

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

Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von
Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren**

Band 247



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

Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser- Preforms im Faserblasverfahren

Band 247

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

Dissertation

von

Patrick Moll, M.Sc.
aus Friedrichshafen

Tag der mündlichen Prüfung: 23.06.2021
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8184-8

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 • E-Mail: 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 wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. 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 wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „Methodik zur Steigerung der Homogenität von im Faserblasverfahren hergestellten Langfaserpreforms“ sowie des vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg geförderten „Leistungszentrum Mobilitätssysteme Karlsruhe“.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner Dissertation als Hauptreferent, die vielen konstruktiven Gespräche und das entgegengebrachte Vertrauen während aller Projekte am Institut. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Prof. Dr. Hans Jürgen Seifert für den Prüfungsvorsitz.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am wbk, insbesondere im Bereich „Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung“ für Ihre Unterstützung und das stets offene freundschaftliche Arbeitsklima herzlich bedanken. Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Sekretariaten, allen Service-Centern und insbesondere der Werkstatt für die Unterstützung sowie die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut danken. Gleiches gilt für alle Studierende, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen meiner wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gebührt schließlich meiner Familie, ohne deren bedingungslose Unterstützung, Verständnis und Motivation diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Karlsruhe, im Juni 2021

Patrick Moll

Abstract

Due to the scarcity of resources and energy, stricter legislation regarding fuel consumption and emissions in the transport sector and the growing environmental awareness among the population, the importance of system-efficient lightweight construction has increased significantly in recent years. Currently, the use of fiber reinforced polymers is limited due to the high material and manufacturing costs in mass production. Long fiber reinforced semi-finished products represent a cost-effective alternative in semi-structural applications such as claddings. A promising approach for the resource efficient production of three-dimensional long fiber preforms without the intermediate step of two-dimensional semi-finished products is the fiber injection molding process.

The goal of this thesis is to contribute to a better monitoring of the mold filling and the acquisition of process knowledge on fiber injection molding. Based on this a process control to optimize the process shall be implemented.

Firstly the process is analyzed to identify the relevant machine parameter and their influence on the resulting process parameters is described. Additionally, critical process steps are identified.

For the monitoring of the mold filling a camera is implemented in the mold. Based on the images acquired by the camera the current filling can be computed and used for further analysis of the process. In order to evaluate the properties of the manufactured preforms methods for the analysis of basis weight uniformity and the fiber orientation based on transmitted light images are investigated.

In an experimental investigation following design of experience principles the influence of the process parameters on the properties of the manufactured preforms is determined.

Finally, a control system for the injection of the fibers based on the process monitoring and the control of the injection nozzle is implemented. It allows to achieve a more uniform filling of the mold.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung und Technik	4
2.1 Großserienfertigung von Faserverbundteilen	4
2.1.1 Übersicht	4
2.1.2 „Resin-Transfer-Molding“-Prozesskette	5
2.1.3 Preforming-Verfahren	8
2.2 Faserspritzverfahren	12
2.2.1 Verfahrensübersicht	12
2.2.2 Forschungsarbeiten	14
2.3 Faserblasverfahren	17
2.3.1 Verfahrensübersicht	17
2.3.2 Anlagentechnik	20
2.3.3 Forschungsarbeiten	21
2.4 Bewertung und Ableitung des Forschungsdefizits	24
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	27
3.1 Zielsetzung	27
3.2 Vorgehensweise	28
4 Analyse des Faserblasverfahrens	31
4.1 Versuchsanlage für das Faserblasverfahren	31
4.1.1 Anforderungen	32
4.1.2 Konstruktive Umsetzung	33
4.2 Analyse des Prozessablaufs	37

4.3	Analyse der Einflussgrößen auf den Einblasvorgang	39
5	Prozessüberwachung für den Einblasprozess	46
5.1	Systematische Auswahl geeigneter Sensorik	46
5.2	Entwicklung der bildbasierten Prozessüberwachung	52
5.2.1	Integration einer Kamera in die Einblasform	53
5.2.2	Detektion der Faserfront durch Bildverarbeitung	56
5.3	Validierung der entwickelten Prozessüberwachung	62
6	Charakterisierung der Preformeigenschaften	66
6.1	Bewertung der Homogenität	67
6.1.1	Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Forschung	67
6.1.2	Experimentelle Untersuchung von Methoden zur Homogenitätsbewertung	72
6.1.3	Ergebnisse und Bewertung der Methoden	75
6.2	Bestimmung der Faserorientierung	80
6.2.1	Methoden zur Bestimmung der Faserorientierung	81
6.2.2	Weiterentwicklung der Methoden	84
6.2.3	Experimentelle Untersuchung	87
6.2.4	Ergebnisse und Bewertung	89
7	Experimentelle Untersuchung des Einblasprozesses	96
7.1	Statistische Versuchsplanung (DoE)	96
7.1.1	Definition der Zielgrößen	96
7.1.2	Definition der Einflussfaktoren und Faktorstufen	97
7.1.3	Aufstellen des statistischen Versuchsplans	99
7.2	Durchführung der Parameterstudie	101
7.3	Ergebnisse der Parameterstudie	102
7.3.1	Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf das Preformgewicht	103
7.3.2	Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf die Homogenität	106
7.3.3	Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf die Faserorientierung	112
8	Regelung des Einblasprozesses	117
8.1	Systemtechnische Beschreibung der Regelungsaufgabe	117

8.2	Entwicklung und Implementierung von Regelungsstrategien	120
8.2.1	Entwurf von Regelungsstrategien	120
8.2.2	Implementierung der Regelungsstrategien	124
8.3	Validierung der Regelungsstrategien	125
9	Zusammenfassung und Ausblick	131
9.1	Zusammenfassung	131
9.2	Ausblick	133
	Publikationsliste	135
	Literaturverzeichnis	137
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	V
	Anhang	VII

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ADS	Automation Device Specification
BFFT	Blockwise Fast Fourier Transformation
BHT	Blockwise Hough Transformation
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CNN	Convolutional Neural Network
CV	Coefficient of Variation
CWF	Cluster Width Factor
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DoE	Design of Experiments
FCN	Fully Convolutional Network
FFT	Fast Fourier Transformation
FIM	Fiber Injection Molding
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FWW	Faktorwechselwirkung
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
HT	Hough Transformation
KL	Kullback-Leibler
KNN	K-Nearest-Neighbour-Algorithmus
LCM	Liquid Composite Molding
ODF	Orientation Distribution Function
RoI	Region of Interest
RTM	Resin Transfer Molding
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STT	Structure Tensor Thinning

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
α	Proportionalitätsfaktor	
μ_p	Durchschnittlicher Abstand der Pixel vom Clusterzentrum	
$\rho(\theta)$	Faserorientierungsverteilung	
σ_p	Standardabweichung der Abstände der Pixel vom Clusterzentrum	
χ^2	Chi-Quadrat	
θ	Winkel	[°]
a	Faktor zur Gewichtung der dominierenden Faserorientierung	
A	Anisotropieverhältnis	
A_a	Gesamtfläche eines Bildes	
A_O	Objektfläche eines Ground-Truth-Bildes	
A_T	Objektfläche eines segmentierten Bildes	
AAE	Absolute Foreground Area Error	
B	Bildgröße	[mm]
B_O	Hintergrundpixel eines Ground-Truth-Bildes	
B_T	Hintergrundpixel eines segmentierten Bildes	
CV	Variationskoeffizient	
CWF	Cluster Width Factor (Clusterbreitenfaktor)	
d	Störgröße	
d_E	Einblasspalt	[mm]
d_i	Euklidische Distanz einer Lichtquelle i zum Beobachtungspunkt	[mm]
d_q	euklidische Distanz des q -ten misklassifizierten Pixels	
D_{KL}	Kullback-Leibler-Divergenz	
E	Beleuchtungsstärke	[lx]
f	Brennweite	[mm]
f_S	Schneidfrequenz des Schneidwerks	[Hz]

F_F	Faserfeinheit (Titer)	[<i>tex</i>]
F_O	Vordergrundpixel eines Ground-Truth-Bildes	
F_T	Vordergrundpixel eines segmentierten Bildes	
g	Gegenstandsweite	[<i>mm</i>]
G	Geradheitsmaß	
G_O	Gegenstandsgröße	[<i>mm</i>]
$H(P, Q)$	Kreuzentropie der Wahrscheinlichkeitsverteilungen P und Q	
l_F	Faserlänge	[<i>mm</i>]
l_i	Leuchtstärke einer Lichtquelle i	[<i>cd</i>]
l_i	Lange Achse einer Faser i	
m	Masse eines Preforms bzw. einer Probe	[<i>g</i>]
\dot{m}_F	Faseraustragsrate des Schneidwerks	[<i>g/min</i>]
ME	Misclassification Error	
n_C	Clusteranzahl	
n_F	Anzahl an Fasern	
n_V	Ventilator Drehzahl	[<i>U/min</i>]
n_i	Flächenanteil an weißen Pixeln (=Fasern)	
n_p	Gesamtanzahl an Pixeln	
n_θ	Anzahl an Fasern in Richtung des Winkels θ	
O	Override	
PDE	Pixel Distance Error	
PE	Probability Error	
Q_F	Faservolumenstrom an der Einblasdüse	[<i>cm³/s</i>]
R_i	i -te Region eines segmentierten Bildes	
R_j	j -te Region eines segmentierten Bildes	
S	Klassifikationsgüte	
$S(P)$	Entropie der Wahrscheinlichkeitsverteilung P	
s_i	Kurze Achse einer Faser i	

t_n	Zeitpunkt erfolgter Düsenpositionierung	
u	Stellgröße	
u_R	Wirksame Stellgröße	
$v_{d,max}$	Düsenmaximalgeschwindigkeit	[mm/s]
$v_{d,min}$	Düsenmindestgeschwindigkeit	[mm/s]
v_D	Düsengeschwindigkeit	[mm/s]
v_E	Einblasgeschwindigkeit an der Einblasdüse	[mm/s]
v_F	Faservorschub des Schneidwerks	[mm/s]
w	Führungsgröße	
$w(y, t)$	Führungsgröße zum Zeitpunkt t als Vektor	
W	Fläche eines Clusters	
W_i	Gewichtungsfaktor	
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	
$x_{F,i}$	Lage der Faserfront in Einblasrichtung	
$x_{F,m}$	Mittelwertlage der Faserfront in Einblasrichtung	
$x_{F,m}(y, t)$	Von der Prozessüberwachung bestimmte Lage der Faserfront als Vektor zum Zeitpunkt t	
$x_F(y, t)$	Lage der Faserfront als Vektor zum Zeitpunkt t	
x_p	Entfernung eines Pixels vom Clusterzentrum	
y	Regelgröße	
$y(x_{F,min})$	Ort der geringsten Formfüllung	
$y_{D,s}$	Sollposition für Einblasdüse	
$y_D(t)$	Position der Einblasdüse zum Zeitpunkt t	
y_m	Gemessene Regelgröße	

1 Einleitung

1.1 Motivation

Aufgrund der Verknappung von Ressourcen und Energie, strengerer Gesetzgebung hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Emissionen im Transportsektor und dem steigenden Umweltbewusstsein in der Bevölkerung nimmt die Bedeutung des systemeffizienten Leichtbaus in den letzten Jahren deutlich zu. Im Fokus der Forschung und Technik stehen neue Werkstoffe und Herstell- bzw. Verarbeitungsverfahren zur Gewichtseinsparung von Bauteilen. Hohes Potential haben hierbei Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) aufgrund ihrer sehr guten Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte. Weitere vorteilhafte Eigenschaften dieser Werkstoffgruppe sind die Korrosionsbeständigkeit sowie das gegenüber metallischen Strukturen vier- bis fünfmal höhere Energieaufnahmevermögen (Schürmann 2008, S. 4).

Ein großes Hemmnis für den großflächigen Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden sind die, insbesondere für endlosfaserverstärkte Bauteile, hohen Kosten, welche sich aus den im Vergleich zu metallischen Werkstoffen höheren Kosten für das Fasermaterial und die Bauteilherstellung ergeben (Lässig & Eisenhut et al. 2012, S. 13); (Lerch & Zanker et al. 2014, S. 15). Für Bauteile, an welche geringere Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften gestellt werden, wie z.B. Verkleidungen oder Klappen, stellen langfaserverstärkte Halbzeuge eine kosteneffiziente Alternative zu Endlosfaser-Halbzeugen dar. Neben den geringeren Herstellungskosten sprechen insbesondere die flexibel einstellbaren Eigenschaften durch das Mischen verschiedener Fasern sowie die Realisierung verschiedener Faserstrukturen und einer variablen Isotropie für diese Halbzeugklasse (Stegschuster & Schlichter 2018). Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Faserlänge zeigen, dass bei einem Fasergehalt von 30 Gew-% und hoher Faserorientierung bereits ab einer Faserlänge von 8 - 9 mm bis zu 90 % der Festigkeit einer Endlosfaserverstärkung erreicht wird (Schijve 2000; Brast 2001; Thomason & Vluc 1996). Langfaser-Halbzeuge erlauben weiterhin eine zusätzliche Ressourceneinsparung und Kostensenkung durch die Nutzung von recycelten Kohlenstofffasern, welche eine kürzere Faserlänge von 5 – 100 mm nach dem Recyclingprozess aufweisen (Stegschuster & Schlichter 2018; Wölling & Schmiegl et al. 2017).

Ein vielversprechender Ansatz zur direkten Fertigung von dreidimensionalen Preforms aus Langfasern ohne den Zwischenschritt über zweidimensionale Halbzeuge stellt das

von der Firma *Fiber Engineering GmbH* (Karlsruhe) entwickelte Faserblasverfahren dar (Förster 2003). Das Verfahren erlaubt die endkonturnahe Herstellung von dreidimensional geformten Langfaser-Halbzeugen durch das Einblasen von Fasern mittels eines Luftstroms in eine geschlossene Einblasform. Aufgrund der geschlossenen Einblasform wird eine hohe Materialeinsatzquote erreicht, da der sonst bei der Verwendung von Halbzeugen entstehende Verschnitt entfällt. Dieses Verfahren besitzt weiterhin das Potential, dass die Dichte der Faserstruktur lokal eingestellt werden kann, wodurch der Materialeinsatz optimiert wird. Die bisherigen Forschungsarbeiten zeigen allerdings eine ungleichmäßige Verteilung der Fasern und eine geringe Reproduzierbarkeit der Preforms bei der Fertigung (Fleischer & Dackweiler et al. 2016; Dackweiler & Fleischer 2017). Eine besondere Herausforderung für die Nutzung von im Faserblasverfahren hergestellten Preforms stellt daher die Erzielung gleichbleibender Eigenschaften und einer homogenen Faserverteilung dar.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher das Faserblasverfahren für die ressourceneffiziente Herstellung von Langfaserpreforms mit gesteigerter Homogenität und höherer Reproduzierbarkeit der Preforms untersucht werden. Hauptziel ist die systematische Erfassung der Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den resultierenden Eigenschaften der Preforms sowie eine darauf aufbauende Prozessregelung zur Steigerung der Preformhomogenität. Ausgangspunkt hierfür ist eine Analyse des Faserblasprozesses und die Identifikation der relevanten Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen. Für die sensorische Erfassung des Formfüllvorgangs wird ein Prozessüberwachungssystem entwickelt, welches die Beobachtung der Vorgänge in der Einblasform erlaubt und womit Durchlichtbilder für eine zerstörungsfreie Analyse der hergestellten Preforms aufgenommen werden können. Für die bildbasierte Analyse der Preforms werden Methoden zur Bewertung der Homogenität und Bestimmung der Faserorientierung untersucht und weiterentwickelt. Mit Hilfe der Prozessüberwachung und der Bewertungsmethoden werden anschließend in einer experimentellen Versuchsreihe die Wirkzusammenhänge erfasst und beschrieben. Abschließend erfolgen die Implementierung der Prozessregelung und deren Validierung. Die Arbeiten haben die Absicht einen Beitrag zum besseren Prozessverständnis des Faserblasverfahrens zu liefern sowie eine erweiterte Prozessüberwachung und -führung zu erlauben.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Kapitel. Zunächst wird in Kapitel 2 der allgemeine Stand der Forschung und Technik zur großserientauglichen Herstellung von Faserverbundstrukturen mit einem Fokus auf Verfahren zur Herstellung von langfaserverstärkten Preforms beschrieben. Ausgehend von einer Analyse der Defizite des Faserblasverfahrens aus dem Stand der Forschung werden im darauffolgenden Kapitel 3 die Zielsetzung und die Vorgehensweise dieser Arbeit abgeleitet. Im vierten Kapitel wird die für die Durchführung der Arbeiten aufgebaute Anlagentechnik erläutert. Weiterhin werden als Grundlage für die weiteren Arbeiten der Faserblasprozess analysiert sowie die wichtigsten Einflussgrößen identifiziert. Das fünfte Kapitel erläutert die systematische Entwicklung eines Systems zur Überwachung des Einblasprozesses mit Hilfe einer in die Einblasform integrierten Kamera. Das sechste Kapitel befasst sich mit Methoden zur Bewertung der Homogenität und Faserorientierung auf Basis von Durchlichtaufnahmen der hergestellten Preforms. Die zuvor entwickelten Methoden werden im anschließenden Kapitel 7 für die experimentelle Untersuchung der Einflüsse der Einblasparameter mit einer statistischen Versuchsplanung und –auswertung angewandt. Im folgenden Kapitel 8 wird auf Basis der bisherigen Erkenntnisse eine Regelung des Einblasprozesses entworfen, implementiert und validiert. Die vorliegende Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftig notwendige Forschungs- und Entwicklungsthemen im Bereich des Faserblasverfahrens.

2 Stand der Forschung und Technik

Für die Herleitung des Forschungsbedarfs werden in den folgenden Abschnitten die Grundlagen und der Stand der Forschung und Technik vorgestellt. Dabei werden ein Einblick in die Fertigung von Faserverbundbauteilen für die Großserie gegeben und die für diese Dissertation relevanten Themengebiete eingegrenzt. Anschließend werden die Grundlagen des Preformings erläutert und gezielt auf einige relevante Herstellungsverfahren für Langfaser-Preforms eingegangen. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung des Stands der Forschung und Technik ab.

2.1 Großserienfertigung von Faserverbundteilen

2.1.1 Übersicht

Für die Herstellung von Faserverbundbauteilen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Fertigungsverfahren. Für die Festlegung eines geeigneten Fertigungsverfahrens stellen die Bauteilgröße und –komplexität sowie der zu verarbeitende Werkstoff die wichtigsten Auswahlkriterien dar (Neitzel 2014, S. 203). Neben den technologischen Gesichtspunkten spielen weiterhin die geforderte Bauteilqualität und der geplante Stückzahlbereich eine Rolle (Neitzel 2014, S. 204). Einen detaillierten Überblick über die Funktionsweise und Anwendungsgebiete der einzelnen Verfahren gibt hierbei die Fachliteratur (Schürmann 2008; Henning & Moeller 2011; AVK 2010; Neitzel 2014). Für eine Betrachtung des aktuellen Stands der Forschung sei auf (Fleischer & Teti et al. 2018) verwiesen.

In der Fertigung von Faserverbundteilen im Großserienmaßstab werden meist Flüssigimprägnierverfahren (engl. *Liquid Composite Molding (LCM)*) eingesetzt. Sie bieten das Potential einer wirtschaftlichen Fertigung durch eine schnelle Zykluszeit sowie eine bessere Bauteilqualität aufgrund der erhöhten Reproduzierbarkeit (Hufenbach 2007, S. 14). Die Verfahren haben gemein, dass trockene Verstärkungsfasern in einem Fließprozess mit dem Matrixmaterial imprägniert werden (Henning & Moeller 2011, S. 641). Basierend auf diesem Grundprinzip haben sich etliche Verfahrensvarianten ausgebildet, auf welche an dieser Stelle nicht vollumfänglich eingegangen werden kann.

Das Resin-Transfer-Molding-(RTM)-Verfahren bietet in dieser Verfahrensgruppe aufgrund der guten Automatisierbarkeit das höchste Potential für eine Großserienfertigung (Lässig & Eisenhut et al. 2012, S. 42). Der Marktbericht Composites veröffentlicht jähr-

lich die Produktionsvolumina von faserverstärkten Kunststoffen nach Fertigungsverfahren. Im Jahr 2018 lag die Verarbeitung im RTM-Verfahren nach Sheet bzw. Boulk Molding Compound (SMC/BMC), „Open-Mold“-Verfahren und den thermoplastischen Verfahren glasmattenverstärkter Thermoplast (GMT) bzw. langfaserverstärkter Thermoplast (LFT) an vierter Stelle (Sauer & Kühnel et al. 2018). Das RTM-Verfahren ist in der Industrie das gebräuchlichste Verfahren für die Herstellung von Hochleistungsfaserverbunden beispielweise für Anwendungen in der Primärstruktur im Fahrzeugbau (Hufenbach 2007). Es findet jedoch auch für die Herstellung langfaserverstärkter Bauteile auf Basis von Vliesen und Matten für Sekundärstrukturen Anwendung (Knof 2014); (Kellie 2016, S. 266–267). Aufgrund der hohen industriellen Relevanz für die Großserienfertigung wird daher im Folgenden die Prozesskette für das RTM-Verfahren genauer vorgestellt.

2.1.2 „Resin-Transfer-Molding“-Prozesskette

Das RTM-Verfahren ist ein Flüssigharz-Injektionsverfahren, bei welchem ein trockener textiler Vorformling (sogenannter Preform) in einem geschlossenen Werkzeug infiltriert wird (Henning & Moeller 2011, S. 647). Die gesamte RTM-Prozesskette umfasst alle notwendigen Prozessschritte der Fertigung mit dem RTM-Verfahren von der Textilbereitstellung bis zum fertigen Bauteil. Die Prozessschritte werden dabei in die vier aufeinanderfolgenden, in Abbildung 2-1 dargestellten, Schritte Textilbereitstellung, Preforming, Infiltration und Nachbearbeitung eingeteilt. Im Sinne einer wirtschaftlichen großserientauglichen Fertigung werden diese Schritte über geeignete Handhabungslösungen automatisiert verkettet (Fleischer & Ochs et al. 2012). Für eine genauere Betrachtung geeigneter Endeffektoren für die Handhabung in der RTM-Prozesskette sei auf (Fantoni & Santochi et al. 2014) verwiesen. Weiterhin bedarf die Fertigung eine durchgehende Qualitätsprüfung der in jedem Prozessschritt hergestellten Zwischenprodukte (Fleischer & Lanza et al. 2012).

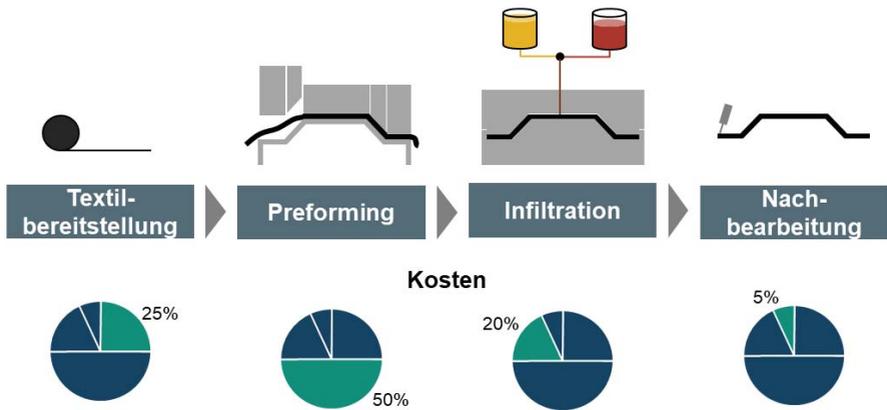


Abbildung 2-1: Ablauf und Kostenstruktur der RTM-Prozesskette (Daten zur Kostenstruktur auf Basis von (Cherif 2013))

In der RTM-Prozesskette werden meist zweidimensionale textile Halbzeuge, welche als Rollenware angeliefert werden, verarbeitet. Für Hochleistungsfaserverbunde handelt es sich hierbei um Gewebe oder Gelege. In Anwendungen mit geringeren mechanischen Anforderungen können jedoch auch Wirrfaservliese zur Anwendung kommen (Kellie 2016; Heilos & Hofmann et al. 2020). Hierbei besteht das Potential Fasermaterial z.B. aus Verschnitt (Kellie 2016, S. 266–267) oder recycelte Fasern einzusetzen. Die Halbzeuge werden in automatisierten Prozessketten auf einem CNC-gesteuerten Cuttertisch mittels eines Ultraschallschneidkopfes oder oszillierenden Messern auf die benötigten Konturen zugeschnitten. Die ausgeschnittenen Einzelstücke werden anschließend in einem Magazin zwischengespeichert.

Im nächsten Prozessschritt Preforming wird aus dem Textil durch Stapeln, Fixieren und anschließendes Umformen der Zuschnitte ein endkonturnaher trockener Vorformling gefertigt. Die Textilizuschnitte werden entsprechend der späteren Bauteilgeometrie und des benötigten Faserplans gestapelt. In der Regel erfolgt hierbei bereits eine Fixierung der Einzellagen mittels eines festen oder flüssigen Binders oder alternativ durch textile Konfektionstechniken wie Nähen (Cherif 2011). Anschließend erfolgt die dreidimensionale Formgebung. Eine genauere Betrachtung der verschiedenen Ansätze zum Preforming wird in Abschnitt 2.1.3 gegeben.

Die Infiltration des Preforms erfolgt in einem beheizten Infiltrationswerkzeug. In das geschlossene Werkzeug wird das Harz-Härter-Gemisch unter Druck injiziert und somit der Preform durchgängig infiltriert. Im Werkzeug erfolgt unter erhöhter Temperatur die Vernetzungsreaktion der Reaktionspartner zur duromeren Matrix (Henning & Moeller 2011, S. 647). Aufgrund der umfangreichen Forschung der letzten Jahre hat sich eine Vielzahl an verschiedenen Verfahrensvarianten ausgebildet (für eine detaillierte Beschreibung siehe (Neitzel 2014, S. 369–377)). Mittels der Variation von Injektionsdruck, Werkzeugspalt oder zusätzlich anliegendem Vakuum im Infiltrationswerkzeug soll der Infiltrationsvorgang vorteilhaft beeinflusst werden. Ziel ist die Verringerung der Zykluszeit, Reduktion von durch die Infiltration entstehenden Defekten, sowie die Verbesserung der Bauteiloberfläche. Mit Hochdruck-RTM-Verfahren und geeigneten Harzsystemen (sog. „Snap-Cure“-Systemen) sind nach aktuellem Stand der Technik Zykluszeiten unter 3 Minuten zu erreichen (Rosenberg & Thoma et al. 2016). Aufgrund der hohen erforderlichen Schließkräfte bei großen Bauteilabmessungen und hohen Drücken sind hierfür große parallelgeregelt Pressen notwendig (Zirn 2014).

Trotz der endkonturnahen Fertigung von RTM-Bauteilen ist in der Regel eine mechanische Nachbearbeitung notwendig. Hierbei werden mittels spanender Fertigungsverfahren oder Wasserstrahlschneiden die Kanten besäumt, sowie gegebenenfalls Bohrungen oder Durchbrüche gefräst. Die Herausforderung besteht dabei in der Vermeidung von Delaminationen und dem Erreichen einer guten Oberflächenqualität der Bearbeitungsfläche (Lopresto & Caggiano et al. 2016). Eine detaillierte Betrachtung möglicher Nachbearbeitungsverfahren ist in (Teti 2002) gegeben.

Die auf die Prozessschritte entfallenden Kostenanteile sind ebenfalls in Abbildung 2-1 dargestellt. 25 % entfallen dabei auf die Textilbereitstellung, was im Wesentlichen auf den hohen Energieverbrauch bei der Herstellung von Kohlenstofffasern zurückzuführen ist (Hohmann & Schwab et al. 2015). Auf die eigentliche Infiltration entfallen hingegen lediglich 20 % der Kosten. Die Nachbearbeitung verursacht etwa 5% der anfallenden Gesamtkosten. Der größte Anteil an den Bauteilkosten entfällt mit 50 % auf den Preforming-Prozessschritt. Dies ist auf die vielen Einzelschritte sowie die hohe Ausschussrate zurückzuführen (Fleischer & Wagner 2013). Weiterhin fallen beim Zuschnitt der Lagen etwa 30-40 % an Verschnitt an (Wölling & Schmiege et al. 2017, S. 271). Optimierungen des Preformingprozesses bieten daher ein hohes Potential die Gesamtbaukosten signifikant zu senken.

2.1.3 Preforming-Verfahren

Das Preforming bezeichnet das Verfahren zur Herstellung einer ein- oder mehrlagigen trockenen Faserstruktur, welche als Preform bezeichnet wird und in einem nachfolgenden Infiltrationsprozess imprägniert wird (Cherif 2011, S. 30). Die Wahl eines geeigneten Preforming-Verfahrens hängt von der Art und Orientierung der Fasern, sowie dem Komplexitätsgrad und der Geometrie des zu realisierenden Bauteils ab (Neitzel 2014, S. 97).

Die Verfahren können dabei in die Kategorien sequentielle Verfahren und direkte Verfahren getrennt werden (Neitzel 2014, S. 99) (Cherif 2011, S. 30). Bei der sequentiellen Preformherstellung werden mehrere Prozessschritte zur Fertigung eines dreidimensional geformten Gesamtpreforms benötigt (Neitzel 2014, S. 104). Ausgangspunkt für diese Form des Preformings sind zweidimensionale flächige Halbzeuge, welche normalerweise durch den Bauteilhersteller von einem Lieferanten bezogen werden. Entsprechend der Geometrie und des gewünschten Lagenaufbaus erfolgt ein Zuschnitt zu Einzelpatches, die anschließend zum Preform assembliert werden. Direkte Preforming-Verfahren erlauben eine Herstellung von dreidimensional geformten Preforms aus dem Fasermaterial und eventuellen zusätzlichen Hilfsstoffen wie Binder in einem einstufigen Prozess (Neitzel 2014, S. 100). Abhängig von den eingesetzten Preforming-Verfahren sind verschiedene Faservolumenanteile, Faserorientierung und geometrische Komplexitäten möglich (Cherif 2011, S. 30).

In Hinblick auf die Faserverstärkung wird zwischen der Fertigung von Preforms mit Endlosfaserverstärkung und Langfaserverstärkung unterschieden. Die Endlosfaserverstärkung ist dabei definiert durch Verstärkungsfasern, deren Länge mindestens der Bauteildimension entspricht. Von einer Langfaserverstärkung spricht man ab einer Faserlänge von 5 mm, wobei bei Infiltrationsprozessen meist Preforms mit Faserlängen von 50 mm und mehr verarbeitet werden.

Eine detaillierte Übersicht der verfügbaren Preforming-Verfahren ist in (Neitzel 2014, S. 99) gegeben, der ähnliche Verfahren in Gruppen zusammengefasst hat. In Anlehnung an (Fecher 2017) können die Preforming-Verfahren anhand der Verfahrenskategorie und der Art der Verstärkungsfasern eingeteilt werden (siehe Abbildung 2-2). Für die Herstellung endlosfaserverstärkter Preforms sind die vier Verfahrensgruppen 3D-Textilprozesse, Fiber-Placement-Methoden, die textile Konfektionstechnik und die Binder-

Umform-Technik geeignet. Die Verfahren zur Herstellung endlosfaserverstärkter Preforms werden im Folgenden kurz erläutert. Die Verfahren zur direkten Herstellung langfaserverstärkter Preforms werden aufgrund des hierauf liegenden Fokus dieser Dissertation in den Abschnitten 2.2 und 2.3 detailliert beschrieben und der aktuelle Stand der Forschung diskutiert.

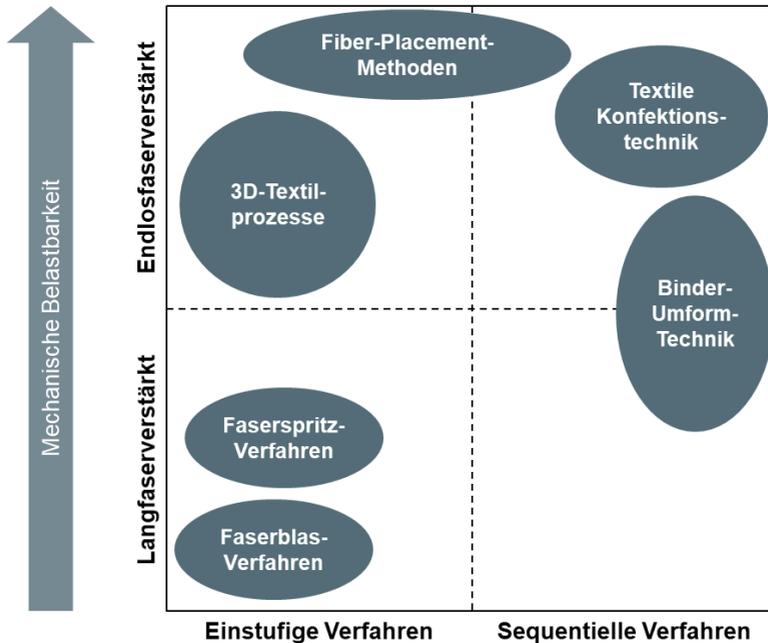


Abbildung 2-2: Einteilung der Preforming-Verfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an (Fecher 2017))

2.1.3.1 3D-Textilprozesse

Zur textiltechnischen Herstellung von Preforms aus Endlosfasern können die Verfahren Weben, Flechten und Stricken gezählt werden.

3D-Webverfahren sind durch mehrere übereinander angeordnete Kett- und Schussfadensysteme gekennzeichnet (Cherif 2011, S. 214). Hiermit können einfache Profile und ebene Halbzeuge hergestellt werden, die neben den Hauptorientierungen in $0^\circ/90^\circ$ -

Richtung auch einen Anteil von bis zu 17 % Fäden in Dickenrichtung aufweisen können (Neitzel 2014, S. 102). Ein häufiger Anwendungsfall der 3D-Webtechnik ist die Fertigung von Abstandsgeweben für flächige Strukturen (Mountasir & Hoffmann et al. 2011). 3D-Flechttechniken eignen sich besonders für die Herstellung von geschlossenen und offenen Profilen mit hoher Produktivität (Neitzel 2014, S. 103). Die kontinuierliche Faserausrichtung kann in alle drei Raumrichtungen variiert werden (Cherif 2011, S. 312). Durch das Führen des benötigten Dorns durch einen Roboter sind auch komplexe Strukturen realisierbar (Cherif 2011, S. 313).

Stricktechniken können für die Herstellung sehr komplexer Halbzeuggeometrien eingesetzt werden (Leong & Ramakrishna et al. 2000). Mehrlagengestricke ermöglichen zusätzliche Verstärkungsfadenanteile in Dickenrichtung, welche verbesserte Crash- und Impacteigenschaften ermöglichen (Cherif 2011, S. 253). Nachteilig sind die vergleichsweise geringen mechanischen Eigenschaften durch die komplexe Maschenstruktur der Fasern und Faserschädigungen im Prozess, sowie die Produktivität (Neitzel 2014; Leong & Ramakrishna et al. 2000) (Neitzel 2014, S. 103).

2.1.3.2 Fiber-Placement-Methoden

Die Fiber-Placement-Methoden für die Herstellung trockener Preforms haben sich aus der in der Luft- und Raumfahrt etablierten Fiber-Placement-Technik für imprägnierte Halbzeuge entwickelt. Bei diesen Methoden werden Endlosfasern mittels eines Legkopfes auf einer zwei- oder dreidimensionalen Unterlage abgelegt und mittels eines Binders fixiert (Belhaj & Deleglise et al. 2013). Im Falle der zweidimensionalen Ablage erfolgt meist ein anschließender Umformschritt zur Erzeugung dreidimensionaler Geometrien. Gegenüber der Nutzung von zweidimensionalen Halbzeugen bieten diese Methoden den Vorteil, dass die Faserorientierungen unter Beachtung einer anschließenden Umformung gezielt auf die späteren Lastpfade im Bauteil ausgerichtet werden können. Aufgrund der sehr guten Faserausrichtung und der hohen erreichbaren Faservolumengehalte wird allerdings die Tränkbarkeit der Preforms reduziert (Rimmel & May et al. 2019). In der Dissertation von (Rimmel 2020) wird das Imprägnierverhalten grundlegend simulativ und experimentell untersucht und daraus Gestaltungsempfehlungen für Preforms abgeleitet.

2.1.3.3 Textile Konfektionstechnik

Die textile Konfektionstechnik bezeichnet das lokale Fixieren und Fügen der Einzelpatches (Neitzel 2014, S. 105). Am häufigsten kommt dabei die Nähtechnik zum Einsatz. Für die Fertigung auch komplexer Geometrien gibt es verschiedene Stichtypen, welche auch einseitig erfolgen können (Neitzel 2014, 109-127). Durch die Stiche erfolgt eine zusätzliche Verstärkung der Lagen in z-Richtung, was die Delaminationsgefahr verringert (Cherif 2011, S. 32). Die Nähköpfe können dabei CNC-gesteuert oder robotergeführt sein, wodurch eine automatisierte Assemblierung mit hoher Flexibilität ermöglicht wird (Cherif 2011, S. 435). Dennoch ist diese Verfahrensvariante sehr aufwandsintensiv und daher nur eingeschränkt für eine Großserienfertigung geeignet.

2.1.3.4 Binder-Umform-Technik

Bei der Binder-Umform-Technik für die Fertigung von endlosfaserverstärkten Preforms werden Gewebe oder Gelege als Halbzeuge verarbeitet. Die Einzellagen des späteren Preforms werden durch einen in der Regel thermoplastischen Binder relativ zueinander fixiert (Cherif 2011, S. 31). Alternativ können für die Herstellung langfaserverstärkter Preforms Vliesstoffe umgeformt werden. Die bebinderten Halbzeuge werden nach dem Stacking aufgeheizt und in einer Umformstation drapiert. Aufgrund der Notwendigkeit von Handhabungs- und Spannvorrichtungen ist nach der Umformung eine Besäumung notwendig (Neitzel 2014, S. 104). Der Vorteil der Binder-Umform-Technik besteht insbesondere in der besseren Eignung zur Automatisierbarkeit und der damit erreichbaren größeren Stückzahlen. Eine eingehende Untersuchung der Ansätze für eine automatisierte Herstellung von Preforms mit der Binder-Umform-Technik wird in (Wagner 2016) präsentiert.

Die Umformung des Textils führt zu hohen lokalen und globalen Deformationen, welche die Faserorientierung, den Faservolumengehalt und die Dicke beeinflussen, sowie für die Bildung von Fehlstellen wie Falten oder Lücken zwischen den Rovings verantwortlich sind (Gereke & Döbrich et al. 2013). Im Falle von Endlosfaser-Halbzeugen wie Geweben und Gelegen sind Scherung innerhalb der Einzellagen und Biegung die vorherrschenden Verformungsmechanismen (Boisse & Hamila et al. 2011). Vielfältige Forschungsarbeiten, welche in (Gereke & Döbrich et al. 2013) zusammengefasst sind, befassen sich damit, das Verhalten während der Umformung von Endlosfaser-Halbzeugen besser zu verstehen. Aufgrund der Anisotropie und der teilweise ungleichmäßigen

Faserverteilung in Vliesstoffen, können die Erkenntnisse über die Umformung von gerichteten Halbzeugen nicht auf diese übertragen werden (Omrani & Wang et al. 2017). Für die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Vliesstoffen gibt es eine Vielzahl an auf der Finite-Elemente-Methode basierende Strategien (Farukh & Demirci et al. 2015). Bisherige Arbeiten beschränken sich allerdings auf die Betrachtung einfacher Belastungsfälle sowie den Einfluss der Faserarchitektur und des Bindungsmechanismus der Vliesstoffe (Ridruejo & González et al. 2011; Farukh & Demirci et al. 2013; Zhang & Chen et al. 2019; Rittenhouse & Wijeratne et al. 2019). In (Omrani & Wang et al. 2017) wird die Drapierbarkeit eines Flachsfaser-Vliesstoffes experimentell untersucht. Entscheidend für eine defektfreie Umformung ist die Einstellung der Niederhalterkraft, welche bei zu geringen Werten zu Faltenbildung und bei zu hohen Werten zu einer lokalen Ausdünnung des Vlieses führt.

2.2 Faserspritzverfahren

Im Folgenden wird das Faserspritzverfahren zur direkten Herstellung langfaserverstärkter Preforms vorgestellt und der aktuelle Stand der Forschung zu diesem Verfahren zusammengefasst.

2.2.1 Verfahrensübersicht

Unter Faserspritzverfahren werden Verfahren verstanden, bei welchen geschnittene Langfasern auf ein offenes Ablagewerkzeug aufgespritzt und mit einem Binder fixiert werden. Die ersten Faserspritzverfahren wurden in den 1950er Jahren entwickelt. Seitdem wurden von einer Vielzahl an Unternehmen und Forschungseinrichtungen in den USA und Europa verschiedene Verfahrensvarianten entwickelt. Nach (Fecher 2017) können folgende Verfahren den Faserspritzverfahren zugeordnet werden:

- „Programmable Powdered Preform Process (P4-Process)“
- „Programmable Powdered Preform Process for Aerospace (P4A-Process)“
- „Ford Programmable Preform Process (F3P-Process)“
- „Part via Preform (PvP)“
- „Direct Fiber Preforming (DFP)“
- „3D-Faserspritzverfahren“

Trotz der verschiedenen Verfahrensvarianten wird der Ablauf der Faserspritzverfahren in den meisten Fällen in die in Abbildung 2-3 dargestellten Prozessschritte Faserablage,

Binderaktivierung und Preformentnahme eingeteilt. Ausgangsmaterial sind üblicherweise Glas- oder Kohlenstofffaserrovings von einer Spule. Die Ablage der Verstärkungsfasern erfolgt durch einen meist robotergeführten Spritzkopf, der die Fasern und einen Binder in Form von Binderfasern oder Binderpulver auf ein perforiertes dreidimensional-geformtes Ablagewerkzeug spritzt. An dem Ablagewerkzeug liegt ein Unterdruck an, um die Fasern auf der Form zu fixieren. Der Spritzkopf besteht aus einem Abzugrollensystem zum Rovingeinzug, dem Schneidwerk, in welchem die Fasern zwischen einer Schneid- und Andruckrolle geschnitten bzw. gebrochen werden, sowie einer Venturidüse, um die Fasern vom Schneidwerk abzusaugen und in Richtung Ablagewerkzeug zu beschleunigen (Hölzel 2003, S. 35). Nach dem Aufbringen der Fasern erfolgt die Binderaktivierung, indem das Ablagewerkzeug durch ein Oberwerkzeug geschlossen wird und heiße Luft durch den Preform geblasen wird. Alternativ erfolgt die Binderaktivierung bei manchen Verfahrensvarianten durch ein am Spritzkopf angebrachtes Heißluftaggregat direkt bei der Faserablage, was eine Prozesszeitersparnis ermöglicht (Fecher 2017, S. 44). Bei der Verwendung eines Oberwerkzeugs erfolgt nach dem erfolgten Aufschmelzen des Binders meist eine aktive Kühlung durch kühle Luft. Abschließend wird der fertige abgekühlte Preform entnommen. Je nach Verfahrensvariante ist gegebenenfalls ein Randbeschnitt vor der Infiltration notwendig (Fecher 2017, S. 66).



Abbildung 2-3: Verfahrensablauf der Faserspritzverfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an (Harper & Turner et al. 2006a))

Mittels Faserspritzverfahren können hohe Austragsraten von bis zu 1200 kg/h realisiert werden (Norris & Carpenter et al. 2008). Das Verfahren eignet sich daher gut für die Fertigung großflächiger Bauteile in einem großserientauglichen Maßstab. Als industrielle Beispielanwendungen in der Großserie sind die Fertigung von Faserverbundteilen

für Aston Martin (50.000 Teile/Jahr)¹ und Ladeflächen für Pick-Ups von Chevrolet² zu nennen. Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Preforming-Verfahren ist die benötigte Anlagentechnik außerdem weniger aufwändig und damit günstiger.

2.2.2 Forschungsarbeiten

Zur Weiterentwicklung des Faserspritzverfahrens werden seit 1997 an mehreren Forschungsinstituten, sowie in der Industrie umfangreiche Forschungsarbeiten geleistet. Schwerpunkte der Forschungstätigkeiten liegen dabei in der Verwendung neuer Materialien, der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Preforms sowie der Funktionsintegration. Außerdem werden Ansätze zur Prozesssimulation entwickelt und Qualitätssicherungssysteme untersucht.

Ausgangspunkt für die Weiterentwicklungen ist das P4-Verfahren für die automatisierte Herstellung von Langglasfaser-Preforms, welches von den Firmen *Applicator System AB* (Mölnlyke, Schweden) und *Owens Corning* (Battice, Belgien) entwickelt wurde (Chavka & Dahl 1999). Am *National Composites Center* (Kettering (OH), USA) wird die Verarbeitung von Kohlenstofffasern und die gezielte Orientierung der geschnittenen Fasern mit dem Ziel der Qualifizierung des Prozesses zur Herstellung von Bauteilen für die Luftfahrt untersucht (Cordell & Benson Tolle et al. 2000). Durch einen dort entwickelten speziellen Sprühkopf können 90 % der Fasern in einem Winkel von $\pm 10^\circ$ abgelegt werden, wodurch bis zu 80 % der Festigkeiten und Steifigkeiten endlosfaserverstärkter Bauteile erreicht werden (Rondeau & Reeve et al. 1999; Reeve & Rondeau et al. 2000).

Ähnliche Untersuchungen zur Verarbeitung von Kohlenstofffasern werden an der *University of Nottingham* (Nottingham, Großbritannien) durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der mikrostrukturellen Parameter und deren Einfluss auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Laminare (Harper 2006, S. 2). Es wird gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften von der Homogenität abhängen (Harper & Turner et al. 2006a). Kürzere Fasern und dickere Laminare führen dabei zu einer besseren Homogenität und damit höheren mechanischen Eigenschaften (Harper

¹ Black, S. (2008), High-Volume Preforming for Automotive Application. <https://www.compositesworld.com/articles/high-volume-preforming-for-automotive-application> (zuletzt abgerufen am: 12.11.2020).

² Sherman, L. M. (2010), SRIM: Material, Machine & Process Innovations Give Birth to SRIM Truck Box. <https://www.ptonline.com/articles/srim-material-machine-process-innovations-give-birth-to-srim-truck-box> (zuletzt abgerufen am: 12.11.2020).

& Turner et al. 2006b). Die Bewertung der Homogenität in diesen Untersuchungen erfolgt auf Basis der Grauwertentwicklung entlang einer Linie einer Bildaufnahme (Harper 2006, S. 50) sowie der Gewichtsmessung von quadratischen Proben und Auftragen der Messwerte in einem 3D-Diagramm über die Preformfläche (Harper 2006, S. 52). Es wird außerdem der Einfluss der Filamentisierung der Fasern anhand verschiedener Rovings und einer im Spritzkopf pneumatisch induzierten Filamentisierung gezeigt. Die Filamentisierung bezeichnet in diesem Zusammenhang die Auftrennung des Rovings in die einzelnen Faserfilamente. Durch eine erhöhte Filamentisierung wird die Steifigkeit um 13 % und die Festigkeit um 55 % gesteigert. Allerdings nimmt mit steigender Filamentisierung der erreichbare Faservolumengehalt aufgrund des Loftings der Preforms ab (Harper & Turner et al. 2007). Weiterhin wird die gezielte Ausrichtung der Fasern mittels einer gerichteten Düse am Spritzkopf untersucht. Es wird gezeigt, dass dabei 94 % aller Fasern in einem Winkel von $\pm 10^\circ$ abgelegt werden können. Im Vergleich zu den Proben mit regellos abgelegten Fasern wird so die Steifigkeit um 206 % und die Festigkeit um 234 % erhöht (Harper & Turner et al. 2009).

(Fecher 2017) untersucht in seiner Dissertation am *Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)* an der *RWTH Aachen* ebenfalls die Homogenität und Faserorientierung im 3D-Faserspritzen. Für die Bestimmung der Homogenität werden hier 25 Proben in einem Raster entnommen, der lokale Faservolumengehalt errechnet und dieser in einem dreidimensionalen Diagramm über die Preformfläche dargestellt (Fecher 2017, S. 68). Die Untersuchungen zeigen, dass der Bahnversatz zur Erzeugung einer Überlappung der elliptisch geformten Einzelbahnen einen entscheidenden Einfluss auf die Homogenität hat. Ebenso wirkt sich eine erhöhte Ablagegeschwindigkeit aufgrund des Ein- und Auslaufverhaltens des Roboters und Schneidwerks negativ aus. Um dennoch hohe Ablagegeschwindigkeiten nutzen zu können, werden die Ein- und Auslaufzeiten in die Randbereiche des Preforms gelegt, was allerdings zu einem notwendigen Beschnitt an den Preform-Rändern führt (Fecher 2017, S. 66). Bei der Untersuchung der Faserorientierung werden die Prozessparameter Ablagehöhe, Ablagegeschwindigkeit, Spaltbreite der Faserleinheit, Eingangsdruck an der Venturidüse und der Preformaufbau untersucht (Fecher 2017, S. 77). Die Bewertung der Faserorientierung erfolgt anhand der Biegekennwerte, die mit einer Dreipunktbiegeprüfung ermittelt werden. Es wird gezeigt, dass eine Erhöhung der Ablagegeschwindigkeit und damit der Austragsrate einen signifikanten Einfluss auf die Faserorientierung hat und damit Anisotropieverhältnisse von

3:1 möglich sind. Die anderen Parameter müssen für eine robuste Prozessführung innerhalb ihrer definierten Grenzen liegen. Ihre Variation innerhalb dieser Grenzen hat allerdings lediglich einen geringen Einfluss auf die Faserorientierung.

Neben der Anwendung für die Fertigung von trockenen Preforms für die Verarbeitung in Harzinjektionsverfahren werden am IKV, der *University of Nottingham* und einem Konsortium aus der *Ford Motor Company* (Dearborn (MI), USA), dem *Oak Ridge National Laboratory* (Oak Ridge (TN), USA) und der *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (Lausanne, Schweiz) Verfahrensvarianten zur Fertigung thermoplastischer Preforms entwickelt. Die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten der thermoplastischen Preforms sind dabei vergleichbar mit denen glasmattenverstärkter Thermoplaste (GMT). Als Fasermaterial wird für diesen Prozess meist ein Hybridrovings aus Glasfaser mit Polypropylen verwendet. Die Konsolidierung der thermoplastischen Preforms erfolgt bevorzugt direkt bei der Preformherstellung im Faserspritzverfahren durch ein warmluftdurchströmtes Konsolidieroberwerkzeug (analog zur Binderaktivierung in Abbildung 2-3) oder einer Kompaktierwalze in Verbindung mit lokalem Aufheizen durch ein Heißluftgebläse (Hölzel 2003). Bei dickeren Bauteilen ist allerdings eine nachgelagerte Konsolidierung notwendig (Jespersen & Baudry et al. 2009). (Burn 2015) untersucht die Nutzung des Faserspritzverfahrens zur Herstellung von langfaserverstärkten Kohlenstofffaser/Polypropylen-FKV. Dabei werden die Kohlenstofffaserrovings als Vorbereitung mit einem Polypropylen-Pulver imprägniert (Harper & Burn et al. 2018).

Erste Ansätze zur Prozesssimulation des Faserspritzverfahrens werden in der Dissertation von (Harper 2006) erarbeitet. In der Simulation wird durch kinematisches Mapping die Faserablage auf einer Ebene stochastisch simuliert (Harper & Turner et al. 2006a). Die statistischen Größen der Faserablage werden durch Versuche bestimmt. Mit Hilfe der Simulation kann der Einfluss der Faserlänge, der Filamentanzahl des Rovings und der gewünschten Flächenmasse auf die Homogenität der Preforms abgeschätzt werden (Harper 2006, S. 61). (Patel 2013) entwickelt in seiner Dissertation ein Gesamtmodell für den Faserspritzprozess, welches durch die Verknüpfung des Faserablagemodells mit den Robotertrajektorien eine iterative Optimierung der Prozessparameter und Ablagepfade ermöglicht. Er erweitert dazu das Modell der Faserablage von (Harper 2006) und verallgemeinert es für den dreidimensionalen Fall. Zusätzlich wird eine Simulation der Luftströmung vom Spritzkopf zum Ablagewerkzeug durchgeführt und der Einfluss der Luftströmung auf das Flugverhalten der Rovingstücke modelliert. Aufgrund des hohen Rechenaufwands und mangelnder Validierungsmöglichkeit findet

die Strömungssimulation allerdings keine Anwendung in der Gesamtsimulation (Patel 2013, S. 114). Die Modellierung der abgelegten Faserstücke findet weiterhin in (Xiao 2018) Anwendung, wo die Permeabilität unter Berücksichtigung der Faserstruktur und des Binders untersucht wird.

Weitere Forschungsarbeiten fokussieren sich auf eine Integration zusätzlicher Funktionen während des Faserspritzverfahrens in den Preform. (Fecher 2017) zeigt, dass durch die Nutzung von Platzhaltergeometrien auf dem Ablagewerkzeug und einer angepassten Ablagebahn Durchbrüche in Bauteilen ohne zusätzlichen Verschnitt hergestellt werden können. Außerdem können durch Platzhalter in Einzelschichten Räume geschaffen werden, in welche Inserts manuell eingefügt werden können. Weiterhin wird gezeigt, dass die Integration von Versteifungsstrukturen in Form von Sandwichkernen möglich ist. (Xiao 2018) nutzt wasserlösliche Kerne zur Erzeugung von Hohlstrukturen in fasergeblasenen Preforms.

Um das Defizit der streuenden mechanischen Kennwerte fasergespitzter Preforms zu beheben, wird im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens iComposites 4.0 die Verstärkung der Preforms durch eine angepasste lokale Endlofaserablage erforscht. Hierzu werden die lokalen Flächengewichte und Faserorientierungen durch ein optisches Messsystem erfasst und einer Struktursimulation zugeführt. Ergeben die Ergebnisse der Struktursimulation ein Nicht-Einhalten der geforderten Eigenschaften, wird eine angepasste Endlofaserstruktur aus Towpregs autark gefertigt und mittels eines Drapierendeffektors auf dem fasergespitzten Preform platziert (Stender & Magura et al. 2019). Für die Bestimmung der lokalen Flächenmasse wurde eine Messtechnik auf Basis der Dickenmessung des Preforms mit einem Laserlichtschnittsensor entwickelt. Es wird gezeigt, dass die Preformhöhe in Abhängigkeit der Faserlänge und -orientierung mit dem lokalen Flächengewicht korreliert (Hopmann & Egger et al. 2018, S. 242).

2.3 Faserblasverfahren

Dieser Abschnitt stellt das Faserblasverfahren und die dafür notwendige Anlagentechnik vor. Weiterhin wird ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben.

2.3.1 Verfahrensübersicht

Das Faserblasverfahren (engl. *Fiber Injection Molding (FIM)*) ist ein Verfahren zur Herstellung von dreidimensional geformten Formteilen aus Fasern. Es wurde 2003 von

Egon Förster und seiner Firma *Fiber Engineering GmbH* (Karlsruhe) zum Patent angemeldet (Förster 2003). Der in dieser Patentschrift genannte Einsatzbereich der Faserformteile ist die Nutzung als Schalldämmteil, um Bauteile aus PU-Schaum zu substituieren. Die Herstellung von Preforms zur Fertigung von FKV-Bauteilen mit Hilfe des Faserblasverfahrens wurde erstmals ab 2014 im Forschungsvorhaben *HyPro* untersucht (Fleischer & Dackweiler et al. 2016).

Das Verfahren ist gekennzeichnet durch die in Abbildung 2-4 dargestellten vier Prozessschritte Faserbereitstellung, Formfüllung, Verpressen mit Binderaktivierung und der Formteilentnahme nach erfolgtem Kühlen. Die verwendete Anlagentechnik wird in Abschnitt 2.3.2 detaillierter vorgestellt. Das eigentliche Faserblasverfahren beginnt mit der Bereitstellung der Fasern. Es handelt sich dabei um bereits geschnittene Kurz- oder Langfasern, denen ein Binder beigemischt ist. Als Bindersysteme können sowohl thermoplastische Binder, meist in Form von sogenannten Bikomponenten-Fasern, oder duroplastische Systeme genutzt werden. Die Formfüllung erfolgt mittels einer oder mehrerer beweglicher Einblasdüsen in ein geschlossenes luftdurchlässiges Formwerkzeug (auch Einblasform genannt) bestehend aus einem Unterwerkzeug und einem Einblasoberwerkzeug. Die Höhe der durch Unter- und Einblasoberwerkzeug entstehenden Kavität legt dabei die lokale Menge an Fasern im späteren Faserformteil fest. Nach kompletter Füllung der Einblasform wird das Einblasoberwerkzeug durch ein Verpressoberwerkzeug getauscht und der Faserrohling verpresst. Das Verpressoberwerkzeug weist dabei die Geometrie des finalen Faserformteils auf, sodass in diesem Prozessschritt bereits die Endkontur erreicht wird. Durch den Geometrieunterschied von Einblasoberwerkzeug und Verpressoberwerkzeug können lokal unterschiedliche Dichten innerhalb des Faserformteils erzeugt werden. Die Aktivierung des Binders erfolgt durch das Durchströmen der Einblasform mit heißer Luft in Dickenrichtung des Faserformteils. Nach vollständiger Aktivierung des Binders wird kalte Luft auf gleichem Wege zur Abkühlung des Formteils durch die Einblasform geblasen. Abschließend erfolgt die Entnahme des endkonturnahen Faserformteils, welches keine weitere Besäumung erfordert.

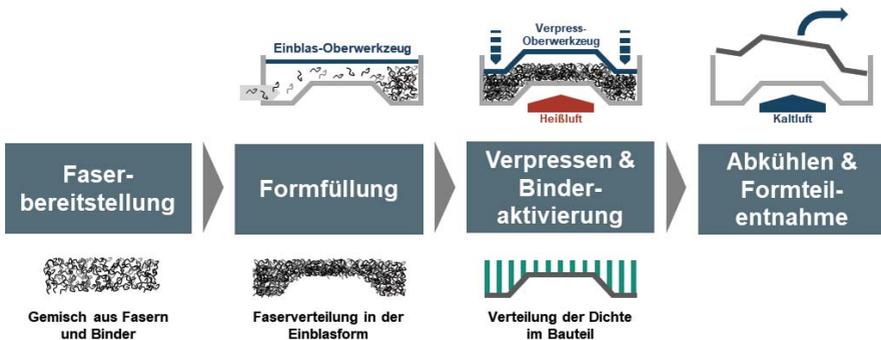


Abbildung 2-4: Verfahrensablauf des Faserblasverfahrens

Durch die Verwendung eines geschlossenen Formwerkzeuges, kann eine Materialeinsatzquote von nahezu 100 % erzielt werden. Da eine sehr gute Formgenauigkeit der Formteile erreicht wird, ist keine Besäumung notwendig. Das Faserblasen ist daher besonders ressourceneffizient (Korn & Reußmann 2017). Ein weiterer Vorteil des Verfahrens liegt in der großen Bandbreite an verarbeitbaren faserartigen Materialien³. Im Gegensatz zu den Faserspritzverfahren, in welchem Fasern von einem Roving geschnitten werden, können im Faserblasverfahren direkt Langfasern verarbeitet werden. Dies erlaubt den Einsatz von Recyclingfasern, z.B. aus Verschnittabfällen zur Herstellung halbzeugbasierter Endlosfaser-Preforms, oder natürlicher Fasern (Bose-Munde 2017).

Das Faserblasverfahren erlaubt außerdem die Herstellung dreidimensional geformter Formteile mit Durchbrüchen und Rippenstrukturen (Förster 2015). Ein besonderes Potential ergibt sich durch die bereits erläuterte Möglichkeit die Dichte des Formteils lokal zu variieren. Hierdurch können Eigenschaften gezielt eingestellt werden oder eine Reduzierung der Materialstärke in geringer belasteten Bereichen zur Erhöhung des Leichtbaupotentials erreicht werden.

Anwendung findet das Faserblasverfahren in der Herstellung von Faserformteilen zur Abdeckung eines Gurtaufrollers (Substitution eines PUR-Schaumteils), von Fahrzeugpolstern sowie von Bodenisolierungen für Automobile (Förster 2015). Eine Alternative

³ Fiber Engineering GmbH (2020b), FIM Technology, Fiber Engineering GmbH. <https://www.fiber-engineering.eu/FIBER-BLOWING-INJECTION/> (zuletzt abgerufen am: 12.11.2020).

Anwendung ist die Herstellung von biologisch abbaubaren Pflanztöpfen aus Hanf, Gräser oder Schilf (Neis-Beeckmann 2020).

2.3.2 Anlagentechnik

Einzigster Anbieter von Anlagen für das Faserblasverfahren ist die Firma *Fiber Engineering GmbH*, welche die Anlagen in Kooperation mit der Firma *Robert Bürkle GmbH* (Freudenstadt) plant und baut.

Hinsichtlich dem Layout der Anlagen wird zwischen Schiebetischanlagen und Drehkreisanlagen unterschieden⁴. Bei Schiebetischanlagen wird die Einblasform in die einzelnen Stationen für das Einblasen und Pressen linear verfahren. Die einzelnen Prozessschritte laufen daher sequentiell ab, woraus eine längere Taktzeit für die Fertigung eines Formteils resultieren. Drehkreisanlagen weisen vier Stationen für Einblasen, Pressen/Heizen, Abkühlen und Entnahme auf, welche auf einem rotierenden Drehtisch angebracht sind. Da in diesem Anlagenlayout die drei wertschöpfenden Prozessschritte parallel durchgeführt werden können, beträgt die Taktzeit lediglich ein Drittel der Gesamtdurchlaufzeit. Es können damit selbst bei großen Bauteilen Taktzeiten von 60 Sekunden erreicht werden (Förster 2015, S. 107).

Die Bestandteile einer Faserblasanlage können grob in die Faserbereitstellung/-aufbereitung, die Faserförderung, die Einblasdüsen, der Einblasform, sowie die Systeme zur Binderfaseraktivierung eingeteilt werden. Die Anlagenteile werden im Folgenden kurz erläutert.

Die Faseraufbereitung richtet sich nach der Bereitstellung der Fasern. Bei industriellen Faserblasanlagen wird das zu verarbeitende Fasermaterial meist als bereits geschnittene Fasern in Form von Ballen oder in sogenannten Big Packs der Anlage zugeführt. Aufgrund der Kompression der Fasern im Anlieferungszustand müssen diese vor dem Einblasen daher entsprechend aufbereitet werden. Hierfür werden Kardiermaschinen und Mischkammern, wie sie aus der Vliesherstellung bekannt sind, genutzt (siehe Abbildung 2-5). Die Kardiermaschinen bestehen aus sogenannten Walzenkrepeln mit einzelnen Spitzen, die die Fasern vereinzeln (Fuchs & Albrecht 2012). Durch die Übergabe einzelner Fasern der Faserballen zwischen den Walzen der Kardiermaschine, werden diese geöffnet. Nach dem Öffnen gelangen die Fasern in eine Mischkammer.

⁴ Fiber Engineering GmbH (2020a), Machines and molds, Fiber Engineering GmbH. <https://www.fiber-engineering.eu/FIBER-BLOWING-INJECTION/MACHINES/> (zuletzt abgerufen am: 12.11.2020).

Es handelt sich hierbei um einen Durchlaufmischer, der eine sequentielle Füllung bei gleichzeitiger Entnahme von Fasern in Richtung der Blasanlage ermöglicht. Der Transport der Fasern zur Einblasform erfolgt mittels großer Gebläse (meist Radialventilatoren). Die Anlagen besitzen eine Ringleitung für den Fasertransport, damit überschüssige Fasern bei vollständiger Formfüllung für den nächsten Einblasprozess genutzt werden können (Korn & Reußmann 2017).

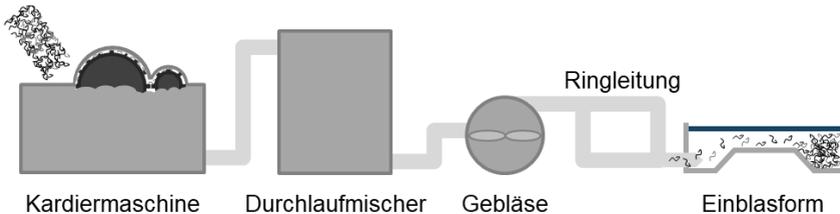


Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau einer Faserblasanlage

Das Formwerkzeug muss luftdurchlässig sein, damit die zum Transport der Fasern genutzte Luft entweichen kann. Das Unterwerkzeug besteht dabei meist aus Lochblech mit einer darunterliegenden Stützstruktur, während das Oberwerkzeug aus Lochblech oder Vollmaterial bestehen kann. Auf der Unter- und Oberseite ist jeweils noch ein Luftkasten angebracht, welcher die heiße Luft oder Dampf zur Binderaktivierung gleichmäßig verteilt (Dackweiler & Fleischer 2017). Das Einblasen der Fasern erfolgt über bewegliche Düsen. In Abhängigkeit der Formteilgeometrie können eine oder mehrere Düsen genutzt werden, welche entweder eine Linearbewegung oder eine Drehbewegung ermöglichen. Optional weist das Formwerkzeug auch Schieber auf, wodurch der Luftstrom geleitet werden kann oder zusätzliche Features im Formteil, z.B. Sollbruchstellen oder Durchbrüche, realisiert werden (Förster 2012). Das Formwerkzeug kann weiterhin einen Drucksensor nahe der Einblasdüse aufweisen, um den Staudruck während der Formfüllung zu messen. Gemäß des Patents von Förster kann durch den Druckwert die Dichte der eingeblasenen Fasern beeinflusst werden und der Einblasvorgang bei einem vorgegebenen Wert beendet werden (Förster 2003).

2.3.3 Forschungsarbeiten

Erste Forschungsarbeiten zur Nutzung des Faserblasverfahrens als Herstellungsverfahren für Preforms werden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Technologieent-

wicklung entlang der RTM-Wertschöpfungskette zur wirtschaftlichen Herstellung hybrider Bauteile“ (HyPro) am wbk Institut für Produktionstechnik in den Jahren 2014 bis 2016 durchgeführt. Dabei werden 350 x 350 mm große plattenförmige Preforms aus Glasfasern im Faserblasverfahren hergestellt und anschließend im RTM-Verfahren, sowie im Nasspressverfahren in einem Tauchkantenwerkzeug infiltriert. Die Analyse der Versuchsplatten erfolgte durch eine Sichtprüfung, sowie die Analyse der Proben im durchlichtverfahren zur Identifikation der Faserverteilung. Es wird gezeigt, dass die Inhomogenität der fasergeblasenen Preforms, welche aufgrund der ungleichmäßigen Anlagerung der Fasern in der Einblasform entsteht, eine Herausforderung für die Infiltration darstellt. Bei der Infiltration im RTM-Verfahren bilden Bereiche mit einer hohen Faserdichte Staustellen für den Harzfluss, was zu Lufteinschlüssen und nicht infiltrierten Bereichen im Bauteil führt. Bessere Ergebnisse können im Nasspressverfahren erzielt werden, da das Harz vor dem Schließen der Presse verteilt wird und die Infiltration in Dickenrichtung erfolgt (Fleischer & Dackweiler et al. 2016). Jedoch treten auch dort Lufteinschlüsse auf, wenn das Harz in die Randbereiche vordringt, bevor die Luft über die Tauchkante des Infiltrationswerkzeugs entweichen kann.

Weiterhin wird im Forschungsprojekt *HyPro* die Integration metallischer Lasteinleitungselemente (sog. Inserts) in fasergeblasene Preforms untersucht. Dabei werden zwei Prozessrouten zur Integration der Inserts während des Einblasvorgangs, sowie eine nachträgliche Einbringung in die Preforms betrachtet. Bei der Integration der Inserts bereits in der Einblasform wird festgestellt, dass sich in Einblasrichtung gesehen hinter dem Insert ein Einblasschatten mit einer geringeren Faserdichte ausbildet und die Faserorientierung am Staupunkt vor dem eingebrachten Inserts nicht lastgerecht ist (Dackweiler & Fleischer 2015). Für die nachträgliche Einbringung der Inserts in den Preform wird eine automatisierte Einbringvorrichtung zum Eindrehen eines speziellen Inserts mit Fanghaken entwickelt. Der Insert wird dabei in den Preform eingedrückt und anschließend drehmomentgesteuert eingedreht. Die Fanghaken ziehen die Fasern dabei über den Preforms, so dass eine gleichmäßige Verteilung der Fasern um den Preform entsteht (Fleischer & Dackweiler et al. 2016).

Im Forschungsprojekt „*Industrielle Produktion von 3D-Faserformteilen mit lokalen Endlosfaserverstärkungen zur Steigerung der Materialeffizienz“ (IP3D)* wird ein Ansatz zur automatisierten Ablage von lokalen Endlosfaserbändern auf fasergeblasenen Preforms entwickelt. Mittels Probekörper aus einem fasergeblasenen Kern und unidirektionalen

Kohlenstofffaser-Decklagen kann in Zugversuchen mit einer Steigerung der Zugfestigkeit um 410 % und des Elastizitätsmoduls um 210 % das Potential einer zusätzlichen Endlosfaserverstärkung gezeigt werden (Fleischer & Förster et al. 2015). Weiterhin wird das Prinzip anhand eines dreidimensional geformten Demonstrator-Bauteils validiert. Durch das Aufbringen von unidirektionalen Endlosfaserbändern entlang der Lastpfade wird die Verformung beim Aufbringen einer Testlast um 30% reduziert. Die für die Demonstrator-Bauteile gefertigten Preforms aus Glasfasern weisen eine große Schwankung des gemessenen Gewichts zwischen 450 g und 700 g auf. Die große Schwankung des Gewichts wird auf die Bildung von Faserknäuel in der Förderstrecke des Einblassystems und eine daraus resultierend ungleichmäßige Anlagerung der Fasern im Formwerkzeug zurückgeführt (Dackweiler & Fleischer 2017). Ähnlich wie im Forschungsprojekt *HyPro* führt dies bei der Infiltration der Preforms im Vacuum-Assisted-Resin-Infusion-(VARI)-Verfahren zu trockenen Stellen und Harztaschen.

Weitere Forschungsarbeiten zum Faserblasverfahren werden am *Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung* (Rudolstadt) durchgeführt. Zusammen mit der *BMW AG* (München) und *Johnson Controls* (Neuss) wird die Verarbeitung von Holzfasern anhand einer Türverkleidung untersucht. Zur thermischen Verfestigung, sowie Optimierung des Umform- und Förderverhaltens werden thermoplastische Fasern beigemischt (Bose-Munde 2017; Reußmann & Cierpka et al. 2015). Durch mehrere Einblasstudien mit Unterbrechen des Einblasprozesses und Öffnen des Einblaswerkzeugs zur manuellen Überprüfung der Faserverteilung wurde der Einblasvorgang optimiert. Die Füllung der Einblasform erfolgt dabei in mehreren Schritten mit einer Reduzierung der Luftgeschwindigkeit und Reduzierung der Fasermenge bei zunehmender Formfüllung (Reußmann & Cierpka et al. 2015).

2.4 Bewertung und Ableitung des Forschungsdefizits

Aus dem Stand der Forschung und Technik geht hervor, dass das Preforming zum einen ein qualitätsentscheidender Schritt für die Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Flüssigimprägnierverfahren ist, zum anderen 50 % der Bauteilkosten auf diesen Fertigungsschritt entfallen. Für die Herstellung von langfaserverstärkten Preforms, auf welchen der Fokus dieser Arbeit liegt, kommen die halbzeugbasierte Binder-Umform-Technik mit Vliesstoffen, das Faserspritzverfahren, sowie das Faserblasverfahren in Frage. Die drei Verfahren werden in Abbildung 2-6 gegenübergestellt und anhand von fünf Kriterien miteinander verglichen:

- Produktivität als das Verhältnis von Wertschöpfung zu geleistetem Aufwand zur Herstellung eines Teils
- In der Literatur beschriebenes Verständnis des Prozesses
- Flexibilität in der Wahl der zur Verarbeitung geeigneten Materialien
- Effizienz (=Nutzungsgrad) der während des Prozesses verbrauchten Materialien
- Qualität der hergestellten Preforms in Bezug auf die Anforderungen der nachfolgenden Infiltration

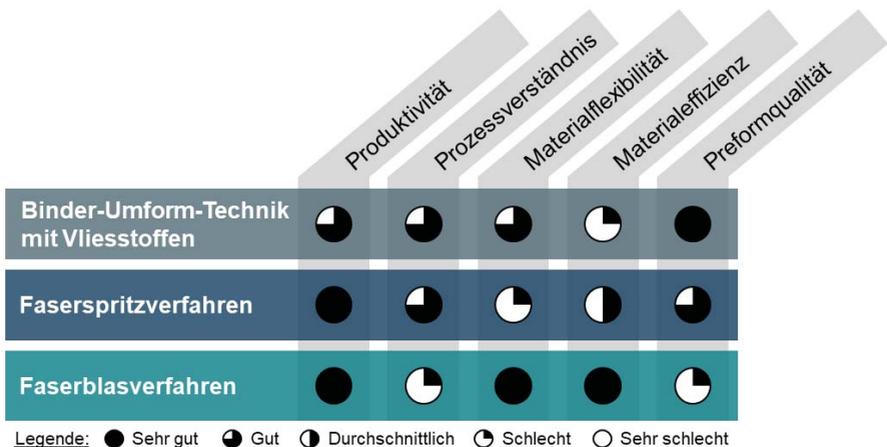


Abbildung 2-6: Bewertung der Verfahren zur Herstellung von langfaserverstärkten Preforms

Hinsichtlich der Bewertung der Preformqualität ist festzustellen, dass in keiner der bisherigen Arbeiten ein direkter Vergleich von mit unterschiedlichen Verfahren hergestellter Preforms erfolgt. Insbesondere die Bewertung der Faserverteilung erfolgt lediglich subjektiv auf Basis von Durchlichtaufnahmen (Harper 2006, S. 50; Fleischer & Dackweiler et al. 2016) oder punktuell gemessener Flächengewichte (Fecher 2017, S. 68), wodurch eine objektive absolute Bewertung der Preforms und eine Vergleichbarkeit zwischen den Arbeiten nicht gegeben ist.

Bei der halbzeugbasierten Herstellung von langfaserverstärkten Preforms mit der Binder-Umform-Technik werden wesentliche Bewertungskriterien bereits durch die Halbzeugherstellung beeinflusst. Bei der Vliesherstellung handelt es sich um ein sehr gut erforschtes und beherrschtes Verfahren, mit welchem Halbzeuge in hoher und gleichbleibender Qualität produktiv herstellbar sind. Aufgrund der sequentiellen Vorgehensweise bei der Binder-Umform-Technik ist die Produktivität im Vergleich zu den direkten Preformingverfahren deutlich geringer. Da durch das Zuschneiden der Halbzeuge ein hoher Anteil an Verschnitt anfällt, ist die Materialeffizienz des Verfahrens negativ zu bewerten.

Das Faserspritzverfahren bietet aufgrund der direkten Preformherstellung mit hohen Faseraustragsraten und der Möglichkeit der Binderaktivierung parallel zur Faserablage eine sehr gute Produktivität. Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten wird sowohl experimentell als auch modellbasiert ein gutes Prozessverständnis aufgebaut, sowie der Einfluss von Prozessparametern auf die resultierenden Eigenschaften der Preforms ermittelt. Es wird ebenfalls gezeigt, dass sich mit dem Verfahren Preforms mit gleichmäßiger Faserverteilung und gezielt ausgerichteten Fasern herstellen lassen (Fecher 2017; Harper 2006). Die endkonturnahe Ablage der Fasern erlaubt eine gute Materialeffizienz, wobei aufgrund der beschriebenen Einlaufeffekte ein Randbeschnitt notwendig ist (Fecher 2017, S. 66). Im Vergleich zu den anderen betrachteten Verfahren ist die Materialflexibilität als Defizit aufzuführen, da Endlosfaser-Rovings (bevorzugt Hybrid-Rovings, die bereits die Binderfaser enthalten), als Ausgangsmaterial eingesetzt werden.

Die Materialeinsatzquote im Faserblasverfahren beträgt nahezu 100 %, was eine deutliche Steigerung im Vergleich zu den alternativen Verfahren ist. Dies wird durch den Aufbau der Faserstruktur in einem geschlossenen Einblaswerkzeug und die Rückführung von Fasern in eine Ringleitung erreicht. Ein weiterer Vorteil besteht in der Verarbeitbarkeit einer Vielzahl an möglichen Fasermaterialien. Durch die direkte Nutzung

von Langfasern können die Materialkosten reduziert werden. Hinsichtlich der Produktivität wird das Faserblasverfahren durch die Parallelisierung der drei Hauptprozessschritte sehr gut bewertet. Wie im Stand der Forschung gezeigt wird, weisen im Faserblasverfahren hergestellte Preforms allerdings eine sehr ungleichmäßige Faserverteilung, welche im Folgenden als Homogenität bezeichnet wird, auf. Diese mangelnde Homogenität führt zu Problemen bei der nachgelagerten Infiltration (Fleischer & Dackweiler et al. 2016). Dieses Defizit ist auf das bisher nur eingeschränkt verfügbare Prozessverständnis zurückzuführen. Insbesondere sind die Einflüsse der Prozessparameter auf die resultierenden Eigenschaften der Preforms bisher nicht beschrieben.

Aus dem Vergleich der Verfahren zeigt sich, dass das Faserblasverfahren ein besonders hohes Potential für die ressourceneffiziente Herstellung von langfaserverstärkten Preforms aufweist. Um dieses Potential für die Preformherstellung nutzen zu können, müssen die aufgezeigten Defizite hinsichtlich des Prozessverständnisses und der Preformqualität gelöst werden. Für eine Reifmachung des Faserblasverfahrens für die industrielle Nutzung zur Herstellung von Langfaserpreforms ergibt sich daher der folgende Forschungsbedarf:

1. Erfassung der Prozessgrößen während der Formteilherstellung durch sensorische Überwachung zur Detektion der Wirkmechanismen im Einblasprozess.
2. Definition einer Metrik zur objektiven Bewertung der Homogenität von Langfaser-Preforms.
3. Identifikation der relevanten Einflussgrößen auf den Faserblasprozess. Insbesondere müssen die Wirkzusammenhänge zwischen den an der Anlage einstellbaren Parametern und den resultierenden Prozessparametern erfasst und deren Einfluss auf die Eigenschaften der hergestellten Preforms untersucht werden.
4. Optimierung des Faserblasverfahrens zum Erreichen einer höheren Reproduzierbarkeit und gleichmäßigerer Faserverteilung der hergestellten Preforms auf Basis des verbesserten Prozessverständnisses.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel erfolgen aufbauend auf den in Kapitel 2 herausgearbeiteten Forschungsdefiziten die Präzisierung der Zielsetzung sowie die Erläuterung der Vorgehensweise zum Erreichen ebenjener.

3.1 Zielsetzung

Dem aktuellen Stand der Forschung und Technik nach ist die Herstellung von Preforms im Faserblasverfahren einer sehr hohen Streuung unterworfen, was sich durch das stark schwankende Gewicht der Preforms äußert. Weiterhin sorgt eine ungleichmäßige Verteilung der Fasern in der Einblasform für eine mangelhafte Homogenität der Preforms. Ursächlich hierfür sind unter anderen die eingeschränkten Möglichkeiten zur Prozessüberwachung und das dadurch begrenzte Prozessverständnis. Die vorliegende Arbeit hat daher das Ziel einen Beitrag zur besseren Überwachung der Formfüllung und dem Aufbau von Prozesswissen für das Faserblasverfahren zu liefern sowie auf Basis dessen eine Prozessregelung zur Optimierung des Prozesses aufzubauen.

Für ein erweitertes Verständnis des Prozesses sollen die Wirkzusammenhänge zwischen den auf den Prozess wirkenden Einflüssen und den resultierenden Eigenschaften der Preforms systematisch erfasst werden. Hierfür müssen die für die Preformherstellung relevanten Einflussfaktoren identifiziert werden. Insbesondere die Zusammenhänge der an der Faserblasanlage einstellbaren Parameter (Anlagenparameter) und den sich daraus ergebenden auf den Prozess wirkenden Größen (wie z.B. die Einblasgeschwindigkeit) müssen quantitativ erfasst werden.

Für den Aufbau eines erweiterten Verständnisses der Preformherstellung ist eine Erfassung der während des Prozesses innerhalb der Anlage auftretenden Größen durch zusätzliche Sensorik notwendig. Es sollen daher geeignete Sensoren ausgewählt und implementiert werden, welche eine Überwachung der Formfüllung und der Verteilung der Fasern erlauben. Diese Prozessüberwachung soll außerdem als Messglied für die aufzubauende Regelung des Einblasprozesses dienen.

Für die Identifikation der Auswirkungen der Prozesseinflussgrößen auf die hergestellten Preforms, müssen außerdem deren Eigenschaften objektiv bewertet werden. Es soll hierzu eine Methodik erarbeitet werden, welche auf Basis von Durchlichtaufnahmen der Preforms eine zerstörungsfreie Charakterisierung der Homogenität in Form eines ein-

dimensionalen Homogenitätsindex zum Vergleich der fasergeblasenen Preforms untereinander und mit anderen Langfaserpreforms ermöglicht. Zusätzlich soll die Faserorientierung der Preforms mit Hilfe der Durchlichtaufnahmen bestimmt werden.

In einer anschließenden experimentellen Untersuchung sollen die Anlagenparameter systematisch variiert werden. Hiermit soll deren Einfluss auf die Formfüllung und die resultierenden Eigenschaften der Preforms erfasst und die resultierenden Wirkzusammenhänge beschrieben werden. Auf Basis der identifizierten Wirkzusammenhänge wird dann eine Regelung des Einblasvorgangs aufgebaut. Ziel dieser Einblasregelung ist es, den prozessbedingt inkonstanten Faservolumenstrom auszugleichen und reproduzierbare gleichmäßige Preformeigenschaften zu erreichen.

3.2 Vorgehensweise

Das Vorgehen zum Erreichen der in Abschnitt 3.1 genannten Ziele der vorliegenden Arbeit ist in die in Abbildung 3-1 dargestellten Schritte eingeteilt. Diese Schritte werden im Folgenden genauer erläutert.

Zuerst erfolgt eine Analyse des Faserblasverfahrens, welche als Grundlage für die weiteren Schritte dient. Hierfür wird zuerst im Kapitel 4.1 die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte und benutzte Anlagentechnik für das Faserblasverfahren vorgestellt. Anschließend erfolgt in Kapitel 4.2 eine Analyse des Prozessablaufs im Faserblasverfahren anhand eines relationsorientierten Funktionsmodells. Hierdurch werden die wesentlichen Funktionen und deren Zusammenhang identifiziert. Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse der prozessspezifischen Einflussgrößen auf den Einblasvorgang. Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflussgrößen werden experimentell oder analytisch bestimmt und mathematisch beschrieben (Kapitel 4.3).

In Kapitel 5 wird die Entwicklung und Integration eines Systems zur Überwachung des Einblasvorgangs erläutert. Hierzu erfolgt zuerst die systematische Auswahl einer geeigneten Sensorik für die definierte Überwachungsaufgabe (Kapitel 5.1). Anschließend erfolgt die Integration der ausgewählten Kamera in die Einblasform und die Entwicklung der notwendigen Bildverarbeitung (Kapitel 5.2). Für die Detektion der Faserfront durch Bildverarbeitung werden mehrere Methoden zur Segmentierung implementiert und deren Eignung untersucht. Mittels einer abschließenden Validierung in Kapitel 5.3 wird die geeignetste Methode ausgewählt und das Prozessüberwachungssystem validiert.

Auf Basis von mit Hilfe der in der Einblasform integrierten Kamera aufgenommenen Durchlichtaufnahmen können die Preforms charakterisiert werden. In Kapitel 6.1 werden hierzu Methoden zur Bewertung der Homogenität untersucht und deren Eignung für fasergeblasene Preforms anhand von simulierten und realen Durchlichtbildern bewertet, um abschließend eine geeignete Methode auszuwählen. Zusätzlich werden Methoden zur Bestimmung der Faserorientierungsverteilung und der lokalen Faserorientierung der Preforms entwickelt und validiert (Kapitel 6.2).

Mittels einer experimentellen Untersuchung des Einblasprozesses in Kapitel 7 werden die Wechselwirkung zwischen den Einblasparametern und den Eigenschaften der fasergeblasenen Preforms bestimmt. Hierzu werden aufbauend auf die Analyse aus Kapitel 4.3 die Einflussparameter ausgewählt und die Zielgrößen definiert, sowie eine statistische Versuchsplanung (DoE) durchgeführt (Kapitel 7.1). Gemäß des Versuchsplans werden in einer Parameterstudie Preforms hergestellt und mit Hilfe der im Kapitel 6 entwickelten Methoden deren Eigenschaften bestimmt (Kapitel 7.2). In Kapitel 7.3 erfolgen die Darstellung der Ergebnisse der Parameterstudie, sowie eine Bewertung des Einflusses der untersuchten Parameter auf die Preformeigenschaften.

In Kapitel 8 wird die Faserblasanlage um eine Regelung des Einblasprozesses erweitert. Dazu erfolgen zuerst eine systemtechnische Beschreibung der Regelungsaufgabe und die Definition der Grundstruktur des Regelkreises (Kapitel 8.1). Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 8.2 der Entwurf von Regelungsstrategien. Diese werden dann in der Steuerungsarchitektur der Anlage implementiert. Die Validierung der Regelung erfolgt durch die Herstellung von Preforms unter Nutzung der Regelung und Vergleich mit den in der zuvor durchgeführten Parameterstudie hergestellten Preforms. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Regelung in Bezug auf die definierten Ziele.

Die Ergebnisse der Arbeit werden in Kapitel 9 zusammengefasst und ein Ausblick auf das weitere Forschungspotential gegeben.

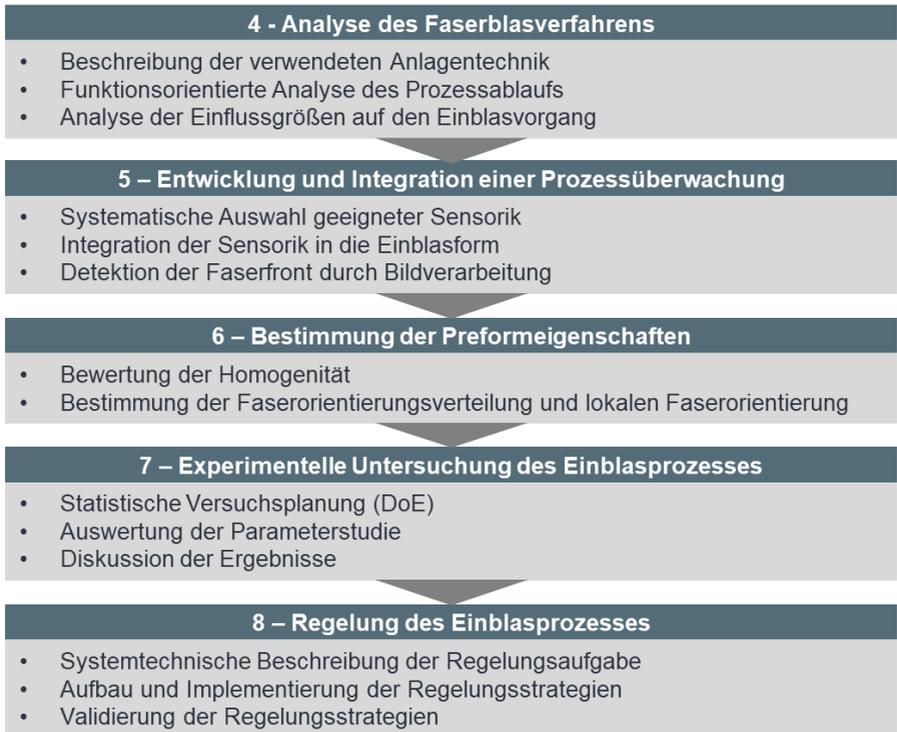


Abbildung 3-1: Schrittweises Vorgehen zum Erreichen der formulierten Zielstellung

4 Analyse des Faserblasverfahrens

Um die zuvor genannten Ziele mit der erläuterten Vorgehensweise zu erreichen, muss zunächst eine geeignete Anlagentechnik zur Durchführung der Versuche entwickelt und aufgebaut werden. Im vorliegenden Kapitel wird die im Rahmen der Dissertation weiterentwickelte und aufgebaute Faserblas-Versuchsanlage vorgestellt. Anschließend wird der Prozessablauf analysiert, um die Schwachstellen im Prozessablauf zu identifizieren. Darauf aufbauend werden weiterhin die Einflussgrößen auf den Faserblasprozess analysiert, detailliert beschrieben und ein geeignetes Prozessfenster definiert.

4.1 Versuchsanlage für das Faserblasverfahren

Voraussetzung für das Faserblasverfahren ist eine entsprechende Anlagentechnik, deren grundsätzlicher Aufbau in Abschnitt 2.3.2 erläutert wird. Solche Anlagen werden aktuell lediglich durch die Firma *Fiber Engineering GmbH* (Karlsruhe) konstruiert und vertrieben. Diese Anlagen sind für die Fertigung von Bauteilen in Klein- bis hin zu Großserien konzipiert, weshalb diese für die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Versuche mit Fokus auf den Einblasprozess überdimensioniert sind. Insbesondere die Anlagenteile zur Faserbereitstellung und –aufbereitung bedürfen einem hohen Investitions- und Platzbedarf, wobei die Faserstärke und –länge auf die durch Zulieferer verfügbaren Schnittfasern limitiert ist ohne diese direkt selbst variieren zu können.

Ein weiteres Defizit der kommerziellen Anlagen in Hinblick auf die Versuchsarbeiten in der universitären Forschung ist die Dimension der Formwerkzeuge und die damit einhergehende hohe erforderliche Leistung für die Aufheizsysteme zur Binderaktivierung sowie der Materialbedarf. Aufgrund der genannten Nachteile, ist daher der Aufbau einer Faserblas-Versuchsanlage zur Durchführung der hier vorgestellten Untersuchungen notwendig, welche sich an den Anforderungen des Versuchsbetriebs im Forschungsumfeld orientiert. Eine einfache Faserblas-Versuchsanlage wurde bereits in (Herrig 2017) aufgebaut. Diese kann allerdings die Anforderungen, welche aus der geplanten Zielstellung hinsichtlich der Parametervariation und der Prozessbeeinflussung resultieren, nicht bedienen. Um die in Kapitel 3.1 genannten Ziele zu erreichen wird daher in der angeleiteten Masterarbeit (A_Ongom-Along 2019) systematisch eine Weiterentwicklung der Faserblas-Versuchsanlage durchgeführt und diese neu aufgebaut. In den folgenden Abschnitten werden die Anforderungen an diese Anlage und deren konstruktive Umsetzung beschrieben.

4.1.1 Anforderungen

Das Hauptziel des Aufbaus der Faserblas-Versuchsanlage besteht in der Erhöhung der Freiheitsgrade für den Faserblasprozess, sowie der Skalierung der Prozesstechnik für den Laboreinsatz. Um die an die Faserblas-Versuchsanlage gestellten Anforderungen eindeutig zu definieren, zu kategorisieren und zu priorisieren werden diese in einer Anforderungsliste nach (Feldhusen & Grote 2013, S. 321–324) zusammengefasst. Die Anforderungen werden daher in Fest- und Wunschanforderungen (F/W) eingeteilt und die Wunschanforderungen mittels eines Gewichtungsfaktors priorisiert. Tabelle 4-1 zeigt einen Ausschnitt aus der Anforderungsliste. Die vollständige Anforderungsliste ist in Tabelle 0-1 im Anhang zu finden.

Tabelle 4-1: Ausschnitt aus Anforderungsliste für Neukonstruktion der Faserblas-Versuchsanlage (A_Ongom-Along 2019)

Nr.	Anforderung	F/W	Kategorie
1	Bauraum FIM Zelle	F	Allgemein
2	Faseransammlungen innerhalb des Prozesses vermeiden	F	Prozess
3	Homogener Fasereintrag in die Einblasform	F	Prozess
4	Faserförderwege kurz halten	F	Prozess
5	Verschiedene Press/Einblasoberwerkzeuge	F	Einblasform
6	Frei programmierbare Industriesteuerung	F	Steuerung

Die Hauptanforderung ist die Verarbeitung von Fasern mit variablen Faserlängen und einer guten Steuerbarkeit der Fasermenge. Im Gegensatz zum vorliegenden Stand der Technik sollen die Fasern daher direkt von einem Endlosfaser-Roving geschnitten werden, wodurch die Auswahl an zu verarbeitenden für die Verwendung als Preform relevanten Fasern deutlich erweitert wird. Weiterhin sollen die Förderwege möglichst kurz gehalten werden, damit die Bildung von Faserknäuel reduziert wird. Eine wesentliche Anforderung ist die Steuerung der Anlage über eine frei programmierbare industrietaugliche Steuerung, welche eine genaue Einstellung der Maschinenparameter, die Realisierung der Regelung und die Aufzeichnung relevanter Prozessdaten erlaubt.

4.1.2 Konstruktive Umsetzung

Die in Abschnitt 4.1.1 an die Faserblas-Versuchsanlage definierten Anforderungen werden in die in Abbildung 4-1 abgebildete Konstruktion überführt. Die Versuchsanlage besteht dabei aus zwei Teil-Anlagen: ein Faserschneidwerk der Firma *MAG IAS GmbH* (Mosbach-Diedesheim; heute *FFG Europe & Americas*) für die Bereitstellung geschnittener Fasern und dem eigentlichen Einblassystem, welche im Rahmen der angeleiteten Masterarbeit (A_Ongom-Along 2019) auf Basis der Anforderungen konzipiert, konstruiert und aufgebaut wird.

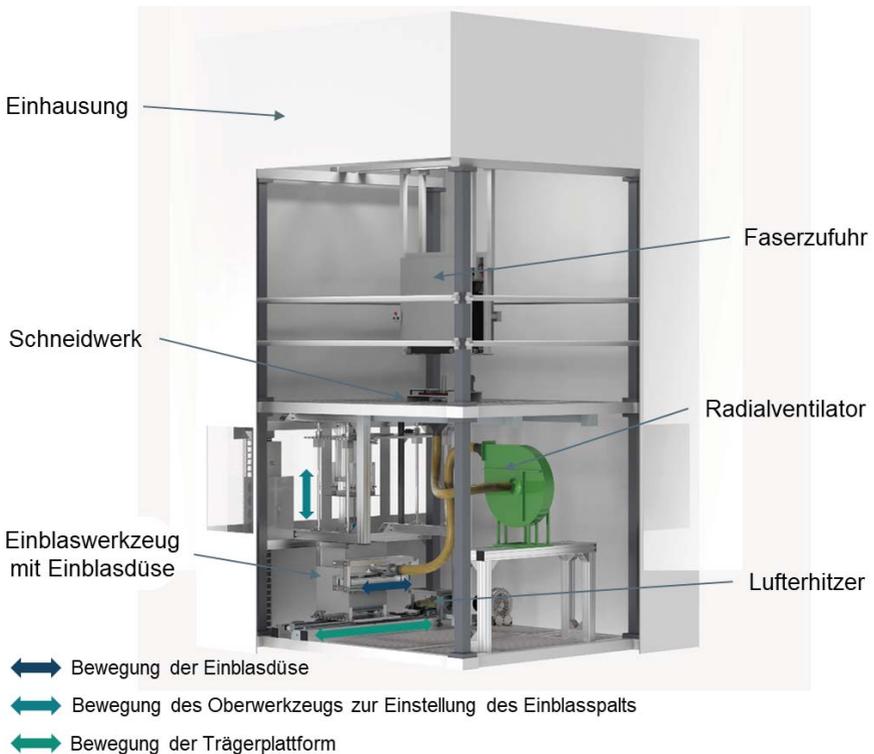


Abbildung 4-1: Übersichtsdarstellung der Faserblas-Versuchsanlage am wbk (gerenderte Darstellung)

Die gesamte Versuchsanlage befindet sich in einer Einhausung mit den Abmessungen 2700 x 3050 x 5050 mm, um die Verteilung von Fasern im gesamten Technikum zu verhindern. Die einzelnen Teilsysteme werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Die Faserbereitstellung erfolgt über das Faserschneidwerk, durch welches die Fasern mit einstellbarem Faservorschub auf eine definierbare Länge geschnitten werden. Das Funktionsprinzip des Schneidwerks ist in Abbildung 4-2 (a) dargestellt. Der Abzug des Rovings von der Rovingspule erfolgt über ein umlaufendes Förderband, welches den Roving über eine Rolle mit definiertem Vorschub fördert und über Zuführröhrchen in Richtung des Schneidwerks transportiert. Druckluftdüsen am Ende der Zuführröhrchen erzeugen durch den Venturi-Effekt eine Luftströmung, welche den Roving auf Spannung hält. Der eigentliche Schneidkopf besteht aus einem Rotor mit zwei Klingen in gegenüberliegender Ausrichtung, sowie einem statischen Teil mit zwei Klingen (siehe Abbildung 4-2 (b)). Die Trennung der Fasern erfolgt durch einen Scherschnitt zwischen der statischen und der rotierenden Klinge. Unterhalb des Schneidwerks befindet sich ein Trichter, in welchen die Fasern durch die Druckluft ausgestoßen werden und welcher den Übergang zum Faserfördersystem darstellt.

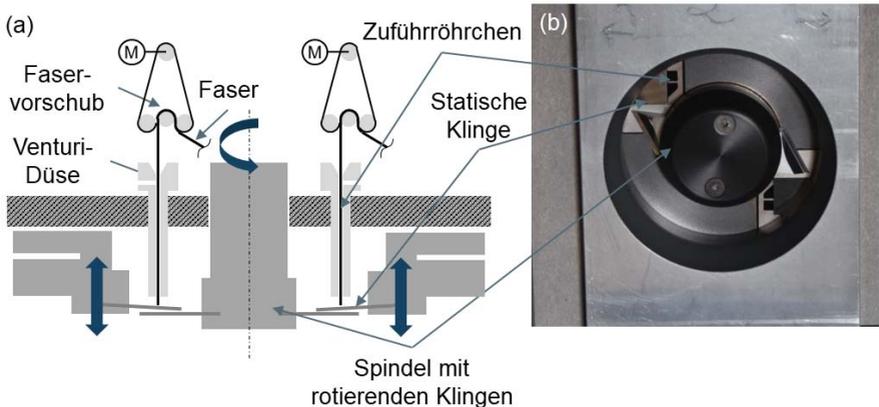


Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip des Faserschneidwerks (a) und Detailansicht des Schneidkopfes (b)

Die Faserförderung erfolgt durch einen Radialventilator vom Typ *TF 561/B* der Firma *Konz-Lufttechnik GmbH* (Steinheim) mit einem Fördervolumen von max. 1320 m³/h bei einer max. Drehzahl von 2910 U/min, welcher die Fasern vom Trichter am Schneidwerk

auf Nabenhöhe einsaugt und durch einen Auslass am oberen Umfang weiterfördert. Die Förderwege sind durch Schläuche mit einem Innendurchmesser von 85 mm ausgeführt. Der Übergang zum Förderschlauch am Ventilatorausgang ist durch ein additiv gefertigtes Übergangsstück strömungsgünstig ausgeführt, um Verstopfungen in diesem Bereich zu vermeiden. Ebenfalls ist am Übergang des Förderschlauches zur Düse ein additiv gefertigtes Adapterstück, um einen strömungsgünstigen Übergang ohne Stoßkante zu schaffen. Die Förderschläuche sind möglichst kurz und ohne enge Krümmungen gehalten, um eine störungsfreie Faserförderung zu begünstigen.

Für die im Rahmen dieser Dissertation geplanten Versuche wird aufgrund der grundlagenorientierten Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern und den Preformeigenschaften eine sehr einfache Geometrie gewählt. Die Standard-Versuchseinblasform für die Untersuchungen des Einblasprozesses ist daher für die Fertigung quadratischer Preforms mit einer Grundfläche von 400 x 400 mm konstruiert. Die zweiteiligen Einblasformen, bestehend aus Unter- und Oberwerkzeug, sind aus einer Rahmenkonstruktion mit Alu-Profilen und Wandungen aus Lochblech aufgebaut. Das Unterwerkzeug ist in der Faserblas-Versuchsanlage auf einer horizontal beweglichen Trägerplattform (siehe Abbildung 4-1) montiert, durch welche es mittels eines Riementriebs von einer gut erreichbaren Grundstellung (zur Entnahme des Preforms) auf eine Einblas- und Verpressposition gefahren werden kann. Das Oberwerkzeug ist an einer durch einen Kugelgewindetrieb vertikal beweglichen Hubeinheit befestigt, womit die Einblasform geöffnet und definierte Einblas-/Verpressspalten angefahren werden können.

Aufgrund der Geometrie der Einblasform wird eine sich linear entlang einer Stirnseite bewegende Einblasdüse gewählt. Die Einblasdüse besteht aus einem oval geformten Rohrstück, welches mittels einer riemengetriebenen Linearachse vom Typ *EGC-80-550-TB-KF* der Firma *Festo Vertrieb GmbH & Co. KG* (Esslingen) durch einen Schrittmotor vom Typ *AS1050-0120* der Firma *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG* (Verl) mit integriertem Inkremental-Encoder bewegt werden kann. An der Düse ist ein Abschlussblech montiert, welches die Einblasform beim Verfahren der Düse seitlich abschließt und zusätzlich auf Lineareinheiten geführt ist (siehe Abbildung 4-3). Die gesamte Einblasdüse ist als Modul ausgeführt und kann an verschiedene Formwerkzeuge montiert werden.

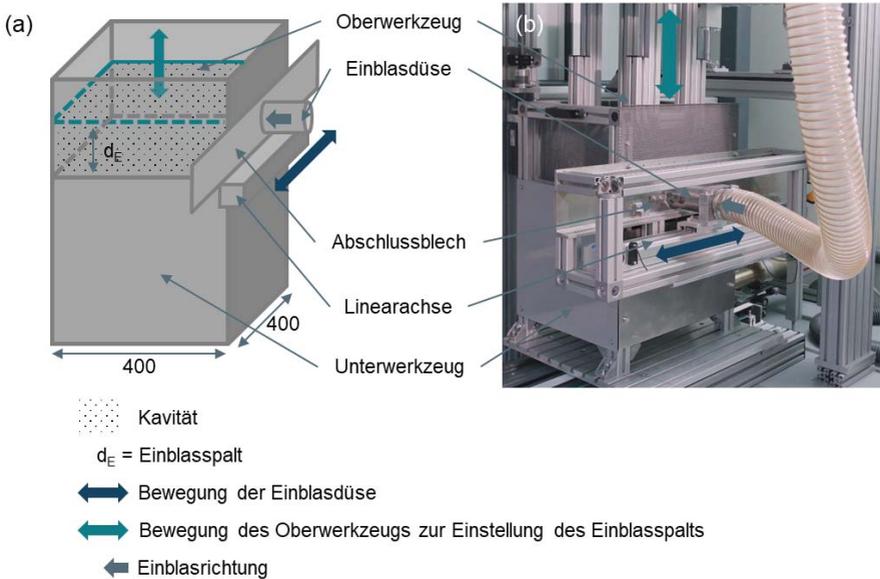


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Einblasform mit beweglicher Lineardüse (a) und Einblasform in der Einbauposition in der Faserblas-Versuchsanlage (b)

Zur Aktivierung des thermoplastischen Binders mittels Heißluft besitzt das Unterwerkzeug einen Luftanschluss durch welche heiße Luft von unten durch den Preform geleitet wird. Die Heißluftherzeugung erfolgt durch ein Heißluftgebläse vom Typ *LHS 61L* der Firma *Leister Technologies AG* (Kägiswil, Schweiz) in Verbindung mit einem Radialventilator vom Typ *G90L2* desselben Herstellers, womit Heißluft bis 650°C erzeugt werden kann.

Für die Steuerung der Anlage kommt eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) vom Typ *CX5130-0135* der Firma *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG* (Verl) zum Einsatz. Über Ein- und Ausgangsmodule sind die Eingangs- und Ausgangssignale der Aktoren und Sensoren mit der Steuerung verknüpft. Durch die Nutzung von Antrieben desselben Herstellers können diese ebenfalls direkt über den Feldbus *EtherCAT* in die Steuerung eingebunden werden. Die Projektierung und Programmierung der Steuerung und Antriebe erfolgt mit dem Softwaresystem *TwinCAT 3* der *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG* entsprechend der Norm *IEC 61131-3*. Für die Steuerung der Anlage

sind die Betriebsarten Handbetrieb und Automatik implementiert. Der Handbetrieb erlaubt die einzelne Ansteuerung jedes Aktors. In der Betriebsart Automatik erfolgt ein automatischer Ablauf der Prozessschritte Einblasen, Verpressen, Aufheizen, Abkühlen und Bauteilentnahme, wobei die einzelnen Prozessschritte an- und abwählbar sind, um auch lediglich Teilschritte automatisiert ablaufen zu lassen. Die einzelnen Prozessschritte sind dabei nach dem Prinzip einer service-orientierten Steuerung (Moll & Schäfer et al. 2019a) als einzelne Services implementiert. Ein Bildschirm mit einer graphischen Benutzeroberfläche (engl. *Human Machine Interface (HMI)*) außerhalb der Einhausung erlaubt die Bedienung und Überwachung der Anlage.

4.2 Analyse des Prozessablaufs

Unter Berücksichtigung der anlagentechnischen Gegebenheiten der Faserblas-Versuchsanlage wird in diesem Abschnitt der Prozessablauf detailliert analysiert und anhand von Funktionen formalisiert. In Anlehnung an (Graf 2017) wird hierfür ein modifiziertes relationsorientiertes Funktionsmodell angewandt, mit Hilfe dessen im Gegensatz zu anderen Modellierungsansätzen verstärkt die Beziehungen der Funktionen untereinander analysiert und beschrieben werden. Ziel dieser Analyse ist die Identifizierung von Systemzusammenhängen und Schwachstellen im Prozessablauf.

Für die Analyse wird der Prozessablauf in singuläre Prozessschritte zerlegt, welche durch Funktionen beschrieben werden. Eine Funktion ist dabei „eine zweckorientierte, lösungsneutrale, als Operation beschriebene Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems“ (Lindemann 2009, S. 331) und wird „durch die Kombination eines Substantivs mit einem Verb beschrieben“ (Lindemann 2009, S. 331). Im Rahmen der hier angewandten Analyse wird zwischen schädlichen Funktionen und nützlichen Funktionen unterschieden. Als schädliche Funktion werden dabei Funktionen im Prozess klassifiziert, die unerwünscht sind und den reibungslosen Prozessablauf behindern. Diese sind daher zu eliminieren bzw. zu vermeiden, was das Einfügen weiterer Funktionen bedingt. Die Kausalitätsbeziehungen der Funktionen untereinander werden mit Hilfe der Teilbefehle „wird benötigt für“, „verursacht“ und „wurde eingefügt, um zu vermeiden“ beschrieben (Ponn & Lindemann 2011, S. 75). Ein Ausschnitt des Funktionsmodells ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Das vollständige Funktionsmodell ist in Abbildung 0-1 im Anhang zu finden.

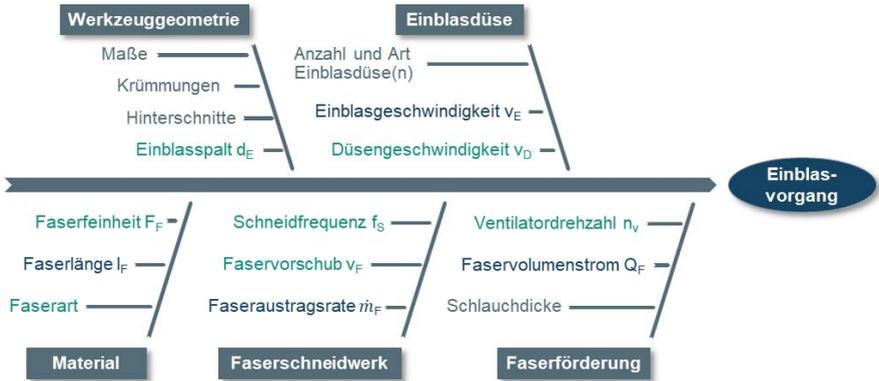
großen Querschnitt und einer strömungsgünstigen Ausgestaltung der faserführenden Leitungen erreicht. Zum anderen werden Prozesseinstellungen genutzt, bei welchen die Wahrscheinlichkeit einer Blockade geringer ist. Auf diese sogenannten prozesssicheren Einstellbereiche wird in Abschnitt 4.3 näher eingegangen.

Eine weitere schädliche Funktion bei der Zufuhr von Fasern ist das Überfüllen der Kavität. Durch das Überfüllen der Kavität kommt es zum einen zu Schwankungen des Gewichts der Preforms und zum anderen zu einer Kompression der Fasern in Bereichen nahe der Einblasdüse, was folglich zur schädlichen Funktion „Inhomogen füllen“ führt.

Die Betrachtung der Relationen der Funktionen untereinander, zeigt die Ursachen für die schädlichen Funktionen im Faserblasverfahren. Für das übergeordnete Ziel der Verbesserung der Eigenschaften fasergeblasener Preforms und Steigerung der Reproduzierbarkeit wird daher der weitere Fokus auf die detaillierte Betrachtung des Einblasvorganges gelegt.

4.3 Analyse der Einflussgrößen auf den Einblasvorgang

Für die detaillierte Betrachtung des Einblasvorganges werden die prozessspezifischen Einflussfaktoren mit Hilfe eines angepassten Ishikawa-Diagrammes identifiziert und transparent dargestellt. Ziel des Ishikawa-Diagrammes ist die systematische Analyse der Kausalzusammenhänge zwischen Ursache und Wirkungen der prozessspezifischen Einflussgrößen auf einen Prozess. Die Analyse der Einflussfaktoren bildet außerdem die Grundlage für die Auswahl der zu untersuchenden Einflussgrößen und deren Variationsbereich für die experimentelle Untersuchung des Einblasvorganges in Kapitel 7. Abbildung 4-5 zeigt die identifizierten Einflussgrößen auf den Einblasprozess in einem Ishikawa-Diagramm.

Legende:

Feste Einflussgrößen Einstellbare Einflussgrößen Abhängige Einflussgrößen

Abbildung 4-5. Prozessspezifische Einflussgrößen auf den Einblasvorgang im Faserblasverfahren

Die Einflussgrößen werden entsprechend der Zuordnung zu den Anlagenteilen kategorisiert. Zusätzlich sind Einflussgrößen durch das zu verarbeitende Fasermaterial gegeben. Die Einflussgrößen können weiterhin folgendermaßen eingeteilt werden:

- Feste Einflussgrößen sind nicht veränderbar und durch die Konstruktion der Anlage oder die Geometrie des Preforms vorgegeben.
- Einstellbare Einflussgrößen sind durch die Wahl des Materials oder durch das direkte Ändern von Parametern an der Anlagensteuerung einstellbar.
- Abhängige Einflussgrößen stehen in einem direkten Zusammenhang zu einstellbaren Einflussgrößen, welcher entweder analytisch beschrieben werden kann oder experimentell ermittelt werden muss.

Die wichtigsten prozessspezifischen Einflussgrößen auf den Einblasvorgang und deren kausale Zusammenhänge werden zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen an dieser Stelle erläutert.

Die **Geometrie der Einblasform** ist abhängig von der Geometrie des Bauteils und eventuell gewünschter Dichteviationen. Hiervon hängen außerdem die **Art und Anzahl der Einblasdüsen** ab. Die hier vorgestellten Untersuchungen werden mit einem

quadratischen Probekörper mit 400 x 400 mm Kantenlänge durchgeführt. Der **Einblasspalt** d_E ist definiert durch den Abstand des Bodens des Unterwerkzeugs vom Oberwerkzeug (siehe Abbildung 4-3 (a)) und ist in der Maschinensteuerung stufenlos einstellbar. Der minimal einstellbare Einblasspalt ist limitiert durch den Durchmesser der Einblasdüse und beträgt 80 mm, wohingegen das obere Limit des Einblasspalts durch die Höhe des Unterwerkzeugs gegeben ist.

Das verarbeitete **Material** (Strukturfasern und Binderfasern) wirkt sich ebenfalls auf den Einblasprozess aus. Das verwendete Schneidwerk erlaubt das Schneiden mehrerer Rovings, wodurch eine Steigerung der Faseraustragsrate auch durch die parallele Zufuhr mehrerer Rovings möglich ist. Durch die **Faserfeinheit** F_F (Titer) und Anzahl der zugeführten Rovings wird direkt die Faseraustragsrate beeinflusst (siehe Formel 4-1).

Der **Faservorschub** v_F bezeichnet die Länge eines Rovings, die pro Zeiteinheit dem Schneidwerk zugeführt wird, und kann in der Steuerung des Schneidwerks eingestellt werden. Der Roving wird durch ein umlaufendes Band zwischen Förderwalzen gefördert, welche durch einen Servomotor angetrieben werden (vgl. Abbildung 4-2 (a)). Der Faservorschub entspricht dabei der Umlaufgeschwindigkeit des fördernden Bands. Der durch das Schneidwerk mögliche Faservorschub reicht bis 8000 mm/s. Die im Rahmen der angeleiteten Bachelorarbeit (A_Fricke 2019, S. 47-50) durchgeführten Versuche zur Bestimmung des nutzbaren Prozessfensters des Schneidwerks zeigen jedoch, dass Faservorschübe von mehr als 2000 mm/s zu regelmäßigen Blockaden des Einblassystems führen.

Die **Faseraustragsrate** \dot{m}_F ist als die Menge an Fasern, die pro Zeiteinheit durch das Schneidwerk geschnitten und ausgestoßen wird, definiert. Durch die kontinuierliche Arbeitsweise des Schneidwerks kann die Faseraustragsrate bei stationärem Betrieb als konstant angesehen werden. Die Faseraustragsrate \dot{m}_F hängt von der Feinheit F_F der verarbeiteten Fasern, deren Anzahl n und dem Faservorschub v_F ab und ist durch folgende Formel gegeben:

$$\dot{m}_F [g/min] = n * \frac{F_F [tex]}{10^6} * v_F [mm/s] * 60 \quad \text{Formel 4-1}$$

Von der Faseraustragsrate ist der **Faservolumenstrom** Q_F zu unterscheiden. Der Faservolumenstrom bezeichnet die Menge an Fasern pro Zeiteinheit, welche an der Einblasdüse in die Einblasform eingepulst wird. Aufgrund der angesprochenen Bildung

von Faserknäuel ist der Faservolumenstrom inkonstant und entspricht lediglich bei Mittelung über einen längeren Betrachtungszeitraum der Faseraustragsrate.

Die **Schneidfrequenz** f_S ist die Anzahl der Umdrehungen der Schneidspindel mit den rotierenden Klingen im Schneidkopf pro Sekunde und kann an der Anlagensteuerung eingestellt werden. Aufgrund der zwei Klingen an der Schneidspindel wird der zugeführte Roving pro Umdrehung zwei Mal geschnitten. Von der Schneidfrequenz f_S und dem Faservorschub v_F hängt daher die **Faserlänge** l_F der geschnittenen Fasern folgendermaßen ab:

$$l_F [mm] = \frac{v_F [mm/s]}{2 * f_S [Hz]} \quad \text{Formel 4-2}$$

Mittels experimenteller Untersuchungen werden im Rahmen der angeleiteten Arbeit (A_Fricker 2019) die Schnittqualität des Schneidwerks und die sich daraus ergebende Faserlängenverteilung bestimmt. Hierzu wird die Schneidfrequenz schrittweise von 5 Hz bis 20 Hz variiert und der notwendige Faservorschub für eine Zielfaserlänge von 50 mm entsprechend umgestellter Formel 4-2 errechnet. Zur Auswertung wird die Länge von je 150 Fasern pro Versuchseinstellung mit einem Stahllineal vermessen. Hierbei wird festgestellt, dass insbesondere die Glasfasern durch das Schneidwerk nicht immer vollständig durchtrennt werden. Dadurch liegt ein gewisser Anteil an Fasern mit einer Faserlänge, die einem Vielfachen der eingestellten Faserlänge entsprechen, vor (siehe Abbildung 4-6 (c)). Es konnte festgestellt werden, dass das Schnittergebnis abhängig von der Schneidfrequenz ist. Höhere Frequenzen führen zu einem besseren Schnitt, welcher sich wie in Abbildung 4-6 (b) ersichtlich in einem geringeren Anteil an Fasern mit einem Vielfachen der gewünschten Faserlänge ausdrückt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Glasfasern als sprödes Material durch einen „Bruch durch Biegung“ (Hölzel 2003, S. 32) getrennt werden. Aufgrund der größeren eingebrachten kinetischen Energie der Klinge bei höheren Schneidfrequenzen erfolgt daher ein besseres „Schnittergebnis“. Die Faserlängenverteilung der Binderfasern weist unabhängig der Schneidfrequenz keine auftretenden Vielfachen der gewünschten Faserlänge auf.

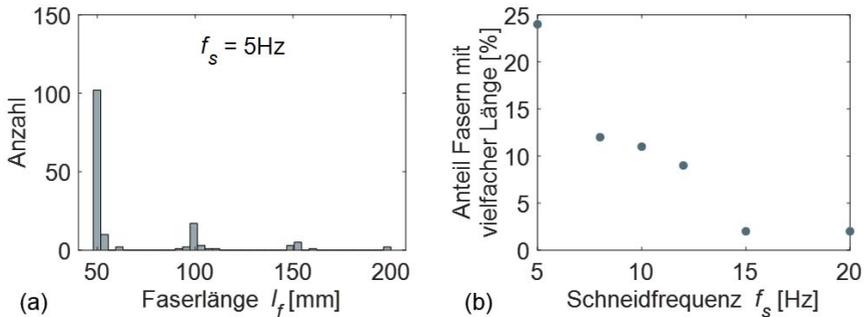


Abbildung 4-6: Gemessene Längen der Glasfasern bei 500 mm/s Faservorschub und 5 Hz Schneidfrequenz (a) und Anteil der Fasern mit einem Vielfachen der Faserlänge in Abhängigkeit der Schneidfrequenz (b)

Die **Ventilator Drehzahl** n_V des Radialventilators zur Faserförderung kann in der Steuerung in einem Bereich von 0 bis 2910 U/min stufenlos eingestellt werden. Bei steigender Drehzahl nimmt das geförderte Luftvolumen des Ventilators (= Luftvolumenstrom) bis zum Maximum von 1320 m³/h linear zu. In Voruntersuchungen konnte beobachtet werden, dass bei einer Reduktion der Ventilator Drehzahl die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Verstopfung der Faserförderstrecke kommt erhöht wird (A_Fricker 2019). Dies ist auf die verminderte kinetische Energie der Fasern zurückzuführen. Für einen prozesssicheren Betrieb der Anlage wird daher immer eine Ventilator Drehzahl größer 2500 U/min eingestellt.

Vom erzeugten Luftvolumenstrom und damit der Ventilator Drehzahl hängen die Einblasgeschwindigkeit des Luftstroms an der Einblasdüse direkt ab. Der Zusammenhang wird in der angeleiteten Arbeit (A_Fricker 2019, S. 43-44) experimentell ermittelt und ist in Abbildung 4-7 dargestellt. Die Einblasgeschwindigkeit wird hierzu unter Variation der Ventilator Drehzahl in 10%-Schritten des Maximums direkt an der Einblasdüse mit einem Hitzedrahtanemometer vom Typ *PCE-423* des Herstellers *PCE Instruments* (Meschede) für eine Zeitdauer von 90 s gemessen und daraus der Mittelwert errechnet. Die Standardvarianz während des Messzeitraums kann vernachlässigt werden. Ermittelt durch eine lineare Regression wird der Zusammenhang von Einblasgeschwindigkeit v_E und Ventilator Drehzahl n_V mit folgender Formel beschrieben:

$$v_E \text{ [m/s]} = 0,246 * n_V \text{ [U/min]}$$

Formel 4-3

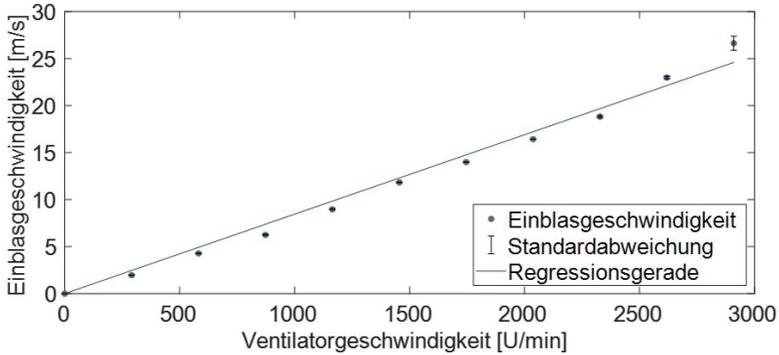


Abbildung 4-7: Einblasgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Ventilatorgeschwindigkeit (eigene Darstellung in Anlehnung an (A_Fricker 2019, S. 44))

Die Düse bewegt sich wie in Abbildung 4-3 dargestellt alternierend entlang der Kante der Einblasform. Die Bewegungsrichtung ist somit parallel zum Verlauf der sich ausbildenden Faserfront. Die **Düsengeschwindigkeit** v_D ist die lineare Bewegungsgeschwindigkeit der Einblasdüse entlang der Einblasform und kann in der Anlagensteuerung stufenlos eingestellt werden. Die maximale Düsengeschwindigkeit von 150 mm/s ergibt sich dabei aus der Dynamik des zum Antrieb verwendeten Schrittmotors.

Die aufgezeigten Größen beeinflussen den Einblasvorgang und stehen teilweise in Wechselwirkung zueinander. Die einstellbaren Einstellbereiche können aufgrund der geometrischen Verhältnisse der Anlage und der Leistungsdaten der Komponenten nur in einem bestimmten Bereich variiert werden. Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch die experimentell festgestellte erhöhte Häufigkeit von Blockaden des Einblausystems bei Betrieb außerhalb der festgestellten Grenzen. Diese Limits werden als prozesssichere Einstellbereiche bezeichnet, innerhalb deren Grenzen ein zuverlässiger sicherer Betrieb der Anlage mit einer reduzierten Wahrscheinlichkeit an Prozessstörungen möglich ist. Die prozesssicheren Einstellbereiche der einstellbaren Einflussgrößen und die sich daraus ergebenden Bereiche der abhängigen Einflussgrößen sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 7 wird der Einfluss der genannten Größen auf die Eigenschaften der Preforms näher untersucht.

Tabelle 4-2: Einstellbarkeit und Einstellbereich der Einflussgrößen auf den Einblasvorgang

Einflussgröße	Einstellbarkeit	Prozesssicherer Einstellbereich
Einblaspalt d_E	Stufenlos	80 - 260 mm
Faserfeinheit F_F	Materialabhängig	
Faservorschub v_F	Stufenlos	0 – 2000 mm/s
Faseraustragsrate \dot{m}	Formel 4-1	
Schneidfrequenz f_S	Stufenlos	0 – 200 Hz
Faserlänge l_F	Formel 4-2	
Ventilator Drehzahl n_V	Stufenlos	2500 – 2910 U/min
Einblasgeschwindigkeit v_E	Formel 4-3	
Düsengeschwindigkeit v_D	Stufenlos	0 – 150 mm/s

Fazit:

Zur Durchführung der Versuche dieser Dissertation wird eine anforderungsgerechte Faserblas-Versuchsanlage aufgebaut. Durch die Verwendung eines Schneidwerks zur Faserbereitstellung, können die Fasern mit einer gleichmäßigen Rate dem Einblassystem zugeführt werden und somit gezielt der Einblasprozess analysiert werden. Eine speicherprogrammierbare Steuerung erlaubt das gezielte Einstellen und Erfassen der relevanten Parameter, sowie die Implementierung der Regelung des Prozesses.

Zur Analyse des Prozessablaufs wird ein relationsorientiertes Funktionsmodell aufgestellt, in welchem die Funktionszusammenhänge strukturiert dargestellt werden. Hierdurch wird die Bildung von Faserknäuel, sowie die Überfüllung der Einblasform als Hauptursache für die inhomogene Faserverteilung festgestellt und der weitere Betrachtungsrahmen auf den Einblasvorgang eingegrenzt.

Mittels eines Ishikawa-Diagrammes werden anschließend die prozessspezifischen Einflussfaktoren identifiziert. Die Zusammenhänge zwischen den einstellbaren und abhängigen Einflussfaktoren werden analytisch oder experimentell bestimmt. Als Ergebnis liegen die einstellbaren relevanten Einflussfaktoren Einblaspalt, Faservorschub, Schneidfrequenz, Ventilator Drehzahl und Düsengeschwindigkeit sowie deren Grenzen für einen prozesssicheren Betrieb vor.

5 Prozessüberwachung für den Einblasprozess

Das vorliegende Kapitel widmet sich der Prozessüberwachung des Fasereinblasprozesses, welche die Grundlage zur Erlangung eines erweiterten Verständnisses des Faserblasprozesses bildet. Zunächst erfolgt hierzu eine systematische Auswahl geeigneter Sensorik. Anschließend erfolgt die Integration der ausgewählten bildbasierten Sensorlösung in die Einblasform und die Entwicklung einer Bildverarbeitung zur Detektion der Faserfront auf Basis der aufgenommenen Bilddaten. Abschließend wird die entwickelte Prozessüberwachung validiert.

5.1 Systematische Auswahl geeigneter Sensorik

Es sind etwa 2000 grundlegende Sensorverfahren bekannt, welche auf unterschiedlichen physikalischen Wechselwirkungen beruhen (Bernstein 2014, S. 5). Für die Auswahl konkreter Sensoren für eine Überwachungsaufgabe in automatisierten Prozessen muss daher zuerst der Bedarf an sensorischen Funktionen geklärt sowie die Anforderungen an einen Sensor spezifiziert werden (Hesse & Schnell 2018, S. 21). Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird die in (Graf & Gruber et al. 2016) vorgestellte Methodik zur Auswahl von Sensoren für automatisierte Prozesse adaptiert.

Ausgangspunkt für die systematische Sensorauswahl ist die Analyse des Prozesses in Kapitel 4.2. Mit Hilfe des relationsorientierten Funktionsmodells können die schädlichen Funktionen „Kavität überfüllen“ und „Inhomogen füllen“ als ursächlich für die geringe Reproduzierbarkeit und die entstehende mangelhafte Homogenität der Preforms identifiziert werden. Diese beiden schädlichen Funktionen müssen daher mit Hilfe geeigneter Sensorlösungen detektiert werden, um die Anforderungen hinsichtlich Funktionalität des Prozesses und Qualität der hergestellten Preforms zu erfüllen. Weiterhin können die beiden relevanten schädlichen Funktionen dem Teilsystem Einblasform (vgl. Abschnitt 4.1.2) zugeordnet werden. Ziel ist es daher eine Sensorlösung zur Kontrolle dieser beiden schädlichen Funktionen unter Berücksichtigung der Einbausituation in der Einblasform auszuwählen.

Ausgehend von den genannten Anforderungen und Rahmenbedingungen folgt die anwendungsspezifische Ergebnisfindung, welche der Wirk- und Bauebene nach (Graf 2017) entspricht. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 5-1 aufgeführt und werden im Folgenden detailliert erläutert.



Abbildung 5-1: Vorgehen zur systematischen Auswahl geeigneter Sensorik

In einem ersten Schritt erfolgen die Problemformulierungen, welche „handlungsorientierten Charakter besitzen und damit die Suche nach Lösungen für das betrachtete technische Problem zielgerichtet initiieren“ (Ponn & Lindemann 2011, S. 76). Für die Problemformulierungen werden dabei die Anforderungen an den Prozess mit dem Anlagenteilsystem und der relevanten schädlichen Funktion verknüpft und in Abbildung 5-2 dargestellt.

Prozessanforderung	Funktionalität	Qualität
Anlagenteilsystem	Einblasform	Einblasform
Schädliche Funktion	Kavität überfüllen	Inhomogen füllen
Problemformulierung	Kontrolle des Füllstandes der Einblasform	Detektion der Faserverteilung in der Einblasform
Prüfaufgabe	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">%</div> Füllstand	 Verteilung

Abbildung 5-2: Problemformulierung und Beschreibung der Prüfaufgabe

Als nächster Schritt der Lösungsfindung werden den formulierten Problemstellungen konkrete Prüfaufgaben zugewiesen. Die Prüfaufgabe stellt einen Bezug zwischen der schädlichen Funktion und einer spezifischen Messgröße, welche aus physikalischen Effekten berechenbar ist, her. Im vorliegenden Fall werden der Füllstand und die Verteilung der Fasern in der Einblasform sensorisch erfasst.

Für die Konkretisierung der Sensorauswahl werden nun geeignete physikalische Effekte ausgewählt und in Form von Sensorklassen mit den schädlichen Funktionen verknüpft. Eine Sensorklasse ist eine Sammlung von Sensoren, welche denselben physikalischen Effekt als Wirkprinzip nutzen und mit gleichem Prüfmechanismus (punktförmig, linienförmig, flächig) auf das Prüfobjekt wirken (Graf 2017, S. 33). Eine sich daraus ergebende Sensorklasse ist beispielsweise „kapazitiv punktförmig“, welcher die meisten industrieeüblichen Anwesenheitssensoren zuzuordnen sind.

Für die Auswahl der physikalischen Effekte wird geprüft, ob diese für die definierte Prüfaufgabe (siehe Abbildung 5-2) prinzipiell geeignet sind. Weiterhin müssen die Kriterien Nutzbarkeit, welche die Eignung des Effektes für die in der Anlage zu verarbeiteten Materialien beschreibt, sowie die Anwendbarkeit in einer automatisierten Anlage erfüllt werden (Graf 2017, S. 73–74). Für detailliertere Informationen zur Funktionsweise, Anwendungsgebieten und möglichen Messaufgaben eines physikalischen Effektes, sei auf die Eigenschaftslisten in (Graf 2017, S. 216–218) verwiesen. Die physikalischen Effekte werden dabei aufgrund ihrer möglichen Prüfmechanismen (punktförmig, linienförmig, flächig) zu Sensorklassen gruppiert. Die vollständige Analyse und Bewertung der physikalischen Effekte kann Tabelle 0-2 im Anhang entnommen werden.

Nach der Auswahl in Frage kommender physikalischer Effekte werden die Sensorklassen in einem morphologischen Kasten mit den schädlichen Funktionen verknüpft (siehe Abbildung 5-3). Somit stehen für jede schädliche Funktion mögliche Lösungsideen zur Verfügung. Den Spalten in Abbildung 5-3 ist dabei zu entnehmen, welche Anzahl und Art an Sensorklassen zur Kontrolle einer schädlichen Funktion möglich ist und welche Prüfaufgabe diese erfüllt. Bei einer mehrfachen Nennung einer Sensorklasse in einer Zeile kann diese mehrfach eingesetzt werden.

Es ist an dieser Stelle zu präzisieren, dass der kapazitive, piezoelektrische und piezoresistive Effekt in der Ausprägung als Drucksensor genutzt wird. Hiermit kann wie in (Förster 2003) beschrieben der Staudruck beim Einblasen zur Bestimmung des Füllstandes in der Einblasform gemessen werden. Der elektrooptische und fotoelektrische Effekt können sowohl mit punktförmigem, linienförmigem und auch flächigem Prüfmechanismus für die direkte Messung der Füllung der Einblasform verwendet werden. Weiterhin können beide Effekte mit flächigem Prüfmechanismus für die Detektion der Faserverteilung angewandt werden. Es wird dabei deutlich, dass die Sensorklassen „elektrooptisch flächig“ und „fotoelektrisch flächig“ alle formulierten Problemstellungen

adressieren können und damit einen hohen Erfüllungsgrad aufweisen. Für die weitere Auswahl werden daher nur die flächig wirkenden Sensorklassen mit diesen beiden Effekten betrachtet.

Problemformulierung	Detektion der Faserverteilung in der Einblasform	Kontrolle des Füllstandes der Einblasform
Schädliche Funktion	Inhomogen füllen	Kavität überfüllen
Kapazitiver Effekt		 Sensorklasse „kapazitiv punktförmig“ 
Piezoelektrischer Effekt		 
Piezoresistiver Effekt		 
Elektrooptischer Effekt	 	   
Fotoelektrischer Effekt	 	   

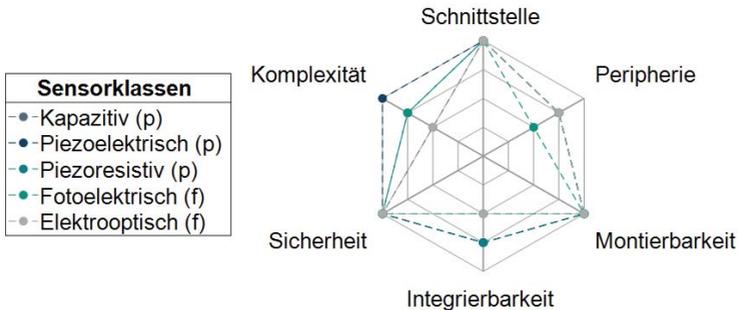
Legende:

				
Punktförmig	Linienförmig	Flächig	Füllstand	Verteilung
Wirkprinzipien			Prüfaufgaben	

Abbildung 5-3: Morphologischer Kasten für die Zuordnung der schädlichen Funktionen zu den Sensorklassen

Für eine Auswahl einer Sensorlösung aus den möglichen in Abbildung 5-3 dargestellten Sensorklassen werden diese abschließend anhand ihrer Standardisierung und der technischen Umsetzbarkeit bewertet. Die Standardisierung bezeichnet dabei die industrielle Verfügbarkeit von Standardlösungen für die definierte Prüfaufgabe und wird durch einen paarweisen Vergleich der Sensorklassen untereinander bewertet (Graf 2017, S. 79). Weiterhin wird die technische Umsetzbarkeit für das jeweilige Szenario

anhand der in Abbildung 5-4 gezeigten Unterkriterien zur Implementierung der Sensor-klasse bewertet. Die Summe der Bewertungen der Unterkriterien kann als qualitatives Maß für den finanziellen Aufwand der Sensorintegration verstanden werden, wobei ein kleiner Wert einen hohen Aufwand bedeutet (Graf 2017, S. 80). Die Bewertung erfolgt dabei auf Grundlage der in (Hesse & Schnell 2018) und (Bernstein 2014) enthaltenen Informationen zu Wirkprinzipien und Sensoren.



Bewertungsskala:

1: sehr hoch, 2: hoch, 3: gering, 4: sehr gering

Abbildung 5-4: Bewertung der technischen Umsetzbarkeit der Sensorklassen

Für die finale Auswahl werden die Sensorklassen in Abbildung 5-5 nach ihrer technischen Umsetzbarkeit und Standardisierung eingeteilt. Die Füllung der kreisrunden Symbole zeigt dabei den Erfüllungsgrad jeder Sensor-klasse, wobei die Füllung der rechten Hemisphäre des Symbols für eine Erfüllung der Prüfaufgabe „Füllstand“ und die Füllung der linken Hemisphäre des Symbols für eine Erfüllung der Prüfaufgabe „Verteilung“ steht. Aus der Bewertung ist ersichtlich, dass ein Drucksensor mit dem piezoelektrischen Effekt als Wirkprinzip eine einfach und kostengünstig zu implementierende Standardlösung darstellt. Nachteilig ist hier, dass mit dieser Sensor-klasse nur der Füllstand der Einblasform erfasst werden kann. Ein flächiger elektrooptischer Sensor weist aufgrund der Eignung für beide Prüfaufgaben einen hohen Erfüllungsgrad auf. Flächige Sensoren mit elektrooptischem Wirkprinzip sind als bildgebende Sensoren (z.B. CCD- oder CMOS-Sensoren) als Standardsensoren verfügbar und in vielen industriellen Bereichen in der Anwendung. Aufgrund der Tatsache, dass die Messung des Füllstandes

und der Faserverteilung mit Hilfe eines solchen Sensors eine nachgeschaltete Bildverarbeitung bedarf, ist die Integrierbarkeit und Komplexität niedriger zu bewerten, woraus in der Gesamtbewertung eine schlechtere technische Umsetzbarkeit resultiert.

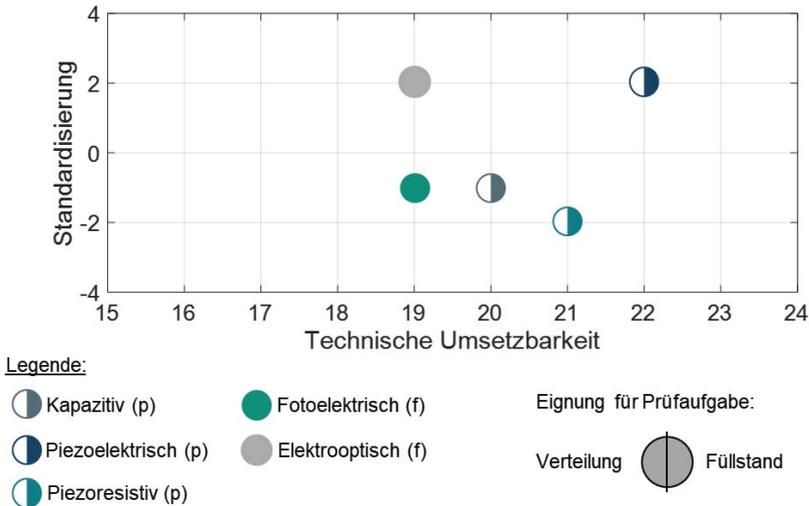


Abbildung 5-5: Einteilung der Sensorklassen nach technischer Umsetzbarkeit und Standardisierung

Für das Gesamtkonzept des Systems zur Prozessüberwachung mit einer Erfassung des Füllstandes und der Faserverteilung ist eine Lösung mit nur einem Sensor aufgrund des geringeren Investitionsbedarfs und der einfacheren Integration in die Einblasform zu bevorzugen. Aufgrund der Eignung eines flächigen elektrooptischen Sensors für beide spezifizierten Prüfaufgaben wird diese Sensorklasse für die Nutzung in der geplanten Prozessüberwachung eingesetzt. Als konkrete Sensorlösungen kommen hierfür Industriekameras mit sogenannten CCD- oder CMOS-Sensoren in Frage. Aufgrund der direkten Ladungsabnahme bei CMOS-Sensoren weisen diese einen besonders geringen Leistungsbedarf und eine höhere Toleranz gegenüber Temperaturschwankungen und sonstigen Störungen auf (Hesse & Schnell 2018, S. 391), was sie für die Integration in der Einblasform qualifiziert. Die Eingrenzung des möglichen Lösungsraums

an verfügbarer Sensorik auf die konkrete Auswahl eines CMOS-Sensors bildet die Ausgangssituation für die Entwicklung der bildbasierten Prozessüberwachung auf welche in Abschnitt 5.2 näher eingegangen wird.

5.2 Entwicklung der bildbasierten Prozessüberwachung

In diesem Abschnitt der Arbeit wird die Entwicklung der Überwachung des Einblasprozesses auf Basis der zuvor systematisch ausgewählten elektrooptischen Sensorlösung erläutert. Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse werden im Rahmen der Abschlussarbeit (A_Schäfer 2019) erarbeitet und in (Moll & Schäfer et al. 2019b) veröffentlicht. Eine weitere Optimierung hin zum in dieser Dissertation präsentierten Stand erfolgt in der Abschlussarbeit (A_Qiu 2020).

Neben einer Kamera als ausgewählte Sensorlösung besteht das Prozessüberwachungssystem zusätzlich aus einer Bildverarbeitung, durch welche aus den aufgenommenen Bilddaten die Faserfront und die Formfüllung extrahiert wird, und der Schnittstelle zur Anlagensteuerung (siehe Abbildung 5-6). Die Bildverarbeitung wird aufgrund der hohen Anforderungen an die Rechenleistung auf einem Personal Computer (PC) mit einem Prozessor vom Typ *i7-4790* der Firma *Intel Corporation* (Santa Clara (CA), USA) mit 3,6 GHz Taktfrequenz und einer Grafikkarte vom Typ *Quadro K-620* der Firma *NVIDIA Corporation* (Santa Clara (CA), USA) durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten eines Einblasprozesses werden von diesem PC direkt auf dem Netzlaufwerk des Instituts abgespeichert. Ein wie hier an der Schnittstelle zwischen echtzeitfähiger Automatisierungs-Hardware und einem Firmen-Netzwerk eingesetzter PC wird als sogenanntes Edge Device bezeichnet. Die Kommunikation zur speicherprogrammierbaren Steuerung der Faserblas-Versuchsanlage erfolgt mittels Ethernet über das echtzeitfähige Kommunikationsprotokoll *ADS* (Automation Device Specification) der Firma *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG* (Verl). Der aktuelle Verlauf der Faserfront kann dem Bediener somit über die Bedienoberfläche (engl. *Human Machine Interface (HMI)*) der Anlagensteuerung dargestellt werden. Zusätzlich wird das Original-Kamerabild auf einem an das Edge-Device angeschlossenen Bildschirm angezeigt.

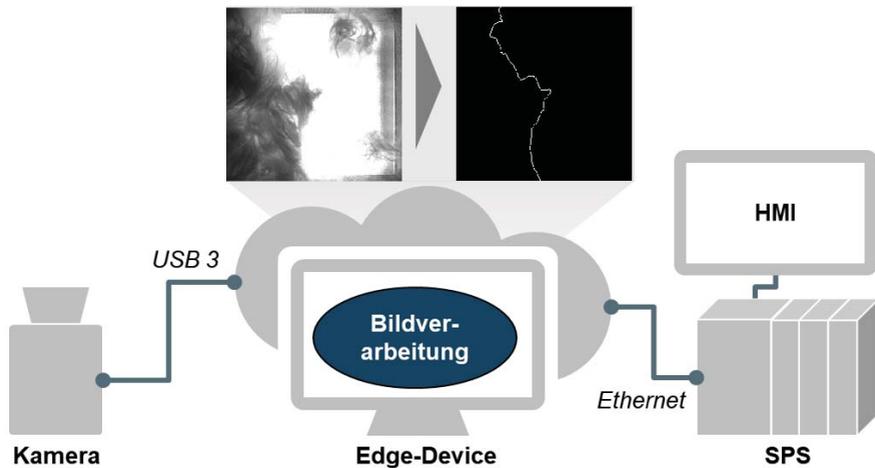


Abbildung 5-6: Architektur des Prozessüberwachungssystems (eigene Darstellung in Anlehnung an (Moll & Schäfer et al. 2019b))

In den folgenden Abschnitten wird auf die Integration der Kamera und die Funktionsweise der Bildverarbeitung eingegangen. Abschließend wird das Prozessüberwachungssystem validiert.

5.2.1 Integration einer Kamera in die Einblasform

Hinsichtlich der Integration einer Kamera zur optischen Erfassung der Fasern in der Einblasform ergeben sich wechselwirkende Anforderungen an die Gestalt der Einblasform zum einen und Anforderungen an die Kamera und Optik zum anderen. Im Folgenden wird auf diese Anforderungen eingegangen und die davon abgeleitete Lösung erläutert.

Aufgrund der Einbausituation und den dabei auftretenden Einflüssen muss die Kamera ausreichend robust gegen Verschmutzung durch Fasern, sowie unempfindlich gegenüber elektro-magnetischen Interferenzen durch umliegende leistungselektronische Bauteile sein. Zur Vermeidung von bewegungsbedingter Unschärfe durch einfliegende Fasern muss die Kamera eine hohe Bildrate (> 20 Bilder pro Sekunde) aufweisen. Weiterhin ist ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis notwendig und der Bildsensor darf keine sogenannten Hot-Pixel aufweisen. Hinsichtlich der Erkennung des Füllstandes

und Detektion der Faserfront ist die Auflösung der Kamera nachgeordnet, da eine Genauigkeit im niedrigen Millimeter-Bereich ausreichend ist. Für die Aufnahme von Durchlichtbildern zur Bewertung der Homogenität der fertigen Preforms wird allerdings eine Auflösung von ≥ 200 dpi empfohlen (Amirnasr & Shim et al. 2014). Auf Basis der genannten Anforderungen wird die Industriekamera vom Typ *UI-3290SE* der Firma *IDS Imaging Development Systems GmbH* (Obersulm) ausgewählt. Diese nimmt mit dem für die Detektionsaufgabe hinreichenden Monochrom-Bildsensor rauscharme Bilder auf.

Der erforderliche Erfassungsbereich der Kamera ist durch die Größe der Preforms von 400×400 mm gegeben. Aufgrund der möglichen Bauhöhe der Einblasform kann der Abstand zwischen der Unterseite der Kavität (entspricht der Bildebene) und der Linse, welcher als Gegenstandsweite g bezeichnet wird, maximal 300 mm betragen. Mit Hilfe der Linsengleichung nach Descartes und des Strahlensatzes lässt sich Formel 5-1 herleiten, mit der die Brennweite f für eine geeignete Linse berechnet wird (Azad & Gockel et al. 2011).

$$f \text{ [mm]} = \frac{g \text{ [mm]} * B \text{ [mm]}}{G_o \text{ [mm]} + B \text{ [mm]}} \quad \text{Formel 5-1}$$

Aufgrund der mittigen Platzierung der Kamera befindet sich die optische Achse der Linse in der Mitte der Einblasform, wodurch die Gegenstandsgröße G_o der halben Preformgröße entspricht. Mit der kameraspezifischen Bildgröße B von 7,5 mm ergibt sich eine notwendige Brennweite von 10,84 mm. Weiterhin muss die Auflösung des Objektivs und der Bildkreisdurchmesser zum Sensor der ausgewählten Kamera passen. Als geeignetes Objektiv wird daher das Objektiv vom Typ *M111FM08* der Firma *Tamron Co., Ltd.* (Saitama, Japan) ausgewählt.

Um die Erfassung der Fasern durch das Kamerasystem zu ermöglichen wird die Einblasform wie in Abbildung 5-7 (a) dargestellt modifiziert. Der Boden und Deckel werden dabei durch Scheiben aus Plexiglas ersetzt, welche einen Blick in die Kavität erlauben. Aufgrund der seitlichen Wandung aus Lochblech ist die Beleuchtung in der Kavität stark eingeschränkt. Es ist daher eine zusätzliche Hintergrundbeleuchtung am oberen beweglichen Teil der Einblasform erforderlich. Diese muss zeitlich und räumlich möglichst homogen sein, um die Bildverarbeitung möglichst wenig negativ zu beeinflussen. In (A_Schäfer 2019) werden daher mehrere Leuchtmittel verglichen und LED-Streifen als

geeignetste Beleuchtung ausgewählt. Es konnte dabei experimentell festgestellt werden, dass eine größere Entfernung der LED-Streifen von der Bildebene zu einer gleichmäßigeren Beleuchtung führt. Eine gleichmäßige Verteilung der LEDs führt allerdings nicht zu einer gleichmäßigen Beleuchtung der Kavität, da die Beleuchtungsstärke E an einem gewissen Punkt nach Formel 5-2 neben der Leuchtstärke l_i einer Lichtquelle i ebenso von deren euklidischen Distanz d_i zu diesem Punkt abhängt. Dies führt bei gleichmäßiger Verteilung der LEDs zu einer geringeren Beleuchtungsstärke an den Rändern.

$$E [lx] = \sum_{i=1}^n \frac{l_i [cd]}{d_i^2 [mm]} \quad \text{Formel 5-2}$$

Mit Hilfe von Formel 5-2 wird daher in (A_Qiu 2020) ein Berechnungsmodell zur Optimierung der LED-Verteilung aufgestellt und die Hintergrundbeleuchtung durch das Hinzufügen von weiteren LEDs im Randbereich optimiert. Da sich der Aufnahmebereich der Kamera mit zunehmendem Abstand strahlenförmig erweitert und sich die Distanz d bei verschiedenen Einblaspalten ändert ist eine optimal homogene Ausleuchtung der Kavität jedoch nicht möglich (vgl. Abbildung 5-7 (b)).

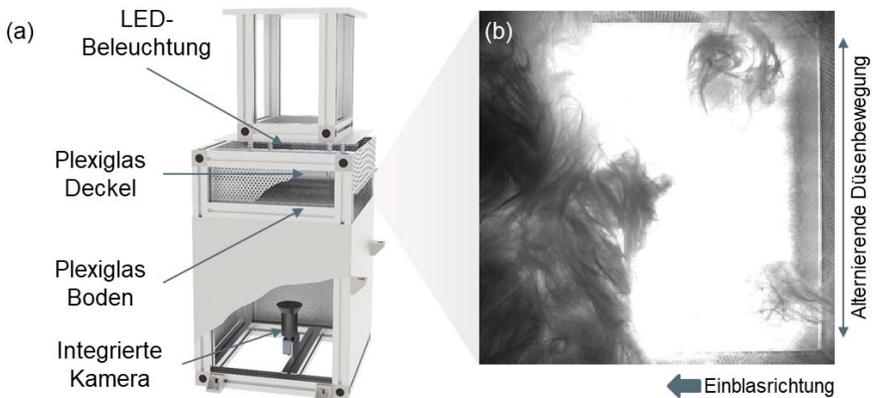


Abbildung 5-7: Aufbau der Einblasform mit integrierter Kamera und LED-Hintergrundbeleuchtung (a) und exemplarische Aufnahme aus der Einblasform während des Einblasprozesses (b)

5.2.2 Detektion der Faserfront durch Bildverarbeitung

Für die Detektion der Faserfront müssen die relevanten Informationen aus den durch die Kamera erhaltenen Aufnahmen extrahiert und verarbeitet werden. Es wird daher eine Bildverarbeitung benötigt, durch welche die bereits gefüllten Bereiche der Einblasform von den noch ungefüllten Bereichen unterschieden werden können, um anschließend die Trennkante der Bereiche, welche der Faserfront entspricht, detektieren zu können. Die Implementierung erfolgt mit der Software *MATLAB* ab Version *R2018b* des Software-Entwicklers *The MathWorks, Inc.* (Natick (MA), USA), da bereits grundlegende Operationen zur Verarbeitung von Bildern in Toolboxes bereitgestellt werden. Für die einfache Anwendbarkeit der Bildverarbeitung ist diese als auf dem Edge-Device lauffähige App mit einer grafischen Benutzeroberfläche programmiert.

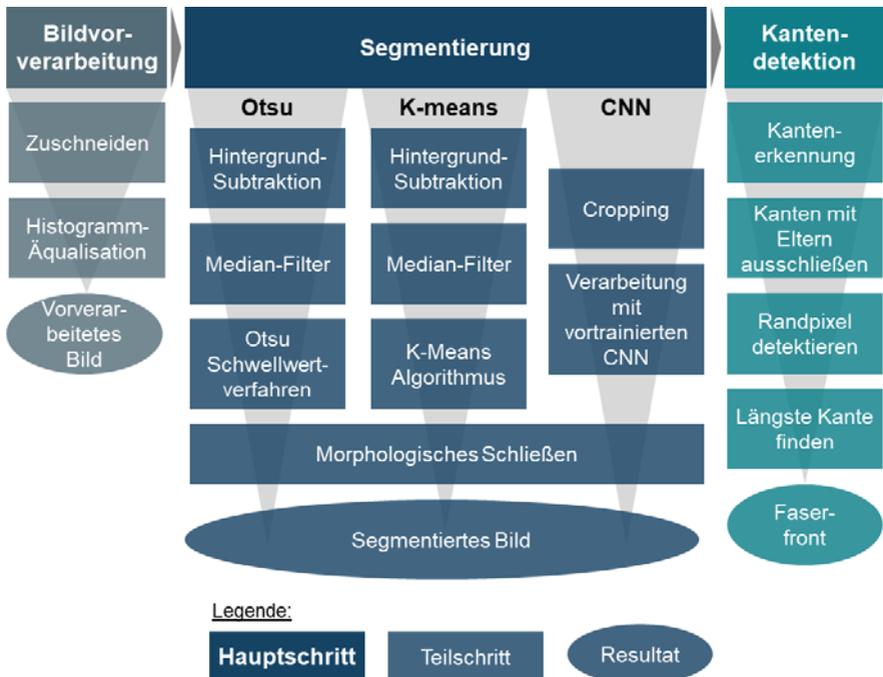


Abbildung 5-8: Vorgehensweise zur Detektion der Faserfront durch Bildverarbeitung (eigene Darstellung in Anlehnung an (Moll & Schäfer et al. 2019b))

Die Vorgehensweise zur Detektion der Faserfront durch die Bildverarbeitung in Anlehnung an (Beyerer & Puente León et al. 2016, S. 11) ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Die Hauptschritte sind die Bildvorverarbeitung, die Segmentierung und die Detektion der Kante, welche in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

5.2.2.1 Bildvorverarbeitung

Im Zuge der Bildvorverarbeitung wird das von der Kamera aufgenommene Bild in einem verarbeitbaren Bildformat importiert und für die weitere Verarbeitung vorbereitet. Dabei werden störende Bildelemente entfernt, um die nachfolgenden Operationen zu vereinfachen.

In einem ersten Schritt wird das rechteckige Rohbild mit einer Bildgröße von 4104 x 2174 Pixel auf den relevanten Bildausschnitt (Region of Interest (RoI)) der quadratischen Einblasform zugeschnitten. Abschließend wird eine Histogramm-Äquivalisation auf das Bild angewandt, durch welche der Kontrast der Grauwertaufnahme gesteigert wird. Weiterhin können so durch die Hintergrundbeleuchtung verursachte Unregelmäßigkeiten reduziert werden (Pourdeyhimi & Kohel 2002).

5.2.2.2 Segmentierung

Ziel der Segmentierung ist die Unterscheidung der bereits mit Fasern gefüllten Bereiche von den noch ungefüllten Bereichen in der Einblasform. Aufgrund der Einteilung in zwei Bereiche wird hier auch von einer Binarisierung gesprochen. Die Unterscheidung der Bereiche basiert dabei auf der Abschattung der Hintergrundbeleuchtung durch die eingeblasenen Fasern, wodurch bereits gefüllte Bereiche auf den Durchlichtaufnahmen dunkler erscheinen als die hellen ungefüllten Bereiche (vgl. Abbildung 5-7(b)). Aufgrund der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen nicht möglichen gleichmäßigen Ausleuchtung der Kavität ist die Verwendung eines einfachen konstanten Schwellwertes allerdings nicht möglich. Die Segmentierung ist daher der entscheidende Schritt für eine zuverlässige Detektion der Faserfront. Im Rahmen der Dissertation werden drei unterschiedliche Methoden für die Segmentierung implementiert und in der abschließenden Validierung (Abschnitt 5.3) bewertet. Bei den Methoden handelt es sich um das Otsu-Verfahren, einen k-Means-Algorithmus und faltende künstliche neuronale Netze (engl. *Convolutional Neural Networks (CNN)*). Aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsweise der Metho-

den sind unterschiedliche vor- und nachgelagerte Operationen notwendig um zu segmentierten Bildern in einheitlichem Format und Verarbeitungsgrad zu gelangen (siehe Abbildung 5-8).

Otsu-Verfahren

Das Verfahren nach (Otsu 1979) ist ein globales Schwellwertverfahren zur Segmentierung von Bildern in zwei Klassen. Das Verfahren eignet sich bei Bildern deren Grauwertverteilung zwei ausgeprägte Cluster aufweist, so wie es der Fall für die hier vorliegenden Aufnahmen ist. Durch die Maximierung der Varianz zwischen den Clustern wird durch das Verfahren automatisch ein Schwellwert ermittelt.

Vor der Anwendung des Schwellwerts zur Binarisierung wird eine Hintergrundsubtraktion durchgeführt und ein Median-Filter angewandt. Bei der Hintergrundsubtraktion wird das Bild der ungefüllten Einblasform (entspricht der ersten Aufnahme eines Einblasvorganges) vom aktuellen Bild abgezogen. Hierdurch werden negative Effekte des Hintergrunds, wie z.B. die Schattenbildung an den Rändern, entfernt. Ein Median-Filter dient der Entfernung von Artefakten (z.B. einzelne lose Faserknäuel) in der Aufnahme.

Für die Segmentierung mittels des Otsu-Schwellwertverfahrens wird die in *MATLAB* vorimplementierte Methode *otsuthresh* genutzt. Im Anschluss an die Segmentierung wird noch ein morphologisches Schließen (Serra & Vincent 1992) auf das segmentierte Bild angewandt, um durch die Segmentierung entstandene kleine Löcher in dem die Fasern repräsentierenden Bildbereich zu entfernen.

K-Means-Algorithmus

Der k-Means-Algorithmus nach (Lloyd 1982) ist ein Verfahren zum Clustering von Datensätzen bei bekannter Clusteranzahl. Die Datenpunkte werden dabei abhängig von der euklidischen Distanz zum nächsten zunächst zufällig gewählten Clustermittelpunkt den Clustern zugeteilt. Anschließend erfolgt die Neuberechnung der Clustermittelpunkte. Der Algorithmus durchläuft diese Schritte iterativ bis sich die Zuordnung nicht mehr ändert (Ertel 2016, S. 246). Für die vorliegende Problemstellung der Segmentierung kann der Algorithmus aufgrund der bekannten Anzahl an Clustern ebenfalls verwendet werden.

Die Ausführung des k-Means-Algorithmus erfolgt mit der in *MATLAB* implementierten Methode *kmeans*. Die initialen Clustermittelpunkte werden dabei durch den k-Me-

ans++-Algorithmus ausgewählt, wodurch sich die Rechenzeit reduziert und die Ergebnisqualität gesteigert wird (Arthur & Vassilvitskii 2007). Für die Methode kann weiterhin die maximale Anzahl an Iterationen eingestellt werden. In der angeleiteten Masterarbeit (A_Schäfer 2019) wird jedoch gezeigt, dass sich die Konvergenzkriterien für den Algorithmus im vorliegenden Anwendungsfall nicht signifikant auf die Laufzeit auswirken.

Analog zur bereits beschriebenen Vorgehensweise wird ebenfalls eine Hintergrundsubtraktion durchgeführt und ein Median-Filter angewandt. Für die Anwendung der Methode wird die Aufnahme zuerst in eine eindimensionale Form konvertiert. Das Abstandsmaß entspricht daher der Grauwertdifferenz eines Pixels zum Clusterzentrum. Anschließend erfolgt eine Rückkonvertierung in Matrixform. Als Ergebnis liegt somit eine Zuordnung jedes einzelnen Pixels zu einem Cluster anhand seines Grauwerts vor.

Convolutional Neural Networks (CNN)

Convolutional Neural Networks (CNN, *deutsch*: "faltende" neuronale Netzwerke) sind neuronale Netze zur Verarbeitung von Daten mit einer rasterähnlichen Topologie, wie z.B. Bildern (Goodfellow & Courville et al. 2018, S. 369). Sie bestehen wie in Abbildung 5-9 illustriert aus sogenannten Faltungsschichten (Convolutional Layer) zur Extraktion von Bildmerkmalen (z.B. Kanten, Farben, etc.) und Poolingschichten zur Auswahl von Bildmerkmalen und Reduktion der Dimension (Ansari 2020, S. 195). Am Ende werden die Bilder einem klassischen neuronalen Netz zur Klassifikation zugeführt. Durch die Anzahl und Art der Layer wird die Architektur des Netzwerks definiert. CNN haben gegenüber klassischer Segmentierungsverfahren den Vorteil, dass diese nur sehr wenig Vorverarbeitung benötigen. Klassische Bildverarbeitungsmethoden nutzen häufig manuell ausgewählte Filter zur Entfernung unerwünschter Bildbestandteile (z.B. Schatten), während CNN mit genügend Trainingsdaten diese Charakteristika lernen können.

Im Rahmen der Dissertation werden folgende faltende neuronale Netze zur Segmentierung der Aufnahmen trainiert und deren Eignung untersucht:

- U-Net nach (Ronneberger & Fischer et al. 2015)
- SegNet nach (Badrinarayanan & Kendall et al. 2017)
- Fully Convolutional Networks (FCN) nach (Long & Shelhamer et al. 2015)

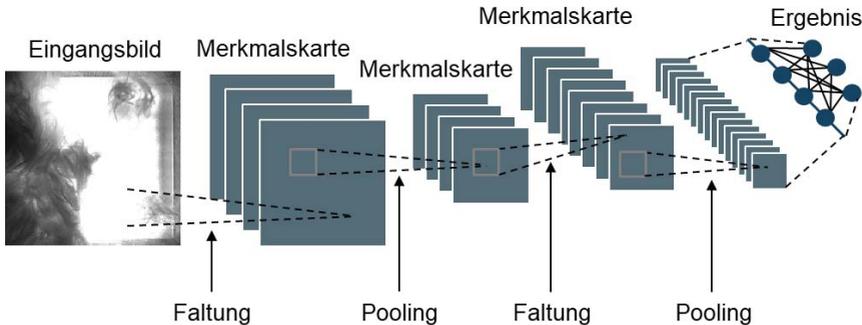


Abbildung 5-9: Aufbau eines Convolutional Neural Networks (eigene Darstellung in Anlehnung an (Ansari 2020, S. 196))

Die Schichten der genannten neuronalen Netze sind in *MATLAB* mit den Methoden *unetLayers*, *segnetLayers* und *fcnLayers* vorimplementiert. Vor der Nutzung eines CNN im Bildverarbeitungssystem muss dieses für die konkrete Anwendung trainiert werden. Im Rahmen der Abschlussarbeit (A_Qiu 2020) werden die genannten Netze daher mit unterschiedlichen Encodertiefen mit Hilfe von 1727 händisch gelabelten Bildern mit variierenden Einblaspalte trainiert.

Vor der Anwendung des neuronalen Netzes wird das quadratische Bild zuerst auf eine Größe von 256 x 256 Pixel reduziert (Cropping), was einer realen Auflösung von 1,31 mm/Pixel entspricht. Der damit einhergehende Darstellungsverlust feiner Fasern kann für die übergeordnete Messaufgabe vernachlässigt werden. Durch die Größenreduktion des Bildes wird die Rechenzeit deutlich verringert, da das Netz weniger Knoten in den einzelnen Layern besitzt. Für die Segmentierung mit den trainierten CNN wird die *MATLAB*-Methode *semanticseg* genutzt. Zur Verbesserung der Rechenzeit der Segmentierung erfolgt die Berechnung auf der Grafikkarte des Edge-Devices, welche durch den vektorbasierten Chip besser als normale Prozessoren für diese Art von Berechnung geeignet ist.

5.2.2.3 Kantendetektion

Um aus den segmentierten Bildern die Faserfront extrahieren zu können, bedarf es einer Kantendetektion. Als Kante wird hierbei der Übergang zwischen einem als mit Fasern gefüllten und einem als ungefüllt klassifizierten Bereich bezeichnet. Aufgrund

von Ungenauigkeiten in der Segmentierung bestehen die segmentierten Bilder nicht nur aus zwei vollständig voneinander getrennten Bereichen. Dies führt dazu, dass mehr Kanten als die eigentliche Faserfront detektiert werden. Mittels einer geeigneten Filterung ist daher die Kante, welche der Faserfront entspricht, zu identifizieren.

Zur Detektion der Kanten wird die *MATLAB*-Methode *bwboundaries* verwendet, welche anhand aller acht angrenzenden Nachbarn eines Pixels (Moore-Nachbarschaft) Kanten von sogenannten Objekten erkennt (Gonzalez & Woods et al. 2009). Im vorliegenden Falle entsprechen die Objekte den als Fasern klassifizierten Bereichen. Die Filterung der Kanten erfolgt nach dem Ausschlussprinzip und ist exemplarisch in Abbildung 5-10 illustriert. In einem ersten Schritt werden zunächst alle Kanten von Objekten, welche sich vollständig innerhalb eines anderen Objektes (sogenanntes „Eltern-Objekt“), ausgeschlossen. Da sich die Fasern immer an der linken Wandung anlagern und sich von dieser Seite aus die Faserfront aufbaut, wird postuliert, dass die der Faserfront entsprechenden Kante immer mindestens zwei der drei Bildaußenkanten (obere, untere und linke Bildaußenkante) enthalten muss. Kanten welche diesem Kriterium nicht entsprechen werden entsprechend ausgeschlossen. Unter den dann noch detektierten Kanten muss die längste Kante der Faserfront entsprechen.

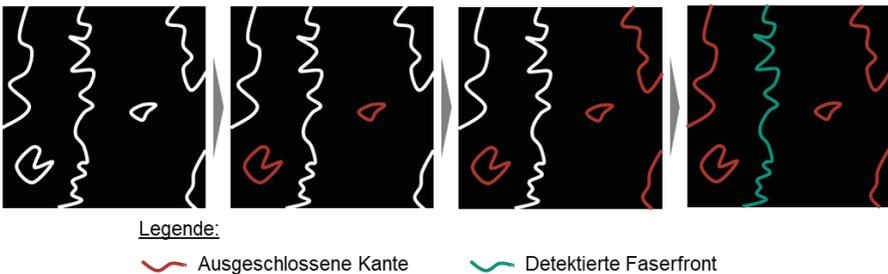


Abbildung 5-10: Filterung der detektierten Kanten zur Identifikation der Faserfront

Die ermittelte Faserfront wird zum einen in Form eines Bildes für die Prozessdokumentation auf dem Netzlaufwerk des Instituts abgespeichert, zum anderen an die Bedienoberfläche der Steuerung der Faserblas-Versuchsanlage übermittelt. Zur Übermittlung an das HMI wird die Faserfront auf 90 Stützpunkte reduziert und deren Koordinaten mittels des ADS-Protokolls über eine Ethernet-Verbindung übermittelt. Anhand der Stützpunkte wird die Faserfront auf dem HMI in Form eines Diagramms, in welchem

die Stützpunkte durch Geradensegmente verbunden werden, angezeigt und dient dem Anlagenbediener zur Überwachung des Einblasprozesses.

5.3 Validierung der entwickelten Prozessüberwachung

Die Genauigkeit der entwickelten Prozessüberwachung ist definiert durch die Präzision der bestimmten Faserfront. Aus Abschnitt 5.2.2 ist ersichtlich, dass der entscheidende Schritt zur Detektion der Faserfront die Segmentierung in bereits gefüllte und ungefüllte Bereiche der Einblasform ist. Die Validierung der Prozessüberwachung erfolgt daher anhand der Bewertung der verschiedenen untersuchten Segmentierungsverfahren (A_Qiu 2020). Außerdem wird die erreichbare Bildrate (engl. *framerate*) der Prozessüberwachung untersucht.

Für die Bewertung von Segmentierungsverfahren wird in der Literatur eine Vielzahl von Methoden vorgeschlagen. Eine direkte und objektive Bewertung kann mittels analytischer oder empirischer Methoden erfolgen, wobei analytische Methoden lediglich eine Bewertung der Implementierung erlauben (Zhang & Fritts et al. 2008). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt daher eine überwachte empirische Bewertung auf Basis von Referenzbildern (*Ground-Truth*). (Sezgin & Sankur 2004) stellen verschiedene Methoden vor und empfehlen die Nutzung einer Kombination der normalisierten Methoden. Hieraus folgt nach Formel 5-3 die Klassifikationsgüte $S(i)$ für ein segmentiertes Bild i durch Bildung des arithmetischen Mittels vier ausgewählter Bewertungsmethoden, welche in Tabelle 0-3 im Anhang detailliert beschrieben werden.

$$S(i) = \frac{ME(i) + AAE(i) + PDE(i) + PE(i)}{4} \quad \text{Formel 5-3}$$

Die Validierung erfolgt anhand von insgesamt 150 Aufnahmen, bei welchen die *Ground-Truth* manuell bestimmt wird. Zur Berücksichtigung der verschiedenen Beleuchtungssituationen in Abhängigkeit des Einblaspalts werden Aufnahmen aus der Prozessdokumentation von Einblasvorgängen mit 80 mm, 110 mm und 140 mm Einblaspalt genutzt. Die anhand von Formel 5-3 ermittelten Klassifikationsgüten der untersuchten Segmentierungsverfahren für die Aufnahmen sind in Abbildung 5-11 dargestellt. Tabelle 5-1 zeigt die durchschnittliche und minimale Klassifikationsgüte.

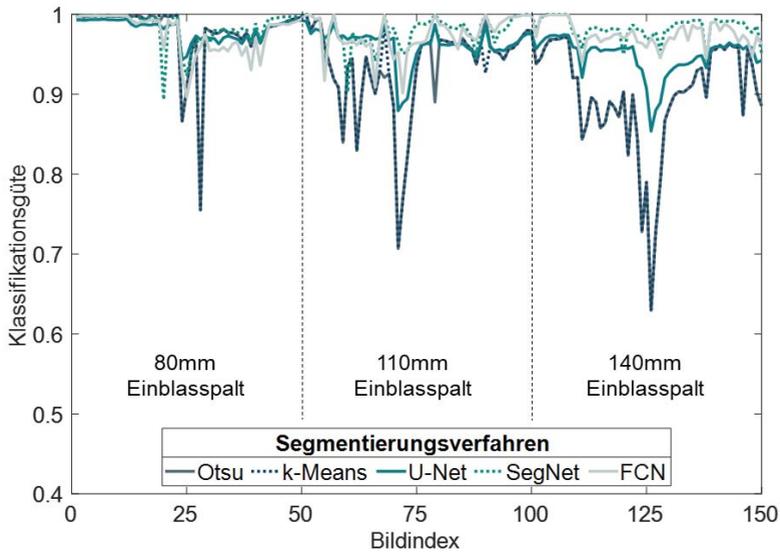


Abbildung 5-11: Klassifikationsgüte der untersuchten Segmentierungsverfahren
(eigene Darstellung nach (A_Qiu 2020))

Tabelle 5-1: Durchschnittliche und minimale Klassifikationsgüten der untersuchten
Segmentierungsverfahren (A_Qiu 2020)

Segmentierungsverfahren	Durchschnittliche Klassifikationsgüte	Minimale Klassifikationsgüte
Otsu-Verfahren	0,937	0,63
k-Means-Algorithmus	0,937	0,63
U-Net	0,964	0,854
SegNet	0,982	0,893
FCN	0,975	0,897

Es ist festzustellen, dass das Otsu-Verfahren und der k-Means-Algorithmus eine sehr ähnliche Klassifikationsgüte erreichen, die sich lediglich in einzelnen Aufnahmen unterscheidet. Die minimal erreichte Klassifikationsgüte liegt deutlich unter den erreichten Ergebnissen der auf CNN basierten Verfahren. Dies wird darauf zurückgeführt, dass

insbesondere in den Randbereichen der Aufnahmen, in denen bei verschiedenen Einblaspalten unterschiedliche Schatten auftreten, eine unzureichende Klassifikation auftritt. Das auf U-Net basierte Segmentierungsverfahren weist das gleiche Defizit in den Randbereichen, wenn auch schwächer ausgeprägt, auf. Die beiden Verfahren SegNet und FCN zeigen eine hohe durchschnittliche Klassifikationsgüte von 98 % richtig klassifizierter Bereiche. Im schlechtesten Fall beträgt die Klassifikationsgüte immer noch nahezu 90 %.

Die Untersuchung der Rechenzeit der Bildverarbeitung für die Prozessüberwachung erfolgt auf zwei Rechnern mit unterschiedlichen Prozessoren und Grafikkarten. Abbildung 5-12 zeigt die mit den untersuchten Segmentierungsverfahren erreichte Anzahl an Aufnahmen pro Sekunde (Framerate), was der erreichbaren Messfrequenz der Prozessüberwachung entspricht. Es zeigt sich, dass die klassischen Verfahren Otsu und k-Means eine höhere Framerate erlauben. Durch die Verwendung einer leistungsfähigen Grafikkarte kann allerdings die Framerate der CNN-basierten Verfahren auf über 10 Hz gesteigert werden. Dies wird aufgrund der zeitlichen Änderungsrate des Füllzustandes als ausreichend betrachtet.

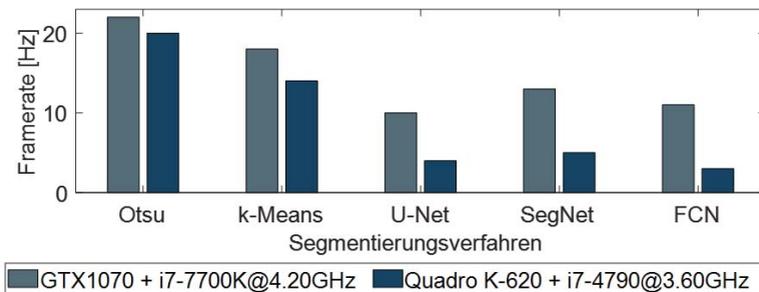


Abbildung 5-12: Erreichbare Framerate der entwickelten Prozessüberwachung mit unterschiedlichen Segmentierungsverfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an (A_Qiu 2020))

Aufgrund der hohen erreichten Klassifikationsgüte des SegNet und der gegenüber FCN besseren Framerate wird die Prozessüberwachung mit dem auf SegNet basierten Segmentierungsverfahren für die weitere Verwendung in der Bildverarbeitung ausgewählt.

Fazit:

Mittels eines systematischen Auswahlverfahrens wird eine kamerabasierte Sensorik als die geeignetste Variante zur Bestimmung des Füllzustandes der Einblasform und der Detektion der Faserfront ausgewählt. Neben der Integration der Kamera in die Einblasform wird zusätzlich eine Bildverarbeitung zur Extraktion der benötigten Informationen aus den Aufnahmen entwickelt.

Aufgrund der vorliegend schwierigen Beleuchtungssituation in der Einblasform eignen sich auf faltenden neuronalen Netzen basierte Segmentierungsverfahren am besten für die Anwendung in einer solchen Bildverarbeitung. Die Validierung der Prozessüberwachung zeigt, dass eine ausreichend hohe Genauigkeit der entwickelten Lösung vorliegt.

Die Implementierung der Prozessüberwachung in der Faserblas-Versuchsanlage erlaubt eine vollständige Beobachtung des Einblasvorganges durch den Anlagenbediener. Somit kann der Einblasvorgang mit Hilfe der Prozessüberwachung bei vollständiger Füllung des Einblasvorganges beendet werden, wodurch im Vergleich zum Stand der Technik keine Füllstudien zur Bestimmung des Stop-Zeitpunkts oder inkrementelle Füllvorgänge erforderlich sind. Die Erfassung des aktuellen Formfüllzustandes in nahezu Echtzeit ist die Voraussetzung für eine Regelung des Einblasprozesses. Zusätzlich erfolgt eine Aufzeichnung des kompletten Einblasvorganges, welcher die Analyse zu einem späteren Zeitpunkt erlaubt.

6 Charakterisierung der Preformeigenschaften

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit den Methoden zur Untersuchung der Eigenschaften der fasergeblasenen Preforms. Grundlage für diese Charakterisierung sind Durchlichtaufnahmen, welche mittels der im Kapitel 5 beschriebenen in der Einblasform integrierten Kamera aufgenommen werden.

Für die weitere Verarbeitung und Nutzung der Preforms sind insbesondere die Homogenität und die Faserorientierung entscheidend. Die Homogenität beeinflusst die spätere Infiltration der Preforms und ist ebenfalls relevant für die mechanischen Eigenschaften. Die Festigkeit und Steifigkeit eines faserverstärkten Bauteils wird mehrheitlich durch die Orientierung der Verstärkungsfasern bestimmt. Im Folgenden werden daher Methoden zur Charakterisierung dieser beiden Eigenschaften untersucht und für die Untersuchung von fasergeblasenen Preforms qualifiziert.

Die untersuchten und selbst entwickelten Methoden werden mit der Software *MATLAB* implementiert. Zur einfacheren Anwendbarkeit der Methoden wird mit dem *MATLAB* App Designer eine Applikation mit einer graphischen Benutzeroberfläche (engl. *Graphical User Interface (GUI)*) aufgebaut (siehe Abbildung 6-1). Diese erlaubt die anwenderfreundliche Nutzung der Analyse-Methoden auch ohne eine Installation und Lizenzierung von *MATLAB*.

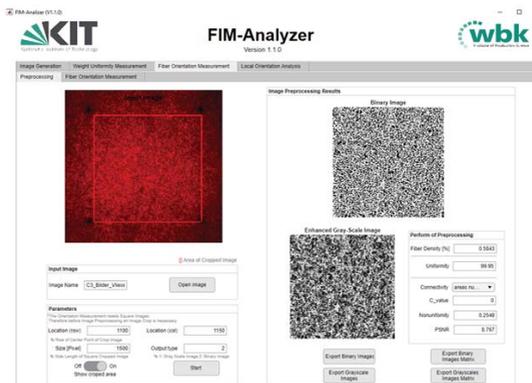


Abbildung 6-1: *MATLAB*-App "FIM-Analizer" zur Berechnung der Preformeigenschaften

6.1 Bewertung der Homogenität

In diesem Unterkapitel werden Methoden zur Bewertung der Homogenität untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in (Moll & Wang et al. 2020) ebenfalls veröffentlicht.

6.1.1 Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Forschung

Im folgenden Teil wird eine Übersicht über Methoden zur Bewertung der Homogenität von faserartigen Strukturen gegeben. Diese Methoden werden abschließend kategorisiert und mittels eines Screenings wird ihre Eignung für die Bewertung der Homogenität von fasergeblasenen Preforms bewertet.

6.1.1.1 Zusammenfassung des Stands der Forschung

Als Homogenität (engl. *uniformity*) wird allgemein die Variation der Eigenschaften einer Faserstruktur, z.B. Dicke, Gewicht, Dichte, über einen bestimmten Bereich bezeichnet (Amirnasr & Shim et al. 2014; Emadi & Tavanaie et al. 2018). Im Kontext dieser Dissertation wird der Begriff Homogenität ausschließlich für die Variation des Flächengewichts gebraucht. In einer Vielzahl an wissenschaftlichen Beiträgen werden Methoden zur Bestimmung der Homogenität von Faserstrukturen, wie z.B. Vliesen, und deren Beschreibung durch einen Index vorgestellt. Generell lassen sich diese Ansätze in physische Methoden und bildbasierte Methoden einteilen.

Die physischen Methoden basieren auf einer Messung des Gewichts direkt an den Faserstrukturen. Die häufigste Methode ist die sogenannte „Cut-and-weight“-Methode (Ericson & Baxter 1973). Hierbei werden der Faserstruktur Proben gleicher Größe in einem einheitlichen Raster entnommen. Das Vorgehen zur Probenentnahme ist in der Norm (DIN EN 29073-1) zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Vliesstoffen beschrieben. Anschließend wird die Masse m der Proben bestimmt. Die Homogenität wird dann mittels des Variationskoeffizienten (engl. *Coefficient of Variation (CV)*) entsprechend Formel 6-1 angegeben, wobei \bar{m} den Mittelwert der gemessenen Massen der Proben bezeichnet.

$$CV = \frac{\sqrt{\text{Varianz}}}{\text{Mittelwert}} = \frac{\sqrt{\text{Var}(m)}}{\bar{m}}$$

Formel 6-1

Die mittels dieser Methode bestimmte Homogenität hängt dabei stark von der Anzahl und Größe der genommenen Proben ab. Ein weiterer Nachteil ist die zerstörende Prüfung.

Mit dem Aufkommen von Bildverarbeitung in der Qualitätskontrolle, werden auch Methoden zur Bestimmung der Homogenität auf Bildbasis entwickelt. Diese basieren darauf, dass die Faserstruktur von einer möglichst gleichförmigen Lichtquelle durchleuchtet wird, weshalb diese als Durchlichtaufnahmen bezeichnet werden. In Regionen mit höherem Flächengewicht durchdringt weniger Licht die Faserstruktur als in Regionen mit geringerem Flächengewicht, woraus unterschiedliche Graustufenwerte in der Aufnahme erzeugt werden.

Viele der optischen Methoden basieren ebenfalls auf der Berechnung des Variationskoeffizienten, wobei die Graustufenwerte der einzelnen Bildpixel x als Grundlage dienen (Boeckerman 1992; Veerabadran & Davis et al. 1996). Für kleine Proben ist diese Methode ungeeignet, da der Variationskoeffizient bei größer werdenden Proben sinkt und deshalb eine Mindestprobengröße notwendig ist (Parikh & Bresee et al. 2006). Ein weiteres Defizit ist die Tatsache, dass mit dem Variationskoeffizienten lediglich die globale Variation bestimmt und die räumliche Verteilung der Masse (Effekt zweiter Ordnung) ignoriert wird (Amirnasr & Shim et al. 2014).

Ein weiterer Ansatz ist die Quadrantenmethode, welche in der Ökologie für die Schätzung räumlicher Verteilungen Anwendung findet (Greig-Smith 1964). Bei dieser Methode wird ein Bild in mehrere kleinere Ausschnitte aufgeteilt, weshalb sie als digitales Äquivalent zur „Cut-and-weight“-Methode gesehen werden kann. Für jeden Ausschnitt wird der durchschnittliche Graustufenwert ermittelt und anschließend daraus der Variationskoeffizient berechnet (Tascan & Nohut 2015). Alternativ kann der Dispersionsindex I_d , welcher die Varianz anstelle der Standardvarianz nutzt, nach Formel 6-2 berechnet werden. In (Emadi & Tavanaie et al. 2018) wird dieser Methode eine Binarisierung mittels des K-Nearest-Neighbors-Algorithmus (KNN) vorgeschaltet.

$$I_d = \frac{\text{Varianz}}{\text{Mittelwert}} = \frac{\text{Var}(m)}{\bar{m}} \quad \text{Formel 6-2}$$

In anderen Methoden wird die räumliche Verteilung der Bildausschnitte mittels eines Poisson-Tests ermittelt. (Pourdeyhimi & Kohel 2002) binarisiert dabei die Durchlichtbil-

der mittels der Otsu-Schwellwertmethode. Die Bilder werden anschließend in n Ausschnitte geteilt, der Flächenanteil einer Phase bestimmt und anschließend der Dispersionsindex berechnet. Für die Überprüfung auf eine Poisson Verteilung wird dann ein Chi-Quadrat-Test $\chi^2 = I_d(n - 1)$ durchgeführt, wobei $(n - 1)$ dem Freiheitsgrad entspricht. In Abhängigkeit des Chi-Quadrat-Wertes und des Freiheitsgrades wird die Verteilung als geclustert, zufällig oder gleichmäßig verteilt kategorisiert. Werden die Chi-Quadrat-Werte in Bezug zur Summe der Ausschnitte gesetzt, folgt ein Homogenitätsindex mit einem Wertebereich zwischen 0 und 100. In (Amirnasr & Shim et al. 2014) wird diese Methode um die Nutzung von Graustufenbildern erweitert, wodurch weniger Bildinformationen durch eine Binarisierung verloren gehen. Eine ebenfalls auf diesem Ansatz basierende Methode wird in (Chhabra 2003) beschrieben, wobei hier Reliefdaten anstatt der Graustufenwerte für die Berechnung des Dispersionsindex benutzt werden. In Abhängigkeit der Verteilungskategorie wird ein Homogenitätsindex zwischen -1 und 1 berechnet.

Ein weiterer Ansatz nutzt die Diskrete Fourier Transformation (DFT) zur Homogenitätsbestimmung (Bouydaïn & Colom et al. 2001). Hierbei wird das Bild mittels DFT in den Frequenzraum transformiert und die eindimensionale spektrale Leistungsdichte berechnet. Über eine Kurvenanpassung wird das radiale Profil des Leistungsdichtespektrums angenähert. Die gefitteten Parameter α und ρ_0 korrelieren dabei mit der Homogenität.

In (Thorr & Drean et al. 1999) wird die Grauwertematrix zur Bewertung der Eigenschaften eines Vliesstoffes benutzt. Aus der Grauwertematrix können verschiedene Größen errechnet werden, welche den Eigenschaften des Vliesstoffes entsprechen. Die Energie der Grauwertematrix wird dabei als Index für die Homogenität genutzt.

Weiterhin wird die Fraktale Dimension zur Berechnung der Oberflächenhomogenität von Vliesstoffen genutzt (Yang & Takatera 2011). Hierbei wird über die sogenannte Boxcounting-Methode die Fraktale Dimension der Faserfläche und der Grauwertstufenverteilung bestimmt.

Die Bewertung der Größe, Lage und Verteilung an Defekten in Faserstrukturen wird ebenfalls als ein Maß für die Homogenität herangezogen. Ausreißer besonders hoher oder niedriger Flächenmasse können detektiert werden und über ihr Volumen ein Maß für die Homogenität abgeleitet werden (Cherkassky 1999). (Lien & Liu 2006) nutzen

den Variationskoeffizienten für die Detektion von Defekten, wobei ebenfalls eine Größenabhängigkeit festgestellt werden konnte. In (Klietzing & Tiedt et al. 2012) wird ein Ansatz vorgestellt, bei welchem mit Hilfe von qualitativen Kriterien und Fuzzy-Logik ein Homogenitätsindex abgeleitet wird.

6.1.1.2 Bewertung des Stands der Forschung

Die vorgestellten Methoden werden entsprechend des Prinzips wie die Homogenitätsinformation bestimmt wird in verschiedene Methodenklassen eingeteilt. Hierbei werden der Variationskoeffizient und der Dispersionsindex zur Klasse der Variationsmethoden zusammengefasst. Um die Eignung der vorgestellten Methoden für die Homogenitätsbewertung von fasergeblasenen Preforms zu untersuchen, werden die Methoden mittels eines Screenings vorselektiert. Hierbei erfolgt eine Bewertung anhand der Kriterien Reifegrad, Präzision, Robustheit und Effizienz. Der Reifegrad spiegelt dabei die Anzahl an Referenzen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen wider. Die Präzision gibt an wie gut die Bewertungsgenauigkeit der Methoden ist, wohingegen die Robustheit die Eignung der Methoden für verschiedenartige Faserstrukturen (Flächengewicht, Dicke, Größe) ausdrückt. Die Effizienz ist ein Maß für die benötigte Rechenzeit für die Bildvorverarbeitung und die Berechnung des Homogenitätsindex. Die zusammengefassten Methodenklassen und das Ergebnis des Screenings sind in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Screening der vorgestellten Methodenklassen

Methodenklasse	Reifegrad	Präzision	Robustheit	Effizienz
Variationsmethoden	++	-	0	0
Quadrantenmethode	++	+	+	++
Fourier Transformation	-	0	-	+
Grauwertematrix	0	0	+	-
Fraktale Dimension	0	0	0	+
Defektbasierte Methoden	0	-	-	0

Die Bewertung der Methoden für die verschiedenen Bewertungskriterien basiert auf den Ergebnissen und Bewertungen in den jeweiligen Quellen und der in der angeleiteten Masterarbeit (A_Fei 2019) durchgeführten Untersuchungen.

Die Variationsmethoden sind in der Literatur eingängig beschrieben. Aufgrund der Nichtbetrachtung von Effekten zweiter Ordnung resultiert eine geringe Präzision und

eingeschränkte Robustheit. Durch die Berechnung auf Basis jedes einzelnen Pixels steigt die Rechenzeit bei Zunahme der Bildgröße quadratisch an. Die Quadrantenmethode ist ähnlich gut beschrieben und weist eine Vielzahl an Varianten auf. In der Literatur wird die erfolgreiche Anwendung mit guter Genauigkeit bei verschiedenen Faserstrukturen gezeigt. Durch die Betrachtung größerer Ausschnitte ist die Rechenzeit deutlich geringer als für die Berechnung des Variationskoeffizienten. Die weiteren Methoden sind in der Literatur nur wenig beschrieben und nur in einzelnen Anwendungsfällen erprobt. Der Reifegrad wird daher als gering bis durchschnittlich bewertet. Die Berechnung auf Basis der Fourier Transformation ist sehr empfindlich auf lokalen Variationen und die Ergebnisse sind stark von den eingestellten Parametern abhängig, wobei hierzu wenig Vorerfahrungen in der Literatur vorhanden sind. Die Grauwertematrix ist robust, allerdings ist die Energie als Maß für die Homogenität richtungsabhängig, woraus eine nur durchschnittliche Präzision resultiert. Die auf der fraktalen Dimension beruhenden Methoden liefern keinen eindeutigen Homogenitätsindex, sondern die ermittelnden Ausgangsgrößen korrelieren lediglich mit der subjektiven Bewertung der Homogenität. Defektbasierte Methoden weisen den Nachteil auf, dass diese ebenfalls keinen Homogenitätsindex liefern.

Auf Basis dieses Screenings werden lediglich die quadrantenbasierten Methoden als zielführend für die relevante Anwendung gesehen und für die weitere detaillierte Untersuchung ausgewählt. Für eine finale Auswahl werden die Methoden dieser Klasse im Folgenden genauer untersucht und bewertet. Des Weiteren wird der Variationskoeffizient als einfach zu berechnender Referenzwert ebenfalls mit betrachtet. Obwohl die Methode nach (Emadi & Tavanaie et al. 2018) zu den Quadrantenmethoden gezählt wird, wird diese nicht mit betrachtet, da in den Voruntersuchungen festgestellt wird, dass die Binarisierung mit dem KNN-Algorithmus sehr rechenintensiv ist. Um die Benennung zu vereinfachen werden die zu untersuchenden Methoden nummeriert und die jeweilige Quelle in Tabelle 6-2 angegeben.

Tabelle 6-2: Benennung, Werteentwicklung des Homogenitätsindexes und Quelle der Methoden für die Detailuntersuchung

Methodennummer	Zunahme der Homogenität	Quelle
Methode 1	Index sinkt	u. a. (Parikh & Bresee et al. 2006)
Methode 2	Index tendiert zu 0	(Tascan & Nohut 2015)
Methode 3	Index tendiert zu 0	(Tascan & Nohut 2015)
Methode 4	Index tendiert zu -1	(Chhabra 2003)
Methode 5	Index tendiert zu 100	(Pourdeyhimi & Kohel 2002)
Methode 6	Index tendiert zu 100	(Amirnasr & Shim et al. 2014)

6.1.2 Experimentelle Untersuchung von Methoden zur Homogenitätsbewertung

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur experimentellen Untersuchung der zuvor ausgewählten Methoden beschrieben. Die Untersuchung wird anhand von simulierten Bildern mit unterschiedlichen einstellbaren Helligkeitsverteilungen sowie Durchlichtbildern verschiedener realer Faserstrukturen durchgeführt.

6.1.2.1 Analyse simulierter Bilder

Für den ersten Teil der experimentellen Untersuchung werden Bilder nach einem in (Amirnasr & Shim et al. 2014) vorgestellten Ansatz erzeugt. Die Bilder bestehen aus Clustern weißer Pixel, deren Anzahl, Verteilung und Größe über die beiden Parameter Clusteranzahl n und den Clusterbreitenfaktor CWF (engl. *Cluster Width Factor*) eingestellt werden können. Weiterhin kann ausgewählt werden, ob die Cluster gleichmäßig über die Bildfläche verteilt oder ob diese zufällig platziert werden. Der Flächenanteil weißer Pixel ist dabei mit 20 % konstant eingestellt, woraus für jeden Cluster die Anzahl weißer Pixel bestimmt wird. Die radiale Verteilung der weißen Pixel um das Clusterzentrum folgt einer Normalverteilung nach Formel 6-3.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_p - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}}$$

Formel 6-3

Hierbei ist x_p die Entfernung eines Pixels vom Clusterzentrum, μ_p der durchschnittliche Abstand und σ_p die Standardabweichung der Verteilung der Abstände. Mit Zunahme der Standardabweichung wird der Cluster daher homogener. Die Standardabweichung wird nach Formel 6-4 durch die Fläche W des Cluster und den Clusterbreitenfaktor CWF bestimmt.

$$CWF = \frac{\sigma_p}{W} \quad \text{Formel 6-4}$$

Die Gesamthomogenität des Bildes steigt bei einer Erhöhung der Clusteranzahl n_c und Zunahme des Clusterbreitenfaktors CWF . Auf Basis dieses Ansatzes können Bilder mit verschiedenen einstellbaren Verteilungseigenschaften erzeugt werden.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation werden zwei Sets an Bildern mit gleichmäßig angeordneten (siehe Abbildung 0-2 im Anhang) und zufällig verteilten Clustern (siehe Abbildung 0-3 im Anhang) erzeugt. In jedem Set werden Bilder mit fünf verschiedenen Clusteranzahlen und neun verschiedenen Clusterbreitenfaktoren gemäß Tabelle 6-3 erstellt. Im Falle der Bilder mit zufällig verteilten Clustern werden für jede Parameterstufenkombination fünf Bilder generiert. Aufgrund der sich ändernden Homogenität wird die Präzision der verschiedenen Methoden anhand der simulierten Bilder untersucht. Durch die unterschiedliche Verteilung der Cluster der beiden Sets wird weiterhin die Robustheit der Methoden gegenüber einer Änderung der Faserstruktur genauer betrachtet. Speziell der Vergleich der fünf verschiedenen Bilder mit gleichen Parametern innerhalb des Sets mit zufällig verteilten Clustern erlaubt hierauf Schlüsse zu ziehen. Weiterhin erfolgt eine Bewertung der Methoden ohne den Einfluss des Preprocessings.

Tabelle 6-3: Parameterstufen für die Generierung von simulierten Bildern

Einstellparameter	Parameterstufen
Clusteranordnung	gleichmäßig; zufällig
Clusteranzahl n_c	1; 9; 100; 900; 10.000
Clusterbreitenfaktor CWF	0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 50

6.1.2.2 Analyse realer Durchlichtaufnahmen

Zusätzlich zu den simulierten Bildern werden außerdem reale Durchlichtbilder verschiedener Faserstrukturen untersucht. Alle Bilder werden mittels des in 5.2.1 vorgestellten Equipments aufgenommen und zeigen Proben mit 400 x 400 mm Größe. Vor der Untersuchung mit den ausgewählten Methoden werden alle realen Durchlichtbilder einheitlich vorverarbeitet, um negative Einflüsse während der Bildaufnahme zu eliminieren. Hierfür wird zuerst ein Gauss-Filter mit 3 x 3 Pixeln angewendet, um durch die Aufnahme erzeugtes Bildrauschen zu entfernen. Anschließend werden mittels einer Histogramm-Äqualisation durch die Hintergrundbeleuchtung hervorgerufene Ungleichmäßigkeiten entfernt.

Es werden insgesamt drei Sets mit Bildern von je fünf unterschiedlichen Proben aufgenommen, wovon je ein Bild in Abbildung 6-2 dargestellt ist. Set A besteht aus Bildern von auf der Faserblas-Versuchsanlage produzierten Preforms. Diese werden mit einem Glasroving vom Typ *ADVANTEX R25 HX14* der Firma *R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH* (Waldenbuch) mit einer Faserfeinheit von 2400 tex hergestellt und weisen ein Flächengewicht von ca. 1250 g/cm² auf. Das zweite Set B enthält Aufnahmen von Proben einer genadelten Glasfasermatte mit der Bezeichnung *KN CR 550/60* der Firma *P-D Glasseiden GmbH* (Oschatz), welche ein Flächengewicht von 610 g/cm² aufweist. Die Matte enthält als Besonderheit eine zusätzliche Lage eines groben Gewebes zur Fixierung der Fasern, welche auf den Aufnahmen eindeutig sichtbar ist (vgl. Abbildung 6-2 (b)). Set C besteht aus Aufnahmen von Proben eines ebenfalls von der Firma *P-D Glasseiden GmbH* hergestellten pulvergebundenen Vlieses (Bezeichnung: *MA 111-450*) mit einer Flächenmasse von 450 g/cm². Dieses weist subjektiv bewertet eine sehr gleichmäßige Faserverteilung auf.

Da die Faserstrukturen in Set B und Set C in einem industriellen qualitätsgesicherten Bandprozess hergestellt werden, kann eine gleichmäßige Verteilung der Eigenschaften vorausgesetzt werden. Durch Vergleich der fünf bestimmten Homogenitätswerte innerhalb eines Sets kann somit auf die Präzision einer Methode geschlossen werden. Durch Vergleich der Sets untereinander wird eine Aussage über das Auflösungsvermögen der Methode und die Eignung zur Untersuchung von Faserstrukturen mit unterschiedlichen Charakteristiken getroffen.

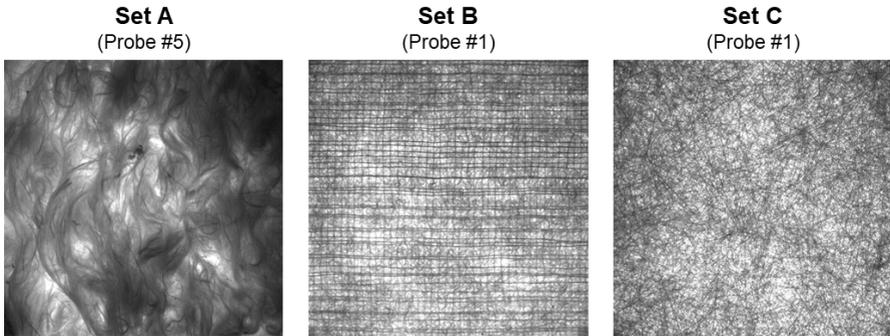


Abbildung 6-2: Durchlichtbilder von realen Faserstrukturen

6.1.3 Ergebnisse und Bewertung der Methoden

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung der simulierten und realen Bilder vorgestellt. Auf Basis der Ergebnisse werden die Methoden anschließend bewertet und eine für die weiteren Untersuchungen in Abschnitt 7 geeignete Methode ausgewählt.

Mittels der in (Moll & Wang et al. 2020) durchgeführten Untersuchungen wird gezeigt, dass die untersuchten quadrantenbasierten Methoden durch die Größe der Bildausschnitte beeinflusst werden. Eine höhere Zahl an Bildausschnitten und damit Verkleinerung deren Größe führt dabei zu einer geringeren Homogenität. Dies ist darauf zurückzuführen, dass über die Mittelwertbildung der Grauwerte von größeren Bildausschnitten die Varianz innerhalb eines Bildausschnittes ausgemittelt wird. Für eine vergleichende Bewertung muss daher die Anzahl an Bildausschnitten konstant gehalten werden. Weiterhin wird gezeigt, dass bei Bildern größer als 500 x 500 Pixel die Größe des Bildausschnittes (eine konstante Anzahl von Bildausschnitten vorausgesetzt) keinen Einfluss auf den Homogenitätsindex hat.

6.1.3.1 Ergebnisse der Untersuchung simulierter Bilder

Die generierten Bilder werden mit den sechs verschiedenen Methoden untersucht, wobei für die quadrantenbasierten Methoden eine Anzahl von $8 \times 8 = 64$ Bildausschnitten gewählt wird. In Abbildung 6-3 sind die errechneten Homogenitätsindizes in Abhängigkeit des Clusterbreitenfaktors *CWF* für eine gleichmäßige und zufällige Verteilung von jeweils 100 Clustern gegeben. Für die Untersuchung der Bilder mit zufälliger Verteilung

wird der Mittelwert aus den fünf Bildern errechnet und mit der Standardabweichung in Abbildung 6-3 aufgetragen. Die Ergebnisse für die untersuchten weiteren Clusteranzahlen sind im Anhang zu finden.

Der als Referenzwert errechnete Variationskoeffizient (Methode 1) bleibt für alle Clusterbreitenfaktoren konstant. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Falle von Bildern, die nur aus schwarzen und weißen Pixeln bestehen, lediglich der Flächenanteil an weißen Pixeln, aber keine Verteilung ausgegeben wird. Da der Flächenanteil bei der Bildgenerierung konstant gesetzt werden, ändert sich der Variationskoeffizient daher nicht.

Alle anderen Methoden zeigen eine zunehmende Homogenität (beachte Werteentwicklung des Homogenitätsindex (Tabelle 6-2)) bei einer Zunahme des Clusterbreitenfaktors. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da eine Zunahme der Clusterbreite zu einer gleichmäßigeren Verteilung der weißen Pixel führt. Weiterhin wird für alle Methoden festgestellt, dass eine gleichmäßige Anordnung der Cluster zu einem höheren Homogenitätswert als eine zufällige Anordnung führt.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Methoden 3 und 5 ist festzustellen, dass diese bereits bei geringen Werten für den Clusterbreitenfaktor an den Randbereich ihres Wertespektrums gelangen. Dies bedeutet, dass diese Methoden ein sehr geringes Auflösungsvermögen bei der Untersuchung von Bildern mit hoher Homogenität aufweisen, da eine Veränderung der Homogenität nur zu einer kleinen Änderung des jeweiligen Indexes führt. Methode 4 zeigt bei geringen Clusterbreitenfaktoren ein lineares Verhalten, was bedeutet, dass in diesem Bereich keine Unterscheidung der Homogenität auf Basis des errechneten Indexes möglich ist. Weiterhin zeigt diese Methode im mittleren Bereich des Wertespektrums eine sehr hohe Standardabweichung. Dies ist auf die abschnittsweise definierte Berechnung des Indexes mit Abschnittswechseln bei 0 und -0,5 (vgl. (Chhabra 2003)) zurückzuführen, welche bei kleinen Änderungen des Dispersionsindex zu einer großen Änderung des Homogenitätsindex führen.

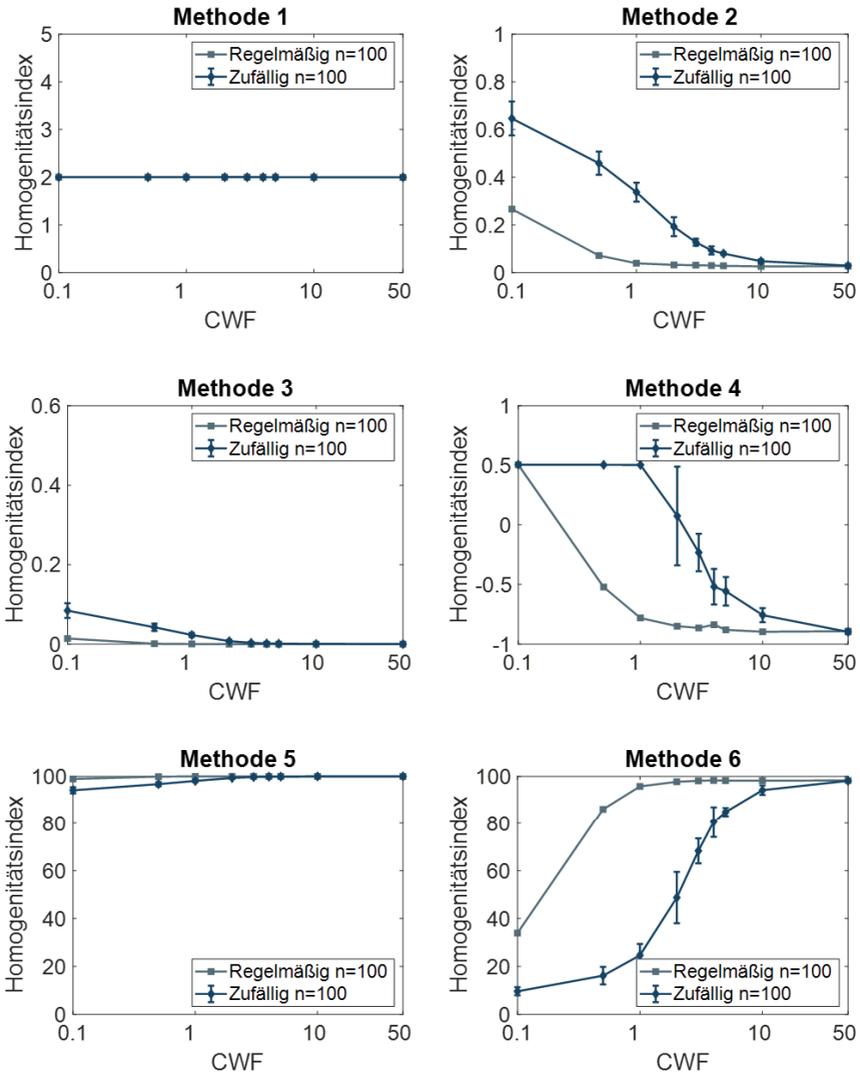


Abbildung 6-3: Homogenitätsindizes der simulierten Bilder mit gleichmäßig und zufällig verteilten 100 Clustern in Abhängigkeit des Clusterbreitenfaktors

Der mittels Methode 6 errechnete Homogenitätsindex erstreckt sich über einen breiten Wertebereich. Die Methode weist somit eine gute Auflösung für die Bewertung von Bildern mit unterschiedlichsten Homogenitäten auf. Speziell im mittleren Wertespektrum fällt auch bei dieser Methode eine hohe Standardabweichung bei der Untersuchung der verschiedenen Bilder mit zufällig verteilten Clustern auf.

Methode 2 führt zu einem gleichmäßig verlaufenden Homogenitätsindex, welcher bis zu einem hohen Clusterbreitenfaktor eine Bewertung der Homogenität erlaubt. Die festgestellte Standardabweichung der errechneten Homogenitätsindizes für das zufällig verteilte Bildset betragen weniger als 5 % und sind gleichmäßig über das Wertespektrum verteilt.

6.1.3.2 Ergebnisse der Untersuchung realer Durchlichtbilder

In Abbildung 6-4 werden die über fünf Bilder je Set kalkulierten Mittelwerte der errechneten Homogenitätsindizes der Durchlichtbilder von realen Faserstrukturen gezeigt. Der angetragene Fehlerbalken entspricht dabei der Standardabweichung. Durch alle Methoden wird für die fasergeblasenen Preforms in Set A eine deutlich geringere Homogenität errechnet. Set C weist auf Basis aller Methoden eine geringfügig höhere Homogenität als Set B auf. Dies ist auf die angesprochene zusätzliche Gewebestruktur zur Fixierung der Vliese aus Set B zurückzuführen, welche eine Unregelmäßigkeit der Faserstruktur darstellt. Die generelle Einstufung der Sets entspricht dem subjektiven Eindruck bei der manuellen Betrachtung der Durchlichtaufnahmen.

Es wird weiterhin festgestellt, dass die Standardabweichung im Falle aller Methoden jeweils bei der Bewertung des Bildsets A die größte Standardabweichung aufweist. Dies ist auf die diskrete Produktionsweise der fasergeblasenen Preforms zurückzuführen, welche gegenüber den industriell gefertigten Vliesstoffen zu höheren Abweichungen führt, und ist aufgrund der Vorerfahrungen aus dem Stand der Forschung zu erwarten. Die Methoden 2 und 3 weisen die geringste Standardabweichung für Sets B und C auf. Unter der in Abschnitt 6.1.2.2 begründeten Annahme, dass die Eigenschaften der Vliese innerhalb dieser Bildsets gleichbleibend sind, bleibt somit festzuhalten, dass diese Methoden die höchste Präzision zur Bestimmung eines Homogenitätsindex aufweisen.

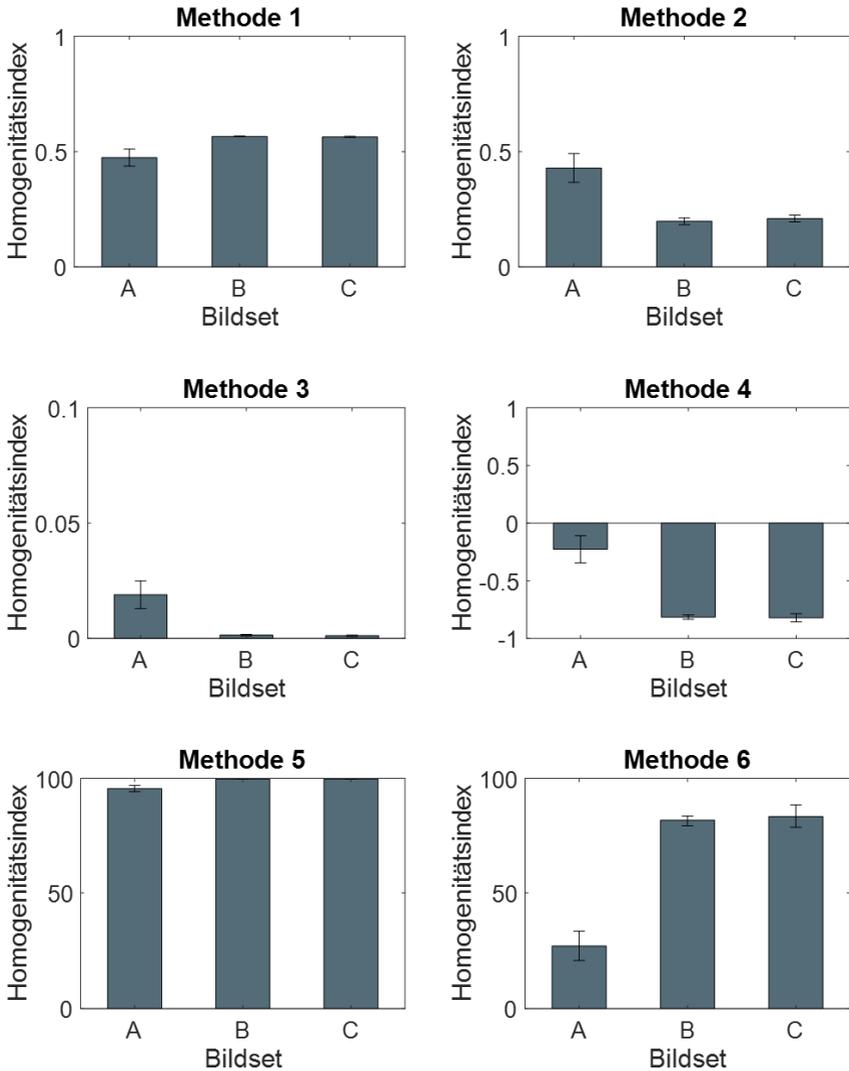


Abbildung 6-4: Mit Hilfe der ausgewählten Methoden bestimmte Homogenitätsindizes der Durchlichtbilder von realen Faserstrukturen

6.1.3.3 Bewertung der Methoden

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen die Eignung der verschiedenen untersuchten Methoden und ihre Stärken und Schwächen. Es konnte festgestellt werden, dass alle Methoden für eine Bewertung der Homogenität auf Basis von Durchlichtaufnahmen geeignet sind und die Homogenitätsunterschiede zwischen fasergeblasenen Preforms und industriell hergestellten Vliesen unterschieden werden können. Für einen Vergleich von fasergeblasenen Preforms untereinander sind allerdings ein hohes Auflösungsvermögen und eine hohe Präzision der Methoden erforderlich.

Die Untersuchung der simulierten Bilder zeigt, dass die Methoden 3 und 5 aufgrund des schlechten Auflösungsvermögens für die Bewertung von fasergeblasenen Preforms nicht geeignet sind. Speziell für Methode 5 wird dies durch die Analyse der realen Durchlichtbilder bestätigt. Methode 4 zeigt den Nachteil der abschnittswisen Definition des Homogenitätsindex, was dazu führt, dass die Indexwerte im mittleren Bereich (zufällige Verteilung) stark streuen und Verteilungen mit niedriger Homogenität nicht ausgewertet werden können, da sie einen konstanten Indexwert von 0,5, was einer geclusterten Verteilung entspricht, erhalten. Methode 6 zeigt ebenfalls eine geringe Präzision bei der Untersuchung der simulierten Bilder, was durch die hohen Standardabweichungen bei der Bewertung der Realbilder aus Set B und C bestätigt wird.

Methode 2 zeigt sowohl bei der Untersuchung der simulierten als auch der realen Bilder eine gute Eignung. Der errechnete Homogenitätsindex hat eine gute Auflösung und kann über einen weiten Bereich genutzt werden. Weiterhin zeigt diese Methode die höchste Präzision bei der Ermittlung der Homogenität. Auf Basis dieser Untersuchungsergebnisse wird diese Methode des quadrantenbasierten Variationskoeffizienten nach (Tascan & Nohut 2015) für die weitere Bewertung der fasergeblasenen Preforms und dem Vergleich mit herkömmlichen Vliesstoffen im Rahmen der Dissertation genutzt.

6.2 Bestimmung der Faserorientierung

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung und Untersuchung von Methoden zur Bestimmung der Faserorientierungsverteilung und der lokalen Faserorientierung behandelt. Die Entwicklung und Implementierung der hier präsentierten Methoden in der Software *MATLAB* erfolgt im Rahmen der angeleiteten Masterarbeit (A_Wang 2019). Die Methoden und Ergebnisse werden ebenfalls in (Moll & Wang et al. 2021) veröffentlicht.

6.2.1 Methoden zur Bestimmung der Faserorientierung

Die Faserorientierungsverteilung $\rho(\theta)$ (engl. *Orientation Distribution Function (ODF)*) gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Faser einen bestimmten Winkel θ hat und ist durch Formel 6-5 definiert. n_θ bezeichnet hierbei die Anzahl an Pixeln in Richtung dieses Winkels θ (Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996a).

$$\rho(\theta) = \frac{n_\theta}{\sum_1^{180} n_\theta} \quad \text{mit} \quad \sum_1^{180} \rho(\theta) = 1, \theta = 1, 2, \dots, 180 \quad \text{Formel 6-5}$$

Die Faserorientierung ist eine wichtige Eigenschaft von Faserstrukturen in technischen Anwendungen, da unter anderem die mechanischen Eigenschaften hiervon abhängen. In Zeiten vor dem Aufkommen von industrieller Bildanalyse wurde die Faserorientierung über Verfahren wie Laserstreuung, mechanische Versuche und direktes manuelles Tracking festgestellt (Quinn & Georgakoudi 2013). Nachteile dieser Methoden sind die lange Analysezeit, ungenaue Ergebnisse und teilweise teures Analyseequipment. Bildanalysemethoden bieten dem gegenüber den Vorteil, dass diese mit günstigeren Gerätschaften in kürzerer Zeit eine Analyse ermöglichen. Basierend auf den Bildanalysetechniken können die Methoden in verschiedene Kategorien eingeteilt werden.

Die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung auf Basis der schnellen Fourier Transformation (engl. *Fast Fourier Transform (FFT)*) ist die am häufigsten vorkommende Methode (Pourdeyhimi & Dent et al. 1997a; Ghassemieh & Acar et al. 2002; Enomae & Yoon-Hee et al. 2006; Yongping & Zengbo et al. 1998; Marquez 2006; Sander & Barocas 2009). Zur Berechnung werden die Aufnahmen in den Frequenzbereich transformiert und das Leistungsspektrum berechnet. Die Energien in die Richtungen von 0° bis 180° werden anschließend aufsummiert, um die Faserorientierungsverteilung zu bekommen. Die Methode gilt als besonders präzise zur Bestimmung der maximalen Faserorientierung, allerdings wird die Varianz der Verteilung überschätzt (Pourdeyhimi & Dent et al. 1997a).

Eine Weiterentwicklung der Methode (im Folgenden Blockwise FFT (BFFT) genannt) wird in (Tunák & Antoch et al. 2014) präsentiert. Dort wird das Bild vergleichbar mit der bereits vorgestellten Quadrantenmethode in einzelne Bildausschnitte unterteilt und dann mittels FFT die Vorzugsrichtung in jedem Bildausschnitt berechnet. Dieser Ansatz erlaubt eine lokale Information über die Faserorientierung. Weiterhin untersuchen

Tunak et al. die Verwendung der Momentenanalyse zur Bestimmung der Faserorientierungsverteilung in jedem Bildausschnitt, welche allerdings eine geringere Präzision als FFT aufweist und kombinieren diese Information mit den Ergebnissen aus der Berechnung mittels FFT. Die Momentenanalyse findet weiterhin in (Lijuan & Weidong 2017) Anwendung.

In weiteren Arbeiten wird die Hough Transformation (HT) zur Bestimmung der Faserorientierung benutzt (Pourdeyhimi & Kim 2002; Bin & Xiaoming et al. 2017; Bugao & Ling 1997; Lijuan & Weidong 2017). Hierzu wird das Bild in den Hough-Raum konvertiert. Die Lage und Intensität der Peaks erlaubt dann eine Information über die Faserorientierung. Ähnlich wie für die FFT wird für die Hough Transformation ebenfalls ein quadrantenbasierter Ansatz (analog daher BHT genannt) untersucht (Bayan & Levitt et al. 2009).

Eine weitere Methode stellt die Strukturtensor-Methode dar, welche erstmals in (van Vliet & Verbeek 1995) für die Analyse von Materialien angewendet wird. Diese basiert auf der Auswertung des Grauwertgradienten (Knutsson 1989). (Krause & Hausherr et al. 2010), (Sabiston & Pinter et al. 2018) und (Schöttl & Dörr et al. 2020) nutzen diese Methode zur Analyse von Computertomographie-Aufnahmen faserverstärkter Materialien in zwei- und dreidimensionaler Richtung. Ein großer Vorteil dieser Methode ist die Bestimmung der Orientierung an jedem einzelnen Bildpixel. Dies setzt allerdings hochaufgelöste Bilder mit hohem Kontrast voraus. Nachteilig ist allerdings die geringe Präzision bei der Bestimmung der Faserorientierungsverteilung (Davidovic et al. 2011).

Die Berechnung von Strömungsfeldern basierend auf der Annahme, dass Kanten in einem Bild repräsentativ für die Faserorientierung sind, erlaubt ebenfalls die Berechnung der Faserorientierungsverteilung (Pourdeyhimi & Dent 1997b). Hierbei wird über eine Kantendetektion ein Strömungsvektor in einem kleinen Bildausschnitt bestimmt. Alternativ kann der Strömungsvektor auch über die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden (Hong & Wan et al. 1998). Eine ähnliche Herangehensweise verfolgt das sogenannte Line Fitting, bei welchem die Faserkanten detektiert und Bézier-Kurven entlang dieser Kanten angepasst werden (Jue & Bugao et al. 2018). Diese Kurven werden anschließend in geradlinige Abschnitte eingeteilt, deren Orientierung einfach bestimmt werden kann. Weitere Untersuchungen befassen sich mit dem direkten Tracking von Fasern, bei welchem die Bilder zuerst skelettiert werden, um die Breite der Fasern auf ein Pixel zu reduzieren und anschließend die Richtung der zusammenhängenden

Pixel untersucht wird (Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996b). Beide Methoden setzen deutliche Kanten der Fasern voraus, weshalb sie vor allem für die Analyse von Mikroskop-Bildern eingesetzt werden, bei welchen die einzelnen Fasern gut erkennbar sind.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Faserorientierung basiert auf der Summation gewichtete Orientierungsvektoren (Quinn & Georgakoudi 2013). Hierbei wird die Änderung der Bildintensität in verschiedene Richtungen um ein einzelnes Pixel untersucht. Es wird festgestellt, dass die Methode weniger präzise als die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung auf Basis der FFT ist, allerdings eine geringere Rechenzeit benötigt.

Ein entscheidendes Kriterium für die Genauigkeit aller Methoden ist die Art der Bildaufnahme. In Tabelle 0-4 im Anhang ist eine Übersicht des vorgestellten Stands der Forschung mit dem jeweils genutzten Bildaufnahme-Equipment und des untersuchten Materials bzw. Musters gegeben. In einigen der vorgestellten Arbeiten werden die zu analysierenden Bilder mit Lichtmikroskopen oder Rasterelektronenmikroskopen aufgenommen, was die Darstellung einzelner Fasern erlaubt. Im Fall der Analyse der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Preforms, werden die Bilder jedoch mit einer Kamera und Objektiv ohne Vergrößerung aufgenommen. Aufgrund der Dicke und Beschaffenheit der Preforms sind keine einzelnen Fasern wie auf Mikroskopbildern, sondern Faseransammlungen und Rovingstücke zu sehen. Es ist daher eine Adaptation der Methoden notwendig, um auch die Faserorientierung dieser großflächigeren Proben bestimmen zu können. Hierbei kommt dem Preprocessing zur verbesserten Wahrnehmung der Fasern eine besondere Bedeutung zu.

Für die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung ist eine besonders robuste Methode, welche die gesamten Bildinformationen nutzt, die beste Wahl. Die besten Ergebnisse liefert hierfür die quadrantenbasierte FFT. Im von (Tunák & Antoch et al. 2014) vorgestellten Ansatz geht die dominierende Orientierung in jedem Bildausschnitt mit gleichem Gewicht in die Bestimmung der Gesamtorientierung ein. Dies ist lediglich bei einer geringen Anzahl an Fasern (wie in den dort analysierten Elektronenmikroskop-Bildern) und einer starken Vorzugsorientierung sinnvoll. Aufgrund der hohen Dichte an Fasern in fasergeblasenen Preforms ändert sich die Faserstruktur in den einzelnen Bildausschnitten deutlich. Die Methode wird daher um einen Gewichtungsfaktor für jeden Bildausschnitt ergänzt. Weiterhin wird die lokale Faserorientierung bestimmt, um

auch eine Information über die räumliche Verteilung der Orientierung zu bekommen. Von den dargestellten Methoden weist hierfür die Strukturtensor-Methode das größte Potential auf. Aufgrund der mangelhaften Präzision dieser Methode wird diese im Rahmen der Dissertation weiterentwickelt und verbessert, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

6.2.2 Weiterentwicklung der Methoden

Im Folgenden wird die Entwicklung und Funktionsweise der im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten Methoden zur Bestimmung der Faserorientierung vorgestellt. Die Reihenfolge der Methoden und die Einzelschritte jeder Methode sind in Abbildung 6-5 dargestellt.

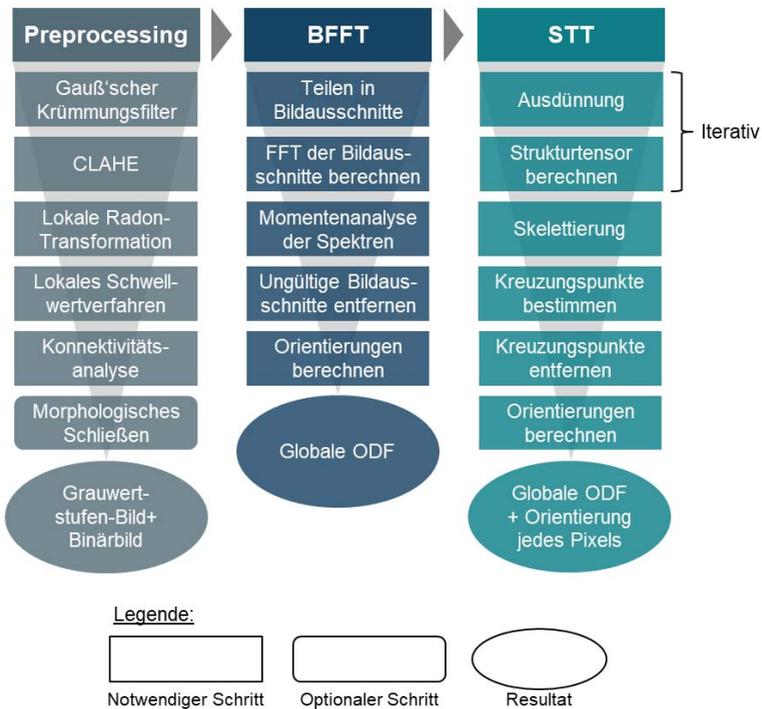


Abbildung 6-5: Ablauf des Methodensets zur Bestimmung der Faserorientierung und deren Einzelschritte

Es handelt sich dabei um ein Methodenset bestehend aus dem Preprocessing der Bilder, der Bestimmung der Faserorientierungsverteilung auf Basis einer quadrantenbasierten schnellen Fourier-Transformation (BFFT) und der Bestimmung der lokalen Faserorientierung mit einer erweiterten Strukturtensor-Methode (engl. *Structure Tensor Thinning (STT)*).

6.2.2.1 Preprocessing

Die aufgenommenen Durchlichtbilder bedürfen einem Preprocessing zur Eliminierung von Bildstörungen und der Verbesserung der nachfolgenden Orientierungsbestimmung. Durch das Preprocessing wird Rauschen aus den Bildern entfernt und der Kontrast der einzelnen Fasern und Rovings erhöht. Weiterhin werden die aufgenommenen Grauwertstufen-Bilder für die Anwendung der nachfolgenden Methoden binarisiert.

In einem ersten Schritt wird Bildrauschen aus den Aufnahmen entfernt. Hierfür kommt ein Gauß'scher Krümmungsfiler zur Anwendung. Durch diesen wird eine gute Rauschentfernung ohne eine Glättung von Kanten erreicht (Tunák & Antoch et al. 2014). Zur Kontraststeigerung der Bilder werden eine kontrastbegrenzte adaptive Histogramm-Äqualisation (Pizer & Amburn et al. 1987) und eine lokale Radon-Transformation kombiniert. Die Histogramm-Äqualisation verstärkt dabei den Kontrast zwischen den Faserstrukturen und dem Hintergrund. Die Radon-Transformation verbessert aufgrund des schmalen Kernels den Kontrast entlang der Kanten der Fasern. Anschließend wird das Bild mittels eines lokalen adaptiven Schwellwertverfahrens binarisiert. Um kleine Fehlstellen im binarisierten Bild zu schließen, werden final noch eine Konnektivitätsanalyse und optional ein morphologisches Schließen angewandt. In Abbildung 6-6 sind die resultierenden Bilder nach dem Preprocessing dargestellt. Es wird deutlich, dass die Detailstruktur der Fasern deutlich hervorgehoben wird.

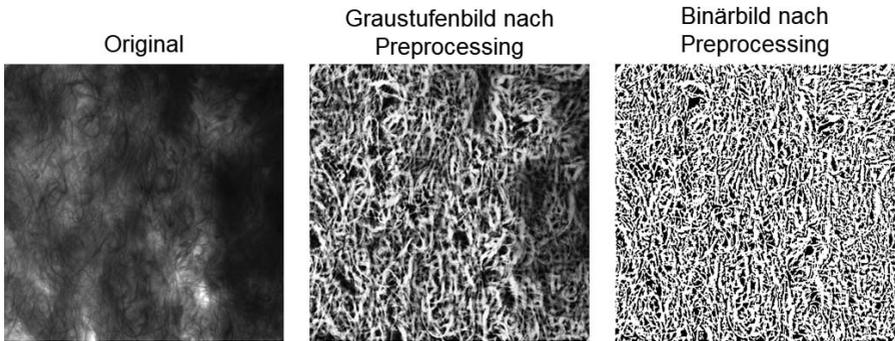


Abbildung 6-6: Durchlichtaufnahmen vor und nach dem Preprocessing

6.2.2.2 Quadrantenbasierte schnelle Fourier-Transformation (BFFT)

Im Rahmen dieser Dissertation wird die in (Tunák & Antoch et al. 2014) vorgestellte Methode um einen Gewichtungsfaktor für jeden Bildausschnitt erweitert. In diesen Gewichtungsfaktor fließen zum einen die Faserdichte in jedem Bildausschnitt und zum anderen die spezifische Ausrichtung der Fasern ein. In einem binarisierten Bild wird die Faserdichte als der Flächenanteil n_i an weißen Pixeln (=Fasern) angegeben. Die spezifische Ausrichtung der Fasern wird durch das Verhältnis von langer Achse l_i zu kurzer Achse s_i der Fasern innerhalb des Bildausschnitts definiert. Dies bedeutet, dass Fasern mit eindeutigerer Orientierung eine höhere Gewichtung bekommen. Der Gewichtungsfaktor W_i ergibt sich daher mit

$$W_i = \frac{n_i * a * \frac{l_i}{(l_i + s_i)}}{N} \quad \text{mit} \quad N = \sum n_i \quad \text{Formel 6-6}$$

wobei a ein Faktor zur Gewichtung der dominierenden Faserorientierung ist. Der Pseudocode der Implementierung der gesamten Methode ist im Anhang in Pseudocode 0-1 gegeben.

6.2.2.3 Erweiterte Strukturtensor-Methode (STT)

Um das Defizit der geringen Präzision der Strukturtensor-Methode zu beheben, wird diese Methode im Rahmen der Dissertation erweitert. Die hauptsächliche Verbesserung besteht im Hinzufügen eines Ausdünnungsverfahrens. Hierbei wird die Fa-

serstruktur iterativ ausgedünnt und jeweils die Orientierung bestimmt. Der iterative Ablauf ist in Abbildung 6-5 dargestellt. In jeder Iteration werden zuerst der Strukturtenor und daraus die Faserorientierung berechnet. Dann werden die Kantenpixel detektiert und deren berechnete Orientierung zwischengespeichert. Danach werden die Fasern durch die Entfernung der Kantenpixel ausgedünnt. Im letzten Iterationsschritt wird die Orientierung der verbliebenen Struktur bestimmt. Dieses Vorgehen ermöglicht die Bestimmung der Orientierung von unterschiedlich breiten Faserstrukturen und Rovings.

Ein weiteres festgestelltes Defizit ist im Bereich der Kreuzungsstellen von verschiedenen Fasern (A_Wang 2019, S.31). In diesen Bereichen kann keine eindeutige Orientierung bestimmt werden, was die Berechnung der Faserorientierungsverteilung negativ beeinflusst. Es wird deshalb ein weiterer Schritt zur Entfernung dieser Kreuzungspunkte hinzugefügt. Hierzu werden zuerst die Skelettlinien mittels einer Mediale-Achse-Transformation bestimmt. Hierbei kommt die Achtfach-Konnektivität wie in (Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996b) vorgeschlagen zur Anwendung. Die Kreuzungsstellen können dann durch eine morphologische Analyse identifiziert werden. Der Bereich um diese Pixel wird daraufhin von der Berechnung der Faserorientierungsverteilung ausgenommen. Der algorithmische Ablauf der gesamten Methode ist als Pseudocode im Anhang (Pseudocode 0-2) gegeben.

6.2.3 Experimentelle Untersuchung

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur experimentellen Untersuchung der entwickelten Methoden vorgestellt. Dieses stützt sich auf simulierte Bilder und auf Durchlichtaufnahmen realer Vliese.

6.2.3.1 Analyse simulierter Bilder

Bei der Validierung von Methoden zur Bestimmung der Faserorientierung besteht die Herausforderung darin, dass aus den in Abschnitt 6.2.1 genannten Gründen nur sehr schwer die tatsächliche Faserorientierung zur Verwendung als „Ground Truth“ bestimmt werden kann. Im Rahmen dieser Dissertation werden daher simulierte Bilder mit festgelegten Faserorientierungsverteilungen in Anlehnung an (Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996a) generiert.

Um ein möglichst gutes TestszENARIO zu erhalten, müssen diese simulierten Bilder möglichst die gleichen Features wie reale Durchlichtaufnahmen aufweisen. Auf Basis der

empirischen Analyse vorhandener Durchlichtbilder werden die Features Faserlänge, Faserbreite, Faserkrümmung, Faseranzahl bzw. -dichte, sowie die Faserorientierungsverteilung identifiziert. Über einen in das *MATLAB*-Tool integrierten Algorithmus, dessen Implementierung als Pseudocode im Anhang (Pseudocode 0-3) gegeben ist, werden die Bilder generiert. Die Faserorientierungsverteilung wird dabei über die Angabe der dominierenden Orientierungen und deren Varianz angegeben. Hieraus wird eine gesamte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion *WDF* errechnet. Jede Faser wird dann einzeln mit den angegebenen Features Länge, Dicke und Krümmung erzeugt, entsprechend der *WDF* rotiert und anschließend zufällig platziert. Final wird dann die tatsächliche Faserorientierungsverteilung als Referenz bestimmt. Durch die exakte Referenz erlauben die simulierten Bilder somit eine Bewertung der Präzision der Methoden. Da es sich bereits um binarisierte Bilder handelt, können die Methoden weiterhin ohne einen Einfluss des Preprocessing bewertet werden.

Für die eigentliche Validierung der Methoden werden drei Sets mit verschiedenen Features der Fasern genutzt. Für jedes Set werden fünf verschiedene Modelle für die Faserorientierungsverteilung variierend nach Anzahl der dominierenden Orientierungen n_θ und deren Varianz σ_n erzeugt. Die Anzahl der dominierenden Orientierungen und deren Varianz nehmen mit jedem Modell zu, wodurch die Komplexität steigt. Die Daten der erzeugten Bilder sind in Tabelle 6-4 gegeben. Von jedem Modell eines Sets werden fünf Bilder mit einer Größe von 2000 x 2000 Pixeln erzeugt. Ein repräsentativer Teil der Bilder ist im Anhang in Abbildung 0-4 dargestellt.

Tabelle 6-4: Features der erzeugten Bildersets und Modelle

		Modelle ($n_\theta; \sigma_1, \sigma_2, \dots$)				
		Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5
Set 1	Kurz, gekrümmt	1; 10	2; 10, 10	2; 10, 20	2; 10, 20	3; 10, 10, 10
Set 2	Lang, gerade	1; 10	2; 10, 10	2; 10, 20	2; 10, 20	3; 10, 10, 10
Set 3	Lang, gekrümmt	1; 10	2; 10, 10	2; 10, 20	2; 10, 20	3; 10, 10, 10

6.2.3.2 Analyse realer Durchlichtaufnahmen

Für die Validierung der Methoden anhand realer Durchlichtbilder werden dieselben Aufnahmen wie für die Analyse in Abschnitt 6.1.2.2 verwendet (siehe Abbildung 6-2). Aufgrund der auch mit bloßen Auge sichtbaren Charakteristika der Vliese können die Methoden validiert werden. Die Aufnahmen des Bildsets B zeigen eindeutig das zusätzliche grobe Gewebe der Vliese, welches in 0° und 90° Richtung ausgerichtet ist. Auf den Aufnahmen in Bildset C ist ersichtlich, dass es sich hier um ein Vlies mit sehr gleichförmiger Verteilung der Fasern in alle Richtungen handelt. Mit Hilfe der Aufnahmen in Bildset A wird die Eignung der Methoden zur Analyse der komplexen Struktur fasergeblasener Preforms gezeigt.

6.2.4 Ergebnisse und Bewertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Validierung der entwickelten Methoden anhand der simulierten Bilder und der Durchlichtbilder realer Faserstrukturen präsentiert. Auf Grundlage der Ergebnisse werden die Methoden anschließend bewertet und mit dem Stand der Forschung verglichen. In (Moll & Wang et al. 2021) wird bereits gezeigt, dass die um eine Gewichtung erweiterte BFFT-Methode bessere Ergebnisse als der Stand der Technik aufweist.

6.2.4.1 Untersuchung simulierter Bilder

Die mit den in Tabelle 6-4 dargestellten Features generierten 75 Bilder werden mit den beiden Methoden BFFT und STT untersucht und deren Faserorientierungsverteilung (ODF) bestimmt. Auf Basis der in (Moll & Wang et al. 2021) gezeigten Ergebnisse wird eine Größe von 40×40 Pixel für die Bildausschnitte für die BFFT gewählt. Die Anzahl an Iterationen für STT beträgt 15. Die Referenz-ODF der simulierten Bilder und die durch die Methoden bestimmten ODFs werden zur Elimination lokaler Schwankungen und zur besseren Bestimmbarkeit der dominierenden Orientierungen geglättet. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür eine Kernregression mit einem Gauss-Kernel mit einer Bandbreite von 7° verwendet. Zum Vergleich der gemessenen ODF mit der Referenz-ODF wird die Kullback-Leibler-(KL)-Divergenz angewandt (Kullback & Leibler 1951). Diese ist eine statistische Größe, die ein Maß für die Abweichung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung P zu einer anderen Q darstellt und nach Formel 6-7 berechnet wird. Dabei ist $H(P, Q)$ die Kreuzentropie von P und Q und $S(P)$ die Entropie von P .

$$D_{KL}(P||Q) = H(P, Q) - S(P)$$

$$= - \sum_{x \in X} p(x) \log q(x) + \sum_{x \in X} p(x) \log p(x)$$

Formel 6-7

Abbildung 6-7 zeigt die gemittelte Kullback-Leibler-Divergenz zwischen Referenz-ODF und der mittels der Methoden gemessenen ODF für die Analyse der verschiedenen Bildsets und Modelle. Die KL-Divergenz ist daher als Maß für die Genauigkeit zu verstehen. Bei beiden Methoden ist festzustellen, dass die Ergebnisse für die Bildsets 1 und 3 (gekrümmte Fasern) etwa gleich sind und für Bildset 2 (gerade Fasern) etwa den doppelten Wert aufweisen. Vergleicht man die Ergebnisse für die STT mit denen der BFFT so sieht man, dass die KL-Divergenz für die STT lediglich höher als für die BFFT ist.

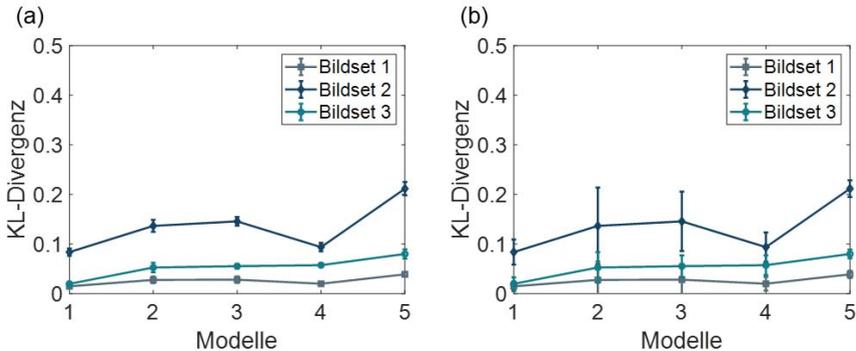


Abbildung 6-7: Kullback-Leibler-Divergenz zwischen Referenz-Faserorientierungsverteilung und berechneter Faserorientierungsverteilung für BFFT (a) und STT (b)

Eine detailliertere Betrachtung der ODF ist in Abbildung 6-8 zu sehen, welche die ODFs eines Bildes mit drei dominierenden Faserorientierungen aus jedem Bildset zeigt. Es ist hierbei festzustellen, dass die Winkel der dominierenden Richtungen durch beide Methoden genau berechnet werden. Es ist weiterhin ersichtlich, dass die Häufigkeit der Orientierungen durch die BFFT mit sehr guter Genauigkeit bestimmt wird. Für die STT fällt auf, dass im Bereich der 90°-Orientierung ein nahezu gleiches Ergebnis wie für die BFFT bestimmt wird, wohingegen eine Überschätzung der Häufigkeit in 0°/180° erfolgt.

Dies führt zu einer höheren Varianz der näher an 0° bzw 180° liegenden dominierenden Orientierungen.

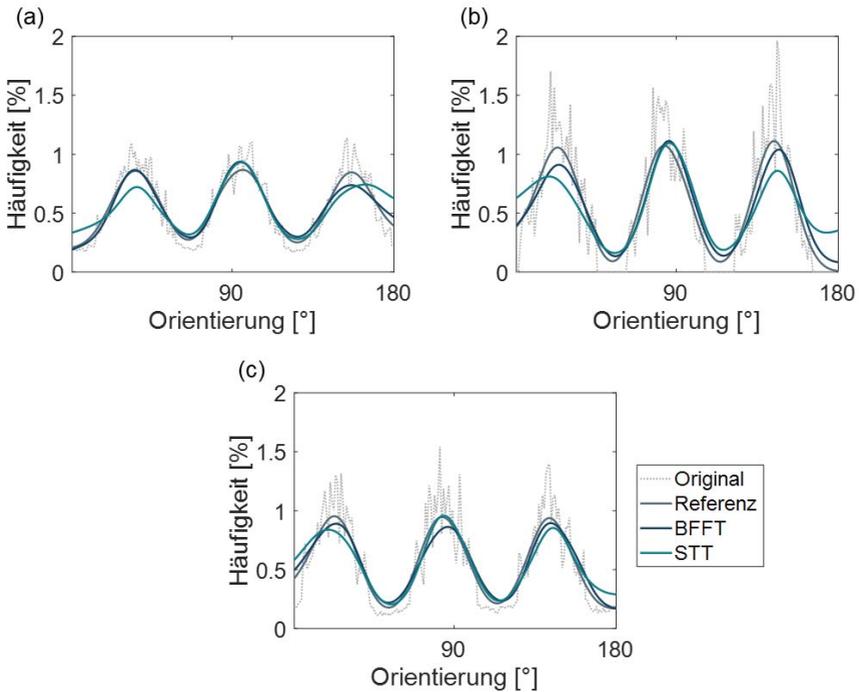


Abbildung 6-8: Faserorientierungsverteilungen für simulierte Bilder aus Bildset 1 (a), Bildset 2 (b) und Bildset 3 (c)

6.2.4.2 Untersuchung realer Bilder

Abbildung 6-9 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der Faserorientierungsverteilung mit BFFT für die drei Sets mit Durchlichtaufnahmen realer Faserstrukturen. Die fasergeblasenen Preforms (Set A) zeigen hierbei eine sehr starke Vorzugsorientierung in 90° . Bildset B weist eine Vorzugsorientierung in 90° und eine stärker ausgeprägte in $0^\circ/180^\circ$ auf. Aufgrund des zusätzlichen Gewebes bei diesen Vliesen wäre eine gleiche

Häufigkeit für die 90°- und 0°/180°-Richtung zu erwarten. Die Vliese aus Bildset C weisen eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Faserorientierung auf, was dem erwarteten Ergebnis entspricht.

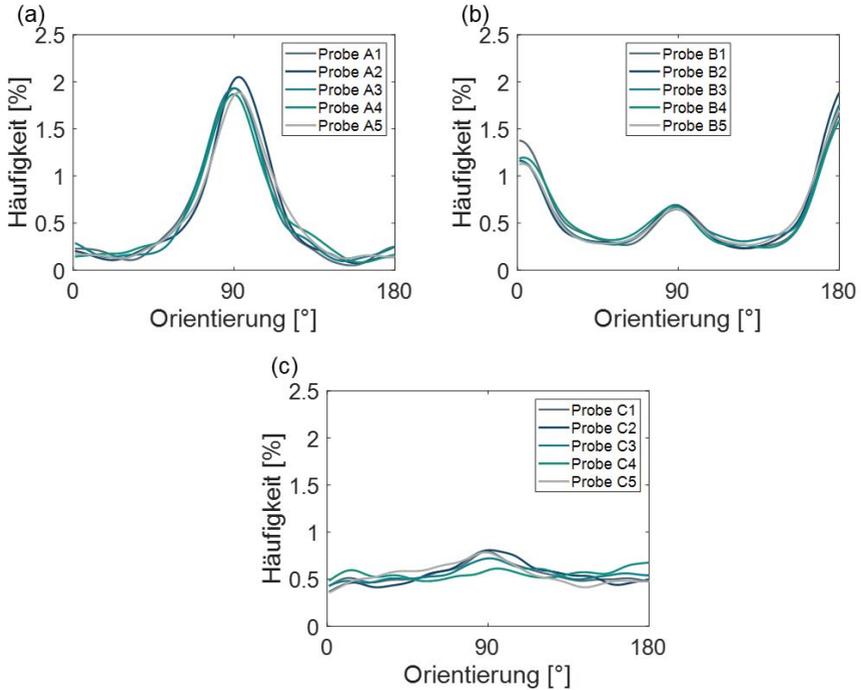


Abbildung 6-9: Bestimmung der Faserorientierungsverteilung mittels BFFT der Aufnahmen in Bildset A (a), Bildset B (b) und Bildset C (c)

Die Ergebnisse der Bestimmung mit STT sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Vergleicht man die Ergebnisse des Bildsets A so stellt man fest, dass mittels STT die Dominanz der 90°-Richtung weniger ausgeprägt ermittelt wird. Hingegen gibt es allerdings eine leichte Häufung der in 0°/180° orientierten Fasern. Die Ergebnisse für Bildset B zeigen ebenfalls die zu erwartenden Vorzugsorientierungen in 90° und 0°/180°. Diese sind allerdings stärker ausgeprägt und zeigen eine geringere Varianz. Für Bildset C wird durch STT eine geringe Vorzugsorientierung in 90° und 0°/180° berechnet.

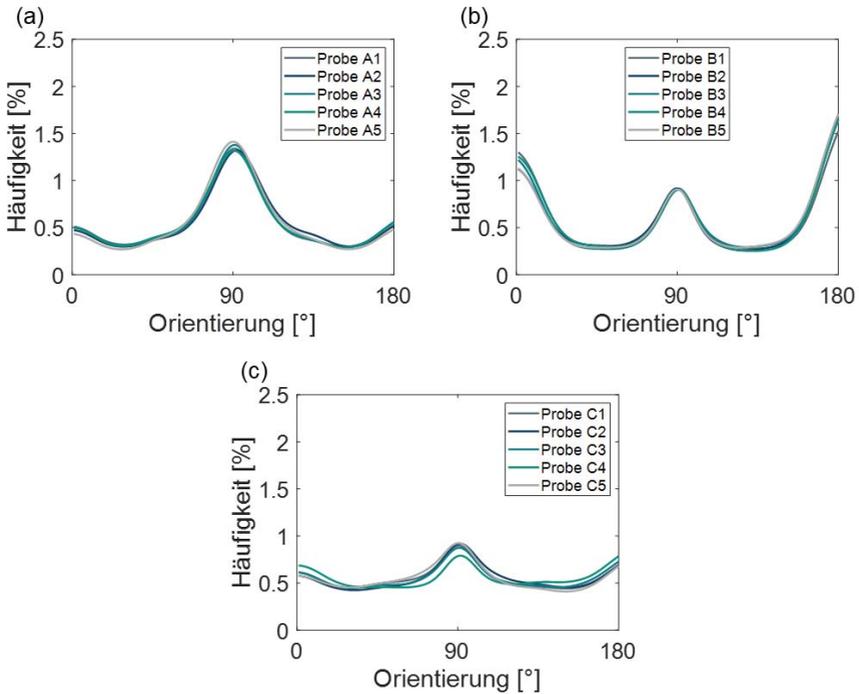


Abbildung 6-10: Bestimmung der Faserorientierungsverteilung mittels STT der Aufnahmen in Bildset A (a), Bildset B (b) und Bildset C (c)

Die mittels STT bestimmte lokale Faserorientierung wird in Abbildung 6-11 für jeweils ein exemplarisches Bild aus jedem Bildset gezeigt. Mittels der Farbwertskala wird die ermittelte Orientierung jedes Pixels dargestellt. Die sehr groben Faserstrukturen und deren Vorzugsorientierung in 90°-Richtung des fasergeblasenen Preforms in Bildset A sind hier klar zu erkennen. Die lokale Betrachtung der Aufnahme aus Bildset B zeigt, dass die Orientierung des Gewebes treffend detektiert wird. Ein großer Anteil der zwischen den dicken Rovings des Gewebes liegenden Bildflächen zeigt allerdings eine Orientierung in 0°-Richtung auf der Farbskala. Das Resultat für die Aufnahme aus Bildset C zeigt sehr feine Faserstrukturen mit einer gleichmäßigen Verteilung. Auch hier ist ein leichtes Übergewicht der Orientierungen nahe zu 0°-Richtung (entspricht blauen Farbtönen) festzustellen.

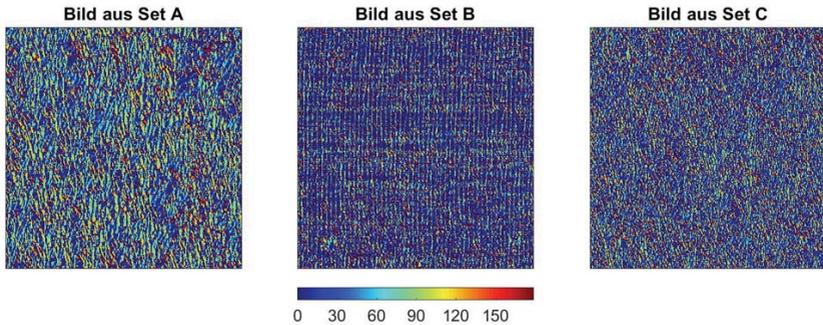


Abbildung 6-11: Lokale Faserorientierung für je eine exemplarische Aufnahme aus den Bildsets

6.2.4.3 Bewertung

Die präsentierten Ergebnisse aus den Untersuchungen mit simulierten Bildern zeigen, dass mittels der quadrantenbasierten schnelle Fourier-Transformation (BFFT) eine sehr genaue Bestimmung der Faserorientierungsverteilung möglich ist. Die dominierenden Faserorientierungen können mit einer Präzision von $\pm 1^\circ$ exakt bestimmt werden.

Die komplett neu entwickelte erweiterte Strukturtenso-Methode (STT) erlaubt ebenfalls eine präzise Ermittlung der dominierenden Faserorientierungen im mittleren Winkelspektrum von 10° bis 170° . Hierbei wird ebenfalls eine Präzision von wenigen Grad erreicht. Dies ist eine signifikante Verbesserung gegenüber den aus dem Stand der Forschung bekannten Genauigkeiten von ca. 10° für die etablierte Strukturtenso-Methode (vergleiche mit den Untersuchungen in (Davidovic et al. 2011)). Es kann allerdings festgestellt werden, dass die Häufigkeiten im Bereich nahe $0^\circ/180^\circ$ durch diese Methode überbewertet werden. Aufgrund der Betrachtung der bestimmten lokalen Faserorientierung der realen Durchlichtaufnahmen, ist dies darauf zurückzuführen, dass für sehr feine Strukturen keine exakte Orientierungsbestimmung möglich ist und diese daher fälschlicherweise als 0° gewertet werden.

Es wird somit festgehalten, dass für eine präzise Bestimmung der Faserorientierungsverteilung und der dominierenden Orientierung(en) über das gesamte Richtungsspektrum die BFFT der STT vorzuziehen ist. Speziell wenn verschiedene ODFs miteinander

zu vergleichen sind, eignet sich die BFFT besser als die STT. Zusätzlich ermöglicht die STT eine Bestimmung der lokalen Faserorientierung. Dies ist besonders hilfreich, wenn die lokale Verteilung der Orientierungen einzelner Proben genauer untersucht werden muss.

Fazit:

In diesem Kapitel werden Methoden zur Charakterisierung der fasergeblasenen Preforms untersucht, weiterentwickelt und bewertet. Die Basis der Methoden bildet eine Durchlichtaufnahme der Preforms, was eine zerstörungsfreie Charakterisierung ermöglicht. Die Integration der untersuchten Methoden in eine *MATLAB*-App mit grafischer Benutzeroberfläche erlaubt eine benutzerfreundliche Analyse der Preforms.

Für die Bewertung der Homogenität wird die Eignung verschiedener Methoden zur Analyse der Preforms untersucht und bewertet. Die Methode 2 des quadrantenbasierten Variationskoeffizienten nach (Tascan & Nohut 2015) zeigt dabei eine gute Auflösung und eine hohe Bandbreite an analysierbaren Faserstrukturen. Weiterhin zeigt diese Methode die höchste Präzision bei der Ermittlung der Homogenität und wird daher für die weiterführenden Untersuchungen im Rahmen der Dissertation angewandt.

Für die Bewertung der Faserorientierung der vorliegenden Preforms sind die etablierten Methoden nur unzureichend geeignet. Es werden daher bestehende Methoden weiterentwickelt und zu einem Methodenset zusammengefasst, welches die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung und der lokalen Faserorientierung erlaubt. Die Validierung anhand fasergeblasener Preforms und kommerzieller Vliese zeigt eine gute Eignung des entwickelten Methodensets. Aufgrund der Überbewertung der $0^\circ/180^\circ$ -Richtung durch die erweiterte Strukturtenso-Methode (STT) ist für die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung die quadrantenbasierte schnelle Fourier-Transformation (BFFT) zu bevorzugen. STT eignet sich hingegen für die optische Validierung der Ergebnisse durch eine Detailanalyse von Preforms.

7 Experimentelle Untersuchung des Einblasprozesses

Dieses Kapitel beschreibt die experimentelle Untersuchung des Einblasprozesses im Faserblasverfahren. Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen den Einblasparametern und den resultierenden Eigenschaften der fasergeblasenen Preforms.

Zunächst erfolgt eine statistische Versuchsplanung. Hierzu werden zuerst die zu untersuchenden Zielgrößen definiert, um dann aus den in Abschnitt 4.3 analysierten Prozessgrößen die relevanten Einflussfaktoren für die Parameterstudie auszuwählen. Anschließend wird ein statistischer Versuchsplan ausgewählt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aufgrund der unzureichenden Erfahrungswerte zu den Einflüssen der Prozessparameter des Faserblasverfahrens in der Literatur die Versuche nach einem Screening-Versuchsplan durchgeführt. Im Anschluss an die Durchführung der Einblasversuche und der Bestimmung der definierten Zielgrößen erfolgen die Auswertung nach statistischen Gesichtspunkten und die Diskussion der Ergebnisse.

7.1 Statistische Versuchsplanung (DoE)

Die statistische Versuchsplanung (engl. *Design of Experiments (DoE)*) dient der effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 4). Die zu untersuchenden Größen werden hierbei als Zielgrößen bezeichnet. Die in einem Versuchsplan enthaltenen Parameter heißen (Einfluss-)faktoren. Die konkreten einzustellenden Werte der Faktoren sind die sogenannten (Faktor-)stufen.

7.1.1 Definition der Zielgrößen

Die Definition der zu erfassenden Zielgrößen orientiert sich am Teilziel der Dissertation die Eigenschaften der fasergeblasenen Preforms in Abhängigkeit der Prozessparameter zu bestimmen. Tabelle 7-1 fasst die Auswahl der Zielgrößen zusammen.

Eine entscheidende Eigenschaft der Preforms ist das **Gewicht** der Preforms. Das Gewicht des Preforms entspricht hierbei der Masse der eingeblasenen Fasern. Da der Einblasvorgang bei vollständiger Füllung der Einblasform – ermöglicht durch die entwickelte Prozessüberwachung – beendet wird, ist die Dauer des Einblasvorganges und damit die Fasermenge nicht determiniert. Die Betrachtung des Preformgewichts bei identischem Einblaspalt ermöglicht somit eine indirekte Aussage über die Kompression der Fasern in der Einblasform.

Wie im Stand der Forschung und Technik aufgeführt, ist die **Homogenität** der fasergeblasenen Preforms eine entscheidende Eigenschaft. Von der Homogenität hängen maßgeblich die spätere Infiltrierbarkeit und damit die Qualität des faserverstärkten Bauteils ab. Die Bewertung der Homogenität erfolgt mit der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Vorgehensweise auf Basis von Durchlichtbildern.

Neben der Homogenität ist die **Orientierung der Fasern** eine zentrale Eigenschaft. Die Faserorientierung wird ebenfalls auf Basis der aufgenommenen Durchlichtaufnahmen bestimmt. Die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung erfolgt mit der quadrantenbasierten schnellen Fouriertransformation (BFFT). Für die Beurteilung der lokalen Faserorientierung einzelner Preforms wird die erweiterte Strukturtensor-Methode (STT) genutzt.

Tabelle 7-1: Übersicht der definierten Zielgrößen

Zielgröße	Einheit	Messverfahren
Preformgewicht	[g]	Feinwaage
Homogenität	[-]	Analyse von Durchlichtbildern
Faserorientierung	[-]	Analyse von Durchlichtbildern

7.1.2 Definition der Einflussfaktoren und Faktorstufen

Die Anzahl der Einflussfaktoren ist entscheidend für den Umfang und die Qualität der durchzuführenden Untersuchung. Eine große Anzahl an Faktoren führt dabei zu einem großen Versuchsumfang, wohingegen der Ausschluss einer relevanten Einflussgröße zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen kann. Aufgrund des unzureichenden Kenntnisstandes zur Relevanz der Einflussfaktoren wird ein Screening-Versuchsplan ausgewählt, bei welchem die Faktoren auf zwei Stufen variiert werden. Dies ermöglicht die Auswahl einer großzügigen Anzahl an Einflussfaktoren bei gleichzeitig geringem Versuchsumfang. Grundlage für die Auswahl der Faktoren ist die Analyse der Einflussgrößen und deren Zusammenfassung in Tabelle 4-2. Ausgewählt werden dabei lediglich Einflussgrößen, die gezielt an der Faserblas-Versuchsanlage einstellbar sind. Das verarbeitete Material, welches ebenfalls eine relevante Einflussgröße ist, wird im Rahmen der Parameterstudie zur Reduktion des Versuchsumfangs nicht genauer betrachtet und konstant gehalten. Aufgrund der anzunehmenden linearen Abhängigkeit der

Zielgrößen von den Einflussgrößen wird eine möglichst hohe Differenz der Werte zwischen den Faktorstufen angestrebt. Dies ermöglicht es aussagekräftige Unterschiede zwischen den Zielgrößen zu erreichen.

Als relevanter Faktor für die Formfüllung wird die Menge an eingeblasenen Fasern pro Zeit angesehen, welche über die Einstellung des Faservorschubs definiert wird. Die obere Faktorstufe entspricht dem in Abschnitt 4.3 definierten oberen Limit für den prozesssicheren Bereich. Die untere Faktorstufe wird auf 500 mm/s definiert, was einer Faseraustragsrate von 4,3 kg/h entspricht.

Die Länge der eingeblasenen Fasern ist ein weiterer relevanter Einflussfaktor auf die definierten Zielgrößen. Die im Prozess anvisierte Faserlänge beträgt 50 mm und wird als untere Faktorstufe festgelegt. Ab einer Faserlänge von 75 mm ist die Festigkeitssteigerung nur noch minimal (Brast 2001, S. 61; Thomason & Vluc 1996). Diese Länge wird daher als obere Faktorstufe festgelegt.

Die Düsendeschwindigkeit kann als äquivalent zur Ablagegeschwindigkeit im Faserspritzverfahren angesehen werden. In der Literatur ist beim Faserspritzverfahren ein Einfluss dieser Ablagegeschwindigkeit auf die Homogenität der Preforms nachgewiesen (Vergleiche Abschnitt 2.2.2). Aufgrund der Ähnlichkeit der Verfahrensprinzipien und der Analogie zur Ablagegeschwindigkeit wird die Düsendeschwindigkeit daher als relevanter Faktor in der Parameterstudie untersucht.

Die Größe der Kavität und damit die Menge an Fasern ist durch den Einblasspalt definiert, welcher daher als relevante Einflussgröße gilt. Der geringstmögliche Einblasspalt beträgt aufgrund des Durchmessers der Düse 80 mm und die höchste Einstellung ist durch die Höhe der modifizierten Einblasform mit 160 mm begrenzt. Aus Vorversuchen ist bekannt, dass ein Einblasspalt von 80 mm regelmäßig zu leichten Verstopfungen in der Kavität führt, weshalb die untere Faktorstufe mit einem Wert von 100 mm gewählt wird. Die obere Faktorstufe wird mit 140 mm gewählt, da eine höhere Kavität und die daraus folgenden höheren Flächengewichte ($> 1500 \text{ g/m}^2$) der Preforms für den Anwendungsfall als Verstärkungsfaserstruktur zu hoch sind.

Die Ventilator Drehzahl wirkt sich auf die Einblasgeschwindigkeit aus, welche wiederum einen relevanten Einfluss auf den Einblasvorgang darstellt. Die Faktorstufen entsprechen den Grenzen des in Abschnitt 4.3 definierten prozesssicheren Bereichs.

Tabelle 7-2: Faktorstufen der zu untersuchenden Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Faktorstufen	
	-1	+1
Faservorschub v_F	500 mm/s	2000 mm/s
Faserlänge l_F	50 mm	75 mm
Düsengeschwindigkeit v_D	20 mm/s	100 mm/s
Einblaspalt d_E	100 mm	140 mm
Ventilatorumdrehzahl n_V	2500 U/min	2910 U/min

7.1.3 Aufstellen des statistischen Versuchsplans

Wie in Abschnitt 7.1.2 erläutert wird für die durchzuführende Untersuchung ein Screening-Versuchsplan angewandt. Screening-Versuchspläne ermöglichen bei minimalem Verlust an Informationen möglichst wenig Versuche durchführen zu müssen. In (Siebertz & van Bebber et al. 2017) werden einige Screening-Versuchspläne vorgestellt, welche in Tabelle 7-3 zusammenfassend dargestellt sind. Die in der Tabelle genannte Auflösung bezieht sich dabei auf den Grad, zu dem Haupteffekte mit anderen (Mehr-Faktor)-Wechselwirkungen (FWW) vermengt sind. Für nähere Informationen sei dabei auf (Kleppmann 2013, S. 142) verwiesen.

Vollständige Versuchspläne erlauben eine Untersuchung ohne eine Vermengung von Effekten, führen allerdings zu einer hohen Anzahl von Versuchen. Bei teilfaktoriellen Versuchsplänen werden höhere Wechselwirkungen zu Gunsten weiterer Faktoren ersetzt. Bei gleichbleibender Faktoranzahl wird somit der Versuchsumfang jeweils halbiert. Dies geht allerdings einher mit einer Reduktion der möglichen Auflösung.

Eine Alternative zu den teilfaktoriellen Versuchsplänen sind Plackett-Burman-Versuchspläne. Diese haben eine feste Anzahl an untersuchbaren Faktorstufen und haben üblicherweise eine Auflösung von III. Durch eine Wiederholung aller Faktorstufenkombinationen mit umgekehrtem Vorzeichen kann die Auflösung eines Plackett-Burman-Versuchsplans auf IV gesteigert werden (unter Verdopplung der Versuchsanzahl). Eine Reduzierung des Versuchsumfangs ist mit übersättigten Plackett-Burman-Versuchsplänen möglich, wobei die Faktoren teilweise miteinander vermengt werden und nur große Effekte erkannt werden können.

Tabelle 7-3: Übersicht möglicher Screening-Versuchspläne und derer Eigenschaften

	Faktorstufen- kombinationen	Auflösung	Anmerkung zur Be- trachtung einzelner Faktoren	
Versuchspläne	Vollständig faktorieller Plan	32	Vollständig	Hohe Aussagekraft (auch für FWW)
	Teilfaktorieller 2^{5-1} -Plan	16	V	unkritisch
	Teilfaktorieller 2^{5-2} -Plan	8	III	Kritische Vermengung
	Plackett-Burman-Versuchsplan (Auflösung III)	12	III	Verschmierung von FWW über andere Faktoren
	Plackett-Burman-Versuchsplan (Auflösung IV)	24	IV	Verschmierung gering
	Übersättigter Plackett-Burman-Versuchsplan	6	-	Nur für große Effekte

Da davon ausgegangen werden kann, dass es nicht zu signifikanten Wechselwirkungen kommt, können Versuchspläne mit einer Vermengung der Haupteffekte mit Mehrfachwechselwirkungen toleriert werden. Eine Auflösung von III wird jedoch allgemein als kritisch eingestuft (Kleppmann 2013, S. 142). Eine Ausnahme bilden die Plackett-Burman-Versuchspläne, da die Wechselwirkungen auf alle anderen Faktoren außer den wechselwirkenden Faktoren verschmiert sind, weshalb in der Praxis bei kleinen Wechselwirkungen nur eine vernachlässigbare Beeinflussung der Haupteffekte erfolgt. Aufgrund der geringen Anzahl an notwendigen Faktorstufenkombinationen wird daher für die Parameterstudie ein Plackett-Burman-Versuchsplan mit Auflösung III ausgewählt. Die sich daraus ergebenden Werte der einzelnen Faktorstufenkombinationen sind in Tabelle 7-4 angegeben. Aufgrund der anzunehmenden Streuung der Einzelversuche werden pro Faktorstufenkombination je sechs Versuche durchgeführt. Um mögliche Verfälschungen der Ergebnisse zu verhindern, erfolgt eine Blockbildung und Randomisierung der Einzelversuche.

Tabelle 7-4: Plackett-Burman-Versuchsplan für Parameterstudie

Versuchsreihe	Einflussfaktoren				
	Faservorschub v_F	Faserlänge l_F	Düsenge- schwindigkeit v_D	Einblas- spalt d_E	Ventilator- drehzahl n_V
A	-1	-1	+1	+1	+1
B	-1	+1	-1	+1	-1
C	-1	+1	+1	-1	+1
D	-1	+1	+1	-1	-1
E	-1	-1	-1	+1	+1
F	-1	-1	-1	-1	-1
G	+1	+1	-1	-1	+1
H	+1	+1	-1	+1	+1
I	+1	-1	+1	+1	-1
J	+1	-1	-1	-1	-1
K	+1	+1	+1	+1	-1
L	+1	-1	+1	-1	+1

7.2 Durchführung der Parameterstudie

Die Versuche für die Parameterstudie werden auf der in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Faserblas-Versuchsanlage und der in Abbildung 5-7 gezeigten Einblasform mit integrierter Prozessüberwachung durchgeführt. Dies erlaubt die vollständige Aufzeichnung des Einblasvorgangs für eine anschließende Untersuchung, sowie die direkte Aufnahme von Durchlichtbildern ohne eine zusätzliche Handhabung des Preforms.

Als Fasermaterial für die Parameterstudie wird ein Glasroving vom Typ *ADVANTEX R25 HX14* der Firma *R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH* (Waldenbuch) mit einer Faserfeinheit von 2400 tex verarbeitet. Da sich der Fokus der durchzuführenden Versuche auf den Einblasprozess richtet, werden die Versuche ohne die Zugabe eines Bindematerials durchgeführt.

Für die Versuche wird die Faserblasanlage in der Betriebsart Automatik gesteuert. Die Einblasform wird zuerst auf den gewünschten Einblaspalt geschlossen. Anschließend starten die alternierende Bewegung der Lineardüse und der Radialventilator. Der ei-

gentliche Einblasvorgang beginnt bei Schnittbeginn des Schneidwerks. Das Schneidwerk wird an der Steuerung der Faserschneideinheit manuell gestartet, wenn der Radialventilator seine Soll-Drehzahl erreicht hat und die Einblasdüse sich mit der eingestellten Geschwindigkeit bewegt. Während des Einblasens wird der Formfüllfortschritt mittels der auf dem Anlagen-HMI dargestellten Lage der Faserfront überwacht. Die Faserzufuhr wird an der Faserschneideinheit manuell durch den Anlagenbediener beendet, wenn die Faserfront die Einblasseite der Einblasform erreicht. Der Radialventilator und die Einblasdüse laufen dann noch 20 s nach, um die restlichen im Faserfördersystem befindlichen Fasern in die Einblasform zu fördern. Die Zeit von Beginn bis Ende des Faserschneidens (= Schnittzeit) wird mittels einer Stoppuhr erfasst.

Im Anschluss an den Einblasprozessschritt erfolgt einheitlich ein Verpressen der eingeblasenen Fasern auf eine Zieldicke von 20 mm. Bei erreichter Verpressdicke wird mit der integrierten Kamera eine Durchlichtaufnahme mit einer Auflösung von 8,9 Megapixel erstellt. Diese Durchlichtaufnahme ist die Basis für die Bestimmung der Homogenität und Faserorientierung der Preforms mit Hilfe der in Kapitel 6 vorgestellten Methoden. Im Anschluss an den Versuch werden die eingeblasenen Fasern aus der Einblasform entnommen und mit einer Waage das Gewicht bestimmt.

Bei einzelnen Versuchen konnten Verstopfungen im Faserfördersystem am Ausgang des Radialventilators festgestellt werden, durch welche die Formfüllung negativ beeinträchtigt wird. Ein Kausalzusammenhang der Verstopfungen zu einer bestimmten Faktorstufe ist jedoch nicht erkennbar. Der Radialventilator wird daher nach jeder aufgetretenen Verstopfung von verbliebenen Faserresten befreit und der Versuch wiederholt.

7.3 Ergebnisse der Parameterstudie

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterstudie für die ausgewählten Zielgrößen vorgestellt. Die Auswertung der Versuche erfolgte mit Hilfe der Software *Origin Pro* des Software-Herstellers *OriginLabs* (Northampton (MA), USA) und der darin enthaltenen App zur statistischen Versuchsplanung.

Die Ergebnisse einer Versuchsreihe werden in sogenannten Boxplots dargestellt. Die dargestellten Boxen reichen dabei vom 25 %-Quantil (sog. unteres Quartil) bis zum 75 %-Quantil (sog. oberes Quartil) der Ergebnisse, entsprechen also dem Interquartilsabstand in welchem 50 % aller Ergebnisse liegen. Die als Whisker bezeichneten vertikalen Linien reichen von den Enden der Box bis zu den Extremwerten. Die rote Linie

innerhalb einer Box kennzeichnet den Median der Ergebnisse. In der Auswertung werden Einzelwerte, welche mehr als das 1,5-fache des Interquartilsabstands außerhalb der Box liegen, als Ausreißer gekennzeichnet.

Weiterhin werden die Effekte der Faktoren berechnet. Der Effekt wird durch die Differenz zwischen dem Mittelwert aller Versuchsergebnisse bei der oberen Faktorstufeneinstellung und dem Mittelwert aller Versuchsergebnisse bei der unteren Faktorstufeneinstellung berechnet. Er quantifiziert also die mittlere registrierte Veränderung der Zielgröße beim Wechsel der Faktoreinstellungen von unterer zu oberer Faktorstufe. Die Effekte der Faktoren auf die Zielgröße werden in Form eines Haupteffektdiagramms dargestellt. Die vertikale Achse zeigt dabei die Zielgröße und die horizontale Achse die Faktorstufe. Die Mittelwerte aller Versuche einer Faktorstufe für den jeweiligen Faktor werden in das Diagramm eingetragen und mit einer Linie, deren Steigung der Stärke des Effekts entspricht, verbunden. Die standardisierten Effekte werden außerdem in einem Pareto-Diagramm dargestellt. Dieses enthält eine Signifikanzgrenze, welche mit Hilfe von t-Statistiken berechnet wird. Die Signifikanzanalysen gehen von einer Nullhypothese aus, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten, also kein signifikanter Effekt vorhanden ist. Es wird dabei von einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ausgegangen. Dies bedeutet, dass die standardisierten Effekte oberhalb der Signifikanzgrenze von der Nullhypothese abweichen und somit als statistisch signifikant gelten.

Die gemessenen numerischen Werte der Zielgrößen der in der Parameterstudie hergestellten Preforms sind im Anhang in Tabelle 0-5 zu finden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für jede Zielgröße detailliert vorgestellt, analysiert und bewertet.

7.3.1 Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf das Preformgewicht

Die Ergebnisse der gemessenen Preformgewichte sind nach Versuchsreihe gruppiert in einem in Abbildung 7-1 dargestellten Boxplot aufgetragen. Die Gewichtswerte der Einzelversuche reichen dabei von 124 g bis 287 g. Es ist ersichtlich, dass die gemessenen Werte innerhalb der einzelnen Versuchsreihen stark schwanken. Dies zeigt, dass trotz des einheitlichen Abbruchkriteriums, welches durch die Lage der optisch erfassten Faserfront definiert ist, eine unterschiedliche Menge an Fasern eingeblasen wird.

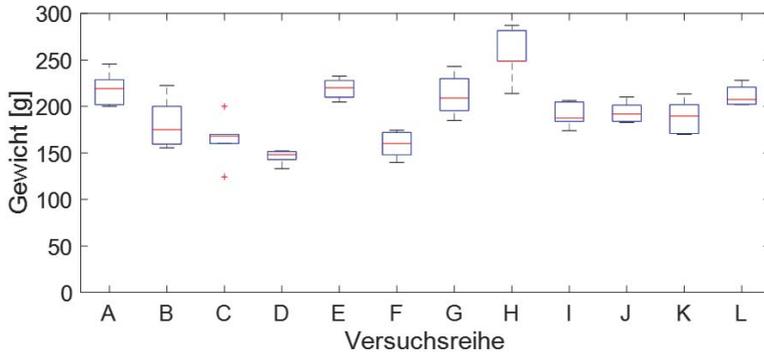


Abbildung 7-1: Gewichte der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm

Unter der Annahme, dass eine gleichmäßige Faserdichte des Preforms in Dickenrichtung vorliegt, ist davon auszugehen, dass bei einer Erhöhung des Einblaspalts und der damit einhergehenden Volumenvergrößerung der Kavität eine deutliche Zunahme des Preformgewichts folgt. Bei Betrachtung der in Abbildung 7-1 gezeigten Ergebnisse wird jedoch festgestellt, dass es keine unmittelbar feststellbaren Unterschiede in den gemessenen Gewichten der Preforms, welche mit einem Einblaspalt von 100 mm hergestellt werden (Versuchsreihen C, D, F, G, J, L), im Vergleich zu den mit einem Einblaspalt von 140 mm hergestellten Preforms (Versuchsreihen A, B, E, H, I, K) gibt. Mit der Annahme einer gleichmäßigen Faserdichte in Dickenrichtung müssten die mit 140 mm Einblaspalt hergestellten Preforms ein um 40 % höheres Gewicht aufweisen. Der Mittelwert der Gewichte aller mit höherem Einblaspalt hergestellten Preforms beträgt 210,2 g gegenüber 181,2 g bei auf der unteren Parameterstufe hergestellten Preforms (vgl. Abbildung 7-2 (a)). Dies entspricht lediglich einer Gewichtssteigerung von 14 %. Es wird daher geschlussfolgert, dass die Fasern beim Anstauen an der der Düse gegenüberliegenden Seite sich in Dickenrichtung gesehen nicht gleichmäßig anlagern. Die theoretische Überlegung eines linearen Einflusses des Einblaspalts auf die eingeblasene Fasermenge (unter Beibehaltung der restlichen Einblasparameter) ist somit widerlegt.

Der Haupteffektplot in Abbildung 7-2 (a) zeigt die Auswirkung der untersuchten Einblasparameter auf das Preformgewicht. Es wird festgestellt, dass neben der bereits an-

gesprochenen Erhöhung des Einblaspalts auch eine Vergrößerung des Faservorschubs und der Ventilator-drehzahl zu einer Zunahme des Preformgewichts führen. Eine Erhöhung der Düsen-geschwindigkeit und eine höhere Faserlänge hingegen führen zu einer Abnahme des Gewichts. Die Signifikanzanalyse ergibt, dass bis auf die Faserlänge alle Einflussfaktoren einen signifikanten Einfluss auf das Preformgewicht haben (vgl. Abbildung 7-2 (b)).

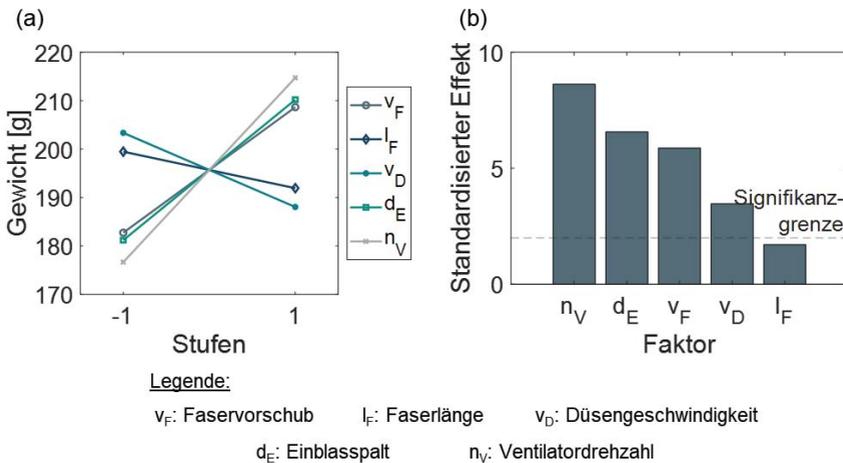


Abbildung 7-2: Haupteffektplot für die Zielgröße Gewicht (a) und Pareto-Plot zur Darstellung der Signifikanz der standardisierten Effekte (b)

Die Signifikanzanalyse zeigt, dass der Einflussfaktor Ventilator-drehzahl deutlich stärker als der Einblaspalt zu bewerten ist. Aufgrund der vollständigen Füllung der Einblasform (Abbruchkriterium des Einblasvorgangs) bedeutet ein Unterschied im Preformgewicht bei gleichem Einblaspalt eine unterschiedliche Kompression der Fasern. Die deutliche Zunahme des Preformgewichts bei einer höheren Ventilator-drehzahl ist folglich damit zu erklären, dass durch die damit einhergehende Steigerung der Einblas-geschwindigkeit (siehe Abbildung 4-7) die Fasern beim Einblasen in die Einblasform verdichtet werden. Die Tatsache, dass eine Steigerung des Faservolumenstroms ebenfalls zu einer Zunahme des Preformgewichts führt, lässt den Schluss zu, dass nicht der reine Luftstrom für die Verdichtung der Faser-masse verantwortlich ist. Entscheidender Mechanismus für die Verdichtung der Fasern ist der durch die eingeblasenen Faserpakete

ausgeübte Impuls. Dieser ergibt sich aus der Fasermasse (Faservorschub mal Zeit) und der Einblasgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Düsengeschwindigkeit wirkt sich folglich mit diesem Erklärungsmodell negativ auf die Verdichtung aus, was durch die Versuchsergebnisse im Haupteffektplot bestätigt wird.

Es ist somit festzuhalten, dass mittels der Einblasparameter das Gewicht der Preforms sehr stark und gezielt beeinflusst werden kann. Mit Hilfe der Betrachtung des Preformgewichts können Erkenntnisse zur Kompression der Fasern in der Einblasform und den zugrunde liegenden Einflussgrößen abgeleitet werden. Entgegen den Erwartungen haben der Einblaspalt und damit das Volumen der Kavität einen nachrangigen Einfluss auf das Preformgewicht. Entscheidender Mechanismus für die Verdichtung der bereits in der Einblasform befindlichen Fasern ist der auf diese durch die eingeblasenen Faserpakete ausgeübte Impuls. Dieser ist abhängig von der Einblasgeschwindigkeit, dem Faservorschub und der Düsengeschwindigkeit.

7.3.2 Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf die Homogenität

Die Homogenität der hergestellten Preforms wird auf Basis der aufgenommenen Durchlichtaufnahmen durch den in Kapitel 6.1 ausgewählten Homogenitätsindex (Methode 2 nach (Tascan & Nohut 2015)) bewertet. Ein niedrigerer Homogenitätsindex steht dabei für eine bessere Homogenität. Abbildung 7-3 zeigt die gemessenen Homogenitätswerte der Versuchsreihen. Es zeigt sich, dass die Homogenität auch innerhalb der Versuchsreihen stark streut. Besonders ausgeprägt ist dies bei den Versuchen mit einem Faservorschub von 2000 mm/s (Versuchsreihen G – L).

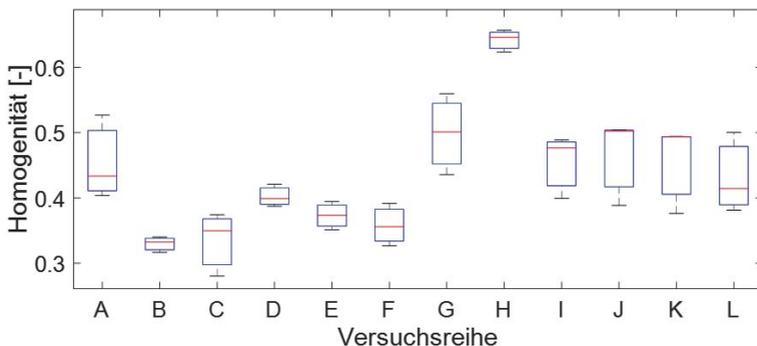


Abbildung 7-3: Homogenität der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm

Die Analyse der Haupteffekte zeigt, dass der Faservorschub den höchsten Einfluss auf die Homogenität der Preforms aufweist (vgl. Abbildung 7-4 (a)). Eine Zunahme des Faservorschubs führt zu einem deutlich höheren Homogenitätsindex. Die Einflussfaktoren Einblaspalt und Ventilatorendrehzahl führen jeweils zu einer leichten Zunahme des Homogenitätsindex auf der oberen Faktorstufe. Ebenso der Einflussfaktor Faserlänge, wobei hier nur ein geringer Unterschied festzustellen ist. Eine Erhöhung der Düsendgeschwindigkeit hingegen bedingt einen niedrigeren Homogenitätsindex.

Die Signifikanzanalyse zeigt, dass lediglich der Einflussfaktor Faservorschub einen signifikanten Effekt auf die Homogenität darstellt. Die standardisierten Effekte der anderen Faktoren liegen unterhalb der Signifikanzgrenze (95%-Konfidenzintervall), was bedeutet, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den Faktorstufen mit einer Wahrscheinlichkeit $> 5\%$ zufällig auftreten (Kleppmann 2013, S. 86). Es ist jedoch auffällig, dass die Versuchsreihe D, bei welcher die Einflussparameter auf der entsprechend der Haupteffekte günstigeren Faktorstufen eingestellt sind, mit einem Durchschnittswert von 0,38 für den Homogenitätsindex nicht die beste Homogenität aufweist.

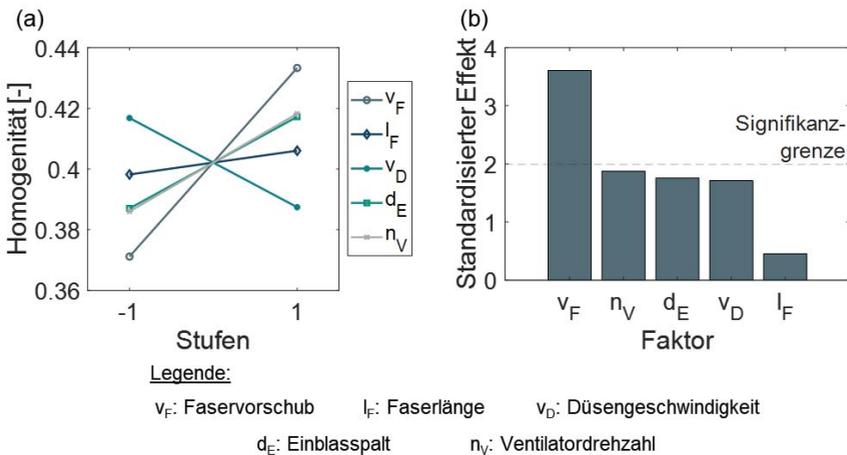


Abbildung 7-4: Haupteffektplot für die Zielgröße Homogenität (a) und Pareto-Plot zur Darstellung der Signifikanz der standardisierten Effekte (b)

Um die Ursache des Effekts des Faservorschubs auf die Homogenität genauer zu untersuchen werden die Einblasvorgänge der einzelnen Versuche anhand der aufgenommenen Daten genauer betrachtet. Abbildung 7-5 zeigt hierfür exemplarisch den Verlauf der Formfüllung eines Preforms aus Versuchsreihe C mit niedrigem durchschnittlichem Homogenitätsindex, welcher mit einem Faservorschub auf der niedrigen Stufe hergestellt wird und einem mit Faservorschub auf der oberen Faktorstufe hergestellten Preform aus Versuchsreihe H, welcher einen hohen durchschnittlichen Homogenitätsindex aufweist. Bei den Einblasvorgängen mit niedrigem Faservorschub fällt auf, dass die Füllung der Einblasform über die gesamte Breite relativ gleichmäßig verläuft. Die Faserfront ist dabei nahezu linear bis leicht gekrümmt ausgeprägt. Im Falle der Einblasvorgänge mit hohem Faservorschub wird die Einblasform ungleichmäßiger gefüllt. An den Randbereichen der Einblasform werden vermehrt Fasern eingeblasen, woraus eine tendenziell einseitige Formfüllung resultiert.

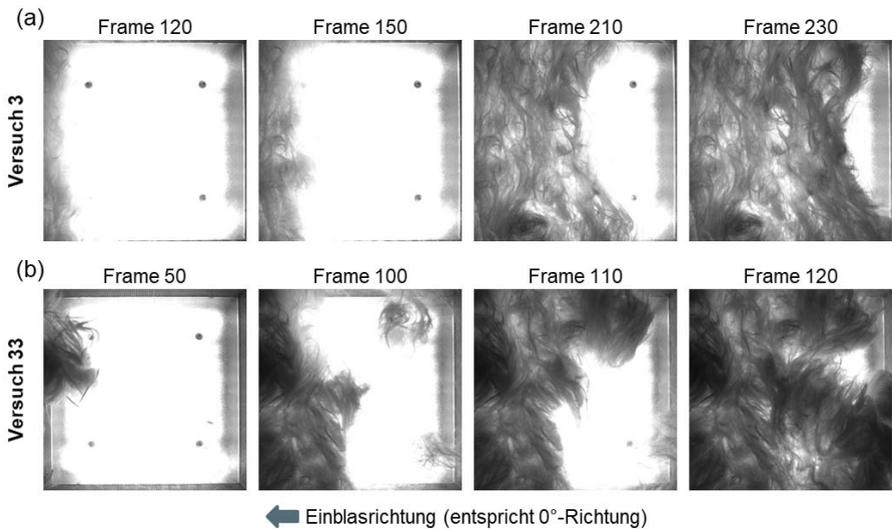


Abbildung 7-5: Fortschritt der Formfüllung zweier Preforms mit niedrigem Homogenitätsindex (a) und hohem Homogenitätsindex (b)

In vorhergehenden Arbeiten zum Faserblasverfahren wurde bereits eine starke Bildung von Faserknäueln beschrieben (Fleischer & Förster et al. 2015; Dackweiler & Fleischer

2017). Dies konnte ebenfalls bei den im Rahmen dieser Parameterstudie durchgeführten Experimenten beobachtet werden (vgl. Abbildung 7-5 (b) zweites Bild von links). Die Knäuel weisen eine lokal sehr starke Komprimierung der Fasern auf. Diese Knäuelstrukturen sind auch im späteren Preform eindeutig zu identifizieren. Durch die Aggregation von Fasern in diesen Knäueln treten in den Bereichen um diese Knäuelstrukturen Lücken auf, in welchen nur wenige Fasern platziert sind (vgl. Abbildung 7-5 (b) rechtes Bild). Die damit einhergehenden großen Änderungen der lokalen Faserdichte auf kleinem Raum sorgen für eine entsprechende Inhomogenität des Preforms.

Die Neigung zur Bildung von Faserknäueln ist insbesondere bei höheren Faservorschüben zu beobachten. Eine Erklärung hierfür ist, dass bei zunehmender Menge an Fasern im Einblssystem die Fasern sich ineinander Verhaken und zu solchen Knäueln aggregieren. Kritische Stellen für einen solchen Aggregationsprozess sind die Engstellen, wie der Auslass des Trichters unter dem Schneidwerk und dem Ausgang des Radialventilators.

Für eine detailliertere Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Formfüllung wird daher ein an die Methode der kleinsten Quadrate angelehntes Geradheitsmaß G eingeführt, welches auf Basis der Faserfront berechnet wird:

$$G = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{F,i} - x_{F,m})^2} \quad \text{mit } N = 256 \quad \text{Formel 7-1}$$

Aufgrund der Funktionsweise der Prozessüberwachung besteht die Faserfront aus 256 Bildpunkten. $x_{F,i}$ ist dabei die Lage der Faserfront in Einblasrichtung (x -Richtung) jeder vertikalen Bildreihe und $x_{F,m}$ der Mittelwert aller Werte von $x_{F,i}$ (vgl. Abbildung 7-6). Das Geradheitsmaß drückt somit aus, wie gleichmäßig die Füllung der Einblasform ist. Je niedriger der Wert des Geradheitsmaßes, desto gerader ist die Faserfront und desto gleichmäßiger verteilt sind die eingeblasenen Fasern. Bildet man den Mittelwert der Geradheitsmaße über alle durch die Prozessüberwachung aufgenommenen Frames eines Einblasprozesses, lässt sich eine Gesamtaussage über die Gleichmäßigkeit des entsprechenden Einblasprozesses treffen. Ein geringes durchschnittliches Geradheitsmaß steht dabei für eine hohe Gleichmäßigkeit der Formfüllung.

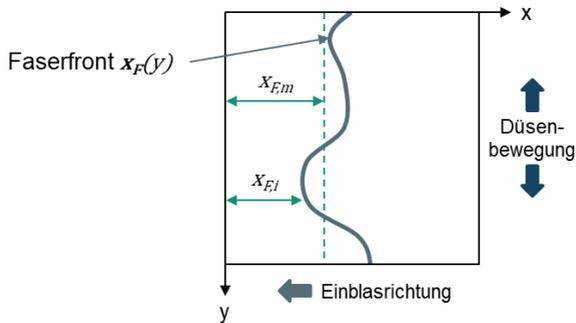


Abbildung 7-6: Skizze zur Erklärung der Kenngrößen zur Berechnung des Geradheitsindex G

Auf Basis des eingeführten Geradheitsmaßes wird daher der Zusammenhang zwischen Formfüllung und Homogenität gezeigt. Abbildung 7-7 zeigt die Homogenität aller hergestellten Preforms über das durchschnittliche Geradheitsmaß des Einblasprozesses aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass Einblasprozesse mit einem geringen durchschnittlichen Geradheitsmaß zu Preforms mit einer besseren Homogenität (=niedriger Homogenitätsindex) führen.

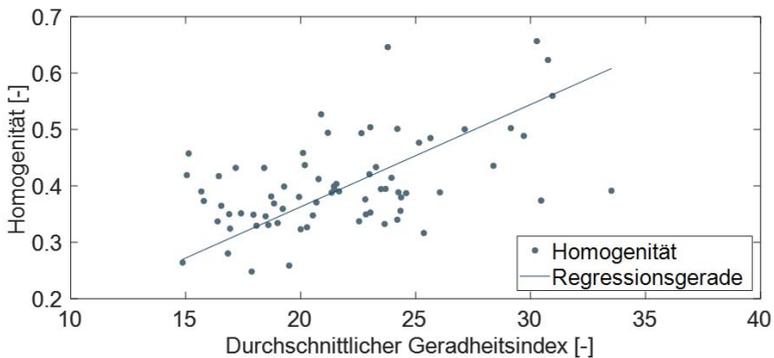


Abbildung 7-7: Korrelation der durchschnittlichen Geradheit mit der Homogenität der untersuchten Preforms

Bezüglich der Einflüsse der Einblasparameter auf die Preformhomogenität ist somit festzuhalten, dass lediglich der Faservorschub einen signifikanten Einfluss hat. Ursache hierfür ist die geringere Neigung zur Bildung von Faserknäuel. Hieraus folgen eine gleichmäßigere Verteilung der Fasern in der Einblasform und eine geradlinigere ausgeprägte Faserfront. Für eine Verbesserung der Homogenität muss daher der Einblasvorgang möglichst gleichmäßig sein.

Um eine Aussage über die erreichte Homogenität der fasergeblasenen Preforms mittels des bestimmten dimensionslosen Homogenitätsindex treffen zu können, muss dieser mit den bestimmten Homogenitätsindizes anderer Vliesmaterialien verglichen werden. Als Vergleichsmaterialien dienen dabei die bereits in Abschnitt 6.1.2.2 genutzten Vliese (siehe Abbildung 6-2), welche industriell in Bandverfahren hergestellt werden. Deren Homogenität wird auf gleiche Art, wie die in der Parameterstudie hergestellten Preforms, bestimmt. Tabelle 7-5 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der bestimmten Homogenitätsindizes für die fasergeblasenen Preforms aus Versuchsreihe D, bei welcher die Einflussparameter auf der entsprechend der Haupteffekte günstigeren Faktorstufen eingestellt sind, sowie die beiden Vergleichsmaterialien. Der Vergleich zeigt, dass die Homogenität der fasergeblasenen Preforms selbst unter den günstigsten Parametern deutlich schlechter als die Homogenität der Vergleichsvliese aus industrieller Produktion ist. Weiterhin fällt auf, dass die Standardabweichung der Homogenitätsindizes doppelt so hoch ist. Dies zeigt, dass der Preformherstellungsprozess im Faserblasverfahren hinsichtlich der Homogenität eine geringere Prozessstabilität aufweist.

Tabelle 7-5: Vergleich der bestimmten Homogenitätsindizes für fasergeblasene Preforms und im Handel erhältliche Vliese

Material	Mittelwert	Standardabweichung
Fasergeblasene Preforms (Versuchsreihe D)	0,38	0,029
Genadeltes Vlies (Set B)	0,2	0,015
Pulvergebundenes Vlies (Set C)	0,21	0,015

7.3.3 Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf die Faserorientierung

Auf Basis der aufgenommenen Durchlichtaufnahmen wird außerdem die Faserorientierung der Preforms untersucht. Hierzu erfolgt die Bestimmung der Faserorientierungsverteilung mit Hilfe der in Abschnitt 6.2 vorgestellten quadrantenbasierten schnellen Fouriertransformation (BFFT). Abbildung 7-8 zeigt die dominante Faserorientierung der einzelnen Versuchsreihen im Boxplot-Diagramm. Die dominante Faserorientierung entspricht der Richtung, welche die höchste Häufigkeit in der Faserorientierungsverteilung aufweist. Es zeigt sich, dass über alle Versuchsreihen hinweg die Preforms eine bevorzugte Faserorientierung in 90°-Richtung, welche einer Orientierung quer zur Einblasrichtung entspricht, vorweisen. Es existiert daher kein gezielter Zusammenhang zwischen den untersuchten Einblasparametern und der dominanten Faserorientierung.

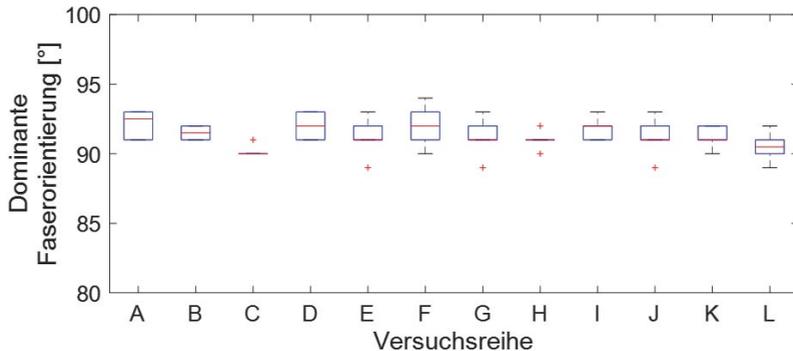


Abbildung 7-8: Dominante Faserorientierung der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm

Eine genauere Aussage zur Ausprägung der Vorzugsorientierung erlaubt ein Blick auf die Faserorientierungsverteilung einzelner Preforms. Exemplarisch für alle weiteren Versuchsreihen sind in Abbildung 7-9 die Faserorientierungsverteilungen für die Versuchsreihe H dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung der Faserrichtungen zeigt, dass die dominante Orientierung in 90°-Richtung mit einem starken schmalen Peak ausgeprägt ist. Die Anzahl an Fasern quer zur Einblasrichtung ist ca. 2,5- bis 3-mal so hoch wie in Einblasrichtung. Die Preforms weisen folglich unterschiedliche Eigenschaften in beide Richtungen auf. Die Richtungsabhängigkeit von Eigenschaften wird allgemein als

Anisotropie bezeichnet. Im Folgenden wird daher der Einfluss der Einblasparameter auf die Anisotropie der Preforms genauer untersucht.

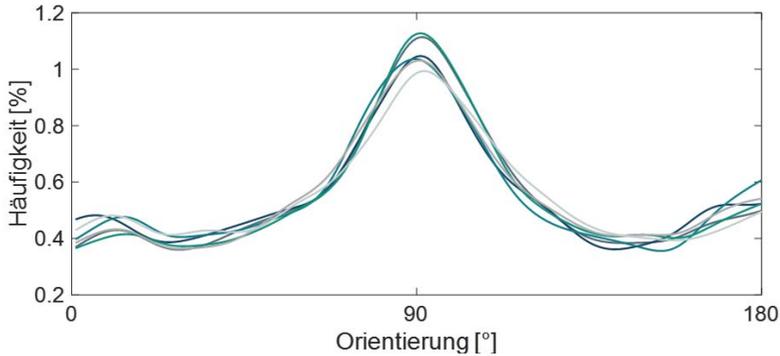


Abbildung 7-9: Faserorientierungsverteilung der hergestellten Preforms aus
Versuchsreihe H

Für eine detailliertere Betrachtung der beobachteten Anisotropie der Preforms wird das Anisotropieverhältnis A als das Verhältnis zwischen der Anzahl an Fasern in Richtung $90^\circ \pm 10^\circ$ und der Anzahl an Fasern in Richtung $0^\circ/180^\circ \pm 10^\circ$ definiert (siehe Formel 7-2).

$$A = \frac{\rho(\theta = 80 \dots 100)}{\rho(\theta = 1 \dots 10) + \rho(\theta = 170 \dots 180)} \quad \text{Formel 7-2}$$

Die mittels Formel 7-2 berechneten Anisotropieverhältnisse für die hergestellten Preforms reichen von 1,74 bis 4,17 (vgl. Abbildung 7-10). Einzelne Versuchsreihen weisen eine hohe Streuung der Anisotropieverhältnisse auf. Dies ist insbesondere bei den Versuchsreihen mit einem Faservorschub von 500 mm/s (Versuchsreihen A - F) zu beobachten, welche eine hohe Anzahl an Einzelversuchen aufweisen, welche durch die Auswertung als Ausreißer gekennzeichnet werden.

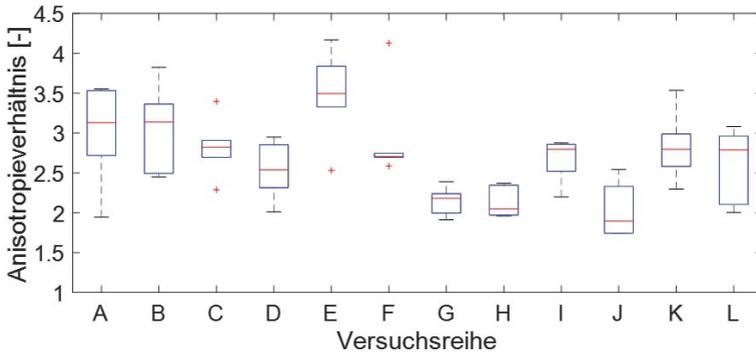


Abbildung 7-10: Anisotropieverhältnis der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm

Die genauere Betrachtung der Haupteffekte zeigt, dass der Faservorschub einen dominanten Einfluss auf das Anisotropieverhältnis hat (vgl. Abbildung 7-11 (a)). Die Zunahme des Faservorschubs führt dabei zu einer weniger starken Ausrichtung der Fasern. Aus der Signifikanzbewertung (siehe Abbildung 7-11 (b)) folgt, dass der Faktor Faservorschub signifikant zu bewerten ist. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zur Analyse des Einflusses der Einblasparameter auf die Homogenität, wird geschlussfolgert, dass die gleichmäßigere Füllung bei geringerem Faservorschub zu einer ebenfalls stärkeren linearen Ausrichtung der Fasern quer zur Einblasrichtung (und damit parallel zur annähernd linearen Faserfront) führt. Wie bereits in Abschnitt 7.3.2 erwähnt, finden sich bei höherem Faservorschub vermehrt Knäuelstrukturen im Preform. Die dort stark komprimierten Fasern lagern sich nicht bevorzugt parallel zur Faserfront an. Die Fasern in diesen Knäueln sind daher stärker in andere Richtungen als die 90°-Richtung ausgerichtet (vgl. Abbildung 7-5 (b) rechtes Bild).

Der Einflussfaktor Düsengeschwindigkeit weist den zweithöchsten Effekt auf, welcher allerdings bereits unterhalb der Signifikanzgrenze liegt. Die Steigerung der Düsengeschwindigkeit führt zu einer Abnahme des Anisotropieverhältnisses. Dies ist überraschend, da eine höhere Düsengeschwindigkeit wie bereits erwähnt theoretisch zu einer gleichmäßigeren Formfüllung und damit geradlinigeren Faserfront führen müsste. Entsprechend der Erklärungshypothese zum Einfluss des Faservorschubs wäre also ein

gegenteiliger Effekt zu vermuten. Der hier beobachtete Effekt kann folglich nicht zweifelsfrei erklärt werden und ist vermutlich auf die hohe Streuung zurückzuführen, was die geringe Signifikanz nahelegt.

Die Effekte der Einflussfaktoren Einblaspalt, Faserlänge und Ventilatorgeschwindigkeit sind mit einem Unterschied zwischen unterer zu oberer Faktorstufe deutlich kleiner als 0,1 nur sehr schwach ausgeprägt und liegen folglich deutlich unter der Signifikanzgrenze. Die beobachteten Effekte sind daher zu hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls auf die große Streuung zurückzuführen.

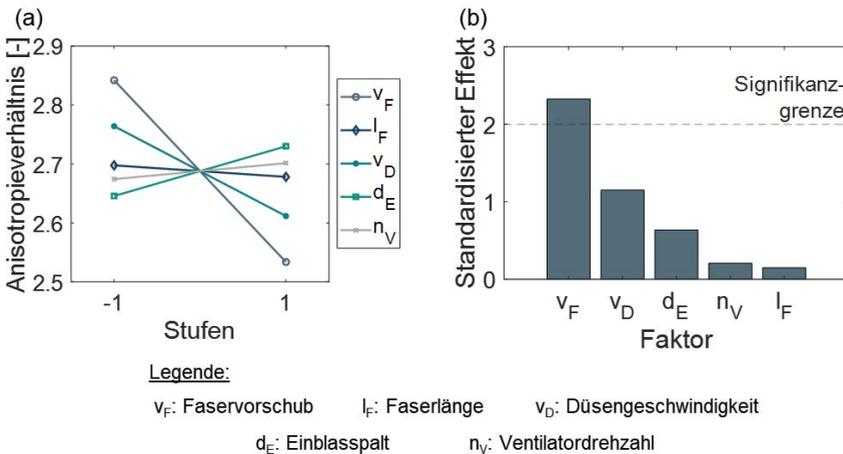


Abbildung 7-11: Haupteffektplot für das Anisotropieverhältnis (a) und Pareto-Plot zu Darstellung der Signifikanz der standardisierten Effekte (b)

Zusammenfassend ist zur Faserorientierung festzustellen, dass alle Preforms mit einem Anisotropieverhältnis größer als 1,74 (Mittelwert 2,69 über alle Preforms) eine starke Ausrichtung der Fasern quer zur Einblasrichtung aufweisen, wobei die gemessenen Einzelwerte stark schwanken. Die Betrachtung des Einflusses der Einblasparameter auf diese Anisotropie zeigt, dass lediglich der Einfluss des Faservorschubs als signifikant zu bewerten ist. Niedrigere Faservorschübe führen dabei zu einer stärkeren Ausrichtung der Fasern, was auf die geringere Neigung zur Knäuelbildung und die Ausbildung einer gleichmäßigeren Faserfront zurückzuführen ist.

Fazit:

Mittels einer statistisch ausgewerteten Parameterstudie wird der Einfluss der Einblasparameter Faservorschub, Faserlänge, Düsengeschwindigkeit, Einblaspalt und Ventilatordrehzahl auf das Gewicht, die Homogenität und die Faserorientierung der Preforms untersucht. Über alle Versuchsreihen hinweg zeigt sich eine hohe Streuung der untersuchten Größen. Mittels einer Signifikanzanalyse wurden daher die jeweils signifikanten Einflussfaktoren identifiziert.

Es wird gezeigt, dass das Gewicht der Preforms und damit die Kompression der Fasern gut durch Einblasparameter einstellbar sind. Entscheidender Mechanismus ist dabei der Impuls der eingeblasenen Fasern, welcher sich aus der mit Hilfe der Ventilatordrehzahl einstellbaren Einblasgeschwindigkeit und der aus dem Faservorschub ergebenden Menge an Fasern pro Zeiteinheit ergibt. Einen nachgeordneten Einfluss hat der Einblaspalt. Über alle Versuchsreihen hinweg wird weiterhin festgestellt, dass die Faserlänge keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Größen aufweist.

Die Analyse der Homogenität und der Faserorientierung zeigt, dass diese lediglich durch den Faservorschub signifikant beeinflusst werden. Dies ist auf die Neigung der Fasern zur Knäuelbildung im Einblassystem zurückzuführen, welche sich insbesondere bei erhöhtem Faservorschub ergibt und zu einer ungleichmäßigeren Füllung der Einblasform führt. Es wird festgestellt, dass eine gleichmäßigere Füllung der Einblasform mit einer geradlinigeren Ausprägung der Faserfront zu einem homogeneren Faserbild führt. Für eine Verbesserung der Homogenität muss daher mit einem geringeren Faservorschub eingeblasen werden, was wiederum zu einer längeren Einblaszeit und entsprechend einer geringeren Produktivität führt. Potential für eine Steigerung der Homogenität bietet die aktive Beeinflussung des Einblasprozesses, durch welche eine möglichst lineare Faserfront über den gesamten Einblasprozess erreicht wird.

Der Vergleich der erzielten Homogenität mit der Homogenität von Vergleichsvliesen aus industrieller Produktion zeigt, dass die fasergeblasenen Vliese selbst unter optimalen Einblasparametern nicht an deren Homogenität reichen.

8 Regelung des Einblasprozesses

Das folgende Kapitel beschreibt die Regelung für den Einblasprozess im Faserblasverfahren. In Abschnitt 7.3.2 wird gezeigt, dass eine Korrelation zwischen der Homogenität der hergestellten Preforms und dem durchschnittlichen Geradheitsindex als Maß für die Gleichmäßigkeit der Formfüllung existiert. Weiterhin wird aufgrund dieser Ergebnisse angenommen, dass eine gleichmäßige Formfüllung zu weniger Lücken in der Faserstruktur führt, was sich in einer erhöhten Reproduzierbarkeit ausdrückt. Aus diesen Ergebnissen werden als Arbeitsgrundlage für die Regelung des Einblasprozesses die folgenden beiden Hypothesen formuliert:

1. Eine gleichmäßige Formfüllung führt zu einer verbesserten Homogenität der fasergeblasenen Preforms.
2. Eine gleichmäßige Formfüllung erhöht die Reproduzierbarkeit bei der Preformherstellung im Faserblasverfahren.

Eine Ursache für die ungleichmäßige Formfüllung ist der in Abschnitt 4.3 beschriebene prozessbedingt inkonstante Volumenstrom der Fasern in die Einblasform. Ziel ist es daher den Einblasvorgang aktiv zu regeln, um den inkonstanten Faservolumenstrom auszugleichen und eine reproduzierbare gleichmäßige Formfüllung zu erreichen. Im Folgenden werden der Aufbau und die Implementierung der Regelung beschrieben, sowie die Funktionsweise der Regelung validiert.

8.1 Systemtechnische Beschreibung der Regelungsaufgabe

Im folgenden Abschnitt wird zuerst das System, welches geregelt wird, beschrieben. Daraus wird die eigentliche Regelungsaufgabe abgeleitet, welche das Ziel hat eine gleichmäßige Formfüllung durch die Beeinflussung des Systems zu erreichen.

Eine Regelung bezeichnet allgemein die Beeinflussung eines dynamischen Systems auf Basis gemessener Größen aus dem System. Auf ein System wirken generell Eingangsgrößen und das Verhalten des Systems wird durch Ausgangsgrößen beschrieben. Die Dynamik des Systems ist dadurch charakterisiert, dass sich diese Größen zeitlich ändern und als zeitabhängige Funktionen dargestellt werden können (Lunze 2020, S. 2). Eine Regelung ist erforderlich, um mit einer gezielten Aktion das dynamische System bei unzureichend bekannten und schlecht vorhersagbaren Verhältnissen zu beeinflussen (Föllinger & Konigorski et al. 2016, S. 18).

Ein typischer Regelkreis ist in Abbildung 8-1 (a) abgebildet. Das dynamische System wird dabei als Regelstrecke bezeichnet, auf welches neben einer wirksamen Stellgröße $u_R(t)$ eine nicht beeinflussbare und meist unbekannte Störgröße $d(t)$ wirkt. Das System antwortet mit der Regelgröße $y(t)$, welche mittels des Messglieds erfasst wird, woraus aufgrund der dynamischen Eigenschaften des Messglieds die gemessene Regelgröße $y_m(t)$ folgt. Aufgabe und Ziel der Regelung ist die Nachführung der Regelgröße $y(t)$ auf die vorgegebene Führungsgröße $w(t)$. Der Regler gibt dafür eine Stellgröße $u(t)$ an das Stellglied aus, welches aufgrund der im Allgemeinen dynamischen Eigenschaften desselben mit der wirksamen Stellgröße $u_R(t)$ auf die Regelstrecke wirkt. Für den Aufbau der Regelung für den konkreten Anwendungsfall wie des Einblasprozesses im Faserblasverfahren muss diese allgemeine Grundstruktur konkretisiert werden. Dies beinhaltet die Formulierung der Regelungsaufgabe und anschließend die Auswahl der Regel- und Stellgröße (Lunze 2020, S. 14).

Für die Regelung des Einblasprozesses stellt die Einblasform das zu regelnde dynamische System dar, da sich die Menge und Position der Fasern zeitlich ändert und äußeren Größen unterworfen ist. Die Aufgabe der Regelung ist das Erreichen einer möglichst gleichmäßigen Füllung der Einblasform trotz des aufgrund der Bildung von Faserknäueln zeitlich inkonstanten Zustroms an Fasern. Als Störungen auf das System wirken weiterhin temporäre lokale Verdichtungen der Fasern durch den Luftstrom, sowie Turbulenzen, welche nicht beeinflusst werden können.

In den Untersuchungen in Abschnitt 7.3.2 konnte gezeigt werden, dass die Geradlinigkeit der Faserfront eine Aussage über die Gleichmäßigkeit der Formfüllung erlaubt. Aufgrund dessen und der möglichen sensorischen Erfassung durch die entwickelte Prozessüberwachung wird die Faserfront als Regelgröße ausgewählt. Die Faserfront wird als Vektor $x_F(y, t)$ definiert, womit die sich zeitlich ändernde Lage der Faserfront in Einblasrichtung gesehen (x-Richtung) an jedem Punkt quer zur Einblasrichtung (y-Richtung) beschrieben wird. Die mittels der Prozessüberwachung bestimmte Faserfront $x_{F,m}(y, t)$ dient als Rückführgröße an den Regler, welcher ebenfalls die vektorielle Führungsgröße $w(y, t)$ erhält.

Da durch die Position der Einblasdüse die Ablageposition der eingeblasenen Fasern und damit die Faserfront beeinflusst wird, eignet sich eine Regelung dieser besonders für die Optimierung des Einblasprozesses und wird daher als Eingangsgröße definiert.

Bei den bisherigen Versuchen mit konstanter Geschwindigkeit der alternierenden Einblasdüse hängt die Position der Fasern vom inkonstanten Faservolumenstrom ab. Die Einblasdüse wird daher als Stellglied für die aufzubauende Regelung definiert. Sie wirkt mit der Düsenposition $y_D(t)$ auf die Regelstrecke. Die möglichen Stellgrößen, welche vom Regler an die Einblasdüse gesendet werden, hängen von der hardwaretechnischen Umsetzung und der damit verbundenen Freiheitsgrade in der Anlagensteuerung ab. Da es hierfür mehrere Möglichkeiten gibt, wird dies an dieser Stelle nicht weiter konkretisiert. Die genaue Definition der Stellgröße folgt bei der Entwicklung der Regelungsstrategien in Abschnitt 8.2.1.

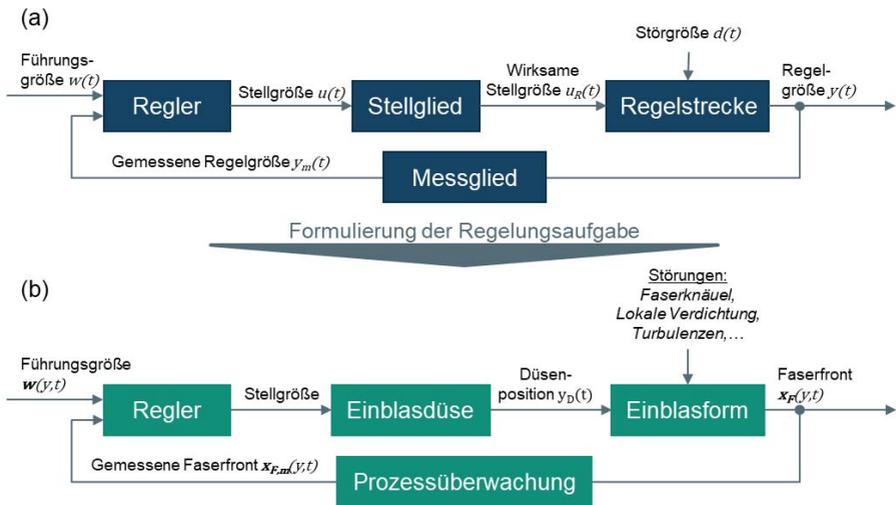


Abbildung 8-1: Allgemeine Grundstruktur eines Regelkreises (a) und daraus abgeleitete Struktur für den Regelkreis des Einblasprozesses (b)

Mit der vorliegenden systemtechnischen Beschreibung der Regelungsaufgabe liegen die Voraussetzungen für die folgende Entwicklung und Implementierung der Regelung vor.

8.2 Entwicklung und Implementierung von Regelungsstrategien

Ausgehend von der in Abschnitt 8.1 abgeleiteten Struktur des Regelkreises für die Regelung des Einblasprozesses (siehe Abbildung 8-1 (b)) werden nun Regelungsstrategien entworfen und das Regelgesetz aufgestellt. Anschließend erfolgt die Implementierung der Regelung in der Faserblas-Versuchsanlage.

8.2.1 Entwurf von Regelungsstrategien

Die klassischen Verfahren der Regelungstechnik für den Entwurf und die Analyse von Reglern beziehen sich auf ein Modell der Regelstrecke (modellbasierte Regelung). Dabei wird das dynamische System häufig zuerst als Zustandsraummodell im Zeitbereich mit Hilfe von Differentialgleichungen beschrieben. Anschließend wird das Modell in den Frequenzbereich transformiert und damit der Regler entworfen (Lunze 2020, S. 14). Das im Rahmen der vorliegenden Regelungsaufgabe zu beschreibende dynamische System der Vorgänge in der Einblasform ist äußerst komplex. Die erste Schwierigkeit besteht im zeitlich inkonstanten, lediglich stochastisch beschreibbaren Zustrom an Fasern. Die Auswirkung der eingeblasenen Fasern auf die Regelgröße Faserfront ist aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Ausprägung und Faserdichte der eingeblasenen Faserknäuel nicht mathematisch zu beschreiben. Weiterhin gibt es Einflüsse des Luftstroms, welcher zu einer kurzzeitigen Komprimierung der Fasern an der Faserfront im Bereich der aktuellen Düsenposition führt. Diese Komprimierung und der Wirkbereich sind wiederum von der aktuellen Formfüllung abhängig. Durch die Analyse der Prozessaufzeichnungen, der in Kapitel 7 vorgestellten experimentellen Untersuchung, wird außerdem festgestellt, dass sich durch Turbulenzen des Luftstroms vereinzelt Fasern von der Faserfront lösen und sich neu anlagern. Auch eine einfache Modellierung der beschriebenen in der Einblasform stattfindenden Vorgänge bedarf einer Festlegung der Modellparameter, welche nur auf Basis umfassender Versuche durchgeführt werden kann. Die erreichte Modellgüte mit den durch Versuchen gewonnenen Modellparametern ist mit hoher Wahrscheinlichkeit so gering, dass ein solch einfaches Modell für einen Reglerentwurf nicht ausreichend ist. Es bleibt daher festzuhalten, dass eine mathematische Modellierung zur ausreichend genauen Vorhersage des Systemverhaltens der vorliegenden Regelstrecke nicht gefunden werden kann.

Eine Möglichkeit das System auch ohne ein mathematisches Modell zu beschreiben, besteht in der sogenannten erfahrungsbasierten Modellierung. Dabei werden das Sys-

tem und dessen Ursache-Wirkungs-Verhalten durch einen Experten, z.B. den Anlagenbediener oder Prozessingenieur, beschrieben. Für eine einheitliche Beschreibung des vorliegenden Systems werden die in Abbildung 8-2 dargestellten mathematischen Beschreibungen und ein Koordinatensystem für die Einblasform eingeführt. Die Faserfront wird darin als Vektor $x_F(y, t)$ beschrieben. Aufgrund des Zustroms an Fasern folgt, dass die Terme in diesem Vektor mit zunehmender Einblaszeit größer werden. Da sich die Fasern im Bereich der aktuellen Position der Düse y_D anlagern, folgt somit der qualitative Zusammenhang $\Delta x_F(y, \Delta t) = f(y_D(\Delta t))$.

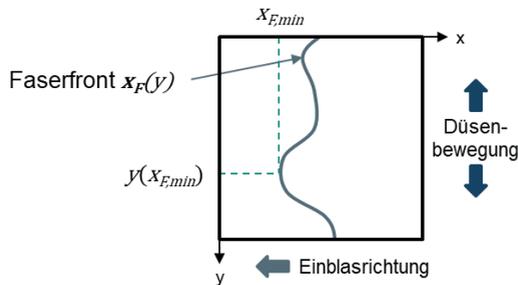


Abbildung 8-2: Darstellung der Faserfront im Koordinatensystem der Einblasform

Da kein exaktes mathematisches Modell vorliegt, können die klassischen Entwurfsvorgehen der Regelungstechnik nicht angewandt werden. Mit Hilfe des erfahrungsbasierten Modells, kann jedoch auch ein erfahrungsbasierter Entwurf der Regler erfolgen. Auf Basis des Expertenwissens über das Systemverhalten kann somit abgeleitet werden, wie das Stellglied in Abhängigkeit des aktuellen Zustands des Systems einzustellen ist.

Die Steuerung der Bewegung der Einblasdüse, welche das Stellglied im Regelkreis darstellt, erfolgt auf der speicherprogrammierten Steuerung (SPS) der Faserblas-Versuchsanlage mit dem Softwaresystem *TwinCAT 3* der *Beckhoff Automation GmbH & Co. KG*. Die auf einer Linearachse mit Riementrieb und durch einen Schrittmotor angetriebene Einblasdüse ist in *TwinCAT 3* als Achse konfiguriert. Für die Ansteuerung der Achse werden vordefinierte Funktionsbausteine aus der Motion Control Bibliothek genutzt, welche den *PLCopen* Spezifikationen entsprechen. Die Motion Control der SPS übernimmt dabei die Umsetzung einer Positionsvorgabe in Lage- und Geschwindigkeitswerte in einer offenen Steuerkette (Weck & Brecher 2006, S. 152). Da diese bereits

implementierte Steuerkette weiter genutzt werden soll, erfolgt die Definition der Stellgröße für die Regelung des Einblasprozesses auf Ebene der Eingangsgrößen der in der Anlagensteuerung genutzten Funktionsbausteine. Daraus ergeben sich zwei Regelungsstrategien mit unterschiedlichen Stellgrößen $u(t)$ für den Regler:

- Regelung der Geschwindigkeit der Einblasdüse
- Dynamische Positionsvorgabe für die Einblasdüse

Die Funktionsweise und das Regelgesetz der beiden Regelstrategien werden im Folgenden detailliert erläutert.

8.2.1.1 Geschwindigkeitsbasierte Regelung

Bei der geschwindigkeitsbasierten Regelung wird durch den Regler die Geschwindigkeit der Düse in Abhängigkeit von der aktuellen Faserfront als Stellgröße berechnet. Das Bewegungsprofil der Einblasdüse entspricht dabei weiterhin der alternierenden Bewegung über die gesamte Breite der Einblasform, wie es auch im ungeregelten Betrieb stattfindet.

Ausgehend von der bereits beschriebenen qualitativen Modellierung des Systems, beruht die Regelung auf der Anpassung der Düsengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Differenz der aktuellen Position der Düse $y_D(t)$ zum Ort der geringsten Formfüllung $y(x_{F,min})$. Die aktuelle Position der Düse entspricht dabei der Düsenmitte. Hieraus wird das Regelgesetz für die Düsengeschwindigkeit $v_a(t)$ wie folgt aufgestellt:

$$v_a(t) = \alpha * |y_D(t) - y(x_{F,min})| + v_{a,min} \quad \text{Formel 8-1}$$

Hierbei ist α ein Proportionalitätsfaktor mit Hilfe dessen der Stellwert für die Düsengeschwindigkeit skaliert werden kann. $v_{a,min}$ ist die Mindestgeschwindigkeit, welche die Einblasdüse mindestens haben muss, damit die Düse nicht still steht, wenn sie sich genau am Ort der geringsten Formfüllung befindet.

Die Vorgabe eines neuen Soll-Werts für die Geschwindigkeit in einer aktuellen Bewegung, welche in der SPS mit Hilfe des Motion-Funktionsbausteins *MC_MoveAbsolute* realisiert ist, ist nicht möglich. Für die Anpassung der Geschwindigkeit in Echtzeit muss daher der Geschwindigkeitsoverride-Wert für die Achse im übergeordneten Organisationsbaustein *MC_Power* angepasst werden. Der Override 0 ist durch Formel 8-2 definiert und limitiert die Geschwindigkeit in allen Fahrbefehlen der Achse.

$$O(t) = \frac{v_d(t)}{v_{d,max}} * 100 \quad \text{Formel 8-2}$$

Durch Einsetzen der Formel 8-1 in Formel 8-2 und der Definition, dass die Mindestgeschwindigkeit $v_{d,min}$ einem Zehntel der Maximalgeschwindigkeit $v_{d,max}$ entspricht, folgt:

$$O(t) = \frac{100 \alpha * |y_D(t) - y(x_{F,min})|}{v_{d,max}} + 10 \quad \text{Formel 8-3}$$

Aus der Grundannahme, dass der Override sein Maximum von 100 beim größten Abstand der Düse zum Ort der geringsten Formfüllung aufweist, wird der Proportionalitätsfaktor α abgeleitet. Aufgrund der Breite der Düse und des damit folgenden möglichen Verfahrenswegs der Düse folgt, dass der Term $y_D(t) - y(x_{F,min})$ maximal einen Betrag von 328 annehmen kann. Mit der formulierten Grundannahme und dem Einsetzen des Wertes 328 in Formel 8-3 folgt durch Umstellen:

$$\alpha = \frac{0,9 * v_{d,max}}{328} \quad \text{Formel 8-4}$$

Mit dem Proportionalitätsfaktor folgt das Regelgesetz für den Override:

$$O(t) = 90 * \frac{|y_D(t) - y(x_{F,min})|}{328} + 10 \quad \text{Formel 8-5}$$

8.2.1.2 Positionsbasierte Regelung

Die positionsbasierte Regelung basiert auf der Idee, die Düse direkt zum Ort der geringsten Formfüllung $y(x_{F,min})$ zu verfahren, um das dort vorherrschende „Defizit“ an Fasern aufzufüllen. Die Positionierung der Düse auf diese Position erfolgt mit konstanter Geschwindigkeit. Da während der Positionierung weiterhin Fasern zugeführt werden, ändert sich das dynamische System und folglich $y(x_{F,min})$ fortwährend. Das Regelgesetz für die Stellgröße $y_{D,s}$ ist folglich:

$$y_{D,s}(t) = y(x_{F,min}(t)) \quad \text{Formel 8-6}$$

Die Bewegung auf eine gezielte Position wird in der SPS mit Hilfe des Motion-Funktionsbausteins *MC_MoveAbsolute* realisiert. Der Funktionsbaustein *MC_MoveAbsolute* startet eine Positionierung auf eine absolute Zielposition und meldet das Erreichen der gewünschten Position zurück. Während der Positionierung kann durch den Funktions-

baustein kein neuer Positionswert verarbeitet werden. Die Vorgabe der Stellgröße erfolgt daher nicht zeitkontinuierlich, sondern ist nur zu diskreten Zeitpunkten nach Abschluss eines Positioniervorgangs möglich. Das Regelgesetz muss folglich zeitdiskret formuliert werden, wobei die Zeitpunkte t_n jeweils dem Endzeitpunkt eines vorhergegangenen Positioniervorgangs entsprechen:

$$y_{D,s}(t) = y(x_{F,min}(t_n)) \quad \text{Formel 8-7}$$

8.2.2 Implementierung der Regelungsstrategien

Die in den Abschnitten 8.2.1.1 und 8.2.1.2 beschriebenen Regelstrategien werden im Rahmen der angeleiteten Masterarbeit (A_Xu 2020) auf der Faserblas-Versuchsanlage implementiert. Die für die steuerungstechnische Implementierung der Regelung notwendigen Teilsysteme sind das Edge-Device mit der darauf laufenden Bildverarbeitung des Systems zur Prozessüberwachung, sowie die speicherprogrammierbare Steuerung als Hauptsteuerung der Anlage (vgl. Abbildung 5-6). Im Folgenden wird beschrieben wie die Regelung darauf implementiert wird.

Die Programmierung der Regelung erfolgt ebenso wie die Prozessüberwachung mit Hilfe der Software *MATLAB*. Da der Regler auf die durch die Bildverarbeitung der Prozessüberwachung detektierte Faserfront angewiesen ist, kann die Regelung direkt in den bestehenden *MATLAB*-Code integriert werden. Dies bietet den Vorteil, dass keine zusätzliche Schnittstelle erforderlich ist und somit die Reaktionszeit verkürzt werden kann. Weiterhin reduziert sich die Bandbreite an Daten, welche mittels der *ADS*-Schnittstelle vom Edge-Device zur SPS der Anlage gesendet werden muss, woraus ebenfalls eine schnellere Reaktionszeit resultiert. Auf Seiten der SPS wird die Stellgröße entsprechend der gewählten Regelstrategie durch die Funktionsbausteine der Motion Control in die gewünschte Bewegung des Motors, welche die Düse antreibt, umgesetzt. In Abbildung 8-3 ist ersichtlich, wie die Regelung in die Steuerungsarchitektur der Faserblas-Versuchsanlage eingebettet ist und die Schnittstellen definiert sind.

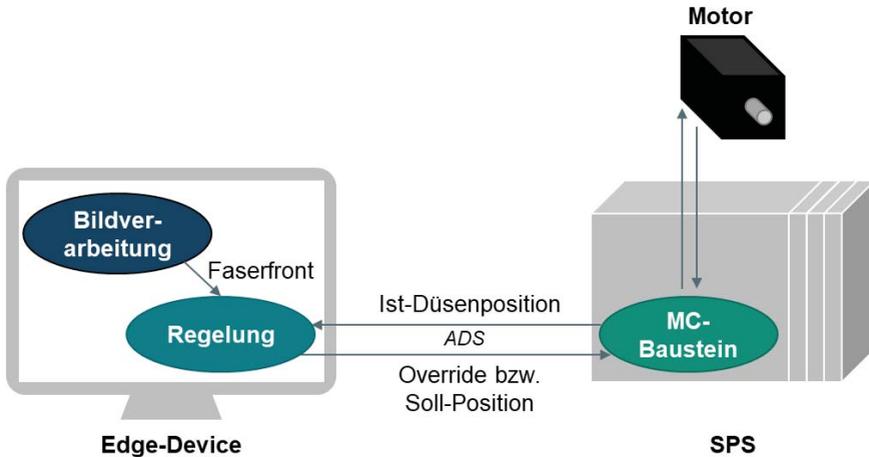


Abbildung 8-3: Implementierung der Regelung in der der Faserblas-Versuchsanlage

8.3 Validierung der Regelungsstrategien

Für die Validierung der Regelungsstrategien werden zwei Versuchsreihen mit geschwindigkeitsbasierter und positionsbasierter Regelung auf der Faserblas-Versuchsanlage durchgeführt. Als Referenz ohne Regelung dient dabei die Versuchsreihe C aus Kapitel 7, da diese die beste Homogenität aufweist. Für jede Versuchsreihe werden fünf Preforms hergestellt. Die für die Versuchsreihen genutzten Versuchsparameter sind in Tabelle 8-1 gegeben und entsprechen in den Parametern mit der höchsten Signifikanz den Parametern, welche für Versuchsreihe C genutzt werden. Die eingestellte Düsengeschwindigkeit entspricht bei der geschwindigkeitsbasierten Regelung der Maximalgeschwindigkeit, welche die Düse am Ort der geringsten Formfüllung aufweist. Analog zur Parameterstudie wird als Fasermaterial ein Glasroving vom Typ *ADVANTEX R25 HX14* der Firma *R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH* (Waldenbuch) mit einer Faserfeinheit von 2400 tex verarbeitet.

Tabelle 8-1: Versuchsparameter für die Validierung der Regelungsstrategien

Versuchsparameter	Wert
Einblaspalt d_E	100 mm
Faservorschub v_F	500 mm/s
Faserlänge l_F	50 mm
Ventilatorrehzahl n_V	2910 U/min
Düsengeschwindigkeit v_D	150 mm/s
Material	Glasroving <i>ADVANTEK R25 HX14</i>

Die Bewertung der Regelungsstrategien erfolgt anhand des Einflusses der Regelung auf die Regelgröße. Bereits in Abschnitt 7.3.2 wird zur Bewertung der Faserfront der durchschnittliche Geradheitsindex als Kenngröße eingeführt. Ziel der Regelung ist eine gleichmäßige Formfüllung, welche durch eine hohe Geradheit der Faserfront während der Einblaszeit charakterisiert ist. Die über die Einblaszeit gemittelte Geradheit der Faserfront (durchschnittlicher Geradheitsindex nach Formel 7-1) wird somit als Maß für die Gleichmäßigkeit der Formfüllung herangezogen. Die gemessenen numerischen Größen der Preforms zur Validierung der Regelung sind im Anhang in Tabelle 0-6 zu finden. Abbildung 8-4 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen als Fehlerbalken des durchschnittlichen Geradheitsindex aus den Versuchen der beiden Versuchsreihen mit geregelter Einblasdüse und der Referenz-Versuchsreihe. Die Versuche ohne Regelung weisen mit einem Wert von 22,2 den höchsten durchschnittlichen Geradheitsindex auf. Die Versuchsreihen mit einer geregelten Düsenbewegung haben im Mittel einen durchschnittlichen Geradheitsindex von 14,5 für die geschwindigkeitsbasierte Regelung und 16,6 für die positionsbasierte Regelung. Die Regelung hat also einen deutlich feststellbaren positiven Einfluss auf den Geradheitsindex.

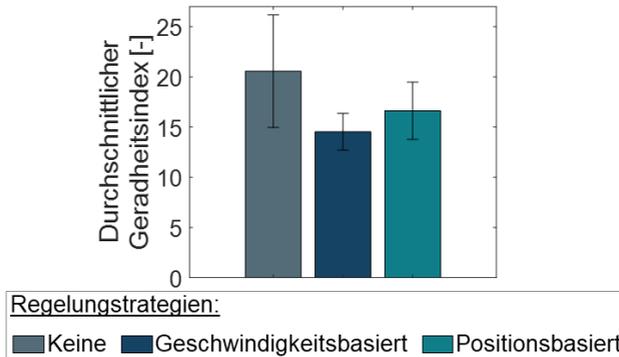


Abbildung 8-4: Durchschnittlicher Geradheitsindex bei unterschiedlichen Regelungsstrategien

Es kann somit festgehalten werden, dass die implementierte Regelung zu einer gleichmäßigeren Füllung der Einblasform führt. Das Hauptziel der Regelung den inkonstanten Faservolumenstrom auszugleichen und eine gleichmäßigere Formfüllung zu erreichen ist somit erfüllt. Als weiteres Ergebnis folgt, dass die geschwindigkeitsbasierte Regelung das Regelungsziel besser als die positionsbasierte Regelung erreicht.

Im Rahmen der Validierung der Regelung werden außerdem die zu Beginn des Kapitels formulierten Hypothesen untersucht. Zur Überprüfung der Hypothese 1 einer verbesserten Homogenität durch die mittels der Regelung erreichte gleichmäßige Formfüllung wird die Homogenität der mit geregelttem Einblasprozess hergestellten Preforms berechnet. Abbildung 8-5 (a) zeigt das Mittel der Homogenitätsindizes der in den Versuchsreihen hergestellten fasergeblasenen Preforms. Die Referenzversuchsreihe, welche bereits in der in Kapitel 7 beschriebenen Parameterstudie den geringsten Homogenitätsindex zeigte, weist mit einem mittleren Homogenitätsindex von 0,31 den besten Wert auf. Die Homogenitätsindizes der mit einer geregelten Düsenbewegung hergestellten Preforms betragen im Mittel 0,37 bzw. 0,4.

Aus den Ergebnissen folgt, dass die Regelung der Einblasdüse unabhängig von der angewandten Regelungsstrategie zu keiner Verbesserung der Homogenität führt. Die für das vorliegende Kapitel definierte Arbeitshypothese, dass eine gleichmäßigere Füllung der Einblasform zu einer verbesserten Formfüllung führt, kann somit auf Grundlage der Validierungsergebnisse nicht bestätigt werden. Dies zeigt, dass sich der bereits

festgestellte negative Effekt der Knäuelbildung so stark auswirkt, dass er durch eine Regelung des Einblasprozesses nicht kompensiert werden kann.

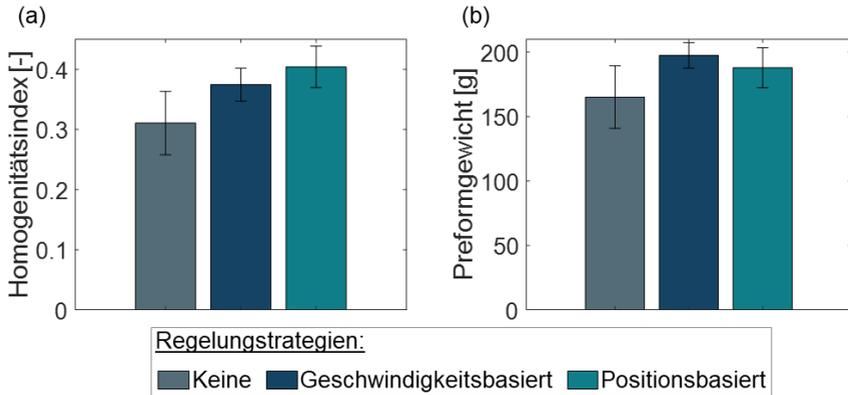


Abbildung 8-5: Homogenitätsindex (a) und Preformgewicht (b) bei unterschiedlichen Regelungsstrategien

Zur Validierung der zweiten Hypothese einer erhöhten Reproduzierbarkeit der Preforms bei gleichmäßigerer Formfüllung durch eine Regelung des Einblasprozesses wird das Gewicht der Preforms aus den Versuchsreihen betrachtet. In Abbildung 8-5 (b) ist das Mittel des Preformgewichts und die Standardabweichung (als Fehlerbalken) der in den Versuchsreihen hergestellten fasergeblasenen Preforms dargestellt. Die Werte sind zur einfacheren Übersicht numerisch in Tabelle 8-2 gegeben.

Tabelle 8-2: Mittelwert und Standardabweichung des Preformgewichts nach Versuchsreihe

Versuchsreihe	Mittelwert	Standardabweichung	
		absolut	relativ
Referenz	165,1 g	22,175 g	13,43 %
Geschwindigkeitsbasierte Regelung	197,6 g	8,913 g	4,51 %
Positionsbasierte Regelung	188,0 g	13,928 g	7,41 %

Bei der Betrachtung der Werte ist zu erkennen, dass die mit geregelter Düsenbewegung hergestellten Preforms deutlich schwerer sind. Vergleicht man dies mit der durchschnittlichen Geradheit, ist zu schlussfolgern, dass ein gleichmäßigerer Einblasprozess zu einem höheren Gewicht führt. Dies wird dadurch erklärt, dass es bei einer gleichmäßigen Faserfront zu einer dichteren Anlagerung der Fasern kommt. Es wird weiterhin beobachtet, dass innerhalb der Versuchsreihen mit einer Regelung der Einblasdüse die Standardabweichung deutlich geringer ist. Eine geringe Standardabweichung innerhalb einer Versuchsreihe spricht für eine gute Reproduzierbarkeit des Einblasprozesses. Die relative Standardabweichung der Referenz-Versuchsreihe liegt mit 13,43% im Bereich der in der Arbeit von (Dackweiler & Fleischer 2017) festgestellten relativen Standardabweichung von 12,56 %. Gegenüber der Referenz-Versuchsreihe und dem Literaturwert wird die Standardabweichung mittels der geschwindigkeitsbasierten Regelung um nahezu Faktor 3 verbessert. Die zweite Arbeitshypothese, dass eine gleichmäßige Formfüllung die Reproduzierbarkeit bei der Preformherstellung im Faserblasverfahren erhöht, wird somit bestätigt.

Fazit:

Auf Basis der Ergebnisse aus den Untersuchungen aus Kapitel 7 und der in Kapitel 5 vorgestellten Prozessüberwachung wird eine Regelung des Einblasprozesses konzipiert und in der Faserblasanlage implementiert, welche die Bewegung der Einblasdüse in Abhängigkeit der aktuellen Faserfront regelt. Aufgrund der fehlenden exakten mathematischen Beschreibung des Systemverhaltens, erfolgt eine erfahrungsbasierte Modellierung und Entwurf des Reglers.

Mittels einer experimentellen Untersuchung wird die Funktionsfähigkeit der Regelung validiert und deren Einfluss auf die Preforms bewertet. Die Betrachtung der durchschnittlichen Geradheit der Faserfront zeigt, dass durch die Regelung die gewünschte Regelgröße deutlich verbessert wird.

Durch die Validierung wird weiterhin festgestellt, dass sich aus der durch die Regelung erreichten gleichmäßigeren Füllung der Einblasform keine Verbesserung der Homogenität erreichen lässt. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Kapitel 7 folgt, dass allein durch eine verbesserte Führung der Einblasparameter keine ausreichende Verbesserung der Homogenität der fasergeblasenen Preforms erreicht wird. Eine entscheidende Wirkung auf die Homogenität der Preforms haben die sich in der Förderstrecke bildenden Faserknäuel.

Die Betrachtung des Preformgewichts der mit geregelter Einblasprozess hergestellten Preforms zeigt, dass durch die Regelung des Einblasprozesses eine höhere Reproduzierbarkeit erreicht wird. Kombiniert mit den Ergebnissen aus Kapitel 7, welche der Einblasparameter signifikant sind und welchen qualitativen Einfluss diese auf das Gewicht der Preforms haben, kann dieses somit gezielt und reproduzierbar eingestellt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

In den letzten Jahren steigt die Bedeutung von Leichtbau aufgrund der zunehmenden Herausforderungen hinsichtlich Ressourcenschonung und Energieeffizienz an. Insbesondere Faser-Kunststoff-Verbunde bieten hierzu ein hohes Potential, weisen allerdings höhere Kosten im Vergleich zu metallischen Werkstoffen auf. Ein Hauptkostentreiber sind dabei das verarbeitete Fasermaterial und die Bauteilherstellung, wovon in einer Resin-Transfer-Molding-Prozesskette aufgrund des Verschnitts ein wesentlicher Kostenanteil auf den Prozessschritt des Preformings entfällt. Das im Rahmen dieser Arbeit fokussierte Faserblasverfahren erlaubt die verschnittfreie direkte Herstellung von Langfaser-Preforms mit komplexen Geometrien in einer geschlossenen Einblasform.

Im Vergleich zu alternativen Prozessen für die Herstellung von Langfaserpreforms wie der Binder-Umform-Technik mit Vlies-Halbzeugen und dem ebenfalls direkten Faserspritzverfahren, weist das Faserblasverfahren aufgrund der hohen Materialiensatzquote und der breiten Palette an einsetzbaren Faserarten eine hohe Ressourceneffizienz auf. Weiterhin können direkt dreidimensionale Geometrien mit lokal unterschiedlicher Dichte hergestellt werden. Bisherige Forschungsarbeiten zeigen allerdings, dass die Eigenschaften der fasergeblasenen Preforms stark schwanken und eine ungleichmäßige Faserverteilung vorliegt. Dies führt zu einer unzureichenden Infiltration der Preforms und damit einer mangelhaften Bauteilqualität.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher einen Beitrag zur besseren Überwachung der Formfüllung und dem Aufbau von Prozesswissen für das Faserblasverfahren zu leisten sowie darauf aufbauend eine Regelung zur Optimierung des Prozesses aufzubauen.

Die Durchführung der Versuche erfolgt an einer im Rahmen der Dissertation aufgebauten Faserblas-Versuchsanlage. Durch die Nutzung eines Schneidwerks für die Faserebereitstellung können die Faserlängen und die Faserzufuhr sehr genau eingestellt werden. Die offene Steuerungsarchitektur erlaubt den Zugriff auf alle Anlagenzustände und die Nutzung der Daten für die Prozessanalyse sowie die einfache Integration der Prozessüberwachung und Implementierung einer Regelung des Prozesses.

Mittels eines relationsorientierten Funktionsmodells wird der Prozessablauf im Faserblasverfahren analysiert. Dadurch können die wesentlichen Funktionen und deren Zusammenhang beschrieben und der Einblasvorgang aufgrund des inkonstanten Faser volumenstroms als kritischer Prozessschritt identifiziert werden. Anschließend erfolgt eine systematische Analyse der prozessspezifischen Einflussgrößen auf den Einblasvorgang. Die Zusammenhänge zwischen einzelnen an der Anlage einstellbaren Parametern und den resultierenden Prozessgrößen werden analytisch beschrieben oder in experimentellen Versuchen ermittelt.

Für die Ermittlung des Formfüllzustandes und der Faserverteilung in der Einblasform wird eine Kamera als geeignete Sensorik ausgewählt und in die Einblasform implementiert. Die Detektion der Faserfront aus den aufgenommenen Bildern erfolgt mit einer Bildverarbeitung auf einem in der Faserblas-Versuchsanlage installierten Edge-Device. Hierfür werden mehrere Methoden vergleichend untersucht, wobei in der Validierung faltende neuronale Netze als die geeignetste Methode für die in der Einblasform vorherrschende schwierige Beleuchtungssituation identifiziert werden.

Die am Ende eines Einblasvorganges aufgenommenen Durchlichtaufnahmen ermöglichen die zerstörungsfreie Charakterisierung der Preforms. Zur Bewertung der Homogenität werden mehrere Methoden aus der Literatur mittels simulierter Testbilder und realer Aufnahmen untersucht. Die Berechnung eines Homogenitätsindex auf Basis des quadrantenbasierten Variationskoeffizienten zeigt hierbei die höchste Genauigkeit und Stabilität. Für die Bestimmung der Faserorientierung wird ein Methodenset entwickelt. Mit der quadrantenbasierten schnellen Fourier Transformation wird die Faserorientierungsverteilung bestimmt. Die Weiterentwicklung der Struktur-Tensor-Methode erlaubt die Bestimmung der lokalen Faserorientierung der Preforms.

Die Identifikation der Einflüsse der Prozessparameter auf die mittels der entwickelten bildbasierten Methoden bestimmten Preformeigenschaften, wird durch eine experimentelle Parameterstudie auf Basis einer statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Es wird festgestellt, dass sich das Flächengewicht der Preforms hauptsächlich durch eine Verdichtung der Fasern in Einblasrichtung ergibt. Wesentliche Einflussgrößen hierauf sind die Einblasgeschwindigkeit und der Faservorschub. Der Einblaspalt hat lediglich einen geringen Einfluss. Die Homogenität der hergestellten Preforms schwankt sehr stark, was auf die Bildung von Faserknäueln in der Förderstrecke zurückzuführen ist. Im Rahmen dieser Arbeit kann festgestellt werden, dass lediglich die durch den Faser-

vorschub definierte Menge an eingeblasenen Fasern pro Zeit einen signifikanten Einfluss auf die Homogenität der Preforms hat. Die Verringerung des Faservorschubs beeinflusst die Homogenität dabei positiv. Im Vergleich zu industriell gefertigten Vliesen weisen die fasergeblasenen Preforms jedoch eine geringere Homogenität auf. Weiterhin wird unabhängig der gewählten Einblasparameter eine starke Orientierung der Fasern quer zur Einblasrichtung festgestellt, welche im Mittel einem Anisotropieverhältnis von 2,69 entspricht.

Zum Ausgleich des inkonstanten Faservolumenstroms erfolgen der Aufbau einer Regelung des Einblasprozesses und deren Implementierung in der Faserblas-Versuchsanlage. Auf Basis der aktuellen Lage der Faserfront wird die Düsenbewegung geregelt, um eine möglichst gleichmäßige Formfüllung zu erreichen. Die Validierung der Regelung zeigt, dass eine gleichmäßigere Formfüllung erreicht wird. Es wird jedoch keine Verbesserung der Homogenität durch die Regelung aufgrund des negativen Einflusses der Faserknäuel erreicht. Die Betrachtung des Preformgewichts zeigt allerdings, dass die Reproduzierbarkeit der Preforms durch die Regelung des Einblasprozesses um nahezu Faktor 3 gesteigert wird.

Die Ergebnisse der Dissertation führen zu einem verbesserten Verständnis des Einblasprozesses im Faserblasverfahren. Insbesondere sind die relevanten Prozessparameter identifiziert, ihr Einfluss auf die Eigenschaften der hergestellten Preforms herausgestellt und die zugrundeliegenden Mechanismen beschrieben. Die gewonnenen Erkenntnisse können qualitativ auch auf die Herstellung von Faserformteilen jenseits des Anwendungsfall als Preform übertragen werden. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Methoden können durch die in Abschnitt 9.2 skizzierten Weiterentwicklungen zur Überwachung, verbesserten Prozessführung und Qualitätssicherung des Faserblasverfahrens in der Industrie genutzt werden.

9.2 Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wird ein System zur Überwachung des Einblasprozesses entwickelt und erfolgreich validiert. Hierzu wird die Einblasform durch die Nutzung einer Plexiglasscheibe als Boden und Deckel der Form adaptiert, um eine Kamera integrieren zu können. Durch die fehlende Möglichkeit der Einleitung von Warmluft in Dickenrichtung des Preforms, kann keine Binderaktivierung in dieser Versuchs-Einblasform erfolgen. In weiteren Arbeiten sollte daher die Integration der Kamera in eine Einblasform für die serientaugliche Preformherstellung integriert werden. Die in der Arbeit für die

Bildverarbeitung verwendeten faltenden neuronalen Netze erlauben aufgrund ihres Potentials auch Muster aus Bildern mit fehlenden Bildelementen zu erkennen die Detektion der Faserfront durch einen sonst üblichen Boden der Einblasform aus Lochblech. Hierfür müssen die Netze auf die geänderte Aufnahmesituation neu trainiert werden. Somit kann die Prozessüberwachung auch für Einblasformen, die keine rechteckige Grundfläche aufweisen, angepasst werden.

Die untersuchten Methoden für die Bewertung der Homogenität sind aktuell auf quadratische Proben beschränkt. Um hiermit auch Preforms mit komplexeren Geometrien bewerten zu können, müssen diese daher verallgemeinert werden. Ein möglicher Ansatz hierzu ist eine abschnittsweise Auswertung der Homogenität und deren Fusion zu einem bauteilweiten Homogenitätsindex. Weiterhin werden gewollte lokale Unterschiede des Flächengewichts, welche mit dem Faserblasverfahren herstellbar sind, durch die Methoden nicht berücksichtigt. Eine Möglichkeit der Erweiterung der Methode besteht in einer Korrektur des Grauwertes der Durchlichtbilder in Abhängigkeit der gewollten Flächengewichtsdifferenzen. Dies bedarf einer experimentellen Bestimmung der Grauwerte des Durchlichtbildes für gegebene Flächenmassen und Materialien unter gleichbleibenden Aufnahmebedingungen.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich die bereits im Stand der Forschung beschriebene Bildung von Faserknäuel negativ auf die Homogenität der Preforms und deren Reproduzierbarkeit auswirkt und dies nur bedingt durch eine Optimierung der Einblasparameter bzw. Regelung des Einblasprozesses ausgeglichen werden kann. Ein Fokus weiterer Arbeiten sollte daher auf die Optimierung der Faserbereitstellung, -aufbereitung und -förderung gelegt werden, um die Bildung dieser Knäuel zu verhindern. Ein möglicher Ansatz besteht in der Verwendung eines Speisevliesbildners mit einer Reglerkombination zur Beeinflussung des Flockenstroms und der Transportluft, wie er in modernen Anlagen zur Vliesherstellung vorzufinden ist (Fuchs & Albrecht 2012, S. 130–131).

Publikationsliste

Die nachfolgend aufgeführten Publikationen sind während der Tätigkeit des Verfassers der vorliegenden Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik entstanden.

(Moll & Schäfer et al. 2018)

Moll, P.; Schäfer, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2018), „Aufbau einer modularen Produktionsanlage für hybride Faserverbundbauteile“, VDI-Z Integrierte Produktion, 160(11), S. 55–58.

(Moll & Jacob et al. 2018)

Moll, P.; Jacob, A.; Schäfer, M.; Coutandin, S.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2018), „Plattformbasiertes Geschäftsmodell für rekonfigurierbare Produktionsanlagen im Leichtbau“, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113(9), S. 580–583.

(Moll & Ohlberg et al. 2019)

Moll, P.; Ohlberg, L.; Salzer, S.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Integrated Gripping-system for Heating and Preforming of Thermoplastic Unidirectional Tape Laminates“, Procedia CIRP, 85, S. 266–271.

(Moll & Schäfer et al. 2019a)

Moll, P.; Schäfer, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Reconfigurable modular production plant for thermoplastic hybrid composites“, Production Engineering, 13(3-4), S. 469–477.

(Moll & Schäfer et al. 2019b)

Moll, P.; Schäfer, A.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Method for the Investigation of Mold Filling in the Fiber Injection Molding Process Based on Image Processing“, Procedia CIRP, 86, S. 156–161.

(Schäfer & Moll et al. 2019)

Schäfer, M.; Moll, P.; Brocke, L.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Model for Web-Application based Configuration of Modular Production Plants with automated PLC Line Control Code Generation“, Procedia CIRP, 83, S. 292–297.

(Baranowski & Moll et al. 2020)

Baranowski, M.; Moll, P.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2020), „SLS-Prozess für endlosfaserverstärkte Kunststoffbauteile“, VDI-Z Integrierte Produktion, 162(5).

(Moll & Pirrung et al. 2020)

Moll, P.; Pirrung, F.; Baranowski, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2020), „Evaluation of Fiber Placement Strategies for the Implementation of Continuous“. SAMPE 2020 Virtual Series. Additive Manufacturing.

(Moll & Wang et al. 2020)

Moll, P.; Wang, S.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2020), „Analysis of Basis Weight Uniformity Indexes for the Evaluation of Fiber Injection Molded Nonwoven Pre-forms“, *Autex Research Journal*. (mit Stand 26.03.2021 nur online veröffentlicht; abrufbar mit DOI 10.2478/aut-2020-0039)

(Moll & Wang et al. 2021)

Moll, P.; Wang, S.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2021), „Fiber orientation measurement of fiber injection molded nonwovens by image analysis“, *Textile Research Journal*, 91(5-6).

Literaturverzeichnis

Literaturangaben mit dem Präfix „A_“, beispielsweise (A_Fei 2019) bezeichnen studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden.

(A_Fei 2019)

Fei, M. (2019), Analyse der Homogenität fasergeblasener Vliese auf Basis von Durchlichtaufnahmen. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Fricker 2019)

Fricker, L. (2019), Analyse des Schneidwerks und Fasereinblassystems einer Faserblasanlage. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Ongom-Along 2019)

Ongom-Along, C. (2019), Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Anlage für das Faserblasverfahren. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Qiu 2020)

Qiu, Y. (2020), Investigation and Optimization of a Machine Vision System for Process Monitoring. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Schäfer 2019)

Schäfer, A. (2019), Entwicklung und Umsetzung einer Werkzeugüberwachung für das Faserblasverfahren durch Bildverarbeitung. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Wang 2019)

Wang, S. (2019), Analysis of the Fiber Orientation Distribution of Fiber-Injection Molded Nonwovens on the Basis of Transmitted Light Images. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Xu 2020)

Xu, J. (2020), Development of Adaptive Process Strategies for Fiber Injection Molding. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. wbk Institut für Produktionstechnik.

(Amirnasr & Shim et al. 2014)

Amirnasr, E.; Shim, E.; Yeom, B.-Y. & Pourdeyhimi, B. (2014), „Basis weight uniformity analysis in nonwovens“, *The Journal of The Textile Institute*, 105(4), S. 444–453.

(Ansari 2020)

Ansari, S. (2020), *Building Computer Vision Applications Using Artificial Neural Networks. With Step-by-Step Examples in OpenCV and TensorFlow with Python*, Apress, Berkeley. ISBN: 978-1-4842-5887-3.

(Arthur & Vassilvitskii 2007)

Arthur, D. & Vassilvitskii, S. (2007), „K-means++: The Advantages of Careful Seeding.“ in *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, Hrsg. H. Gabow, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia (PA), USA, S. 1027–1035.

(AVK 2010)

AVK (2010), *Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-0881-3.

(Azad & Gockel et al. 2011)

Azad, P.; Gockel, T. & Dillmann, R. (2011), *Computer Vision. Das Praxisbuch*, Elektor-Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-89576-165-2.

(Badrinarayanan & Kendall et al. 2017)

Badrinarayanan, V.; Kendall, A. & Cipolla, R. (2017), „SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12), S. 2481–2495.

(Bayan & Levitt et al. 2009)

Bayan, C.; Levitt, J. M.; Miller, E.; Kaplan, D. & Georgakoudi, I. (2009), „Fully automated, quantitative, noninvasive assessment of collagen fiber content and organization in thick collagen gels“, *Journal of applied physics*, 105(10), 102042.

(Belhaj & Deleglise et al. 2013)

Belhaj, M.; Deleglise, M.; Comas-Cardona, S.; Demouveau, H.; Binetruy, C.; Duval, C. & Figueiredo, P. (2013), „Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms“, *Composites Part B: Engineering*, 50, S. 107–111.

(Bernstein 2014)

Bernstein, H. (2014), *Messelektronik und Sensoren*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-00548-1.

(Beyerer & Puente León et al. 2016)

Beyerer, J.; Puente León, F. & Frese, C. (2016), *Machine vision. Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-662-47793-9.

(Bin & Xiaoming et al. 2017)

Bin, Y.; Xiaoming, Z.; Yuening, Z. & Dongyue, Q. (2017), „The influence of process parameters on needle punched nonwovens investigated using image analysis“, *RSC Advances*, 7(9), S. 5183–5188.

(Boeckerman 1992)

Boeckerman, P. A. (1992), „Meeting the special requirements for on-line basis-weight measurement of lightweight nonwoven fabrics“, *Tappi Journal*, 75(12), S. 166–172.

(Boisse & Hamila et al. 2011)

Boisse, P.; Hamila, N.; Vidal-Sallé, E. & Dumont, F. (2011), „Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses“, *Composites Science and Technology*, 71(5), S. 683–692.

(Bose-Munde 2017)

Bose-Munde, A. (2017), „Faserbauteile leicht herstellen“, *Automobil Industrie*(5), S. 48–49.

(Bouydaïn & Colom et al. 2001)

Bouydaïn, M.; Colom, J. F.; Navarro, R. & Pladellorens, J. (2001), „Determination of paper formation by Fourier analysis of light transmission images“, *Appita Journal*, 54(2), 103-105+115.

(Brast 2001)

Brast, K. (2001), *Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung.

(Bugao & Ling 1997)

Bugao, X. & Ling, Y. (1997), „Determining Fiber Orientation Distribution in Nonwovens with Hough Transform Techniques“, *Textile Research Journal*, 67(8), S. 563–571.

(Burn 2015)

Burn, D. (2015), *Long discontinuous Carbon Fibre/Polypropylene Composites for High Volume Automotive Applications*. PhD thesis, The University of Nottingham, Nottingham.

(Chavka & Dahl 1999)

Chavka, N. G. & Dahl, J. S. (1999), „P4: Glass Fiber Preforming Technology for Automotive Applications“. *Evolving and revolutionary technologies for the new millennium. 44th international SAMPE symposium and exhibition, Long Beach Convention Center, Long Beach, California, May 23 - 27, 1999*, Hrsg. L. J. Cohen, J. L. Bauer & W. E. Davis, S. 281–292. ISBN: 9780938994824.

(Cherif 2011)

Cherif, C. (2011), *Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Faserstoffe, Halbzeuge und Preforms: Technologie und Eigenschaften*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-642-17991-4.

(Cherif 2013)

Cherif, C. (Hrsg.) (2013), *Leichtbau mit Textilverstärkung für Serienanwendungen. Bindematerialien - Textile Preforms - Verbundbauteile; Buch zum DFG-AiF-Clustervorhaben - Leichtbau und Textilien*, Verlag Wissenschaftliche Skripten, Auerbach. ISBN: 978-3-942267-81-6.

(Cherkassky 1999)

Cherkassky, A. (1999), „Evaluating Nonwoven Fabric Irregularity on the Basis of Linnik Functionals“, *Textile Research Journal*, 69(10), S. 701–708.

(Chhabra 2003)

Chhabra, R. (2003), „Nonwoven Uniformity - Measurements Using Image Analysis“, *International Nonwovens Journal*, 12(1), S. 43–50.

(Cordell & Benson Tolle et al. 2000)

Cordell, T.; Benson Tolle, T. & Rondeau, R. (2000), „The Programmable Pow-

dered Preform Process for Aerospace: Affordable Performance Through Composites“. *Bridging the centuries with SAMPE's materials and processes technology. 45th international SAMPE symposium and exhibition, Long Beach Convention Center, Long Beach, California, May 21 - 25, 2000*, Hrsg. S. Loyd, V. Karbhari, D. O. Adams & A. B. Strong, S. 254–265. ISBN: 9780938994862.

(Dackweiler & Fleischer 2015)

Dackweiler, M. & Fleischer, J. (2015), „Herstellung intrinsisch hybrider Bauteile. Herausforderungen zukünftiger Fertigungsprozesse am Beispiel des Faserblasverfahrens“. *Serienfertigung mit unreifen Prozessen. Tagungsband zur wbk Herbsttagung 2015*, Hrsg. J. Fleischer, Shaker Verlag, Aachen, S. 79–94.

(Dackweiler & Fleischer 2017)

Dackweiler, M. & Fleischer, J. (2017), „Automated local reinforcing of glass fiber-injection-molded preforms with carbon fiber tapes“ in *Proceedings of the 15th Japan International SAMPE Symposium&Exhibition*, Hrsg. SAMPE Japan.

(Davidovic et al. 2011)

Davidovic, A.; Gargallo-Peiro, A.; Llontop Garcia, M.; Munoz Ortega, F. J.; Toledo Carrasco, D. & Wang, C. (2011), *Estimation of Orientation Distribution of Fibers*, Complutense University of Madrid, Madrid.

(Emadi & Tavanaie et al. 2018)

Emadi, M.; Tavanaie, M. A. & Payvandy, P. (2018), „Measurement of the Uniformity of Thermally Bonded Points in Polypropylene Spunbonded Non-Wovens Using Image Processing and Its Relationship with their Tensile Properties“, *Autex Research Journal*, 18(4), S. 405–418.

(Enomae & Yoon-Hee et al. 2006)

Enomae, T.; Yoon-Hee, H. & Akira, I. (2006), „Nondestructive determination of fiber orientation distribution of paper surface by image analysis“, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 21(2), S. 253–259.

(Ericson & Baxter 1973)

Ericson, C. W. & Baxter, J. F. (1973), „Spunbonded Nonwoven Fabric Studies. Characterization of Filament Arrangement in the Web“, *Textile Research Journal*, 43(7), S. 371–378.

(Ertel 2016)

Ertel, W. (2016), *Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-13548-5.

(Fantoni & Santochi et al. 2014)

Fantoni, G.; Santochi, M.; Dini, G.; Tracht, K.; Scholz-Reiter, B.; Fleischer, J.; Kristoffer Lien, T.; Seliger, G.; Reinhart, G.; Franke, J.; Nørgaard Hansen, H. & Verl, A. (2014), „Grasping devices and methods in automated production processes“, *CIRP Annals*, 63(2), S. 679–701.

(Farukh & Demirci et al. 2013)

Farukh, F.; Demirci, E.; Acar, M.; Pourdeyhimi, B. & Silberschmidt, V. V. (2013), „Meso-scale deformation and damage in thermally bonded nonwovens“, *Journal of Materials Science*, 48(6), S. 2334–2345.

(Farukh & Demirci et al. 2015)

Farukh, F.; Demirci, E.; Ali, H.; Acar, M.; Pourdeyhimi, B. & Silberschmidt, V. V. (2015), „Nonwovens modelling: a review of finite-element strategies“, *The Journal of The Textile Institute*, 107(2), S. 225–232.

(Fecher 2017)

Fecher, M. L. (2017), *Analyse des 3D-Faserspritzverfahrens zur Fertigung komplexer und funktionsintegrierter RTM-Strukturbauteile*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung.

(Feldhusen & Grote 2013)

Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2013), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-642-29568-3.

(Fleischer & Lanza et al. 2012)

Fleischer, J.; Lanza, G.; Brabandt, D. & Wagner, H. (2012), „Overcoming the challenges of automated pre-forming of semi-finished textiles“. *SAMPE Europe Symposium 2012, München, Deutschland, 24.-25.05.2012*, Hrsg. SAMPE Europe, S.114-143. ISBN: 978-3-9523565-6-2.

(Fleischer & Ochs et al. 2012)

Fleischer, J.; Ochs, A. & Dosch, S. (2012), „The future of lightweight manufacturing - production-related challenges when hybridizing metals and continuous fiber-reinforced plastics“ in *New developments in sheet metal forming. International*

Conference on New Developments in Sheet Metal Forming Technology in Fellbach (near Stuttgart), Hrsg. M. Liewald, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt am Main, S. 55–74.

(Fleischer & Wagner 2013)

Fleischer, J. & Wagner, H. (2013), „Automatische Herstellung von Preforms für schalenförmige CFK-Bauteile durch Anwendung einer featurebasierten Technologieplanung“ in *19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Tagungsband*, Hrsg. A. Wanner & K. A. Weidenmann, Conventus Congressmanagement & Marketing, Jena, S. 944–959.

(Fleischer & Förster et al. 2015)

Fleischer, J.; Förster, F. & Dackweiler, M. (2015), „Materialeffiziente hybride Preforms aus Lang- und Endlosfasern“, *Lightweight Design*, 2015(6), S. 14–19.

(Fleischer & Dackweiler et al. 2016)

Fleischer, J.; Dackweiler, M. & Ballier, F. (2016), „Fiber-Injection-Molding - Herausforderungen und Chancen“, *VDI-Z Integrierte Produktion*, 2016(10), S. 64–66.

(Fleischer & Teti et al. 2018)

Fleischer, J.; Teti, R.; Lanza, G.; Mativenga, P.; Möhring, H.-C. & Caggiano, A. (2018), „Composite materials parts manufacturing“, *CIRP Annals*, 67(2), S. 603–626.

(Föllinger & Konigorski et al. 2016)

Föllinger, O.; Konigorski, U.; Lohmann, B.; Roppenecker, G. & Trächtler, A. (2016), *Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*, VDE Verlag GmbH, Berlin. ISBN: 978-3-8007-4201-1.

(Förster 2003)

Förster, E., *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von dreidimensional ausgeprägten Formteilen sowie Formteil*(2003), Deutschland DE 103 24 735 B3.

(Förster 2012)

Förster, E. (2012), „*Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Formteilen aus Fasermaterial*“, Deutschland DE 10 2012 019 534 A1.

(Förster 2015)

Förster, E. (2015), „Ressourceneffizienz mit FIM zur Fertigung von 3D-Faserformteilen“, *uwf UmweltWirtschaftsForum*, 23(3), S. 103–110.

(Fuchs & Albrecht 2012)

Fuchs, H. & Albrecht, W. (Hrsg.) (2012), *Vliesstoffe. Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*, Wiley-VCH, Weinheim. ISBN: 978-3-527-31519-2.

(Gereke & Döbrich et al. 2013)

Gereke, T.; Döbrich, O.; Hübner, M. & Cherif, C. (2013), „Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 46, S. 1–10.

(Ghassemieh & Acar et al. 2002)

Ghassemieh, E.; Acar, M. & Versteeg, H. K. (2002), „Microstructural analysis of non-woven fabrics using scanning electron microscopy and image processing. Part 2: Application to hydroentangled fabrics“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 216(4), S. 199–207.

(Gonzalez & Woods et al. 2009)

Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. & Eddins, S. L. (2009), *Digital image processing using MATLAB*, Gatesmark Publishing. ISBN: 978-0-9820854-0-0.

(Goodfellow & Courville et al. 2018)

Goodfellow, I.; Courville, A. & Bengio, Y. (2018), *Deep Learning. Das umfassende Handbuch*. Grundlagen, aktuelle Verfahren und Algorithmen, neue Forschungsansätze, mitp Verlags GmbH & Co. KG, Frechen. ISBN: 978-3-95845-701-0.

(Graf 2017)

Graf, J. (2017), *Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge*. Dissertation, Technische Universität München, München.

(Graf & Gruber et al. 2016)

Graf, J.; Gruber, K.; Shen, Y. & Reinhart, G. (2016), „An Approach for the Sensory Integration into the Automated Production of Carbon Fiber Reinforced Plastics“, *Procedia CIRP*, 52, S. 280–285.

(Greig-Smith 1964)

Greig-Smith, P. (1964), *Quantitative Plant Ecology*, University of California Press, Los Angeles.

(Harper 2006)

Harper, L. T. (2006), *Discontinuous carbon fibre composites for automotive applications*. PhD thesis, The University of Nottingham, Nottingham.

(Harper & Turner et al. 2006a)

Harper, L. T.; Turner, T. A.; Warrior, N. A.; Dahl, J. S. & Rudd, C. D. (2006), „Characterisation of random carbon fibre composites from a directed fibre preforming process: Analysis of microstructural parameters“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), S. 2136–2147.

(Harper & Turner et al. 2006b)

Harper, L. T.; Turner, T. A.; Warrior, N. A. & Rudd, C. D. (2006), „Characterisation of random carbon fibre composites from a directed fibre preforming process: The effect of fibre length“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), S. 1863–1878.

(Harper & Turner et al. 2007)

Harper, L. T.; Turner, T. A.; Warrior, N. A. & Rudd, C. D. (2007), „Characterisation of random carbon fibre composites from a directed fibre preforming process. The effect of tow filamentisation“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), S. 755–770.

(Harper & Turner et al. 2009)

Harper, L. T.; Turner, T. A.; Martin, J.R.B. & Warrior, N. A. (2009), „Fiber Alignment in Directed Carbon Fiber Preforms — A Feasibility Study“, *Journal of Composite Materials*, 43(1), S. 57–74.

(Harper & Burn et al. 2018)

Harper, L. T.; Burn, D. T.; Johnson, M. S. & Warrior, N. A. (2018), „Long discontinuous carbon fibre/polypropylene composites for high volume structural applications“, *Journal of Composite Materials*, 52(9), S. 1155–1170.

(Heilos & Hofmann et al. 2020)

Heilos, K.; Hofmann, M.; Albrecht, F.; Rosenberg, P. & Wegner, A. (2020), „VliesRTM - Investigation of HP-RTM process chain with recycled carbon fiber nonwovens“, *Technische Textilien*(2), S. 74–76.

(Henning & Moeller 2011)

Henning, F. & Moeller, E. (2011), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Hanser, München. ISBN: 978-3-446-42891-1.

(Herrig 2017)

Herrig, P. (2017), *Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanlage für das Faserblasverfahren*, Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Hesse & Schnell 2018)

Hesse, S. & Schnell, G. (2018), *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-21172-1.

(Hohmann & Schwab et al. 2015)

Hohmann, A.; Schwab, B.; Wehner, D.; Albrecht, S.; Ilg, R.; Schüppel, D. & von Reden, T. (2015), *MAI enviro. Vorstudie zur Lebenszyklusanalyse mit ökobilanzieller Bewertung relevanter Fertigungsprozessketten für CFK-Strukturen*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0929-3.

(Hölzel 2003)

Hölzel, S. (2003), *Herstellung und Verarbeitung fasergespritzter Preforms aus thermoplastischen Hybridrovingen*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung.

(Hong & Wan et al. 1998)

Hong, L.; Wan, Y. & Jain, A. (1998), „Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(8), S. 777–789.

(Hopmann & Egger et al. 2018)

Hopmann, C.; Egger, P.; Beste, C.; Magura, N.; Müller, N.; Stender, S. & Fischer, K. (2018), „Ausschussfreie FVK-Bauteilfertigung durch Inline-Prozessregelung“ in *Kunststoffindustrie 4.0. 29. Internationales Kolloquium Kunststofftechnik*, Hrsg. C. Hopmann, Shaker Verlag, Aachen, S. 207–248.

(Hufenbach 2007)

Hufenbach, W. (Hrsg.) (2007), *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. SPP 1123, SDV - Die Medien AG, Dresden. ISBN: 978-3-00-022109-5.*

- (Jespersen & Baudry et al. 2009)
Jespersen, S. T.; Baudry, F.; Wakeman, M. D.; Michaud, V.; Blanchard, P.; Norris, R. & Månson, J.-A.E. (2009), „Consolidation of net-shape random fiber thermoplastic composite preforms“, *Polymer Composites*, 31(4), 653-665.
- (Jue & Bugao et al. 2018)
Jue, H.; Bugao, X.; Hanchao, G. & Rongwu, W. (2018), „Measuring fiber orientations in nonwoven web images using corner detection by Bézier fitting curves“, *Textile Research Journal*, 88(18), S. 2120–2131.
- (Kellie 2016)
Kellie, G. (Hrsg.) (2016), *Advances in technical nonwovens*, Woodhead Publishing, Duxford, UK. ISBN: 978-0-08-100575-0.
- (Kleppmann 2013)
Kleppmann, W. (2013), *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*, Hanser, München. ISBN: 978-3-446-43752-4.
- (Klietzing & Tiedt et al. 2012)
Klietzing, T.; Tiedt, T.; Mohit, R.; Seide, G.; Gries, T.; Maas, M.; Wüsch, M. & Geus, H. G. (2012), „QualiVlies – objektive Qualitätsbewertungsmethode auf Basis subjektiver Qualitätswahrnehmung von Vliesstoffen“, *Technische Textilien*, 55(3), S. 119–120.
- (Knof 2014)
Knof, M. , *Leichtbau durch isotropes Carbonfaservlies*, Vortrag auf Hofer Vliesstofftage, Hof, 05.11.2014. abrufbar unter https://www.hofer-vliesstofftage.de/vortraege/2014/2014_2.pdf (zuletzt abgerufen am: 06.04.2021)
- (Knutsson 1989)
Knutsson, H. (1989), „Representing local structure using tensors“. *SCIA -89. Proceedings of the 6th Scandinavian conference on image analysis*, Hrsg. M. Pietikäinen & J. Rönig, Pattern Recognition Society of Finland, Oulu, S. 244–251. ISBN: 9789529008902.
- (Korn & Reußmann 2017)
Korn, R. & Reußmann, T. (2017), „3-D Direktablage von Verstärkungsfasern im

Faserblasverfahren – Stand der Technik bei der Naturfaserverarbeitung“ in *Kunststoffe im Automobilbau 2017*, Hrsg. VDI Wissensforum GmbH, VDI Verlag, Düsseldorf, S. 149–158.

(Krause & Hausherr et al. 2010)

Krause, M.; Hausherr, J. M.; Burgeth, B.; Herrmann, C. & Krenkel, W. (2010), „Determination of the fibre orientation in composites using the structure tensor and local X-ray transform“, *Journal of Materials Science*, 45(4), S. 888–896.

(Kullback & Leibler 1951)

Kullback, S. & Leibler, R. A. (1951), „On Information and Sufficiency“, *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(1), S. 79–86.

(Lässig & Eisenhut et al. 2012)

Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R. T.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T. & Begemann, W. (2012), *Serienproduktion von hochfesten Faser-verbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Abrufbar unter https://lightweight.vdma.org/documents/266675/25858411/Studie%20Serienproduktion%20hochfester%20Faserverbundbauteile%2009_12/244b2db2-db10-4390-aade-44988245e8b4?t=717545 (zuletzt abgerufen am: 06.04.2021)

(Leong & Ramakrishna et al. 2000)

Leong, K. H.; Ramakrishna, S.; Huang, Z. M. & Bibo, G. A. (2000), „The potential of knitting for engineering composites—a review“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(3), S. 197–220.

(Lerch & Zanker et al. 2014)

Lerch, C.; Zanker, C.; Thielmann, A.; Jäger, A.; Keckl, C.; Kuppinger, J.; Henning, F.; Stroka, M.; Schneider, M.; Birenbaum, C.; Fleischer, J.; Lanza, G.; Baumann, F.; Kopf, R.; Krämer, A. & Wagner, H. (2014), *Wertschöpfungspotential im Leichtbau und deren Bedeutung für Baden-Württemberg*, Stuttgart. Abrufbar unter https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/Downloads/RZ_LeichtbauBW_Studie_WSK_Web.pdf (zuletzt abgerufen am: 06.04.2021)

(Lien & Liu 2006)

Lien, H.-C. & Liu, C.-H. (2006), „A Method of Inspecting Non-woven Basis Weight Using the Exponential Law of Absorption and Image Processing“, *Textile Research Journal*, 76(7), S. 547–558.

(Lijuan & Weidong 2017)

Lijuan, Z. & Weidong, Y. (2017), „Orientation image analysis of electrospun submicro-fibers based on Hough transform and Regionprops function“, *Textile Research Journal*, 87(18), S. 2263–2274.

(Lim & Lee 1990)

Lim, Y. W. & Lee, S. U. (1990), „On the color image segmentation algorithm based on the thresholding and the fuzzy c-means techniques“, *Pattern Recognition*, 23(9), S. 935–952.

(Lindemann 2009)

Lindemann, U. (2009), *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-642-01422-2.

(Lloyd 1982)

Lloyd, S. (1982), „Least squares quantization in PCM“, *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(2), S. 129–137.

(Long & Shelhamer et al. 2015)

Long, J.; Shelhamer, E. & Darrell, T. (2015 - 2015), „Fully convolutional networks for semantic segmentation“. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, S. 3431–3440. ISBN: 978-1-4673-6964-0.

(Lopresto & Caggiano et al. 2016)

Lopresto, V.; Caggiano, A. & Teti, R. (2016), „High Performance Cutting of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials“, *Procedia CIRP*, 46, S. 71–82.

(Lunze 2020)

Lunze, J. (2020), *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-60745-9.

(Marquez 2006)

Marquez, J. P. (2006), „Fourier analysis and automated measurement of cell and fiber angular orientation distributions“, *International Journal of Solids and Structures*, 43(21), S. 6413–6423.

(Mountasir & Hoffmann et al. 2011)

Mountasir, A.; Hoffmann, G. & Cherif, C. (2011), „Development of weaving technology for manufacturing three-dimensional spacer fabrics with high-performance yarns for thermoplastic composite applications: An analysis of two-dimensional mechanical properties“, *Textile Research Journal*, 81(13), S. 1354–1366.

(Neis-Beeckmann 2020)

Neis-Beeckmann, P. (2020), „Pflanztöpfe aus Naturfasern. „Bio“ ohne Wenn und Aber“, *BIOPRO Magazin*, 2020(1), S. 16.

(Neitzel 2014)

Neitzel, M. (Hrsg.) (2014), *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, Hanser, München. ISBN: 978-3-446-43697-8.

(Norris & Carpenter et al. 2008)

Norris, R. E.; Carpenter, J. A. & Warren, D. (2008), *Automotive Lightweighting Materials Annual Progress Report - Polymer composites Research and Development: Automotive Composites Consortium Focal Project 4 (ACC007*) - Development of Next Generation Programmable Preforming Process*. US Department of Energy, Oak Ridge National Institute. Jahresbericht zum Forschungsvorhaben Automotive Lightweighting Materials.

(Omrani & Wang et al. 2017)

Omrani, F.; Wang, P.; Soulat, D.; Ferreira, M. & Ouagne, P. (2017), „Analysis of the deformability of flax-fibre nonwoven fabrics during manufacturing“, *Composites Part B: Engineering*, 116, S. 471–485.

(Otsu 1979)

Otsu, N. (1979), „A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), S. 62–66.

(Parikh & Bresee et al. 2006)

Parikh, D. V.; Bresee, R. R.; Sachinvala, N. D.; Crook, L.; Muenstermann, U.; Watzl, A. & Gillespie, D. (2006), „Basis Weight Uniformity of Lightly Needled Hydroentangled Cotton and Cotton Blend Webs“, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 1(1), 47-61.

(Patel 2013)

Patel, C. (2013), *Development of discontinuous fibre preforming processes*. PhD thesis, The University of Nottingham, Nottingham.

(Pizer & Amburn et al. 1987)

Pizer, S. M.; Amburn, E. P.; Austin, J. D.; Cromartie, R.; Geselowitz, A.; Greer, T.; ter Haar Romeny, B.; Zimmerman, J. B. & Zuiderveld, K. (1987), „Adaptive histogram equalization and its variations“, *Journal of Electronic Imaging*, 39(3), S. 355–368.

(Ponn & Lindemann 2011)

Ponn, J. & Lindemann, U. (2011), *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-642-20580-4.

(Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996a)

Pourdeyhimi, B.; Ramanathan, R. & Dent, R. (1996), „Measuring Fiber Orientation in Nonwovens. Part 1: Simulation“, *Textile Research Journal*, 66(11), S. 713–722.

(Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996b)

Pourdeyhimi, B.; Ramanathan, R. & Dent, R. (1996), „Measuring Fiber Orientation in Nonwovens. Part II: Direct Tracking“, *Textile Research Journal*, 66(12), S. 747–753.

(Pourdeyhimi & Dent et al. 1997a)

Pourdeyhimi, B.; Dent, R. & Davis, H. (1997), „Measuring Fiber Orientation in Nonwovens. Part III: Fourier Transform“, *Textile Research Journal*, 67(2), S. 143–151.

(Pourdeyhimi & Dent 1997b)

Pourdeyhimi, B. & Dent, R. (1997), „Measuring Fiber Orientation in Nonwovens. Part IV: Flow Field Analysis“, *Textile Research Journal*, 67(3), S. 181–187.

(Pourdeyhimi & Kohel 2002)

Pourdeyhimi, B. & Kohel, L. (2002), „Area-Based Strategy for Determining Web Uniformity“, *Textile Research Journal*, 72(12), S. 1065–1072.

(Pourdeyhimi & Kim 2002)

Pourdeyhimi, B. & Kim, H. S. (2002), „Measuring Fiber Orientation in Nonwovens: The Hough Transform“, *Textile Research Journal*, 72(9), S. 803–809.

(Quinn & Georgakoudi 2013)

Quinn, K. P. & Georgakoudi, I. (2013), „Rapid quantification of pixel-wise fiber orientation data in micrographs“, *Journal of biomedical optics*, 18(4).

(Reeve & Rondeau et al. 2000)

Reeve, S.; Rondeau, R.; Bond, G. & Tervet, F. (2000), „Mechanical Property Translation in Oriented, Discontinuous Carbon Fiber Composites“. *Bridging the centuries with SAMPE's materials and processes technology. 45th international SAMPE symposium and exhibition, Long Beach Convention Center, Long Beach, California, May 21 - 25, 2000*, Hrsg. S. Loyd, V. Karbhari, D. O. Adams & A. B. Strong, S. 241–253. ISBN: 9780938994862.

(Reußmann & Cierpka et al. 2015)

Reußmann, T.; Cierpka, S.; Galan, J.; Huber-Hesselberger, J. & Müller, S. (2015), „Faserblasen - 3D-Direktablage von Naturfasern“, *emobility tec*, 2015(3), S. 62–65.

(Ridruejo & González et al. 2011)

Ridruejo, A.; González, C. & LLorca, J. (2011), „Micromechanisms of deformation and fracture of polypropylene nonwoven fabrics“, *International Journal of Solids and Structures*, 48(1), S. 153–162.

(Rimmel 2020)

Rimmel, O. (2020): Grundlagen der Imprägnierung von Dry Fiber Placement Preforms. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.

(Rimmel & May et al. 2019)

Rimmel, O.; May, D. & Mitschang, P. (2019), „Impact of stitching on permeability and mechanical properties of preforms manufactured by dry fiber placement“, *Polymer Composites*, 40(4), S. 1631–1642.

(Rittenhouse & Wijeratne et al. 2019)

Rittenhouse, J.; Wijeratne, R.; Orlor, E. B.; Dillard, D. A.; Moore, R. B. & Vita, R. de (2019), „Effect of areal density and fiber orientation on the deformation of thermomechanical bonds in a nonwoven fabric“, *Polymer Engineering and Science*, 59(2), S. 311–322.

(Rondeau & Reeve et al. 1999)

Rondeau, R.; Reeve, S. & Bond, G. (1999), „The Effect of Tows and Filament

Groups on the Properties of Discontinuous Fiber Composites“. *Evolving and revolutionary technologies for the new millennium. 44th international SAMPE symposium and exhibition, Long Beach Convention Center, Long Beach, California, May 23 - 27, 1999*, Hrsg. L. J. Cohen, J. L. Bauer & W. E. Davis, S. 1449–1460. ISBN: 9780938994824.

(Ronneberger & Fischer et al. 2015)

Ronneberger, O.; Fischer, P. & Brox, T. (2015), „U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation“. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Part III, Hrsg. N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells & A. F. Frangi, Springer, Cham, S. 234–241. ISBN: 978-3-319-24573-7.

(Rosenberg & Thoma et al. 2016)

Rosenberg, P.; Thoma, B. & Henning, F. (2016), „Investigation and Validation of a new Cavity Pressure Controlled HP-RTM Process Variant (PC-RTM)“ in *16th-annual SPE Automotive Composites Conference & Exhibition*, Hrsg. SPE, Novi (Mi), USA.

(Sabiston & Pinter et al. 2018)

Sabiston, T.; Pinter, P.; Lévesque, J.; Weidenmann, K. A. & Inal, K. (2018), „Evaluating the number of fibre orientations required in homogenization schemes to predict the elastic response of long fibre sheet moulding compound composites from X-ray computed tomography measured fibre orientation distributions“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, S. 278–294.

(Sander & Barocas 2009)

Sander, E. A. & Barocas, V. H. (2009), „Comparison of 2D fiber network orientation measurement methods“, *Journal of biomedical materials research. Part A*, 88(2), S. 322–331.

(Sauer & Kühnel et al. 2018)

Sauer, M.; Kühnel, M. & Witten, E. (2018), *Composites Market Report 2018. Market developments, trends, outlook and challenges*. Abrufbar unter <https://www.carbon-connected.de/Group/CCeV.Berichte.und.Studien/Dokumente/File/Embedded> (zuletzt abgerufen am: 11.04.2020).

(Schijve 2000)

Schijve, W. (2000), „Long Glass PP - high performance at medium fibre length“ in *Tagungshandbuch - 3. Internationale AVK-TV Tagung für Verstärkte Kunststoffe*

und Duroplastische Formmassen. 12 - 13 September 2000, Kongresshaus Baden-Baden, Hrsg. Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe, Baden-Baden.

(Schöttl & Dörr et al. 2020)

Schöttl, L.; Dörr, D.; Pinter, P.; Weidenmann, K. A.; Elsner, P. & Kärgler, L. (2020), „A novel approach for segmenting and mapping of local fiber orientation of continuous fiber-reinforced composite laminates based on volumetric images“, *NDT & E International*, 110, 102194.

(Schürmann 2008)

Schürmann, H. (2008), *Konstruieren Mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-540-72189-5.

(Serra & Vincent 1992)

Serra, J. & Vincent, L. (1992), „An overview of morphological filtering“, *Circuits, Systems and Signal Processing*, 11(1), S. 47–108.

(Sezgin & Sankur 2004)

Sezgin, M. & Sankur, B. (2004), „Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation“, *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), S. 146.

(Siebertz & van Bebber et al. 2017)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-55742-6.

(Stegschuster & Schlichter 2018)

Stegschuster, G. & Schlichter, S. (2018), „Perspectives of web based composites from RCF material“, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 406, S. 1–6.

(Stender & Magura et al. 2019)

Stender, S.; Magura, N.; Fischer, K. & Emonts, M. (2019), „Funktionsorientierte Fertigung von FVK-Bauteilen“, *Lightweight Design*, 12(1), S. 18–25.

(Tascan & Nohut 2015)

Tascan, M. & Nohut, S. (2015), „Nondestructive prediction of areal weight, grab tensile strength and elongation at break of polypropylene (PP) spunbond nonwoven fabrics using digital image analysis“, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 25(1), S. 24–32.

(Teti 2002)

Teti, R. (2002), „Machining of Composite Materials“, *CIRP Annals*, 51(2), S. 611–634.

(Thomason & Vlug 1996)

Thomason, J. L. & Vlug, M. A. (1996), „Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(6), S. 477–484.

(Thorr & Drean et al. 1999)

Thorr, F.; Drean, J. Y. & Adolphe, D. (1999), „Image Analysis Tools to Study Nonwovens“, *Textile Research Journal*, 69(3), S. 162–168.

(Tunák & Antoch et al. 2014)

Tunák, M.; Antoch, J.; Kula, J. & Chvojka, J. (2014), „Estimation of fiber system orientation for nonwoven and nanofibrous layers: local approach based on image analysis“, *Textile Research Journal*, 84(9), S. 989–1006.

(van Vliet & Verbeek 1995)

van Vliet, L. & Verbeek, P. (1995), „Estimators for Orientation and Anisotropy in Digitized Images“. *ASCI '95. Proceedings of the first annual conference of the Advanced School for Computing and Imaging ; Heijen, the Netherlands, May 16 - 18, 1995*, Hrsg. J. van Katwijk, ASCI, Delft, S. 442–450. ISBN: 9789090083445.

(Veerabadran & Davis et al. 1996)

Veerabadran, R.; Davis, H. A.; Batra, S. K. & Bullerwell, A. C. (1996), „Devices for On-Line Assessment of Nonwovens' Basis Weights and Structures“, *Textile Research Journal*, 66(4), S. 257–264.

(Wagner 2016)

Wagner, H. (2016), *Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Weck & Brecher 2006)

Weck, M. & Brecher, C. (2006), *Werkzeugmaschinen 3. Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-540-22506-5.

(Wölling & Schmiege et al. 2017)

Wölling, J.; Schmiege, M.; Manis, F. & Drechsler, K. (2017), „Nonwovens from Recycled Carbon Fibres – Comparison of Processing Technologies“, *Procedia CIRP*, 66, S. 271–276.

(Xiao 2018)

Xiao, Z. (2018), *Advancements in discontinuous carbon fibre composite technologies for high-volume manufacturing processes*. PhD thesis, University of Nottingham, Nottingham.

(Yang & Takatera 2011)

Yang, X. & Takatera, M. (2011), „Fractal Characteristics of Contact Surface of Needle Punched Nonwovens“. *Advances in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education*, Hrsg. S. Lin & X. Huang, Springer, Berlin, S. 28–33. ISBN: 978-3-642-23323-4.

(Yasnoff & Mui et al. 1977)

Yasnoff, W. A.; Mui, J. K. & Bacus, J. W. (1977), „Error measures for scene segmentation“, *Pattern Recognition*, 9(4), S. 217–231.

(Yongping & Zengbo et al. 1998)

Yongping, G.; Zengbo, X. & Ruqin, L. (1998), „Application of Fourier Transform Techniques in the Measurement of Structural Parameters in Fabrics and Nonwovens“, *Journal of China Textile University*, 24(6), S. 18–22.

(Zhang & Fritts et al. 2008)

Zhang, H.; Fritts, J. E. & Goldman, S. A. (2008), „Image segmentation evaluation: A survey of unsupervised methods“, *Computer Vision and Image Understanding*, 110(2), S. 260–280.

(Zhang & Chen et al. 2019)

Zhang, M.; Chen, Y.; Chiang, F.-p.; Gouma, P. I. & Wang, L. (2019), „Modeling the Large Deformation and Microstructure Evolution of Nonwoven Polymer Fiber Networks“, *Journal of Applied Mechanics*, 86(1), S. 772.

(Zirn 2014)

Zirn, R. (2014), „Anforderungen an die Pressentechnik bei der Produktion von CFK-Karosserieteilen“ in *Leichtbau-Technologien im Automobilbau*, Hrsg. W. Siebenpfeiffer, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 4–10.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Ablauf und Kostenstruktur der RTM-Prozesskette (Daten zur Kostenstruktur auf Basis von (Cherif 2013))	6
Abbildung 2-2: Einteilung der Preforming-Verfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an (Fecher 2017))	9
Abbildung 2-3: Verfahrensablauf der Faserspritzverfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an (Harper & Turner et al. 2006a))	13
Abbildung 2-4: Verfahrensablauf des Faserblasverfahrens	19
Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau einer Faserblasanlage	21
Abbildung 2-6: Bewertung der Verfahren zur Herstellung von langfaserverstärkten Preforms	24
Abbildung 3-1: Schrittweises Vorgehen zum Erreichen der formulierten Zielstellung	30
Abbildung 4-1: Übersichtsdarstellung der Faserblas-Versuchsanlage am wbk (gerenderte Darstellung)	33
Abbildung 4-2: Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip des Faserschneidwerks (a) und Detailansicht des Schneidkopfes (b)	34
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Einblasform mit beweglicher Lineardüse (a) und Einblasform in der Einbauposition in der Faserblas-Versuchsanlage (b)	36
Abbildung 4-4: Ausschnitt aus dem relationsorientierten Funktionsmodell für den Faserblasprozess	38
Abbildung 4-5: Prozessspezifische Einflussgrößen auf den Einblasvorgang im Faserblasverfahren	40
Abbildung 4-6: Gemessene Längen der Glasfasern bei 500 mm/s Faservorschub und 5 Hz Schneidfrequenz (a) und Anteil der Fasern mit einem Vielfachen der Faserlänge in Abhängigkeit der Schneidfrequenz (b)	43
Abbildung 4-7: Einblasgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Ventilatorgeschwindigkeit (eigene Darstellung in Anlehnung an (A_Fricker 2019, S. 44))	44
Abbildung 5-1: Vorgehen zur systematischen Auswahl geeigneter Sensorik	47

Abbildung 5-2: Problemformulierung und Beschreibung der Prüfaufgabe	47
Abbildung 5-3: Morphologischer Kasten für die Zuordnung der schädlichen Funktionen zu den Sensorklassen	49
Abbildung 5-4: Bewertung der technischen Umsetzbarkeit der Sensorklassen	50
Abbildung 5-5: Einteilung der Sensorklassen nach technischer Umsetzbarkeit und Standardisierung	51
Abbildung 5-6: Architektur des Prozessüberwachungssystems (eigene Darstellung in Anlehnung an (Moll & Schäfer et al. 2019b))	53
Abbildung 5-7: Aufbau der Einblasform mit integrierter Kamera und LED-Hintergrundbeleuchtung (a) und exemplarische Aufnahme aus der Einblasform während des Einblasprozesses (b)	55
Abbildung 5-8: Vorgehensweise zur Detektion der Faserfront durch Bildverarbeitung (eigene Darstellung in Anlehnung an (Moll & Schäfer et al. 2019b))	56
Abbildung 5-9: Aufbau eines Convolutional Neural Networks (eigene Darstellung in Anlehnung an (Ansari 2020, S. 196))	60
Abbildung 5-10: Filterung der detektierten Kanten zur Identifikation der Faserfront	61
Abbildung 5-11: Klassifikationsgüte der untersuchten Segmentierungsverfahren (eigene Darstellung nach (A_Qiu 2020))	63
Abbildung 5-12: Erreichbare Framerate der entwickelten Prozessüberwachung mit unterschiedlichen Segmentierungsverfahren (eigene Darstellung in Anlehnung an (A_Qiu 2020))	64
Abbildung 6-1: <i>MATLAB</i> -App "FIM-Analizer" zur Berechnung der Preformeigenschaften	66
Abbildung 6-2: Durchlichtbilder von realen Faserstrukturen	75
Abbildung 6-3: Homogenitätsindizes der simulierten Bilder mit gleichmäßig und zufällig verteilten 100 Clustern in Abhängigkeit des Clusterbreitenfaktors	77
Abbildung 6-4: Mit Hilfe der ausgewählten Methoden bestimmte Homogenitätsindizes der Durchlichtbilder von realen Faserstrukturen	79
Abbildung 6-5: Ablauf des Methodensets zur Bestimmung der Faserorientierung und deren Einzelschritte	84

Abbildung 6-6: Durchlichtaufnahmen vor und nach dem Preprocessing	86
Abbildung 6-7: Kullback-Leibler-Divergenz zwischen Referenz-Faserorientierungsverteilung und berechneter Faserorientierungsverteilung für BFFT (a) und STT (b)	90
Abbildung 6-8: Faserorientierungsverteilungen für simulierte Bilder aus Bildset 1 (a), Bildset 2 (b) und Bildset 3 (c)	91
Abbildung 6-9: Bestimmung der Faserorientierungsverteilung mittels BFFT der Aufnahmen in Bildset A (a), Bildset B (b) und Bildset C (c)	92
Abbildung 6-10: Bestimmung der Faserorientierungsverteilung mittels STT der Aufnahmen in Bildset A (a), Bildset B (b) und Bildset C (c)	93
Abbildung 6-11: Lokale Faserorientierung für je eine exemplarische Aufnahme aus den Bildsets	94
Abbildung 7-1: Gewichte der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm	104
Abbildung 7-2: Haupteffektplot für die Zielgröße Gewicht (a) und Pareto-Plot zur Darstellung der Signifikanz der standardisierten Effekte (b)	105
Abbildung 7-3: Homogenität der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm	106
Abbildung 7-4: Haupteffektplot für die Zielgröße Homogenität (a) und Pareto-Plot zur Darstellung der Signifikanz der standardisierten Effekte (b)	107
Abbildung 7-5: Fortschritt der Formfüllung zweier Preforms mit niedrigem Homogenitätsindex (a) und hohem Homogenitätsindex (b)	108
Abbildung 7-6: Skizze zur Erklärung der Kenngrößen zur Berechnung des Geradheitsindex G	110
Abbildung 7-7: Korrelation der durchschnittlichen Geradheit mit der Homogenität der untersuchten Preforms	110
Abbildung 7-8: Dominante Faserorientierung der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm	112
Abbildung 7-9: Faserorientierungsverteilung der hergestellten Preforms aus Versuchsreihe H	113
Abbildung 7-10: Anisotropieverhältnis der hergestellten Preforms im Boxplot-Diagramm	114

Abbildung 7-11: Haupteffektplot für das Anisotropieverhältnis (a) und Pareto-Plot zur Darstellung der Signifikanz der standardisierten Effekte (b)	115
Abbildung 8-1: Allgemeine Grundstruktur eines Regelkreises (a) und daraus abgeleitete Struktur für den Regelkreis des Einblasprozesses (b)	119
Abbildung 8-2: Darstellung der Faserfront im Koordinatensystem der Einblasform	121
Abbildung 8-3: Implementierung der Regelung in der Faserblas-Versuchsanlage	125
Abbildung 8-4: Durchschnittlicher Geradheitsindex bei unterschiedlichen Regelungstrategien	127
Abbildung 8-5: Homogenitätsindex (a) und Preformgewicht (b) bei unterschiedlichen Regelungstrategien	128
Abbildung 0-1: Relationsorientiertes Funktionsmodell für den Faserblasprozess	IX
Abbildung 0-2: Simulierte Bilder mit regelmäßiger Clusteranordnung zur Untersuchung der Methoden zur Homogenitätsbestimmung (Auswahl)	XVI
Abbildung 0-3: Simulierte Bilder mit zufälliger Clusteranordnung zur Untersuchung der Methoden zur Homogenitätsbestimmung (Auswahl)	XVII
Abbildung 0-4: Simulierte Bilder zur Validierung der Methoden zur Berechnung der Faserorientierung (Auswahl)	XVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Ausschnitt aus Anforderungsliste für Neukonstruktion der Faserblas-Versuchsanlage (A_Ongom-Along 2019)	32
Tabelle 4-2: Einstellbarkeit und Einstellbereich der Einflussgrößen auf den Einblasvorgang	45
Tabelle 5-1: Durchschnittliche und minimale Klassifikationsgüten der untersuchten Segmentierungsverfahren (A_Qiu 2020)	63
Tabelle 6-1: Screening der vorgestellten Methodenklassen	70
Tabelle 6-2: Benennung, Werteentwicklung des Homogenitätsindexes und Quelle der Methoden für die Detailuntersuchung	72
Tabelle 6-3: Parameterstufen für die Generierung von simulierten Bildern	73
Tabelle 6-4: Features der erzeugten Bildersets und Modelle	88
Tabelle 7-1: Übersicht der definierten Zielgrößen	97
Tabelle 7-2: Faktorstufen der zu untersuchenden Einflussfaktoren	99
Tabelle 7-3: Übersicht möglicher Screening-Versuchspläne und derer Eigenschaften	100
Tabelle 7-4: Plackett-Burman-Versuchsplan für Parameterstudie	101
Tabelle 7-5: Vergleich der bestimmten Homogenitätsindizes für fasergeblasene Preforms und im Handel erhältliche Vliese	111
Tabelle 8-1: Versuchsparameter für die Validierung der Regelungsstrategien	126
Tabelle 8-2: Mittelwert und Standardabweichung des Preformgewichts nach Versuchsreihe	128
Tabelle 0-1: Anforderungsliste für Neukonstruktion der Faserblas-Versuchsanlage (A_Ongom-Along 2019)	VII
Tabelle 0-2: Analyse und Bewertung physikalischer Effekte	X
Tabelle 0-3: Methoden zur überwachten Bewertung von Segmentierungsverfahren nach (Sezgin & Sankur 2004)	XII
Tabelle 0-4: Übersicht über den Stand der Forschung zur Bestimmung der Faserorientierung	XIII

Tabelle 0-5: Ergebnisse der Preforms aus der Parameterstudie	XIX
Tabelle 0-6: Ergebnisse der Preforms aus der Validierung der Regelungstrategien	XXI

Anhang

Tabelle 0-1: Anforderungsliste für Neukonstruktion der Faserblas-Versuchsanlage
(A_Ongom-Along 2019)

Nr.	Anforderung	F/W	Kategorie
1	Bauraum FIM Zelle	F	Allgemein
2	Faseransammlungen innerhalb des Prozesses vermeiden	F	Prozess
3	homogener Fasereintrag in die Einblasform	F	Prozess
4	Faserförderwege kurz halten	F	Prozess
5	verschiedene Press/Einblasoberwerkzeuge	F	Einblasform
6	Frei programmierbare Industriesteuerung	F	Steuerung
7	Nutzung verschiedener Einblasdüsen (linear/schwenkbar)	W	Prozess
8	Filamentisierung der Fasern	W	Prozess
9	Temperaturüberwachung	F	Prozessüberwachung
10	Weg-/Positionsüberwachung	F	Prozessüberwachung
11	Endlagenüberwachung	F	Prozessüberwachung
12	sehr geringer Faseraustritt aus der Anlage	F	Sicherheit & Ergonomie
13	Türalarm (offen/geschlossen)	W	Sicherheit & Ergonomie
14	Frischluftzirkulation	F	Sicherheit & Ergonomie
15	Wege für Bedienung/Wartung vorsehen	F	Sicherheit & Ergonomie
16	Kantenschutz, Warnhinweise für heiße Flächen,...	F	Sicherheit & Ergonomie
17	Erleichterte Bauteilentnahme	F	Sicherheit & Ergonomie
18	Ergonomisch Arbeitshöhe	W	Sicherheit & Ergonomie
19	Positionierung HMI außerhalb Zelle (gute Sicht)	F	Steuerung
21	Regelbarkeit der Einblasdüse	F	Steuerung
21	Zentrales HMI	F	Steuerung
22	variabler Einblasdruck	F	Steuerung
23	Automatische Datenspeicherung von Maschinenparametern	W	Steuerung
24	Automatisierter Programmablauf	W	Steuerung
25	homogene Wärmeverteilung innerhalb der Einblasform	F	Einblasform
26	geführte Bewegungen	F	Einblasform

27	Bewegung weggesteuert (einstellbar)	F	Einblasform
28	Faserdichte Einblasform	F	Einblasform
29	Formfeste Einblasform	F	Einblasform
30	angepasst an Füllstandüberwachung	F	Einblasform

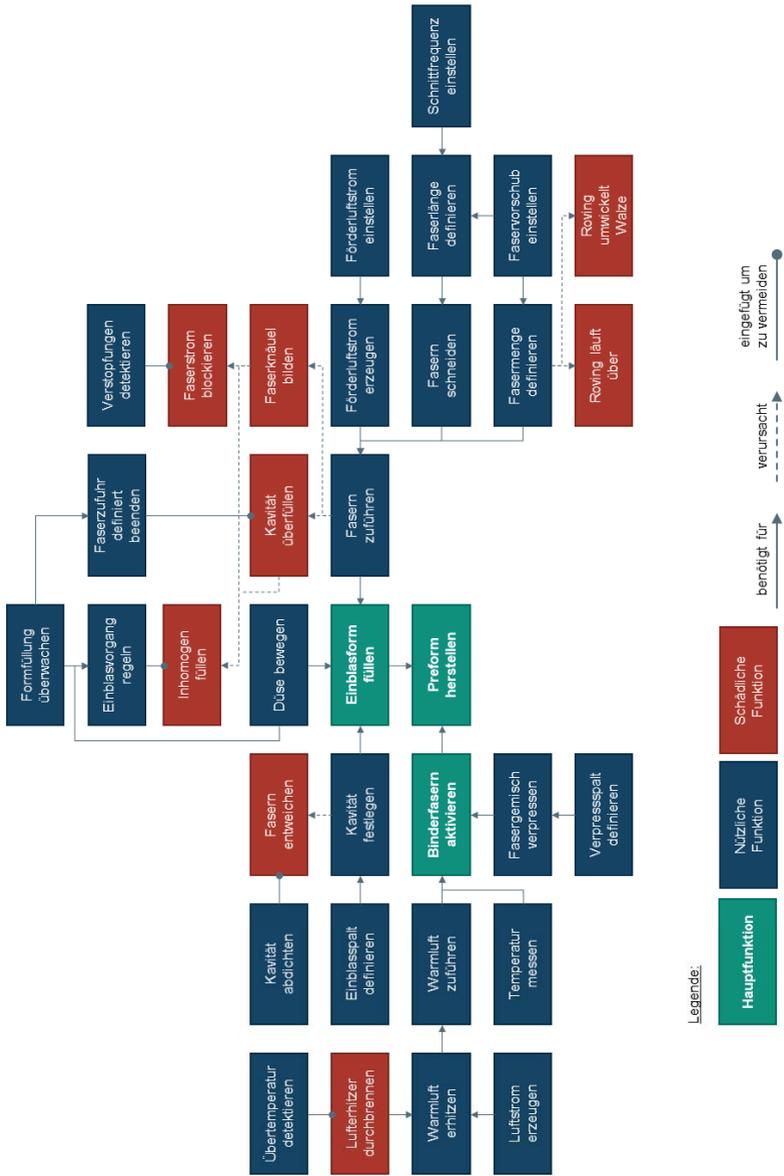


Abbildung 0-1: Relationsorientiertes Funktionsmodell für den Faserblasprozess

Tabelle 0-2: Analyse und Bewertung physikalischer Effekte

Auswahlkriterien						
Physikalischer Effekt	Füllung	Verteilung	Nutzbarkeit	Anwendbarkeit	Entscheidung	Kommentar
Wirbelstrom	+	+	-	-	N	
Kapazitiv	+	-	+	+	J	Druck/ Füllstands- messung
Induktiv	-	-	+	+	N	Druck
Piezoelektrisch	+	-	+	+	J	Druck
Pyroelektrisch	-	-	-	-	N	
Fotoelektrisch	+	+	-	+	J	
Elektrooptisch	+	+	+	+	J	Verteilung/ Menge
Spezifischer Wider- stand	+	+	+	-	N	
Magneto-resistiv	+	+	-	-	N	
Piezoresistiv	+	-	+	+	J	Druck
Thermoelektrisch	-	-	-	-	N	
Thermowiderstand	-	-	-	-	N	
Magneto-restriktiver Effekt	-	-	-	-	N	
Potenziometrischer Effekt	-	-	-	-	N	
Amperometrischer Effekt	-	-	-	-	N	
Konduktometrischer Effekt	-	-	-	-	N	
Schallwellen	-	-	-	-	N	
Doppler Effekt	-	-	-	-	N	

Röntgenstrahlung	+	+	+	-	N	
UV-Licht, sichtbares Licht, Infrarot	+	+	-	+	N	Keine Auswertung
Gauss-Effekt	-	-	-	-	N	
Mikrowellenstrahlung	+	+	-	-	N	
Radiofrequenzen					N	

Legende: J = Ja; N = Nein

Tabelle 0-3: Methoden zur überwachten Bewertung von Segmentierungsverfahren nach (Sezgin & Sankur 2004)

Methode	Definition	Quelle
Misclassification Error	$ME = 1 - \frac{ B_O \cap B_T + F_O \cap F_T }{ B_O + F_O }$ <p>mit B_O und F_O = Hintergrund- und Vordergrundpixel des Ground Truth Bildes B_T und F_T = Hintergrund- und Vordergrundpixel des segmentierten Bildes</p>	(Yasnoff & Mui et al. 1977)
Absolute Foreground Area Error	$AAE = \begin{cases} \frac{A_O - A_T}{A_a} & \text{if } A_T < A_O \\ \frac{A_T - A_O}{A_a} & \text{if } A_T \geq A_O \end{cases}$ <p>mit A_O = Objektfläche in Ground Truth Bild A_T = Objektfläche in segmentiertem Bild A_a = Gesamtfläche Bild</p>	In Anlehnung an (Sezgin & Sankur 2004)
Pixel Distance Error	$PDE = \frac{\sqrt{\sum_{q=1}^k d_q^2}}{N}$ <p>mit N = Gesamtanzahl Pixel q = q-tes misklassifiziertes Pixel k = Gesamtanzahl misklassifizierter Pixel d_q = euklidische Distanz des q-ten misklassifizierten Pixels</p>	(Yasnoff & Mui et al. 1977)
Probability Error	$PE = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1, i \neq j}^c P(R_i R_j) * P(R_j)$ <p>mit R_i und R_j = die i-te und j-te Region von c Regionen</p>	(Lim & Lee 1990)

Tabelle 0-4: Übersicht über den Stand der Forschung zur Bestimmung der Faserorientierung

Quelle	Methode	Bildaufnahme-Equipment	Probenmaterial
(Pourdeyhimi & Dent et al. 1997a)	FFT	Kamera	Vlies
(Ghassemieh & Acar et al. 2002)	FFT	Rasterelektronenmikroskop	Vlies
(Enomae & Yoon-Hee et al. 2006)	FFT	Lichtmikroskop, Rasterelektronenmikroskop	Papier
(Yongping & Zengbo et al. 1998)	FFT	-	Vlies
(Marquez 2006)	FFT	Kamera	Gewebe
(Sander & Barocas 2009)	FFT	Rasterelektronenmikroskop	Fibrin-Gewebe
(Tunák & Antoch et al. 2014)	BFFT	Rasterelektronenmikroskop	Vlies
(Pourdeyhimi & Kim 2002)	HT	Kamera	Vlies
(Bin & Xiaoming et al. 2017)	HT	Rasterelektronenmikroskop	Vlies
(Lijuan & Weidong 2017)	HT	Rasterelektronenmikroskop	Membran aus elektrogenesponnenen Fasern
(Bayan & Levitt et al. 2009)	BHT	Rasterelektronenmikroskop	Collagen-Fasern
(van Vliet & Verbeek 1995)	ST	Kamera	Kohlenwasserstoffe
(Krause & Hausherr et al. 2010)	ST	Computertomographie	Faserverbunde
(Sabiston & Pinter et al. 2018)	ST	Computertomographie	Faserverbunde
(Schöttl & Dörr et al. 2020)	ST	Computertomographie	Faserverbunde
(Pourdeyhimi & Dent 1997b)	FF	Kamera	Vlies
(Hong & Wan et al. 1998)	FF	-	Fingerabdrücke
(Pourdeyhimi & Ramanathan et al. 1996b)	DT	Kamera	Vlies
(Tunák & Antoch et al. 2014)	IMA	Rasterelektronenmikroskop	Vlies

(Lijuan & Weidong 2017)	IMA	Rasterelektro- nenmikroskop	Membran aus elekt- rogesponnenen Fa- sern
(Quinn & Georgakoudi 2013)	WVS	Rasterelektro- nenmikroskop	Collagen-Fasern

Pseudocode 0-1: Implementierung der Bestimmung der Faserorientierungsverteilung auf Basis der quadrantenbasierten schnellen Fourier-Transformation

Input:

Vorverarbeitetes Grauwertstufenbild I , Größe der Bildausschnitte L

Code:

Einteilung des Bildes I in Bildausschnitte, Anzahl der Bildausschnitte

$$N_{sub-window} = I/L^2$$

Initiales Set für Bildausschnitte $M \in \emptyset$

for $i \in \{1, \dots, N_{sub-window}\}$ **do**

 Bildausschnitte S_i mit Hamming-Fenster-Funktion W

 FFT von $S_i \times W$, Momentenanalyse des berechneten Spektrums

 Überprüfe Validität jedes Bildausschnitts mit Flächenanteil ρ_i und verhältnis von langer zu kurzer Achse r_i

 Wenn Bildausschnitt gültig: $M \leftarrow M \cup \{Dominierende\ Orient.\ \theta_i, \rho_i, r_i\}$

end for

 Gewichtete Summe der dominierenden Orientierung M

 Berechne Faserorientierungsverteilung ODF der Bildausschnitte M

Output:

Global Faserorientierungsverteilung ODF des Bildes I

Pseudocode 0-2: Implementierung der Bestimmung der Faserorientierung auf Basis der erweiterten Strukturtenso-Methode

Input:

Binärbild I , Anzahl Iterationen N , Größe des zu entfernenden Bereichs um Kreuzungspunkte l

Code:

Initiale Orientierungskarte $M \in \emptyset$

for $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ **do**

 Berechne Strukturtenso von Pixeln von I

 Extrahiere Kantenpixel $E_{i \in \{1, 2, \dots, N-1\}}$

 Füge Orientierung θ_i von extrahierten Kantenpixeln $M \leftarrow M \cup \theta_i$ hinzu

 Entferne Kantenpixel aus aktuellem Bild $I \leftarrow I/E_i$

end for

 Extrahiere Skelette von Faserstrukturen in Orientierungskarte S

 Fine Kreuzungspunkte B der Skelette S

Entferne Pixel der Größe P um die Kreuzungspunkte B und speichere in neuer Orientierungskarte $M' \leftarrow M/P$

Berechne Faserorientierungsverteilung ODF der Pixel in M'

Output:

Global Faserorientierungsverteilung ODF des Bildes I , Orientierung jedes Pixels M

Pseudocode 0-3: Implementierung der Generierung simulierter Bilder gegebener Faserorientierung

Input:

Faseranzahl N , Faserlänge $a(1: lang; 2: kurz)$, Anteil gekrümmter Fasern $b \in [0,1]$, dominierende Orientierungen $\theta_{i \in \{1,2,\dots,5\}}$, Varianz jeder dominierenden Orientierung $\sigma_{i \in \{1,2,\dots,5\}}$.

Code:

Berechne erwartete Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) P_i jeder dominierenden Orientierung mit gegebenen θ_i und σ_i

Berechne die WDF P des Gesamtbildes $P \leftarrow \sum P_i / \max(i)$

Initiales Set generierter Fasern $F \in \emptyset$

Initiales simuliertes Bild $I \in zeros$

for $j \in \{1,2, \dots, 180\}$ **do**

 Berechne Faseranzahl $n \leftarrow P(j) \times N$ für Orientierung j

for $k \in \{1,2, \dots, n\}$ **do**

 Generiere Faser j_k {Pixelanzahl n , Breite d , dominierende Orientierung j , Form $s(1:gerade;2:gekrümmt)$ für gegebenes a und b

 Platziere Faser j_k zufällig in Bild $I \leftarrow I \cup j_k$

$F \leftarrow F \cup j_k$

end for

end for

Berechne Faserorientierungsverteilung ODF über Summation der Fasern in F

Output:

Globale Faserorientierungsverteilung ODF , simuliertes Bild I

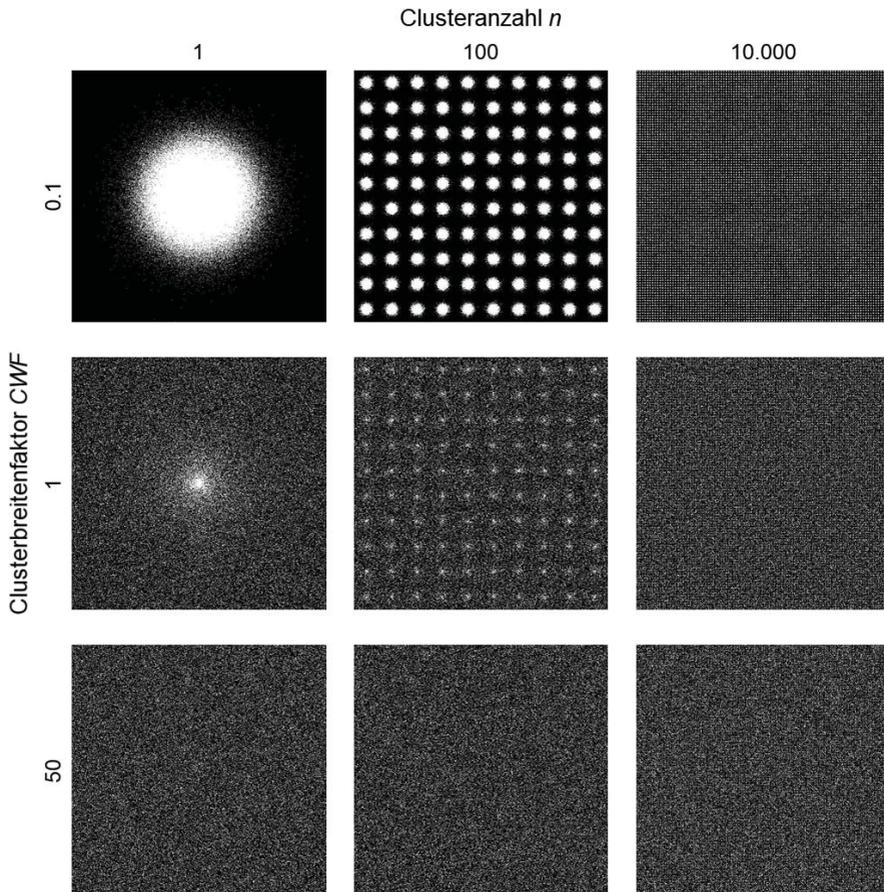


Abbildung 0-2: Simulierte Bilder mit regelmäßiger Clusteranordnung zur Untersuchung der Methoden zur Homogenitätsbestimmung (Auswahl)

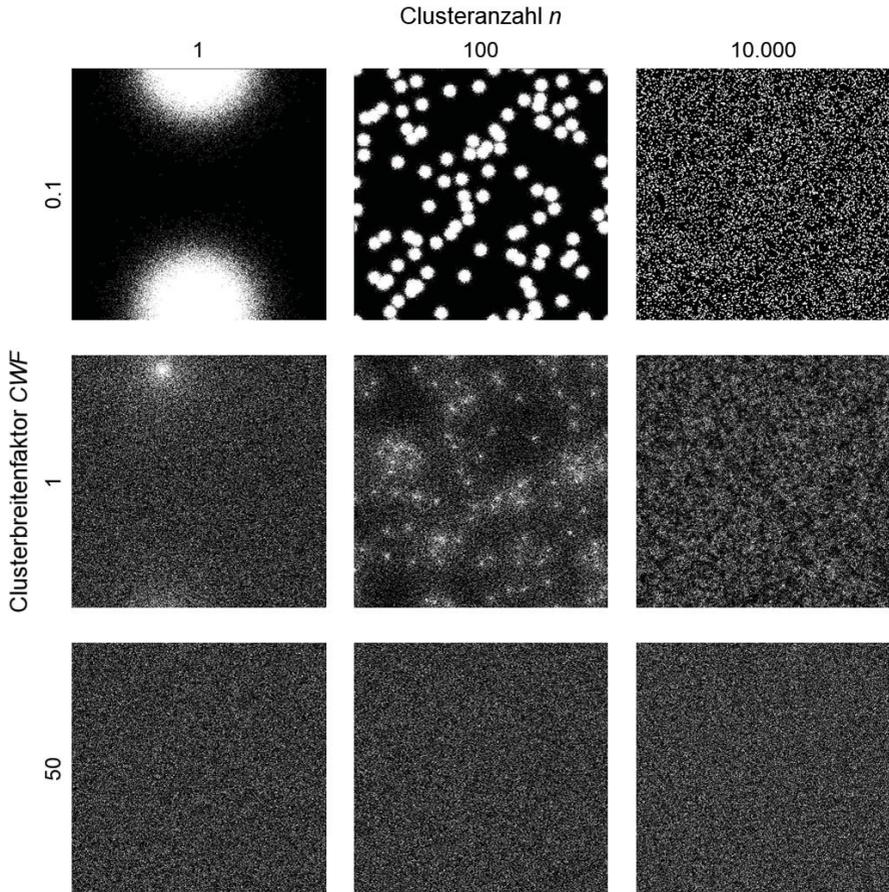


Abbildung 0-3: Simulierte Bilder mit zufälliger Clusteranordnung zur Untersuchung der Methoden zur Homogenitätsbestimmung (Auswahl)

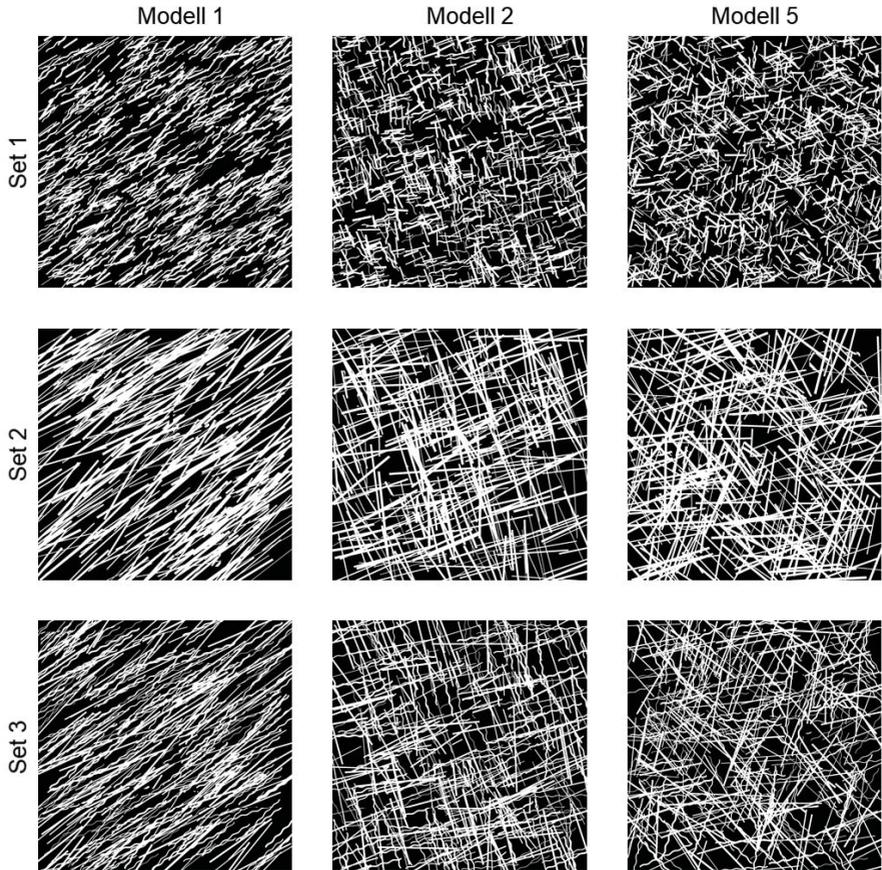


Abbildung 0-4: Simulierte Bilder zur Validierung der Methoden zur Berechnung der Faserorientierung (Auswahl)

Tabelle 0-5: Ergebnisse der Preforms aus der Parameterstudie

Versuchsreihe	Preformgewicht [g]	Homogenität [-]	Dominante Faserorientierung [°]	Anisotropieverhältnis [-]	Geradheitsmaß [-]
A	216,4	0,4333	93	1,94	23,28
	245,6	0,5270	91	3,55	20,89
	228,8	0,4035	93	2,72	21,55
	240	0,4585	93	3,12	20,10
	222	0,3648	92	3,53	16,55
	202	0,4192	93	3,15	15,05
B	222,6	0,3325	91	3,08	23,65
	159,5	0,3165	92	2,49	25,36
	155,6	0,3401	92	2,45	24,20
	200	0,3499	91	3,83	16,89
	179	0,4321	91	3,19	17,18
	171	0,3294	92	3,36	18,08
C	168,3	0,2803	90	2,70	16,84
	160,1	0,3495	90	2,74	22,84
	124,3	0,3741	90	2,29	30,46
	200	0,3477	91	3,40	20,53
	168	0,2481	90	2,91	17,87
	170	0,2641	90	2,90	14,87
D	152,1	0,4208	92	2,31	22,99
	151,4	0,3989	91	2,01	19,28
	147,5	0,3872	93	2,41	24,59
	143	0,3797	93	2,85	24,37
	133	0,3805	91	2,67	19,93
	149	0,3243	92	2,95	16,93
E	204,6	0,3944	91	2,53	23,50
	209,9	0,3514	91	3,33	17,41
	232,6	0,3733	93	3,42	15,79
	221	0,3901	91	3,84	15,68
	219	0,4576	89	4,17	15,13
	228	0,4173	92	3,57	16,44
F	174,3	0,3558	93	2,75	24,34
	139,8	0,3915	93	2,70	33,52
	164,4	0,3267	91	2,70	20,27
	148	0,3342	94	2,59	19,00
	156	0,3708	90	2,71	20,68
	172	0,3371	91	4,13	16,39
G	243	0,4357	91	1,91	28,38
	215,1	0,5597	92	2,00	30,95
	195,6	0,5012	91	2,15	24,21
	203	0,4848	91	2,24	25,65
	185	0,3529	89	2,21	23,03

	230	0,4122	93	2,39	20,78
H	287,1	0,6234	91	2,35	30,76
	248,9	0,6567	91	1,96	30,27
	281,7	0,6462	90	1,97	23,79
	249	0,3887	91	2,37	24,25
	214	0,3938	91	2,08	21,47
	249	0,3903	92	2,02	21,67
I	206,3	0,3993	92	2,85	21,45
	204,8	0,4767	92	2,20	25,15
	187,1	0,4887	91	2,52	29,71
	188	0,4369	92	2,86	20,18
	174	0,3307	91	2,74	18,60
	184	0,3594	93	2,88	19,22
J	188,6	0,5025	93	1,93	29,14
	201,4	0,3886	91	1,74	26,06
	210,2	0,5041	92	2,33	23,03
	195	0,3947	91	2,54	23,69
	184	0,3373	91	1,86	22,54
	183	0,4320	89	1,74	18,41
K	197,6	0,3763	92	2,30	22,81
	201,9	0,4936	90	2,79	22,65
	213,4	0,4942	91	2,58	21,18
	170	0,2587	91	2,99	19,50
	171	0,3689	92	2,80	18,84
	182	0,3462	91	3,53	18,48
L	228,1	0,5004	91	2,10	27,13
	202,4	0,4145	90	2,91	23,95
	220,7	0,3813	91	2,66	18,72
	207	0,3881	89	2,96	21,35
	202	0,3489	92	3,08	17,95
	208	0,3232	90	2,00	20,00

Tabelle 0-6: Ergebnisse der Preforms aus der Validierung der Regelstrategien

Regelstrategie	Preformgewicht [g]	Homogenität [-]	Geradheitsindex [-]
1.1	200	0,3900	17,1416
	186	0,3667	13,8001
	213	0,4015	13,8907
	194	0,3837	15,5025
	195	0,3310	12,3340
2	211	0,3653	16,0646
	185	0,4113	19,0969
	168	0,4032	19,3774
	192	0,3839	12,3424
	184	0,4569	16,2094

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 fünfachsigem 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 Makrozerspanung 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 μ 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 Kugelgewindetrieben 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

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener
Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms
im Faserblasverfahren**