das arithmetische Mittel gebildet. Die Faser wird alle 30 Sekunden getrennt, sodass in den Versuchsreihen  $s_{f1}$  bis  $s_{f5}$  jeweils 30 Sekunden lang Fasern ausgetragen werden. Die Ergebnisse werden im Anhang in Tabelle 0-6 aufgelistet.

Der Korrekturfaktor berechnet sich durch die Division des Mittelwerts der Ist-Förderung durch die Soll-Förderung (s. Formel 6-17).

$$\delta = \frac{S_{F,mittel}}{S_{F,soll}} \quad \text{Formel 6-17}$$

mit

$\delta$  = Korrekturfaktor für Schlupf

$s_{F,mittel}$  = Mittlere gemessene ausgetragene Faserlänge

$s_{F,soll}$  = Berechnete ausgetragene Faserlänge

und

$$S_{F,soll} = n_{Motor} * S_u * 1 \text{ min} \quad \text{Formel 6-18}$$

mit

$s_u$  = Pro Motorumdrehung ausgetragene Faserlänge

und

$$S_{F,mittel} = \frac{\sum_{n=1}^5 S_{F,n}}{5} \quad \text{Formel 6-19}$$

mit

$s_{F,n}$  = Ausgetragene Faserlänge bei Versuch „n“

Zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit des Förderungsprozesses wird zudem die jeweilige Standardabweichung  $S_{SF}$  in Prozent berechnet.

$$S_{SF} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^5 (S_{F,n} - S_{F,mittel})^2}{5}}}{S_{F,mittel}} * 100\% \quad \text{Formel 6-20}$$

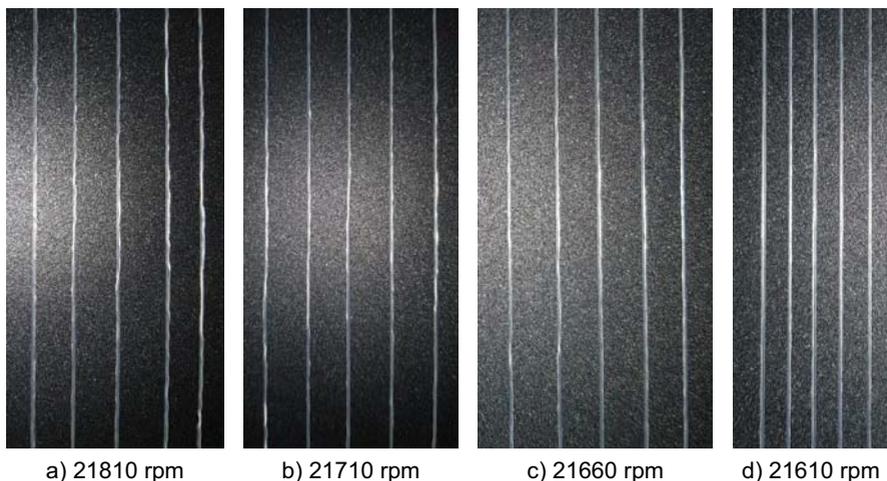
mit

$S_{SF}$  = Standardabweichung der ausgetragenen Faserlänge

Bei einer Standardabweichung der ausgetragenen Faserlängen von 0,25 % ergibt der Korrekturfaktor  $\delta$  den Wert 0,973. Unter Berücksichtigung dieses Korrekturfaktors wird mit Formel 6-16 die erforderliche Motordrehzahl berechnet (21810 rpm). Diese Drehzahl fördert in 30 Sekunden im Schnitt 1201 mm Faserlänge bei einer Standardabweichung von 0,43 % (s. Tabelle 0-6 im Anhang).

Für die Validierung der ermittelten Drehzahl bzw. zur weiteren Feineinstellung werden Fertigungsversuche durchgeführt. Hierfür wird mehrfach eine 10 cm lange Linie mit Faserverstärkung gefertigt.

In folgender Abbildung 6-10 werden die gedruckten FVK-Linien bei verschiedenen Iterationen der Motordrehzahl abgebildet. Bei den Linien mit der Motordrehzahl 21810 rpm ist deutlich zu erkennen, dass der Faseraustrag schneller als die Bauplattformgeschwindigkeit war. Die Fasern stauchen sich leicht auf und bilden keine gerade Linie. Hieraus resultierend wird die Motordrehzahl um 100 rpm auf 21710 rpm verringert. Es ist eine leichte Verbesserung zu erkennen, jedoch bilden die Fasern noch immer keine gerade Linie. Eine weitere Reduktion um 50 rpm auf 21660 rpm verbessert das Ergebnis erneut, jedoch erfolgt erst bei 21610 rpm eine komplett gerade Faserablage.



*Abbildung 6-10: Vergleich der Faserimplementierung bei verschiedenen Motordrehzahlen*

Der Korrekturfaktor  $\delta$  für die Drehzahl 21610 rpm wird in Formel 6-21 (nach Umstellen der Formel 6-16 und Einsetzen der dort genannten Werte) berechnet.

$$\delta = \frac{v_{Faser}}{n_{Motor} * d_{Förderrolle} * \pi} * i_{Getriebe} = 0,982 \quad \text{Formel 6-21}$$

## Fall 2: Faserförderung während des diskontinuierlichen Austrags

Der diskontinuierliche Austrag zeichnet sich, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, durch das Absetzen eines Tropfens auf die stillstehende Bauplattform aus.

Versuche in (A\_Wirth 2018) haben gezeigt, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit beim diskontinuierlichen Austrag stark von der Bewegungsrichtung der Bauplattform abhängt, da sich bei einer simultanen Bewegung in X- und Y-Richtung die Beschleunigungen der beiden Motoren überlagern und somit die einzelnen Positionen unterschiedlich schnell angefahren werden können.

Die in den GCode einzugebenden richtungsabhängigen Verfahrensgeschwindigkeiten der Bauplattform werden experimentell so ermittelt, dass die tatsächliche Durchschnittsgeschwindigkeit immer gleichbleibt. Durch die diskontinuierliche Bewegung können die 40 mm/s Bewegungsgeschwindigkeit der Bauplattform der kontinuierlichen Bewegung nicht erreicht werden, somit wird in (A\_Wirth 2018, S. 36) mit 13,9 mm/s ein neuer Geschwindigkeitswert bestimmt, der jedoch dann in jeder Richtung mit diskontinuierlicher Bewegung im T1-Befehl erreicht wird. Somit ist für eine Faserablage im T1 Befehl eine weitere Motordrehzahl mit Hilfe der Ziel-Austragsgeschwindigkeit von 13,9 mm/s und unter der Berücksichtigung des Schlupfes  $\delta = 0,982$  zu bestimmen. Die Motordrehzahl berechnet sich somit in folgender Formel 6-22 (Formel 6-16 nach  $n_{Motor}$  aufgelöst) zu 7509 rpm.

$$n_{Motor} = \frac{v_{Faser} * i_{Getriebe}}{d_{Förderrolle} * \pi * \delta} * 60 \frac{s}{min} = 7509 \text{ rpm} \quad \text{Formel 6-22}$$

mit

$v_{Faser} = \text{Fördergeschwindigkeit der Fasern} = 13,9 \text{ mm/s}$

$i_{Getriebe} = \text{Gesamtübersetzung des Getriebes} = 125$

$d_{Förderrolle} = \text{Durchmesser der Förderrolle} = 4,5 \text{ mm}$

$\delta = 0,982$

Weiterhin wird in (A\_Wirth 2018, S. 40) beschrieben, dass ab einer Winkeldifferenz der C-Achse von mehr als  $1,5^\circ$  zwischen zwei Punkten, die mit dem T1-Befehl angefahren

werden, die Drehbewegung die Bewegung des Bauteilträgers ausbremst, da die CNC vorgibt, dass alle Ziel-Koordinaten zeitgleich erreicht werden. Somit wird für alle Winkeldifferenzen, die größer als  $1,5^\circ$  sind, der Tropfenaustrag und der Faseraustrag voneinander getrennt, indem abwechselnd ein Punkt und ein kurzes Stück Fasern ausgetragen werden. Im GCode wird dies umgesetzt, indem zwischen dem Aufruf des Unterprogramms U4 (Start der Faser) und dem Aufruf des Unterprogramms U5 (Stopp der Faser) eine 20 ms lange Pause eingelegt wird. Versuche zeigen, dass in diesen 20 ms eine Länge von 0,292 mm Fasern ausgetragen werden, der Faseraustrag kann durch ein Anpassen der Wartezeit später weiter angepasst werden (A\_Wirth 2018, S. 41).

### 6.2.3.8 Layout der Faserimplementierung

Versuche zur Untersuchung verschiedener Layouts der Faserimplementierung an Hand von Zugprobekörper werden in (A\_Müller 2017) und (Baumann et al. 2018) beschrieben. Hierbei stellt sich heraus, dass die besten mechanischen Eigenschaften dann erreicht werden, wenn die FVK-Struktur am äußeren Rand beginnend spiralförmig nach innen gefüllt wird und die FVK-Struktur hierbei möglichst kompakt gehalten wird. Ein Beispiel für dieses Layout wird in Abbildung 6-11 für den Querschnitt P3 dargestellt.

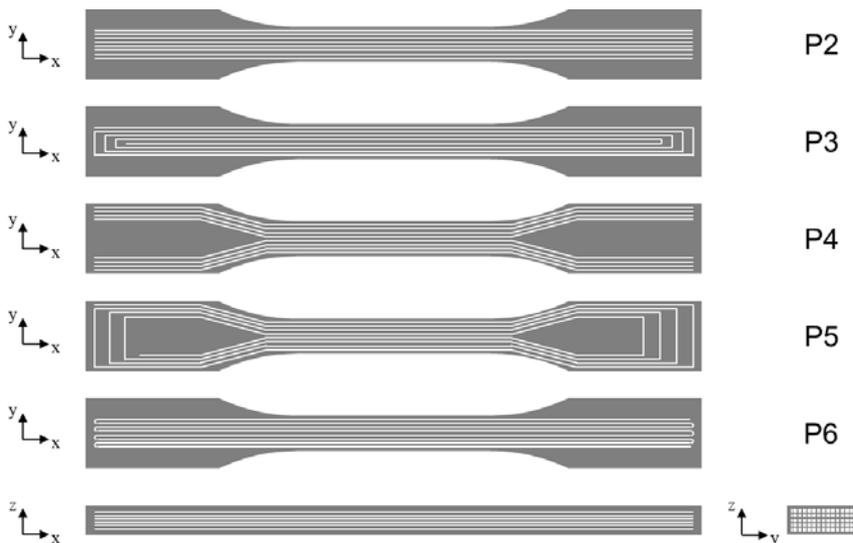


Abbildung 6-11: Faserlayout der verschiedenen Probekörper in Anlehnung an (A\_Muthler 2018, S. 59)

## 6.3 Parameterstudie an UD-Probekörpern

Wie bereits im Lösungsansatz beschrieben wurde, wird für die Parameterstudie an UD-Probekörpern ein methodisches Vorgehen anhand der statistischen Versuchsplanung (DoE) und der Varianzanalyse (ANOVA) verwendet.

Zunächst sind für die statistische Versuchsplanung die zu untersuchenden Zielgrößen zu definieren, um dann mögliche Einflussfaktoren zu bewerten und die relevanten Faktoren auszuwählen. Zudem sind hierbei die Faktorstufen mit einer geeignet großen Differenz zu definieren, wobei diese jedoch in einem realisierbaren Rahmen gehalten werden müssen. Im Anschluss können der Versuchsplan ermittelt und die dafür benötigten Probekörper genau definiert werden.

Damit bei dieser Parameterstudie auch eine Abhängigkeit der einzelnen Faktoren untereinander betrachtet werden kann, ist trotz des größeren Fertigungs- und Messaufwandes ein vollfaktorieller Versuchsplan zu wählen. Der Versuchsplan wird hierbei je Zielgröße auf 3 Faktoren mit jeweils 2 Faktorstufen begrenzt.

Die Probekörper sind in der Folge nach Versuchsplan zu fertigen und die Zielgrößen zu ermitteln. Im Anschluss hieran erfolgen die Auswertungen der einfaktoriellen und mehrfaktoriellen ANOVA.

### 6.3.1 Definition der Zielgrößen

Das Verhalten bei dynamischen Lasten bzw. bei Lastwechselversuchen sind zu diesem Punkt der Entwicklung der Faserzuführung noch uninteressant und können in späteren Arbeiten ermittelt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt folglich auf den statischen Lasten, um überhaupt eine Aussage bezüglich der Belastbarkeit der additiv gefertigten FVK-Teile zu erhalten.

Die in statischen Versuchen ermittelbaren relevanten mechanischen Eigenschaften sind die Grundlastfälle Zug, Druck, Biegung und Torsion. Da Verstärkungsfasern hauptsächlich unter Zugbeanspruchung hervorragende Eigenschaften besitzen, sind erneut der E-Modul und die Zugfestigkeit als erste und zweite Zielgrößen zu definieren. Druckbeanspruchungen sind für FVK wenig relevant und werden somit nicht weiter betrachtet. Die Biegebeanspruchung ist eine Kombination aus Zug- und Druckbeanspruchungen in verschiedenen Bereichen und kann zudem durch die Scherbeanspruchung zwischen den einzelnen Lagen der additiv gefertigten Probekörper weitere interessante

Daten und Informationen bezüglich der Haltbarkeit und des Versagensverhaltens liefern. Da es jedoch schon bei unverstärkten additiv gefertigten Kunststoffen kaum Informationen bezüglich der Biegeeigenschaften oder des Verhaltens unter Biegebeanspruchung gibt, wird aufgrund der fehlenden Vergleichsbasis im Rahmen der Parameterstudie auf die Biegeeigenschaften verzichtet. Um Torsionsbelastungen allgemein gut aufnehmen zu können, müssten die Verstärkungsfasern einem dreidimensionalen Wickelpfad folgen können. Dies ist bei einer rein ebenen Ablage der Fasern jedoch nicht möglich, somit werden auch die Torsionseigenschaften nicht weiter berücksichtigt.

Anhand der Zugprobekörper könnten auch noch die Abmessungen bzw. die Einhaltung der vorgegebenen Bauteilmaße als weitere Eigenschaften ermittelt werden. Allerdings wird die Maßhaltigkeit durch den bei der Zugsteifigkeit und -festigkeit berücksichtigten Querschnitt schon implizit berücksichtigt. Da zudem keine unterschiedlichen Werkstoffe betrachtet werden, ist eine Normierung auf den Querschnitt nicht weiter notwendig. Somit verbleiben als relevante Zielgrößen der E-Modul und die Zugfestigkeit (s. Tabelle 6-2).

*Tabelle 6-2: Zielgrößen und deren Einheiten*

#	Zielgröße	Einheit
1	E-Modul	[MPa]
2	Zugfestigkeit	[MPa]

### **6.3.2 Definition der Einflussfaktoren**

Für die Einflussfaktoren der Untersuchungen sind die Verarbeitungsparameter zu wählen, welche voraussichtlich den größten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Hierfür sind zunächst sämtliche veränderbaren Verarbeitungsparameter zu definieren und deren Einfluss auf die Zielgrößen abzuschätzen, um in der Folge jene Verarbeitungsparameter auszuwählen, die den größten Einfluss erwarten lassen.

#### **6.3.2.1 Analyse der Verarbeitungsparameter**

Mit Hilfe eines Ishikawa Diagramms, welches auf die Anforderungen aus diesem Kapitel angepasst wird, sollen alle relevanten Verarbeitungsparameter, Randbedingungen und Störgrößen ermittelt werden.

Die zu beantwortende Fragestellung wird auf Basis der relevanten Zielgrößen wie folgt formuliert:

„Wie beeinflussen die verschiedenen Faktoren E-Modul und Zugfestigkeit?“

In der Literatur werden viele verschiedene mögliche Ursachen für einen Fehler in einem System definiert, diese sind beispielsweise *Mensch, Maschine, Umwelt, Management, Material, Messung, Methode*, etc. Für eine Versuchsdurchführung an einer prototypischen Maschine werden sinnvollerweise die Ursachen *Mensch, Maschine, Prozess, Umwelt, Material* und *Messung* ausgewählt, da es alleine um die Herstellung und Messung einzelner Probekörper geht.

Der menschliche Einfluss kann für die hier durchzuführenden Versuche vernachlässigt werden, da sowohl die Herstellung als auch die Messung aller Probekörper von einer Person nach einem zuvor fest definierten Vorgehen durchgeführt werden.

Auch die Einflüsse aus der Umwelt können für die hier durchzuführenden Versuche vernachlässigt werden. Einflüsse wie unterschiedliche Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten können sich im freeformer Prozess nicht auswirken, da das zu verarbeitende Material vorgetrocknet und in einem temperierten Bauraum verarbeitet wird. Vor der Messung der Proben ist zudem eine geeignete und über alle Probekörper konstante Konditionierung zu gewährleisten, sodass alle Probekörper bei den gleichen definierten Bedingungen ausgelagert werden.

Die weiteren Ursachen *Prozess, Maschine, Messung* und *Material* sind relevant bzw. können relevante Parameter enthalten und sind folglich näher zu definieren. Ein Überblick über die genannten Ursachen und die einzelnen Variablen ist im Ishikawa Diagramm in Abbildung 6-12 zu finden.

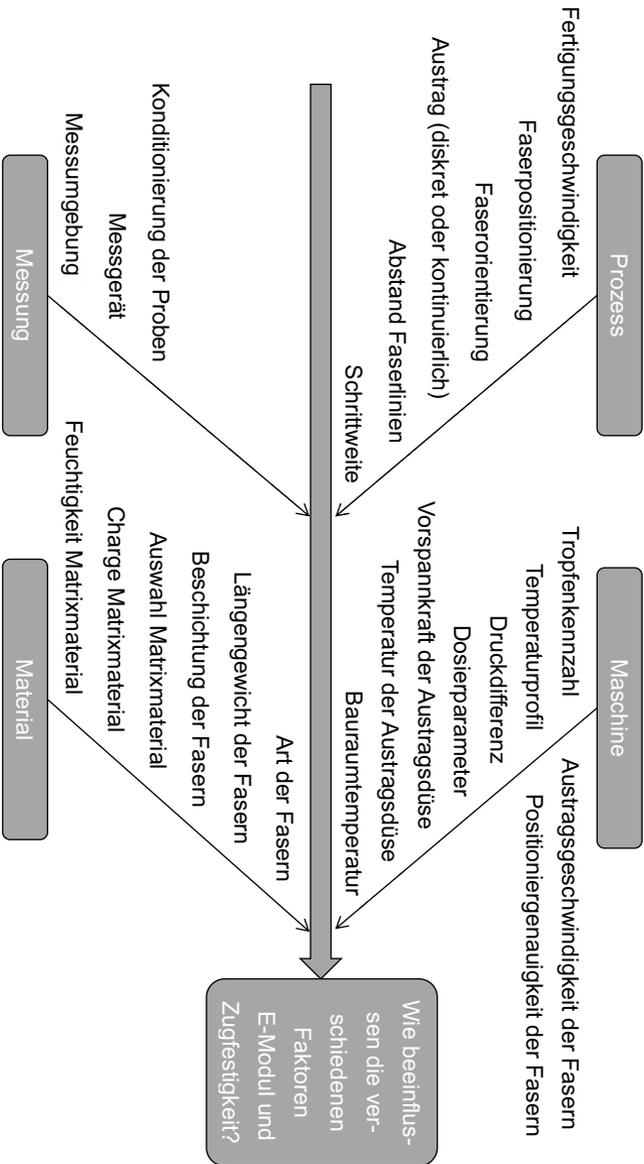


Abbildung 6-12: Ishikawa Diagramm mit den relevanten Ursachen und Parametern

Die in der Ursache *Prozess* beschriebenen Parameter umfassen alle im GCode einstellbaren Parameter. Unter der Ursache *Maschine* werden die Anlagenparameter des freeformers sowie die Parameter der Faserzuführung zusammengefasst. Die Ursache *Messung* umfasst alle für die Messung der Probekörper relevanten Parameter, die Ursache *Material* umfasst die Parameter für Matrix- und Fasermaterial.

In den folgenden Kapiteln werden der tatsächliche Einfluss und die Relevanz des Einflusses der im Ishikawa Diagramm in Abbildung 6-12 genannten einstellbaren Einflussfaktoren bewertet.

### 6.3.2.1.1 Einstellbare Verarbeitungsparameter am freeformer

Die direkt am freeformer einzustellenden Parameter beeinflussen den Austrag des Matrixmaterials und die Generierung des Bauteils. Eine Veränderung der Parameter beeinflusst folglich nicht nur die Fertigung mit Faserverstärkungen, sondern auch der reinen Matrix. Ausgehend von den in Kapitel 6.2.3.5.1 definierten Verarbeitungsparametern sind ausschließlich jene zu wählen, welche einen großen Einfluss auf die Anbindung zwischen Faserverstärkung und Matrix erwarten lassen, gleichzeitig jedoch nicht die Fertigung mit Kunststoff einschränken.

Die folgend aufgelisteten Parameter lassen keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Anbindung zwischen Kunststoff und Fasern erwarten. Sämtliche Werte sind innerhalb eines Bauauftrages nicht veränderbar, sondern werden eingestellt bzw. ständig auf einen konstanten Wert geregelt und wirken sich somit sowohl auf die Fertigung von unverstärkten Kunststoff-Bauteilen als auch auf die Fertigung von verstärkten Bauteilen aus.

- Tropfenkennzahl: Die Tropfenkennzahl gibt das Volumen je Kunststoffropfen wieder, welches jedoch an die gewünschte Fertigungsauflösung anzupassen ist. Eine alleinige Variation der Tropfenkennzahl führt zwingend zu einer Überfüllung oder Unterfüllung des Bauteils und ist deshalb nicht sinnvoll, auch wenn eine gewisse Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften erzielbar wäre.
- Druckdifferenz: Die Druckdifferenz ist die Stellgröße bei der Regelung der Tropfenkennzahl des freeformes und gibt an, um welche Differenz der Druck verändert wird, um die gewünschte Tropfenkennzahl zu erreichen. Je größer die Druckdifferenz ist, desto schneller wird die Tropfenkennzahl auf den Soll-Wert eingeregelt, desto größer sind jedoch auch die Schwankungen um den Sollwert. Der Wert beeinflusst die Konstanz der Bauteilfüllung sowohl in verstärkten als

auch in unverstärkten Bereichen. Da dieser Wert die Regelung der zuvor genannten Tropfenkennzahl beeinflusst und dieser somit unterzuordnen ist, wird maximal eine geringe Abhängigkeit zwischen der Druckdifferenz und den mechanischen Eigenschaften der FVK-Proben erwartet.

- Temperaturprofil des Zylinders: Unter dem Temperaturprofil des Zylinders sind die Temperaturen der verschiedenen Heizzonen zu verstehen. Eine direkte Auswirkung nur auf die mechanischen Eigenschaften der FVK wird nicht erwartet, da erst die Austragsdüse dem ausgetragenen Material die Temperatur gibt, mit welchem es ausgetragen wird und auf Kunststoff oder Verstärkungsfasern trifft.
- Parameter der Dosiereinheit: Die weiteren Parameter der Dosiereinheit, wie die Dosiergeschwindigkeit, der Dosierweg, Staudruck usw. betreffen den Kunststoffaustrag allgemein, somit sowohl verstärkte als auch unverstärkte Bereiche. Die Parameter dienen der optimalen Materialaufbereitung und sollten sich auf die mechanischen Eigenschaften der FVK Proben nur äußerst gering auswirken.
- Vorspannkraft des Piezoaktors: Dies ist die Kraft, mit welcher der Piezoaktor mit der Nadelmembran verspannt wird. Je höher diese Kraft ist, desto größer ist die Schließkraft der Nadelmembran und desto höher muss der Massedruck sein, damit Material ausgetragen werden kann. Für die mechanischen Eigenschaften der Bauteile sollte dieser Wert nicht relevant sein, da der Massedruck so weit erhöht wird, bis die gewünschte Tropfenkennzahl erreicht wird. Durch den höheren Druck und die dadurch auch vergrößerten Scherkräfte beim Kunststoffaustrag kann es jedoch zu einer leichten Degradation des Materials kommen, welche sich eventuell negativ auf Kunststoff- und FVK-Bauteile auswirken kann.
- Z-Offset: Der Z-Offset gibt den Abstand zwischen der Düse und der Bauplattform wieder. Je nach Material und Bauraumtemperatur gibt es unterschiedliche optimale Werte für den Z-Offset. Ist er zu groß eingestellt, haftet das Bauteil nicht richtig auf der Bauplattform, ist er zu niedrig eingestellt, kann das Bauteil eventuell nur schwer von der Bauplattform gelöst werden. Der Z-Offset wirkt sich nur auf die unterste Schicht eines Bauteils aus und hat somit keinerlei Auswirkung auf die in der Regel darüber liegenden FVK-Schichten.

Die folgenden Parameter lassen einen großen Einfluss auf die Anbindung zwischen Kunststoff und Fasern erwarten.

- Temperatur der Austragsdüse: Die Temperatur der Austragsdüse stellt direkt die Temperatur des ausgetragenen Materials ein. Je wärmer der Kunststoff, umso

niedrigviskoser ist er und kann die vorhandenen Fasern voraussichtlich besser infiltrieren und umfließen. Zudem kann ein heißerer Materialaustrag auch bereits erstarrtes Kunststoffmaterial wieder oberflächlich aufschmelzen und somit auch die Anbindung zum bereits vorhandenen Kunststoff verbessern.

- Bauraumtemperatur: Die Bauraumtemperatur gibt die Temperatur der gesamten Fertigungsumgebung wieder. Je höher die Temperatur ist, umso weniger erkaltet das im Bau befindliche Bauteil. Zudem wird weniger Energie benötigt, um bereits erkaltete Bereiche wieder oberflächlich anzuschmelzen, sodass sich eine höhere Bauraumtemperatur positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirken sollte. Weiterhin sind die ausgetragenen Fasern auch wärmer, folglich sollte der Kunststoff später erstarren und somit länger Zeit haben, die Fasern zu infiltrieren und zu umfließen. Eine hohe Bauraumtemperatur sollte folglich zu besseren mechanischen Eigenschaften sowohl für unverstärkte als auch für verstärkte Bauteile führen.

In der folgenden Tabelle 6-3 werden die einstellbaren Parameter des freeformers zusammengefasst und ihre Relevanz bewertet. Ein starker Einfluss wird durch „+“ gekennzeichnet, ein moderater Einfluss durch „0“ und ein geringer Einfluss durch „-“. Zudem ist unter „Einfluss auf FVK“ insbesondere die Anbindung des Kunststoffs an die Fasern zu verstehen. Die Bewertungen sowie die Bezeichnungen gelten genauso für Tabelle 6-4, Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6.

*Tabelle 6-3: Zusammenfassung und Bewertung der einstellbaren Parameter des freeformers*

Parameter	Einfluss auf		Relevanz
	Kunststoff	FVK	
Tropfenkennzahl	0	0	-
Druckdifferenz	-	-	-
Temperaturprofil des Zylinders	0	-	-
Parameter der Dosiereinheit	0	-	-
Vorspannkraft des Piezoaktors	0	-	-
Z-Offset	-	-	-
Temperatur der Austragsdüse	+	+	+
Bauraumtemperatur	+	+	+

### 6.3.2.1.2 Einstellbare Verarbeitungsparameter der Faserzuführung

Die Prozessparameter der Faserzuführung werden in folgender Liste genannt. Diese können die Anbindung zwischen Kunststoff und Faser jedoch voraussichtlich nicht beeinflussen bzw. sind als Einflussfaktor nicht relevant.

- Austragsgeschwindigkeit der Fasern: Die Fördergeschwindigkeit der Verstärkungsfasern ist, wie in Kapitel 6.2.3.7.2 beschrieben, an die Fertigungsgeschwindigkeit anzupassen. Eine zu hohe Fördergeschwindigkeit hat ein Stauchen der Fasern zur Folge und führt zu einer wellenförmigen Faserablage (s. Abbildung 6-10 a). Eine zu niedrige Fördergeschwindigkeit führt zwar zu einer geraden Faserablage und sogar zu einer gewissen Vorspannung der Fasern, jedoch schädigt diese die Vorschubrollen. Die Fördergeschwindigkeit hat somit theoretisch eine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der FVK-Probekörper, jedoch ist nur eine Förderung im Optimum, also synchron zur Fertigungsgeschwindigkeit, gewünscht.
- Positioniergenauigkeit der Fasern: Hierunter ist die Genauigkeit der Faserzuführung auf Basis der Zuführeinheit zu verstehen. So lange die Fasern, wie bereits zuvor beschrieben, komplett vom ausgetragenen Kunststoff getroffen bzw. infiltriert und umhüllt werden, hat die Genauigkeit keine weitere Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der FVK-Proben.

In der folgenden Tabelle 6-4 werden die einstellbaren Parameter der Faserzuführung nochmals zusammengefasst und bewertet.

*Tabelle 6-4: Zusammenfassung und Bewertung der einstellbaren Parameter der Faserzuführung*

Parameter	Einfluss auf		Relevanz
	Kunststoff	FVK	
Austragsgeschwindigkeit der Fasern	-	+	-
Positioniergenauigkeit der Fasern	-	0	-

### 6.3.2.1.3 Einstellbare Verarbeitungsparameter im GCode

Die im GCode eingestellten Parameter beeinflussen das zu fertigende Bauteil direkt, da alle Parameter, welche die Geometrie oder die Fertigungsgeschwindigkeit beeinflussen, enthalten sind.

Die folgenden Parameter lassen keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Anhaftung zwischen Kunststoff und Fasern erwarten.

- **Fertigungsgeschwindigkeit:** Die Fertigungsgeschwindigkeit, also der F Parameter im GCode, gibt die Verfahrgeschwindigkeit während den verschiedenen Fahrbewegungen, also auch beim Materialaustrag wieder. Zu beachten ist, dass die Fördergeschwindigkeit der Verstärkungsfasern der Fertigungsgeschwindigkeit entsprechen muss, damit weder eine Stauchung der Fasern noch ein Herausziehen der Fasern aus der Austragseinheit auftritt. So lange beide Geschwindigkeiten gleich groß sind, sollte sich die Fertigungsgeschwindigkeit nicht auf die Bauteilqualität und die mechanischen Eigenschaften auswirken.
- **Faserpositionierung:** Die Faserpositionierung bestimmt die X-, Y-, und Z-Koordinaten des Faseraustrags. Solange die in Kapitel 6.2.3.6.1 definierte Grundvoraussetzung gilt, dass die Fasern vollständig vom ausgetragenen Material eingeschlossen werden können, ist keine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften zu erwarten.
- **Faserorientierung:** Die Faserorientierung gibt den Winkel der C-Achse wieder, unter welchem die Verstärkungsfasern dem Fertigungsprozess zugeführt werden. Hierbei gilt, ebenso wie für die zuvor genannte Faserpositionierung, dass, solange die Fasern vollständig implementiert sind, keine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften zu erwarten ist. Zu beachten ist hierbei, dass der Winkel der C-Achse nicht den Winkel wiedergibt, in welchem die Fasern im Bauteil implementiert werden, dieser wird allein durch die Bewegungsrichtung der Bauplattform realisiert. Die Positionierung der C-Achse stellt hierbei nur sicher, dass die Zuführeinheit so orientiert ist, dass die Fasern korrekt, d.h. parallel zur Bewegungsrichtung der Bauplattform, zugeführt werden können.
- **Diskreter oder kontinuierlicher Tropfenaustrag:** Die Wahl des diskreten oder kontinuierlichen Tropfenaustrags sollte keine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der Probekörper haben, vorausgesetzt, dass die Fördergeschwindigkeit der Fasern an die jeweilige Austragsart der Tropfen angepasst ist.

Die folgenden Parameter wirken sich voraussichtlich stark auf die Anhaftung zwischen Kunststoff und Fasern aus.

- Abstand der einzelnen Faserlinien zueinander: Durch den Abstand der einzelnen Faserlinien wird indirekt der FVG bestimmt, welcher an dieser Stelle jedoch nicht zu untersuchen ist. Wichtig ist hier, herauszufinden, wie nah man die Fasern aneinanderlegen kann, sodass sie trotzdem noch eine gute Anbindung zwischen den einzelnen Schichten und das vollständige Umfließen der Fasern erlauben. Ein zu geringer Abstand könnte in einem unvollständigen Umfließen resultieren und damit die Anbindung zwischen den einzelnen Ebenen stark einschränken. Um den Abstand zwischen den einzelnen Faserlinien zu variieren, ohne dass dies in einer Überfüllung oder Unterfüllung des Bauteils resultiert, muss zudem die Schrittweite im korrekten Maß angepasst werden.
- Schrittweite: Die Schrittweite gibt den Abstand der einzelnen Tropfen innerhalb einer T2-Austragslinie wieder. Wird die Schrittweite zu gering gewählt, führt dies zu einer Überfüllung des Bauteils, wird die Schrittweite zu weit gewählt, zu einer Unterfüllung. In beiden Fällen werden die mechanischen Eigenschaften des Bauteils stark beeinflusst.

In folgender Tabelle 6-5 werden die einstellbaren Prozessparameter aus dem GCode nochmals zusammengefasst und bewertet.

*Tabelle 6-5: Zusammenfassung und Bewertung der einstellbaren Prozessparameter des GCodes*

Parameter	Einfluss auf		Relevanz
	Kunststoff	FVK	
Fertigungsgeschwindigkeit	-	-	-
Faserpositionierung	-	-	-
Faserorientierung	-	-	-
Diskreter oder kontinuierlicher Tropfenaustrag	-	-	-
Abstand der einzelnen Faserlinien zueinander	-	+	+
Schrittweite	+	+	+

#### 6.3.2.1.4 Weitere einstellbare Parameter und Störgrößen

Weitere einstellbare Parameter und Störgrößen, welche nicht im direkten Zusammenhang mit der Anlage (freeformer und Faserzuführung) und dem Prozess (GCode) stehen, werden in der Folge aufgelistet.

- **Eigenschaften des Matrixmaterials:** Die hauptsächlich variablen Parameter in Bezug auf das Matrixmaterial sind die Wahl des Materials an sich, die Charge des Materials und die Materialfeuchte. Das zu verwendende Material wurde bereits in Kapitel 6.2.3.5.1 definiert und ist innerhalb der Versuche natürlich nicht zu verändern. Da keine chargenabhängigen Materialdatenblätter vorliegen, sind alle Versuche mit der gleichen Materialcharge durchzuführen. Die Feuchtigkeit des Materials ist in der Regel von der Umgebung abhängig und kann somit im Tages- und Wochenverlauf bei der Probenherstellung schwanken. Aus diesem Grund wird das gesamte Material vor der Verarbeitung nach Vorgabe im Datenblatt 4 Stunden bei 80 °C getrocknet und auch während der Verarbeitung durch das am freeformer installierte Trockengerät trocken gehalten. Alle drei Punkte könnten somit einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der FVK-Probekörper haben, durch die beschriebenen Maßnahmen wird der tatsächliche Einfluss jedoch geringgehalten.
- **Eigenschaften des Fasermaterials:** Wie auch beim Matrixmaterial bildet zunächst die Art des Materials (Glasfaser, Kohlenstofffaser, etc.) und das Längengewicht (tex-Zahl) die erste Variable. Durch die Auswahl in Kapitel 6.2.3.5.2 ist dies bereits definiert und innerhalb der Versuche nicht zu verändern. Eine weitere Variable ist die Beschichtung des Fasermaterials. Die ebenfalls in Kapitel 6.2.3.5.2 beschriebene Beschichtung der Fasern mit Pericoat AC 250 ist für die Versuche zu verwenden und nicht zu variieren. Die Art, Menge und Beschichtung der Fasern sollte somit eine große Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften der Probekörper haben, erhält jedoch durch die genannten Vorkehrungen eine nur geringe Relevanz.
- **Messungen:** Die Einfluss- bzw. Störgrößen im Bereich der Messung der Materialeigenschaften stellen die Konditionierung der Proben, die Messgeräte und die Messumgebung dar. Die letzten beiden Punkte können bei länger auseinander liegenden Messungen einen Einfluss haben, welcher aufgrund der Bedingungen im Prüflabor (Klimatisierung nach Norm und Anlagenwartung nach Norm) jedoch

vernachlässigbar bzw. nicht vorhanden sein sollte. Die Konditionierung der Probekörper kann vor allem bei der Aufnahme von Wasser eine Rolle spielen, aber auch nur bei einer unterschiedlichen Lagerung. Die Probekörper sind folglich alle auf dieselbe Weise in einer trockenen Umgebung zu lagern, sodass aus dem Bereich der Messungen keine Auswirkungen auftreten sollten.

In folgender Tabelle 6-6 werden die weiteren Prozessparameter und Störgrößen zusammengefasst und bewertet.

*Tabelle 6-6: Zusammenfassung und Bewertung der weiteren Prozessparameter und Störgrößen*

Parameter	Einfluss auf		Relevanz
	Kunststoff	FVK	
Eigenschaften des Matrixmaterials	+	+	-
Eigenschaften des Fasermaterials	-	+	-
Messungen	0	0	<b>0</b>

### 6.3.2.2 Ermittlung der prozessrelevanten Einflussfaktoren und Prozessparameter

Die größte Relevanz der Prozessparameter liegt bei der Temperatur der Austragsdüse und des Bauraums und der Kombination aus dem Abstand der einzelnen Faserlinien zueinander sowie der Schrittweite innerhalb einer Linie. Diese Werte sind somit für die Parameterstudie zu berücksichtigen.

In der Einleitung zu Kapitel 6.3 wurde bereits die Anzahl der zu untersuchenden Faktorstufen auf zwei festgelegt. Die Werte für die Stufen der Austragsdüsentemperatur ergeben sich aus dem Verarbeitungsdatenblatt des Matrixmaterials Terluran GP35. Die empfohlene Verarbeitungstemperatur beträgt 230 °C, die maximale Verarbeitungstemperatur beträgt 260 °C. Da zuvor bereits beschrieben wurde, dass eine höhere Temperatur vermutlich eine bessere Anbindung der Matrix an die Fasern ermöglichen sollte, wird keine weitere Stufe unterhalb der empfohlenen 230 °C gewählt. Die Werte werden somit als kleinste und größte Faktorstufe gewählt und in Tabelle 6-7 aufgelistet.

*Tabelle 6-7: Faktorstufen für die Temperatur der Austragsdüse*

Faktorstufe	-1	+1
Temperatur der Austragsdüse	230 °C	260 °C

Die verschiedenen Faktorstufen der Bauraumtemperatur werden durch Erfahrungswerte definiert. Unterhalb von 60 °C Bauraumtemperatur ist die Anhaftung des ausgetragenen Kunststoffes an der Bauplattform mangelhaft und es kommt sehr schnell zum Ablösen der Bauteile. Auch bei 60 °C kann dieser Effekt vereinzelt auftreten, vor allem, wenn die Temperatur des ausgetragenen Kunststoffes nur 230 °C beträgt. Hier kann eine Verringerung des Z-Offsets evtl. Abhilfe leisten. Die theoretisch maximal erreichbare Bauraumtemperatur des freeformers beträgt 100 °C. Dieser Wert konnte aufgrund des im Bauraum implementierten Moduls zur Faserzuführung nie erreicht werden, da der Bauraum wegen der Zuführung der Kabel und der Faser nicht mehr dicht ist und somit die Hitze nach außen getragen wird bzw. Kaltluft in das System gerät. Die maximale Fertigungstemperatur, welche innerhalb von 30 Minuten erreicht und dann dauerhaft gehalten werden kann, beträgt 80 °C. Minimum und Maximum der Faktorstufen sind folglich mit 60 °C und 80 °C festgelegt, die Werte werden in Tabelle 6-8 aufgelistet.

*Tabelle 6-8: Faktorstufen für die Temperatur des Bauraums*

Faktorstufe	-1	+1
Temperatur des Bauraums	60 °C	80 °C

Der Abstand der Faserlinien und die Schrittweite innerhalb der Faserlinie sind direkt voneinander abhängig, damit eine optimal gefüllte Probe hergestellt werden kann. Der Abstand zwischen den einzelnen Linien mit Fasern ist dabei mit der Linienbreite gleichzusetzen und wirkt sich direkt auf den FVG innerhalb der Linie aus, da die Querschnittsfläche der Fasern gleich bleibt, die Querschnittsfläche des Kunststoffes jedoch durch die reduzierte Breite bei gleicher Schichtdicke reduziert wird. Um weiterhin die Volumenkonstanz innerhalb der Linie auch bei veränderter Linienbreite zu gewährleisten, wird die Schrittweite, also der Abstand der einzelnen Tropfen innerhalb einer Linie, entsprechend der Linienbreite angepasst. Beide Parameter werden somit zu dem Faktor „lokaler FVG“ zusammengefasst.

Die realisierbaren lokalen Faservolumengehalte sind von einer sinnvollen und realisierbaren Wahl der Linienbreite und des Tropfenabstands abhängig, sodass dies bei der Wahl zu berücksichtigen ist. Zunächst sind der lokale FVG, die Linienbreite und der Tropfenabstand in eine direkte mathematische Abhängigkeit zu bringen, um im Anschluss daran die genauen Werte zu ermitteln.

Hierzu werden erneut Formel 6-11 bis Formel 6-15 verwendet. Lediglich Formel 6-14 wird angepasst, sodass nun die Tropfenbreite nicht mehr durch das Aspektverhältnis

konstant gegeben ist, sondern wie in folgender Formel 6-23 als variable Breite definiert wird.

$$V_{gesamt} = L_{t,neu} * B_{Linie} * SD \quad \text{Formel 6-23}$$

mit

$B_{Linie}$  = variable Breite der Tropfenlinie

Eine grafische Darstellung der Variablen wurde bereits in Abbildung 6-9 gezeigt. Damit sinnvollerweise direkt der zu realisierende lokale FVG ausgewählt werden kann, sind die Breite der Tropfenlinie  $B_{Linie}$  und der Tropfenabstand innerhalb der Linie  $L_{t,neu}$  davon abhängig anzugeben. Hierfür wird zunächst in Formel 6-24 über die direkte Definition des FVGs einer FVK-Linie die Abhängigkeit zwischen dem lokalen FVG und der Linienbreite ermittelt. Es ist zu beachten, dass das im Nenner gegebene Volumen durch die Angabe der gesamten Linienbreite und Schichtdicke nicht nur das Kunststoffvolumen, sondern auch das Volumen von Fasern und Schlichte beinhaltet.

$$\varphi_{Faser} = \frac{V_{Faser}}{V_{gesamt}} = \frac{L_{t,neu} * A_{Faser}}{L_{t,neu} * B_{Linie} * SD} \quad \text{Formel 6-24}$$

mit

$A_{Faser}$  = Querschnittsfläche der Fasern (ohne Schlichte)

Kürzen der Formel 6-24 und Auflösen nach  $B_{Linie}$  ergibt Formel 6-25, in welcher nun die Linienbreite in Abhängigkeit des FVGs gegeben ist.

$$B_{Linie} = \frac{A_{Faser}}{\varphi_{Faser} * SD} \quad \text{Formel 6-25}$$

Einsetzen von Formel 6-13 und Formel 6-25 in Formel 6-11 ergibt nach Auflösen analog zu Formel 6-15 folgende Formel 6-26, mit welcher der gesuchte Tropfenabstand  $L_{t,neu}$  in direkter Abhängigkeit zur Linienbreite  $B_{Linie}$  und damit auch in Abhängigkeit zum lokalen FVG berechnet wird. Zudem wird in Ergänzung zu Formel 6-15 die Querschnittsfläche des Faserhalbezugs  $A_F$  genauer durch die Summe aus den Querschnittsflächen des eigentlichen Faserwerkstoffs  $A_{Faser}$  und der darauf vorhandenen Schlichte spezifiziert.

$$L_{t,neu} = \frac{n_{B/H}^2 * SD^3}{B_{Linie} * SD - (A_{Faser} + A_{Schlichte})} \quad \text{Formel 6-26}$$

mit

$A_{Schlichte}$  = Querschnittsfläche der auf der Faser aufgetragenen Schlichte

Nachdem die Linienbreite und der Tropfenabstand innerhalb einer Linie mit Formel 6-25 und Formel 6-26 in eine direkte mathematische Abhängigkeit gebracht worden sind, sind die Faktorstufen des lokalen FVGs zu definieren. Mit Hilfe der genannten Formeln lässt sich berechnen, dass bei einem lokalen FVG von ca. 20 % die Linienbreite und der Tropfenabstand in etwa gleich sind. Bei einem um 5 % geringeren lokalen FVG ist die Linienbreite jedoch schon bereits mehr als doppelt so groß wie der Tropfenabstand. Bei einem um 5 % größeren lokalen FVG ist der prozentuale Unterschied zwischen Linienbreite und Tropfenabstand nicht ganz so groß. In der Folge werden die Faktorstufen wie in Tabelle 6-9 festgelegt und die zugehörigen Werte für Linienbreite und Tropfenabstand direkt aufgelistet. Der lokale FVG beschreibt an dieser Stelle den Gehalt der Fasern in den zu fertigenden FVK-Elementen. Durch Grund-, Rand-, und Deckschichten stellt sich für ein ganzes Bauteil global gesehen ein niedrigerer FVG ein.

*Tabelle 6-9: Werte für Faservolumengehalt, Linienbreite und Tropfenabstand*

Faktor	Faktorstufe	
	-1	+1
Faservolumengehalt	15 %	25 %
Linienbreite	0,439 mm	0,264 mm
Tropfenabstand	0,202 mm	0,399 mm

### 6.3.3 Versuchsplan

Die Auswirkung der in Tabelle 6-7 bis Tabelle 6-9 genannten Einflussfaktoren (Düsen-temperatur, Bauraumtemperatur, lokaler Faservolumengehalt) ist für die Faktorstufen -1 und +1 mit Hilfe eines vollfaktoriellen Versuchsplans zu prüfen (1 bis 8 in Tabelle 6-10). Hierbei sollen für jede Parameterkombination 6 Probekörper gefertigt werden. Laut DIN EN ISO 527-1 werden mindestens 5 Proben gefordert, somit wären bei einer eventuellen Ausschuss-Probe weiterhin genügend Probekörper für die statistische Auswertung vorhanden. Die folgende Tabelle 6-10 zeigt den Versuchsplan.

Tabelle 6-10: Versuchsplan

Probenreihe	Düsentemperatur		Bauraumtemperatur		Lokaler FVG	
	Faktor- stufe	Wert	Faktor- stufe	Wert	Faktor- stufe	Wert
1	-1	230 °C	-1	60 °C	-1	15 %
2	-1	230 °C	-1	60 °C	1	25 %
3	-1	230 °C	1	80 °C	-1	15 %
4	-1	230 °C	1	80 °C	1	25 %
5	1	260 °C	-1	60 °C	-1	15 %
6	1	260 °C	-1	60 °C	1	25 %
7	1	260 °C	1	80 °C	-1	15 %
8	1	260 °C	1	80 °C	1	25 %

Zur Unterscheidung der FVK- Proben von den unverstärkten Proben wird bei einem Hinweis auf die FVK-Probenreihe vor der Reihennummer noch ein F (für „Faser“) genannt. Die einzelnen Probekörper der Probenreihen werden durchnummeriert. Die Benennung einer bestimmten Probe setzt sich somit aus einem F für eine FVK-Probe oder gar keinem Buchstaben, der Nummer der Probenreihe und davon mit einem Punkt getrennt der Nummer des Probekörpers innerhalb der Probenreihe zusammen, z.B. F2.4 für die vierte FVK-Probe der zweiten Probenreihe.

Damit eine eventuelle Drift in den Ergebnissen, basierend auf sich verändernden Randbedingungen während der Probekörperherstellung, nicht versehentlich den veränderten Parameterkombinationen zugeordnet wird, werden die Probekörper in einer zufälligen Reihenfolge hergestellt.

### 6.3.4 Beschreibung der Zugprobekörper

Wie zuvor beschrieben, ist unter anderem die Auswirkung des lokalen FVGs auf die Faser-Matrix-Anbindung zu prüfen. Hierbei ist jedoch nicht der globale FVG im Probenquerschnitt, sondern der FVG einer einzelnen additiv gefertigten FVK-Linie gemeint. Würde man den globalen FVG der gesamten Probe ändern, würden sich naturgemäß auch die ermittelten mechanischen Eigenschaften stark ändern und man könnte keine Unterscheidung mehr treffen, wie viel dieser Änderung auf die größere Anzahl an Fasern und wie viel auf die engere Ablage der Fasern zurückzuführen ist.

Aus diesem Grund wird die Anzahl der Fasern im Probenquerschnitt über alle Proben hinweg konstant gehalten und nur der Abstand zwischen den Faserlinien und der daraus resultierende Tropfenabstand innerhalb einer Faserlinie verändert, die Werte wurden bereits in Tabelle 6-9 aufgeführt.

Als Probekörper wird, wie bei FVK-Proben üblich, eine quaderförmige Geometrie verwendet. Um eine Vergleichbarkeit zu unverstärkten Kunststoffproben zu erhalten, wird die Geometrie an die taillierten Zugprobekörper nach DIN EN ISO 527-2 1BA angelehnt und weisen somit im Messbereich den gleichen Querschnitt wie die Norm-Körper auf. Das Layout der Faserablage wird entsprechend dem Layout der Probe P3 aus Kapitel 6.2.3.8 übernommen. Die Maße und das grundlegende Faserlayout der Zugprobekörper werden in folgender Abbildung 6-13 dargestellt, hierbei stellen die weißen Linien die FVK-Linien im einbettenden Kunststoff (grau) dar.

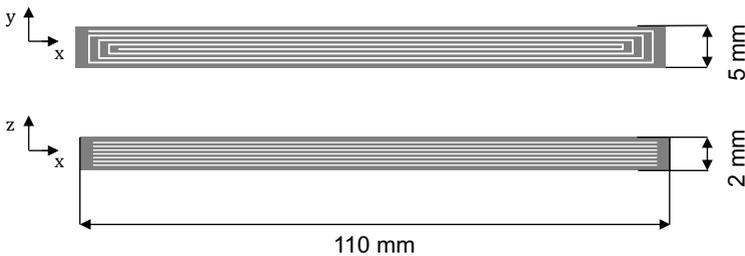


Abbildung 6-13: Maße und Faserlayout der Zugprobekörper

Zusätzlich zum grundlegenden Faserlayout ist die genaue Anzahl der zu verstärkenden Schichten zu berücksichtigen, wobei die Höhe der einzelnen Schichten mit 0,2 mm bereits definiert wurde. Für die FVK-Probekörper wird zum Zweck der besseren Anhaftung an der Bauplattform eine faserfreie Grundsicht verwendet. Um das Verstärkungslayout symmetrisch zu halten, wird zudem auch eine faserfreie Deckschicht verwendet. Die verbliebenen 8 Schichten der 2 mm dicken Probe sind mit Faserverstärkungen zu versehen. Die Anzahl der pro Schicht verwendeten Fasern ergibt sich aus den in Tabelle 6-9 aufgeführten Werten und der gesamten Probenbreite. Zudem ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich zu den Linien mit Faserverstärkungen noch eine Umrandung nur mit Matrixwerkstoff zu fertigen ist, um eine definierte Randschicht mit einer gleichmäßigen Beschaffenheit ohne eventuell herausstehenden Fasergarnen oder Einzelfilamenten zu gewährleisten.

Die Anzahl der in einer Ebene des Probekörpers zu verwendenden FVK-Linien lässt sich mit Hilfe von Formel 6-27 berechnen. Hierbei wird für die Berechnung der Faseranzahl der Probekörper mit dem geringsten lokalen FVG einer FVK-Linie gewählt, da hier die größten Abstände zwischen den einzelnen FVK-Linien bestehen und somit dieser Probekörper bei vollständiger Füllung die geringste Anzahl an Fasern aufweist. Dabei ist die geforderte unverstärkte Randstruktur (einmal je Seite) und der geforderte Überlapp von 25 % zwischen Füllbereich und Randstruktur zu berücksichtigen, was zu einer Reduktion der zur Verfügung stehenden Probenbreite von  $2 * 0,75 * \text{unverstärkter Linienbreite}$  führt.

$$n_{\text{Fasern}} = \frac{B_{\text{Probekörper}} - 2 * 0,75 * n_{\text{B/H}} * SD}{B_{\text{Faserlinie}}} \quad \text{Formel 6-27}$$

mit

$n_{\text{Fasern}}$  = Anzahl an Faserlinien pro Ebene

$B_{\text{Probekörper}}$  = Breite des Probekörpers

$B_{\text{Faserlinie}}$  = Breite der Faserlinie, bzw. Abstand der Faserlinien

Mit der Probenbreite von 5 mm, dem B/H-Verhältnis von 1,34, der Schichtdicke von 0,2 mm und der aus Tabelle 6-9 gewählten Linienbreite für die Faktorstufe -1 des lokalen FVGs von 0,439 mm berechnet sich die Anzahl der FVK-Linien pro Ebene zu 10,47, was auf 10 abgerundet wird.

Bei Probekörpern mit einem höheren FVG innerhalb der FVK-Linie sitzen diese Linien automatisch enger zusammen, sodass eine freie Fläche zwischen FVK-Bereich und Umrandungslinie entsteht. Diese ist mit der unverstärkten Kunststoffmatrix aufzufüllen, zudem ist darauf zu achten, dass der Verstärkungsbereich mittig in jeder Ebene angeordnet ist, sodass der Probenaufbau weiterhin symmetrisch bleibt.

Für Probekörper mit der Faktorstufe +1 des lokalen FVGs berechnet sich die zu verstärkende Breite mit der zugehörigen Linienbreite (0,264 mm) aus Tabelle 6-9 zu 2,64 mm. Die restliche Breite wird durch unverstärkte UD-Linien gefüllt. Die Anzahl dieser Linien berechnet sich wie in folgender Formel 6-28 beschrieben.

$$n_{\text{K-Linien}} = \frac{B_{\text{Probekörper}} - 2 * 0,75 * n_{\text{B/H}} * SD - 2,64\text{mm}}{n_{\text{B/H}} * SD} \quad \text{Formel 6-28}$$

mit

$n_{\text{K-Linien}}$  = Anzahl an unverstärkten Kunststofflinien pro Ebene

Mit den zuvor genannten Werten ergibt sich die Anzahl der unverstärkten Kunststofflinien, welche zu den FVK-Linien und den Randkonturen hinzukommen zu 7,3. Dies wird aufgrund der Forderung nach einem symmetrischen Probenaufbau auf 8 Linien aufgerundet, sodass von außen nach innen zur Mittellinie nacheinander erst eine Randkontur, dann 4 unverstärkte Kunststofflinien und dann 5 FVK Linien folgen.

In folgender Abbildung 6-14 ist das Layout der zu implementierenden Faserverstärkung für die zwei zu realisierenden lokalen Faservolumengehalte im horizontalen Probenquerschnitt dargestellt. Der Spiralverlauf wurde bereits in Abbildung 6-13 dargestellt. Die schwarzen durchgehenden Linien stellen die Randkonturen dar, die schwarzen gestrichelten Linien die Fülllinien aus Kunststoff und die weißen Linien die FVK-Pfade. Wie zuvor beschrieben, ist die Anzahl der Fasern (weiße Linien) in beiden Probenarten gleich, in der Stufe +1 liegen diese nur enger zusammen, um den lokal höheren FVG bei einem global gleichbleibenden FVG zu realisieren.

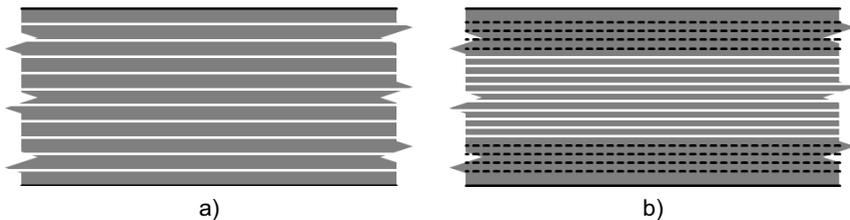


Abbildung 6-14: a) Horizontaler Querschnitt der Probekörper für die Faktorstufen -1 und b) +1 des Faservolumengehalts

### 6.3.5 Herstellung der Probekörper

Die Zugprobekörper werden entsprechend des in Kapitel 6.3.3 beschriebenen Versuchsplans in beliebiger Reihenfolge hergestellt, die genaue Reihenfolge kann (A\_Zhu 2018) entnommen werden. Parallel zu den FVK-Probekörpern wird jeweils ein unverstärkter Probekörper gefertigt, dessen GCode aus der Standard-Datenaufbereitung des freeformers stammt. Für unverstärkte Zugproben wird eine taillierte Form in Anlehnung an DIN EN ISO 527-2 1BA gewählt (Höhe 2 mm, verlängerte Einspannflächen aufgrund Einschränkungen bei der Einspannung in die Prüfmaschine). Folgende Fehler sind laut (A\_Zhu 2018) während der Fertigung der FVK-Probekörper aufgetreten:

- Ablösen einzelner Bauteile von der Bauplattform bei Probenreihe 1.
- Wickeln der Fasern um die Vorschubrolle bei verschiedenen Probenreihen

Da das Ablösen von der Bauplatzform bei der Fertigung der ersten Probe aus Reihe 1 auch nach mehreren Versuchen immer wieder auftritt, wird nur für diese Probenreihe der Offset von  $-0,2$  mm auf  $-0,25$  mm reduziert, um so eine bessere Anbindung der Probekörper zu realisieren.

Das Wickeln der Fasern um die Vorschubrollen ist insgesamt vier Mal aufgetreten (A\_Zhu 2018, S. 77). Eine Zuordnung zu einer bestimmten Probenreihe oder einem bestimmten Einflussfaktor ist nicht erkennbar. Aus diesem Grund wurde jedes Mal, wenn sich die Fasern um die Vorschubrollen gewickelt haben, die Fertigung der Probekörper abgebrochen und neu gestartet. Mögliche Lösungsansätze für das Umwickeln der Vorschubrollen werden in Kapitel 7.2.1 ermittelt und diskutiert.

Bei der gleichzeitigen Fertigung der unverstärkten Probekörper sind keine Fehler aufgetreten, hieraus kann folglich geschlossen werden, dass sich die parallele Fertigung einer FVK-Probe und eines weiteren Bauteils gegenseitig nicht behindern. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine Kleinserienfertigung, wenn mehrere Bauteile gleichzeitig zu fertigen sind.

### **6.3.6 Ermittlung der Probeneigenschaften**

Die zu ermittelnden Eigenschaften der Probekörper wurden bereits in Tabelle 6-2 genannt, sie lauten E-Modul und Zugfestigkeit.

Die Maße der Probekörper (nötig für die Ermittlung der Spannungen) werden mit einem digitalen Messschieber, welcher eine Auflösung von  $0,01$  mm und eine Genauigkeit von  $\pm 0,02$  mm besitzt, ermittelt.

Die Durchführung der Zugversuche erfolgt anhand der Norm (DIN EN ISO 527-1). In den folgenden Unterkapiteln werden der Versuchsaufbau, die Versuchsergebnisse und das Versagensverhalten beschrieben bzw. die gewählten Parameter für die Versuchsdurchführung genannt und deren Wahl erläutert.

#### **6.3.6.1 Ermittlung der Zug-Eigenschaften**

Vor den Zugversuchen werden die Probekörper alle gleich vorbehandelt, indem sie zusammen über eine Dauer von 48 Stunden bei Raumtemperatur mit Hilfe von Silica getrocknet wurden. Die Zugversuche werden an einer Universalprüfmaschine Zwick & Röll ZMart.Pro mit einer 200 kN Kraftmessdose, einer MultiXtens Extensometer, mit der

Auswertesoftware testXpert II V3.6 und mit den im folgenden Absatz genannten Parametern in einer klimatisierten Laborumgebung durchgeführt.

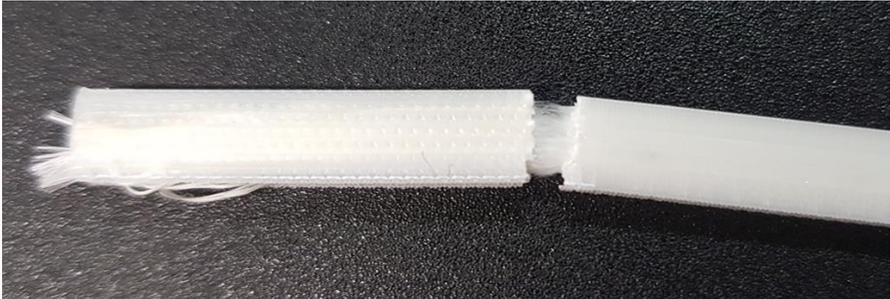
Die Vorspannung der Zugprobekörper ist nach DIN EN ISO 527-1 auf einen Wert  $\leq E/2000$  einzustellen. Auf Basis von Vorversuchen wird der E-Modul für die verwendeten Probekörper auf 10 GPa geschätzt, was bei einem Soll-Querschnitt von 10 mm<sup>2</sup> einer Vorspannkraft von 50 N entspricht. Die Prüfgeschwindigkeit zur Ermittlung des E-Moduls wird aus der Tabelle für mögliche Prüfgeschwindigkeiten aus der Norm ausgewählt und beträgt 0,5 mm/min. Für die Ermittlung der Zugfestigkeit ist kein spezieller Wert für die Prüfgeschwindigkeit vorgegeben, somit wird die Geschwindigkeit im Anschluss an die Bestimmung des E-Moduls auf 10 mm/min erhöht. Die Messlänge wird entsprechend der Norm mit 25 mm gewählt. Der E-Modul wird mit Hilfe der Spannungen bei den Dehnungswerten 0,2 % und 0,6 % bestimmt.

### **6.3.6.2 Auflistung der Versuchsergebnisse**

Im Anhang werden die Versuchsergebnisse der verschiedenen Probenreihen in Tabelle 0-7 bis Tabelle 0-14 aufgelistet. Es ist zu beachten, dass die Zugprobekörper F4.3 und F5.4, also Probe 3 der Probenreihe F4 sowie Probe 4 der Probenreihe F5, aufgrund nicht entdeckter Fertigungsfehler keine Fasern aufweisen, was sich sowohl im Gewicht als auch in den mechanischen Eigenschaften widerspiegelt, weswegen diese Probekörper von der Darstellung in den Boxplots und der Auswertung in Kapitel 6.3.7 ausgeschlossen werden.

### **6.3.6.3 Beschreibung des Versagensverhaltens**

In Abbildung 6-15 wird beispielhaft für alle FVK-Zugproben die geprüfte Probe F8.3 in einer Draufsicht gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Probe genau am Rand der Einspannung gerissen ist, aber nur ein Versagen der Matrix und keine gerissenen Fasern zu erkennen sind. Aufgrund des Spalts zwischen den beiden Probenhälften, welcher mit Fasern überbrückt wird, ist davon auszugehen, dass die Fasern aus der Kunststoffmatrix herausgerissen wurden, es also zu einem Grenzflächenversagen zwischen Fasern und Matrix gekommen ist.



*Abbildung 6-15: Beispielhaftes Versagen der Probekörper*

Das Versagen der Probekörper direkt an der Einspannung entspricht nicht dem aus den Vorversuchen erwarteten Versagen und ist nach DIN EN ISO 527-1 unzulässig. Die Probekörper dürften somit nicht ausgewertet werden. Die Versagensart hat jedoch keine Auswirkung auf den E-Modul, welcher bereits zu Beginn der Versuche bei geringer Belastung ermittelt wird. Weiterhin sind an dieser Stelle hauptsächlich die Auswirkungen der Parametervariation und keine maximal erreichbaren Werte interessant, so dass mit der Auswertung trotzdem fortgefahren wird. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Maximalwerte der Zugfestigkeit deutlich besser sein könnten, als sie in den Versuchen ermittelt wurden.

### **6.3.7 Auswertung der Parameterstudie**

Die Auswertung der Parameterstudie basiert auf (Hemmerich 2018). Die dort beschriebene Vorgehensweise beruht auf verschiedenen wissenschaftlichen Werken und bietet eine auf das Wesentliche reduzierte Zusammenfassung der gesamten Thematik. Sie ist entsprechend der hier vorliegenden Randbedingungen anzupassen und zu ergänzen und sowohl für additiv gefertigte eFVK-Probekörper als auch für parallel dazu gefertigte, unverstärkte ABS-Probekörper durchzuführen. Die einzelnen Schritte der Parameterstudie lauten wie folgt:

1. Darstellung der Versuchsergebnisse in Boxplot-Diagrammen
2. Test auf Normalverteilung der Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe
3. Test auf Ausreißer bei den Ergebnissen innerhalb einer Versuchsreihe
4. Test auf Homogenität der Varianzen zwischen den einzelnen Versuchsreihen
5. Einfaktorielle ANOVA durchführen
6. Mehrfaktorielle ANOVA durchführen

Die Darstellung in Boxplot-Diagrammen stellt für die Einführung in die statistische Analyse einen guten Überblick über alle Versuchsergebnisse dar. Mit den Tests auf Normalverteilung, Ausreißer und Varianzhomogenität wird geprüft, ob die daran anschließende einfaktorielle und mehrfaktorielle ANOVA durchgeführt werden darf. Die einfaktorielle ANOVA liefert das Ergebnis, ob sich Einflussfaktoren statistisch signifikant auf die Zielgrößen auswirken, die mehrfaktorielle ANOVA stellt diesen Einfluss und die Wechselwirkungen anschaulich dar.

Die gesamte Analyse und die beschriebenen Tests werden in der Software IBM – SPSS Statistics 25 durchgeführt. Innerhalb dieser Software wird die Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk Tests geprüft und die Ausreißer auf Basis des Abstands vom Mittelwert angegeben (kleine Ausreißer > 1,5 Standardabweichungen vom Mittelwert entfernt, extreme Ausreißer > 3 Standardabweichungen vom Mittelwert entfernt). Die Homogenität der Varianzen wird mit Hilfe des Levene-Tests geprüft.

### 6.3.7.1 FVK-Zugprobekörper

#### 6.3.7.1.1 Boxplot-Diagramme

Einen guten ersten Überblick über die erzielten Versuchsergebnisse liefern Boxplot-Diagramme, da hier die Lage und Streuweite der Ergebnisse inkl. kleiner Ausreißer (Kreis) und extremer Ausreißer (Stern) abgelesen werden können. Die Boxplot-Diagramme für FVK-Zugprobekörper werden in Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 dargestellt.

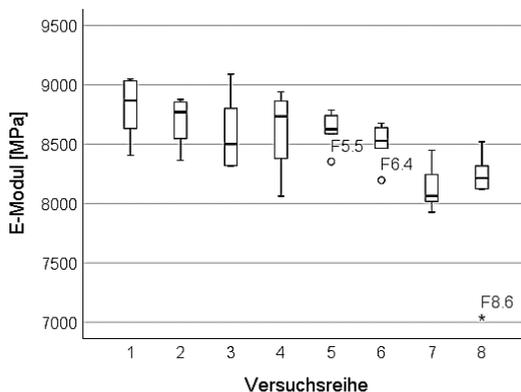


Abbildung 6-16: Boxplot-Diagramm für den E-Modul der FVK-Probekörper

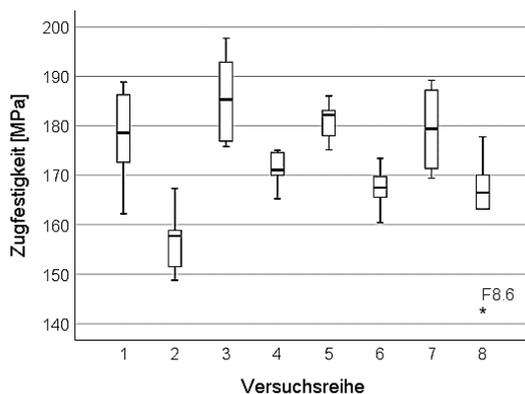


Abbildung 6-17: Boxplot-Diagramm für die Zugfestigkeit der FVK-Probekörper

Es ist zu erkennen, dass die Messergebnisse, bis auf den extremen Ausreißer F8.6, alle auf ähnlichen Niveaus liegen (ca.  $\pm 10\%$  vom globalen Mittel), sich jedoch je nach Versuchsreihe in der Lage der Boxplots teilweise deutlich voneinander unterscheiden.

### 6.3.7.1.2 Normalverteilung prüfen

Eine Normalverteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% liegt dann vor, wenn der Shapiro-Wilk Test eine Signifikanz  $> 0,05$  liefert. Die Signifikanz-Werte sind in Tabelle 6-11 dargestellt, hierbei werden die Probenreihen rot hervorgehoben, bei denen eine Normalverteilung nach Shapiro-Wilk nicht vorliegt.

Tabelle 6-11: Ergebnis des Tests auf Normalverteilung

	Versuchsreihe							
	1	2	3	4	5	6	7	8
E-Modul	0,434	0,207	0,181	0,454	0,544	0,352	0,391	0,019
Zugfestigkeit	0,819	0,745	0,555	0,521	0,840	0,965	0,246	0,264

Da nur für eine Ergebnisreihe das Zielkriterium sehr knapp verfehlt wird (extremer Ausreißer der Probe F8.6) und bei den restlichen Reihen das Kriterium erfüllt wird, kann trotzdem davon ausgegangen werden, dass in den einzelnen Ergebnisreihen eine Normalverteilung vorliegen müsste. Die Auswertung wird somit fortgesetzt.

### 6.3.7.1.3 Test auf Ausreißer

Der Test auf Ausreißer innerhalb von SPSS liefert die in Tabelle 6-12 dargestellten Ergebnisse (Entnommen aus Abbildung 6-16).

*Tabelle 6-12: Test auf Ausreißer*

Parameter	Kleiner Ausreißer	Extremer Ausreißer
E-Modul	F5.5, F6.4	F8.6
Zugfestigkeit		F8.6

Probekörper F5.5 und F6.4 zeigen einen kleinen Ausreißer nach unten beim E-Modul. Hier kommt die Definition als Ausreißer zustande, da die weiteren Werte dieser Probenreihen deutlich enger zusammen liegen als bei den anderen Probenreihe und somit der absolute Abstand vom jeweiligen Mittelwert ähnlich wie in den anderen Probenreihen ist. Folglich werden die Probekörper F5.5 und F6.4 trotzdem bei der weiteren Auswertung weiterhin berücksichtigt. Probekörper F8.6 zeigt sehr geringe Werte und damit extreme Ausreißer bei E-Modul und Zugfestigkeit. Da bei beiden untersuchten Zielgrößen ein extremer Ausreißer vorliegt, ist von einem Fertigungsfehler auszugehen und der Probekörper F8.6 wird von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Dies ist zulässig, da auch ohne den Probekörper F8.6 die nach Norm geforderte minimale Anzahl von 5 Probekörpern für die Auswertung erfüllt wird.

### 6.3.7.1.4 Varianzhomogenität prüfen

Mit Hilfe von SPSS wird die Varianzhomogenität geprüft, diese liegt vor, wenn die Signifikanz einen Wert von  $> 0,05$  einnimmt. Die Signifikanz-Werte sind in Tabelle 6-13 dargestellt.

*Tabelle 6-13: Test auf Varianzhomogenität*

Parameter	Basiert auf dem Mittelwert	Basiert auf dem Median	Basiert auf dem Median und mit angepassten df	Basiert auf dem getrimmten Mittel
E-Modul	0,100	0,458	0,465	0,117
Zugfestigkeit	0,057	0,066	0,076	0,058

Die Varianzhomogenität ist für beide Zielgrößen auf alle Rechenarten gegeben, die Auswertung darf somit ohne Einschränkungen fortgesetzt werden.

### 6.3.7.1.5 Einfaktorielle ANOVA

Die Ergebnisse der mit Hilfe von SPSS ausgewerteten einfaktoriellen ANOVA sind Tabelle 6-14 zu entnehmen.

*Tabelle 6-14: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA*

Parameter	Ergebnis
E-Modul	$F(7, 37) = 5,035, p < 0,001$
Zugfestigkeit	$F(7, 37) = 10,096, p < 0,001$

Da der Signifikanzwert  $p$  für beide Zielgrößen unterhalb der Grenze von 0,05 liegt, existieren für beide Parameter mindestens zwei Versuchsreihen, die sich signifikant voneinander unterscheiden. Welche Versuchsreihen dies sind, ist an dieser Stelle jedoch nicht relevant, nur die Information, dass es signifikante Unterschiede gibt. Dies ist die Voraussetzung, dass die genaue Auswirkung der Faktoren und deren Wechselwirkungen auf die Parameter ermittelt werden können, was im folgenden Kapitel geschieht.

### 6.3.7.1.6 Mehrfaktorielle ANOVA

Mit Hilfe der mehrfaktoriellen ANOVA werden die Auswirkungen der Faktoren und deren Wechselwirkungen auf die gemessenen Parameter ermittelt. Hier gilt, wie bei der einfaktoriellen ANOVA, dass der Signifikanzwert  $< 0,05$  sein muss, damit von einem signifikanten Einfluss des Faktors auf den Messwert ausgegangen werden kann. In folgender Tabelle 6-15 werden die mit Hilfe von SPSS ermittelten Signifikanzwerte dargestellt und erneut jene Werte rot markiert, für welche kein signifikanter Einfluss vorliegt.

*Tabelle 6-15: Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA*

Parameter	Düsentemperatur	Bauraumtemperatur	Faservolumengehalt	Düsentemperatur x Bauraumtemperatur	Düsentemperatur x Faservolumengehalt	Bauraumtemperatur x Faservolumengehalt	Düsentemperatur x Bauraumtemperatur x Faservolumengehalt
E-Modul	0,000	0,001	0,812	0,172	0,624	0,188	0,618
Zugfestigkeit	0,580	0,013	0,000	0,012	0,188	0,271	0,690

In Abbildung 6-18 sind die Wirkungen der verschiedenen Faktoren auf die untersuchten Parameter dargestellt, zudem ist in jedem Diagramm der Mittelwert jedes Parameters über das gesamte Versuchsfeld als horizontale Linie eingezeichnet. Gestrichelte Linien zeigen eine nicht signifikante Auswirkung, welche aus den rot markierten Werten aus Tabelle 6-15 hervorgeht.

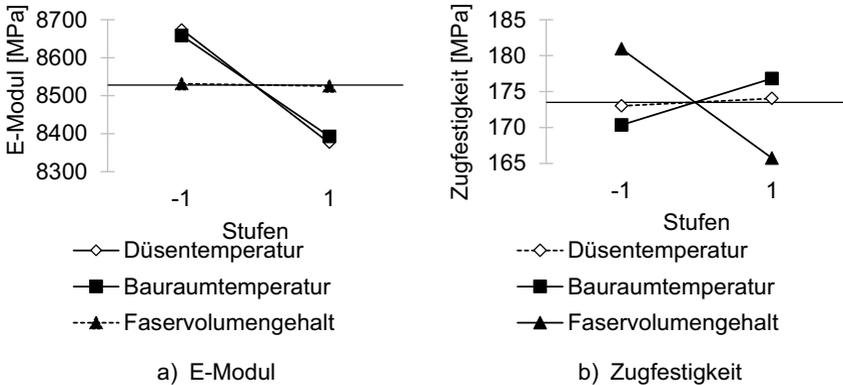


Abbildung 6-18: Wirkung der Faktoren auf die untersuchten Parameter

Die signifikanten Wechselwirkungen zwischen Düsentemperatur und Bauraumtemperatur werden in folgender Abbildung 6-19 dargestellt.

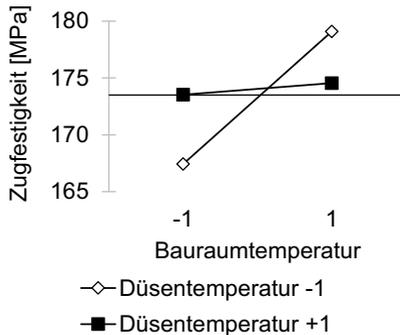


Abbildung 6-19: Signifikante Wechselwirkungen der Faktoren Bauraumtemperatur und Düsentemperatur

Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit der Parameter nachfolgend beschrieben. Diskutiert werden sie zusammen mit den Ergebnissen aus der Auswertung der ABS-Probestkörper in Kapitel 6.3.9.

### **E-Modul:**

Auf den E-Modul haben die Düsentemperatur und die Bauraumtemperatur eine signifikante Auswirkung. Aus Abbildung 6-18 a) wird deutlich, dass ein höherer Wert für die Temperatur von Düse und Bauraum zu einem geringeren E-Modul führen.

### **Zugfestigkeit:**

Auf die Zugfestigkeit haben die Bauraumtemperatur, der lokale FVG und die Wechselwirkung aus Düsentemperatur und Bauraumtemperatur eine signifikante Auswirkung. Hohe Werte für die Zugfestigkeit werden bei einer hohen Bauraumtemperatur und einem niedrigen lokalen FVG erzielt. Die Wechselwirkung zwischen Düsen- und Bauraumtemperatur wirkt sich aus, indem sich bei einer niedrigen Düsentemperatur ein Erhöhen der Bauraumtemperatur positiv auf die Zugfestigkeit der FVK auswirkt, bei einer hohen Düsentemperatur jedoch keine weitere Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bauraumtemperatur erkennbar ist.

### **Auswertung:**

Bei einer genaueren Betrachtung der Absolutwerte fällt auf, dass die Abweichung der einzelnen Faktorstufen vom Gesamtmittel bei den statistisch signifikanten Einflussgrößen betragsmäßig zwischen 1,52 % und 4,48 % beträgt. Eine solche Differenz führt zu keinen sehr großen, aber spürbaren Unterschieden in den Bauteileigenschaften.

In folgender Tabelle 6-16 werden die Faktorstufen dargestellt, welche zu besseren Probeneigenschaften führen. Die Wechselwirkungen der Faktoren sind für die Ermittlung der erreichbaren Maximalwerte nicht relevant und werden deswegen an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

*Tabelle 6-16: Auswertung der Parameteruntersuchung*

Parameter	Düsentemperatur	Bauraumtemperatur	Lokaler FVG
E-Modul	-1	-1	
Zugfestigkeit		1	-1

Ein höherer E-Modul ist bei einer Düsentemperatur auf Stufe -1 bei 230 °C und bei einer Bauraumtemperatur auf Stufe -1 bei 60 °C zu erreichen. Der lokale FVG wirkt sich auf den E-Modul nicht aus. Eine höhere Zugfestigkeit wird hingegen bei einer Bauraumtemperatur auf Stufe +1 bei 80 °C und bei einem lokalen FVG auf Stufe -1 erreicht, hier zeigt die Düsentemperatur keine signifikante Auswirkung.

Unter der Berücksichtigung, dass es bei der Bauraumtemperatur auf Stufe -1 bei 60 °C zu Anhaftungsproblemen des Bauteils auf der Bauplattform kommen kann, werden die besten Faktorstufen für die Fertigung von FVK wie folgt gewählt:

- Düsentemperatur: -1 (230 °C)
- Bauraumtemperatur: +1 (80 °C)
- Faservolumengehalt: -1 (15%)

### 6.3.7.2 ABS-Zugprobekörper

Die hier gezeigten Ergebnisse der ABS-Zugprobekörper stammen von Proben, die jeweils zeitgleich mit einer gleich nummerierten FVK-Probe gefertigt wurden. Eine Auswirkung des lokalen FVG auf die unverstärkte Probe ist somit möglich und auf eine Beeinflussung während der Fertigung der FVK-Probe zurückzuführen.

#### 6.3.7.2.1 Boxplot-Diagramme

Die Boxplot-Diagramme für ABS-Zugprobekörper werden in Abbildung 6-20 und Abbildung 6-21 dargestellt.

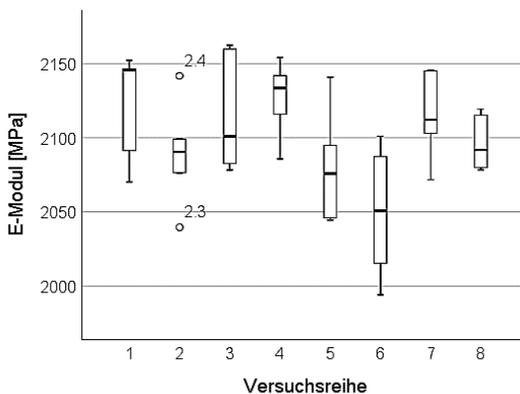


Abbildung 6-20: Boxplot-Diagramm für den E-Modul der ABS-Zugprobekörper

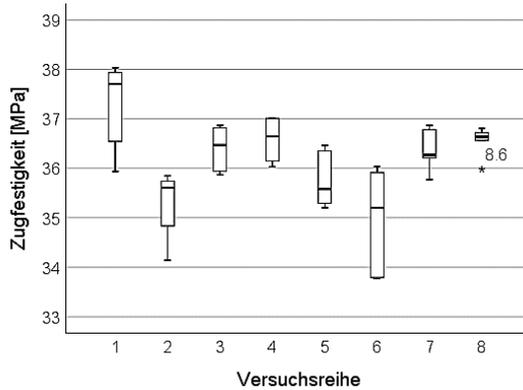


Abbildung 6-21: Boxplot-Diagramm für die Zugfestigkeit der ABS-Zugprobekörper

Wie bei den FVK-Probekörpern ist auch bei den unverstärkten ABS-Probekörpern zu erkennen, dass die Messergebnisse alle auf ähnlichen Niveaus liegen, sich aber deutlich weniger voneinander unterscheiden. Weitere Aussagen können aber nicht getroffen werden.

### 6.3.7.2.2 Normalverteilung prüfen

Die Signifikanz-Werte sind in Tabelle 6-17 dargestellt, hierbei werden die Probenreihen rot hervorgehoben, bei denen eine Normalverteilung nach Shapiro-Wilk nicht vorliegt.

Tabelle 6-17: Ergebnis des Tests auf Normalverteilung  
Versuchsreihe

	1	2	3	4	5	6	7	8
E-Modul	0,021	0,816	0,080	0,519	0,452	0,578	0,497	0,133
Zugfestigkeit	0,108	0,090	0,346	0,345	0,204	0,196	0,464	0,031

Da nur für den E-Modul bei Probenreihe 1 und die Zugfestigkeit bei Probenreihe 8 das Zielkriterium jeweils nur äußerst knapp verfehlt wird und bei den restlichen Reihen das Kriterium erfüllt wird, kann trotzdem davon ausgegangen werden, dass in den einzelnen Ergebnisreihen eine Normalverteilung vorliegen müsste. Die Auswertung wird somit fortgesetzt.

### 6.3.7.2.3 Test auf Ausreißer

Der Test auf Ausreißer innerhalb von SPSS liefert die in Tabelle 6-18 dargestellten Ergebnisse.

*Tabelle 6-18: Test auf Ausreißer*

Parameter	Kleiner Ausreißer	Extremer Ausreißer
E-Modul	2.3, 2.4	
Zugfestigkeit		8.6

Es fällt auf, dass die E-Moduln der Probekörper 2.3 und 2.4 einmal unterhalb, und einmal oberhalb der restlichen Werte der Probenreihe 2 liegen und insgesamt keine viel größere Streuweite besitzen als andere Probenreihen. Mathematisch handelt es sich hierbei um Ausreißer, weil die restlichen Werte der Probenreihe 2 sehr eng zusammen liegen, im Vergleich zu den anderen Probenreihen ergibt sich aber kein allzu großer Unterschied. Beide Probekörper werden somit für die weitere Auswertung beibehalten.

Gleiches gilt für die Zugfestigkeit von Probekörper 8.6. Die restlichen Werte der Probenreihe 8 liegen sehr eng zusammen, sodass es sich mathematisch gesehen um einen Ausreißer handelt. Bei Betrachtung der Absolutwerte und Vergleich mit den anderen Probenreihen ist jedoch keine große Abweichung zu erkennen. Der Probekörper wird somit für die weitere Auswertung beibehalten, auch wenn die entsprechende Probe aus der FVK-Versuchsreihe aufgrund sehr starker Abweichungen nicht weiter berücksichtigt wurde.

### 6.3.7.2.4 Varianzhomogenität prüfen

Mit Hilfe von SPSS wird die Varianzhomogenität der ABS-Proben geprüft, diese liegt vor, wenn die Signifikanz einen Wert von  $> 0,05$  einnimmt. Die Signifikanz-Werte sind in Tabelle 6-19 dargestellt, hierbei werden die Parameter rot hervorgehoben, bei denen keine Varianzhomogenität vorliegt.

Tabelle 6-19: Test auf Varianzhomogenität

Parameter	Basiert auf dem Mittelwert	Basiert auf dem Median	Basiert auf dem Median und mit angepassten df	Basiert auf dem getrimmten Mittel
E-Modul	0,333	0,759	0,757	0,361
Zugfestigkeit	0,011	0,332	0,349	0,017

Für die Zugfestigkeit liegt in jeweils zwei Prüffällen eine Varianzhomogenität knapp nicht vor. Für die anderen beiden Prüffälle liegt die Varianzhomogenität vor. An dieser Stelle werden keine Versuchsreihen von der folgenden statistischen Auswertung ausgenommen, jedoch ist zu berücksichtigen, dass eine Aussage bzgl. der Zugfestigkeit eventuell nicht korrekt getroffen werden kann.

#### 6.3.7.2.5 Einfaktorielle ANOVA

Die Ergebnisse der mit Hilfe von SPSS ausgewerteten einfaktoriellen ANOVA sind Tabelle 6-20 zu entnehmen.

Tabelle 6-20: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA

Parameter	Ergebnis
E-Modul	$F(7, 40) = 3,888, p = 0,003$
Zugfestigkeit	$F(7, 40) = 8,947, p < 0,001$

Da der Signifikanzwert  $p$  für beide Zielgrößen unterhalb der Grenze von 0,05 liegt, existieren für beide Zielgrößen mindestens zwei Versuchsreihen, die sich signifikant voneinander unterscheiden. Welche Versuchsreihen dies sind, ist an dieser Stelle jedoch erneut nicht relevant, nur die Information, dass es signifikante Unterschiede gibt. Dies ist die Voraussetzung, dass die genaue Auswirkung der Faktoren und deren Wechselwirkungen auf die Parameter ermittelt werden können, was im folgenden Kapitel geschieht.

#### 6.3.7.2.6 Mehrfaktorielle ANOVA

In folgender Tabelle 6-21 werden die mit Hilfe von SPSS ermittelten Signifikanzwerte der mehrfaktoriellen ANOVA dargestellt und erneut jene Werte rot markiert, für welche kein signifikanter Einfluss vorliegt.

Tabelle 6-21: Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA

Parameter	Düsentemperatur	Bauraumtemperatur	Faservolumengehalt	Düsentemperatur x Bauraumtemperatur	Düsentemperatur x Faservolumengehalt	Bauraumtemperatur x Faservolumengehalt	Düsentemperatur x Bauraumtemperatur x Faservolumengehalt
E-Modul	0,004	0,007	0,068	0,155	0,490	0,122	0,320
Zugfestigkeit	0,010	0,001	0,002	0,016	0,087	0,000	0,094

In Abbildung 6-22 sind die Wirkungen der verschiedenen Faktoren auf die untersuchten Parameter dargestellt, zudem ist in jedem Diagramm der Mittelwert jedes Parameters über das gesamte Versuchsfeld als horizontale Linie eingezeichnet. Gestrichelte Linien zeigen eine nicht signifikante Auswirkung, welche aus den rot markierten Werten aus Tabelle 6-21 hervorgeht.

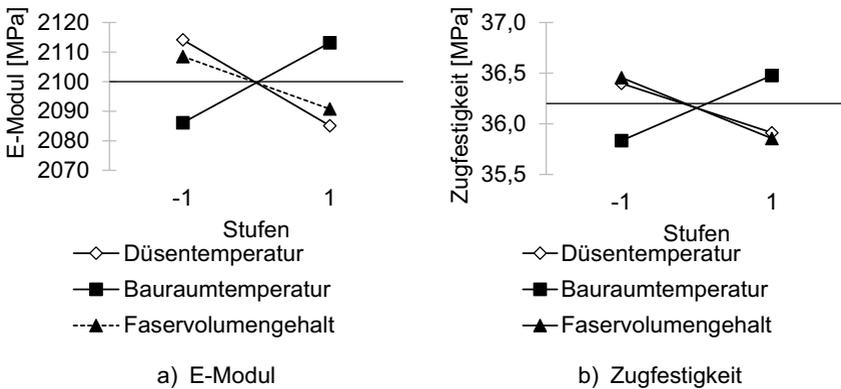


Abbildung 6-22: Wirkung der Faktoren auf die untersuchten Parameter

Die signifikanten Wechselwirkungen zwischen Düsentemperatur und Bauraumtemperatur werden in folgender Abbildung 6-23 a) dargestellt, die signifikanten Wechselwirkungen zwischen lokalem FVG und Bauraumtemperatur in Abbildung 6-23 b).

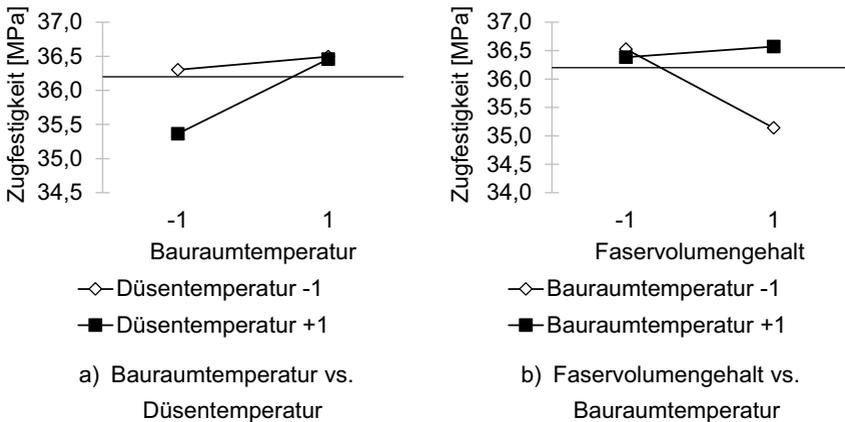


Abbildung 6-23: Signifikante Wechselwirkungen bei der Zielgröße Zugfestigkeit

Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit der Parameter nachfolgend beschrieben. Diskutiert werden diese zusammen mit den Ergebnissen aus der Auswertung der FVK-Probekörper in Kapitel 6.3.9.

#### E-Modul:

Auf den E-Modul wirken sich die Düsentemperatur und die Bauraumtemperatur signifikant aus. Eine geringe Düsentemperatur sowie eine hohe Bauraumtemperatur führen dabei jeweils zu einem hohen E-Modul.

#### Zugfestigkeit:

Auf die Zugfestigkeit wirken sich alle drei Parameter signifikant aus. Eine niedrige Düsentemperatur, ein niedriger lokaler FVG und eine hohe Bauraumtemperatur führen dabei jeweils zu einer hohen Zugfestigkeit.

Die Wechselwirkung zwischen Düsen- und Bauraumtemperatur wirkt sich aus, indem sich bei einer niedrigen Düsentemperatur ein Verringern der Bauraumtemperatur positiv auf die Zugfestigkeit der FVK auswirkt, bei einer hohen Düsentemperatur jedoch keine weitere Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bauraumtemperatur erkennbar ist. Die Wechselwirkung zwischen der Bauraumtemperatur und dem lokalen FVG wirkt sich aus, indem sich bei einer niedrigen Bauraumtemperatur ein Erhöhen des lokalen FVG negativ auf die Zugfestigkeit der FVK auswirkt, bei einer hohen Bauraumtemperatur jedoch keine weitere Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom FVG erkennbar ist.

**Auswertung:**

Es ist erwähnenswert, dass sich der lokale FVG statistisch signifikant auf Probekörper auswirkt, welche gar keine Faserverstärkungen besitzen. Das heißt, dass sich ein Unterschied in den Fertigungsparametern eines Bauteils, beispielsweise die Geometrie oder die Fertigungsdauer, auf das parallel hierzu gefertigte Bauteil auswirkt. Die Auswirkung ist mit einer Abweichung von  $\pm 0,4 \%$  vom Mittelwert des E-Moduls und  $\pm 0,8 \%$  vom Mittelwert der Zugfestigkeit jedoch sehr gering.

Bei einer genaueren Betrachtung der Absolutwerte fällt auf, dass die Abweichung der einzelnen Faktorstufen vom Gesamtmittel bei den statistisch signifikanten Einflussgrößen betragsmäßig maximal  $0,89 \%$  vom Gesamtmittel beträgt. Eine solch geringe Differenz führt kaum zu merkbaren Unterschieden in den Bauteileigenschaften, sodass eine weitere Auswertung keine neuen Erkenntnisse bringt. Auch die zuvor genannte Auswirkung von den Fertigungsparametern eines Bauteils auf das parallel hierzu gefertigte Bauteil ist zwar statistisch signifikant, betragsmäßig jedoch zu vernachlässigen.

Die Wechselwirkungen der Faktoren sind für die Ermittlung der erreichbaren Maximalwerte nicht relevant und werden deswegen an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

**6.3.8 Diskussion der Ergebnisse**

Zunächst werden die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Probeneigenschaften diskutiert, im Anschluss erfolgt in Kapitel 6.3.9 die Zusammenfassung der Parameterstudie.

**6.3.8.1 Auswirkung der Düsentemperatur**

Die Düsentemperatur wirkt sich auf den E-Modul von FVK- und ABS-Proben gleichermaßen aus, eine höhere Düsentemperatur führt zu einem geringeren E-Modul. Dies spricht dafür, dass hierdurch nicht nur die Anbindung zwischen Fasern und Kunststoff beeinflusst wird, sondern der Kunststoff an sich. Eine mögliche Erklärung ist eine leichte Degradierung des Materials. Die eigentlich erwartete bessere Anhaftung der Fasern an das Matrixmaterial tritt nicht ein.

Auf die Zugfestigkeit der FVK wirkt sich die Düsentemperatur nicht signifikant aus, auf die Zugfestigkeit der ABS-Proben hat sie einen signifikanten, aber betragsmäßig sehr geringen Einfluss. Auch hier führt eine höhere Düsentemperatur zu geringeren Werten,

sodass noch immer von einer Degradierung des Matrixmaterials ausgegangen werden kann.

### **6.3.8.2 Auswirkung der Bauraumtemperatur**

Die Bauraumtemperatur hingegen zeigt beim E-Modul von FVK- und ABS-Proben ein gegenläufiges Verhalten. Die FVK-Proben erzielen bei einer niedrigen Bauraumtemperatur den maximalen E-Modul, die ABS-Proben bei einer hohen Bauraumtemperatur. Da die Fasern zwar von außerhalb in den Bauraum gefördert werden, jedoch innerhalb des Schlauches in der Energiekette ebenfalls von der Bauraumtemperatur beeinflusst werden, lässt dies den Schluss zu, dass die erhöhte Bauraumtemperatur sich negativ auf die Beschichtung der Fasern auswirkt und diese ein wenig degradiert.

Bei Betrachtung der Zugfestigkeit ist jedoch festzustellen, dass sich die höhere Bauraumtemperatur positiv auf FVK- und ABS-Proben auswirkt. Dies weist darauf hin, dass eine hohe Bauraumtemperatur zwar zu einer weniger steifen, dafür festeren Anbindung zwischen Matrix und Faser führt.

### **6.3.8.3 Auswirkung des lokalen Faservolumengehalts**

Auf den E-Modul wirkt sich eine Änderung des lokalen FVG, also eine Veränderung des Abstands zwischen den Fasern bei gleicher Fasermenge, weder bei den FVK- noch bei den ABS-Proben signifikant aus.

Die Zugfestigkeit von FVK- und ABS-Proben wird vom lokalen FVG jedoch signifikant beeinflusst, sodass diese bei einem höheren lokalen FVG für beide Probenarten niedriger ist. Dieser Einfluss auf die FVK-Proben lässt sich dadurch erklären, dass die Fasern bei dichter Ablage in einem engeren Bereich gebündelt werden und dadurch eine geringere Oberfläche für die Infiltrierung und für die Übertragung der Lasten zur Verfügung steht. Besonders beachtenswert ist jedoch die Abhängigkeit der ABS-Proben vom lokalen FVG der gleichzeitig gefertigten Probe. Hierbei erfolgt eine Beeinflussung der ABS-Probe aus einem Parameter der benachbarten Probe. Eine mögliche Ursache könnte eine unterschiedliche Fertigungsdauer bei Proben mit unterschiedlichen lokalen FVG sein, eine weitere Ursache könnte in der Regelung der Tropfenkennzahl liegen. Durch die Fasern unterhalb der Düse könnte es zu einem Gegendruck beim Tropfenaustrag kommen. Um diesen zu kompensieren, könnte der Druck hochgeregelt werden. Wenn dann keine Fasern mehr unterhalb der Düse sind, fällt der Widerstand weg und es wird zunächst etwas mehr Kunststoff ausgetragen, bis die Tropfenkennzahl

nachgeregelt ist. Bei einer Probe mit niedrigem lokalen FVG liegen die Fasern bis zum Rand, daher würde das Nachregeln und der zu große Kunststoffauftrag in der parallel gefertigten ABS-Probe erfolgen. Bei einem großen lokalen FVG gibt es zudem unverstärkte Bahnen, während derer sich der Tropfenauftrag wieder einregeln kann, sodass in der ABS Probe dann nicht mehr zu viel Kunststoff ausgetragen wird.

Ob diese Erklärung zutrifft, geht jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinaus und ist in weiterführenden Untersuchungen herauszufinden.

#### **6.3.8.4 Wechselwirkungen**

Sowohl bei den FVK- als auch bei den ABS-Proben existiert eine Wechselwirkung der Einflussgrößen Bauraumtemperatur und Düsentemperatur in Bezug auf die Zugfestigkeit, diese ist jedoch gegensätzlich gerichtet. Bei einer niedrigen Düsentemperatur wirkt sich ein Erhöhen der Bauraumtemperatur positiv auf die Zugfestigkeit der FVK aus, bei einer hohen Düsentemperatur ist keine weitere Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bauraumtemperatur erkennbar. Bei ABS-Proben liegt die Verbesserung der Zugfestigkeit während der Erhöhung der Bauraumtemperatur bei einer hohen Düsentemperatur vor.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Anbindung der Fasern an den Kunststoff bei einer niedrigen Düsentemperatur stärker auf eine Schwankung der Bauraumtemperatur reagiert als bei einer hohen Düsentemperatur, somit ist es hier besonders wichtig, die Bauraumtemperatur sicher und genau zu regeln. Bei einer niedrigen Düsentemperatur wirken sich Schwankungen der Bauraumtemperatur kaum auf die Anbindung zwischen Fasern und Kunststoff aus. Für einen möglichst robusten Prozess (möglichst konstante Zugfestigkeit) ist folglich eine hohe Düsentemperatur zu wählen. Wenn jedoch die Einflussfaktoren genau geregelt werden können, kann auch eine niedrige Düsentemperatur gewählt werden, bei der dann bei einer hohen Bauraumtemperatur die beste Zugfestigkeit erreicht werden kann.

Für die unverstärkten ABS-Proben gilt, dass bei niedriger Düsentemperatur ein in Bezug auf Schwankungen der Bauraumtemperatur robuster Prozess vorliegt. Ein gegenüber Schwankungen der Bauraumtemperatur robuster Prozess der ABS-Proben liegt zudem auch vor, wenn der lokale FVG der FVK-Proben gering ist. Ein hoher lokaler FVG und eine niedrige Bauraumtemperatur beeinflussen sich gegenseitig negativ.

Der Grund für die verschiedenen Wechselwirkungen kann an dieser Stelle nicht seriös diskutiert werden, da noch zu wenig über die Auswirkungsmechanismen der verschiedenen Einflussparameter bekannt ist.

### 6.3.9 Zusammenfassung der Parameterstudie

Die Parameterstudie innerhalb der Kapitel 6.3.7.1 und 6.3.7.2 führt zu folgenden Ergebnissen:

- Es kommt bei allen eFVK-Probekörpern zu einem sichtbaren Matrixversagen mit aus den Probenhälften herausgezogenen, nicht sichtbar geschädigten Fasern.
- Die untersuchten Fertigungsparameter wirken sich bei den unverstärkten ABS-Proben nahezu überhaupt nicht auf die Zugeigenschaften aus.
- Die Zugeigenschaften der verstärkten Probekörper werden von den untersuchten Parametern nicht sonderlich stark, aber spürbar beeinflusst (bis zu 4,48 % Abweichung vom Gesamtmittel).
- Ein geringerer Abstand zwischen den Fasern, in der Parameterstudie als großer lokaler FVG bezeichnet, führt zu einer Verschlechterung der Zugfestigkeit, obwohl die Gesamtanzahl der Fasern nicht verändert wird und folglich die mechanischen Eigenschaften gleichbleiben sollten.

Eine Prüfung bezüglich der Korrelationen zwischen den gleichzeitig gefertigten ABS- und eFVK-Probekörpern wird in der Folge ausgeführt. Hierbei wird der Fokus auf die Extremwerte jeder Probenreihe gelegt, da im Bereich um den Mittelwert keine statistisch relevante Aussage getroffen werden kann. Wenn zwei gleichzeitig gefertigte Probekörpern beide bei E-Modul und/oder Zugfestigkeit um mehr als eine bestimmte Differenz vom Mittelwert ihrer jeweiligen Probenreihe in die gleiche Richtung abweichen, wird an dieser Stelle von einer Korrelation der Extremwerte gesprochen. Als Differenz wird die Standardabweichung der jeweiligen ABS- oder eFVK-Probenreihe definiert. Zur Berechnung werden die Werte aus Tabelle 0-7 bis Tabelle 0-16 im Anhang verwendet, die zuvor bereits ausgeschlossenen Proben 4.3 und 5.4 werden hierbei nicht berücksichtigt.

Für ABS- und eFVK-Probekörper aus folgenden Versuchsreihen existiert eine Korrelation:

- E-Modul: 1.1, 3.1, 5.5
- Zugfestigkeit: 1.1, 3.1, 3.6, 6.2, 6.4, 7.1, 8.6

Bei jeweils acht berücksichtigten Versuchsreihen kommt es somit dreimal beim E-Modul und siebenmal bei der Zugfestigkeit zu einer Korrelation der Extremwerte. Da jede Versuchsreihe über ein Minimum und ein Maximum verfügt, existieren je Versuchsreihe 16 Extremwerte. Für den E-Modul liegt daher der Anteil der korrelierenden Extremwerte bei 18,8 %, für die Zugfestigkeit sogar bei 43,8 %.

Die zuvor genannten Ergebnisse führen zu folgenden Schlüssen:

- Bei den eFVK-Proben können die ermittelten Abhängigkeiten zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen auf die Anbindung zwischen Fasern und Matrix zurückgeführt werden, da bei den unverstärkten ABS-Proben keine relevante Abhängigkeit zu erkennen ist.
- Die implementierten Fasern schwächen eine Probe, wenn sie sehr nah aneinander positioniert werden, was sich aus den schlechteren Probeneigenschaften bei einer dichteren Ablage (höherer lokaler FVG) schlussfolgern lässt.
- Es kann eine Korrelation zwischen den jeweiligen Extremwerten der Versuchsreihen von ABS- und eFVK-Proben nachgewiesen werden. Diese können folgende Gründe haben:
  - Die Probekörper beeinflussen sich während der Fertigung gegenseitig, so dass sich ein Fehler in einen Körper auf den anderen Körper auswirkt.
  - Die bereits berücksichtigten Einflussgrößen und Störgrößen wirken sich stärker aus als vermutet bzw. konnten über die Versuche hinweg nicht konstant gehalten bzw. definiert gesteuert werden.
  - Bisher unbekannte Störgrößen treten bei der Fertigung der Probekörper auf und beeinflussen sowohl den reinen Kunststoffaufbau als auch die Anbindung zwischen Fasern und Matrix.

Der Sachverhalt der Korrelation der Extremwerte lässt sich an dieser Stelle nicht abschließend klären. Da jedoch sowohl Maxima als auch Minima Korrelationen aufweisen, kann ausgeschlossen werden, dass nur der erste Punkt (ein Probekörper beeinflusst den anderen) zutrifft, sondern weitere für den gesamten Bauraum geltende Größen einen Einfluss aufweisen.

## 6.4 Auswahl der optimalen Verarbeitungsparameter

Da die unverstärkten Probekörper von den untersuchten Parametern nur äußerst geringfügig beeinflusst werden, bleibt die am Ende von Kapitel 6.3.7.1.6 ausgewählte Parameterkombination als Optimum bestehen. Auf eine bessere Robustheit gegen

Schwankungen der Bauraumtemperatur wird an dieser Stelle bewusst verzichtet (Wechselwirkung zwischen Düsentemperatur und Bauraumtemperatur) und stattdessen die maximale Performance angestrebt, unter anderem auch, weil von einer sehr konstanten Bauraumtemperierung ausgegangen wird. Die optimalen Verarbeitungsparameter lauten also:

- Düsentemperatur: -1 (230 °C)
- Bauraumtemperatur: +1 (80 °C)
- Lokaler Faservolumengehalt: -1 (15%)

## 6.5 Validierung

Zunächst werden in Kapitel 6.5.1 die mechanischen Kennwerte für Zugproben, welche mit den optimalen Verarbeitungsparametern aus Kapitel 6.4 gefertigt werden, ermittelt. Anschließend erfolgt in Kapitel 6.5.2 ein Vergleich zwischen den ermittelten Werten und entsprechenden Literaturwerten, welche in Kapitel 2.4.3 zusammengefasst wurden. Kapitel 6.5.3 schließt die Validierung mit der Fertigung des Demonstrators ab.

### 6.5.1 Ermittlung mechanischer Kennwerte

Mit den in Kapitel 6.4 genannten Verarbeitungsparametern sind in der Folge erneut Zugprobekörper zu fertigen, diesmal jedoch über den gesamten Querschnitt mit Verstärkungsfasern gefüllt, abzüglich jeweils einer Grund- und Deckschicht und einer Randkontur je Lage, welche unverstärkt gefertigt werden. Als Fasermaterial wird weiterhin das in Kapitel 6.2.3.5.2 ausgewählte E-Glasfasergarn EC9-34Z28 verwendet.

Da bei FVK insbesondere auf einen hohen E-Modul und eine hohe Zugfestigkeit Wert gelegt wird, ist nicht nur der FVG 25 % zu untersuchen, sondern dieser in 5 % Schritten so weit zu erhöhen, bis eine Fertigung nicht mehr erfolgreich ist (dies wird basierend auf Erfahrungen im Fertigungsprozess bei einem FVG > 40 % erwartet). Werte für den Tropfenabstand und Linienabstand werden wie zuvor mit Hilfe von Formel 6-25 und Formel 6-26 berechnet und in Tabelle 6-22 aufgelistet. Die Düsentemperatur wird hierbei auf die zuvor festgelegten 230 °C und die Bauraumtemperatur auf 80 °C eingestellt.

Tabelle 6-22: Linienbreite und Tropfenabstand für verschiedene FVG

Versuchsreihe	1	2	3	4
Faservolumengehalt	25 %	30 %	35 %	40 %
Linienbreite	0,264	0,220	0,188	0,164
Tropfenabstand	0,399	0,528	0,686	0,885

Von jedem Probekörpertyp werden die nach Norm geforderten 5 Exemplare gefertigt. Die Fertigung der Probekörper mit 25 %, 30 % und 35 % FVG erfolgt ohne das Auftreten von Fehlern oder Problemen, bei den Probekörpern mit 40 % FVG zeigt sich jedoch, dass die einzelnen Lagen nicht mehr zusammenhaften und die Fertigung dadurch fehlschlägt.

Um eine Vergleichbarkeit mit den zuvor durchgeführten Versuchen zu gewährleisten, werden wie zuvor (s. Kapitel 6.3.6) dieselben Anlagen und Parameter bei der Ermittlung der Probeneigenschaften verwendet.

Erneut versagen alle Probekörper auf die gleiche Weise, diesmal jedoch anders als in den vorigen Versuchen. In folgender Abbildung 6-24 ist beispielhaft das Versagen des Probekörpers 3.3 (Probe 3 der Versuchsreihe mit 35% lokalem FVG) in Seitenansicht der Probe dargestellt. Es ist erneut zu erkennen, dass am Rand der Einspannung ein Versagen aufgetreten ist, diesmal versagt der Probekörper jedoch durch ein komplettes Abscheren einzelner Schichten. Zwischen den Schichten sind deutlich Fasern zu erkennen, sodass davon auszugehen ist, dass die Probekörper innerhalb einer Faserschicht entlang des Faserverlaufs versagen.



Abbildung 6-24: Versagensverhalten der Probekörper mit vollflächiger Füllung

Erneut wirkt sich die Versagensart nicht auf den E-Modul aus, sondern muss nur bei der Zugfestigkeit berücksichtigt werden. In Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26 werden

die Boxplot-Diagramme der vollständig gefüllten Proben der Versuchsreihen 1 bis 3 dargestellt.

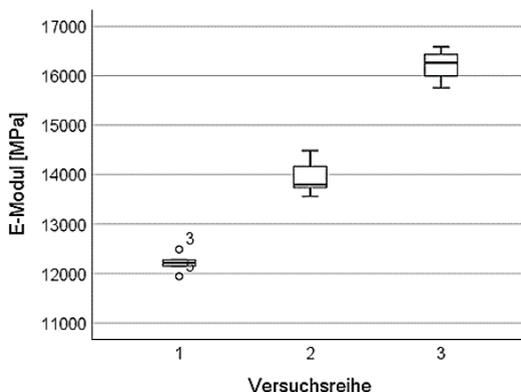


Abbildung 6-25: Boxplot-Diagramm für den E-Modul der vollständig gefüllten eFVK-Probekörper

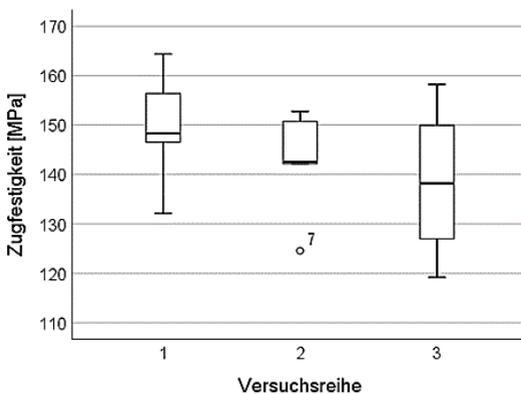


Abbildung 6-26: Boxplot-Diagramm für die Zugfestigkeit der vollständig gefüllten eFVK-Probekörper

Die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen auf Basis einer Stichprobe werden in folgender Tabelle 6-23 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 6-23: FVG und mechanische Eigenschaften der Versuchsreihen

Versuchsreihe	FVG (in Linie)	Mittlerer E-Modul [GPa]	E-Modul St. Abw. [%]	Mittlere Zugfestigkeit [MPa]	Zugfestigkeit St. Abw. [%]
1 (Max. Füllung)	25 %	12,2	1,6 %	150	8,1 %
2 (Max. Füllung)	30 %	13,9	2,7 %	143	7,8 %
3 (Max. Füllung)	35 %	16,2	2,1 %	138	11,7%

Beim E-Modul ist direkt zu erkennen, dass dieser mit steigendem FVG zunimmt. Gleichzeitig fällt die Standardabweichung beim E-Modul in jeder Versuchsreihe sehr gering aus. Die Zugfestigkeit besitzt in der jeweiligen Versuchsreihe eine deutlich größere Standardabweichung, zudem wird die Zugfestigkeit mit steigendem FVG reduziert. Hier liegen folglich Anhaftungsdefizite vor, welche sich mit steigendem FVG noch verstärken, so wie es die Ergebnisse der Parameterstudie in Kapitel 6.3.7.1.6 auch gezeigt haben.

### 6.5.2 Vergleich zwischen AKF-FVK und Stand der Technik

Um die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Versuchsergebnisse mit Ergebnissen aus dem Stand der Technik vergleichen zu können, ist für die verwendeten Probekörper zunächst der reale FVG zu ermitteln. Aufgrund der leicht schwankenden Regelung der Austragszahl kommt es bei den Probekörpern zu unterschiedlich großen Querschnittsflächen. Der FVG ist über den Fasergehalt der Querschnittsfläche zu bestimmen, s. Formel 6-29.

$$\varphi_{Faser} = FFG = \frac{A_{Faser}}{b_{gesamt} * h_{gesamt}} \quad \text{Formel 6-29}$$

mit

$A_{Faser}$  = Querschnittsfläche aller Fasern ohne Schlichte

$b_{gesamt}$  = Breite des gesamten Probekörpers

$h_{gesamt}$  = Höhe des gesamten Probekörpers

Nach Formel 6-9 besitzt die Faser EC9-34Z28 mit der Garnfeinheit 34 tex und der Dichte der Glasfasern von 2,58 g/cm<sup>3</sup> eine Querschnittsfläche von 0,01318 mm<sup>2</sup>. In Tabelle 6-24 werden die von der jeweiligen Probenreihe abhängigen, zur Berechnung des globalen FVGs (im Querschnitt des Messbereichs) benötigten Werte beschrieben und der FVG genannt. Zudem werden auch die Werte der Versuchsreihen 3 (-1, 1, -1

– 15% (Param.-Stud.) und 4 (-1, 1, 1 – 25% (Param.-Stud.)) aus der Parameterstudie aus Gründen der Vollständigkeit mit dargestellt. Die Prozentangaben in der Probenbezeichnung in Tabelle 6-24 geben den jeweiligen lokalen FVG einer faserverstärkten Fertigungslinie an. Trotz vollständiger Füllung der Probekörper mit FVK-Linien kommt ein kleinerer globaler FVG aufgrund der ungefüllten Randkonturen und Randschichten zustande.

*Tabelle 6-24: Werte zur Berechnung des globalen Faservolumengehalts*

Probenbezeichnung	Durchschn. Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Anzahl Fasern in Schicht	Anzahl Fasern in Bauteil (8 Schichten)	Globaler Faservolumengehalt
15% (Param.-Stud.)	10,876	10	80	9,7 %
25% (Param.-Stud.)	10,713	10	80	9,8 %
25% (Max. Füllung)	11,804	17	136	15,2 %
30% (Max. Füllung)	11,732	20	160	18,0 %
35% (Max. Füllung)	11,992	24	192	21,1 %

Die jeweiligen Mittelwerte des FVGs der Probenreihen aus der Parameterstudie und den Probenreihen mit 25 %, 30 % und 35 % lokalem FVG werden in Tabelle 6-25 zusammen mit E-Modul und Zugfestigkeit dargestellt, um einen Vergleich zum Stand der Technik zu vereinfachen.

*Tabelle 6-25: FVG und mechanische Eigenschaften der Versuchsreihen*

Probenreihe	FVG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
15% (Param.-Stud.)	9,7 %	8,6	186
25% (Param.-Stud.)	9,8 %	8,6	171
25% (Max. Füllung)	15,2 %	12,2	150
30% (Max. Füllung)	18,0 %	13,9	143
35% (Max. Füllung)	21,1 %	16,2	138

In Tabelle 6-26 werden die Werte für additiv gefertigte eFVK aus dem Stand der Technik (s. Anhang in Tabelle 0-4), bei denen Glasfasern verwendet wurden, zusammengefasst, um diese anschließend mit den selbst erzielten Werten zu vergleichen.

Tabelle 6-26: Vergleichs-Werte für additiv gefertigte eFVK aus dem Stand der Technik

Quelle	Material	FVG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
(Dickson et al. 2017)	Nylon/GF - M1	8 %	3,29	156
(Dickson et al. 2017)	Nylon/GF - M1	10 %	4,91	212
(Goh et al. 2018)	Nylon/GF - M1	35 %	7,2	450
(Justo et al. 2018)	Nylon/GF - M1	50 %	25,9	575

Die Werte aus Tabelle 6-25 und Tabelle 6-26 werden in folgender Abbildung 6-27 und Abbildung 6-28 vergleichend zueinander dargestellt.

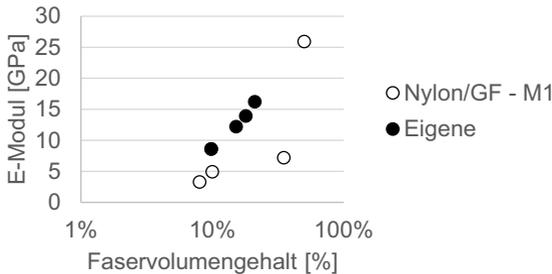


Abbildung 6-27: E-Modul für eFVK (nur Glasfasern)

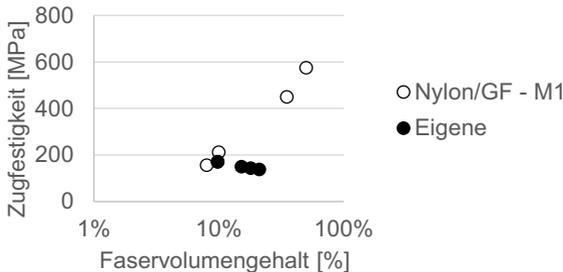


Abbildung 6-28: Zugfestigkeit für eFVK (nur Glasfasern)

Die E-Moduln der in Tabelle 6-26 genannten Werte für 8 %, 10 % und 35 % FVG werden bereits von den niedrig gefüllten Proben, welche nur einen globalen FVG von 9,7 % und 9,8 % aufweisen, übertroffen. Die 25,9 GPa der Proben mit 50% FVG können jedoch nicht erreicht werden. Bei Betrachtung von Abbildung 6-27 ist zu erkennen, dass

die selbst erzielten Ergebnisse in Abhängigkeit vom erreichten Faservolumengehalt oberhalb der Ergebnisse aus dem Stand der Technik liegen. Bei Betrachtung der Zugfestigkeit in Abbildung 6-28 liegen die Ergebnisse der eigenen Proben nur bei einem niedrigen FVG auf einem ähnlichen Niveau wie die Ergebnisse aus dem Stand der Technik. Bei höherem FVG verringert sich die Zugfestigkeit.

Es ist jedoch zu beachten, dass für die in dieser Arbeit untersuchten Probekörper eine ABS Matrix mit deutlich höherem E-Modul und deutlich niedrigerer Zugfestigkeit verwendet wurde, als das im Stand der Technik verwendete Nylon aufweist. Aus diesem Grund sind für alle Proben und Literaturwerte der theoretisch mögliche E-Modul und die theoretisch mögliche Zugfestigkeit mit Hilfe des Voigt-Modells aus Formel 2-1 und Formel 2-2 zu berechnen. Somit kann das theoretisch mögliche Potential abgeschätzt werden und eine Aussage bzgl. der Qualität des jeweiligen Fertigungsprozesses getroffen werden.

Die hierbei verwendeten Parameter lauten wie folgt:

- E-Modul von ABS Terluran GP35 mit dem freeformer hergestellt: 2110 MPa
- Zugfestigkeit von ABS Terluran GP35 mit dem freeformer hergestellt: 37,22 MPa
- E-Modul Glasfaser: 73000 MPa (Henning und Moeller 2011, S. 345)
- Zugfestigkeit Glasfaser: 3400 MPa (Henning und Moeller 2011, S. 345)
- E-Modul Nylon: 940 MPa (MarkForged 2018)
- Zugfestigkeit Nylon: 54 MPa (MarkForged 2018)

Da über die im MarkForged Material verwendeten Glasfasern keine Informationen vorliegen, werden hier die gleichen Werte angenommen, wie für die selbst verwendeten Glasfasern. Zudem wurde der E-Modul und die Zugfestigkeit des ABS Materials erneut anhand von 15 Probekörpern, welche parallel zu den höher gefüllten FVK-Probekörpern gefertigt wurden, bestimmt.

Der Grad der Erfüllung des theoretisch erreichbaren E-Moduls und der theoretisch erreichbaren Zugfestigkeit wird in der Folge aus den angegebenen Werten berechnet. Diese sind jedoch nicht zu verwechseln mit dem Grad der Erfüllung der möglichen Verstärkungswirkung aus Formel 6-1, sondern geben direkt den Anteil an den theoretisch erreichbaren Werten wieder. Dies geschieht mit Hilfe von Formel 6-30 und Formel 6-31.

$$A_E = \frac{E_{\text{Versuchsergebnis}}}{E_{\text{Voigt}}} * 100\% \quad \text{Formel 6-30}$$

mit

$A_E$  = prozentualer Anteil am erreichbaren E – Modul

$E_{\text{Versuchsergebnis}}$  = tatsächlich erreichbarer E – Modul

$E_{\text{Voigt}}$  = theoretisch erreichbarer E – Modul mit Voigt – Modell

und

$$A_R = \frac{R_{\text{Versuchsergebnis}}}{R_{\text{Voigt}}} * 100\% \quad \text{Formel 6-31}$$

mit

$A_R$  = prozentualer Anteil an der erreichbaren Zugfestigkeit

$R_{\text{Versuchsergebnis}}$  = tatsächlich erreichbare Zugfestigkeit

$R_{\text{Voigt}}$  = theoretisch erreichbare Zugfestigkeit mit Voigt – Modell

Der Grad der Erfüllung des theoretisch erreichbaren E-Moduls und der theoretisch erreichbaren Zugfestigkeit wird in Tabelle 6-27 dargestellt.

Tabelle 6-27: Grad der Potentialerfüllung

Probenbezeichnung / Quelle	FVG	Grad der Erfüllung des Potentials	
		E-Modul	Zugfestigkeit
15% (Parameteropt.)	9,7%	95%	56%
25% (Parameteropt.)	9,8%	94%	51%
25% (Max. Füllung)	15,2%	94%	29%
30% (Max. Füllung)	18,0%	92%	23%
35% (Max. Füllung)	21,1%	94%	19%
(Dickson et al. 2017)	8%	48%	57%
(Dickson et al. 2017)	10%	60%	62%
(Goh et al. 2018)	35%	27%	38%
(Justo et al. 2018)	50%	69%	34%

Es ist deutlich erkennbar, dass der potentielle E-Modul bei den im Rahmen dieser Dissertation gefertigten Probekörpern deutlich besser erfüllt wird, als in der Literatur mit dem additiven Fertigungssystem MarkOne. Bei der Zugfestigkeit hingegen schneidet der MarkOne besser ab. Zu beachten ist jedoch, dass keiner der eigenen Probekörper

der Norm entsprechend versagt hat, sondern immer im Bereich der Einspannung gerissen ist, sodass die selbst hergestellten Probekörper weiteres Potential in Bezug auf die Zugfestigkeit besitzen. Weiterhin wird nochmal darauf hingewiesen, dass für die Materialparameter des Markforged Fasermaterials kein Datenblatt vorlag, sondern für die Berechnung die gleichen Literaturwerte wie bei den selbst benutzten Fasern angenommen wurden.

Für die entwickelte Anlage und den Prozess im Allgemeinen heißt dies, dass bei geeigneter Prozessführung und geeigneten Materialien die Anlagentechnologie aus dem Stand der Technik übertroffen werden kann. Die Anlagen- und Prozessentwicklung ist folglich als sehr erfolgreich einzuschätzen.

### **6.5.3 Fertigung des Demonstrators**

#### **6.5.3.1 Generierung der Fertigungsdaten für nicht-lineare FVK-Pfade**

Alle bisher gefertigten Probekörper weisen makroskopisch gesehen einen linearen Faserverlauf auf. Der in Kapitel 6.1.2 definierte Demonstrator, das DRS-Aktorgehäuse von *KA-RaceIng*, weist jedoch eine gewölbte Tragflächenform auf, sodass eine Fasereinführung in gekrümmten Pfaden erfolgen muss.

Ein in (A\_Wirth 2018) entwickeltes Tool ermöglicht unter der Verwendung der in Kapitel 6.2.3.7 beschriebenen Parameter und mathematischen Zusammenhänge die Erzeugung eines GCodes für FVK auch für nicht-lineare Implementierungspfade. Hierbei gilt die Einschränkung, dass Faserverstärkungen immer entlang eines Pfads parallel zur Randkontur implementiert werden.

Aus diesem Grund wird die CAD-Datei des DRS-Aktorgehäuses in zwei Komponenten aufgetrennt, einen mit Fasern zu verstärkenden Lastbereich und eine Reststruktur, welche die nicht zu verstärkende Strukturen enthält. Der mit Fasern zu verstärkende Bereich wird in Abbildung 6-29 a) dargestellt und in Abbildung 6-29 b) grau hervorgehoben, der unverstärkte Bereich wird in Abbildung 6-29 b) schwarz dargestellt (wurde bereits in Abbildung 6-3 gezeigt und wird hier zur Veranschaulichung nochmal wiederholt).



*Abbildung 6-29: a) Nur der mit Fasern zu verstärkende Bereich; b) der zu verstärkende Bereich (grau) in Zusammenhang mit der unverstärkten Struktur (schwarz) mit Genehmigung entnommen aus (A\_Wirth 2018, S. 55)*

Mit Hilfe des Tools werden für beide Bereiche die jeweils erforderlichen Befehle in den GCode geschrieben und entsprechend zusammengefügt. So wird gewährleistet, dass nur der zu verstärkende Bereich mit den Befehlen für die Faserimplementierung versehen wird. Eine genauere Beschreibung des Tools und der Vorgehensweise erfolgt in (A\_Wirth 2018, S. 54–57).

In jeder Schicht werden vier Linien mit Glasfasergarn im zu verstärkenden Bereich nebeneinander eingebracht, außen und innen wird zunächst auf Randkonturen zum Zweck des maximalen Fasereintrags verzichtet.

Die laut (A\_Wirth 2018, S. 54) verwendeten geometrischen Parameter im GCode lauten wie folgt:

- FVG: 20 %
- Schichtdicke: 0,2 mm
- B/H-Verhältnis: 1,34
- Tropfenlänge entlang des Faseraustrags (nach Formel 6-26): 0,292 mm
- Tropfenbreite quer zum Faseraustrag (nach Formel 6-25): 0,329 mm

Zusätzlich werden dem GCode Befehle hinzugefügt, welche ca. alle 2 Stunden eine Unterbrechung des Bauauftrags ausführen, damit immer wieder kontrolliert werden kann, ob die Fertigung erfolgreich verläuft.

### 6.5.3.2 Additive Fertigung der Demonstratorgeometrie

Der Demonstrator wird basierend auf den in Kapitel 6.5.3.1 gegebenen Informationen in einer Fertigungszeit von 18 Stunden und mit der Verwendung von 182 m Glasfaser-garn hergestellt (A\_Wirth 2018, S. 55). Das fertige Bauteil ist in folgender Abbildung 6-30 dargestellt.

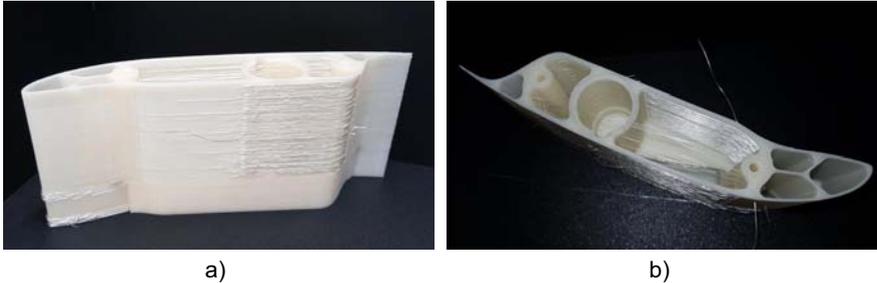


Abbildung 6-30: a) Seitenansicht des DRS-Aktorgehäuses; b) Draufsicht auf das DRS-Aktorgehäuse

Der mit Fasern verstärkte Bereich ist deutlich zu erkennen, da nicht alle Fasern komplett innerhalb der Bauteilstruktur eingearbeitet wurden, sondern teilweise innen oder außen herausstehen. Vermutlich liegt dies an kleinen Ungenauigkeiten bei der Angleichung der Faseraustrags- und der Fertigungsgeschwindigkeit, sodass die Fasern bei einer zu schnellen Förderung durch Stauchung von der eigentlichen Bahn nach außen hin abweichen und somit nicht mehr vollständig in den Kunststoff implementiert werden. Insgesamt kann jedoch von einer erfolgreichen Fertigung gesprochen werden.

Abbildung 6-31 zeigt die Einbaupositionen der DRS-Aktorgehäuse im Flügel des KA-RaceIng Rennwagens. In Abbildung 6-31 a) ist der zusammengebaute Heckflügel am Rennwagen zu sehen, in Abbildung 6-31 b) die verstellbaren DRS-Flügel, welche im Heckflügel eingebaut werden. Die Einbaupositionen der additiv gefertigten DRS-Aktorgehäuse sind jeweils rot mit durchgehender Linie markiert, die gegenüberliegenden Lagerpunkte ohne Aktor-Implementierung sind gestrichelt markiert.

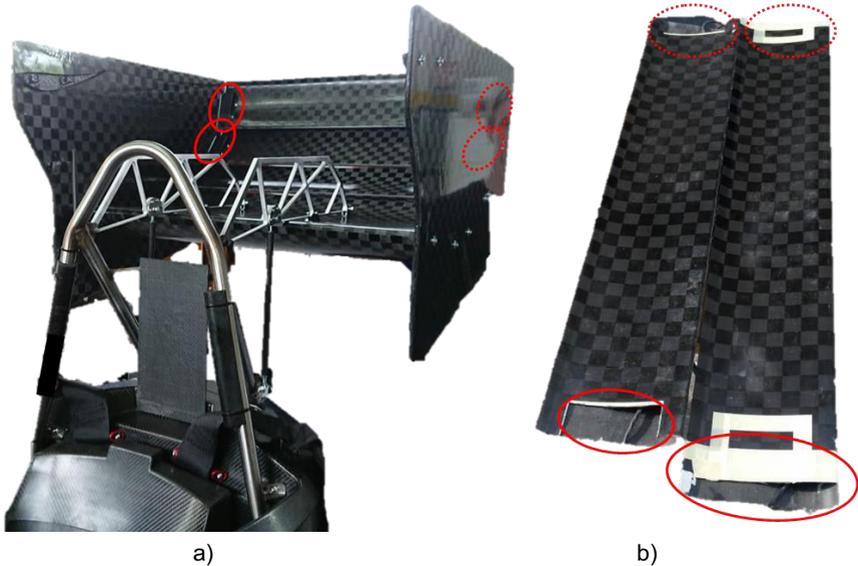


Abbildung 6-31: a) Heckflügel des KA-RaceIng Rennwagens und b) DRS-Flügel mit Freiräumen für die Integration der Aktorgehäuse. Fotos: (KA-RaceIng e.V. 2018)

Auch wenn die hergestellten DRS-Aktorgehäuse aufgrund der sichtbaren und teilweise herausstehenden Fasern nicht optimal aussehen, sind sie dennoch funktionsfähig und erfüllen den angedachten Einsatzzweck. Somit konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Anlagen- und Prozesstechnologie zusammen mit den ermittelten Verarbeitungsparametern zwar keine optimalen Ergebnisse liefert, jedoch auch für komplexe Geometrien grundlegend gut funktioniert und zudem eine genügend hohe Prozesssicherheit auch für länger andauernde Fertigungsaufträge aufweist.

## 7 Bewertung

In diesem Kapitel wird zunächst die Methodik für die Verfahrensentwicklung und die Parameterstudie bewertet, anschließend wird das eigentliche Ergebnis, die Anlage und der Prozess, diskutiert.

### 7.1 Methodik

Die Methodik bei der Entwicklung des Verfahrens und bei der durchgeführten Parameterstudie ist hauptsächlich in Bezug auf die daraus resultierenden Ergebnisse, also die Verwendbarkeit des Anlagenmoduls und des dazugehörigen Prozesses und die Rückschlüsse aus der Parametervariation, zu bewerten.

#### 7.1.1 Verfahrensentwicklung

Wie bereits am Anfang der Verfahrensentwicklung in Kapitel 6.2 beschrieben worden ist, wurde das Anlagenmodul für die Implementierung von Endlosfasern nicht explizit Schritt für Schritt auf Basis der „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ (VDI-Richtlinie 2221) entwickelt, da diese als Grundlagenwissen vorausgesetzt wird. Die darin beschriebenen Methoden und Vorgehensweisen werden jedoch an verschiedenen Stellen angewendet, auch ohne explizit darauf hinzuweisen.

Am Anfang der Entwicklung nicht erst rein theoretisch eine Möglichkeit der Faserimplementierung zu ermitteln, sondern stattdessen nur die groben Randbedingungen als „Leitlinien“ aufzunehmen, hat sich als zielführende Vorgehensweise herausgestellt. Somit wurde bei den in (Baumann et al. 2017a) beschriebenen Vorversuchen die Verarbeitung von Endlosfasern auf verschiedene Arten direkt experimentell untersucht und es konnte schnell eine Entscheidung über das Verfahren mit dem höchsten Potential getroffen werden, welches, wie in (Baumann et al. 2017b) und dem entsprechenden Patent (Baumann und Duffner 2015) beschrieben, umgesetzt wurde.

Da das entwickelte Verfahren erfolgreich validiert werden konnte und eine Verbesserung zum Stand der Technik realisiert werden konnte, ist die Verfahrensentwicklung und somit auch das Vorgehen hierzu als erfolgreich zu bewerten.

### **7.1.2 Parameterstudie**

Für die Parameterstudie im Rahmen dieser Dissertation wurden die zu untersuchenden Einflussfaktoren mit größter Sorgfalt ausgewählt und es wurden mit der Temperatur der Austragsdüse, der Temperatur des Bauraums und des lokalen Faservolumengehalts nur jene Faktoren ausgewählt, deren Variation eine große Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften erwarten ließen. Die Parameterstudie, welcher ein vollfaktoriel-ler Versuchsplan zu Grunde lag, war in großen Teilen erfolgreich, da optimale Parameter gefunden werden konnten. Allerdings hat sich hier bei den Zugversuchen herausgestellt, dass die Anbindung der Fasern an die Matrix nicht optimal ist, da es nie zu einem Versagen des FVK-Bereichs, sondern immer zu einem Versagen im Grenzbe-reich zwischen Fasern und Matrix gekommen ist. Somit liegen die ermittelten Ergeb-nisse der Zugfestigkeit auch außerhalb des erwarteten Bereichs und sind zum Teil deut-lich schlechter als Werte mit vergleichbarem FVG aus dem Stand der Technik.

Auf den E-Modul hat das Versagensverhalten jedoch keine Auswirkung, sodass dieser Teil der Parameterstudie erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Die Analyse der Korrelation zwischen den gleichzeitig hergestellten Probekörpern hat ergeben, dass die gewählten Einflussgrößen nicht konstant bzw. genau eingehalten werden konnten oder es noch zusätzliche, bisher unbekannte Störgrößen gibt. Trotz-dem konnten statistisch signifikante Auswirkungen der Einflussfaktoren auf die Zielgrö-ßen nachgewiesen werden.

Die Parameterstudie ist somit insgesamt als erfolgreich einzuschätzen, auch wenn noch keine optimalen Parameter für eine konstant gute Anhaftung bei hohen FVG ge-funden werden konnten und die Ergebnisse unerwünschte Wechselwirkungen aufzei-gen.

## **7.2 Anlage und Prozess**

Die Anlage und der Prozess sind auf Basis der in der Zielsetzung definierten Anfor-derungen zu bewerten. Zunächst erfolgt jedoch eine allgemeine Bewertung des Moduls und der Implementierungsprozesse für die linearen und nicht-linearen FVK-Pfade.

### 7.2.1 Modul für die Faserimplementierung

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modul für die Faserimplementierung ist voll funktionsfähig und für die additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen gut geeignet.

Die ausgewählten Komponenten sowie die Ansteuerung funktionieren trotz der scharfen Randbedingungen (insbesondere der hohen Bauraumtemperatur) fehlerfrei. Trotzdem ist es im Rahmen der Parameterstudie zu sieben Fehldrucken, von denen vier rechtzeitig entdeckt und ersetzt wurden, gekommen. Während der DoE-Analyse wurden 48 FVK-Probekörper gefertigt, für die nachfolgende Validierung weitere 15. Insgesamt wurden somit 60 Gutteile und sieben Ausschussteile gefertigt, der Ausschuss lag bei 10,4 %. Hervorzuheben ist, dass das DRS-Aktorgehäuse mehrfach mit 18 Stunden Fertigungsdauer bis auf herausstehende Fasern fehlerfrei gefertigt wurde. In Anlehnung an den Technologie-Reifegrad aus der Luft- und Raumfahrt wird der Reifegrad 7 von 10 erreicht: „Modelldemonstration der Leistung des Elements in der Einsatzumgebung“ (DIN ISO 16290, S. 14).

Das Anlagenmodul weist jedoch trotz des hohen Reifegrades noch einzelne Schwachstellen bzw. Optimierungspotentiale auf. Der Verschleiß der gummierten Förderwalzen, welcher nach einigen Betriebsstunden und vielen hundert Metern geförderter Fasern auftritt und welcher wahrscheinlich auch ein Grund für das Aufwickeln der Fasern auf die Förderwalzen ist, muss reduziert werden. Folgende Abbildung 7-1 zeigt die verschlissenen gummierten Rollen.

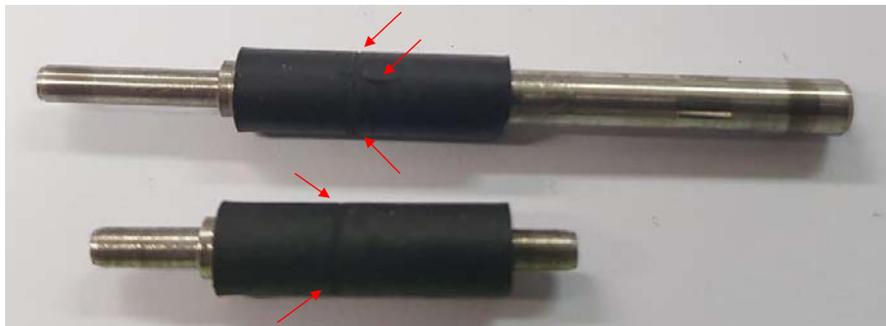


Abbildung 7-1: Verschlissenes Förderrollenpaar

Beide Förderrollen weisen eine kleine umlaufende Nut auf, die durch die zu fördernden Glasfasern in das Material gerieben wurde. Problematischer ist jedoch der auf der oberen Förderrolle zu erkennende Riss in Achsenrichtung. Dieser Riss ist nach Rücksprache mit dem Materialhersteller auf eine thermische Überbeanspruchung zurückzuführen. Das Rollenmaterial ist folglich für weiterführende Arbeiten durch ein Material mit höherer Temperaturbelastbarkeit auszutauschen, beispielsweise auf Silikonbasis.

Das Trennen der Fasern durch Abreißen bzw. Brechen an der Kanülenkante funktioniert weitestgehend. Es kommt jedoch selten vor, dass beim Trennen die Garne etwas auffasern und somit in andere Bereiche des Bauteils gelangen können. Somit ist die Implementierung einer Schneidvorrichtung vor allem auch in Anbetracht des Wunsches, verschiedene Fasermaterialien verarbeiten zu können, welche sich nicht durch Brechen an der Kanülenkante trennen lassen, empfehlenswert.

### **7.2.2 Prozess für lineare FVK-Pfade**

Allgemein ist bei den im Rahmen dieser Dissertation gefertigten Proben zu erkennen, dass die Potentialerfüllung beim E-Modul mit zunehmendem FVG nur wenig, bei der Zugfestigkeit jedoch sehr stark abnimmt. Dort ist sogar zu erkennen, dass auch die Absolutwerte bei steigendem FVG abnehmen.

Unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens der FVK-Probekörper ist darauf zu schließen, dass mit zunehmendem FVG die Anbindung zwischen Fasern und Matrix immer schlechter wird und die eingebrachten Verstärkungsfasern aufgrund fehlender Haftung zur darunterliegenden Schicht eine trennende Wirkung zwischen den verschiedenen Fertigungsebenen aufweisen. Dies führt dazu, dass bei allen Probekörpern der Parameterstudie die Verstärkungsfasern aus der Matrix herausgezogen werden oder sogar ganze Schichten voneinander abgleiten.

Um das ungewünschte Versagensverhalten in Zukunft zu verhindern, muss ein Weg gefunden werden, den FVK-Bereich besser mit der umgebenden Matrix und der darunter liegenden Schicht zu verbinden. Neben der Untersuchung einer anderen Faserbeschichtung könnte auch die Verwendung von Hybridgarnen eine Möglichkeit darstellen, da bei diesen eine vollständige Infiltration der Faserbündel gewährleistet wäre. Auch eine direkt an die Faserablage anschließende Nachbearbeitung, bei welcher der Kunststoff und die Fasern nochmals erhitzt und/oder zusammengepresst werden, könnte eine Möglichkeit sein, die Anbindung zwischen den Schichten und insbesondere zwi-

schen Kunststoff und Fasern zu verbessern. Eine weitere Möglichkeit könnte die Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Fasern und Matrix sein, indem feinere Garne verwendet werden, sodass mit mehr Faserlinien für die gleiche Faserfüllung automatisch auch in Summe eine größere Kontaktfläche entsteht.

### 7.2.3 Prozess für nicht-lineare FVK-Pfade

Die größte Herausforderung beim gesamten Prozess für die Erzeugung nicht-linearer FVK-Pfade ist das Aufteilen in FVK- und nicht-FVK-Bereiche innerhalb der Konstruktionsdaten. Dies ist eine mühsame und zeitaufwendige Arbeit, die aktuell nur von einem Fachmann mit Verständnis im Faserverbund-Bereich durchgeführt werden sollte. Sie erlaubt aber eine eindeutige Unterscheidung der beiden Bereiche und eine Anpassung der Strukturen für einen optimalen Faserverlauf.

Die hier verwendete und in (A\_Wirth 2018) beschriebene Lösung funktioniert zwar, liefert jedoch keine optimalen Ergebnisse, da oftmals Fasern aus dem Bauteil herausstehen. Das ursächliche Problem stellt hier vermutlich die fehlende Synchronisation zwischen Fördermotor der Fasern und Plattformbewegungen des freeformers dar. Aktuell werden die richtungsabhängigen Bewegungsgeschwindigkeiten mühsam an die Fördergeschwindigkeit der Fasern angeglichen und je nach Drehwinkeldifferenz sind noch Pausenzeiten zu berücksichtigen. Dies wurde zwar durch viele Versuche größtenteils aufeinander abgestimmt, eine richtige Synchronisation über die CNC des freeformers ist hier aber unabdingbar für hochwertige FVK-Bauteile. Eine Alternative hierfür wäre der Verzicht auf die aktive Faserförderung während der Fertigung und stattdessen ein Herausziehen der Fasern durch die bereits in das Bauteil implementierten Fasern. Dies hätte zudem den Vorteil, dass die Fasern unter definierter Vorspannung implementiert werden könnten. Ein hinzuschaltbarer Vorschub für die Erstimplementierung der Fasern wäre jedoch trotzdem notwendig.

Weiterhin ist eine alternative Datenaufbereitung für die Generierung der FVK-Pfade nötig, um den Gesamtprozess zu vereinfachen und zu verkürzen und um die Faserablage weiter zu optimieren. Eine direkte Ableitung der FVK-Pfade auf Basis eines Belastungsfalles innerhalb einer Simulationsumgebung hätte beispielsweise die optimale Faserpositionierung bei minimalem Entwicklungsaufwand zur Folge. Erste Überlegungen hierzu werden ebenfalls in (A\_Wirth 2018) vorgestellt.

## 7.2.4 Bewertung auf Basis der Zielsetzung

Auf Basis der in der Zielsetzung definierten Anforderungen werden in den folgenden Kapiteln der entwickelte Prozess und das dazu gehörende Modul zur Faserimplementierung bewertet. Die hierbei vergebenen Punkte werden im Anschluss in der Nutzwertanalyse in Tabelle 7-1 zusammengefasst und mit der Bewertung des Stands der Technik aus Tabelle 3-1 verglichen.

### 7.2.4.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden durch die Implementierung von Endlosfasern im Vergleich zu unverstärktem Kunststoff deutlich verbessert. Im Vergleich zu endlosfaserverstärkten Kunststoffen aus dem Stand der Technik muss zwischen dem E-Modul und der Zugfestigkeit unterschieden werden.

Der Absolutwert des E-Moduls der Probekörper, welche mit den optimierten Verarbeitungsparametern gefertigt wurden, übertrifft die Werte der vergleichbaren Proben aus dem Stand der Technik teils deutlich. Jedoch ist hier die unterschiedliche Matrix zu berücksichtigen. Aber auch in Bezug auf die mit dem Voigt-Modell berechneten theoretisch möglichen E-Moduln schneiden die selbst hergestellten Proben sehr gut ab (92 % bis 95 % vs. 27 % bis 69 % Erfüllung des Potentials, s. Tabelle 6-27).

Bei Betrachtung der Zugfestigkeit zeigt sich jedoch, dass die Werte aus dem Stand der Technik nicht erreicht werden können. Hierbei liegt der Grad der Erfüllung bei maximal 56 %, im Stand der Technik bei bis zu 62 %. Bei höheren FVG sinkt der Grad der Erfüllung bei den selbst hergestellten Proben wesentlich stärker als bei den Werten aus dem Stand der Technik.

Insgesamt werden die mechanischen Eigenschaften der gefertigten Proben mit drei Punkten und somit einen Punkt schlechter als die mechanischen Eigenschaften der eFVK aus dem Stand der Technik bewertet, da zwar bei vergleichbaren FVG der E-Modul besser, die Zugfestigkeit aber zum Teil deutlich schlechter ist. Die Maximalwerte aus dem Stand der Technik können nicht erreicht werden.

Wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, könnte durch die Verbesserung der Faser-Matrix-Anbindung noch weiteres Potential des entwickelten Verfahrens ausgenutzt und der Stand der Technik somit eingeholt und sogar überholt werden. Eine verbesserte Anbindung der Fasern an die Matrix könnte z.B. durch andere Beschichtungsmaterialien der Fasern oder durch eine weitere Prozessoptimierung erfolgen. Vor allem könnte jedoch

durch die Verwendung feinerer Fasergarne eine feinere Fertigungsauflösung und somit bei gleichem Fasergehalt eine größere Oberfläche zur Anbindung der Fasern an die Matrix generiert werden.

#### **7.2.4.2 Materialauswahl**

Das Ziel der möglichst großen verwendbaren Materialauswahl wird mit dem entwickelten Prozess größtenteils erfüllt. Die Matrixauswahl ist durch die Verwendung des ARBURG freeformers größtmöglich, der Prozess der eigentlichen Faserimplementierung ist von der Art der Faser unabhängig. Damit tatsächlich alle Faserarten verwendet werden können, fehlt aktuell jedoch noch ein geeigneter, kontrollierter Schneidprozess. Weiterhin ist zu beachten, dass die Fasern auf geeignete Art beschichtet werden müssen, bevor sie im Prozess fehlerfrei verarbeitet werden können. Trotz dieser Einschränkungen wird die Materialauswahl mit drei Punkten bewertet und ist aufgrund der sehr geringen Faserauswahl der Verfahren aus dem Stand der Technik somit deutlich besser für die additiven Fertigung geeignet.

Weiteres Potential für eine bessere Bewertung der Materialauswahl liegt neben der Implementierung eines Schneidprozesses in der Verfügbarkeit von feinen Faserhalbzeugen, um so auch für noch feinere Fertigungsaufösungen ein geeignetes Fasermaterial verwenden zu können.

#### **7.2.4.3 Effizienter Fasereinsatz**

Die Fertigung des DRS-Aktor-Gehäuses zeigt, dass eine parallele Fertigung von Kunststoff- und FVK-Bereichen in einem Bauteil möglich ist. Somit muss die Faser allgemein nur dort eingesetzt werden, wo sie zwingend erforderlich ist. Allerdings liegen aktuell noch Schwächen bei der Anbindung der Verstärkungsfasern an die Matrix vor, sodass das Potential der mechanischen Eigenschaften noch nicht voll ausgenutzt werden kann und noch keine 100-prozentige Effizienz vorliegt. Die Effizienz des Fasereinsatzes wird folglich mit drei Punkten bewertet und ist somit besser als bisherige additive eFVK-Prozesse.

Das weitere Potential des effizienten Fasereinsatzes ist somit eng mit dem Potential für die mechanischen Eigenschaften verknüpft. Gelingt es, die Verstärkungsfasern gut an die Matrix anzubinden und so das Potential der mechanischen Eigenschaften auszuschöpfen, verbessert sich auch automatisch die Effizienz des Fasereinsatzes.

#### **7.2.4.4 Erzielbare Bauteilkomplexität**

Mit Hilfe des entwickelten Prozesses ist es möglich, auch sehr dünne Strukturen bis hin zu einer Tropfenbreite mit Fasern zu verstärken (ca. 0,3 mm Wandstärke), was im Stand der Technik mit Endlosfaserverstärkungen bisher nicht möglich ist. Auch ist es möglich, nur wenige Zentimeter lange Implementierungspfade zu erzeugen. Die erzielbare Bauteilkomplexität ist somit größer als die von additiven eFVK-Prozessen im Stand der Technik. Da jedoch insbesondere Einschränkungen bei der Fertigung nicht-linearer Pfade gegeben sind, wird die erzielbare Bauteilkomplexität mit drei Punkten bewertet.

Weiteres Potential erschließt sich durch die Verwendung feinerer Faserhalbzeuge für die Fertigung feinerer Strukturen. Zudem ist es mit der Anlagentechnologie zwar möglich, nicht lineare Pfade mit Fasern zu verstärken, jedoch ist der Aufwand hierfür aktuell noch sehr groß und die Qualität nicht optimal. Eine vereinfachte Datenaufbereitung, welche, wie am Ende von Kapitel 7.2.3 beschrieben, direkt aus einer Simulation die Bauteilbelastung in Verstärkungspfade überführt, kann dem Anwender hier viel Arbeit ersparen.

#### **7.2.4.5 Vorlaufzeit**

Durch die aufwendige Erzeugung der Fertigungsdaten für den entwickelten Prozess ergeben sich etwas längere Vorlaufzeiten als bisher in der additiven Fertigung. Allerdings lag hierauf bei der Prozessentwicklung kein Schwerpunkt und durch die Entwicklung und Bereitstellung einer geeigneten Software für die Erzeugung der Fertigungsdaten für eFVK kann dieser Punkt schnell vollständig erfüllt werden. Um die Verstärkungsfasern verarbeiten zu können, ist eine Vorbehandlung (Beschichtung der Fasergarne) nötig, welche die Vorlaufzeit weiter vergrößert. Zum aktuellen Zeitpunkt ergibt sich im Vergleich zu den additiven FVK-Verfahren aus dem Stand der Technik hierdurch folglich eine Verschlechterung, sodass dieses Kriterium mit nur einem Punkt bewertet werden kann.

#### **7.2.4.6 Zusammenfassung der Bewertung**

In folgender Tabelle 7-1 werden die im Stand der Technik erfüllten Anforderungen und die tatsächliche Erfüllung der Anforderungen durch den entwickelten Prozess beschrieben.

Tabelle 7-1: Erfüllung der Anforderungen

Bewertungs- kriterien	Additiv gefertigte Kunststoffe			Additiv gefertigte kFVK		Additiv gefertigte eFVK		Entwickeltes Verfahren	
	GF	BF	BF*GF	BF	BF*GF	BF	BF*GF	BF	BF*GF
Mechanische Eigenschaften	35,0	0	0,0	2	70,0	4	140,0	3	105,0
Materialauswahl	27,5	3	82,5	1	27,5	0	0,0	3	82,5
Effizienter Materialeinsatz	15,0	4	60,0	3	45,0	2	30,0	3	45,0
Erzielbare Bau- teilkomplexität	15,0	4	60,0	4	60,0	2	30,0	3	45,0
Vorlaufzeit	7,5	4	30,0	3	22,5	2	15,0	1	7,5
Summe	100		232,5		225,0		215,0		285,0
Erfüllungsgrad			<b>58,1 %</b>		<b>56,3 %</b>		<b>53,8 %</b>		<b>71,3 %</b>

Im Vergleich zu den additiven eFVK-Verfahren im Stand der Technik liegt das im Rahmen dieser Dissertation ausgearbeitete Verfahren bei den Bewertungskriterien der mechanischen Eigenschaften und der Vorlaufzeit zurück. Der erreichte E-Modul übertrifft die Werte aus dem Stand der Technik zwar, die Zugfestigkeit ist jedoch deutlich schlechter. Auch wenn mit 95 % gegenüber 69 % (E-Modul) das Verstärkungspotential bei einzelnen Probenreihen besser erfüllt wurde als im Stand der Technik, führt der höhere erreichbare Faservolumengehalt dort zu deutlich größeren Absolutwerten. Zudem ist die Vorlaufzeit aufgrund der aufwendigen Erzeugung der Fertigungsdaten und der Vorbehandlung der Verstärkungsfasern länger als im Stand der Technik. In den drei weiteren Punkten ist das entwickelte Verfahren jedoch besser als die eFVK-Verfahren im Stand der Technik.

Insgesamt eignet sich das entwickelte Verfahren unter Berücksichtigung der genannten Bewertungskriterien am besten für die industrielle additive Fertigung in Kleinserien. Es ist jedoch zu beachten, dass das Verfahren aktuell im Technologie-Reifegrad 7 umgesetzt wurde (Demonstration in Einsatzumgebung) aber für eine industrielle Umsetzung eine zu hohe Ausschussrate besitzt, auch wenn die DRS-Aktorgehäuse erfolgreich gefertigt werden konnten.

Jedes Bewertungskriterium lässt noch Spielraum für weitere Verbesserungen und Optimierungen. Neben der zuvor genannten, bei den Bewertungskriterien jedoch nicht berücksichtigten Prozesssicherheit müssen insbesondere die Anhaftung zwischen Matrix und Fasern und die Datenaufbereitung optimiert werden, erst dann kann das Verfahren sinnvoll industriell verwendet werden, bzw. können voll funktionsfähige Bauteile gefertigt werden.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Zusammenfassung**

Die additive Fertigung von Thermoplasten weist sehr viele Vorteile auf, beispielsweise die einfache und wirtschaftliche Fertigung von Einzelstücken und Kleinserien sowie die Realisierung von komplexen Bauteilstrukturen. Jedoch konnte sie sich bislang noch nicht vollständig erfolgreich durchsetzen, da die mechanische Belastbarkeit der additiv gefertigten Bauteile nicht an jene von herkömmlich hergestellten Bauteilen, z. B. aus einem Spritzgussprozess, heranreicht. Dem entgegengesetzt steht die Materialklasse der FVK, welche zwar sehr gute mechanische Eigenschaften aufweist, deren Herstellung jedoch meist sehr aufwendig ist und teure Maschinenteknologie benötigt, was eine Fertigung von Einzelstücken und Kleinserien unwirtschaftlich macht. Auch die realisierbare Bauteilkomplexität ist bei den meisten FVK-Bauteilen stark eingeschränkt.

Das Ziel war daher, ein Verfahren inklusive zugehöriger Maschinenteknik zu entwickeln und zu validieren, mit welchem Faserverstärkungen innerhalb der additiven Fertigung verwendet werden können. Genutzt wurde hierfür das ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren mit zugehöriger Fertigungsanlage ARBURG freeformer.

Zunächst wurde nach einem kurzen Grundlagen-Exkurs in die Theorie der FVK und der additiven Fertigung der aktuelle Stand der Forschung und Technik in Bezug auf die Verwendung von Faserverstärkungen in der additiven Fertigung intensiv betrachtet und erläutert. So war es möglich, einen Überblick über die verschiedenen Fertigungstechnologien, welche Kurz- und Endlofaserverstärkungen verwenden, zu erhalten und eine Datenbasis bezüglich der mechanischen Kennwerte, insbesondere E-Modul und Zugfestigkeit, unter Berücksichtigung des jeweiligen FVGs, zu erzeugen, welche am Ende der Arbeit als Vergleichsbasis diente.

Die eigentliche Prozess- und Anlagenentwicklung erfolgte basierend auf einer Bewertung des Stands der Technik. Die zu Grunde liegenden Bewertungskriterien wurden hierfür unter Berücksichtigung der Defizite aktueller Verfahren und der Anforderungen an eine wirtschaftliche Fertigung von Einzelstücken und Kleinserien erarbeitet und mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs in Bezug auf ihre Wichtigkeit bewertet. Anschließend wurde die Zielsetzung entwickelt und das Zielsystem auf Basis der zuvor erarbeiteten Bewertungskriterien definiert.

Um einen vollfunktionsfähigen Prozess zu entwickeln, der alle geforderten Kriterien bestmöglich erfüllt, wurde für die Ermittlung aller benötigter Funktionen und gegebener Randbedingungen ein später herzustellendes Demonstratorbauteil zu Grunde gelegt. Als Demonstrator wurde das DRS-Aktor-Gehäuse des *KA-Racing* Rennwagens der Saison 2018 ausgewählt.

Die Lösung für die Anlagentechnologie sieht ein Modul vor, welches aus einer konzentrisch um den Kunststoffaustrag rotierenden Einheit besteht, über welche die Förderung eines Fasergarns realisiert wird. Die unter den Kunststoffaustrag geförderten Fasern werden direkt vom ausgetragenen Kunststoff überdruckt und so in das Bauteil integriert. Die Hauptfunktionen des Moduls bestehen darin, die richtige Orientierung der Fasern einzustellen und diese dann zu fördern. Das Trennen der Fasern wird durch Abreißen bzw. Abbrechen an der Kante der austragenden Kanüle realisiert.

Um die Verarbeitungsparameter zu ermitteln, mit denen Bauteile mit besten mechanischen Eigenschaften hergestellt werden können, wurde eine Parameterstudie an unidirektional verstärkten Zugprobekörpern durchgeführt. Hierfür wurden zunächst die Zielgrößen und Einflussfaktoren ermittelt und anschließend ein entsprechender vollfaktorierter Versuchsplan aufgestellt. Bei der Probenfertigung wurde gleichzeitig mit jedem FVK-Probekörper ein unverstärkter Probekörper gefertigt, um so Korrelationen aus gegenseitiger Beeinflussung oder weitere Umwelteinflüsse erkennen zu können. Es konnten Korrelationen nachgewiesen werden, sodass zusätzliche unbekannte Umwelteinflüsse und/oder nicht konstante, bzw. nicht definiert eingestellte Einflussfaktoren vorliegen.

Die mit Hilfe der ANOVA ermittelten optimalen Verarbeitungsparameter lauten wie folgt:

- Düsentemperatur: 230 °C
- Bauraumtemperatur: 80 °C
- Faservolumengehalt: 15 %

Damit konnte mit einem globalen FVG von 21,1 % ein E-Modul von 16,2 GPa erreicht werden. Die höchste Zugfestigkeit ergab sich bereits bei der Parameteroptimierung bei einem FVG von 9,7 % mit 186 MPa bei gleichen Verarbeitungsparametern. Der E-Modul ist deutlich besser als vergleichbare Werte für eFVK aus der Literatur, die Zugfestigkeit jedoch meist schlechter. Die Erfüllung der mit den jeweiligen FVG theoretisch möglichen Werte berechnen sich für den E-Modul zu 95 % und für die Zugfestigkeit zu

56 %. Damit wird das Potential des entwickelten Verfahrens zum Teil besser erfüllt als im aktuellen Stand der Technik (E-Modul 69 % und Zugfestigkeit 62 %).

Die Ursache für die schlechte Zugfestigkeit der Probekörper innerhalb der Parameterstudie ließ sich bereits anhand des Versagensbildes in Abbildung 6-15 erklären. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Fasern aus der Matrix herausgezogen wurden und nur die Matrix gebrochen ist. Problematisch dürfte deswegen insbesondere die Faser-Matrix-Haftung gewesen sein.

Die Fertigung des DRS-Aktor-Gehäuses funktionierte trotz der aufwendigen Ermittlung des GCodes fehlerfrei, auch wenn das Ergebnis aufgrund der herausstehenden Fasern nicht optimal aussieht.

Das entwickelte Verfahren und die dazugehörigen Maschinenkomponenten sind aktuell im Technologie-Reifegrad 7 einzuordnen. Es konnte gezeigt werden, dass unter realen Einsatzbedingungen in einer normalen Arbeitshalle auch viele Bauteile nacheinander gefertigt werden konnten, wobei es jedoch einen durchschnittlichen Ausschuss aufgrund von Verarbeitungsfehlern von 10,4 % gab. Allerdings konnten mehrere DRS-Aktorgehäuse fehlerfrei über jeweils 18 Stunden gefertigt werden.

Zusammenfassend ist die Verfahrensentwicklung als erfolgreich einzuschätzen, da eine Verbesserung im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik erreicht wurde.

## **8.2 Ausblick**

Um das entwickelte Verfahren tatsächlich im industriellen Maßstab verwenden zu können, bedarf es noch diverser Anpassungen von Prozess und Anlage.

Zunächst ist der Prozess weiter zu optimieren, sodass nicht nur die Steifigkeit, sondern auch die Festigkeit der gefertigten FVK die Verstärkungswirkung aus dem Stand der Technik erreicht bzw. übertrifft. Da die Ursache für die schlechte Zugfestigkeit in einer schlechten Anbindungsqualität zwischen Fasern und Matrix und den einzelnen Schichten vermutet wird, könnte hier durch andere Schichten oder eine andere Art der Vorimprägnierung die Anhaftung verbessert werden. Auch das Vergrößern der Kontaktfläche zwischen Fasern und Matrix, indem mit kleineren Garndurchmessern feinere FVK-Linien gefertigt werden, könnte zu einer besseren Kraftübertragung führen. Dies würde sich jedoch nachteilig auf die Fertigungsdauer auswirken. Auch ein nachgeschalteter Prozess, der die einzelnen Schichten und die Fasern mit der umgebenden Matrix bspw.

durch nachträgliches Aufbringen von Temperatur und Druck besser verbindet, wäre denkbar.

Weiterhin ist der Ausschuss zu reduzieren. Ursache für Fehldrucke war vor allem in den hier nicht weiter beschriebenen Vorversuchen meist das Umwickeln der Vorschubrollen mit den Verstärkungsfasern. Dies wird durch die Beschichtung der Fasern zwar weitgehend verhindert, jedoch nicht vollständig ausgeschlossen. Aus diesem Grund sollte eine Sensorik hinzugefügt werden, welche erkennt, ob die Fasern korrekt verarbeitet werden oder ob Prozessfehler auftreten.

Um zudem eine tatsächliche Verarbeitbarkeit von allen Fasermaterialien gewährleisten zu können, wird die Implementierung eines Schneidmoduls empfohlen. Bei der Verarbeitung der Glasfasern ist es zwar kein einziges Mal vorgekommen, dass das Abreißen der Fasern zu einem Fehldruck führte, auch für Carbonfasern konnte in hier nicht näher beschriebenen manuellen Vorversuchen bereits die Funktion dieses Trennverfahrens nachgewiesen werden. Trotzdem ist ein kontrollierter Schneidprozess vorzuziehen und kann der Prozesssicherheit nur zuträglich sein. Zudem könnte der Schneidprozess eine weitere Verringerung der minimalen Faserlänge ermöglichen, da dann die Implementierungslänge, die für das Aufbringen der Haltekraft beim Abreißen notwendig ist, deutlich verringert werden könnte.

Bei der Fertigung des DRS-Aktorgehäuses ist es dazu gekommen, dass vor allem auf gekrümmten Bahnen die Fasern nicht optimal integriert wurden, da die Fertigungsgeschwindigkeit des freeformers nicht zu 100 % mit der Fördergeschwindigkeit der Fasern übereinstimmte. Um diese Problematik in den Griff zu bekommen, kann einerseits eine vollständige Synchronisierung umgesetzt werden, indem die Faserförderung auch in die CNC des freeformers eingebunden wird. Andererseits wäre auch ein passives Herausziehen der Fasern durch den bereits im Bauteil implementierten Beginn der Fasern möglich, sodass man hier nur die Zugspannung im Fasergarn regeln müsste und nur am Anfang einer Faserimplementierung kurz Fasern fördert.

Weiterhin wird eine einfachere Methode der Datenaufbereitung benötigt. Aktuell ist es sehr komplex, ein Bauteil zunächst in FVK- und Reststruktur zu unterteilen. Eine automatische GCode-Erzeugung inklusive Faserplatzierung, bestenfalls in Abhängigkeit der Bauteilbelastung, wäre hier von großem Vorteil.

Bisher wurde auch noch nicht die Verwendung weiterer Materialien geprüft. Somit sollte auf jeden Fall ermittelt werden, wie gut sich die Fasern in andere Matrixwerkstoffe implementieren lassen. Aber auch die Verwendung alternativer Fasern, z. B. Kohlenstoff- und Aramidfasern, ist zu prüfen. Weiterhin kann auch eine Verwendung anderer linearer Materialien, wie beispielsweise Kabel, Drähte oder Metallfasern geprüft werden. So wäre es beispielsweise gut möglich, Datenkabel mit Hilfe des Moduls zur Faserimplementierung in ein Bauteil zu integrieren, um diese so vor Einflüssen von außen zu schützen.

## Literaturverzeichnis

A\_Müller, Martin (2017): Optimierung der Verarbeitungsparameter bei der additiven Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen. Bachelorarbeit: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Muthler, Tobias (2018): Entwicklung und Auswahl einer Fertigungsstrategie für die additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile. Masterarbeit: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Sproll, Andrea (2017): Entwicklung einer Vorgehensweise für die Positionierung und Kalibrierung eines Anlagenmoduls zur additiven Fertigung höherfester Bauteile. Bachelorarbeit: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Wirth, Benjamin (2018): Erzeugung von Werkzeugpfaden für die belastungsgerechte Positionierung von Verstärkungsfasern in der additiven Fertigung. Masterarbeit: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Zhu, Ranran (2018): Optimierung der Prozessparameter für die additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen. Masterarbeit: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik.

ARBURG GmbH + Co. KG (2013): today - Das ARBURG Magazin - Ausgabe 53 2013. Die neue Freiheit. Hg. v. ARBURG GmbH + Co. KG (Ausgabe 53). Online verfügbar unter <http://www.arburg.com>, zuletzt geprüft am 31.10.2018.

ARBURG GmbH + Co. KG (2014a): today - Das ARBURG Magazin - Ausgabe 54 2014. Unter der Lupe - freeformer: Funktionsteile in hoher Qualität. Hg. v. ARBURG GmbH + Co. KG (Ausgabe 54). Online verfügbar unter <http://www.arburg.com>, zuletzt geprüft am 31.10.2018.

ARBURG GmbH + Co. KG (2014b): today - Das ARBURG Magazin - Ausgabe 56 2014. Für Sie haben wir alles! Hg. v. ARBURG GmbH + Co. KG (Ausgabe 56). Online verfügbar unter <http://www.arburg.com>, zuletzt geprüft am 17.01.2019.

ARBURG GmbH + Co. KG (2015): AKF G-Code Befehlsbeschreibung. Interne Dokumentation der ARBURG GmbH + Co KG. Lossburg.

ARBURG GmbH + Co. KG (2016): ARBURG Kunststoff Freiformen - Materialqualifizierung. Nicht öffentlich zugängliche Schulungsunterlagen. Hg. v. ARBURG GmbH + Co. KG. Lossburg.

ARBURG GmbH + Co. KG (2017): AKF - ARBURG Kunststoff-Freiformen. Hg. v. ARBURG GmbH + Co. KG. Online verfügbar unter [https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg\\_akf\\_681216\\_de.pdf](https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_akf_681216_de.pdf), zuletzt geprüft am 05.03.2018.

Baumann, Florian; Duffner, Eberhard (2015): Patent: Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines dreidimensionalen Gegenstandes mit einer Faserzuführeinrichtung. Angemeldet durch ARBURG GmbH + Co. KG am 22.12.2015. Anmeldendr.: 102015122647. Veröffentlichungsnr: WO2017108758A1.

Baumann, Florian; Müller, Martin; Coutandin, Sven; Fleischer, Jürgen (2018): Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen – Eine Parameterstudie. *Technologietag Hybrider Leichtbau*. Leichtbau BW GmbH. Stuttgart, 25.06.2018.

Baumann, Florian; Scholz, Julian; Fleischer, Jürgen (2017a): Investigation of a New Approach for Additively Manufactured Continuous Fiber-reinforced Polymers, S. 323–328. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.276. 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing, Karlsruhe.

Baumann, Florian; Sielaff, Lennard; Fleischer, Jürgen (2017b): Process Analysis and Development of a Module for Implementing Continuous Fibres in an Additive Manufacturing Process. In: *SAMPE Europe Symposium 2017*, ISBN 978-90-821727-7-5. SAMPE Europe Conference 2017, Stuttgart.

Bettini, Paolo; Alitta, Gianluca; Sala, Giuseppe; Di Landro, Luca (2017): Fused Deposition Technique for Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* 26 (2), S. 843–848. DOI: 10.1007/s11665-016-2459-8.

Bourell, David; Kruth, Jean-Pierre; Leu, Ming; Levy, Gideon; Rosen, David; Beese, Allison; Clare, Adam (2017): Materials for additive manufacturing. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66 (2), S. 659–681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009. CIRP General Assembly 2017, Lugano.

Brenken, Bastian; Barocio, Eduardo; Favaloro, Anthony; Kunc, Vlastimil; Pipes, Byron (2018): Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers. A review. In: *Additive Manufacturing* 21, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.addma.2018.01.002.

Breuninger, Jannis; Becker, Ralf; Wolf, Andreas; Rommel, Steve; Verl, Alexander (2013): Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern. Berlin [u.a.]: Springer, ISBN: 978-3-642-24324-0.

Bürkle, Erwin; Sieverding, Matthias; Mitzler, Jochen (2003): Spritzgießverarbeitung von langglasfaserverstärktem PP. In: *Kunststoffe* (3), S. 47–49.

Cox, Bryan; Saari, Matt; Xia, Bin; Richer, Edmond; Krueger, Paul; Cohen, Adam (2017): Fiber Encapsulation Additive Manufacturing. Technology and Applications Update. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 4 (2), S. 116–119. DOI: 10.1089/3dp.2016.0016.

DeNardo, Nicholas (2016): Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites. Master Thesis. Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Dickson, Andrew; Barry, James; McDonnell, Kevin; Dowling, Denis (2017): Fabrication of continuous carbon, glass and kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 16, S. 146–152. DOI: 10.1016/j.addma.2017.06.004.

DIN 66025, 01.1983: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

DIN EN ISO 527-1, 06.2012: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

DIN ISO 16290, 09.2016: Raumfahrtssysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien. Beuth Verlag GmbH. Berlin.

Duty, Chad; Drye, Tom; Franc, Alan (2015): Material Development for Tooling Applications Using Big Area Additive Manufacturing (BAAM). Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN.

Duty, Chad; Kunc, Vlastimil; Compton, Brett; Post, Brian; Erdman, Donald; Smith, Rachel et al. (2017): Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. In: *Rapid Prototyping Journal* 23 (1), S. 181–189. DOI: 10.1108/RPJ-12-2015-0183.

Ensinger GmbH (2018a): Materialdatenblatt PA12. Hg. v. Ensinger GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ensingerplastics.com/de-de/halbzeuge/produkte/pa12-tecamid-12-natural>, zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Ensinger GmbH (2018b): Materialdatenblatt PEI. Hg. v. Ensinger GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ensingerplastics.com/de-de/halbzeuge/produkte/tecapei-natural>, zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Ensinger GmbH (2018c): Materialdatenblatt PPS. Hg. v. Ensinger GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ensingerplastics.com/de-de/halbzeuge/produkte/tecatron-natural>, zuletzt geprüft am 15.03.2019.

EOS GmbH (2010): Materialdatenblatt CarbonMide PA12-CF. Hg. v. EOS GmbH. Online verfügbar unter <https://eos.materialdatacenter.com/eo/material/pdf/374141/CarbonMide?sLg=de&rnd=1552639472014>, zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Ferreira, Rafael Thiago Luiz; Amatte, Igor Cardoso; Dutra, Thiago Assis; Bürger, Daniel (2017): Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. In: *Composites Part B: Engineering* 124, S. 88–100. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013.

Fischer, Andreas; Rommel, Steve (2013): Bauteile im Faserkunststoffverbund aus dem 3D-Drucker. 3D Fibre Printer des Fraunhofer IPA ermöglicht generative Fertigung thermoplastischer Kunststoffteile mit integrierter Endlos-Karbonfaser. In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Hg.): *interaktiv - Das Kundenmagazin des Fraunhofer IPA*, Bd. 1.2013 (1), S. 10–13.

Frketic, Jolie; Dickens, Tarik; Ramakrishnan, Subramanian (2017): Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites. An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. In: *Additive Manufacturing* 14, S. 69–86. DOI: 10.1016/j.addma.2017.01.003.

Gardner, John; Sauti, Godfrey; Kim, Jae-Woo; Cano, Roberto; Wincheski, Russell; Barrera, Enrique (2016a): Additive manufacturing of multifunctional components using high density carbon nano-tube yarn filaments. SAMPE Conf Proc. SAMPE. Long Beach, CA, 2016.

Gardner, John; Sauti, Godfrey; Kim, Jae-Woo; Cano, Roberto; Wincheski, Russell; Stelter, Christopher et al. (2016b): 3-D printing of multifunctional carbon nanotube yarn

reinforced components. In: *Additive Manufacturing* 12, S. 38–44. DOI: 10.1016/j.addma.2016.06.008.

Gebhardt, Andreas (2013): *Generative Fertigungsverfahren. Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 4., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser, ISBN: 978-3-446-43652-7.

Girdis, Jordan; McCaffrey, Matthew; Proust, Gwenaelle (2016): Additive Manufacturing of Carbon Fiber and Graphene – Polymer Composites using the technique of Fused Deposition Modelling. In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* (27), S. 864–870. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/069-Girdis.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.

Goh, Guo Dong; Dikshit, Vishvesh; Nagalingam, Arun Prasanth; Goh, Guo Ling; Agarwala, Shweta; Sing, S. L. et al. (2018): Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. In: *Materials & Design* 137, S. 79–89. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.021.

Hagemann, Florian; Zäh, Michael (2006): *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München: Hanser (Kostengünstig produzieren), ISBN: 978-3-446-43957-3.

Hemmerich, Wenja (2018): *Einfaktorielle ANOVA*. StatistikGuru Version 1.96. Wiesbaden. Online verfügbar unter <https://statistikguru.de/spss/einfaktorielle-anova>, zuletzt aktualisiert am 2018, zuletzt geprüft am 04.11.2018.

Henning, Frank; Moeller, Elvira (2011): *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München: Hanser, ISBN: 978-3-446-42891-1.

Hill, Charles; Rowe, Kyle; Bedsole, Robert; Earle, James; Kunc, Vlastimil: Materials and process development for direct digital manufacturing of vehicles. SAMPE Conf Proc. SAMPE. Long Beach, CA. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/311734370\\_Materials\\_and\\_Process\\_Development\\_for\\_Direct\\_Digital\\_Manufacturing\\_of\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/311734370_Materials_and_Process_Development_for_Direct_Digital_Manufacturing_of_Vehicles), zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Hofstätter, Thomas; Pedersen, David; Tosello, Guido; Hansen, Hans (2017): State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 6, 073168441769564. DOI: 10.1177/0731684417695648.

Hou, Zhanghao; Tian, Xiaoyong; Zhang, Junkang; Li, Dichen (2018): 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure. In: *Composite Structures* 184, S. 1005–1010. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.10.080.

Jansson, Anton; Pejryd, Lars (2016): Characterisation of carbon fibre-reinforced polyamide manufactured by selective laser sintering. In: *Additive Manufacturing* 9, S. 7–13. DOI: 10.1016/j.addma.2015.12.003.

Jiang, Delin; Smith, Douglas (2016): Mechanical Behavior of Carbon Fiber Composites Produced with Fused Filament Fabrication. In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (27)*, S. 884–898. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/071-Jiang.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.20017.

Jing, Wu; Hui, Chen; Qiong, Wu; Hongbo, Liu; Zhanjun, Luo (2017): Surface modification of carbon fibers and the selective laser sintering of modified carbon fiber/nylon 12 composite powder. In: *Materials & Design* 116, S. 253–260. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.037.

Justo, Jesus; Távara, Luis; García-Guzmán, Lorenzo; París, Federico (2018): Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. In: *Composite Structures* 185, S. 537–548. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.052.

KA-RaceIng e.V. (2018): Bilder KA-RaceIng Rennwagen, 2018 an Florian Baumann.

Kraibühler, Herbert; Duffner, Eberhard; Kessler, Oliver (2012): Patent: Verfahren zur Ausbringung eines Volumenstroms. Angemeldet durch ARBURG GmbH + Co. KG am 14.03.2012. AnmeldeNr.: 102012004988. Veröffentlichungsnr: WO2013/135367A1.

Kumar, Sanjay; Kruth, Jean-Pierre (2010): Composites by rapid prototyping technology. In: *Materials & Design* 31 (2), S. 850–856. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.07.045.

Kunc, Vlastimil (2015): Advances and challenges in large scale polymer additive manufacturing. 15th SPE Automot. Compos. Conf. SPE Automot. Compos. Conf. Novi, MI, 2015.

Lange+Ritter GmbH: Produktkatalog Faserverstärkungen aus Glasfaser. Hg. v. Lange+Ritter GmbH. Online verfügbar unter <http://www.lange-ritter.de/downloads/katalog/>, zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Lanza, Gisela; Kopf, Robin; Zaiß, Marielouise; Stricker, Nicole; Eschner, Niclas; Jacob, Alexander et al. (2017): Laser-Strahlschmelzen - Technologie mit Zukunftspotenzial. Ein Handlungsleitfaden. Erste Ausgabe; Stand: Juni 2017. Karlsruhe: KIT - Karlsruhe Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, ISBN: 978-3-00-056913-5.

Lerch, Christian; Zanker, Christoph; Thielmann, Axel; Jäger, Angela; Keckl, Christoph; Kuppinger, Jan et al. (2014): Wertschöpfungspotenziale im Leichtbau. Hg. v. Leichtbau BW GmbH. Stuttgart. Online verfügbar unter [https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user\\_upload/Downloads/RZ\\_LeichtbauBW\\_Studie\\_WSK\\_Web.pdf](https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/Downloads/RZ_LeichtbauBW_Studie_WSK_Web.pdf), zuletzt geprüft am 17.01.2019.

Li, Nanya; Li, Yingguang; Liu, Shuting (2016): Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. In: *Journal of Materials Processing Technology* 238, S. 218–225. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025.

Liao, Guangxin; Li, Zhixiang; Cheng, Yuchuan; Xu, Dingding; Zhu, Dingchun; Jiang, Shenglong et al. (2018): Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling. In: *Materials & Design* 139, S. 283–292. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.027.

Liu, Shuting; Li, Yingguang; Li, Nanya (2018): A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures. In: *Materials & Design* 137, S. 235–244. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.10.007.

Love, Lonnie; Kunc, Vlastamil; Rios, Orlando; Duty, Chad; Elliott, Amelia; Post, Brian et al. (2014): The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. In: *J. Mater. Res.* 29 (17), S. 1893–1898. DOI: 10.1557/jmr.2014.212.

Marchese, Kelly; Crane, Jeff; Haley, Charlie (2015): 3D opportunity for the supply chain. Additive manufacturing delivers. Hg. v. Deloitte University Press. Online verfügbar unter <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-printing-supply-chain-transformation.html>, zuletzt geprüft am 14.10.2019.

MarkForged (2014): MarkForged Homepage. The world's first 3D printer that can print carbon fiber. Hg. v. MarkForged. Online verfügbar unter <https://markforged.com/>, zuletzt geprüft am 19.09.2016.

MarkForged (2018): Material Datasheet Composites. Online verfügbar unter [https://static.markforged.com/markforged\\_composites\\_datasheet.pdf](https://static.markforged.com/markforged_composites_datasheet.pdf), zuletzt geprüft am 11.01.2019.

- Material-Archiv (2016): Material-Archiv Website. Online verfügbar unter <http://www.materialarchiv.ch>, zuletzt geprüft am 14.03.2018.
- Matsuzaki, Ryosuke; Ueda, Masahito; Namiki, Masaki; Jeong, Tae-Kun; Asahara, Hirotsuke; Horiguchi, Keisuke et al. (2016): Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. In: *Scientific reports* 6, S. 23058. DOI: 10.1038/srep23058.
- Melenka, Garrett; Cheung, Benjamin; Schofield, Jonathon; Dawson, Michael; Carey, Jason (2016): Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. In: *Composite Structures* 153, S. 866–875. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.07.018.
- Molitch-Hou, Michael (2014): Arevo Labs want to See Makers 3D Printing with Carbon Fiber and Carbon Nanotubes. Hg. v. 3D Printing Industry. Online verfügbar unter <http://3dprintingindustry.com/2014/03/28/arevo-labs-want-see-makers-3d-printing-carbon-fiber-carbon-nanotubes/>, zuletzt geprüft am 28.10.2014.
- Mori, Ken-ichiro; Maeno, Tomoyoshi; Nakagawa, Yuki (2014): Dieless Forming of Carbon Fibre Reinforced Plastic Parts Using 3D Printer. In: *Procedia Engineering* 81, S. 1595–1600. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.196.
- Nakagawa, Yuki; Mori, Ken-ichiro; Maeno, Tomoyoshi (2017): 3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts. In: *Int J Adv Manuf Technol* 91 (5-8), S. 2811–2817. DOI: 10.1007/s00170-016-9891-7.
- Ning, Fuda; Cong, Weilong; Hu, Yingbin; Wang, Hui (2017): Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling. Effects of process parameters on tensile properties. In: *Journal of Composite Materials* 51 (4), S. 451–462. DOI: 10.1177/0021998316646169.
- Ning, Fuda; Cong, Weilong; Qiu, Jingjing; Wei, Junhua; Wang, Shiren (2015): Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. In: *Composites Part B: Engineering* 80, S. 369–378. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- Oxman, Neri (2011): Variable property rapid prototyping. In: *Virtual and Physical Prototyping* 6 (1), S. 3–31. DOI: 10.1080/17452759.2011.558588.

Parandoush, Pedram; Lin, Dong (2017): A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. In: *Composite Structures* 182, S. 36–53. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088.

Polymehr GmbH (2015): Materialdatenblatt PETG. Hg. v. Polymehr GmbH. Online verfügbar unter <https://www.polymehr.com/wp-content/uploads/technisches-datenblatt-petg.pdf>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2015, zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Protoplant (2014): Material Data Sheet. Proto-Pasta Carbon Reinforced PLA. Hg. v. Protoplant. Online verfügbar unter <http://www.proto-pasta.com/pages/conductive-pla#CCmade>, zuletzt aktualisiert am 24.09.2014, zuletzt geprüft am 14.07.2016.

Prüß, Hauke; Vietor, Thomas (2015a): Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing. In: *J. Mech. Des* 137 (11), 1–7. DOI: 10.1115/1.4030993.

Prüß, Hauke; Vietor, Thomas (2015b): Neue Gestaltungsfreiheiten durch 3D-gedruckte Faser-Kunststoff-Verbunde. Vortragsfolien. In: *RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie* 2015 (1). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-2-42374>, zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Reuss, András (1929): Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. In: *Z. angew. Math. Mech.* 9 (1), S. 49–58. DOI: 10.1002/zamm.19290090104.

Royal Academy of Engineering: Additive manufacturing: opportunities and constraints. A summary of a roundtable forum held on 23 May 2013 hosted by the Royal Academy of Engineering. Royal Academy of Engineering. London, ISBN: 978-1-909327-05-4.

Saari, Matt; Cox, Bryan; Richer, Edmond; Krueger, Paul; Cohen, Adam (2015a): Fiber Encapsulation Additive Manufacturing. An Enabling Technology for 3D Printing of Electromechanical Devices and Robotic Components. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 2 (1), S. 32–39. DOI: 10.1089/3dp.2015.0003.

Saari, Matt; Galla, Matt; Cox, Bryan; Krueger, Paul; Cohen, Adam; Richer, Edmond (2015b): Additive Manufacturing of Soft and Composite Parts from Thermoplastic Elastomers. In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 949–958. Online verfügbar unter <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-78-Saari.pdf>, zuletzt geprüft am 29.06.2017.

Saari, Matt; Galla, Matt; Cox, Bryan; Richer, Edmond; Krueger, Paul; Cohen, Adam (2015c): Active Device Fabrication using Fiber Encapsulation Additive Manufacturing.

In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 26–39. Online verfügbar unter <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-3-Saari.pdf>, zuletzt geprüft am 29.06.2017.

Salazar, Alicia; Rico, Alvaro; Rodríguez, Jesus; Segurado Escudero, Javier; Seltzer, Rocio; La Martin de Escalera Cutillas, Federico (2014): Fatigue crack growth of SLS polyamide 12. Effect of reinforcement and temperature. In: *Composites Part B: Engineering* 59, S. 285–292. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.12.017.

Schürmann, Helmut (2008): *Konstruieren Mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch), ISBN: 978-3-540-72189-5.

Sculpteo (2018): *Meistgenutzte 3D-Druck-Technologien im Jahr 2018*. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/760408/umfrage/meistgenutzte-3d-druck-technologie/>, zuletzt geprüft am 30.10.2018.

Shofner, Meisha; Lozano, Karen; Rodríguez-Macías, Fernando; Barrera, Enrique (2003a): Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 89 (11), S. 3081–3090. DOI: 10.1002/app.12496.

Shofner, Meisha; Rodríguez-Macías, Fernando; Vaidyanathan, Ranji; Barrera, Enrique (2003b): Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34 (12), S. 1207–1217. DOI: 10.1016/j.compositesa.2003.07.002.

Showa Denko Carbon Sales Inc.: *Vapor Grown Carbon Fiber. Typical Properties*. Hg. v. Showa Denko Carbon Sales Inc. Online verfügbar unter [www.sdkc.com](http://www.sdkc.com), zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Tekinalp, Halil; Kunc, Vlastimil; Velez-Garcia, Gregorio; Duty, Chad; Love, Lonnie; Naskar, Amit et al. (2014): Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. In: *Composites Science and Technology* 105, S. 144–150. DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009.

Tian, Xiaoyong; Liu, Tengfei; Wang, Qingrui; Dilmurat, Abliz; Li, Dichen; Ziegmann, Gerhard (2017): Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. In: *Journal of Cleaner Production* 142, S. 1609–1618. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.139.

Tian, Xiaoyong; Liu, Tengfei; Yang, Chuncheng; Wang, Qingrui; Li, Dichen (2016): Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 88, S. 198–205. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.05.032.

Toray Carbon Fibers America Inc.: Torayca T300 Data Sheet. T300 Carbonfiber. Hg. v. Toray Carbon Fibers America Inc. Online verfügbar unter [https://www.toraycma.com/file\\_viewer.php?id=5106](https://www.toraycma.com/file_viewer.php?id=5106), zuletzt geprüft am 14.03.2018.

Torrado Perez, Angel; Roberson, David; Wicker, Ryan (2014): Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. In: *J Fail. Anal. and Preven.* 14 (3), S. 343–353. DOI: 10.1007/s11668-014-9803-9.

Tse, Lai Yu Leo; Kapila, Sunil; Barton, Kira (2016): Contoured 3D printing of fiber reinforced polymers. In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (27)*, S. 1205–1216. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/098-Tse.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.

van Der Klift, Frank; Koga, Yoichiro; Todoroki, Akira; Ueda, Masahito; Hirano, Yoshiyasu; Matsuzaki, Ryosuke (2016): 3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens. In: *OJCM* 06 (01), S. 18–27. DOI: 10.4236/ojcm.2016.61003.

Vaneker, Tom (2017): Material Extrusion of Continuous Fiber Reinforced Plastics Using Commingled Yarn. In: *Procedia CIRP* 66, S. 317–322. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.367. 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing, Karlsruhe.

VDI-Richtlinie 2221, Mai 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf.

VDI-Richtlinie 3405, Mai 2014: Additive Fertigung - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf.

Verein Deutscher Ingenieure (2014): Statusreport. Additive Fertigungsverfahren. Verein Deutscher Ingenieure. Online verfügbar unter [https://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur\\_dateien/gpl\\_dateien/VDI\\_Statusreport\\_AM\\_2014\\_WEB.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_dateien/VDI_Statusreport_AM_2014_WEB.pdf), zuletzt geprüft am 15.03.2019.

Voigt, Woldemar (1889): Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. In: *Ann. Phys.* 274 (12), S. 573–587. DOI: 10.1002/andp.18892741206.

Völkner, Wolfram (2015): Vom Prototyping zum E-Manufacturing - Beispiele in Metall und Kunststoff. Vortrag. Sprechstunde Leichtbau. EOS GmbH. Leichtbau BW GmbH. Stuttgart, 16.03.2015.

Wang, Xin; Jiang, Man; Zhou, Zuowan; Gou, Jihua; Hui, David (2017): 3D printing of polymer matrix composites. A review and prospective. In: *Composites Part B: Engineering* 110, S. 442–458. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.

Wohlers Associates (2017): Wohlers report. 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, ISBN: 978-0-9913332-3-3.

Yang, Chuncheng; Tian, Xiaoyong; Liu, Tengfei; Cao, Yi; Li, Dichen (2017): 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites. Mechanism and performance. In: *Rapid Prototyping Journal* 23 (1), S. 209–215. DOI: 10.1108/RPJ-08-2015-0098.

Yao, Xinhua; Luan, Congcong; Zhang, Deming; Lan, Liujian; Fu, Jianzhong (2017): Evaluation of carbon fiber-embedded 3D printed structures for strengthening and structural-health monitoring. In: *Materials & Design* 114, S. 424–432. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.10.078.

Zhong, Weihong; Li, Fan; Zhang, Zuoguang; Song, Lulu; Li, Zhimin (2001): Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. In: *Materials Science and Engineering: A* 301 (2), S. 125–130. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01810-4.

Zhu, Wei; Yan, Chunze; Yang, Jiayi; Wen, Shifeng; Shi, Yusheng (2015): Parameter Optimization for Preparing Carbon Fiber/Epoxy Composites by Selective Laser Sintering. In: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 857–865. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-70-Zhu.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Abhängigkeit der Verstärkungswirkung a) vom Faservolumengehalt, eigene Darstellung nach (Henning und Moeller 2011, S. 380) und b) von der Faserlänge, eigene Darstellung nach (Bürkle et al. 2003, S. 48)	6
Abbildung 2-2: Entwicklung des weltweiten Umsatzes mit additiven Fertigungsverfahren in [\$], basierend auf (Wohlers Associates 2017)	9
Abbildung 2-3: Slicing und Pfaderzeugung	10
Abbildung 2-4: LS-Prozess, eigene Darstellung nach (VDI-Richtlinie 3405, S. 9)	12
Abbildung 2-5: FLM-Prozess, eigene Darstellung nach (VDI-Richtlinie 3405, S. 12)	13
Abbildung 2-6: Schnittbild der Materialaufbereitung und des Materialaustrags des ARBURG freeformers, eigene Darstellung nach (ARBURG GmbH + Co. KG 2017, S. 5)	15
Abbildung 2-7: Verschiedene Möglichkeiten der Faserimplementierung bei Austragsverfahren (insbesondere FLM), in Anlehnung an (Prüß und Vietor 2015b, S. 16)	25
Abbildung 2-8: E-Modul für kFVK in 0°-Orientierung	33
Abbildung 2-9: Zugfestigkeit für kFVK in 0°-Orientierung	33
Abbildung 2-10: E-Modul für kFVK in 90°-Orientierung	34
Abbildung 2-11: Zugfestigkeit für kFVK in 90°-Orientierung	35
Abbildung 2-12: E-Modul für eFVK	36
Abbildung 2-13: Zugfestigkeit für eFVK	36
Abbildung 3-1: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien	38
Abbildung 5-1: Lösungsansatz für die Entwicklung eines additiven Fertigungsverfahrens für die Herstellung von eFVK	46
Abbildung 5-2: Vorgehen zur Durchführung der Parameterstudie in Kapitel 6.3	48

---

Abbildung 6-1: DRS-Aktorgehäuse	51
Abbildung 6-2: a) Formula Student Rennwagen des KA-Racelng Teams; b) Genaue Position der DRS-Aktorgehäuse, Fotos: (KA-Racelng e.V. 2018)	52
Abbildung 6-3: a) Lasttragende FVK-Struktur; b) FVK-Bereich (grau) zusammen mit der unverstärkten Reststruktur (schwarz) mit Genehmigung entnommen aus (A_Wirth 2018, S. 55)	52
Abbildung 6-4: Querschnittsdarstellung des auskonstruierten Zuführmoduls	58
Abbildung 6-5: Zuführmodul von schräg unten	59
Abbildung 6-6: In den ARBURG freeformer eingebautes Zuführmodul mit bereits ausgetragener Faser	60
Abbildung 6-7: Signalverarbeitungskette vom GCode bis zum Fördermotor	61
Abbildung 6-8: Trennvorgang für das Brechen der Fasern an der Kanülenkante	62
Abbildung 6-9: Darstellung der Maße und Variablen	65
Abbildung 6-10: Vergleich der Faserimplementierung bei verschiedenen Motordrehzahlen	72
Abbildung 6-11: Faserlayout der verschiedenen Probekörper in Anlehnung an (A_Muthler 2018, S. 59)	74
Abbildung 6-12: Ishikawa Diagramm mit den relevanten Ursachen und Parametern	78
Abbildung 6-13: Maße und Faserlayout der Zugprobekörper	91
Abbildung 6-14: a) Horizontaler Querschnitt der Probekörper für die Faktorstufen -1 und b) +1 des Faservolumengehalts	93
Abbildung 6-15: Beispielhaftes Versagen der Probekörper	96
Abbildung 6-16: Boxplot-Diagramm für den E-Modul der FVK-Probekörper	97
Abbildung 6-17: Boxplot-Diagramm für die Zugfestigkeit der FVK-Probekörper	98
Abbildung 6-18: Wirkung der Faktoren auf die untersuchten Parameter	101

---

Abbildung 6-19: Signifikante Wechselwirkungen der Faktoren Bauraumtemperatur und Düsentemperatur	101
Abbildung 6-20: Boxplot-Diagramm für den E-Modul der ABS-Zugprobekörper	103
Abbildung 6-21: Boxplot-Diagramm für die Zugfestigkeit der ABS-Zugprobekörper	104
Abbildung 6-22: Wirkung der Faktoren auf die untersuchten Parameter	107
Abbildung 6-23: Signifikante Wechselwirkungen bei der Zielgröße Zugfestigkeit	108
Abbildung 6-24: Versagensverhalten der Probekörper mit vollflächiger Füllung	115
Abbildung 6-25: Boxplot-Diagramm für den E-Modul der vollständig gefüllten eFVK-Probekörper	116
Abbildung 6-26: Boxplot-Diagramm für die Zugfestigkeit der vollständig gefüllten eFVK-Probekörper	116
Abbildung 6-27: E-Modul für eFVK (nur Glasfasern)	119
Abbildung 6-28: Zugfestigkeit für eFVK (nur Glasfasern)	119
Abbildung 6-29: a) Nur der mit Fasern zu verstärkende Bereich; b) der zu verstärkende Bereich (grau) in Zusammenhang mit der unverstärkten Struktur (schwarz) mit Genehmigung entnommen aus (A_Wirth 2018, S. 55)	123
Abbildung 6-30: a) Seitenansicht des DRS-Aktorgehäuses; b) Draufsicht auf das DRS-Aktorgehäuse	124
Abbildung 6-31: a) Heckflügel des KA-RaceIng Rennwagens und b) DRS-Flügel mit Freiräumen für die Integration der Aktorgehäuse. Fotos: (KA-RaceIng e.V. 2018)	125
Abbildung 7-1: Verschlissenes Förderrollenpaar	128

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Technik	41
Tabelle 6-1: Veränderte Fertigungsparameter	64
Tabelle 6-2: Zielgrößen und deren Einheiten	76
Tabelle 6-3: Zusammenfassung und Bewertung der einstellbaren Parameter des freeformers	81
Tabelle 6-4: Zusammenfassung und Bewertung der einstellbaren Parameter der Faserzuführung	82
Tabelle 6-5: Zusammenfassung und Bewertung der einstellbaren Prozessparameter des GCodes	84
Tabelle 6-6: Zusammenfassung und Bewertung der weiteren Prozessparameter und Störgrößen	86
Tabelle 6-7: Faktorstufen für die Temperatur der Austragsdüse	86
Tabelle 6-8: Faktorstufen für die Temperatur des Bauraums	87
Tabelle 6-9: Werte für Faservolumengehalt, Linienbreite und Tropfenabstand	89
Tabelle 6-10: Versuchsplan	90
Tabelle 6-11: Ergebnis des Tests auf Normalverteilung	98
Tabelle 6-12: Test auf Ausreißer	99
Tabelle 6-13: Test auf Varianzhomogenität	99
Tabelle 6-14: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA	100
Tabelle 6-15: Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA	100
Tabelle 6-16: Auswertung der Parameteruntersuchung	102
Tabelle 6-17: Ergebnis des Tests auf Normalverteilung	104
Tabelle 6-18: Test auf Ausreißer	105
Tabelle 6-19: Test auf Varianzhomogenität	106
Tabelle 6-20: Ergebnis der einfaktoriellen ANOVA	106
Tabelle 6-21: Ergebnis der mehrfaktoriellen ANOVA	107

---

Tabelle 6-22: Linienbreite und Tropfenabstand für verschiedene FVG	115
Tabelle 6-23: FVG und mechanische Eigenschaften der Versuchsreihen	117
Tabelle 6-24: Werte zur Berechnung des globalen Faservolumengehalts	118
Tabelle 6-25: FVG und mechanische Eigenschaften der Versuchsreihen	118
Tabelle 6-26: Vergleichs-Werte für additiv gefertigte eFVK aus dem Stand der Technik	119
Tabelle 6-27: Grad der Potentialerfüllung	121
Tabelle 7-1: Erfüllung der Anforderungen	134
Tabelle 0-1: Dichte der verschiedenen Materialien	XVIII
Tabelle 0-2: Literaturübersicht additive gefertigte kFVK in 0°-Orientierung	XVIII
Tabelle 0-3: Literaturübersicht additive gefertigte kFVK in 90°-Orientierung	XX
Tabelle 0-4: Literaturübersicht additive gefertigte eFVK	XXI
Tabelle 0-5: Versuchsergebnisse der Rundlaufmessung	XXII
Tabelle 0-6: Bestimmung des Korrekturfaktors $\delta$ und der Motorendrehzahl	XXII
Tabelle 0-7: Versuchsergebnisse Probenreihe 1	XXIII
Tabelle 0-8: Versuchsergebnisse Probenreihe 2	XXIII
Tabelle 0-9: Versuchsergebnisse Probenreihe 3	XXIV
Tabelle 0-10: Versuchsergebnisse Probenreihe 4	XXIV
Tabelle 0-11: Versuchsergebnisse Probenreihe 5	XXV
Tabelle 0-12: Versuchsergebnisse Probenreihe 6	XXV
Tabelle 0-13: Versuchsergebnisse Probenreihe 7	XXVI
Tabelle 0-14: Versuchsergebnisse Probenreihe 8	XXVI
Tabelle 0-15: Mittelwerte und Standardabweichungen der eFVK-Probenreihen	XXVII
Tabelle 0-16: Mittelwerte und Standardabweichungen der ABS-Probenreihen	XXVII

## Anhang

*Tabelle 0-1: Dichte der verschiedenen Materialien*

Material	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Quelle
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	1,06	(Material-Archiv 2016)
Polyphenylsulfid (PPS)	1,36	(Ensinger GmbH 2018c)
Polyetherimid (PEI)	1,28	(Ensinger GmbH 2018b)
Poly lactide (PLA)	1,24	(Material-Archiv 2016)
Polyethylenterephthalat-Glycol (PETG)	1,27	(Polymehr GmbH 2015)
Polyamid 12 (PA12)	1,02	(Ensinger GmbH 2018a)
Kohlenstofffaser (CF)	1,76	(Toray Carbon Fibers America Inc.)
Glasfaser (GF)	2,5	(Lange+Ritter GmbH)
Vapor Grown CF (VGCF)	2	(Showa Denko Carbon Sales Inc.)
Jute	1,44	(Material-Archiv 2016)
CF-verstärktes PA12 (PA12CF)	1,04	(EOS GmbH 2010)

*Tabelle 0-2: Literaturübersicht additive gefertigte kFVK in 0°-Orientierung*

Autor	Material	FVG	FMG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
<sup>1)</sup> (Tekinalp et al. 2014)	ABS/CF	6 %	10 %	7,7	52
<sup>1)</sup> (Tekinalp et al. 2014)	ABS/CF	13 %	20 %	11,5	60
<sup>1)</sup> (Tekinalp et al. 2014)	ABS/CF	21 %	30 %	13,8	62
<sup>1)</sup> (Tekinalp et al. 2014)	ABS/CF	29 %	40 %	13,7	67
<sup>1)</sup> (Love et al. 2014)	ABS/CF	13 %		8,91	70,69
<sup>1)</sup> (Ning et al. 2015)	ABS/CF	2 %	3 %	2,1	40,8
<sup>1)</sup> (Ning et al. 2015)	ABS/CF	3 %	5 %	2,45	42
<sup>1)</sup> (Ning et al. 2015)	ABS/CF	5 %	8 %	2,5	41,5

<sup>1)</sup> Daten aus eigener Recherche, FVG gegebenenfalls mit Hilfe von Formel 2-3 berechnet

	Autor	Material	FVG	FMG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
1)	(Ning et al. 2015)	ABS/CF	6 %	10 %	2,15	33,8
1)	(Ning et al. 2015)	ABS/CF	10 %	15 %	2,25	35
2)	(Hill et al.)	ABS/CF	13 %	20 %	8,4	66,8
2)	(Duty et al. 2015)	ABS/CF	13 %	20 %	11,9	65,7
2)	(Kunc 2015)	ABS/CF	13 %		8,15	53
2)	(Duty et al. 2017)	ABS/CF	13 %	20 %	10,87	47,7
2)	(Duty et al. 2017)	ABS/CF	10 %	15 %	11,8	61,9
1)	(Jiang und Smith 2016)	ABS/CF	11 %	17 %	7,15	50,9
2)	(Duty et al. 2015)	ABS/GF	10 %	20 %	5,7	54,3
2)	(Duty et al. 2015)	ABS/GF	22 %	40 %	10,8	51,2
1)	(Torrado Perez et al. 2014)	ABS/Jute	4 %	5 %	1,54	25,9
1)	(Shofner et al. 2003a)	ABS/VGCF	6 %	10 %	0,8	37,4
1)	(Shofner et al. 2003b)	ABS/VGCF	3 %	5 %	1,27	27
1)	(Liao et al. 2018)	PA12/CF	1 %	2 %	1,45	52
1)	(Liao et al. 2018)	PA12/CF	2 %	4 %	2	58
1)	(Liao et al. 2018)	PA12/CF	4 %	6 %	2,75	80
1)	(Liao et al. 2018)	PA12/CF	5 %	8 %	3,4	88
1)	(Liao et al. 2018)	PA12/CF	6 %	10 %	3,58	93,8
2)	(Duty et al. 2017)	PEI/CF	15 %	20 %	8,36	61,1
2)	(Gardner et al. 2016a)	PEI/CNT	3 %	5 %	3	125,3
1)	(Jiang und Smith 2016)	PETG/CF	13 %	18 %	8,47	68,3
1)	(Ferreira et al. 2017)	PLA/CF	11 %	15 %	7,54	53,4
1)	(Jiang und Smith 2016)	PLA/CF	9 %	13 %	9,28	68,4
2)	(DeNardo 2016)	PPS/CF	44 %	50 %	26,4	92,2

<sup>2)</sup> Werte aus Brenken et al. 2018 übernommen, FVG gegebenenfalls mit Hilfe von Formel 2-3 berechnet

	Autor	Material	FVG	FMG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
3)	(Jansson und Pejryd 2016)	PA12CF SLS	3 %		6,3	66,7
1)	(Salazar et al. 2014)	PA12/GF SLS	12 %	25 %	2,71	43,7
1)	(Jing et al. 2017)	PA12/CF SLS	20 %	30 %	5,8	80

*Tabelle 0-3: Literaturübersicht additive gefertigte kFVK in 90°-Orientierung*

	Autor	Material	FVG	FMG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
1)	(Love et al. 2014)	ABS/CF	13 %		8,91	70,69
2)	(Hill et al.)	ABS/CF	13 %	20 %	8,4	66,8
2)	(Duty et al. 2015)	ABS/CF	13 %	20 %	11,9	65,7
2)	(Kunc 2015)	ABS/CF	13 %		8,15	53
2)	(Duty et al. 2017)	ABS/CF	13 %	20 %	10,87	47,7
2)	(Duty et al. 2017)	ABS/CF	10 %	15 %	11,8	61,9
1)	(Jiang und Smith 2016)	ABS/CF	11 %	17 %	7,15	50,9
2)	(Duty et al. 2015)	ABS/GF	10 %	20 %	5,7	54,3
2)	(Duty et al. 2015)	ABS/GF	22 %	40 %	10,8	51,2
1)	(Jiang und Smith 2016)	PETG/CF	13 %	18 %	8,47	68,3
1)	(Ferreira et al. 2017)	PLA/CF	11 %	15 %	7,54	53,4
1)	(Jiang und Smith 2016)	PLA/CF	9 %	13 %	9,28	68,4
2)	(DeNardo 2016)	PPS/CF	44 %	50 %	26,4	92,2
3)	(Jansson und Pejryd 2016)	PA12CF SLS	3 %		6,3	66,7

<sup>3)</sup> FVG aus Verbunddicke mit Hilfe von Formel 2-8 bestimmt

Tabelle 0-4: Literaturübersicht additive gefertigte eFVK

	Autor	Material	FVG	FMG	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]
1)	(Mori et al. 2014)	ABS/CF - M2	0 %			40
1)	(Mori et al. 2014)	ABS/CF - M3	1 %			15
1)	(Mori et al. 2014)	ABS/CF - M3	1 %			22
2)	(Yang et al. 2017)	ABS/CF - M2	6 %	10 %	4,19	147
1)	(Melenka et al. 2016)	Nylon/AF - M1	4 %		1,77	31
1)	(Melenka et al. 2016)	Nylon/AF - M1	8 %		6,92	60
1)	(Melenka et al. 2016)	Nylon/AF - M1	10 %		9	84
1)	(Dickson et al. 2017)	Nylon/AF - M1	8 %		4,23	110
1)	(Dickson et al. 2017)	Nylon/AF - M1	10 %		4,76	161
2)	(van Der Klift et al. 2016)	Nylon/CF - M1	6 %		14	140
2)	(van Der Klift et al. 2016)	Nylon/CF - M1	18 %		35,7	464,4
1)	(Dickson et al. 2017)	Nylon/CF - M1	11 %		8,46	198
1)	(Goh et al. 2018)	Nylon/CF - M1	41 %		13	600
1)	(Justo et al. 2018)	Nylon/CF - M1	40 %		68	701
1)	(Dickson et al. 2017)	Nylon/CF - M1	8 %		3,29	156
1)	(Dickson et al. 2017)	Nylon/GF - M1	10 %		4,91	212
1)	(Goh et al. 2018)	Nylon/GF - M1	35 %		7,2	450
1)	(Justo et al. 2018)	Nylon/GF - M1	50 %		25,9	575
1)	(Bettini et al. 2017)	PLA/AF - M2	9 %		9,34	203
1)	(Matsuzaki et al. 2016)	PLA/CF - M2	7 %		19,5	185,2
2)	(Li et al. 2016)	PLA/CF - M2	34 %		23,8	91
1)	(Tian et al. 2017)	PLA/CF - M2	7 %	10 %	20,6	256
1)	(Li et al. 2016)	PLA/CF - M2	34 %			80
1)	(Matsuzaki et al. 2016)	PLA/Jute - M2	6 %		5,11	57,1

Tabelle 0-5: Versuchsergebnisse der Rundlaufmessung

Position [°]	Wert in mm	Position [°]	Wert in mm	Position [°]	Wert in mm
-180	0,44	-50	0,38	80	0,36
-170	0,46	-40	0,37	90	0,37
-160	0,46	-30	0,38	100	0,38
-150	0,45	-20	0,38	110	0,42
-140	0,45	-10	0,38	120	0,43
-130	0,47	0	0,37	130	0,43
-120	0,47	10	0,37	140	0,44
-110	0,46	20	0,35	150	0,45
-100	0,45	30	0,32	160	0,44
-90	0,44	40	0,33	170	0,44
-80	0,42	50	0,33	180	0,44
-70	0,4	60	0,32		
-60	0,39	70	0,34		

Tabelle 0-6: Bestimmung des Korrekturfaktors  $\delta$  und der Motordrehzahl

Versuchsreihe	Motordrehzahl	
	21221 [1/min]	21810 [1/min]
$s_{f1}$ [mm]	1165	1202
$s_{f2}$ [mm]	1172	1192
$s_{f3}$ [mm]	1170	1207
$s_{f4}$ [mm]	1165	1200
$s_{f5}$ [mm]	1166	1205
$s_{fsoll}$ [mm]	1200	
$s_{fmittel}$ [mm]	1168	1201
$S_{sf}$ [%]	0,25%	0,43%
$\delta_n$	0,973	

Tabelle 0-7: Versuchsergebnisse Probenreihe 1

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
1.1	8405	162,2	5,29	2,09	8405	2070	35,9	5,14	2,13	1,837
1.2	8897	188,8	5,38	2,01	8897	2146	37,6	5,17	2,13	1,869
1.3	9047	186,3	5,36	2,02	9047	2152	37,8	5,13	2,09	1,83
1.4	8835	176,3	5,4	2,02	8835	2145	38,0	5,14	2,07	1,829
1.5	9033	180,9	5,38	2,01	9033	2091	36,5	5,15	2,13	1,848
1.6	8631	172,6	5,41	2,03	8631	2146	37,9	5,14	2,09	1,835

Tabelle 0-8: Versuchsergebnisse Probenreihe 2

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
2.1	8853	156,9	5,25	2,05	1,288	2087	35,6	5,14	2,12	1,839
2.2	8362	158,9	5,24	2,09	1,27	2076	34,1	5,17	2,13	1,828
2.3	8546	148,8	5,23	2,07	1,292	2040	34,8	5,12	2,14	1,824
2.4	8688	158,6	5,2	2,05	1,273	2142	35,8	5,12	2,12	1,824
2.5	8849	151,6	5,19	2,06	1,267	2095	35,7	5,11	2,1	1,815
2.6	8876	167,4	5,22	2,03	1,286	2099	35,6	5,11	2,11	1,831

Tabelle 0-9: Versuchsergebnisse Probenreihe 3

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
3.1	9090	197,7	5,28	2,1	1,361	2160	36,8	5,13	2,13	1,862
3.2	8318	189,0	5,3	2,05	1,331	2101	35,9	5,08	2,13	1,83
3.3	8343	192,9	5,27	2,06	1,336	2078	36,6	5,07	2,12	1,831
3.4	8800	175,8	5,27	2,05	1,32	2162	36,9	5,07	2,09	1,817
3.5	8317	181,7	5,32	2,04	1,327	2083	36,3	5,14	2,11	1,83
3.6	8657	176,9	5,29	2,04	1,313	2101	35,9	5,11	2,1	1,825

Tabelle 0-10: Versuchsergebnisse Probenreihe 4

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
4.1	8941	174,6	5,17	2,04	1,284	2116	36,5	5,09	2,11	1,833
4.2	8862	175,0	5,27	2,06	1,272	2086	36,0	5,08	2,12	1,824
4.3	1849	29,4	5,18	2,03	1,053	2135	37,0	5,07	2,1	1,832
4.4	8062	165,3	5,29	2,05	1,266	2142	36,8	5,11	2,11	1,835
4.5	8733	171,1	5,23	2,03	1,27	2154	37,0	5,12	2,06	1,814
4.6	8377	170,0	5,22	2,05	1,29	2133	36,2	5,11	2,12	1,836

Tabelle 0-11: Versuchsergebnisse Probenreihe 5

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
5.1	8740	186,1	5,32	2,1	1,343	2081	35,8	5,14	2,08	1,833
5.2	8786	183,1	5,31	2,07	1,343	2071	36,4	5,15	2,1	1,832
5.3	8587	182,2	5,33	2,13	1,349	2046	35,2	5,14	2,09	1,822
5.4	1892	32,6	5,3	2,09	1,132	2141	36,5	5,13	2,08	1,82
5.5	8352	175,1	5,37	2,09	1,334	2044	35,3	5,15	2,11	1,819
5.6	8626	178,0	5,28	2,07	1,316	2095	35,4	5,12	2,09	1,81

Tabelle 0-12: Versuchsergebnisse Probenreihe 6

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
6.1	8567	168,5	5,26	2,09	1,272	2101	35,3	5,15	2,12	1,819
6.2	8676	160,4	5,25	2,09	1,273	2029	33,8	5,14	2,12	1,804
6.3	8638	169,8	5,27	2,08	1,28	1994	33,8	5,14	2,14	1,826
6.4	8195	173,4	5,28	2,1	1,281	2072	35,9	5,13	2,1	1,815
6.5	8486	165,6	5,27	2,1	1,267	2015	35,1	5,14	2,1	1,813
6.6	8464	166,6	5,27	2,14	1,29	2087	36,0	5,14	2,1	1,819

Tabelle 0-13: Versuchsergebnisse Probenreihe 7

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
7.1	8242	189,2	5,23	2,22	1,342	2110	36,9	5,1	2,08	1,829
7.2	8447	187,2	5,29	2,15	1,32	2103	35,8	5,09	2,1	1,813
7.3	8018	184,5	5,28	2,25	1,341	2072	36,3	5,09	2,09	1,816
7.4	8070	171,4	5,31	2,23	1,321	2145	36,8	5,09	2,07	1,825
7.5	7927	174,3	5,26	2,28	1,334	2146	36,2	5,1	2,08	1,816
7.6	8056	169,4	5,28	2,26	1,337	2115	36,3	5,1	2,05	1,815

Tabelle 0-14: Versuchsergebnisse Probenreihe 8

Probekörper	FVK					Kunststoff				
	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]
8.1	8518	177,8	5,27	2,1	1,281	2102	36,6	5,09	2,09	1,823
8.2	8174	168,1	5,27	2,2	1,286	2115	36,6	5,09	2,05	1,813
8.3	8316	170,0	5,23	2,15	1,278	2078	36,7	5,08	2,07	1,819
8.4	8252	163,2	5,29	2,17	1,27	2080	36,8	5,09	2,07	1,815
8.5	8123	164,9	5,23	2,19	1,273	2119	36,6	5,09	2,05	1,817
8.6	7038	142,7	5,3	2,17	1,252	2082	36,0	5,1	2,11	1,82

Tabelle 0-15: Mittelwerte und Standardabweichungen der eFVK-Probenreihen

Probenreihe	E-Modul		Zugfestigkeit	
	Mittelwert [MPa]	Standardabweichung	Mittelwert [MPa]	Standardabweichung
1	8808	2,6%	178	5,0%
2	8696	2,2%	157	3,8%
3	8587	3,4%	186	4,4%
4	8595	3,8%	171	2,1%
5	8618	1,8%	181	2,1%
6	8505	1,9%	167	2,4%
7	8127	2,1%	179	4,4%
8	8070	5,9%	164	6,6%

Tabelle 0-16: Mittelwerte und Standardabweichungen der ABS-Probenreihen

Probenreihe	E-Modul		Zugfestigkeit	
	Mittelwert [MPa]	Standardabweichung	Mittelwert [MPa]	Standardabweichung
1	2125	1,5%	37	2,1%
2	2090	1,5%	35	1,7%
3	2114	1,6%	36	1,1%
4	2126	1,1%	36	1,0%
5	2067	1,0%	36	1,2%
6	2050	1,9%	35	2,6%
7	2115	1,2%	36	1,0%
8	2096	0,8%	37	0,7%



Forschungsberichte aus dem wbk  
Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System  
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die  
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung  
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an  
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

**Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien**

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16  
Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17  
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18  
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19  
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20  
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21  
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22  
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24  
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25  
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

**Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen**

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

**Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung**

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

**Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90  
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91  
Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92  
Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93  
Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94  
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95  
Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96  
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97  
Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98  
Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

**Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining**

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden  
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms  
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau  
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der  
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration  
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V**

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-Bauteile**

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit  
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewinde-trieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**