

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

Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von  
hybriden Faser-Metall-Preforms**  
Modellbildung und Optimierung des  
Binderauftrags und der Drapierung  
für stabförmige Bauteile

Band 251

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

Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden  
Faser-Metall-Preforms**  
Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags  
und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 251



**Prozesskette zur Herstellung von  
hybriden Faser-Metall-Preforms**  
Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und  
der Drapierung für stabförmige Bauteile

---

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

Paul Ruhland  
aus Dresden

Tag der mündlichen Prüfung: 03.12.2021  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann

---



**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 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8430-6

ISSN 0724-4967

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

## **Vorwort des Herausgebers**

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

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von 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 akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgesellschaft geförderten Projekts „Beanspruchungsgerechte Gestaltung von Lasteinleitungen für im Schleuderverfahren hergestellte hybride Leichtbauwellen“ sowie des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts „Faser-Metall-Hybride für Schienenfahrzeuge“.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung dieser Arbeit sowie die Zusammenarbeit am Institut und insbesondere das mir entgegengebrachte Vertrauen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des wbk ganz herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit während meiner Zeit am Institut und auch darüber hinaus Bedanken. Neben der Möglichkeit zum wissenschaftlichen Austausch bin ich insbesondere für die vielen Freundschaften dankbar, die in dieser Zeit entstanden sind.

Zu größtem Dank bin ich meiner Familie verpflichtet, die mich auf meinem Weg stets unterstützt und somit maßgeblich auch zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein allergrößter Dank gilt jedoch meiner Frau Janna. Ich hatte das große Glück, sie während meiner Zeit am Institut kennenlernen zu dürfen. Ohne ihren Rückhalt und ihre Motivation wäre diese Arbeit mit hoher Wahrscheinlichkeit so nicht entstanden.

Karlsruhe, im Dezember 2021

Paul Ruhland



## **Abstract**

Hybrid fibre composite-metal rods are suitable for mechanically highly stressed applications due to their high lightweight potential. In terms of multi-material design, the load introduction is made of metal, while the load transmission area is made of composite material. In the state of the art, the rotational moulding process has been qualified as a highly efficient and flexible manufacturing process for intrinsic hybridization for the production of such components. The rotational moulding process can be used to produce highly durable joints between metal and composites. However, a hybrid preform is required before the actual infiltration. This consists of a stabilized, near-net-shape draped fibre preform in which the metallic load introduction elements are already integrated.

The process chain for manufacturing hybrid preforms from braided sleeves and the metallic load introduction elements has not yet been investigated and therefore represents the central objective of this work. Furthermore, a continuous process understanding for the process chain shall be achieved.

Therefore, in the first step of this work, requirements for the process chain are elaborated and a sequence of individual processes is developed. The individual processes are analysed with regard to their degree of maturity and it is determined that the steps binder application and draping represent the special focus of this work. The individual processes are analysed with regard to their degree of maturity and it is determined that the two steps of binder application and draping represent the special focus of this work.

For the binder application, a machine module is developed which is based on the vibration-assisted dispensing of binder powder. For the selection of a suitable dispensing nozzle, a model is developed which predicts the binder dispensing and thus calculates the optimum nozzle configuration. A machine module is also being developed for the draping process step, which drapes the preform onto the load introduction element by means of membrane-based forming with compressed air. A kinematic draping model is developed and validated to determine the necessary axial feed during draping. Finally, a continuous process chain consisting of all individual steps is prototyped, tested and validated on the basis of the requirements set out at the beginning.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand von Forschung und Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Grundbegriffe	4
2.2 Prozessketten zur Herstellung von stabförmigen, hybriden FVK-Metall-Bauteilen	6
2.3 Preforming von trockenen, textilen Halbzeugen	15
2.3.1 Binder-Umformtechnik	16
2.3.2 Flechttechnisch hergestellte Halbzeuge	18
2.3.3 Zuschnitt von trockenen Faserhalbzeugen	19
2.3.4 Handhabung textiler Halbzeuge und Preforms	20
2.3.5 Binderauftrag	22
2.3.6 Binderaufschmelzung	28
2.3.7 Drapierung	30
2.4 Bewertung des Stands der Forschung und Technik	37
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>39</b>
3.1 Zielsetzung	39
3.2 Vorgehensweise	40
<b>4 Planungsphase</b>	<b>42</b>
4.1 Systemgrenze und Anforderungen	43
4.2 Konzeption Prozesskette	46
4.3 Analyse Fertigungsprozesse	50
<b>5 Einzelprozess: Binderauftrag</b>	<b>54</b>
5.1 Modulentwicklung	54
5.1.1 Anforderungsanalyse	55
5.1.2 Konzeptionierung	56



5.1.3	Entwurf und Umsetzung Binderauftragsmodul	59
5.1.4	Analyse des Binderauftrags	62
5.1.5	Bestimmung der Maschinenparameter	64
5.2	Modellbasierte Optimierung der Austragsdüse	67
5.2.1	Qualifizierung eines bildbasierten Mess- und Auswertesystems	68
5.2.2	Vorversuche und Ableitung Düsenkonzept	73
5.2.3	Streubilder und Reproduzierbarkeit für Düsenkonfigurationen	79
5.2.4	Analytisches Binderauftragsmodell	83
5.2.5	Betrachtungsskalenabhängige Bewertung von Streubildern	88
5.2.6	Modellbasierte Auswahl einer Düsenkonfiguration	91
5.2.7	Modellvalidierung	96
<b>6</b>	<b>Einzelprozess: Drapierung</b>	<b>100</b>
6.1	Modulentwicklung	100
6.1.1	Anforderungsanalyse	101
6.1.2	Konzeptionierung	102
6.1.3	Entwurf und Umsetzung Drapiermodul	105
6.1.4	Analyse des Drapierverhaltens	108
6.2	Kinematische Modellierung der Maschinenparameter	112
6.2.1	Modellaufbau und Vorgehensweise zur Berechnung	112
6.2.2	Methodik zur Materialcharakterisierung	121
6.2.3	Validierung an zylindrischen Geometrien	127
6.2.4	Validierung an Schikanengeometrie	129
6.2.5	Parametersensitivität	132
<b>7</b>	<b>Integrationsphase</b>	<b>136</b>
7.1	Prototypische Implementierung der Gesamtprozesskette	136
7.1.1	Prototypische Prozesskette	136
7.1.2	Ergebnisse der Erprobung	142
7.2	Fazit der Erprobung und Übertragbarkeit auf eine industrielle Anlage	146
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>150</b>
8.1	Zusammenfassung	150

8.2 Ausblick

152

**Literaturverzeichnis**

**154**

**Anhang A**

**I**

## Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
AFP	Automated Fibre Placement	
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungs- vereinigungen	
CAD	Computer Aided Design	
DC	Direct Current (Gleichstrom)	
DEM	Diskrete-Elemente-Methode	
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	
EP	Epoxid	
FE	Finite-Elemente	
FVK	Faserverstärkter Kunststoff / Faserverbund- kunststoff	
IR	Infrarot	
KIT	Karlsruher Institut für Technologie	
Kombi-S-D	Kombination aus Sieb und Druckdom	
LEE	Lasteinleitungselement	
LÜE	Lastübertragungselement	
PDE	Partial Differential Equation	
STL	Stereo-Lithographie (Dateiendung / Austausch- format)	
TER	Thermoplastische endlosfaserverstärkte Roh- ren	
UP	Ungesättigte Polyester	
VDI	Verein deutscher Ingenieure	
WNV	Welle-Nabe-Verbindung	
$\alpha$	Flechtwinkel	[°]
$\alpha_n$	Flechtwinkel $n$	[°]
$\alpha_v$	Spiralsteigungswinkel	[°]
$\gamma_k$	Konfigurationsabhängiger Überdeckungsfaktor	[-]

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\rho_B$	Binderflächengewicht	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$\rho_{B,soll}$	Soll- Binderflächengewicht	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Betrachtungsskala der Glättung = Kantenlänge des quadratischen Glättungsbereichs	[px] / [mm]
$\varphi_0$	Kantenlänge des quadratischen Glättungsbereichs des Hilfsbilds $B$	[px] / [mm]
$\omega_K$	Kernwinkelgeschwindigkeit	[1/s]
$a$	Siebmaschenweite	[ $\mu$ m]
$B$	Elementarzellenbreite	[mm]
$c$	Federsteifigkeit	[N/m]
$D$	Innendurchmesser	[mm]
$\bar{D}$	Mittlerer Durchmesser	[mm]
$d_D$	Siebdrahtdicke	[ $\mu$ m]
$d_F$	Flechtschlauchdicke	[mm]
$d_K$	Kerndurchmesser	[mm]
$f$	Faser	[-]
$GK_n$	Gegenkathete $n$	[mm]
$GW$	Grauwert	[-]
$^{GW}k_f^{\rho_B}$	Korrelationskoeffizient Grauwert zu Binderflächengewicht für Flachproben	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$^{GW}k_z^{\rho_B}$	Korrelationskoeffizient Grauwert zu Binderflächengewicht für Zylinderproben	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$H$	Höhe der Wellenschultern	[mm]
$\mathbf{H}$	Hilfsbild (Matrix)	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$\mathbf{H}_\beta$	Skaliertes Hilfsbild (Matrix)	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$h_{i,j}$	Wert des Hilfsbilds an der Position $i, j$	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$i$	Zählvariable	[-] / [px]
$j$	Zählvariable	[-] / [px]
$K$	Kantenlänge der Elementarzelle des Flechtschlauchs	[mm]
$k$	Zählvariable	[-] / [px]

Formelzeichen	Größe	Einheit
$K_{STL}$	Kantenlänge	[mm]
$l$	Zählvariable	[-] / [px]
$L_1$	Länge des zylindrischen Bereichs	[mm]
$L_f$	Gesamtlänge der Faser $f$	[mm]
$L_{f,hybrid}$	Faserlänge des drapierten, hybriden Preforms	[mm]
$L_{f,monolithisch}$	Faserlänge des monolithischen Preforms	[mm]
$l_K$	Kernlänge	[mm]
$L_{seg,n}$	Länge des Einzelfasersegements	[mm]
$m$	Zählvariable	[-] / [px]
$m_B$	Bindermasse	[mg]
$\dot{m}_B$	Bindermassenstrom	[mg/s]
$\dot{m}_{B,\varnothing}$	Mittlerer Bindermassenstrom	[mg/s]
$m_U$	Unwuchtmasse	[g]
$m_{zus}$	Zusatzmasse	[g]
$n$	Zählvariable	[-] / [px]
$n_F$	Rovinganzahl	[-]
$n_K$	Kerndrehzahlen	[1/s]
$N_p$	Anzahl Punkte je Ebene	[-]
$\Delta p$	Druckdifferenz	[bar]
$P$	Binderstreubild der Zylinderproben (Matrix)	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$p_{i,j}$	Wert des zylindrischen Binderstreubilds an der Position $i, j$	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$P_n$	Punkt $n$	[-]
$P_{n,ZW}$	Zwischenpunkt $n$	[-]
$r$	Übergangsradius	[mm]
$R_\alpha$	Drehmatrix	[-]
$r_U$	Radialer Abstand der Unwucht	[mm]
$S$	Binderstreubild der Flachproben (Matrix)	[mg/cm <sup>2</sup> ]

Formelzeichen	Größe	Einheit
$s_{i,j}$	Wert des flachen Binderstreubilds an der Position $i, j$	[mg/cm <sup>2</sup> ]
$U$	Umfang des Flechtschlauchs	[mm]
$U_n$	Umfang der Ebene $n$	[mm]
$v_{abs}$	Absolutgeschwindigkeit der Düse über dem Kern	[mm/s]
$v_D$	Düsenvorschubgeschwindigkeit	[mm/s]
$v_{D,flach}$	Düsenvorschubgeschwindigkeit bei Flachproben	[mm/s]
$v_K$	Tangentiale Kerngeschwindigkeit	[mm/s]
$x_D$	Koordinate der Düsenposition	[mm]
$x_k$	$x$ -Koordinate des mitdrehenden Koordinatensystems auf dem Kern	[mm]
$\Delta x$	Relativbewegung in axialer Richtung	[mm]
$\Delta x_{spur}$	Abstand der spiralförmigen Binderspuren	[mm]
$y_k$	$y$ -Koordinate des mitdrehenden Koordinatensystems auf dem Kern	[mm]
$\Delta z$	Ebenenabstand	[mm]



## 1 Einleitung

Leichtbau wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie als eine der Schlüsseltechnologien bewertet und als ein Enabler für die Lösung des Spannungsfelds aus knapper werdenden Ressourcen, steigendem Bedarf nach Mobilität, Nachhaltigkeit, Wohlstand und Komfort angesehen. (Caumanns & Flambard et al. 2019; BMWi 2021)

Um bei Bauteilen einen maximalen Leichtbaugrad zu erreichen, werden häufig Hybridbauteile eingesetzt. Im Sinne des Multi-Material-Designs werden bei Hybridbauteilen mehrere Werkstoffe so miteinander kombiniert, dass die Werkstoffe innerhalb eines Bauteils dort eingesetzt werden, wo sie unter wirtschaftlichen und technischen Aspekten die größten Vorteile bieten. (Henning & Moeller 2011, S. 415–416)

Bei stabförmigen Bauteilen, welche beispielsweise Drehmomente oder Zug- und Druckkräfte übertragen können, wird der Bereich der Krafteinleitung an den Enden des Bauteils häufig metallisch ausgeführt, da hier hohe tribologische Lasten und ein multiachsialer Spannungszustand herrschen. Der Bereich zur Lastübertragung zwischen den Endstücken, in dem in der Regel eine definierte, ein- oder zweidimensionale Belastung auftritt, wird aus endlosfaserverstärkten Kunststoffen gefertigt. Anwendungen für derartige Bauteile sind beispielsweise Anlenkstangen für Landeklappen bei Flugzeugen, Stabwerke in Hexapoden bei Werkzeugmaschinen, Kardanwellen im Schiffs- und Nutzfahrzeugbau oder Antriebswellen in der Elektromobilität.

Am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde ein hochflexibles und sehr wirtschaftliches Verfahren zur Herstellung derartiger Bauteile entwickelt. Im sogenannten Schleuderverfahren können Faserverbund-Metallstäbe intrinsisch, also während der Entstehung der Faserverbund-Komponente, hybridisiert werden (Koch 2017). Neben rein stoffschlüssigen Verbindungen zwischen Metall und Faserverbund lassen sich somit auch hochbelastbare formschlüssige, hinterschnittige Verbindungen realisieren, die nachträglich nicht ffügbar wären.

In den Prozessschritten vor der eigentlichen Infiltration im Schleuderverfahren wird ein sogenannter Preform, ein stabilisierter Faservorformling aus Halbzeugen wie beispielsweise Geflechten, hergestellt. Dabei werden die Faserhalbzeuge mit einem Binder stabilisiert und endkonturnah in die spätere Bauteilform drapiert. Außerdem werden die metallischen Lasteinleitungselemente in den Lagenaufbau eingebracht. Bei formschlüssigen Verbindungen wird der Preform direkt auf dem Lasteinleitungselement abgeformt. Der Prozessschritt des Preformings trägt etwa 10 bis 15% zur Wertschöpfung



bei (Thielmann & Lerch et al. 2014) und ist entscheidend für die spätere Infiltrierbarkeit des Bauteils, den korrekten Faserverlauf und damit auch die mechanische Belastbarkeit im Einsatz. Aktuell wird der Preformprozess manuell ausgeführt, was zu hohen Schwankungen in der Tränkung und der Bauteilqualität führt.

Im Rahmen dieser Dissertation wird daher eine Prozesskette entwickelt, um reproduzierbar endkonturnahe, hybride Faser-Metall-Preforms für das Schleuderverfahren herzustellen. Es wird ein tiefes Prozessverständnis für alle notwendigen Prozessschritte geschaffen, sodass am Ende dieser Arbeit eine durchgängige, aus Sicht der Forschung verstandene Prozesskette vorliegt und anhand einer realen Bauteilgeometrie validiert wird.

In Kapitel 2 dieser Arbeit werden dafür zuerst die wichtigsten Grundbegriffe sowie der Stand von Forschung und Technik zu hybriden FVK-Metall-Stäben und Preforming-Verfahren vorgestellt. Kapitel 2 wird mit der Bewertung des Stands der Forschung und Technik und der Ableitung eines Forschungsdefizits abgeschlossen.

Aus diesem Defizit wird in Kapitel 3 die Zielsetzung der Arbeit präzisiert und der Lösungsraum eingegrenzt. Außerdem wird die gewählte Vorgehensweise zur Zielerreichung vorgestellt. Diese gliedert sich in drei Phasen – eine Planungsphase, eine Einzelprozessphase und eine Prozesskettenphase.

In der Planungsphase (Kapitel 4) werden zuerst Systemgrenzen gezogen und Anforderungen an die Prozesskette zusammengetragen. Anschließend wird eine übergeordnete, ganzheitliche Prozesskette konzipiert und analysiert. Dabei wird gezeigt, dass viele Prozessschritte entweder aus dem gut erforschten Preforming schalenförmiger Bauteile mit einfachem Engineering-Aufwand übernommen werden können oder aber schon in anderen Arbeiten hinlänglich beschrieben werden. Die bisher nicht ausreichend betrachteten Prozessschritte Binderauftrag und Drapierung werden in der Einzelprozessphase in den Kapiteln 5 und 6 genauer betrachtet.

Kapitel 5 widmet sich dem Binderauftrag. Es wird im ersten Schritt ein Anlagenmodul zum Auftrag von Binderpulver auf zylindrische Preforms systematisch entwickelt. Um eine reproduzierbare und gleichmäßige Bindermenge auf die Preforms aufzutragen, erfolgt auf der Grundlage von Bildverarbeitungsalgorithmen eine analytische Modellbildung, die es erlaubt, verschiedene Düsenkonzepte zu bewerten und schließlich ein optimales Konzept auszuwählen.

Kapitel 6 verläuft für den Prozessschritt der Drapierung analog zu Kapitel 5. Zuerst wird ein Anlagenmodul zur Drapierung des Preforms auf die Geometrie hinterschnittiger, formschlüssiger Lasteinleitungselemente entwickelt. Anschließend erfolgt eine in diesem Fall kinematische Modellierung der Drapierung, sodass die Anlagenparameter der Maschine und des Prozesses bestimmt werden können.

Nachdem ein Prozessverständnis für alle Einzelprozessschritte vorliegt, wird in Kapitel 7 die Prozesskettenphase beschrieben. Es wird die Gesamtprozesskette prototypisch aufgebaut, erprobt und somit der Gesamtansatz dieser Arbeit validiert. Da sich sämtliche Ausführungen in dieser Arbeit auf eine prototypische Anlage beziehen, werden schließlich Gestaltungsrichtlinien für eine industrielle Anlage aus den gewonnenen Erfahrungen abgeleitet.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 8.

## 2 Stand von Forschung und Technik

Das Ziel des nachfolgenden Kapitels ist die Schaffung der notwendigen Verständnisgrundlagen, die Klarstellung der notwendigen Fachbegriffe sowie die eingehende Darstellung des aktuellen Stands der Forschung und Technik, aus welchem schließlich das Forschungsdefizit für diese Arbeit abgeleitet wird.

Nach der Klärung von Grundbegriffen (Kapitel 2.1) wird in diesem Kapitel daher spezieller auf Herstellungsverfahren für hybride Faserverbund-Metall-Stäbe (Kapitel 2.2) sowie auf die einzelnen Prozessschritte für das Preforming textiler Halbzeuge (Kapitel 2.3) eingegangen.

### 2.1 Grundbegriffe

Wie eingangs eingeführt liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Preforming von hybriden Faserverbund-Metall-Bauteilen, deren Querschnittsabmessungen deutlich kleiner als die Längsabmessungen sind. Derartige Bauteile werden im Allgemeinen als *Stab* bezeichnet. In der Statik als Teilgebiet der Technischen Mechanik werden stabförmige Bauteile als Linientragwerke approximiert und je nach angreifender Belastung weiter unterteilt. Tatsächlich werden in der Technischen Mechanik nur jene Bauteile als Stab definiert, die entlang ihrer Längsrichtung ausschließlich auf Zug- oder Druck belastet werden können (vgl. Abbildung 2-1). Linientragwerke, auf die Kräfte quer zur Längsrichtung einwirken, werden *Balken* genannt. (Gross & Hauger et al. 2019, S. 113; Balke 2010, S. 37–38)

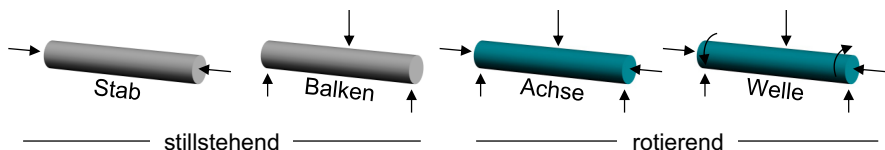


Abbildung 2-1: Einteilung von Bauteilklassen, deren Querschnittsabmessung kleiner als die Längsabmessung ist, nach Belastung

Stäben und Balken ist gemein, dass sie nicht rotieren. Dem gegenüber stehen die rotierenden Maschinenelemente *Achse* und *Welle*. Achsen übertragen unter Rotation Biegekräfte und ggf. Zug- und Druckkräfte in Längsrichtung. Wellen werden zusätzlich mit einem Drehmoment um die Längsachse belastet. (Niemann & Winter et al. 2019, S. 491; Wittel & Jannasch et al. 2019, S. 383; Haberhauer 2018, S. 287–292; Sauer 2016, S. 372)

Da in der deutschen Sprache und in der Wissenschaft kein Begriff existiert, der diese Bauteilkategorien mit den möglichen Belastungsfällen zusammenfassend bezeichnet, wird die betrachtete Bauteilklasse nachfolgend unabhängig von Belastung und Bewegung der Einfachheit halber als Stab bezeichnet.

Bestehen Bauteile, wie beispielsweise Stäbe, aus Elementen unterschiedlicher Werkstoffe, wird von einem *Hybrid*bauteil gesprochen. Dabei sind Hybridbauteile so gestaltet, dass die Werkstoffeigenschaften der Einzelelemente optimal ausgenutzt werden und somit ein maximales Leichtbaupotential besitzen. (Henning & Moeller 2011, S. 73)

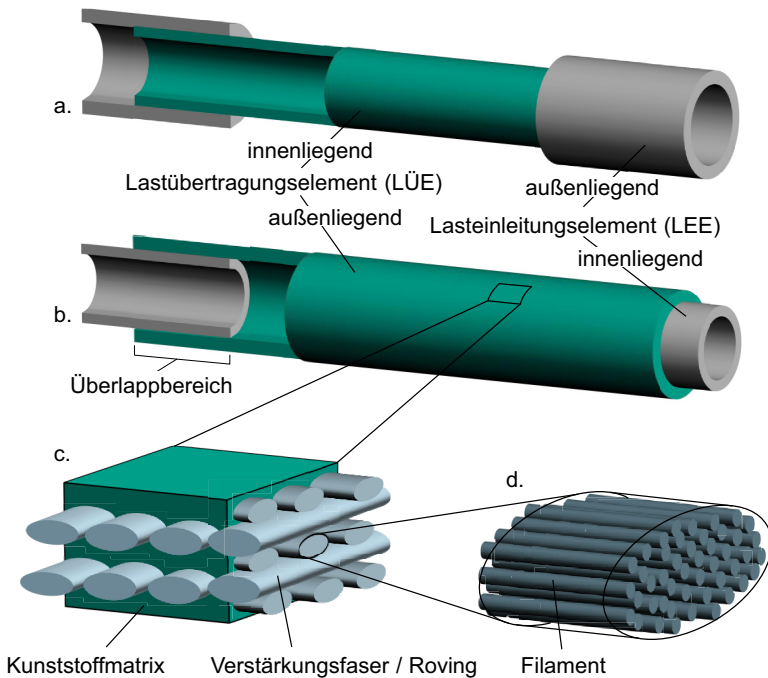


Abbildung 2-2: Schematische Schnittdarstellung hybrider Stäbe (a,b) sowie deren Bestandteile (c,d)

Bei stabförmigen Bauteilen sind insbesondere Kombinationen etabliert, bei denen die Endstücke des Stabes, die *Lasteinleitungselemente* (LEE), aus einem metallischen Werkstoff bestehen und der Bereich zwischen den LEE, das *Lastübertragungselement* (LÜE), aus einem endlosfaserverstärkten Kunststoff (FVK) besteht. In Abbildung 2-2a

und b sind zwei Varianten dieser Hybridbauteile als schematische Teilschnittansicht dargestellt. Es wird unterschieden, ob sich das LEE relativ zum LÜE außenliegend (Abbildung 2-2a) oder innenliegend (Abbildung 2-2b) befindet. In beiden Fällen wird der Bereich, in dem die Elemente verbunden sind und damit die Lasten von einem zum anderen Element übertragen werden kann, als *Überlappbereich* bezeichnet. Dieser stellt im Sinne der Maschinenelemente eine *Welle-Nabe-Verbindung* (WNV) dar. Die Lastübertragung zwischen den Werkstoffen kann sowohl stoff-, kraft- als auch form-schlüssig erfolgen (Sauer 2016, S. 494).

Die für das LÜE verwendeten faserverstärkten Kunststoffe bzw. Faserverbundkunststoffe (FVK) stellen eine Untergruppe der Verbundwerkstoffe dar. Verbundwerkstoffe sind eine Werkstoffklasse, bei der verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert werden. Der Verbund erfolgt derart, dass die Werkstoffe makroskopisch quasi-homogen sind, jedoch aus mindestens zwei nicht ineinander löslichen Phasen bestehen. Im Falle von FVK bestehen diese aus einer Kunststoffmatrix, in welche textile Verstärkungsfasern eingebettet sind (vgl. Abbildung 2-2c). Die Verstärkungsfasern oder auch Rovings wiederum bestehen aus – in der Regel aus mehreren Tausend<sup>1</sup> – einzelnen Filamenten (vgl. Abbildung 2-2d). (Henning & Moeller 2011, S. 341; Witten 2013, S. 33)

Ausgehend von den eingeführten Grundbegriffen werden im folgenden Kapitel Prozessketten vorgestellt, mit denen stabförmige, hybride FVK-Metall-Bauteile hergestellt werden können.

## **2.2 Prozessketten zur Herstellung von stabförmigen, hybriden FVK-Metall-Bauteilen**

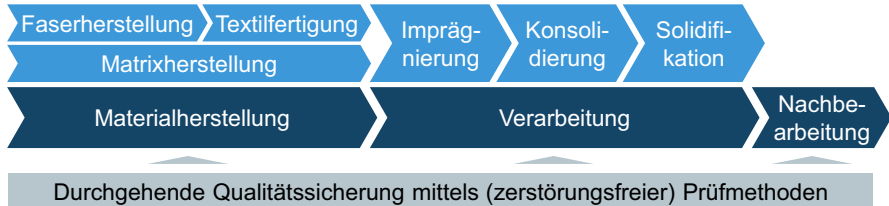
Aufgrund des sehr viel größeren Bauteilspektrums existieren sowohl in der Forschung als auch der Industrie deutlich mehr Prozessketten und Erfahrungen für schalenförmige Bauteile im Vergleich zu stabförmigen Bauteilen. Es wird daher zuerst die allgemeine Prozesskette für i.d.R. schalenförmige Faserverbundbauteile vorgestellt, bevor speziell auf Fertigungsprozesse für stabförmige Bauteile eingegangen wird.

Für die Herstellung von (hybriden) Faserverbundbauteilen existieren je nach verwendeter Materialien und Prozesse eine Vielzahl an Herstellungsverfahren und Varianten. Diese lassen sich grundsätzlich in die drei Phasen Materialherstellung, Verarbeitung

---

<sup>1</sup> Bei Kohlenstofffasern gibt die K-Zahl an, aus wie vielen Tausend Filamenten ein Roving besteht (z.B. 12K = 12.000 Filamente). Cherif (2016, S. 16).

und Nachbearbeitung unterteilen (vgl. Abbildung 2-3). (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 207)



*Abbildung 2-3: Allgemeine Prozesskette zur Herstellung von Faserverbundbauteilen (eigene Darstellung in Anlehnung an (Fleischer & Teti et al. 2018; Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 207))*

In der Phase der Materialherstellung werden einerseits die Verstärkungsfasern und andererseits die Matrix hergestellt. Die als Verstärkungsfasern am häufigsten vorkommenden Faserarten sind Glas- und Kohlenstofffasern. Glasfasern werden häufig direkt aus der Schmelze mithilfe des Düsenzieh-Verfahrens gewonnen und anschließend auf einen Filamentdurchmesser von etwa 10 bis 25  $\mu\text{m}$  gestreckt (Ehrenstein 2006, S. 20–21; Cherif 2011, S. 64). Kohlenstofffasern werden weit verbreitet aus Polyacrylnitril(PAN)-Fasern (sog. Precursor) durch einen thermischen und mechanischen Reck- und Stabilisierungsprozess hergestellt, indem aus dem Precursor durch Pyrolyse (Verkokung) die graphitischen Strukturen der Kohlenstofffasern gewonnen werden. Durch eine anschließende Wärmebehandlung können verschiedene (mechanische) Eigenschaften der Fasern eingestellt werden (Ehrenstein 2006, S. 38–40; Cherif 2011, S. 74–78). Aus den Verstärkungsfasern werden häufig textile Halbzeuge wie bspw. Gewebe, Gelege (flächig) oder Geflechte (hohl) hergestellt, welche eine bessere und einfachere Handhabung und Weiterverarbeitbarkeit im weiteren Prozess ermöglichen (Witten 2013, S. 224).

Der zweite Bestandteil von FVK, die Matrix, wird getrennt hergestellt. Es werden grundsätzlich duomere und thermoplastische Matrixsysteme anhand ihrer Struktur und Bindungsmechanismen der enthaltenen Makromoleküle unterschieden: Die im Fokus dieser Arbeit stehenden Duomere bestehen aus dreidimensional vernetzten Kettenmolekülen, Thermoplaste hingegen aus linearen und verzweigten Kettenmolekülen (Henning & Moeller 2011, S. 313). Verbreitete duomere Harzsysteme sind ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze) und Epoxidharze (EP-Harze). Sie werden meist durch eine

Vermischung eines Reaktionsharzes mit einem Härter, teilweise unter Zugabe eines Beschleunigers, hergestellt (Ehrenstein 2006, S. 52–53).

In der Phase der Verarbeitung wird aus den beiden Einzelwerkstoffen Faser und Matrix der Verbundwerkstoff hergestellt. Zuerst erfolgt die *Imprägnierung*, also die Benetzung der Fasern mit der flüssigen Matrix. Anschließend wird die Luft aus dem Bereich des Textils herausgedrückt (*Konsolidierung*), was bei vielen Flüssigimprägnierverfahren zeitgleich mit Imprägnierung geschieht. Schließlich härtet die Matrix aus bzw. erstarrt im Falle thermoplastischer Kunststoffe (*Solidifikation*), sodass der FVK als Verbundwerkstoff vorliegt. (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 208)

In der Phase der Nachbearbeitung erfolgt gegebenenfalls eine spanende Bearbeitung der Bauteilkontur, bspw. um Funktionsflächen herzustellen (Fleischer & Teti et al. 2018). Die gesamte Prozesskette wird, insbesondere in industriellen Prozessen, durch (idealerweise zerstörungsfreie) Prüfmethode hinsichtlich einer gleichbleibend guten Bauteilqualität überwacht. Ein Überblick über zerstörungsfreie Prüfmethode für FVK-Prozesse wird in (Hübschen & Altpeter et al. 2016) und für hybride Bauteile in (Jost & Schwarz et al. 2021) gegeben.

Verfahrensbedingt kann innerhalb der Prozesskette ein sogenannter Preformingschritt erforderlich sein, bei dem ein textiler Faservorformling (=Preform) hergestellt wird, welcher nahezu der finalen Bauteilkontur entspricht. Je nach Fertigungsverfahren erfolgt das Preforming zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Prozesskette. Bei harzbasiereten Flüssigimprägnierprozessen erfolgt das Preforming vor der Imprägnierung, während es bei thermoplastischen Prozessketten wie der Umformung von Organoblechen vor der Solidifikation erfolgt. Auf das Thema Preforming wird in Kapitel 2.3 genauer eingegangen.

Die dargestellte Prozesskette ist insbesondere für monolithische – also nicht-hybride – Bauteile etabliert. Um derartige Bauteile für einen maximalen Leichtbaugrad zu hybridisieren, kann der FVK-Teil nachträglich mit einer weiteren Komponente, beispielsweise einer metallischen Lasteinleitungskomponente, hybridisiert werden. Die nachgeschaltete Hybridisierung wird auch als extrinsische Hybridisierung bezeichnet (Fleischer & Ochs et al. 2012; Fleischer 2021). Nachfolgend werden einige Beispiele für extrinsische Fertigungsverfahren zur Herstellung hybrider Metall-FVK-Stäbe vorgestellt. In Abbildung 2-4 sind die mit den ausgewählten Verfahren erzeugbaren Hybridbauteile als schematische Schnittansicht durch den Überlappbereich dargestellt.

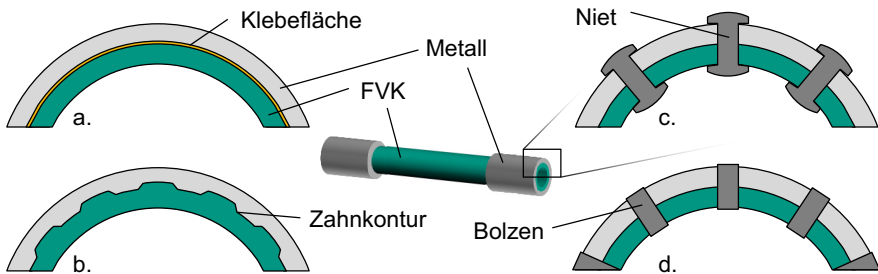


Abbildung 2-4: Möglichkeiten zur extrinsischen Hybridisierung von WNV: Kleben (a), Zahnwellen (b), Nieten (c), Bolzen (d)

Eine der verbreitetsten Methoden zur Hybridisierung ist das Fügen durch Kleben (Abbildung 2-4a). Dabei wird ein Klebstoff, bspw. auf Epoxidharzbasis, auf eine oder beide der Fügeflächen aufgetragen und anschließend Metall- und FVK-Komponente ineinandergefügt. Nach dem Aushärten des Klebstoffs sind die beiden Komponenten stoffschlüssig miteinander verbunden. Aufgrund der langen Historie und einer Vielzahl von Anwendungen lassen sich Klebverbindungen heutzutage zuverlässig auslegen und automatisiert herstellen. (Parashar & Mertiny 2012; Esmaeel & Taheri 2009; Guess & Reedy et al. 1995)

Eine formschlüssige WNV zur Übertragung von Drehmomenten durch mehrere zahnförmige Eingriffe entlang des Umfangs lässt sich durch Zahn- oder Keilwellen bewerkstelligen (Abbildung 2-4b). Bekannt sind diese WNV insbesondere in rein metallischen Anwendungen (Sauer 2016). In hybriden FVK-Metall-Wellen lassen sich sowohl lose Verbindungen, um bspw. einen Längenausgleich einer Kardanwelle wie in (Hufenbach & Ulbricht et al. 2014) vorgestellt zu realisieren, als auch feste Verbindungen, wie bspw. in (Jambor 2016) gezeigt, realisieren. In hybriden Anwendungen weicht das Profil der Wellenverbindung häufig von den genormten Geometrien ab (Ulbricht & Hufenbach et al. 2014). In (Gude & Lenz et al. 2015) wird ein Verfahren vorgestellt, in dem pultrudierte Rohre mit einer durchgängigen, innenliegenden Profilkontur hergestellt werden. Durch den kontinuierlichen Pultrusionsprozess lassen sich somit vergleichsweise kostengünstige Profile herstellen, welche anschließend formschlüssig mit metallischen LEE hybridisiert werden können.

Eine formschlüssige Übertragung durch zusätzliche Fügeelemente lässt sich über Niete (Abbildung 2-4c) oder Bolzen (Abbildung 2-4d) bewerkstelligen. In vielen Ansätzen



werden die notwendigen Bohrungen in FVK und Metall nachträglich eingebracht, sodass der Faserverlauf unterbrochen und somit das Laminat geschwächt wird. Neuere Ansätze arbeiten daher daran, die Fasern um die Bohrungen herum zu platzieren, sodass diese nicht geschädigt werden. (Matsuzaki & Shibata et al. 2008; Marannano & Zuccarello 2015; Kolks & Tserpes 2014)

Weitere Ansätze zur extrinsischen Hybridisierung sind Gewinde zur Übertragung von axialen Kräften (Hufenbach & Kroll et al. 2005) sowie Pressverbände (Lee & Lee 2007), welche jedoch aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten häufig anfällig für Einsatzbedingungen bei wechselnden Temperaturen sind.

Den vorgestellten Ansätzen zur extrinsischen Hybridisierung stehen Verfahren zur intrinsischen Hybridisierung entgegen. Der Begriff „intrinsische Hybridisierung“ wird in (Fleischer & Ochs et al. 2012) definiert und beschreibt ein Verfahren zur Herstellung von Hybridbauteilen, bei der die Verbindung beider Komponenten während des Ur- oder Umformens einer der beiden Komponenten erfolgt. Neben dem offensichtlichen Vorteil durch den Entfall eines nachgeschalteten Fügeschritts besitzen intrinsische Hybride eine Reihe weiterer Vorteile: durch den Wegfall weiterer Fügeelemente lässt sich meist ein höherer Leichtbaugrad erzielen, es lässt sich ein ungestörter Faserverlauf realisieren und die Fügestelle kann durch den stattfindenden Toleranzausgleich bei der intrinsischen Hybridisierung kostengünstiger hergestellt werden. Nicht zuletzt lassen sich hinterschnittige, formschlüssige Überlappgeometrien fertigen, welche konventionell mit der extrinsischen Hybridisierung nicht fertigbar wären. (Fleischer 2021)

Nachfolgend werden Verfahren zur intrinsischen Herstellung von hybriden FVK-Metall-Stäben und -Wellen vorgestellt. In Abbildung 2-5 sind die mit Hilfe der beschriebenen Verfahren herstellbaren Überlappbereiche schematisch dargestellt.

Neben anderen Instituten wird insbesondere am *Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik* der *TU Dresden* Forschung auf dem Gebiet der intrinsischen Hybridisierung mittels des Schlauchblas-Integral(SBI)-Verfahrens betrieben. Bei diesem Verfahren wird ein textiler Preform, meist bestehend aus einem mehrlagigen Geflecht, auf einen Silikonschlauch aufgezogen. In der ursprünglich von (Helms 2006) beschriebenen Variante basiert das Geflecht auf einem Hybridgarn, bestehend aus Verstärkungsfasern und fein verteilten Thermoplast-Fasern. Der Silikonschlauch wird nun mitsamt des Geflechts in eine Werkzeugkavität gelegt und unter Druck und Wärme expandiert. Dadurch

wird das Geflecht innen an der Werkzeugkavität abgeformt und mit den aufgeschmolzenen Thermoplastfasern infiltriert, konsolidiert und durch eine Abkühlphase zu einem FVK-Bauteil erstarrt. Werden in die Kavität vorab LEEe eingelegt, wird das Geflecht auch an der Innenkontur des LEEs abgeformt. Somit lassen sich axial belastbare, formschlüssige Überlappbereiche, wie in Abbildung 2-5a dargestellt, fertigen. (Barfuss & Grützner et al. 2016) entwickeln das von (Helms 2006) beschriebene Verfahren derart weiter, dass ein Geflecht aus bereits thermoplastisch vorkonsolidierten Tapes verwendet wird, sodass ein höhere Bauteilperformance aufgrund eines höheren Faservolumengehalts erzielt werden kann. Neben den auf makroskopischer Ebene sichtbaren, formschlüssigen Hinterschnitten konnte gezeigt werden, dass durch eine Strukturierung auf mehreren geometrischen Betrachtungsebenen, einer sogenannten Multi-Skalen-Strukturierung, eine weitere Performance-Steigerung erzielt werden kann. Dabei werden beispielsweise auf makroskopischer Skala hinterschnittige, wenige Millimeter tiefe Strukturen mit einer überlagerten Rändelung im Sub-Millimeter-Bereich auf der Meso-Skala kombiniert (Barfuss & Garthaus et al. 2015; Barfuss & Grützner et al. 2018; Barfuss & Garthaus et al. 2016; Barfuss & Würfel et al. 2018). In einer Verfahrensvariante wird statt einer thermoplastischen Matrix ein duromeres Harz eingesetzt, welches vor der Expansion des Schlauchs in das verschlossene Werkzeug injiziert wird, welches dadurch prinzipiell auch eine form- und stoffschlüssige Anbindung metallischer LEEe erlaubt (Schillfahrt & Fauster et al. 2017; Schillfahrt & Fauster et al. 2018).

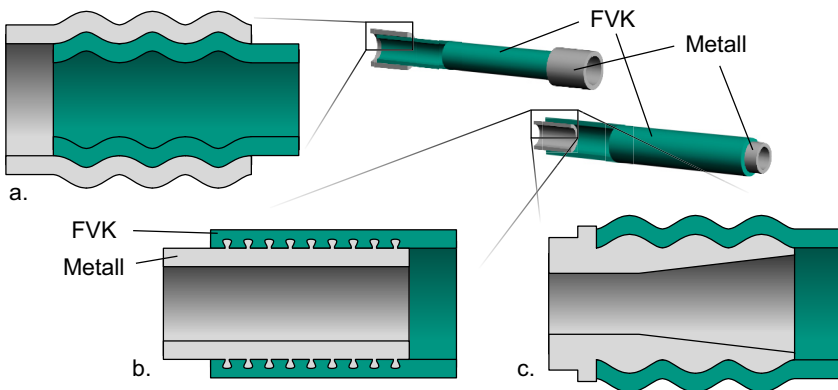


Abbildung 2-5: Möglichkeiten zur intrinsischen Hybridisierung von WNV: Schlauchblas-Integral-Verfahren (a), Nassgewickelte Pin-Verbindungen (b), Schleuderverfahren (c)

In (Ucsnik & Scheerer et al. 2010) und (Skhabovskyi & Batista et al. 2017) wird ein Verfahren beschrieben, bei dem Metallpins auf das metallische LEE aufgeschweißt werden, welche als formschlüssige Elemente für die Lastübertragung dienen. (Hufenbach & Lenz et al. 2012) nutzen das Verfahren für die Anwendung in WNVen, sodass sich ein Überlappbereich, wie in Abbildung 2-5b dargestellt, herstellen lässt. Bei dieser Anwendung werden die Fasern mit einem Wickelverfahren auf den Pins abgelegt. Von (Sun & Kawashita et al. 2018) wurde das Verfahren dahingehend weiterentwickelt, dass die Lasteinleitungselemente auf einem robotergeführten Kern direkt in einem Flechtrad überflochten werden.

Am *wbk Institut für Produktionstechnik* des *Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)* wurde von (Koch 2017) das Schleuderverfahren entwickelt. Es baut auf den Arbeiten von (Ehleben & Schürmann 2006; Ehleben 2002) zum Schleuderverfahren zur Herstellung von thermoplastischen endlosfaserverstärkten Rohren (TER-Schleuderverfahren) auf. Dabei werden im ersten Schritt Verstärkungsfasern auf ein trockenes, thermoplastisches Rohr gewickelt und anschließend mitsamt des Rohres in eine Schleuderkokille gelegt. In dieser wird das thermoplastische Rohr unter Rotation und Wärmezufuhr aufgeschmolzen, sodass es aufgrund der Zentrifugalkraft die außen liegenden Fasern tränkt. Nach dem Abkühlvorgang kann ein faserverstärktes Thermoplastrohr entnommen werden. (Schulz 2004) zeigt, dass die Taktzeit des TER-Schleuderverfahrens durch die Verwendung von Hybridgarnen deutlich gesenkt werden kann. (Löhr 2013) verwendet schließlich konsolidierte thermoplastische Verstärkungstapes, sodass der Tränkungsprozess aus dem Prozess komplett ausgelagert werden kann.

Auf der Grundlage des TER-Schleuderverfahrens wird in (Koch & Dackweiler et al. 2015) die intrinsische Hybridisierung im Schleuderverfahren beschrieben. Diese erfolgt im Gegensatz zum TER-Schleuderverfahren mit einem duromeren Harzsystem. Das Verfahren kann, im Gegensatz zu hochviskosen Thermoplasten, auch hinterschnittige Geometrien tränken und dadurch sowohl innen- als auch außenliegende metallische LEEe anbinden (Ruhland & Nieschlag et al. 2020).

Die Prozessschritte für die intrinsische Hybridisierung im Schleuderverfahren mit formschlüssig angebundenen, innenliegenden Lasteinleitungselementen (vgl. Abbildung 2-5c), wie sie in (Nieschlag & Ruhland et al. 2019) beschrieben wurden, sind in Abbildung 2-6 schematisch dargestellt und werden nachfolgend beschrieben.

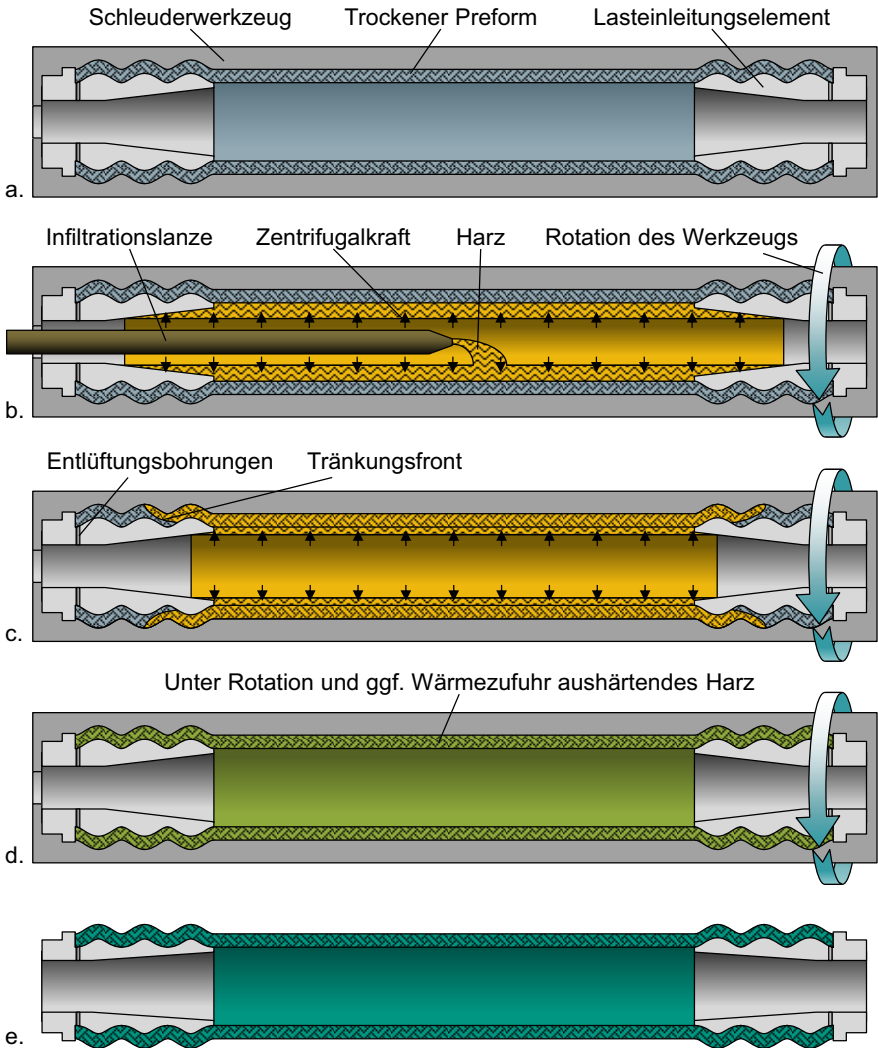


Abbildung 2-6: Prozessschritte zur intrinsischen Hybridisierung im Schleuderverfahren (eigene Darstellung nach (Koch & Dackweiler et al. 2015; Koch 2017; Nieschlag & Ruhland et al. 2019; Ruhland & Nieschlag et al. 2020))

Im ersten Schritt (Abbildung 2-6a) wird ein trockener, textiler Preform gemeinsam mit den anzubindenden LEEen in ein Schleuderwerkzeug eingelegt. Das Schleuderwerkzeug besteht aus zwei Hälften mit jeweils einer Kavität, die die Negativform des späteren Bauteils darstellen. Die Werkzeughälften werden verschlossen und in das Futter einer Schleudermaschine eingespannt. Im einfachsten Fall ist die Schleudermaschine eine modifizierte Drehmaschine mit einem Spindeldurchlass.

Im nächsten Schritt wird das Werkzeug um seine Längsachse in Rotation versetzt (Abbildung 2-6b). In das rotierende Werkzeug wird mit einer Infiltrationslanze ein duromeres Harzsystem drucklos eingegossen. Aufgrund der rotationsbedingt wirkenden Zentrifugalkraft legt sich das Harz an der Innenseite des Preforms zylindrisch an und infiltriert diesen. Dabei wird im ersten Schritt radial der Bereich zwischen den Lasteinleitungselementen getränkt. Anschließend erfolgt die axiale Tränkung des Überlappbereichs (Abbildung 2-6c). Durch Entlüftungsbohrungen, welche am Ende des Tränkungsweges in das LEE eingebracht werden, wird verhindert, dass sich an dieser Stelle aufgrund von eingeschlossener Luft unzulässige Poren bilden. Wenn der Preform vollständig getränkt ist, härtet das Harzsystem unter Rotation und ggf. geeigneter Wärmezufuhr (z.B. durch Heizpatronen) aus (Abbildung 2-6d). Schließlich wird die Rotation beendet, die Werkzeughälften geöffnet und das hybride Bauteil kann entnommen werden (Abbildung 2-6e). (Koch 2017; Koch & Dackweiler et al. 2015; Nieschlag & Ruhland et al. 2019)

Neben der vorgestellten Variante mit innenliegendem LEE kann dieses auch außen liegen. Bei einem nicht-kreisrunden Querschnitt ist dann die Verwendung von sogenannten Schleuderkernen sinnvoll, um eine gleichmäßige Tränkung zu ermöglichen. Das Schleuderverfahren mit Kern ist jedoch nicht Fokus dieser Arbeit, hier sei auf (Fleischer & Koch et al. 2016; Koch 2017; Nieschlag & Ruhland et al. 2018) verwiesen.

Im Vergleich zu den anderen vorgestellten Fertigungsverfahren zeichnet sich das Schleuderverfahren durch die einfache Anlagentechnik aus. Dadurch lassen sich mit hoher Produktivität und Wirtschaftlichkeit hochbelastbare Bauteile mit geringem Investitionsbedarf herstellen. Aufgrund der einfachen Werkzeuggestaltung ist das Verfahren hochflexibel und ermöglicht somit eine hohe Variantenvielfalt. Durch die intrinsische Hybridisierung entfallen außerdem nachgeschaltete Fügeschritte, sodass die Prozesskette insgesamt sehr schlank gestaltet werden kann. (Koch 2017, S. 181)

Im Stand der Technik wurde die Herstellung des Preforms, welcher mit den Lasteinleitungselementen gemeinsam in das Werkzeug eingelegt wird, bisher nicht betrachtet. Insbesondere bei der Herstellung formschlüssiger Bauteile, wie in Abbildung 2-6e dargestellt, muss das LEE in den trockenen Preform integriert werden, bevor dieser in das Schleuderwerkzeug eingelegt und anschließend im Schleuderverfahren infiltriert wird. Im nachfolgenden Kapitel wird daher näher auf den Stand der Forschung und Technik zum Preforming von trockenen, textilen Halbzeugen eingegangen.

### **2.3 Preforming von trockenen, textilen Halbzeugen**

Preforming ist ein optionaler Prozessschritt in der Prozesskette für die Herstellung von FVK-Bauteilen und bezeichnet das Vorformen eines noch nicht imprägnierten textilen Halbzeugs, sodass der aus dem Preforming-Vorgang entstehende Preform (dt. Vorformling) nahezu der späteren Bauteilform entspricht (sog. *near-net-shape*). (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 95; Cherif 2011, S. 30)

Abweichend von der oben genannten Definition sind Preforming-Vorgänge auch bei der Verarbeitung vorimprägnierter Halbzeuge etabliert. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Verarbeitung trockener Halbzeuge liegt, werden Preforming-Verfahren vorimprägnierter Halbzeuge nicht weiter diskutiert.

Nach einer Einordnung unterschiedlicher Preforming-Verfahren und Vorstellung der Binder-Umformtechnik werden in diesem Kapitel die einzelnen Prozessschritte innerhalb der Preforming-Prozesskette – ausgehend vom Halbzeug bis hin zur Drapierung – näher vorgestellt.

Forschungsarbeiten im Bereich des Preformings können prinzipiell in Arbeiten zum schalenförmigen und zum stab- bzw. rohrförmigen Preforming eingeteilt werden, wobei bisherige Forschungsanstrengungen aufgrund des weitaus größeren Anwendungs- und Bauteilspektrums ihren Fokus hauptsächlich auf das schalenförmige Preforming gelegt haben. Da sich viele Erkenntnisse aus dem schalenförmigen Preforming auf stabförmige Bauteile übertragen lassen, werden diese Arbeiten hier ebenfalls ausführlich diskutiert.

Grundsätzlich werden direkte und sequentielle Preformingverfahren unterschieden (vgl. Abbildung 2-7). Bei der direkten Preformherstellung wird der Preform direkt aus dem Fasermaterial gefertigt, wohingegen der Preform bei der sequentiellen Herstellung mittels eines Zwischenprodukts – einem sogenannten Halbzeug wie bspw. einem Gelege

oder einem Flechtschlauch – hergestellt wird. (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 98; Cherif 2011, S. 30–31)

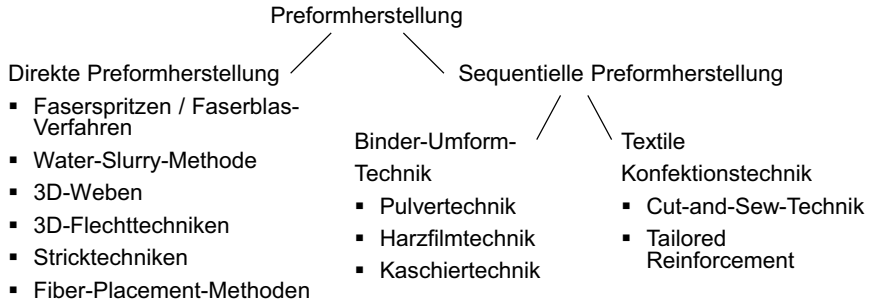


Abbildung 2-7: Einteilung der Preformingverfahren in direkte und sequentielle Herstellungsverfahren. Eigene, erweiterte Darstellung nach (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 99)

Beispielprozesse für das direkte Preforming sind Faserspritzen und das eng verwandte Faserblas-Verfahren, Stricktechniken, Fiber-Placement-Methoden sowie 3-D-Web- und Flechtverfahren. Sequentielle Preformverfahren lassen sich weiter in die textile Konfektionstechnik sowie die Binder-Umformtechnik unterteilen. Ein Vertreter der textilen Konfektionstechnik ist die sog. Cut-and-Sew-Technik, welche vor allem zur Montage einfacher Preforms durch Vernähen verwendet wird. (Cherif 2011, S. 31–32; Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 99–103)

Aufgrund der hohen erzielbaren Endkonturgenauigkeit, der Flexibilität im Lagenaufbau und des hohen Automatisierungspotentials liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Binder-Umformtechnik, auf welche nachfolgend näher eingegangen wird. (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 100)

### 2.3.1 Binder-Umformtechnik

Bei der Binder-Umformtechnik wird der textile Lagenaufbau durch einen Binder in der Endkontur fixiert. Der Binder ist ein Hilfsstoff, der innerhalb oder zwischen den Lagen eingesetzt wird und somit die Geometrie der textilen Lagen stabilisiert. Der Binder kann in verschiedenen Formen auf die Lagen appliziert werden, beispielsweise in Form von Tapes, als Vlies oder Pulver. Ebenso kann der Binder bereits als Beschichtung auf den textilen Halbzeugen vorliegen, in Fadenform fester Bestandteil des Textils sein oder

aber während des Lagenaufbaus aufgebracht werden. (Dickert 2015, S. 10; Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 104)

Ein ausführlicher Überblick über verschiedene Bindertechniken ist in (Dickert 2015, S. 10–14) zu finden.

Die Binder-Umformtechnik besteht grundsätzlich aus den drei Schritten Lagenaufbau mit Binderauftrag, Binderaufschmelzung und Drapierung und ist schematisch in Abbildung 2-8 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist der verbreitete Prozess für schalenförmige Halbzeuge dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit soll dieser, wie im unteren Teil von Abbildung 2-8 gezeigt, auf Preforms für stabförmige Bauteile übertragen werden. (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 31).

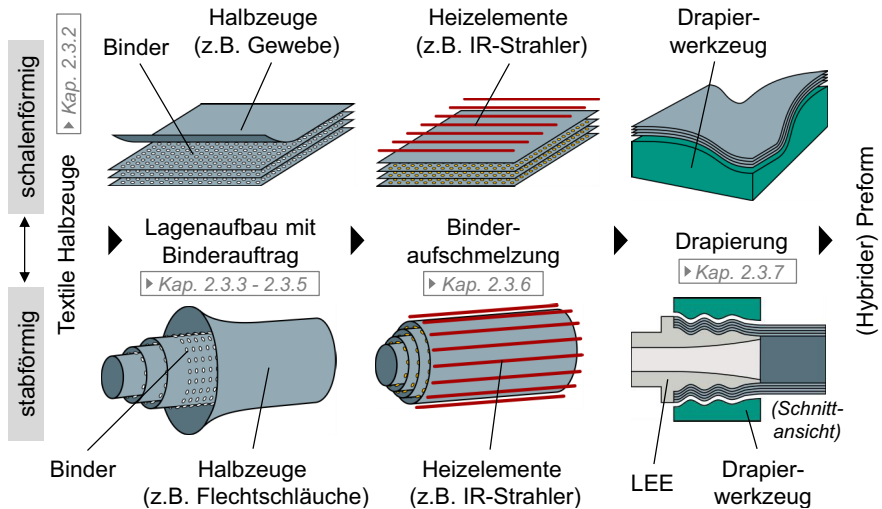


Abbildung 2-8: Prozesskette der Binderumformtechnik für schalenförmige Bauteile (oben) und sowie daraus abgeleitete Prozesskette für stabförmige Bauteile (unten)

Ausgangspunkt für beide Prozesse sind textile Halbzeuge. Im Falle der flächigen Prozesskette können dies beispielsweise Gewebe oder Gelege sein. Bei stabförmigen Preforms kommen Geflechte oder gewickelte Strukturen zum Einsatz. Aus den Halbzeugen wird im ersten Schritt der Lagenaufbau erstellt. Dieser besteht in der Regel aus mehreren Einzellagen des Halbzeugs, wobei auch unterschiedliche Halbzeuge innerhalb eines Lagenaufbaus genutzt werden können. Bei schalenförmigen Preforms kön-



nen die Halbzeuge einfach übereinander gestapelt werden. Schlauchförmige Halbzeuge für stabförmige Preforms müssen hingegen geweitet bzw. gespreizt werden, so dass diese übereinander auf einen Dorn oder Kern gezogen werden können. Falls der Binder nicht bereits in den Halbzeugen enthalten ist, wird er zu diesem Zeitpunkt in den Lagenaufbau eingebracht. Im nächsten Schritt wird der Lagenaufbau aufgeheizt, so dass der Binder aufgeschmolzen wird. Anschließend wird der Lagenaufbau in die spätere Bauteilform umgeformt (*Drapierung*). Die Drapierung kann manuell oder automatisiert durch ein Drapierwerkzeug erfolgen. Bei stabförmigen Bauteilen können in diesem Prozessschritt metallische Lasteinleitungselemente in den Prozess eingebracht und formschlüssig angebunden werden, sodass ein hybrider Preform entsteht. Bei der Drapierung kühlt der Binder wieder unter seine Erweichungstemperatur ab und erstarrt. Dadurch werden die Lagen gegeneinander fixiert und es entsteht ein (hybrider) Preform, welcher in einer automatisierten Prozesskette gehandhabt werden kann.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen sowie der Stand von Forschung und Technik in den beschriebenen Teilschritten, welche entlang der Prozesskette relevant sind, vorgestellt. Nach einer kurzen Einführung in die Ausgangsmaterialien, die flechttechnisch hergestellten Textilien, werden die Prozesse Lagenzuschnitt, Handhabung textiler Halbzeuge und Preforms, Binderauftrag, Binderaufschmelzung und Drapierung erläutert.

### **2.3.2 Flechttechnisch hergestellte Halbzeuge**

Für stabförmige Bauteile sind in der Binder-Umformtechnik insbesondere Flechtschläuche als textile Halbzeuge prädestiniert. Flechtschläuche werden, wie in Abbildung 2-9 schematisch dargestellt, auf einem Flechtrad hergestellt. Auf diesem sind eine gerade Anzahl an Spulen (oder auch Klöppel) befestigt, auf welche die zu flechtenden Rovings aufgewickelt sind. Die Spulen bewegen sich in der Spulenebene wie im rechten Teil von Abbildung 2-9 angedeutet durch eine spezielle Kinematik der Flechtmaschine auf einer spiralförmigen Bahn um die Flechtachse und tauschen so immer die Position mit der jeweils benachbarten Spule. Die Rovings werden dann mit einem Führungsring und optional einem Kern abgezogen. Durch die beschriebene Kinematik der Spulen entsteht das verkreuzte Muster eines Flechtschlauchs, wie im linken Teil von Abbildung 2-9 dargestellt. Je nach Verhältnis aus Durchmesser, Anzahl an Spulen und Materialabzugsgeschwindigkeit stellt sich im Flechtschlauch ein anderer Durchmesser ein. Nach dem Flechten werden die Schläuche meist aufgerollt und so als Halbzeuge zur



Maschinen mit mechanischen Messern oder drehenden Schneidblättern schneiden die Fasern durch die Keilwirkung (Cherif 2016, S. 391). Aufgrund der hohen wirkenden Kräfte kann es dabei jedoch zu Faserverschiebungen kommen.

Durch Wasserstrahlschneiden lassen sich Halbzeuge mit guter Schnittqualität in der Ebene zuschneiden. Jedoch ist nachträglich eine Trocknung der Halbzeuge sicherzustellen. (Voit & Reinhart et al. 2017)

Ein vielversprechendes Schnittverfahren ist das Laserstrahlschneiden. Dabei werden die Fasern lokal durch einen Laserstrahl verdampft, sodass keine Prozesskräfte wirken und damit eine Faserverschiebung ausbleibt. Je nach Anwendung kann der hohe Wärmeeintrag schädlich sein, insbesondere wenn thermoplastisches Binderpulver für die Stabilisierung verwendet wird. (Snape & Turner et al. 2018; Fuchs & Schoeberl et al. 2013)

Einen guten Kompromiss stellt das mechanische Schneiden mit Ultraschallunterstützung dar. Dabei wird die Klinge des Schneidmessers mit Frequenzen im Ultraschallbereich (20 - 30 kHz) angeregt. Dadurch kommt es zu einer hohen Schnittqualität, da die Kräfte auf das Textil stark reduziert werden und Roving-Verschiebungen somit nahezu ausbleiben. (Cherif 2016, S. 392–394)

### **2.3.4 Handhabung textiler Halbzeuge und Preforms**

Nach (Hesse & Malisa 2020, S. 11) bezeichnet der Begriff Handhabung die Schaffung, definierte Veränderung oder vorübergehende Aufrechterhaltung einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern ohne eine beabsichtigte Veränderung am Objekt selbst. In der VDI 2860 wird die Handhabung weiter in die Disziplinen Speichern, Menge verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren unterteilt (VDI 2860:1990-05-00). Aufgrund der Besonderheit der textilen und damit forminstabilen Halbzeuge wird nachfolgend insbesondere auf das Sichern und damit maßgeblich auf das Greifen der textilen Halbzeuge eingegangen.

In (Fantoni & Santochi et al. 2014) werden insgesamt 12 Greifprinzipien vorgestellt. Für das Greifen formlabiler textiler Halbzeuge sind insbesondere Nadelgreifer, Gefriergreifer, Klemmgreifer, Sauggreifer und Niederdruckflächensauger etabliert (Straßer 2012, S. 33; Zeeuw & Peeters et al. 2020).

Nadelgreifer penetrieren das Textil und stellen somit eine formschlüssige Verbindung her. Verbreitet werden Nadelgreifer für flächige Halbzeuge in mechanisch unkritischen

Bereichen angewendet (Seliger & Szimmat et al. 2003). Aufgrund der formschlüssigen und somit wiederholgenauen Verbindung werden in (Liebsch & Kupfer et al. 2017) Nadelgreifer für die Positionierung eines Flechtschlauchs auf einem Kern verwendet. Vorteilhaft ist, dass mehrere Lagen gleichzeitig gegriffen werden können, jedoch kommt es durch die Nadeln zu einer Beeinflussung der Faserstruktur (Böger 1998, S. 12–13; Straßer 2012, S. 83).

Klemmgreifer greifen das Textil an den Außenseiten, können große Kräfte aufnehmen und beeinflussen die Faserstruktur nicht, jedoch ist zwingend eine beidseitige Zugänglichkeit an den Greifpositionen notwendig. Gefriergreifer beruhen auf dem Prinzip der Kohäsion, indem Wasser bspw. mittels eines Peltier-Elements an der Greiffläche unter den Gefrierpunkt abgekühlt und das Textil somit mit dem Greifer verbunden wird. Nachteilig ist jedoch die Benetzung des Textils mit Wasser, was für die spätere Infiltration zwingend einen Trocknungsschritt erfordert (Seliger & Szimmat et al. 2003).

Sauggreifer basieren auf dem Ansaugen von Textilien mittels Unterdruck. Sie sind prinzipbedingt auf weitestgehend luftundurchlässige Halbzeuge beschränkt (Seliger & Szimmat et al. 2003).

Im Gegensatz zu Sauggreifern beruht das Greifprinzip von Niederdruckflächensaugern auf dem Anhaften eines luftdurchlässigen Textils aufgrund eines hohen Luftvolumenstroms. Der Differenzdruck ist lediglich minimal. Vorteilhaft ist insbesondere die geringe Veränderung des Materials durch die geringen lokal wirkenden Kräfte. (Hesse 2011, S. 127; Angerer & Ehinger et al. 2011)

(Reinhart & Straßer et al. 2010) untersuchen zwölf Greifer mit den vorgestellten fünf Greifprinzipien hinsichtlich der Haltekraft, Greifqualität und Wirtschaftlichkeit und kommen zu dem Ergebnis, dass das flächige Greifen mittels Unterdruck am vielversprechendsten für die Handhabung textiler Halbzeuge ist.

(Straßer 2012) entwickelt in seiner Dissertation einen flexiblen, flächigen Greifer für Faserhalbzeuge, in dem einzelne Kammern je nach Geometrie des aufgenommenen Halbzeugs flexibel verschlossen werden können. (Ehinger 2013) baut darauf auf und verwendet das Prinzip des Niederdruckflächensaugers zur Drapierung von flächigen Halbzeugen, indem ein zylindrischer Greifer Lagen aufrollt und anschließend auf einem Werkzeug drapiert. Einen formflexiblen Greifer, welcher ebenfalls zur Drapierung flächiger Halbzeuge geeignet ist, entwickeln (Kunz & Löchte et al. 2015) mit der Form-Hand. (Förster 2016) optimiert kommerziell erhältliche Niederdruckflächensauger durch

die Einbringung einer Sensorik derart, dass die aufgebrachte Greifkraft geregelt und der notwendige Volumenstrom somit reguliert werden kann. (Ballier 2019) nutzt Niederdruckflächensauger für das Greifen von flächigen Halbzeugen und optimiert die Anordnung der Greifer dahingehend, dass ein minimaler Durchhang des Textils erreicht wird.

Es sind aktuell keine Anwendungen des Niederdruckflächensauger-Prinzips für die naheliegende Handhabung von Flechtschläuchen oder zylindrischen Preforms bekannt.

### **2.3.5 Binderauftrag**

Als Binder wird im Kontext der FVK-Industrie ein thermisch aktivierter Klebstoff bezeichnet, mit welchem die textilen Lagen gegeneinander fixiert werden. Der Binder übernimmt jedoch keine lasttragende Funktionen im späteren Bauteil, sondern erfüllt seine Funktion lediglich bis zur Infiltration. Aufgrund der Interaktion mit der Matrix müssen Bindersysteme und Matrix aufeinander abgestimmt werden. (Cherif 2016, S. 23)

#### **2.3.5.1 Binderarten und Eigenschaften bebinderter Preforms**

Es existiert eine Vielzahl von Binderarten und -formen für die unterschiedlichsten Materialien, Prozesse und Losgrößen, auf welche nachfolgend zusammenfassend eingegangen wird.

Beim Chemical Stitching wird über eine Hohlneedle ein reaktives Klebstoffsystem in den trockenen Faserstapel injiziert, sodass es zu einer punktförmigen Verbindung der Lagen kommt. (Thoma & Weidenmann et al. 2012; Thoma 2015)

Bindervliese bestehen meist aus thermoplastischen Binderfäden und werden in den Lagenaufbau als eigenständiges Flächenhalbzeug mit eingebracht. (Dickert 2015, S. 12; Böhm & Häntzschel et al. 2013, S. 28)

Eine ähnliche Binderverteilung wie bei Bindervliesen lässt sich über einen Hotmelt-Auftrag erreichen. Dabei wird thermoplastischer, schmelzflüssiger Binder durch eine Düse mit einem verwirbelten Luftstrahl ausgetragen, sodass vliesähnliche, dünne Binderfäden auf dem Textil abgelegt werden. (Berthel & Cherif et al. 2013, S. 197–198; Dickert 2015, S. 12; Brune 2006)

Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von pulverförmigen Bindern, welche entweder direkt als Pulver oder in schmelzförmiger oder dispergierter Form aufgetragen werden können. (Böhm & Häntzschel et al. 2013, S. 27; Dickert 2015, S. 12)

Neben dem separaten Auftrag des Binders während des Lagenaufbaus besteht auch die Möglichkeit, Binderfäden direkt in der Herstellung der Halbzeuge einzubinden. So werden in (Berthel & Cherif et al. 2013, S. 139–141) und (Hübner & Rocher et al. 2016) Hybridgarne mit Polypropylen-Fäden als Binder verwendet. Durch die Integration der Binderfäden in die Halbzeugherstellung ist dieses Vorgehen jedoch sehr unflexibel und eine Änderung des Bindersystems sehr teuer, weswegen es nur für sehr große Stückzahlen rentabel ist (Mack & Mitschang 2015).

Aufgrund der höchsten Flexibilität, der weiten Verbreitung sowie der guten mechanischen Eigenschaften im Bauteil werden in der weiteren Arbeit lediglich pulverförmige Binder betrachtet. Binderpulver kann auf die textilen Halbzeuge als loses Pulver zum Beispiel durch Streuen oder gelöst in einer Dispersion durch Tauchen oder Besprühen aufgetragen werden.

Eine weitere Variante ist das Aufschmelzen des Binders und Aufbringen im flüssigen Zustand. Für die bessere Verarbeitbarkeit wird das Pulver dabei mit einem Kryo-Mahlwerk gemahlen und anschließend gesiebt. Für den Auftrag kann eine dem Prozess vorgelagerte Tankschmelzanlage verwendet werden, um das Binderpulver aufzuschmelzen. Von dort wird es mittels eines Ventils als dünner Faden bereitgestellt und über eine am Auslass zugeführte Sprühluft spiralförmig verwirbelt und auf das Textil flächig aufgetragen. (Böhm & Häntzschel et al. 2013, S. 54–60)

Die Auswirkungen von Binder auf Preforms sowie auf das infiltrierte Bauteil wurden intensiv im DFG-AiF-Cluster „Leichtbau und Textilien“ sowie in der Dissertation von (Dickert 2015) untersucht. Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen der oben genannten Auftragsarten untersucht.

Für eine hohe Biegesteifigkeit des Preforms ist ein möglichst gleichmäßiger, flächiger Auftrag des Binders notwendig. In (Böhm & Häntzschel et al. 2013, S. 66) kann gezeigt werden, dass ein punktförmiger Auftrag die Biegesteifigkeit stark herabsetzt. Die Auftragsarten pulverförmig und schmelzförmig zeigen keine Unterschiede bezogen auf die Biegesteifigkeit, lediglich der Auftrag als Dispersion verringert die Biegesteifigkeit des Preforms deutlich.

Eine geringe Bindermenge führt im Vergleich zu unbedingten Proben zu einer Erhöhung der Permeabilität des Textils und somit zu einer besseren Infiltrierbarkeit. Der Grund dafür ist, dass aufgrund vorhandener einzelner Binderpartikel zwischen den Lagen Fließkanäle gebildet werden, die die Tränkung somit begünstigen. Die höchste

Permeabilität wird bei einem Binderanteil von etwa 2 ma-% erreicht. (Dickert & Kroll et al. 2013, S. 303)

Da der Binder zwischen den Lagen aufgebracht wird, wirkt sich dieser beim infiltrierten FVK-Bauteil insbesondere auf die interlaminare Festigkeit aus. Die höchste interlaminare Scherfestigkeit kann mit einem vollflächigen oder linienförmigen Auftrag in Pulverform oder als Schmelze erzielt werden. Ein Auftrag als Dispersion führt zu starker Porenbildung bei der Tränkung und einer herabgesetzten Scherfestigkeit. (Böhm & Häntzschel et al. 2013, S. 74–76)

Mit steigendem Binderanteil nimmt die mechanische Belastbarkeit der Bauteile ab. (Böhm & Häntzschel et al. 2013, S. 48–50)

Sowohl in (Dickert 2015, S. 225) aus auch in (Cherif 2013) wird der pulverförmige Binder Epikote 05390 des Hersteller HEXION aufgrund der guten Verarbeitbarkeit, der guten Preformsteifigkeit und -schälfestigkeit sowie guter Eigenschaften des FVK-Bauteils ausgewählt. Nach (Dickert 2015, S. 235) liegen anzustrebende Bindergehalte bei 2 bis 5 ma.-%, wobei der Trend aufgrund höherer Bauteilqualitäten und besserer Tränkbarkeit hin zu niedrigeren Bindergehalten geht.

Der Auftrag in Pulverform zeigt aufgrund der guten Verarbeitbarkeit und guten Preform-eigenschaften neben dem schmelzförmigen Auftrag das höchste Potential für eine gleichmäßige Bebinderung des Textils. Es wird nachfolgend daher genauer auf Möglichkeiten zum Auftrag des Binderpulvers in Pulverform eingegangen.

### **2.3.5.2 Pulverförmiger Binderauftrag**

Manuell wird Binderpulver häufig mit Streuern ausgetragen, die in ihrer Funktionsweise Salz- und Pfefferstreuern ähneln – beispielsweise in (Rudd & Turner et al. 1999). Alternativ kommen beim manuellen Austrag Laborsiebe zum Einsatz (Coutandin 2020, S. 54–55; Dickert 2015, S. 59)

Für den automatisierten Austrag des Pulvers existieren im Stand der Forschung und Technik Lösungen, bei denen das Binderpulver während des Auftrags aufgeschmolzen wird. So wird in (Fuerst 2011) ein Ansatz präsentiert, bei der Binderpulver mittels erhitzter Druckluft auf flächige Halbzeuge aufgetragen werden kann. Das Pulver wird über einen Einfülltrichter und eine darunter liegende Austrags- und Dosierschnecke dosiert und durch vorbeiströmende, erhitzte Druckluft mitgetragen. Ähnliche Vorgehensweisen wurden bereits von (Barron & Entringer et al. 1992) beschrieben.

Eine Möglichkeit, Pulverbinder beim automatisierten Ablegen von trockenen Faser-Tapes (sog. AFP-Prozess: Automated Fibre Placement) einzubringen, wird in der Dissertation von (Mack 2015) behandelt. Er erweitert damit den AFP-Prozess von (Rudd & Turner et al. 1999), in welchem der Pulverbinder noch mit einem Streuer nach jeder gelegten Lage ausgetragen wurde. Mack trennt die Funktionen Binderdosierung und Binderapplikation in zwei separate Module. Die Binderdosierung erfolgt über ein Sperrzahnrad, welches das Binderpulver aus einem Vorratsbehälter fördert. Für eine bessere Förderung wird das gesamte Modul mittels eines druckluftbetriebenen Shakers in Schwingung versetzt. Das dosierte Pulver wird, ähnlich wie in (Fuerst 2011), durch vorbeiströmende, kalte Druckluft mitgerissen. Im Modul zur Binderapplikation wird der kalte Binderluftstrom mit einem Luftstrom aus einer Heißgasdüse vermischt, sodass die Binderpartikel aufgeschmolzen werden. Die aufgeschmolzenen Binderpartikel werden direkt in die Fügestelle zwischen den Tapes aufgetragen, woraufhin das abgelegte Tape mit einer Kompaktierungsrolle angepresst wird. (Mack 2015, S. 50–106; Mack & Mitschang 2015)

Zum Binderauftrag auf Tapes wird in (Meyer 2008) ein Wirbelbinderer vorgestellt. Dabei wird ein Tape durch eine geschlossene Kammer geführt, in welcher mittels eines Luftstroms ein Pulverwirbel erzeugt wird. Allerdings kann keine zufriedenstellende Bindermenge eingestellt werden. (Meyer 2008, S. 79–83)

Als Alternative schlägt Meyer einen Auftrag über einen industriellen Pulverstreuer vor. Dabei trägt eine sich unterhalb eines Pulverbehälters befindliche Bürste Pulver aus dem Behälter aus, während eine zweite, entgegengesetzt laufende Bürste, das Pulver aus der ersten Bürste löst und somit auf das Tape rieseln lässt. Es lässt sich ein reproduzierbarer Binderaustrag auf Tapes erzielen. (Meyer 2008, S. 84–86)

(Helber & Schrick et al. 2018) stellen ebenfalls einen Ansatz vor, in dem Binder auf Fasertapes appliziert wird. Dabei wird aus einem Binderreservoir mittels einer sich drehenden Rolle mit innenliegenden Binderreservoirs Binderpulver entnommen und auf das darunter laufende Tape gestreut. Die Bindermenge lässt sich über das Verhältnis aus Tape-Geschwindigkeit und Rollendrehzahl einstellen. (Helber & Schrick et al. 2018)

Die Integration des Binderauftrags in hohlförmige Halbzeuge, wie beispielsweise Flechtschläuche, stellt aufgrund der Notwendigkeit, den Binder über den kompletten Umfang zu verteilen, eine besondere Herausforderung dar.



Eine Möglichkeit zum Binderauftrag direkt im Flechtprozess beschreiben (Berthel & Cherif et al. 2013, S. 125–133). Es wird eine sich um die Flechtachse um 360° drehbare Sprüheinheit vorgestellt, allerdings wird der Binder dafür als Dispersion aufgebracht.

Da insgesamt keine Lösung für einen homogenen, reproduzierbaren pulverförmigen Binderauftrag auf zylindrische Preforms gefunden werden kann, werden im nachfolgenden Kapitel Pulverauftragsverfahren aus anderen Branchen vorgestellt, von denen gegebenenfalls Aspekte übernommen werden können.

### **2.3.5.3 Pulverauftrag in anderen Anwendungen**

Bei Binderpulver handelt es sich um ein Schüttgut. Nach der allgemeinen Definition setzen sich Schüttgüter aus Festkörpern, in diesem Fall den Binderpartikeln, zusammen (Stieß 2009, S. 449; Schulze 2019, S. 9). Schüttgüter können durch einen aufgetragenen Druck kompaktiert werden. In Ruhe befindliche Schüttgüter können Scherkräfte übertragen und verhalten sich somit ähnlich wie ein Festkörper. Befindet sich ein Schüttgut in Bewegung, so verhält es sich ähnlich wie eine Flüssigkeit. (Schulze 2019, S. 11–17; VDI 26942012-07-00)

Aufgrund von Van-der-Waals-Kräften existieren Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Partikeln des Schüttguts. Daher gilt, dass Schüttgüter umso fester sind und damit auch umso schlechter fließen, je kleiner die Partikel sind. (Schulze 2019, S. 42–43)

Schüttgüter lassen sich in Silos lagern und durch geeignete Austragsgeräte, wie bspw. Schneckenförderer, Gurtförderer oder Schwingtrichter, austragen.

Für weitere Grundlagen zu Schüttgütern sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen: (Schulze 2019; Stieß 2009).

Eine andere Anwendung, in der Pulver sehr fein dosiert werden müssen, ist das Pulverauftragschweißen. Dabei wird ein feiner (z.B. Kunststoff-)Pulvermassenstrom lokal aufgetragen, aufgeschmolzen und kann somit beispielsweise in der additiven Fertigung zum Aufbau von Bauteilen verwendet werden. In (Stichel & Laumer et al. 2014) erfolgt der Austrag des Pulvers über eine Düse, welche mittels eines Piezoaktors in Vibration gebracht wird, sodass erfolgreich Polyamid-12-Pulver austragen werden kann.

Ein Prozessschritt in der Produktion von Batteriezellen ist das Aufbringen des Aktivmaterials auf die Elektroden. In der herkömmlichen Produktion wird dafür ein sogenannter Slurry, eine Dispersion, in der das Aktivmaterial enthalten ist, verwendet. In neueren Entwicklungen wird anstatt des Slurrys ein trockenes Pulver verwendet. Dabei wird das

Pulver mit Partikelgrößen von 5,6 bis 12  $\mu\text{m}$  mit einer elektrostatischen Sprühpistole mit einer Spannung von 25 kV aufgetragen. (Kwade & Haselrieder et al. 2018; Al-Shroofy & Zhang et al. 2017; Ludwig & Zheng et al. 2016)

Für die Dosierung von Pulver in pharmazeutische Tabletten wird ein vibrationsbasierter Ansatz in (Besenhard & Faulhammer et al. 2015) vorgestellt. Die verwendeten Pulver haben Partikelgrößen in der Größenordnung um 100  $\mu\text{m}$  und sind somit vergleichbar mit dem Binderpulver Epikote 05390. Es kann innerhalb von einer Sekunde eine Dosierung von 2,5mg mit einer Genauigkeit von 5% erreicht werden. (Besenhard & Faulhammer et al. 2015)

Da in (Mack 2015) und (Meyer 2008) gezeigt wurde, dass Schwingungen den Transport von Binderpulver begünstigen, werden nachfolgend ausgewählte Forschungsarbeiten auf dem Gebiet schwingender Pulverförderung und -dosierung vorgestellt.

(Kollmann 2002) untersucht den Einfluss von Schwingungen auf den Austrag feinstkörniger, kohäsiver Kalksteinmehle und Titandioxidpulver mit mittleren Partikelgrößen um 1  $\mu\text{m}$ . Zur Schwingungserzeugung wird ein Schwingtrichter mit einem schwingenden Silo verglichen. Der Vorteil des Schwingtrichters liegt insbesondere darin, dass nicht die komplette Masse des Silos mit bewegt werden muss. Insgesamt zeigt Kollmann, dass überlagerte harmonische Schwingungen das Fließverhalten der betrachteten Pulver deutlich verbessern. Zwischen der Schwingungserzeugung mit Schwingtrichter und mit schwingemde Behälter kann keine abschließende Empfehlung gegeben werden. (Kollmann 2002)

Für die Auslegung der Schwingungserzeugung ermittelt (Kache 2010), dass eine maximale Schwinggeschwindigkeit zu einem optimalen Pulverfluss führt. Es wird ein Modell für die Schwingungen im Pulver entwickelt und validiert. (Kache 2010)

Für besonders feine Pulver bei Minimalmengendosierungen können die Vibrationen zur Dosierung über Ultraschallanregungen erreicht werden. Die geringen Schwingungsamplituden erlauben jedoch nur Dosierungen von kleinsten Pulvermengen und können aufgrund der Dämpfung nicht tief in Pulverbehälter eindringen. (Lu & Yang et al. 2006; Lu & Yang et al. 2009; Dunst & Bornmann et al. 2018)

#### **2.3.5.4 Ansätze zur Modellierung des Pulverauftrags**

Schüttgüter in Silos und der Austrag aus diesen werden vor allem über kontinuumsmechanische Ansätze modelliert. Allerdings stößt die Modellierung als Kontinuum an ihre

Grenzen, wenn das Pulver fließt oder sich anderweitig in Bewegung befindet. (Schulze 2019, S. 144; Böhrnsen 2002)

Ein numerischer Ansatz zur Beschreibung des Partikelverhaltens ist die Diskrete-Elemente-Methode (DEM). Sie eignet sich, um einzelne Partikel abzubilden und damit auch Kräfte und Interaktionen auf mikroskopischer Betrachtungsebene zwischen den Partikeln zu berücksichtigen. Durch die DEM lässt sich das Verständnis des Pulververhaltens deutlich verbessern, allerdings ist der Simulationsaufwand für die Abbildung kompletter Silos enorm. (Tykhoniuk & Tomas et al. 2004; Gröger & Tüzün et al. 2003; Pantaleev & Yordanova et al. 2017; Steinhauser 2016, S. 281)

Um den Rechenaufwand zu minimieren, können die Pulverpartikel auf die bis zu zehnfache Größe skaliert werden, sodass weniger Partikel berechnet werden müssen und trotzdem realitätsnahe Ergebnisse berechnet werden. (Imole & Krijgsman et al. 2016)

Im Bereich des Pulverbeschichtens erfolgt der Beschichtungsvorgang oft mithilfe einer Corona-Applikation. Dabei werden die Partikel mittels eines Luftstroms an einer Elektrode entlanggeführt und über die elektrostatische Aufladung an die entgegengesetzt geladenen Oberfläche gelenkt. Zahlreiche Arbeiten präsentieren modellbasierte Ansätze, den Pulverstrom mittels DEM abzubilden. Insbesondere die elektrostatischen Kräfte, welche auf die Partikel einwirken, lassen sich mit der DEM gut abbilden. (Ye & Steigleder et al. 2002; Pendar & Pascoa 2019)

Für eine gute Aussagekraft der Modelle sind insbesondere viele Material- und Simulationsparameter zu bestimmen. Meist werden die Modelle in den Anwendungen an den jeweiligen Betriebspunkt der Anwendung angepasst (gefittet) und besitzen außerhalb des Betriebspunkts nur eine begrenzte Aussagekraft. (Turton 2008)

### **2.3.6 Binderaufschmelzung**

Die meisten Binder sind bei Raumtemperatur nicht adhäsiv sondern müssen, um die Fasern zu benetzen, aufgeschmolzen werden. Durch das Aufschmelzen des Binders, welcher sich zwischen den Halbzeuglagen befindet, benetzt dieser die Fasern. Durch das anschließende Erkalten und Erstarren des Binders werden die Lagen miteinander verklebt. Der Prozess aus Binderaufschmelzung, Benetzung und Erstarrung wird als Binderaktivierung bezeichnet. Bei einigen der in Kapitel 2.3.5.2 vorgestellten Auftragsverfahren, bei denen die Fasern in den noch schmelzflüssigen Binder abgelegt werden (wie beispielsweise dem schmelzflüssigen Aufsprühen im AFP-Prozess), kann eine

nachträgliche Binderaktivierung entfallen. Nachfolgend werden die wichtigsten Verfahren zur Binderaufschmelzung vorgestellt. (Cherif 2016, S. 422–424; Dickert 2015, S. 13)

Beim Heizelementschweißen oder Heißpressen werden einseitig oder beidseitig Heizelemente mit den Fasern in Kontakt gebracht. Dadurch werden die Halbzeuglagen von außen nach innen aufgeheizt und der Binder aufgrund der Wärmeleitung aufgeschmolzen. Unter Druck werden die Lagen kompaktiert, sodass einerseits die Wärmeleitung reproduzierbarer erfolgt und andererseits die Lagen miteinander verbunden werden. (Fahrenwaldt & Schuler et al. 2013, S. 195–197; Dickert & Ziegmann 2012)

Sehr verbreitet ist die Wärmeeinbringung in den Preform mittels Infrarotstrahlern. Dabei wird die Wärme in Form von infraroter Strahlungsenergie über im Umfeld des Preforms angebrachte Infrarotstrahler erzeugt. Aufgrund der hohen Wellenlänge des infraroten Lichts wird dadurch nicht nur die Oberfläche erhitzt, sondern die Erwärmung findet bis zu einige Millimeter tief im Material statt. (Neumann 2017, S. 19; Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 339; Wagner 2016, S. 85–87)

Das Aufheizen des Lagenstapels mittels Induktion wird in (Frauenhofer & Ströhlein et al. 2008) beschrieben. Es eignet sich insbesondere für dickwandige Profile und kontinuierliche Prozesse und kann unabhängig von den verwendeten Binder- oder Harzsystemen angewendet werden, ist jedoch aufgrund der notwendigen elektrischen Leitfähigkeit auf Kohlenstofffaser-Preforms begrenzt. (Ströhlein & Kleineberg et al. 2007; Frauenhofer & Ströhlein et al. 2008)

In (Berthel & Cherif et al. 2013) wird die Binderaufschmelzung durch erhitzte Druckluft vorgestellt. Dabei wird ein Roboterendeffektor mit einem Lufterhitzer ausgestattet, sodass dieser über ein Lochblech den Preform erhitzen und somit den Binder aktivieren kann. (Berthel & Cherif et al. 2013, S. 199–202)

Ein neuerer, vielversprechender Ansatz ist das Binderaufschmelzen mittels Ultraschallschweißen. Durch eine Ultraschall-Sonotrode werden Schwingungen in die Fügezone zwischen den Halbzeugen eingeleitet, sodass der Binder an dieser Stelle aufschmilzt. Verfahrensbedingt lässt sich der Binder nur punkt- und linienförmig aufschmelzen, eine flächige Aktivierung ist nicht möglich (Weiland 2012; Ringwald 2014, S. 192–195). Bei der kontinuierlichen Preform-Herstellung von geflochtenen und gewickelten Profilen für die Lufffahrtindustrie lässt sich das Ultraschall-Schweißen ebenfalls verwenden. (Arold & Neumann et al. 2013; Neumann 2017)

Für die Dimensionierung und Prozessführung des Binderaufschmelzprozesses ist insbesondere die Temperaturführung innerhalb des Halbzeugs relevant. Aufgeschmolzener Binder tränkt die angrenzenden Rovings aufgrund der Kapillarwirkung der Fasern. Die Tränkung wird mit steigender Temperatur aufgrund einer sinkenden Viskosität des Binders beschleunigt. Befindet sich der Binder komplett innerhalb der Rovings, geht die Klebewirkung verloren und die Schälfestigkeit des Preforms entspricht nahezu einem unbedingten Preform. (Dickert & Ziegmann 2012; Dickert 2015, S. 103–105)

(Coutandin 2020) entwickelt in seiner Dissertation daher ein Modell, welches die Tränkung der Rovings durch den Binder vorhersagt. Das Modell ermöglicht die Berechnung der optimalen Aktivierungstemperatur und -zeit, bei der die Halbzeuge gerade so weit getränkt sind, dass sie ideal miteinander verbunden werden. (Coutandin 2020, S. 100–110)

### 2.3.7 Drapierung

In der Binder-Umformtechnik erfolgt nach der Binderaufschmelzung die Drapierung des Textils in die spätere Bauteilform. Der Begriff Drapierung bezeichnet dabei die Umformung des Textils, ohne dass das Textil dabei gefaltet wird. Die Drapierung erfolgt möglichst endkonturnah („*near-net shape*“), sodass die Bauteile nach der Infiltration möglichst kaum oder gar nicht nachbearbeitet werden müssen. (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 367–394)

Anders als isotrope Materialien (z.B. Metalle) lassen sich Textilien während der Drapierung mit den nachfolgend aufgeführten Deformationsmechanismen verformen (vgl. Abbildung 2-10) (Long 2007, 1-19):

- Als Intra-Ply<sup>2</sup>-Scherung wird die durch eine Scherung in der Textil-Ebene hervorgerufene Parallelverschiebung von Garnen sowie die Rotation von sich kreuzenden Garnen um deren Kreuzungspunkt bezeichnet. Sie stellt den primären Verformungsmechanismus für Textilien dar (vgl. Abbildung 2-10a). (Long 2007, S. 3)
- Auf Querkräfte und Druckkräfte in Faserrichtung reagiert das Textil mit einer Biegeverformung (vgl. Abbildung 2-10b). Aufgrund der kleinen Biegesteifigkeit des Materials führt dieser Deformationsmechanismus oft zu Faltenbildung im Material

---

<sup>2</sup> Intra-Ply (engl.): „Innerhalb der Lage“

durch eine In-Plane-Druckbeanspruchung. Diese kann bspw. durch eine Druckbeanspruchung direkt oder indirekt durch eine starke Scherung des Materials hervorgerufen werden. Die Biegesteifigkeit hat einen großen Einfluss auf die Form der Falten. (Boisse & Hamila et al. 2011; Long 2007, S. 12)

- Unter Zugbelastung in Faserrichtung dehnen sich diese (vgl. Abbildung 2-10c). Aufgrund der hohen Steifigkeit der Fasern in Faserrichtung führt eine Zugbelastung zu sehr geringen direkten Verformungen und stellt somit einen untergeordneten Deformationsmechanismus dar (Long 2007, S. 9), jedoch beeinflussen Zugspannungen Deformationsmechanismen wie die Intra-Ply-Scherung sehr stark (Nosrat-Nezami & Gereke et al. 2014).
- In mehrlagigen Umformprozessen kommt es zur Inter-Ply<sup>3</sup>-Schерung, bei der die Lagen untereinander aufgrund von Scherkräften abgleiten (vgl. Abbildung 2-10d). Sie wird ergänzt durch eine Tool/Ply-Scherung – Der Scherung zwischen Werkzeug und äußerster textiler Lage. (Long 2007, S. 10–11)
- Druckkräfte in Dickenrichtung des Textils führen zu einer Material-Kompaktierung (vgl. Abbildung 2-10e), welche in einer Erhöhung des Faservolumengehalts resultiert. (Long 2007, S. 14)

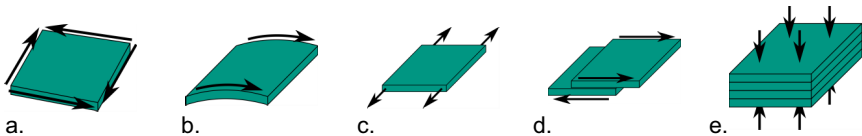


Abbildung 2-10: Wichtigste Deformationsmechanismen bei Textilien: Intra-Ply-Scherung (a), Biegung (b), Zug (c), Inter-Ply- & Tool/Ply-Scherung (d), Kompaktierung (e)

Falten entstehen bei der Verformung von Textilien aufgrund der geringen Biegesteifigkeit des Materials durch eine In-Plane-Druckbeanspruchung. Diese kann bspw. direkt durch eine Druckbeanspruchung oder indirekt durch eine starke Scherung des Materials hervorgerufen werden. Neben der Faltenbildung sind die wichtigsten Drapierfehler die Faserfehlorientierung, lokale Faserwelligkeiten, Bridging (Abheben des Textils an konkaven Radien, sodass es zu einer Überspannung kommt) und Kompaktierung (Brabandt 2018, S. 15–17; Kunze & Galkin et al. 2020).

<sup>3</sup> Inter-Ply (engl.): „Zwischen den Lagen“

### 2.3.7.1 Drapierverfahren für die Binder-Umformtechnik

Für die Drapierung schalenförmiger Textilien sind die wichtigsten Verfahren die Stempel-, die Membran-, die Rollen- sowie die kinematische Drapierung (Wagner 2016, S. 22). Die vier Techniken sind in Abbildung 2-11 schematisch gezeigt und werden nachfolgend jeweils kurz vorgestellt.

Bei der Stempeldrapierung wird der flache textile Lagenaufbau in einen Niederhalter, beispielsweise in Form eines Spannrahmens oder einzelner Greifpunkte, eingespannt und über einer Matrize positioniert. Mittels einer Presse oder anderweitiger Aktuatoren wird ein Stempel derart in die Matrize verfahren, dass das Textil zwischen Stempel und Matrize in die spätere Bauteilform drapiert wird. Durch eine gezielte Segmentierung des Stempels und Einstellung einer zeitlichen Abfolge lässt sich das Drapierergebnis deutlich beeinflussen und optimieren. Aufgrund der hohen Investitionskosten für Presse und Werkzeuge ist das Verfahren insbesondere für Großserienanwendungen relevant. (Chen 2016, S. 20–21; Coutandin 2020, S. 9; Coutandin & Brandt et al. 2018; Härtel 2015, S. 117–118)

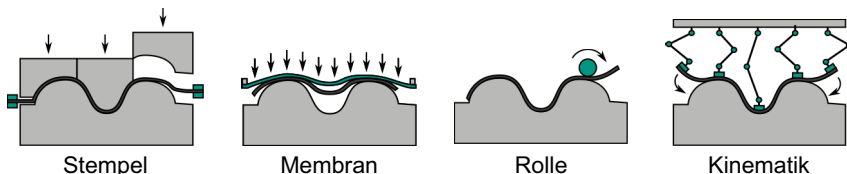


Abbildung 2-11: Drapierverfahren für die Binder-Umformtechnik (eigene Darstellung nach (Wagner 2016, S. 22))

Im Gegensatz zur Stempeldrapierung erfolgt bei der Membran- oder auch Diaphragmadrapierung die Umformung mittels einer Silikonmembran. Die Umformung erfolgt, indem die Membran durch eine Druckdifferenz, meist erzeugt durch ein Vakuum, das Textil an einem halbschaligen Werkzeug abformt. Es wird zwischen einseitigen und doppelseitigen Membranen unterschieden. Im Gegensatz zur einseitigen Membran wird bei der doppelseitigen Membran zusätzlich eine Membran zwischen Textil und Werkzeug eingelegt, sodass das Abgleiten zwischen Textil und Werkzeug besser kontrolliert werden kann. Erfolgt die Erzeugung der Druckdifferenz mittels eines Überdrucks, können auch Differenzdrücke über  $\Delta p > 1 \text{ bar}$  erzeugt werden, sodass größere Drapierkräfte erreicht werden. (Chen & McGregor et al. 2017; Wagner 2016, S. 26–27; Margossian & Bel et al. 2014; Härtel 2015, S. 120)

Die Rollendrapierung ist ein hochflexibler, jedoch iterativer und dadurch langsamerer Prozess. Es wird das Textil mittels einer Rolle auf einer Werkzeughälfte abgeformt. Die Rolle ist meist Teil eines Roboter-Endeffektors und erlaubt somit maximale Freiheitsgrade. In einigen Varianten erfolgt zusätzlich die Handhabung des Textils prozessintegriert über die Rollen selbst, z.B. in (Ehinger 2013). (Härtel 2015, S. 120–122; Kordi & Husing et al. 2007)

Kinematische Drapiersysteme basieren auf dem lokalen, meist punktförmigen Greifen des Textils und der gezielten Verschiebung und Drehung der Greifpunkte zueinander, sodass das Textil in die gewünschte Form drapiert werden kann. Die Drapierung durch derartige Systeme kann entweder komplett frei in der Luft erfolgen oder durch eine Werkzeugkavität, an der das Textil entlang geführt werden kann, unterstützt werden. (Corves & Brinker et al. 2015; Kordi & Husing et al. 2007; Kordi 2009; Reinhold & Juergens et al. 2009)

Neben den vorgestellten diskontinuierlichen Drapierverfahren existieren einige kontinuierliche Verfahren, welche insbesondere für die Herstellung profilmörmiger Preforms eingesetzt werden können. Kontinuierliche Verfahren basieren oft auf dem Umschalten von Flecht- oder Wickelprozessen mit einem kontinuierlich betriebenen Preform-Werkzeug. In anderen Varianten werden Faserhalbzeuge, z.B. Gelege oder Gewebe, in den Prozess zugeführt. In den kontinuierlichen Verfahren werden die Fasern oder Faserhalbzeuge mittels geeigneter Materialführungssysteme umgeformt und durch ein Formwerkzeug geführt. Die Stabilisierung erfolgt mit Pulver- oder Vliesbindern, welche direkt im Prozess aufgebracht und aktiviert werden. Mittels kontinuierlicher Verfahren lassen sich auch gekrümmte Profile, bspw. für Spanten und Stringer<sup>4</sup> für die Luftfahrtindustrie, herstellen. (Grieser & Mitschang 2014; Grieser 2016; Neumann 2017; Purol 2011; Reinhold & Mehlenhoff 2011)

Hohle, stabförmige Preforms werden häufig mit Direktpreforming-Verfahren wie dem Überflechten (vgl. Kapitel 2.3.2) oder dem trockenen Faserwickeln (Sofi & Neunkirchen et al. 2018) hergestellt. Jedoch erfolgt das Preforming immer mit einem notwendigen Kern. Auch im in Kapitel 2.2 vorgestellten Schlauchblas-Integralverfahren erfolgt der Preforming-Schritt auf einen Kern bzw. einen Schlauch (Barfuss & Würfel et al. 2018; Liebsch & Kupfer et al. 2017). Die Drapierung des thermoplastischen Flechtschlauchs

---

<sup>4</sup> Längs- (Stringer) und Querversteifungen (Spanten) im Rumpf von Flugzeugen, meist in Form von gekrümmten Profilen



in die metallischen LEEe bei der Hybridisierung im Schlauchblasintegralverfahren erfolgt durch die Expansion des Silikonschlauchs unter Innendruck und ist somit mit einer Membrandrapierung vergleichbar. Das Preforming und die Handhabung von Flecht-schläuchen, welche für verschiedene Infiltrationsverfahren häufig auf Kerne gezogen werden müssen, erfolgt auch im industriellen Umfeld meist manuell.

### 2.3.7.2 Ansätze zur Modellierung der Drapierung

Faserverstärkte Kunststoffe sind sogenannte Multi-Skalen-Materialien: Aufgrund der faserförmigen Verstärkungsstruktur beeinflussen Architektur und Eigenschaften auf der kleinsten Skala das Verhalten des Gesamtbauteils. FVK in der Nutzungsphase, aber insbesondere auch die textilen Ausgangsprodukte während der Umformung, werden daher üblicherweise auf drei Skalen mit Hilfe von Finite-Elemente(FE)-Ansätzen modelliert (Long 2007). Diese drei Betrachtungsebenen sind im linken Teil von Abbildung 2-12 dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Neben den FE-Ansätzen werden auf makroskopischer Ebene auch die in Abbildung 2-12 rechts dargestellten kinematische Ansätze zur Modellierung herangezogen, auf die an späterer Stelle ebenfalls eingegangen wird.

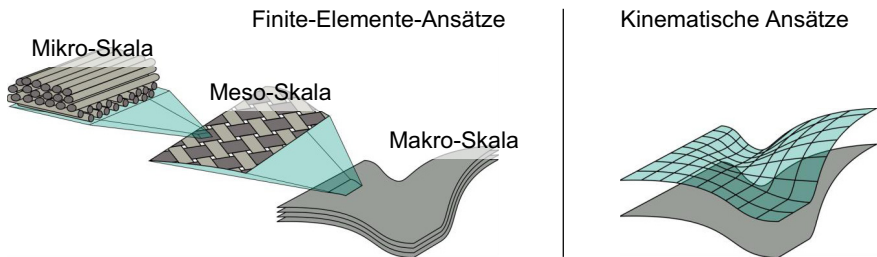


Abbildung 2-12: Betrachtungsskalen für Simulationsansätze der Drapierung (Eigene Abbildung nach (Cherif 2011, S. 603–604; Birkefeld 2013, S. 13; Boisse 2010)).

Auf der kleinsten Betrachtungsebene, der mikroskopischen Skala, werden die einzelnen Filamente als solche in ihrer Interaktion mit den umliegenden Filamenten modelliert. Aufgrund des hohen Detailgrads von Simulationen auf der Mikroskala werden diese in der Regel nur für die Berechnung von Materialkennwerten oder bspw. zur Untersuchung von Porenbildung oder Mikropartikeln auf die Drapierung eingesetzt (Pham & Döbrich et al. 2019; Vorobiov & Bischoff et al. 2015; Gereke & Döbrich et al. 2018).

Auf der (nächstgrößeren) mesoskopischen Skala werden Einzelfilamente zu Faserbündeln oder Garnen „verschmiert“. Es wird die Textilarchitektur der Garne, z.B. die Gewebe oder Geflechtstruktur, abgebildet. Häufig werden auf dieser Ebene sogenannte Einheitszellen betrachtet, die beispielsweise bei Geweben aus einer Gewebezelle bestehen (Cherif 2011, S. 603–604; Long 2007). Mit Hilfe mesoskopischer Modelle lassen sich unter anderem Einflüsse von Materialparametern wie der Scher- oder der Biegesteifigkeit auf die Drapierung untersuchen (Boisse & Zouari et al. 2006; Boisse & Hamila et al. 2011). Mit hohem Rechenaufwand lässt sich mit mesoskopischen Modellen auch die Drapierung auf Bauteilebene abbilden, wobei die Modelle eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität zeigen (Gatouillat & Bareggi et al. 2013).

Auf der Makro-Ebene wird das komplette Bauteil betrachtet. Die Eigenschaften von Garnen werden lagenweise zu gekrümmten Schalen oder Membranen homogenisiert. Mehrere Lagen können untereinander oder mit der Umgebung, z.B. Werkzeugen, in Kontakt stehen. Auf dieser Betrachtungsebene wird typischerweise die bauteilspezifische Auslegung des Prozesses betrachtet, da der Simulationsbereich das komplette Bauteil umfasst (Cherif 2011, S. 603–604; Long 2007). In neueren Arbeiten werden für die Modellierung der Drapierung von Verstärkungsfasern häufig die Membran- und die Biegeeigenschaften des Textils entkoppelt betrachtet: Die Membraneigenschaften, also Zug- und Scherverhalten, werden über Membranelemente abgebildet, während die Biegeeigenschaften über Schalenelemente umgesetzt werden (Nishi & Hirashima 2013; Döbrich & Gereke et al. 2014). Durch diesen Ansatz lassen sich geschlossene Simulationketten für die Bauteilauslegung und Prozessoptimierung realisieren und Kontaktmodelle integrieren (Kärger & Galkin et al. 2018; Coutandin & Brandt et al. 2018).

Neben den oben beschriebenen FE-Ansätzen existieren auf makroskopischer Skala ebenfalls kinematische Ansätze zur Abbildung der textilen Verformung. Bei diesen Ansätzen wird das Textil als eine Art Netz über die Bauteilgeometrie gelegt, wobei sich die in Abbildung 2-12 rechts dargestellten Einheitszellen rautenförmig verformen können. Es wird lediglich die Scherung des Textils abgebildet. Aufgrund der kinematischen und damit rein geometrischen Betrachtung werden auftretende Kräfte und Momente nicht betrachtet, sodass bspw. Faltenbildung nicht oder nur eingeschränkt untersucht werden kann. Vorteilhaft sind, verglichen mit FE-Simulationen, extrem kurze Rechenzeiten und eine deutlich einfachere Modellierung. Kinematische Ansätze für die Modellierung von Geweben wurden erstmals von (Mack & Taylor 1956) beschrieben und basieren auf einer gleichschenkligen, vierseitigen Einheitszelle, wobei beispielsweise bei

Gewebe die jeweils gegenüberliegenden Schenkel die Kett- und Schussfäden repräsentieren. Durch die mathematische Beschreibung der Zielgeometrie und unter Berücksichtigung der Annahmen, dass die Fäden in der Einheitszelle näherungsweise gerade verlaufen, undeformbar sind und Ecken als ideale Gelenke fungieren, lässt sich die drapierte Form des Textils analytisch (Mack & Taylor 1956) oder numerisch vorhersagen.

Das Prinzip der kinematischen Simulation beruht darauf, dass – ausgehend von zwei bekannten Punkten A und B (vgl. Abbildung 2-13) – der jeweils nächste Punkt C auf der zu drapierenden Form bestimmt werden kann, da die Streckenlängen AC und BC bekannt sind. (Boisse 2010)

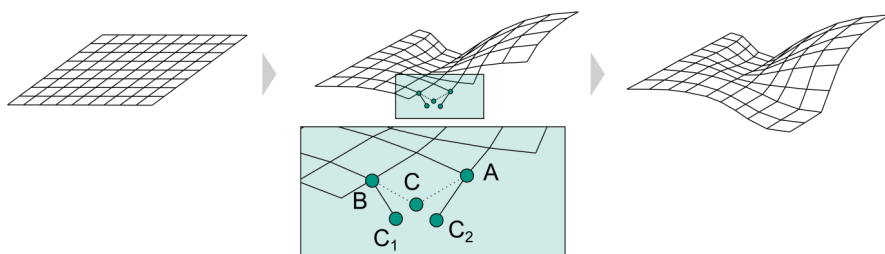


Abbildung 2-13 Vorgehensweise zur Drapiersimulation mit Hilfe kinematischer Ansätze. Eigene Darstellung nach (Boisse 2010)

Kinematische Simulationsansätze sind bei hohlförmigen, insbesondere bei geflochtenen Faserstrukturen, sehr verbreitet. Das Verfahren wird insbesondere verwendet, um den Faserverlauf direkt nach dem Flechtprozess, beispielsweise beim Direktpreforming, vorherzusagen (Schillfahrt & Schledjewski 2017). Die Drapierung von Flechtschläuchen auf gekrümmte Rohrgeometrien wird in (Potluri & Sharma et al. 2001) beschrieben. Die Genauigkeit der Modelle lässt sich weiter erhöhen, indem die Ondulationen des Textils – also die Welligkeit aufgrund der Umlenkungen bei der Überkreuzung von Fasern in einem Gewebe oder Geflecht – in die Berechnung einbezogen werden (Rawal & Gupta et al. 2015).

Es existieren über die vorgestellten Methoden zur Simulation der Drapierung hinaus einige neuere und vielversprechende Ansätze die Drapierung mit Hilfe von Machine-Learning-Modellen vorherzusagen. Aufgrund der aktuell geringen vorhandenen Datenmenge und der damit einhergehenden eingeschränkten Anwendbarkeit wird auf diese

Ansätze jedoch nicht weiter eingegangen. (Zimmerling & Dörr et al. 2019; Brillowski & Zhang et al. 2017; Pfrommer & Zimmerling et al. 2018)

## **2.4 Bewertung des Stands der Forschung und Technik**

Nachdem in den vorangegangenen Unterkapiteln der Stand von Forschung und Technik rund um die Prozesskette zur Herstellung hybrider Faserverbund-Metall-Stäbe und zu Preforming-Verfahren zusammengetragen wurde, soll dieser abschließend bewertet werden.

Hybride Faserverbund-Metall-Stäbe besitzen ein breites Anwendungsfeld. Insbesondere Ansätze zur intrinsischen Hybridisierung sind der extrinsischen Hybridisierung in vielen Aspekten, wie der mechanischen Belastbarkeit der Bauteile, der Schlankheit der Prozesskette sowie der Wirtschaftlichkeit, überlegen (Fleischer 2021). Das Schleuderverfahren zur Herstellung hybrider Faserverbund-Metall-Stäbe zeigt dabei ein großes Potential aufgrund geringer Investitionskosten, niedriger Taktzeiten, einer hohen Flexibilität und einer damit einhergehenden hohen Variantenvielfalt der herstellbaren Bauteile (Koch 2017).

Preforms für das Schleuderverfahren werden zum heutigen Zeitpunkt manuell hergestellt, weswegen das Verfahren aufgrund der eingeschränkten manuellen Drapierbarkeit formschlüssiger Überlappbereiche sein Potential noch nicht voll entfalten kann.

Forschungsarbeiten zum automatisierten Preforming konzentrieren sich aktuell auf schalenförmige Bauteile. Es liegt jedoch nahe, Erkenntnisse aus der Forschung zum Preforming schalenförmiger Bauteile auf die Prozessketten für hohle, stabförmige Bauteile zu übertragen. Dennoch ergeben sich aus der Bauteilkategorie hohler, stabförmiger Bauteile einige Besonderheiten, die Einfluss auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte und das spätere Bauteil haben.

Eine Prozesskette zur Herstellung hybrider, stabförmiger Preforms muss systematisch die Anforderungen aus der nachgelagerten Tränkung im Schleuderverfahren berücksichtigen sowie zu einer maximalen mechanischen Belastbarkeit in der Nutzung des Bauteils befähigen. Eine derartige durchgängige Prozesskette ist im Stand der Forschung und Technik nicht bekannt. Es ist unklar, welche Prozessschritte mit geringem Aufwand vom Preforming schalenförmiger Bauteile übernommen werden können und welche Prozesse weiterentwickelt, modelliert und optimiert werden müssen.

**Fazit:** Für die Herstellung von Preforms hat sich die Binder-Umformtechnik aufgrund der hohen erzielbaren Endkonturgenauigkeit, der Flexibilität im Lagenaufbau und des hohen Automatisierungspotentials als besonders vorteilhaft erwiesen.

Die Prozesskette besteht aus den drei Prozessen Lagenaufbau mit Binderauftrag, Binderaufschmelzung und Drapierung. Für die Herstellung schalenförmiger Bauteile wurden bereits Prozessketten zur Herstellung von Preforms beschrieben.

Eine durchgängige Prozesskette für die automatisierte Herstellung hybrider, hohler Preforms ohne Kern wurde bisher nicht erforscht. Hybride Preforms für die intrinsische Hybridisierung im unter wirtschaftlichen Aspekten vorteilhaften Schleuderverfahren sind aktuell nicht bzw. nicht in ausreichender Qualität herstellbar.

Durch eine solche reproduzierbare Produktion hybrider Preforms wird jedoch ein Sprung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften der damit hergestellten Bauteile und eine Verbesserung der nachfolgenden Prozessschritte, wie beispielsweise der Tränkung im Schleuderverfahren, erwartet.

### 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aufbauend auf dem aus dem Stand der Forschung abgeleiteten Defizit wird in diesem Kapitel die Zielsetzung der Arbeit formuliert sowie die Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung vorgestellt.

#### 3.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die systematische Entwicklung einer Prozesskette für die automatisierte Herstellung hybrider Preforms für stabförmige, im Schleuderverfahren infiltrierbare Bauteile. Es soll einerseits die Gesamtprozesskette konzipiert und analysiert werden, andererseits aber auch ein tiefes Verständnis der Einzelprozesse geschaffen und nachgewiesen werden. Die Prozesskette soll praxisnah erprobt werden, um eine Überführung in eine industrielle Produktion sicherzustellen.

Ausgangsprodukte der betrachteten Prozesskette sind flechttechnisch hergestellte Faserhalbzeuge (Flechtschläuche) sowie metallische Lasteinleitungselemente. Das Zielprodukt ist ein hybrider Preform, welcher aus einem endkonturnahen, mehrlagigen Flechtschlauch-Aufbau besteht, in welchen die metallischen Lasteinleitungselemente innenliegend formschlüssig integriert sind (vgl. Abbildung 3-1).

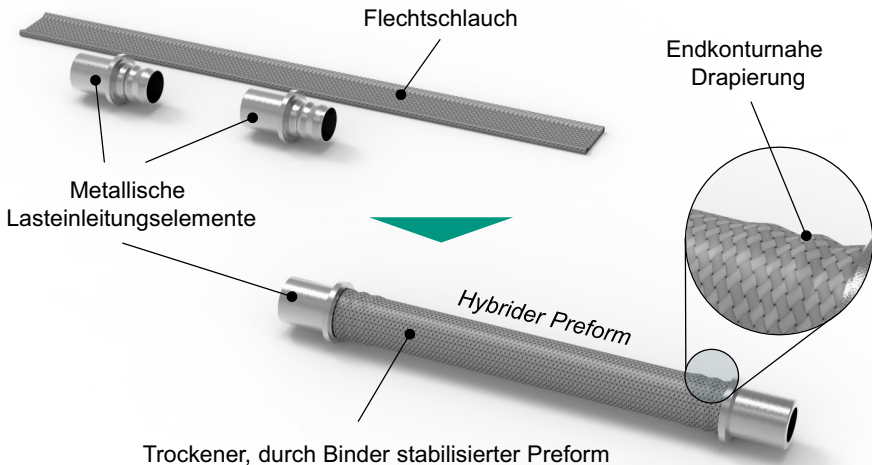


Abbildung 3-1: Zielsetzung der Arbeit: Prozesskette vom Flechtschlauch und Lasteinleitungselementen zum hybriden Preform (3-D-Rendering)

Im Fokus der Arbeit steht die Prozesskette von den Ausgangsprodukten (Flechtschläuche, Lasteinleitungselemente) bis zum Zielprodukt (Hybrider Preform), sodass vor- und nachgelagerte Prozessschritte – abgesehen von den Anforderungen, die sich aus diesen für die oben beschriebene Prozesskette ergeben – nicht betrachtet werden.

Die betrachtete Prozesskette soll größtmögliche Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit auf andere Bauteil- und Überlappgeometrien besitzen.

Weiterhin sind die Ausgestaltung und der Aufbau einer vollautomatisierten Prozesskette nicht Ziel dieser Arbeit – Im Rahmen dieser Arbeit soll der wissenschaftlich relevante Teil erforscht und prototypisch umgesetzt werden, sodass anschließend bspw. ein Systemintegrator eine automatisierte Anlage auslegen kann.

### 3.2 Vorgehensweise

Zum Erreichen der Zielsetzung wird die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise gewählt (vgl. Abbildung 3-2). Sie leitet sich ab aus gängigen Methoden zur Produktentstehung (Bender & Gericke 2021; VDI 2221-12019-11-00; VDI 2222-12019-11-00) sowie Methoden zur Planung von Montage- und Handhabungsanlagen (Lotter & Wiendahl 2012; Hesse & Malisa 2020; VDI 28601990-05-00; REFA 2015).

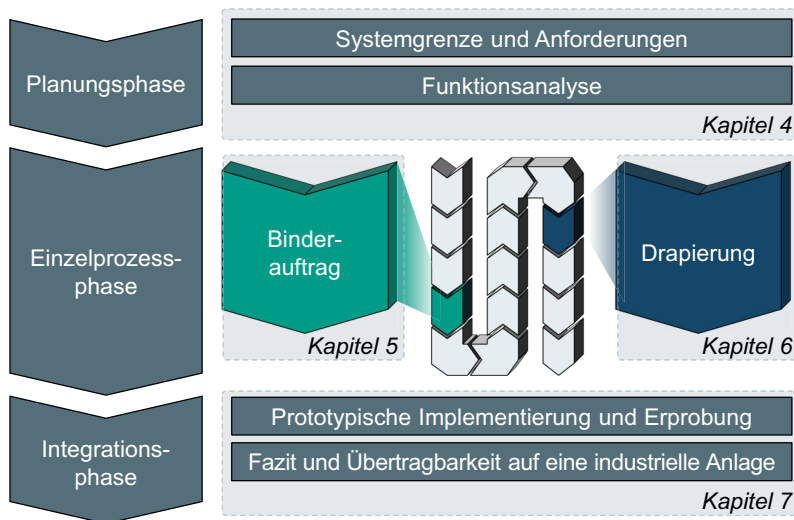


Abbildung 3-2: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung

Die Vorgehensweise gliedert sich in die drei übergeordneten Phasen *Planungsphase*, *Einzelprozessphase* und *Integrationsphase*.

In der Planungsphase (Kapitel 4) wird die Gesamtprozesskette konzipiert und analysiert. Dazu werden in einem ersten Schritt Systemgrenzen abgesteckt sowie Anforderungen an die Prozesskette zusammengetragen und analysiert. Aufbauend auf den Anforderungen wird die Prozesskette konzipiert, indem notwendige Funktionen aufgestellt und logisch miteinander verknüpft werden. Die so identifizierten Einzelfunktionen werden anschließend hinsichtlich der enthaltenen Fertigungsprozesse analysiert. Es wird dabei insbesondere der Stand der Forschung und Technik für jeden Prozessschritt berücksichtigt und herausgearbeitet, welche der Prozessschritte im Stand der Forschung und Technik noch nicht untersucht wurden und daher im Fokus der sich anschließenden Einzelprozessphase liegen.

In der Einzelprozessphase werden die Prozessschritte Binderauftrag (Kapitel 5) und Hybridisierung (Kapitel 6) näher betrachtet. Innerhalb beider Einzelprozesse wird zuerst systematisch ein Anlagenkonzept für die Prozesse entwickelt. Aufbauend auf den Anlagenkonzepten wird jeweils modellbasiert ein Prozessverständnis geschaffen, um die Prozesse auslegen zu können. Für den Prozessschritt Binderauftrag wird die genaue Gestaltung der Austragsdüse modelliert, sodass eine ideale Düsenform ausgewählt werden kann. Für den Prozessschritt Hybridisierung wird die Drapierung kinematisch modelliert, um die notwendigen Vorschubparameter für die Anlage zu ermitteln.

Mit dem Verständnis aller Einzelprozesse startet die Integrationsphase (Kapitel 7). In der Integrationsphase werden die Einzelprozesse prototypisch aufgebaut, sodass eine durchgängige Prozesskette entsteht. Für die Bauteilqualität unerhebliche Prozessschritte (wie beispielsweise einige Handhabungsvorgänge) werden hier im Gegensatz zu einer automatisierten Anlage manuell ausgeführt. Den Abschluss der Vorgehensweise bildet die praxisnahe Erprobung der Prozesskette anhand einer realen Bauteilgeometrie, um den Ansatz zu validieren sowie die Erfüllung der gesteckten Anforderungen zu überprüfen.



## 4 Planungsphase

Die Planungsphase stellt die erste von drei Phasen in dieser Arbeit dar und wird in diesem Kapitel beschrieben. Die Einordnung der Planungsphase innerhalb der gesamten Vorgehensweise sowie die Unterkapitel sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

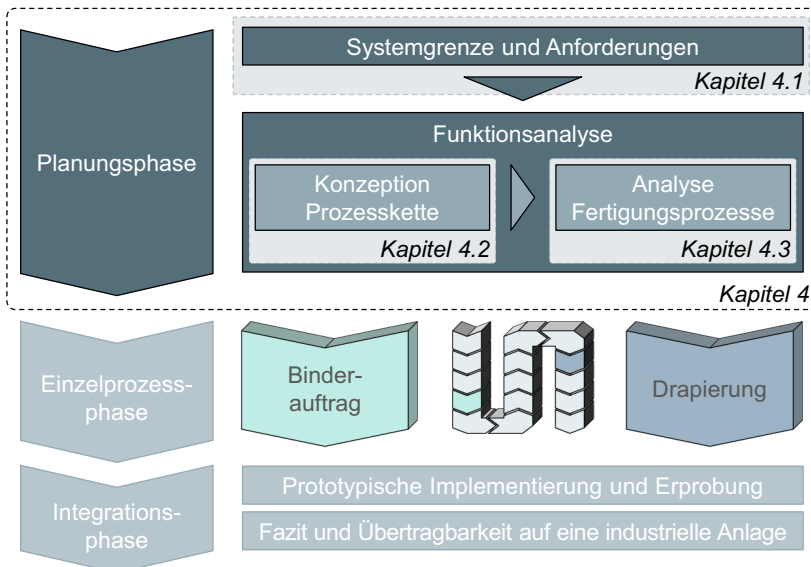


Abbildung 4-1: Einordnung der Planungsphase innerhalb der übergeordneten Vorgehensweise

In der Planungsphase werden im ersten Teil die betrachtete Prozesskette eingegrenzt sowie Randbedingungen definiert. Weiterhin werden systematisch Anforderungen an die Prozesskette zusammengetragen und analysiert (Kapitel 4.1). Anschließend startet die Funktionsanalyse. In dieser wird zuerst die Prozesskette in ihrer Gesamtheit konzipiert (Kapitel 4.2), bevor die einzelnen Fertigungsprozesse innerhalb der Prozesskette analysiert werden (Kapitel 4.3).

## 4.1 Systemgrenze und Anforderungen

Zur Eingrenzung des Betrachtungsraumes für diese Arbeit wird zuerst eine Systemgrenze für die Prozesskette gezogen. In der Zielsetzung dieser Arbeit (Kapitel 3.1) wurden bereits erste Eingrenzungen vorgenommen, auf denen nachfolgend aufgebaut wird.

Da die Prozesskette größtmögliche Allgemeingültigkeit besitzen soll, wird die strukturelle Auslegung und Optimierung der Bauteile nicht betrachtet. Vielmehr sollen die definierten geometrischen Anforderungsbereiche möglichst alle denkbaren Geometrien abdecken. Da im Rahmen dieser Arbeit lediglich eine prototypische Umsetzung der Prozesskette erfolgt, werden sonst gängige Anforderungen hinsichtlich Robustheit der Steuerungsarchitektur, Energieverbrauch der Anlage, Ergonomie und Design/Ästhetik nicht betrachtet. Auch wenn sich die betrachteten Prozesse sowie die Prozesskette auf weitere Infiltrationsverfahren übertragen lassen, liegt der Fokus in dieser Arbeit auf einer nachfolgenden Infiltration, Konsolidierung und Aushärtung im Schleuderverfahren.

Die Anforderungen an die übergeordnete Prozesskette resultieren einerseits aus den betrachteten Ein- und Ausgangsprodukten, andererseits aus dem Prozess selbst sowie aus vor- und nachgelagerten Fertigungsprozessen.

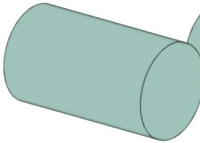
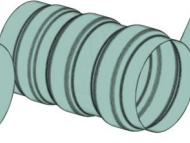
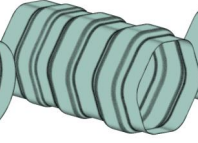
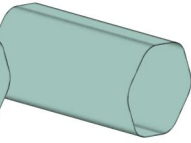
### Produktbezogene Anforderungen

Eingangsstoffe für die Prozesskette stellen Flechtschläuche und metallische Lasteinleitungselemente dar. Je nach Anwendungsfall und Stückzahl kommen unterschiedliche Flechtschlauchtypen in Betracht. Es sollen sowohl glasfaser- als auch kohlenstofffaserbasierte Flechtschläuche mit industriell verbreiteten Rovingstärken von 1K bis 24K verarbeitet werden können. Flechtschläuche liegen zu Beginn des Prozesses aufgerollt auf Spulen vor.

Die metallischen Lasteinleitungselemente können ebenfalls je nach Lastfall in unterschiedlichen Geometrien eingesetzt werden. Üblich sind rein zylindrische Überlappgeometrien oder formschlüssige Geometrien für verschiedene Lastfälle (Nieschlag & Coutandin et al. 2020). In Tabelle 4-1 ist das Spektrum der möglichen Überlappbereiche für verschiedene Lastfälle dargestellt. Es ist jeweils die Form des (theoretisch unendlich dünnen) Interfaces zwischen beiden Komponenten abgebildet. Für die Hybridisierung stellt die Form B die größte Herausforderung dar, daher wird diese im weiteren Verlauf

der Arbeit besonders betrachtet. Es soll jedoch bei allen nachfolgenden Entwicklungsschritten sichergestellt sein, dass sämtliche Geometrien abbildbar sind. Es werden Längen des Überlappbereichs  $L_{\bar{U}}$  von 20 mm bis 70 mm und Durchmesser  $D_{\bar{U}}$  von 25 mm bis 100 mm betrachtet, wodurch das im Schleuderverfahren herstellbare Bauteilspektrum abgedeckt wird. In (Nieschlag & Coutandin et al. 2020) wird für einen zylindrischen Überlappbereich mit  $L_{\bar{U}} = 37$  mm und  $D_{\bar{U}} = 40$  mm eine Verbindungsfestigkeit von 34 MPa erreicht. Unter der (theoretischen) Annahme einer gleichbleibenden Verbindungsfestigkeit lässt sich für den oben eingeführten Größenbereich somit bei den kleinsten Dimensionen ( $L_{\bar{U}} = 20$  mm,  $D_{\bar{U}} = 25$  mm) eine maximale Axialkraft von etwa 50 kN bzw. ein maximales Drehmoment von etwa 650 Nm übertragen. Bei den größten Dimensionen ( $L_{\bar{U}} = 70$  mm,  $D_{\bar{U}} = 100$  mm) beträgt die maximale übertragbare Axialkraft etwa 750 kN und das maximale Drehmoment etwa 37 kNm.

Tabelle 4-1: Mögliche Überlappgeometrien

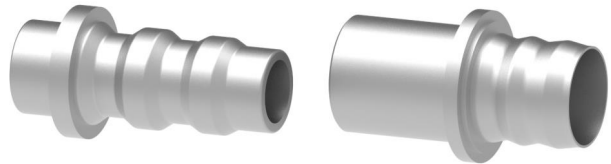
	Form A	Form B	Form C	Form D
Skizze des Interfaces				
Merkmale	Zylindrisch	Zylindrisch hinterschnittig	Polygonal	Polygonal hinterschnittig
Lastfälle	Zug, Druck, Torsion	Zug, Druck, Energieabsorption (Crash)	Torsion	Kombinierte Lastfälle

Für die Erprobung wird eine sogenannte „Schikanengeometrie“ entwickelt, welche sich in ihrer Form an einer realen Bauteilgeometrie orientiert, jedoch besonders steile Flankenwinkel, tiefe Hinterschnitte und enge Radien besitzt und somit den für die Drapierung komplexestmöglich anzunehmenden Fall darstellt (vgl. Tabelle 4-2). Nachfolgend betrachtete Prozesse werden am Beispiel der Schikanengeometrie entwickelt, jedoch wird nicht erwartet, dass anhand der Schikanengeometrie eine endkonturnahe Drapierung möglich ist. Für die Validierung der Prozesskette wird daher eine „Bauteilgeometrie“ herangezogen, welche auf der numerisch für eine maximale mechanische Belastbarkeit hin optimierten Geometrie aus (Nieschlag & Coutandin et al. 2020) basiert.

Durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Geometrien wird außerdem sichergestellt, dass die entwickelten Modelle und Prozesse auch außerhalb der Schikanegeometrie ihre Gültigkeit besitzen.

Für eine maximale Bauteilqualität ist entscheidend, dass die Flechtschläuche faltenfrei und endkonturnah (Brabandt 2018) auf die Lasteinleitungselemente drapiert werden. Ausgehend von einer sich anschließenden kavitätsgebundenen Infiltration (Preform liegt in einer definierten Kavität) wird in Anlehnung an (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 99) eine maximale Formabweichung des textilen Preforms von 1 mm zugelassen.

*Tabelle 4-2: Einführung der Schikane- und der Bauteilgeometrie mit den wichtigsten Geometriekeyngrößen*



	„Schikanegeometrie“	„Bauteilgeometrie“
Durchmesser Laminat im LÜE	30 mm	40 mm
Länge Überlappbereich	78 mm	41 mm
Flankenwinkel	33° - 46°	10° - 16°
Übergangsradien	2mm	3,5mm (außen) 6,5mm (innen)

Um den hybriden Preform automatisiert weiterverarbeiten zu können, müssen die Lagen mit einem Binder gegeneinander fixiert werden. In (Dickert 2015, S. 225) und (Cherif 2013) wurde das industriell verfügbare und verbreitete Binderpulver Epikote 05390 als vielversprechend herausgearbeitet und soll daher auch für diese Arbeit verwendet werden. Zum Nachweis der Biegesteifigkeit für das automatisierte Handling soll die maximale Durchbiegung des Preforms unter Eigengewicht 1 mm betragen (Neitzel & Mitschang et al. 2014, S. 99). Um eine spätere Infiltrierbarkeit im Schleuderverfahren sicherzustellen, soll der mittlere Bindergehalt bei 2 ma.-% liegen. Weiterhin soll das Binderpulver möglichst homogen zwischen den Lagen des Preforms verteilt werden,

um eine größtmögliche Permeabilität bei der Infiltration sicherzustellen und Binderanhäufungen und damit Schwachstellen aufgrund ungenügender Infiltration zu vermeiden (Dickert 2015, S. 159).

### **Prozessbezogene Anforderungen**

Das sich an die Hybridisierung anschließende Schleuderverfahren zur Infiltration, Konsolidierung und Aushärtung der Bauteile ist ein Verfahren mit hohem Automatisierungspotential, erreichbaren Taktzeiten von unter 10 min und aufgrund der werkzeuggebundenen Fertigung mittleren Flexibilität. Die zu entwickelnde Prozesskette zur Produktion hybrider Preforms soll daher möglichst ähnliche Automatisierungsgrade und Taktzeiten ermöglichen sowie eine mit dem Schleuderverfahren vergleichbare Flexibilität aufweisen.

Da das Harz bei der späteren Infiltration im Schleuderverfahren von innen in die Werkzeugkavität gegossen wird (vgl. Abbildung 2-6), ist die Verwendung von im Bauteil verbleibenden Kernen (wie bspw. Schaumkerne) ausgeschlossen. Unter anderem aus Kostengründen soll weiterhin auf die Verwendung von verlorenen Kernen (wie bspw. Sandkerne), welche vor der Infiltration entfernt werden könnten, verzichtet werden.

Auch wenn notwendige Investitionskosten für die Anlage sowie Kosten zum Betrieb aufgrund des hier betrachteten Prototypenstatus nicht dediziert beleuchtet werden, sollen diese möglichst niedrig sein. Dies wird erreicht, indem die Komplexität der Prozesse und die aufgrund von Prozessparametern an die Anlage gestellten Anforderungen möglichst gering gehalten werden.

Die zu entwickelnden Prozesse sollen außerdem eine hohe Wiederholgenauigkeit aufweisen. Weiterhin wird ein geringer Ressourcenverbrauch angestrebt, was insbesondere durch einen geringen Verschnitt bei den Flechtschläuchen sowie eine Vermeidung von Hilfsstoffen bzw. Verbrauchsmaterialien erreicht werden kann.

## **4.2 Konzeption Prozesskette**

Basierend auf den oben definierten Anforderungen wird nachfolgend eine durchgängige Prozesskette konzipiert. Für die Konzepterstellung wird die Funktionsanalyse für Handhabungsaufgaben nach der VDI 2860 herangezogen (VDI 2860:1990-05-00). Die Funktionsanalyse ist ein bewährtes Tool zur Konzeption automatisierter Produktionsanlagen und wird durch eine symbolische Abbildung der Handhabungsvorgänge innerhalb der Prozesskette dargestellt.

Da aus Kostengründen (vgl. Kapitel 4.1) auf die Verwendung von verlorenen Kernen beim Preforming verzichtet werden soll, muss für die Herstellung eines hybriden Preforms zwingend vorab aus dem Flechtschlauch ein Zwischenprodukt hergestellt werden: Der sogenannte *monolithische* Preform (vgl. Abbildung 4-2) ist hohl und wird aus dem Flechtschlauch hergestellt. Er ist durch einen Binder so stabilisiert, dass er durch die Handhabung und durch sein Eigengewicht nicht kollabiert. In diesen werden anschließend die metallischen Lasteinleitungselemente eingeführt und der Preform entlang der Form dieser drapiert, sodass der hybride Preform entsteht.

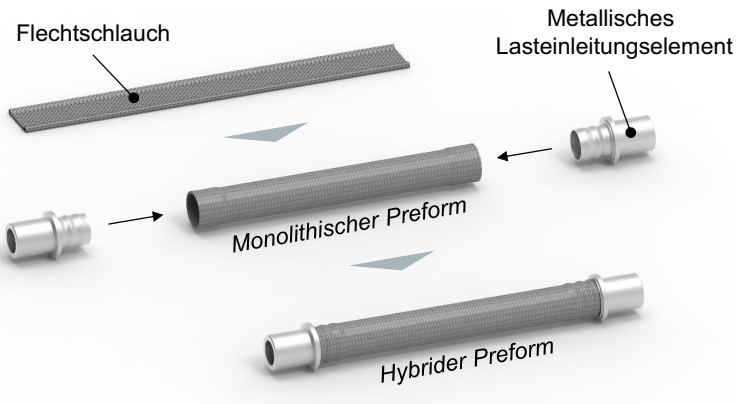


Abbildung 4-2: Einführung des monolithischen Preforms als notwendigen Zwischenschritt für eine Prozesskette ohne verlorenen Kern

In Abbildung 4-3 ist das Ergebnis der Funktionsanalyse dargestellt. Dieses ergibt sich aus der Logik der oben eingeführten Zwischenschritte. Die Prozesskette besteht aus 18 Einzelschritten sowie zwei Hauptpfaden, welche im Schritt (o) zu einem gemeinsamen Pfad zusammengeführt werden. Der erste Hauptpfad betrifft die Herstellung des textilen Preforms (beginnend bei Buchstabe (a)). Der zweite Pfad betrifft die Bereitstellung der metallischen Lasteinleitungselemente (beginnend bei (k)). Der entstehende hybride Preform kann aus einer beliebigen Lagenanzahl  $n_L$  aus Flechtschläuchen bestehen. Da der Preform iterativ aus Flechtschläuchen aufgebaut wird, sind im Funktionsplan Wiederholungen in Abhängigkeit der Flechtschlauchanzahl enthalten.

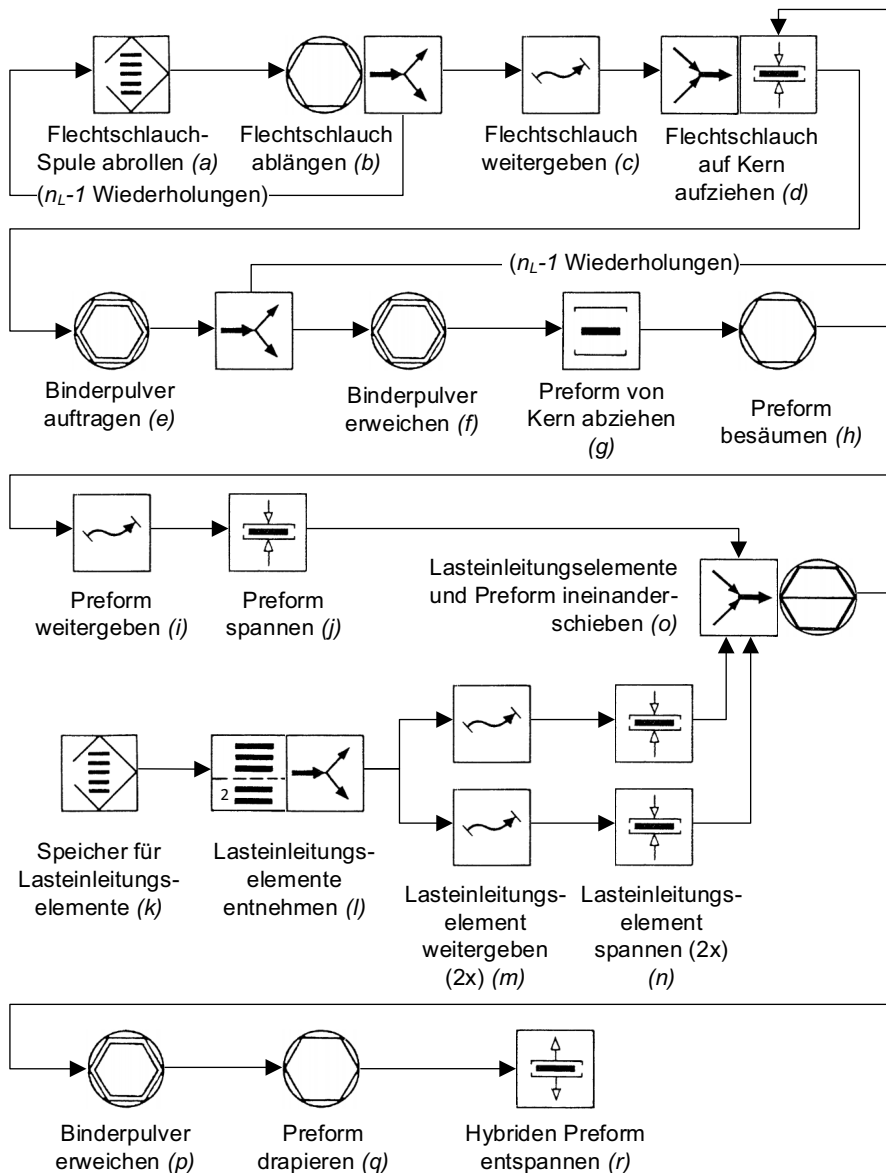


Abbildung 4-3: Funktionsplan zur Herstellung eines hybriden Preforms

Der erste Hauptpfad beginnt mit dem auf Spulen aufgerollt vorliegenden Flechtschlauch (a). Der Flechtschlauch wird im nächsten Schritt von der Spule abgezogen und auf die Länge des Preforms zugeschnitten (b). Diese Vorgehensweise wird für jede Lage des Flechtschlauchs wiederholt. Die vorliegenden, forminstabilen Flechtschlauchstücke werden anschließend weitergegeben (c) und auf einen Kern, welcher die Form des späteren Preforms vorgibt, aufgezogen (d).

Anschließend wird Binderpulver auf den Flechtschlauch aufgetragen (e). Auf das aufgetragene Binderpulver wird das nächste Flechtschlauchstück aufgezogen. Dieser Vorgang wird ebenfalls für jede Lage wiederholt. Auf die äußerste Lage wird jedoch kein Binderpulver aufgetragen.

Der Lagenaufbau mit Binderpulver wird anschließend erhitzt, um das Binderpulver zu erweichen, sodass nach dem Abkühlen die Lagen durch den Binder fixiert sind (f). Der Preform besitzt nun eine ausreichende Steifigkeit, um sein Eigengewicht zu tragen, und kann vom Kern abgezogen werden (g). Da die Schnittkanten des Flechtschlauchs aufgrund der Instabilität häufig unsauber sind, werden die Enden des nun stabilisierten Preforms besäumt, sodass eine gerade Schnittkante mit definiertem Faserverlauf entsteht (h). Der so entstandene, rein textile Preform wird wie oben beschrieben als monolithischer Preform bezeichnet. Dieser wird nach dem Besäumen weitergegeben (i) und in einer definierten Position gespannt (j).

Da die Fertigung der metallischen Lasteinleitungselemente im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wird, ist der parallel verlaufende zweite Hauptpfad deutlich kürzer. Er beginnt mit der geordneten Bereitstellung der Lasteinleitungselemente in einem Speicher (k). Es werden zwei Lasteinleitungselemente entnommen (l). Da beide Lasteinleitungselemente an den gegenüberliegenden Seiten des Preforms integriert werden, teilt sich der Pfad für die beiden Elemente anschließend auf, sodass jedes Element separat weitergegeben (m) und analog zum Preform ebenfalls in einer definierten Position gespannt wird (n).

Mit dem Schritt (o) werden die beiden Hauptpfade für den Preform und die Lasteinleitungselemente verbunden, indem die Lasteinleitungselemente und der monolithische Preform ineinandergeschoben werden. Anschließend wird erneut das Binderpulver in den Überlappbereichen aufgeschmolzen (p), sodass der Preform seine Stabilität verliert. Es folgt die Drapierung des Preforms auf die spätere Bauteilgeometrie (q), in wel-



cher das Binderpulver erkaltet, sodass die Lagen wieder formstabil miteinander verbunden sind. Im letzten Schritt wird der entstandene hybride Preform entspannt ( $r$ ) und kann weiterverarbeitet werden.

### 4.3 Analyse Fertigungsprozesse

Nachdem im vorangegangenen Kapitel eine durchgängige Prozesskette für die Herstellung hybrider Preforms mittels einer Funktionsanalyse aufgestellt wurde, werden die identifizierten Einzel-Fertigungsprozesse der Prozesskette in diesem Kapitel genauer analysiert. Dafür wird insbesondere nochmals auf den Stand der Forschung und Technik in den Prozessen eingegangen. Für jeden Fertigungsprozess wird herausgearbeitet, ob dieser in der nächsten Phase der Vorgehensweise – der Einzelprozessphase – tiefer betrachtet werden muss oder ob dieser wissenschaftlich verstanden ist und somit für die Integrationsphase bei entsprechender Eignung direkt verwendet werden kann.

**Flechtschläuche** werden von Lieferanten üblicherweise in Form von Spulen bereitgestellt (a). Die Spulen bestehen in der Regel aus Pappe für Einweg-Systeme oder aus Kunststoff bei einer Rückführung der Rolle zum Lieferanten. Es werden Flechtschlauchlängen von bis zu mehreren Hundert Metern auf einzelnen Spulen ausgeliefert, sodass diese je nach Größe des Bauteils und Lagenaufbau für mehrere Hundert Bauteile ausreichen. Ein regelmäßiger Spulenwechsel muss also vorgesehen werden. Wissenschaftlich stellt der Schritt (a) jedoch keine Herausforderung dar, da ein automatisiertes Spulenlager bzw. ein Spulenwechsel in anderen Branchen (z.B. Kabelindustrie) den Stand der Technik darstellt. Das gesteuerte Abrollen von Flechtschläuchen wurde in (Liebsch & Kupfer et al. 2017) mit Förderbändern erfolgreich gezeigt.

Das Ablängen bzw. Besäumen von Textilien ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten und wurde in Kapitel 2.3.3 bereits ausführlich beschrieben. Ebenfalls sind zahlreiche kommerzielle Systeme zum Schneiden von Verstärkungsfasern vorhanden. Innerhalb der betrachteten Prozesskette werden im Schritt (b) **forminstabile Flechtschläuche geschnitten** und in Schritt (h) der **formstabile monolithische Preform besäumt**. In (Liebsch & Kupfer et al. 2017) wurde gezeigt, dass Flechtschläuche mit elektrischen Scheren sehr gut geschnitten werden können – für den formstabilen Preform empfiehlt (Cherif 2016, S. 392–394) die Verwendung von Ultraschallschneidern. Die Prozesse zum Ablängen bzw. Besäumen gelten damit für die weitere Vorgehensweise als erforscht und werden nicht näher untersucht.

In den Schritten (c), (d), (g), (i) und (j) wird jeweils der **Flechtschlauch gehandhabt**. In den Schritten (c) und (d) liegt der Flechtschlauch unstabilisiert, d.h. ohne Fixierung durch Binder, vor. In den Schritten (g) und (i) wird jeweils der durch Binder stabilisierte Preform gehandhabt, während der Preform in Schritt (j) gespannt wird. In (Seliger & Szimmat et al. 2003), (Straßer 2012) und (Ehinger 2013) wurden Greiflösungen für flächige textile Verstärkungshalbzeuge vorgestellt, deren Anwendung auf die hier vorliegenden zylindrischen Flechtschläuche mit geringem Aufwand adaptiert werden können. In (Liebsch & Kupfer et al. 2017) wurde bereits eine Handhabung von Flechtschläuchen mit Nadelgreifern vorgestellt, wobei festgehalten werden muss, dass Nadelgreifer aufgrund der möglichen Verletzung der Faserstruktur in hochbeanspruchten Anwendungen häufig nicht zulässig sind (Böger 1998, S. 12–13; Straßer 2012, S. 83).

Nach dem Aufziehen der Flechtschlauchlagen auf den Kern (d) wird das **Binderpulver aufgetragen** (e). Die Auswirkungen von Binderpulver auf nachfolgende Prozesse wie Handhabung und Infiltration wurden bereits weitgehend untersucht (vgl. Kapitel 2.3.5.1). Hervorzuheben sei an dieser Stelle die Dissertation von (Dickert 2015). Ebenfalls existieren Ansätze zur Applikation verschiedener Binderarten auf textile Halbzeuge (Fuerst 2011; Mack & Mitschang 2015; Meyer 2008). Mit der Entwicklung kontinuierlich arbeitender Verfahren wurden ebenfalls Möglichkeiten zur Herstellung endloser, profilförmiger Halbzeuge mit Binderanteil vorgestellt, welche sich jedoch nicht für geschlossene Profile eignen (Grieser & Mitschang 2014; Grieser 2016; Neumann 2017; Purol 2011; Reinhold & Mehlenhoff 2011). Weiterhin lässt sich dieses Verfahren nicht auf Flechtschläuche übertragen, da der Binder auf die einzelnen Rovings aufgetragen wird, was im Flechtprozess nicht ohne weiteres möglich ist. Eine ganzheitlich entwickelte Methode zur Bebinderung von zylindrischen Flecht-Preforms existiert aktuell nicht. Da der Binderauftragsprozess jedoch maßgeblichen Einfluss auf die späteren Prozesse sowie die Bauteilqualität und -belastbarkeit hat (Dickert 2015), soll dieser in der Einzelprozessphase gesondert betrachtet werden (vgl. Kapitel 5).

Zur Herstellung eines monolithischen Preforms wird das **Binderpulver aufgeschmolzen** (f), sodass die benachbarten Lagen nach dem Abkühlen verklebt und somit gegeneinander fixiert werden. Im Prozessschritt (p) wird das Binderpulver nochmals aufgeschmolzen, damit der Preform im nachfolgenden Schritt umgeformt werden kann. Für das verwendete Binderpulver Epikote 05390 muss dieses laut Herstellerangaben auf 80°C bis 120°C erwärmt werden. In (Dickert 2015) wurde gezeigt, dass der Binder je

nach Dauer der Temperatureinwirkung durch Diffusionsprozesse aus dem Bereich zwischen den Lagen in die Lagen selbst diffundiert. In (Coutandin 2020, S. 100–110) wurde dieser Tränkungsprozess anhand des Gesetzes von D’Arcy analytisch beschrieben und ideale Aktivierungsdauern abgeleitet. Für die Erwärmung von trockenen Verstärkungsfasern kommen prozessseitig verschiedene Methoden in Frage, wobei sich im Stand der Technik die Nutzung von Infrarot-Strahlern etabliert hat. Für die Wärmeleitung in flächigen Verstärkungstextilien existieren ebenfalls analytische und numerische Modelle, die auf das vorliegende zylindrische Problem übertragen werden können (Coutandin 2020, S. 65–79). Die Prozessauswahl sowie Bestimmung der optimalen Aktivierungszeit und -temperatur ist somit wissenschaftlich erforscht und muss lediglich in der Integrationsphase auf den zylindrischen Preform adaptiert werden.

Im Schritt (k) werden die **Lasteinleitungselemente bereitgestellt**. Die Bereitstellung erfolgt in einem Speicher, aus welchem diese entnommen werden können. Für derartige Speicher existiert eine Vielzahl von standardisierten Lösungen in der Industrie, die häufig noch auf die spezielle Geometrie des Werkstücks angepasst werden können.

In den Prozessschritten (l), (m) und (r) muss jeweils das metallische **Lasteinleitungselement gehandhabt** werden – In Schritt (n) wird dieses **gespannt**. Für die Handhabung von zylindrischen, formstabilen Bauteilen eignen sich besonders Zwei- oder Dreifingergreifer, da durch eine entsprechende Gestaltung der Finger eine Zentrierung einfach ermöglicht wird. Alternativ sind Dreibackenfutter aus dem Bereich von Drehmaschinen ebenfalls etablierte Spannmittel. Sowohl Greifer als auch Backenfutter sind industriell verfügbar und etabliert und müssen daher nicht weiter untersucht werden.

Nachdem der monolithische Preform (j) sowie beide Lasteinleitungselemente (n) gespannt sind, werden letztere in den Preform **geschoben** (o). Dabei handelt es sich nach (DIN 8593-12003-09-00) um ein Fügeverfahren der Untergruppe Zusammensetzen mit der Ordnungsnummer 4.1.3 („Ineinanderschieben“). Es zeichnet sich durch eine definierte, lineare Relativbewegung aus, welche mit einer Vorschubachse umgesetzt werden kann. Der Prozessschritt des Fügens stellt somit keine wissenschaftliche Herausforderung dar.

Nachdem die Lasteinleitungselemente in den Preform gefügt wurden (o) und das Binderpulver aufgeschmolzen wurde (p), wird der **Preform drapiert** (q). Insbesondere für die Formen B und D (vgl. Tabelle 4-1) muss dabei eine hinterschnittige Geometrie ab-

geformt werden, die zu (mehreren) Querschnittsverjüngungen des Preforms führt. Aufgrund der geflochtenen Faserarchitektur und der damit einhergehenden Kinematik der Flechtschläuche führt eine Querschnittsveränderung zwangsläufig zu einer lokalen Längenänderung, welche durch einen geeigneten Materialfluss innerhalb des Prozesses ausgeglichen werden muss. Für flächige Halbzeuge, insbesondere für die kinematisch vergleichbaren Gewebe, existiert eine Vielzahl von Werkzeugen zur Drapierung. Es existieren ebenfalls analytische und numerische Simulationsansätze, um die Drapierung vorherzusagen (vgl. Kapitel 2.3.7.2). Es ist jedoch unklar, ob und wie das vorhandene technologische und modellbasierte Wissen für die Drapierung flächiger Halbzeuge auf Flechtpreforms übertragen werden kann oder ob dafür neue Prozessmodelle für die Beschreibung der Drapierung und Ableitung von Prozessparametern notwendig sind. Der Prozessschritt Drapierung wird daher in der Einzelprozessphase in Kapitel 6 genauer untersucht.

**Fazit:** In diesem Kapitel wurden Anforderungen an eine Prozesskette zur Herstellung hybrider Preforms analysiert sowie eine ganzheitliche Prozesskette konzipiert. Die Analyse der Einzelprozesse hat ergeben, dass in den Prozessschritten des Binderauftrag und Drapierung erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Zwar existieren erste Ansätze für den pulverförmigen Binderauftrag, jedoch lassen sich diese nicht auf die sequentielle Herstellung von Flechtpreforms übertragen. Es ist daher ein neuer Ansatz zum Binderauftrag und ein Prozessverständnis für die Auslegung eines Anlagenmoduls notwendig.

Für die Drapierung stabförmiger Preforms in eine hinterschnittige Geometrie der Lasteinleitungselemente existieren aktuell keine Ansätze für Anlagenmodule. Auch eine Prozessmodellierung der Drapierung ist für stabförmige Preforms unbekannt.

Die Prozesse Binderauftrag und Drapierung werden daher gesondert in der nachfolgend beschriebenen Einzelprozessphase untersucht.

Die restlichen in Kapitel 4.2 und 4.3 vorgestellten Prozesse sind forschungsseitig verstanden oder können aus dem schalenförmigen Preforming mit reinem Engineering-Aufwand auf stabförmige Preforms übertragen werden. Sie werden daher in der Einzelprozessphase nicht untersucht sondern lediglich in der Integrationsphase (Kapitel 7) in die Gesamtprozesskette implementiert und erprobt.

## 5 Einzelprozess: Binderauftrag

Nachdem in Kapitel 4 in der Planungsphase eine Gesamtprozesskette entwickelt wurde, wird in diesem Kapitel im Rahmen der Einzelprozessphase der Prozessschritt des Binderauftrags näher betrachtet (vgl. Abbildung 5-1).

Um den Binderauftrag zu untersuchen und hinsichtlich der in Kapitel 4.1 gesteckten Anforderungen zu optimieren, wird im ersten Schritt ein Anlagenmodul zum Binderauftrag konzipiert, entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen (Kapitel 5.1). Die entwickelte Binderauftragsdüse wird anschließend hinsichtlich des ausgetragenen Streubilds modelliert und optimiert (Kapitel 5.2).

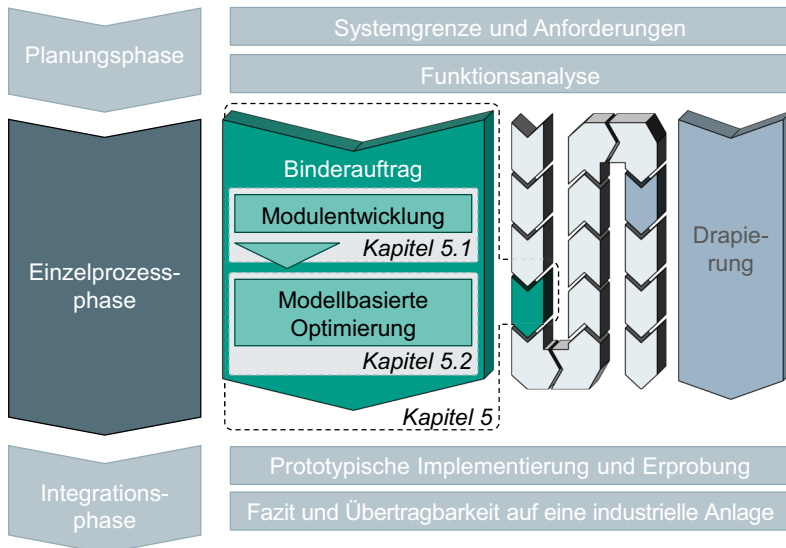


Abbildung 5-1: Einordnung der Prozessschrittentwicklung zum Binderauftrag innerhalb der übergeordneten Vorgehensweise

### 5.1 Modulentwicklung

Das Ziel des Moduls *Binderauftrag* ist der Auftrag eines wiederaufschmelzbaren Binderpulvers auf die Flechtschläuche. Die Entwicklung des Moduls orientiert sich dabei an der Vorgehensweise der VDI 2221-1 (VDI 2221-12019-11-00). Ausgehend von den Anforderungen an die Gesamtprozesskette werden Anforderungen an den Binderauf-

trag zusammengetragen und analysiert (Kap. 5.1.1). In der anschließenden Konzeptionierung werden die Hauptfunktionen des Moduls identifiziert und Lösungsprinzipien erarbeitet (Kap. 5.1.2). Nach der Auswahl einer Lösung wird der Systementwurf vorgestellt (Kap. 5.1.3) und der Binderauftrag beschrieben (Kap. 5.1.4). Schließlich werden die wichtigsten Maschinenparameter hinsichtlich eines maximalen Binderaustrags bei größtmöglicher Wiederholgenauigkeit experimentell optimiert (Kap. 5.1.5).

### 5.1.1 Anforderungsanalyse

Basierend auf den Anforderungen an die Gesamtanlage und den hybriden Preform werden nachfolgend Anforderungen an den Binderauftrag abgeleitet.

(Dickert 2015) erarbeitet, dass ein Binderanteil von 2% bezogen auf die Masse des Preforms optimale Ergebnisse hinsichtlich der Steifigkeit des Preforms, späterer Infiltrierbarkeit sowie der Bauteilperformance ergibt. Das Binderpulver wird zwischen alle Flechtschlauchlagen aufgetragen. Je nach Flächengewicht bzw. Filamentstärke der Flechtschläuche (1K bis 24K) ergibt sich somit ein unterschiedliches Binderflächengewicht<sup>5</sup>. Da der Binderauftrag für sämtliche Textilien anwendbar sein soll, muss das aufgetragene Binderflächengewicht folglich flexibel einstellbar sein.

Als Binderpulver wird das Pulver Epikote 05390 gewählt, da es den besten Kompromiss aus späterer Infiltrierbarkeit, Verarbeitbarkeit beim Auftrag und Kompatibilität zu gängigen Epoxidharz-Matrixsystemen darstellt (Dickert 2015; Cherif 2013).

Für die Infiltrierbarkeit der Fasern ist neben einem definierten, globalen mittleren Binderflächengewicht auch die lokale Bindermenge entscheidend. Lokale Schwankungen der Bindermenge führen zu lokalen Binderanhäufungen und erschweren somit an diesen Stellen die Infiltrierbarkeit. Gegebenenfalls entstehen an diesen Stellen im Bauteil Poren, die zu Schwachstellen führen. Ein **gleichmäßiges und homogenes Streubild** ist somit entscheidend für den Prozessschritt Binderauftrag.

Schwankungen der Bindermenge zwischen mehreren Preforms führen aufgrund der dadurch beeinflussten Permeabilität zu unterschiedlich langen Tränkungszeiten bei der Infiltration der Bauteile. Um trotzdem eine ausreichende Tränkung sicherzustellen, muss der Tränkungsprozess im Schleuderverfahren auf den maximalen Binderanteil im Preform ausgelegt werden, sodass dort eine Tränkung ermöglicht wird. Damit längere

---

<sup>5</sup> Bindermasse pro Fläche

Taktzeiten bei der Infiltration aufgrund schwankender Bindermengen vermieden werden, ist der Binderauftrag hinsichtlich seiner **Wiederholgenauigkeit** zu optimieren.

Für die im Gesamtprozess angestrebte Flexibilität ist der Binderauftragsprozess hinsichtlich Durchmessern und Längen des Preforms entsprechend der Geometrieanforderungen aus Kapitel 4.1 flexibel zu gestalten.

Weiterhin soll die Streumenge pro Zeit möglichst hoch sein, damit eine möglichst **geringe Taktzeit** erreicht werden kann.

### 5.1.2 Konzeptionierung

In Kapitel 2.3.5 wurden bereits verschiedene Konzepte zum Auftrag von pulverförmigem Binder auf textile Halbzeuge vorgestellt. Es wurde dargestellt, dass sich diese hinsichtlich ihres Auftragsprinzips grundlegend unterscheiden.

Sowohl die Ansätze von (Mack 2015) als auch von (Fuerst 2011) bedingen ein Aufschmelzen des Binders bei der Applikation. Nachteilig am schmelzflüssigen Auftrag des Binders ist jedoch, dass dieser häufig die Fasern beim Auftreffen direkt infiltriert und somit einerseits die Permeabilität innerhalb der Faserbündel herabsetzt und andererseits die Klebewirkung zwischen den Lagen abgeschwächt wird und somit höhere Bindergehalte notwendig sind (Meyer 2008, S. 53–54)

Als Hemmnisse für einen direkten, pulverförmigen Auftrag – also ohne ein Aufschmelzen des Pulvers beim Auftrag – werden in (Fuerst 2011) Luftbewegungen in der Umgebung genannt, die den Binderauftrag stören. Dies wird bei der Herstellung zylindrischer Preforms aufgrund der Möglichkeit zur Einhausung des Prozesses jedoch nicht befürchtet und kann durch eine geeignete Abdichtung gänzlich vermieden werden. Daher wird in dieser Arbeit auf eine Erhitzung und Aufschmelzung des Pulvers verzichtet und das Pulver im trockenen, kristallinen Zustand aufgetragen.

In zahlreichen Arbeiten konnte außerdem gezeigt werden, dass die Dosierung des Pulvers mittels eines vibrierenden Trichters bzw. Pulverbehälters bei geeigneter Parameterwahl und Trichterauslegung einen gleichmäßigen Pulveraustrag und ein gutes Streubild erzeugt. (Kollmann 2002; Kache 2010; Stichel & Laumer et al. 2014; Besenhard & Faulhammer et al. 2015)

Für den Auftrag auf Flechtschläuchen wird daher die direkte, trockene Applikation mittels Vibration auf den Preform als vielversprechendstes Prinzip ausgewählt (A\_Radler 2018, S. 36)<sup>6</sup>.

In Anlehnung an VDI 2803 (VDI 2803-12019-01-00) werden die notwendigen Funktionen für die Erfüllung der Anforderungen an den Binderauftrag auf zylindrische Preforms mittels Vibration analysiert. Die wichtigsten Funktionen sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Sie werden nachfolgend mit möglichen Lösungsprinzipien beschrieben. Die Lösungsprinzipien werden anschließend in einem morphologischen Kasten zusammengefasst und die beste Lösung für das weitere Vorgehen ausgewählt (vgl. Abbildung 5-3). Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden nachfolgend daher jeweils die möglichen Lösungsprinzipien sowie direkt das für das weitere Vorgehen ausgewählte Lösungsprinzip vorgestellt.

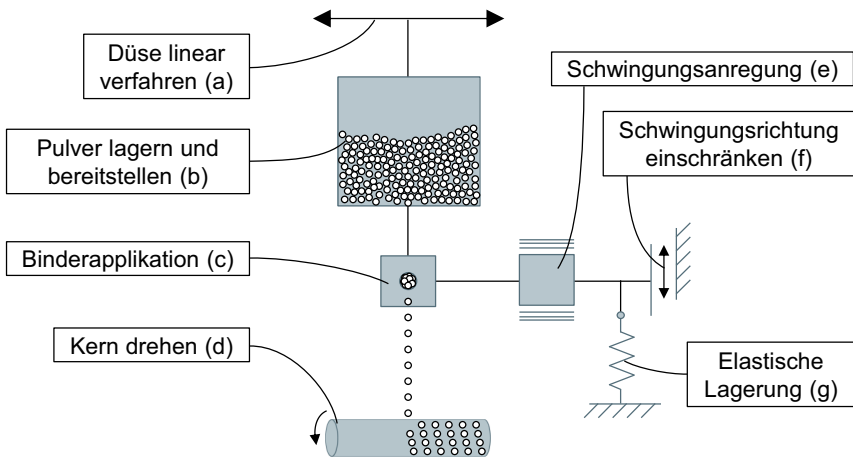


Abbildung 5-2: Schematische Funktionsskizze für den Binderauftrag

Ausgangspunkt des Prozesses ist die Lagerung und Bereitstellung des Pulvers (Abbildung 5-2, b). Das Binderpulver wird als Schüttgut gemäß (VDI 26942012-07-00) in einem Silo gelagert. Das Silo ist gemäß der Schüttguteigenschaften des Pulvers auszulegen. Das Pulversilo kann entweder direkt mit der vibrierenden Austrageinheit ver-

<sup>6</sup> Literaturverweise mit dem Präfix A\_\*\*\* bezeichnen studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Dissertation angeleitet wurden.



bunden sein und dadurch mitschwingen oder es wird von den Schwingungen entkoppelt. Ein entkoppelter Behälter verspricht aufgrund geringerer zu bewegender Massen höhere Schwingungsamplituden bei gleichbleibender Anregung und wird daher ausgewählt. (A\_Radler 2018, S. 43)

Für die Anregung des Pulvers durch Schwingungen (e) sind verschiedene Lösungsprinzipien denkbar. Die Vibration kann durch einen Gleichstrommotor mit einer Unwucht, einen piezoelektrischen Aktor oder einen Luftvibrator erzeugt werden. Aufgrund der geringeren Kosten und der geringeren Komplexität hinsichtlich Auslegung und Ansteuerung wird die Schwingungsanregung mittels Gleichstrommotor mit Unwucht favorisiert. (A\_Radler 2018, S. 42–43)

Damit das System durch die Anregung in eine Schwingung versetzt werden kann, muss dieses eine entsprechende Nachgiebigkeit besitzen. Diese Freiheitsgrade für die Schwingung können im einfachsten Fall undefiniert durch die Steifigkeit der Gesamtanlage vorgegeben werden. Zielführender ist es jedoch, die Schwingung der Austragseinheit von der restlichen Maschine zu entkoppeln. Durch eine elastische Lagerung (g) der Austragseinheit mittels Gummi- oder Schraubenfedern wird diese in alle Raum- und Drehachsen entkoppelt. Eine Verbindung der Austragseinheit mittels Blattfedern zur restlichen Maschine eignet sich zur Einstellung einer definierten Schwingungsrichtung (f), beispielsweise horizontal oder vertikal, und wird daher ausgewählt. (A\_Radler 2018, S. 42)

Durch die Vibration der Schwingungsanregung wird Binderpulver auf den Kern appliziert (c). Diese Applikation kann einerseits durch die Nutzung der Gewichtskraft des Binders direkt auf den Preform erfolgen. Andererseits ist eine Applikation mittels einer Luftströmung denkbar, welche den Binder aufnimmt und auf den Preform sprüht. Aufgrund der Einfachheit der Applikation mit Gewichtskraft wird dieses Lösungsprinzip weiter verfolgt. (A\_Radler 2018, S. 42)

Preform und Binderapplikation müssen in zwei Achsen relativ zueinander bewegt werden. Beide Bewegungen werden entkoppelt, wobei die Linearbewegung (a) der Binderdüse und die Drehbewegung (d) dem Preform zugeordnet werden. Die Linearbewegung der Düse kann über eine Zahnriemenachse, eine Spindelachse mit Kugelgewindetrieb oder einen linearen Direktantrieb umgesetzt werden. Eine Zahnriemenachse mit Trockenlager und Direktantrieb ist aufgrund der hohen erzielbaren Geschwindigkeiten sowie der geringen Anfälligkeit für Verschmutzung besonders geeignet. Für die

Drehbewegung des Preforms wird ein Schrittmotor eingesetzt. (A\_Radler 2018, S. 42–44)

Die möglichen Lösungsprinzipien für die Funktionen sind in Abbildung 5-3 in einem morphologischen Kasten zusammengefasst dargestellt. Blau schattiert sind die Lösungen, welche in (A\_Radler 2018, 43ff.) für die nachfolgende Entwurfsphase ausgewählt wurden. Maßgeblich für die Entscheidungsfindung sind dabei die Einfachheit und damit der Determinismus der Systeme. Für die Funktion *Schwingungsrichtung einschränken* werden die beiden Varianten *horizontal* und *vertikal* ausgewählt und erprobt, sodass erst danach eine Entscheidung für ein Lösungsprinzip getroffen wird.

Funktion	Lösungsprinzip / Ausprägung			
Pulver lagern und bereitstellen	In von Schwingung entkoppeltem Silo	In mitschwingendem Silo		
Schwingungsanregung	Gleichstrommotor mit Unwucht	Piezoelektrischer Aktor	Luftvibrator	
Schwingungsrichtung einschränken	Keine Einschränkung	Horizontal	Vertikal	
Elastische Lagerung	Undefiniert durch Maschinensteifigkeit	Gummifedern oder Gummielemente	Metallische Schraubenfedern	Blattfedern
Binderapplikation	Direkt über Gewichtskraft		Indirekt gesprüht über Luftströmung	
Düse verfahren	Zahnriemenachse	Spindelachse mit Kugelgewindetrieb	Linearer Direktantrieb	
Kern drehen	Schrittmotor			

Ausgewähltes Lösungsprinzip

Abbildung 5-3: Morphologischer Kasten für mögliche Lösungsprinzipien zum Binderauftrag (Eigene Darstellung in Anlehnung an (A\_Radler 2018, S. 42))

### 5.1.3 Entwurf und Umsetzung Binderauftragsmodul

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die wichtigsten Funktionen für den Binderauftrag analysiert sowie Lösungsprinzipien vorgestellt und ausgewählt wurden, wird in diesem Kapitel der Entwurf und die Umsetzung des Binderauftragsmoduls beschrieben.

In Abbildung 5-4 ist ein 3-D-Rendering der Konstruktion des Versuchsstands, in welchem das Binderauftragsmodul untersucht wurde, farblich hervorgehoben dargestellt.

Für eine Beschreibung der übrigen, für den Binderauftrag unerheblichen Struktur des prototypischen Versuchsstands, welche farblich nicht hervorgehoben ist, sei auf (A\_Radler 2018) verwiesen.

Binderpulversilo und Binderaustragsdüse werden über eine Zahnriemenachse vom Typ IGUS drylin® ZLW-1040 linear entlang des Preforms verfahren. Die Zahnriemenachse wiederum wird von einem Schrittmotor in Baugröße NEMA 23 vom Typ Nanotec AS5918 mit einer Übersetzung von 66 mm/U angetrieben.

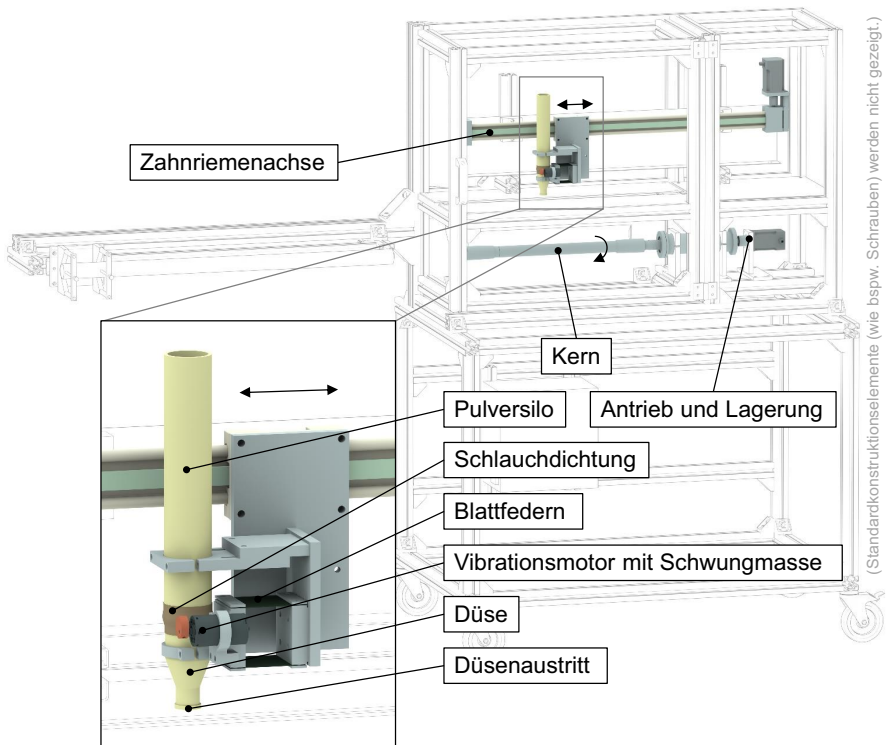


Abbildung 5-4: Entwurf Binderauftragsmodul (eigene Darstellung nach (A\_Radler 2018, S. 38))

Die Düse hat eine nach unten hin konisch zulaufende Form mit einem Konuswinkel von  $30^\circ$ . Am Düsenaustritt befindet sich ein Sieb aus Edelstahladrähten, welches genau wie der Düsenaustrittsdurchmesser experimentell dimensioniert wurde (vgl. Kapitel 5.1.5).

Die Düse ist fest mit einem Vibrationsmotor verbunden. Dieser besteht aus einem DC-Motor vom Typ MAXON DC-MAX26S, auf welchen eine Schwungscheibe mit einem außermittigen Schwerpunkt zur Erzeugung der Schwingungen montiert ist. Aus der Masse des Schwerpunkts sowie dessen radialem Abstand zur Drehachse wird die Fliehkraftkonstante  $m_u \cdot r_u$  berechnet. Mittels einer Schlauchdichtung ist die Düse mit dem Pulversilo verbunden (A\_Radler 2018, S. 46).

Das schwingungsfähige System, bestehend aus Düse und Vibrationsmotor, ist über zwei Blattfedern mit der restlichen Maschine gekoppelt. Die Blattfedern können durch eine Symmetrie des Bohrbildes der Flansche so montiert werden, dass diese entweder eine vertikale oder eine horizontale Schwingung zulassen (vgl. Abbildung 5-5a und b). Experimentell wurde ermittelt, dass sich bei einer vertikalen Montage und damit horizontalen Schwingung (Abbildung 5-5b) kein Bindermassenfluss im System einstellt, wohingegen bei der horizontalen Montage (vertikale Schwingungen, Abbildung 5-5a) ein Bindermassenfluss entsteht. Für das weitere Vorgehen wurde daher die horizontale Montage der Blattfedern gewählt. (A\_Radler 2018, S. 74)

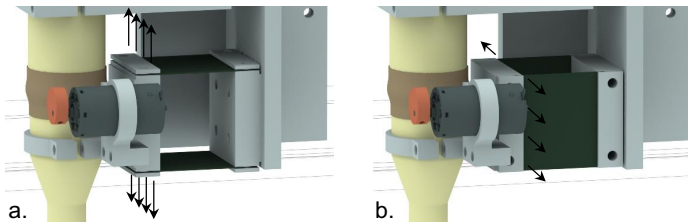


Abbildung 5-5: Horizontale (a) und vertikale (b) Anordnung der Blattfedern zur Einstellung der Schwingungsrichtung

Das Pulversilo ist mechanisch fest mit einem Linearschlitten auf der Zahnriemenachse verbunden, welcher über ein Gleitlager geführt wird. Das Pulversilo besteht aus einem Hohlzylinder mit einer Länge von 220 mm, einem Innendurchmesser von 34 mm und besitzt damit ein Speichervolumen von etwa 200 cm<sup>3</sup>. Das Aspektverhältnis von Durchmesser zu Höhe des Pulversilos wurde so ausgewählt, dass durch die Wandreibung und die innere Reibung des Pulvers die Höhe des Pulverfüllstands keinen Einfluss auf das Streuergebnis hat. Zur Validierung wurde in (A\_Radler 2018, S. 74–75) der Bindermassenstrom in Abhängigkeit des Füllstands ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass der Bindermassenstrom bis zu einem Füllstand von etwa 40 mm konstant bleibt, was einer maximalen Abnahme des Füllstands um 82% entspricht. Nach unterschreiten des

Füllstands von 40 mm nimmt der Bindermassenstrom ab und wird deutlich ungleichförmiger.

Die Flechtschlauchlagen werden auf einem Kern aufgezogen, welcher einseitig mittels zwei Rillenkugellagern drehbar gelagert ist und analog zum Antrieb des Zahnriemens von einem Schrittmotor in Baugröße NEMA 23 vom Typ Nanotec AS5918 angetrieben wird. Das Kernsystem ist modular aufgebaut und erlaubt eine schnelle Anpassung an neue Geometrien durch ein integriertes Schnellwechselsystem.

#### 5.1.4 Analyse des Binderauftrags

Der im vorangegangenen Kapitel beschriebene Entwurf des Binderauftragsmoduls wird in einem prototypischen Versuchsstand aufgebaut und in Betrieb genommen. Nachfolgend wird das durch die Düse auf den Preform applizierte Binderpulver hinsichtlich seines Streubilds untersucht sowie charakteristische Größen zur Beschreibung desselben eingeführt.

Ein Ausschnitt des Streubilds auf einem zylindrischen Dorn ist in Abbildung 5-6a dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit des weißen Binderpulvers wird an dieser Stelle sowie für die folgenden Untersuchungen ein Dorn aus schwarzem Tonpapier anstatt eines Flechtschlauchs verwendet.

Beim Binderauftrag bewegt sich die Düse mit einer Düsenvorschubgeschwindigkeit  $v_D$  entlang der Längsachse des Kerns. Durch die Kerndrehgeschwindigkeit  $\omega_K$  ergibt sich auf dem Kern ein spiralförmiger Auftrag des Binderpulvers, wobei die Binderspuren einen Abstand  $\Delta x_{Spur}$  voneinander besitzen. Mithilfe des Kerndurchmessers  $d_K$  und der tangentialen Kerngeschwindigkeit  $v_K = \omega_K \cdot d_K$  ergibt sich Formel 5-1:

$$\Delta x_{Spur} = \pi \cdot d_K \cdot \frac{v_D}{v_K} \quad 5-1$$

Neben der ortsfesten Koordinate der Düsenposition  $x_D$  wird ein sich auf dem Kern mitdrehendes Koordinatensystem  $\{x_K, y_K\}$  entsprechend Abbildung 5-6a eingeführt. Die ausgetragene Bindermasse wird mit  $m_B$  und deren 1. Ableitung nach der Zeit als Bindermassenstrom  $\dot{m}_B = dm_B/dt$  bezeichnet.

Es kann erwartungsgemäß beobachtet werden, dass die Menge des gestreuten Binderpulvers auf der gedachten Spirale, die von der Düse überfahren wird, größer ist als bei weiter entfernten Punkten zwischen den Umläufen der Spirale auf dem Kern (vgl.

Abbildung 5-6a). Durch die Vibration der Düse wird das Binderpulver beim Austritt aus der Düsenöffnung beschleunigt und dispergiert.

Durch die Adhäsion der Pulverpartikel haften diese auch auf der Unterseite des Pre-forms sicher, sodass das Drehen des Kerns sowie dessen Handhabung keine Herausforderung darstellt. Das Verhalten des Binderpulvers bei hohen Kerndrehzahlen wird in Kapitel 5.1.5 näher untersucht.

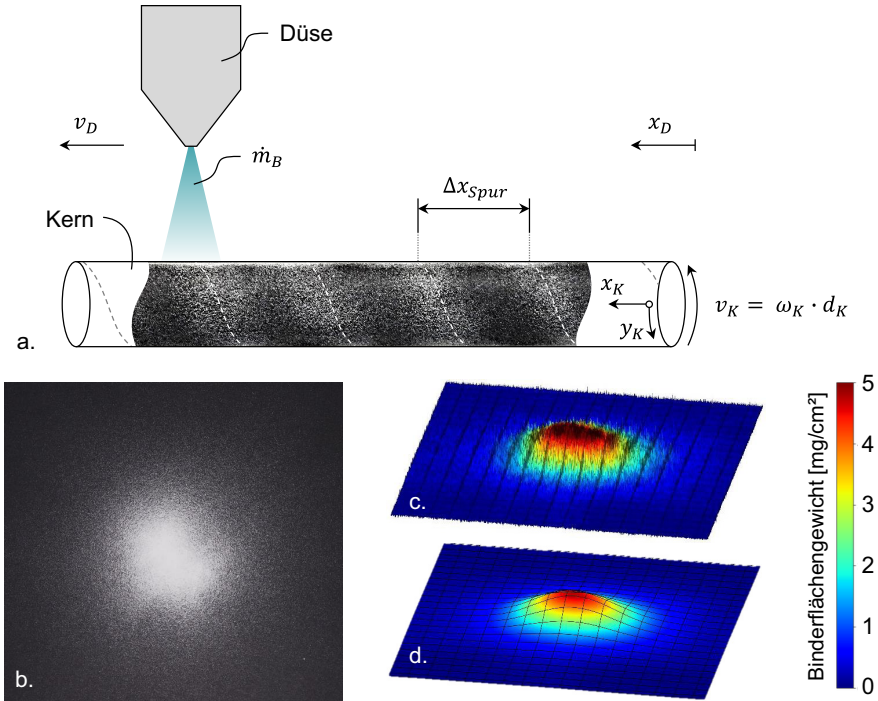


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung des Binderauftrags auf einem Kern (a) sowie Darstellung eines punktförmigen Auftrags bei stehender Düse als Foto (A\_Wagner 2019, S. 34) (b), als Falschfarbenbild ungeglättet (c) und geglättet (d)

In Abbildung 5-6b ist ein beispielhafter Binderauftrag auf eine schwarze Platte bei stehender Düse ( $v_D = 0$ ) dargestellt. Es entsteht ein weitestgehend kreisförmiger Auftrag, wobei die Bindermasse  $m_B$  pro Fläche – das Binderflächengewicht  $\rho_B$  – mit zunehmender

dem Abstand vom Mittelpunkt abnimmt. In den Abbildung 5-6c und d wird dieses Verhalten deutlicher: Es wird das Binderflächengewicht<sup>7</sup> des Auftrags aus Abbildung 5-6b in Falschfarben gezeigt. In Abbildung 5-6c ist das tatsächliche Binderflächengewicht gezeigt. Anhand der Peaks wird deutlich, dass einzelne Binderansammlungen aufgrund der stochastischen Natur des Prozesses auftreten. Werden die Daten geglättet (Abbildung 5-6d) ist zu erkennen, dass die Verteilung des Binderflächengewichts in der Ebene durch eine zweidimensionale Glockenkurve näherungsweise beschrieben werden kann.

### 5.1.5 Bestimmung der Maschinenparameter

Bevor das Streubild näher untersucht werden kann, müssen die wichtigsten Maschinenparameter des Binderauftragmoduls identifiziert und optimiert werden.

Maschinenparameter, welche den Bindermassenstrom beeinflussen, sind die Drehzahl des Vibrationsmotors, die Fliehkraftkonstante der Unwucht, der Durchmesser am Düsenaustritt, die Federsteifigkeit der Blattfedern sowie die Art des Siebs am Düsenaustritt (A\_Wagner 2019, S. 69). Nachfolgend wird die Bestimmung der Maschinenparameter für einen maximalen Bindermassenstrom dargestellt.

Die Einstellungen der Maschinenparameter werden experimentell mit Hilfe von Methoden der statistischen Versuchsplanung ermittelt. Auf eine Einführung der Grundbegriffe der statistischen Versuchsplanung wird an dieser Stelle verzichtet. Sie sind in der entsprechenden Grundlagenliteratur ausführlich dargestellt, z.B. (Siebertz & van Bebber et al. 2010).

Die fünf Maschinenparameter werden in (A\_Wagner 2019, S. 69–75) in einem Screening-Versuchsplan untersucht. Es wird gezeigt, dass bei einem Austrittsdurchmesser von 5 mm und einer Motordrehzahl von 6000 1/min die besten Streuergebnisse hinsichtlich Bindermassenstrom und Wiederholgenauigkeit desselben erzeugt werden.

Die restlichen drei Maschinenparameter (Fliehkraftkonstante, Maschenweite und Federsteifigkeit) werden nachfolgend in einem vollfaktoriellen Versuchsplan auf zwei Stufen und fünf Wiederholungen je Versuch untersucht. Die Stufen der Faktoren werden in Vorversuchen in (A\_Wagner 2019, S. 40–68) ermittelt.

---

<sup>7</sup> Auf die Bestimmung des Binderflächengewichts wird in Kapitel 5.2.1 näher eingegangen.

In Tabelle 5-1 sind die drei Faktoren sowie jeweils die beiden zugehörigen Stufen zusammengefasst dargestellt. Die Fliehkraftkonstante beschreibt dabei das Produkt aus Masse der Unwucht  $m_U$  sowie deren radialen Abstand  $r_U$  von der Drehachse des Motors. Der zweite Faktor betrifft die Konfiguration des eingesetzten Siebs am Düsenaustritt (vgl. Abbildung 5-7a). Es werden zwei Edelstahlsiebe mit einer Leinwandbindung eingesetzt, welche sich hinsichtlich ihrer Maschenweite  $a$  und ihrer Drahtdicke  $d_D$  (vgl. Abbildung 5-7b) unterscheiden. Das Verhältnis von Maschenweite zu Drahtdicke (=Bedeckung) ist bei beiden Konfigurationen näherungsweise gleich. Für die Einstellung der Federsteifigkeit  $c$  wurden Blattfedern mit den entsprechenden Steifigkeiten eingesetzt.

Tabelle 5-1: Faktoren und Stufen des Versuchsplans zur Bestimmung der Maschinenparameter (A\_Wagner 2019, S. 76)

Faktor	Untere Stufe (-)	Obere Stufe (+)
a Fliehkraftkonstante $m_U \cdot r_U$ [g/mm]	43,4	54,8
b Maschenweite $a$ [ $\mu\text{m}$ ] / Drahtdicke $d_D$ [ $\mu\text{m}$ ]	164 / 78	250 / 125
c Federsteifigkeit $c$ [N/m]	33.000	90.000

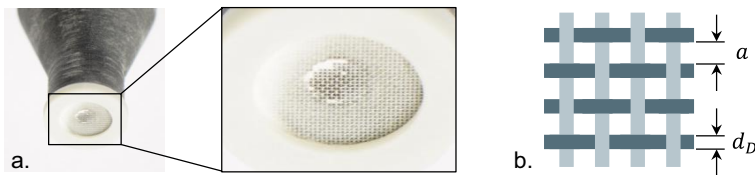


Abbildung 5-7: Detailansicht der eingesetzten Edelstahlsiebe am Düsenaustritt (a) und geometrische Kenngrößen der geflochtenen Siebe (b)

Die gemessenen Qualitätskriterien sind einerseits der gemessene mittlere Bindermassenstrom  $\dot{m}_B$  und andererseits die Schwankung desselben zwischen den fünf Wiederholungen, welche durch den Variationskoeffizient beschrieben werden kann. Der Variationskoeffizient  $VarK(\dot{m}_B)$  stellt dabei die auf den mittleren Bindermassenstrom normierte Standardabweichung der Messwerte dar.

In Abbildung 5-8 sind die Effekte der drei Faktoren dargestellt. Es wird deutlich, dass bei allen drei Faktoren auf der jeweils oberen Stufe der höhere Bindermassenstrom gemessen werden kann. Der Variationskoeffizient ist bei der Fliehkraftkonstante und der Siebkonfiguration in der oberen Stufe jeweils niedriger, was für eine bessere Wiederholgenauigkeit spricht. Lediglich beim Faktor Federsteifigkeit sind die beiden Quali-



tätskriterien gegenläufig. Da die Wiederholgenauigkeit bei der Wahl der Maschinenparameter an dieser Stelle eine untergeordnete Rolle spielt und im nachfolgenden Kapitel 5.2 nochmals dediziert untersucht wird, wird für das weitere Vorgehen bei der Federsteifigkeit ebenfalls die obere Stufe gewählt.

Ein weiterer untersuchter Maschinenparameter stellt die Drehgeschwindigkeit des Kerns beim Binderauftrag dar. Diese hat direkten Einfluss auf das Streubild: Es liegt auf der Hand, dass höhere Drehgeschwindigkeiten zu einem homogeneren Streubild führen, da somit pro Umdrehung weniger Binderpulver auf den Kern fällt und dieses damit statistisch besser verteilt wird. Jedoch besteht die Gefahr, dass das lose auf dem Kern liegende Binderpulver bei zu hohen Umfangsgeschwindigkeiten aufgrund der Zentrifugalkraft weggeschleudert wird. Zur Untersuchung des Schleuderverhaltens in Abhängigkeit der Drehzahl wurden Binderstreueversuche bei drei Kerndrehzahlen  $n_K = \{0,5; 1,0; 1,5\}$  1/s durchgeführt.

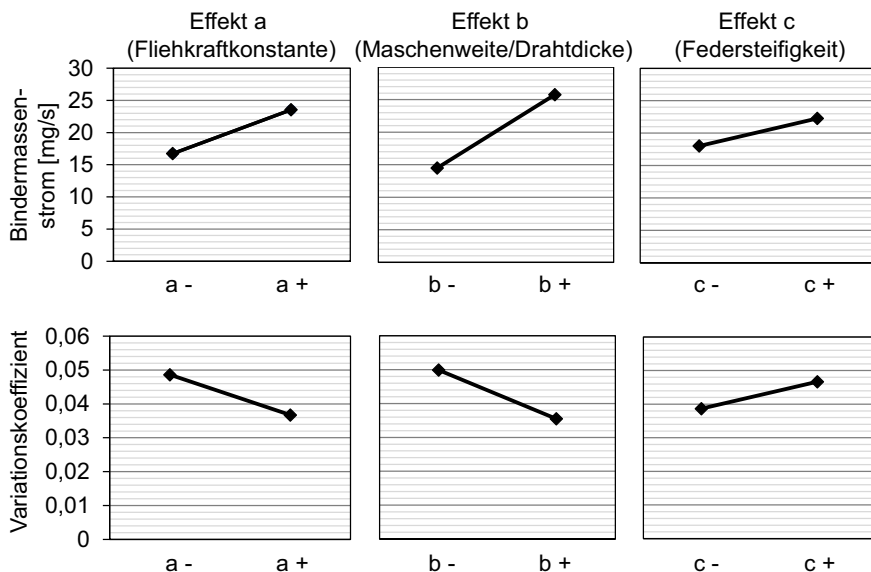


Abbildung 5-8: Effekte der Faktoren Fliehkraftkonstante, Maschenweite/Drahtdicke und Federsteifigkeit (eigene Darstellung und Ergänzung nach (A\_Wagner 2019, S. 80))

Da für spätere Versuche sowohl Untersuchungen auf Flechtschläuchen als auch auf Tonpapier durchgeführt werden, werden beide Materialien als Untergrund gewählt. Der Durchmesser des Kerns beträgt jeweils 36 mm. Die Auftrag wurde bildgebend festgehalten und die gestreute Binderemenge mit einer Waage gemessen, um das Binderflächengewicht zu bestimmen.

In Abbildung 5-9a sind Fotos des Binderauftrags nach etwa der Hälfte der Auftragszeit dargestellt. Auf den jeweils weißen Bereichen wurde bereits Binder aufgetragen und die Düse fährt aus der Seite heraus auf die Kamera zu. Weder beim Flechtschlauch noch beim Tonpapier kann ein Einfluss der Drehzahlen auf die Pulververteilung im Raum nachgewiesen werden. Die Bestimmung der Binderflächengewichte für die Versuche bestätigt die optischen Untersuchungen. Sie ist für das Tonpapier exemplarisch in Abbildung 5-9b dargestellt. Für das weitere Vorgehen kann somit die maximale Drehgeschwindigkeit des Kerns  $n_K = 1,5 \text{ 1/min}$  verwendet werden.

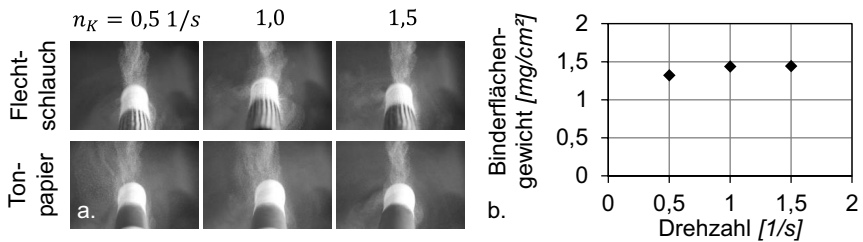


Abbildung 5-9: Schleuderversuche für unterschiedliche Drehzahlen: Fotografische Aufnahmen (a) und gemessene Binderflächengewichte

Neben den in diesem Kapitel spezifizierten Maschinenparametern, welche insbesondere für die Erzeugung eines ausreichend großen Bindermassenstroms verantwortlich sind, sind für die in den Anforderungen beschriebenen Qualitätsgrößen Streubild und Wiederholbarkeit weitere Untersuchungen notwendig. Die beiden Größen hängen, neben dem Bindermassenstrom, maßgeblich von der Gestalt der Austragsdüse ab. Im nachfolgenden Kapitel 5.2 wird daher ein Modell vorgestellt, mit welchem eine optimale Gestaltung der Austragsdüse erreicht werden kann.

## 5.2 Modellbasierte Optimierung der Austragsdüse

Das Ziel dieses Kapitels ist die modellbasierte Optimierung der Austragsdüse hinsichtlich der drei Qualitätskriterien Bindermassenstrom, Streubild und Wiederholgenauig-

keit. Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise wird exemplarisch für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete und weit verbreitete Binderpulver Epikote 05390 durchgeführt, kann jedoch auch auf andere Binderpulver übertragen werden.

Das Streubild lässt sich mit vertretbarem Aufwand lediglich auf flachen Proben untersuchen. Es werden daher im ersten Teil des Vorgehens sogenannte Flachproben verwendet. Die Ergebnisse der *Flachproben* werden dann über ein analytisches Modell auf die zylindrische Gestalt der Preforms übertragen (sog. *Zylinderproben*), damit eine optimale Düsegestaltung ausgewählt werden kann.

Um das Streubild zu bewerten, muss daher im ersten Schritt ein geeignetes Mess- und Auswertesystem qualifiziert werden (Kapitel 5.2.1). Anschließend werden Vorversuche zum Binderaustrag beschrieben sowie ein Konzept für die Optimierung des Pulververhaltens in der Düse vorgestellt (5.2.2). Es werden verschiedene Düsenkonfigurationen experimentell untersucht und die Streubilder auf flächigen Proben bildbasiert untersucht (5.2.3). Anschließend erfolgt die Modellierung des zylindrischen Binderauftrags basierend auf den Streubildern der Flachproben (5.2.4). Die Ergebnisse des Modells werden diskutiert und eine optimale Düsegestalt ausgewählt (5.2.5). Abschließend werden die Vorgehensweise sowie das Modell experimentell validiert (5.2.6).

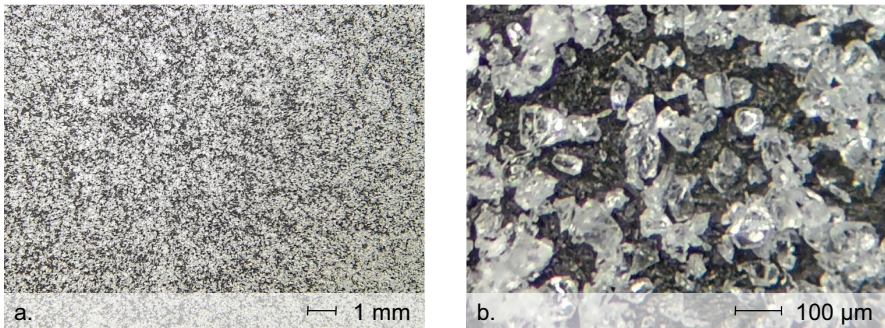
### **5.2.1 Qualifizierung eines bildbasierten Mess- und Auswertesystems**

Zum Nachweis der Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Bindermenge und Streubild (vgl. Kapitel 5.1.1) ist ein Auswertesystem notwendig, welches die genannten Kriterien quantitativ bewertbar macht. Es wird ein bildbasiertes Auswertesystem eingesetzt, welches bei ausgewählten Untersuchungen um Messungen mittels einer Waage ergänzt wird.

Da das verwendete Binderpulver eine weiße Farbe hat, ist die Grundidee des bildbasierten Auswertesystems, die Helligkeit eines Bildbereichs mit dem Binderflächengewicht zu korrelieren. Es wird angenommen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Helligkeit und Binderflächengewicht besteht, unter der Voraussetzung, dass ein gleichmäßig dunkler Hintergrund verwendet wird. Aufgrund der letztgenannten Voraussetzung lässt sich das Verfahren lediglich für den Binderauftrag auf glatten Oberflächen und damit nicht auf der textilen Oberfläche von Flechtschläuchen anwenden. Für die Form des Streubilds wird es jedoch als unerheblich betrachtet, ob dieses auf trockenen Fasern oder schwarzem Tonpapier aufgetragen wird.

Die Voraussetzung für die lineare Korrelation von Helligkeit zu Binderflächengewicht ist, dass bei den betrachteten Bindermengen möglichst alle Binderpartikel auf der Oberfläche sichtbar sind – es dürfen somit nicht regelmäßig mehrere Binderpartikel übereinander liegen, da in diesem Fall die untenliegenden Partikel verdeckt würden und keinen Beitrag zur Helligkeit leisten.

Zum Nachweis dieser Forderung werden mikroskopische Aufnahmen von auf schwarzem Tonpapier aufgetragenem Binderpulver angefertigt (vgl. Abbildung 5-10). Es wird eine mittlere Bindermenge von  $2 \text{ mg/cm}^2$  aufgetragen, wobei die Bindermenge mittels Wiegen ermittelt wird. Die Aufnahmen werden mit einem Mikroskop vom Typ Zeiss Stemi 508 aufgenommen und sind in Abbildung 5-10 mit unterschiedlichen Vergrößerungen dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die einzelnen kristallförmigen Binderpartikel weitestgehend nebeneinander liegen und sich nur selten überdecken. Es ist demnach davon auszugehen, dass jeder Partikel einen (linearen) Anteil zum Helligkeitswert des Bildes bzw. einzelner Bildpixel beiträgt.



*Abbildung 5-10: Mikroskopische Aufnahmen des gestreuten Binderpulvers bei 0,65-facher (a) und 5-facher Objektiv-Vergrößerung*

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden sowohl Streubilder auf flachem Untergrund als auch auf zylindrischem Untergrund ausgewertet. Für beide Varianten wird daher eine standardisierte Vorrichtung zur Aufnahme von Fotos aufgebaut, die in Abbildung 5-11 schematisch dargestellt ist. Die Vorrichtung stellt einerseits sicher, dass die relative Position zwischen Kameraobjektiv und Aufnahmeobjekt – dem Streubild – stets gleich bleibt. Andererseits muss gewährleistet werden, dass die Beleuchtungsverhältnisse über alle Versuche konstant sind, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse

zu gewährleisten. Die Aufnahmekammer wird daher derart abgeschirmt, dass lediglich der verwendete Kamerablitz das Bild beleuchtet und Streulicht keinen Helligkeitsbeitrag leistet. Für die Flachproben wird eine separate Kammer aufgebaut, in die die Proben nach dem Binderauftrag gelegt werden und von oben fotografiert werden. Die Zylinderproben hingegen werden direkt in der Maschine fotografiert, daher wird die Kammer direkt in den Versuchsaufbau integriert. Um das Streubild auf dem kompletten Zylinder aufzunehmen sind mehrere Aufnahmen entlang des Umfangs notwendig, wobei der Antrieb des Kerns des Binderauftragmoduls zur Positionierung der Zylinderproben verwendet wird. Es wird eine Kamera vom Typ SONY ILCE-6000 mit einer Brennweite von 30mm verwendet und für die Aufnahmen eine Belichtungszeit von 1/250 Sekunde, Empfindlichkeit von ISO-100 sowie eine Blendenöffnung von F/11 eingestellt. Der Abstand zwischen Probekörper und Bildsensor beträgt in beiden Fällen 570 mm. (A\_Wagner 2019, S. 30)

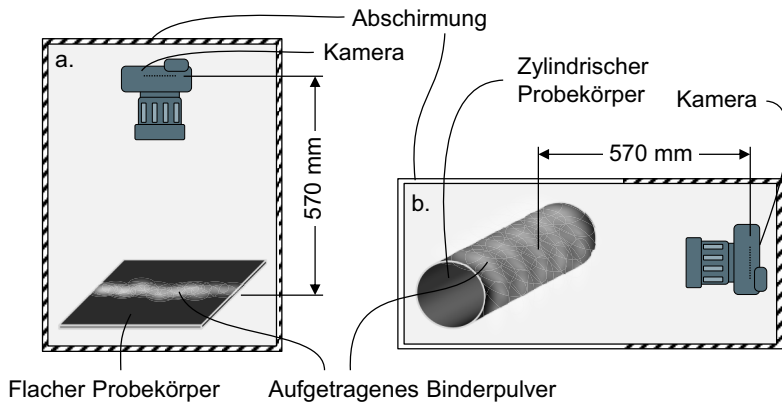


Abbildung 5-11: Vorrichtung zur Aufnahme von Flachproben (a) und Zylinderproben (b) (eigene Darstellung nach (A\_Wagner 2019, S. 30))

Zur Auswertung der aufgenommenen Bilder wird die in Abbildung 5-12 gezeigte Vorgehensweise gewählt, welche in MATLAB R2020a implementiert wurde und somit automatisiert die Bilder in Binderflächengewichte umrechnet (A\_Wagner 2019, S. 32–36). Dabei wird grundsätzlich unterschieden, ob es sich um ein Streubild auf flachen oder zylindrischen Proben handelt. Im linken Bereich von Abbildung 5-12 ist dieser Prozess für den kreisförmigen Austrag aus Kapitel 5.1.4 (Abbildung 5-6) exemplarisch dargestellt.

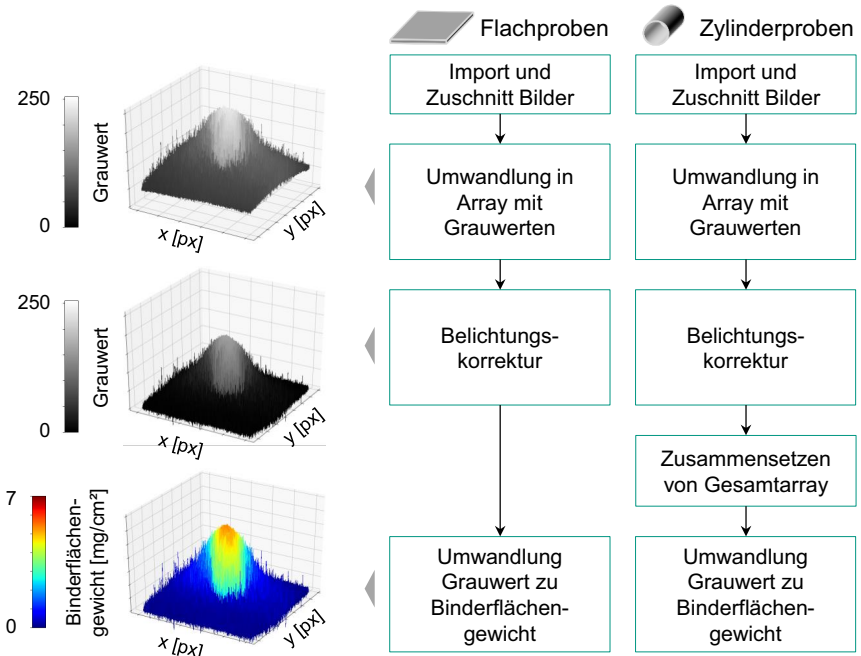


Abbildung 5-12: Vorgehensweise zur Berechnung der Binderflächengewichte aus Einzelbildern für Flach- und Zylinderproben

Der Prozess beginnt mit einem Import der Kamerabilder sowie deren Zuschnitt auf den Bereich der Probe. Anschließend wird das Bild in Graustufen umgerechnet, indem die Farbton- und Sättigungsinformationen gelöscht werden, die Luminanz jedoch behalten wird, und als ein Array gespeichert. Die Grauwerte werden anschließend einer Belichtungskorrektur unterzogen. Dafür werden einerseits weiße und schwarze Kontrollfelder auf den Probekörpern aufgebracht, um Schwankungen bei der Belichtung zwischen den Proben linear auszugleichen. Andererseits werden Grauwerte von unbedienten Proben erstellt, welche von dem ermittelten Binderbild subtrahiert werden, sodass die lediglich aus der Belichtung resultierenden Grauinformatio-nen nahezu vollständig eliminiert werden können.

Im Falle der Zylinderproben erfolgt anschließend das Zusammensetzen der Zylindermantelfläche aus insgesamt 11 Einzelbildern entlang des Umfangs der Probe zu einem Gesamtstreubild. Dazu wird aus den Einzelbildern jeweils ein schmaler, rechteckiger

Bereich aus der Mantelfläche ausgeschnitten. Die Größe der Bereiche wird vorab über eine Probe mit aufgedrucktem Kalibriermuster bestimmt, sodass verhindert wird, dass sich die Einzelbilder überlappen oder eine Lücke zwischen den Bildern entsteht. Das Resultat dieser Operation ist ein Array mit den Grauwerten der rechteckigen, abgerollten Mantelfläche des Zylinders. Für die Flachproben ist dieser Schritt des Zusammensetzens nicht notwendig.

Im letzten Schritt werden die Grauwerte zu Binderflächengewichten umgerechnet. Dafür wird ein Korrelationskoeffizient  $^{GW}k^{\rho_B}$  eingeführt, über den der lineare Zusammenhang zwischen Grauwerten  $GW$  und Binderflächengewichten  $\rho_B$  hergestellt wird:

$$\rho_B = ^{GW}k^{\rho_B} \cdot GW \quad 5-2$$

Die Bestimmung von  $^{GW}k^{\rho_B}$  erfolgt über eine Versuchsreihe, bei der Probekörper mit unterschiedlichen Binderflächengewichten erstellt werden. Die Proben werden anschließend sowohl gravimetrisch als auch mittels des beschriebenen bildbasierten Auswertverfahrens analysiert, um einen Zusammenhang zwischen beiden Verfahren herzustellen. Die Ergebnisse der Versuchsreihe für die Flachproben sind exemplarisch in Abbildung 5-13 dargestellt. Es sind jeweils die mittels Wiegen ermittelten mittleren Binderflächengewichte  $\rho_B$  über den bildbasiert ermittelten Grauwerten  $GW$  aufgetragen. Über den Anstieg der Ausgleichsgerade kann  $^{GW}k^{\rho_B}$  bestimmt werden.

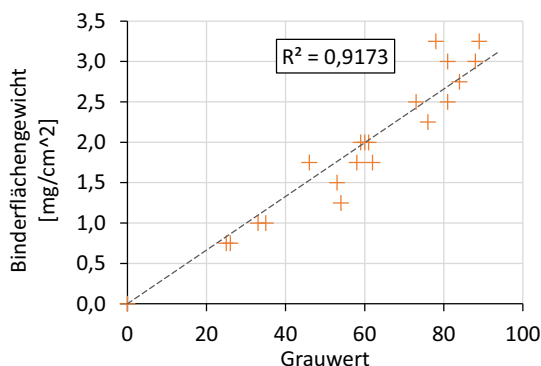


Abbildung 5-13: Korrelation von gravimetrisch ermitteltem Binderflächengewicht zu bildbasiert ermitteltem Grauwert für Flachproben.

Für Flachproben gilt  $^{GW}k_f^{DB} = 0,0332 \text{ mg/cm}^2$ , für Zylinderproben gilt  $^{GW}k_z^{DB} = 0,0285 \text{ mg/cm}^2$ . Der geringfügige Unterschied von etwa 15% resultiert aus den minimal unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen der beiden Aufnahmekammern.

### 5.2.2 Vorversuche und Ableitung Düsenkonzept

Um ein Grundverständnis für die Vorgänge innerhalb der Düse und beim Binderstreuen zu erhalten, werden experimentelle Vorversuche durchgeführt. Dazu wird eine einfache Düse ohne die im späteren Verlauf der Arbeit verwendeten Elemente im Düseninneren aufgebaut. Der Düsenkörper besteht aus einem additiv gefertigten PLA-Zylinder (vgl. Abbildung 5-14), welcher zur Austrittsöffnung hin konisch mit einem Winkel von  $30^\circ$  zuläuft. Am Düsenaustritt befindet sich das in Kapitel 5.1.5 beschriebene Edelstahl-Draht-Sieb mit einer Maschenweite von 250  $\mu\text{m}$  und einem Drahtdurchmesser von 125  $\mu\text{m}$  bei einem Düsendurchmesser von 5 mm.

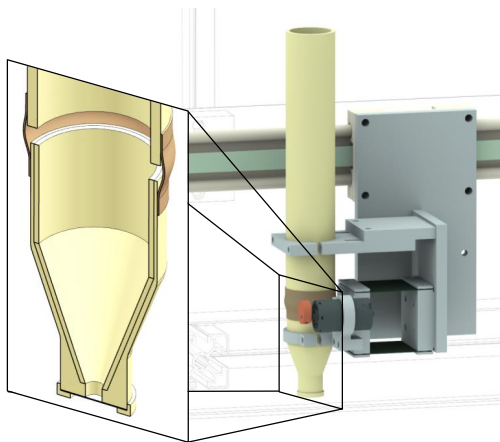


Abbildung 5-14: Für Vorversuche genutzte Binderaustragsdüse

Es werden Streuveruche auf Flachproben mit schwarzem Tonpapier mit den in Kap. 5.1.5 ermittelten Maschinenparametern sowie einem Düsenvorschub  $v_D$  von 33 mm/s durchgeführt. Die erzeugten Streubilder der 5 Wiederholungen sind in Abbildung 5-15 dargestellt.



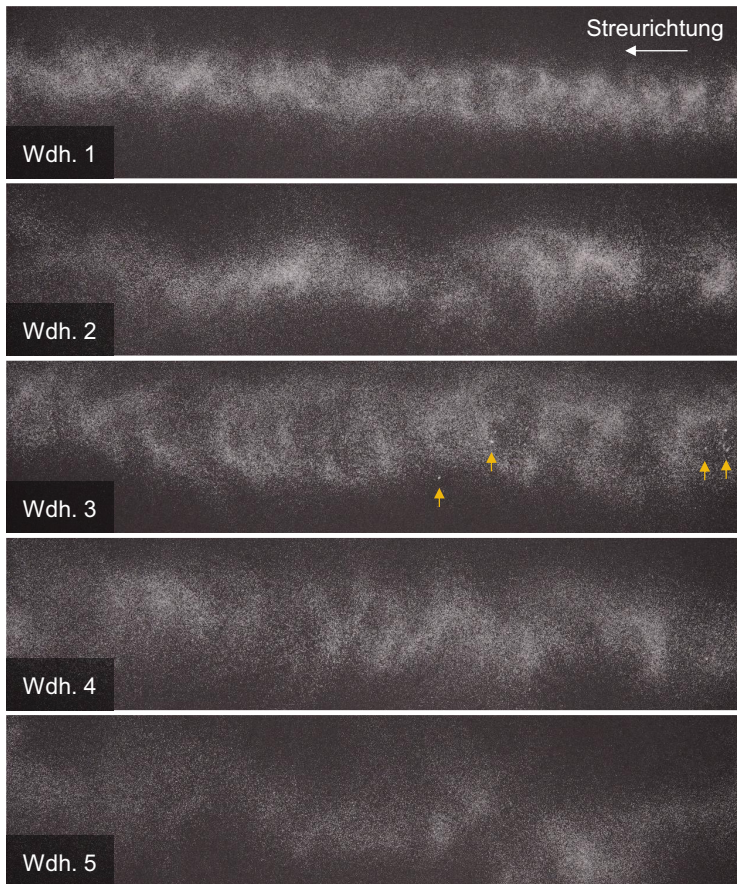


Abbildung 5-15: Streubilder der Austragsdüse

Die ausgetragenen Bindermassen werden gewogen, sodass über die Größe der Platte und den Düsenvorschub  $v_D$  der mittlere Binderstrom  $\dot{m}_B$  ermittelt werden kann (vgl. Tabelle 5-2).

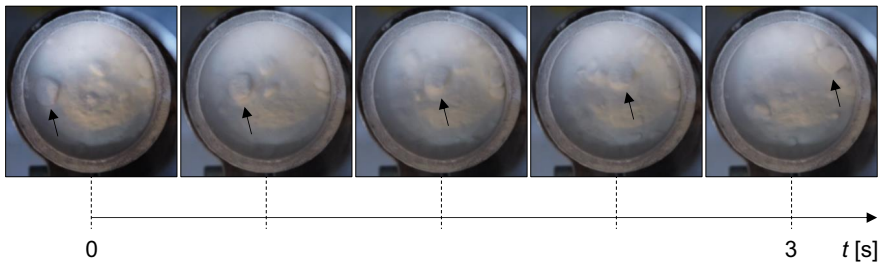
Tabelle 5-2: Gemessene Bindermassen

Wiederholung	1	2	3	4	5	Mittelwert
Binder Masse $m_B$ [mg]	45	43	57	40	20	41
Binderstrom $\dot{m}_B$ [mg/s]	6,7	6,4	8,5	6,0	3,0	6,1
Abweichung vom Mittelwert	+10%	+5%	+39%	-2%	-51%	

Bei der Betrachtung der 5 Streubilder fällt auf, dass sich diese in Streubild und Streumenge deutlich unterscheiden. Während das Streubild bei Wiederholung 1 eine weitestgehend konstante Breite zeigt und die Bindermenge über die Streulänge gleichmäßig bleibt, schwankt die Streumenge bei den Wiederholungen 2, 4 und 5 teilweise erheblich entlang des Fahrwegs. Es wird ebenfalls deutlich, dass die Breite des Streubilds bei den Wiederholungen 3, 4 und 5 deutlich größer ist als bei Wiederholung 1. Der mittlere Binderstrom schwankt teilweise um mehr als 50% um den Mittelwert von 6,1 mg/s. Weiterhin sind insbesondere bei Wiederholung 3 einzelne Binder-Klumpen sichtbar (in Abbildung 5-15 durch gelbe Pfeile markiert).

Aufgrund der Schwankungen innerhalb einer Wiederholung (Ungleichmäßigkeit des Streubilds), der Schwankungen zwischen den Wiederholungen (Wiederholgenauigkeit) und der vereinzelt Klumpenbildung erscheint ein homogener Binderauftrag entsprechend der in Kap. 5.1 definierten Anforderungen mit der dargestellten Düse als nicht erreichbar.

Um ein Verständnis für die Vorgänge innerhalb der Düse zu erhalten, werden in einer zweiten Versuchsreihe Videoaufnahmen von der Draufsicht auf die Pulveroberfläche im Trichter erstellt. Das über dem Trichter liegende Pulversilo wird zu diesem Zweck demontiert. Die Maschinenparameter werden entsprechend Kap. 5.1.5 gewählt, der Düsenvorschub jedoch auf null gesetzt.



*Abbildung 5-16: Pulverklumpen im Trichter. Ein einzelner Pulverklumpen wurde zur Nachverfolgbarkeit mit einem schwarzen Pfeil markiert. In Anlehnung an (A\_Wagner 2019, S. 50)*

In Abbildung 5-16 sind einzelne Standbilder aus einem repräsentativen Videoausschnitt über eine Dauer von 3 Sekunden dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich an der Pulveroberfläche größere Binderklumpen bilden und diese sich durch die Vibration

aktivierte Pulver bewegen. Die beobachteten Klumpen tauchen willkürlich an der Oberfläche auf und verschwinden nach kurzer Zeit wieder.

Es wird vermutet, dass sich die Pulverklumpen auch tiefer durch den Trichter und Pulverbehälter bewegen. Aufgrund der Größe der Klumpen erscheint es wahrscheinlich, dass diese den Trichter teilweise blockieren bzw. den Pulverstrom beeinflussen und somit Streubild und Streumenge verändern können. Diese Modellvorstellung ist schematisch in Abbildung 5-17a dargestellt.

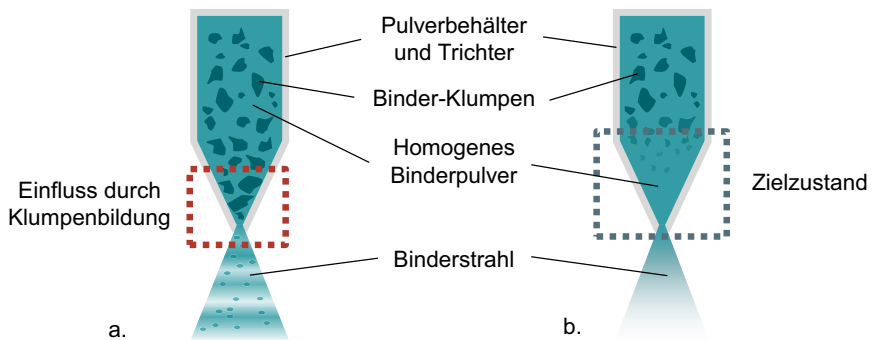


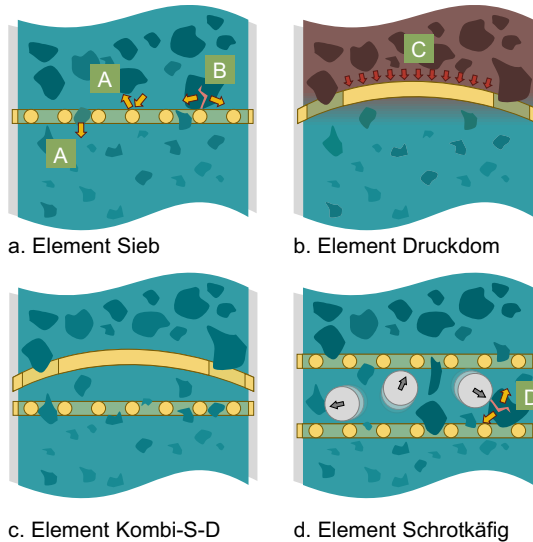
Abbildung 5-17: Modellvorstellung zur Klumpenbildung innerhalb der Düse: Ausgangszustand (a) und Zielbild (b)

Es wird weiterhin vermutet, dass die Klumpenbildung aufgrund der Adhäsion des Pulvers nicht grundsätzlich (z.B. durch veränderte Schwingungsparameter) verhindert werden kann. Daher liegt der Fokus in der nachfolgenden Entwicklung auf der Vermeidung bzw. Zerstörung von Klumpen im unteren Trichterbereich, sodass diese den Binderauftrag nicht beeinflussen und ein homogener und reproduzierbarer Austrag gewährleistet wird (vgl. Abbildung 5-17b).

Zur Erreichung des oben beschriebenen Zielzustands wird das nachfolgend entwickelte Konzept vorgeschlagen. Ziel des Konzepts ist die Auflösung bzw. Vermeidung von Binderklumpen im Bereich des Trichterausgangs. Eine generelle Vermeidung von Binderklumpen im Speicherzylinder ist mit einem sehr hohen Aufwand verbunden und wird daher als nicht zielführend erachtet. Außerdem wird vermutet, dass die Anwesenheit von Klumpen im Pulversilo den Pulveraustrag nicht beeinflusst, solange die Klumpen in der Nähe des Trichterausgangs sehr klein sind und sich bis zum Erreichen des Trichterausgangs auflösen.

Zur Auflösung der Klumpen und Vermeidung von Klumpenneubildung werden im Bereich des Trichters verschiedene passive und semi-aktive Elemente eingebracht.

In einer Kreativphase werden vier verschiedene Elementtypen entwickelt, welche nachfolgend vorgestellt und in Abbildung 5-18 schematisch mit ihrem jeweiligen Wirkprinzip entsprechend der Modellvorstellung gezeigt werden.



*Abbildung 5-18: Schematische Darstellung und Wirkprinzipien der vier Elemente zur Klumpenauflösung (Schnittansicht durch den Trichter): Sieb (a), Pralldom (b), Kombination aus Sieb und Pralldom (c) und Schrotkäfing (d)*

Das Element **Sieb** (Abbildung 5-18a), welches bereits aus Kapitel 5.1.5 bekannt ist, besteht aus einer Edelstahldraht-Flecht-Konstruktion. Das Sieb lässt lediglich Klumpen mit einer kleineren Größe als der Maschenweite hindurch (A), größere Klumpen verbleiben oberhalb des Siebes. Es wird außerdem erwartet, dass Klumpen an den Drähten aufbrechen und sich somit verkleinern (B).

Das Element **Druckdom** (Abbildung 5-18b) besteht aus einer kuppelartigen Struktur mit Durchlässen am äußeren Durchmesser. Ziel des Druckdoms ist es, den Staudruck des Binderpulvers (C) auf das unterhalb des Doms befindliche Pulvervolumen zu verringern und somit die Neigung des Pulvers zur Klumpenbildung zu minimieren.

Das Element **Kombination aus Sieb und Druckdom** (Abbildung 5-18c), kurz **Kombi-S-D**, vereint die beiden Wirkprinzipien der Einzelelemente Sieb und Druckdom.

Im Gegensatz zu den oben genannten, rein passiv wirkenden Elementen besteht das Element **Schrotkäfig** (Abbildung 5-18d) aus Schrotkugeln zwischen zwei Sieben. Die Schrotkugeln werden durch die Vibration der Düse in Bewegung versetzt, weshalb das Element Schrotkäfig als semi-aktiv bezeichnet wird. Die Schrotkugeln können sich zwischen den beiden Sieben bewegen und bei der Kollision mit Pulverklumpen diese zerkleinern bzw. auflösen (D).

In einem modularen Trichterkonzept können die beschriebenen Elementtypen in drei Ebenen des Trichters evaluiert werden. In Abbildung 5-19a und b sind die Positionen der Ebenen oberhalb und innerhalb des konischen Bereichs in der eingeführten Modellvorstellung sowie als 3-D-Rendering in der Schnittansicht dargestellt. In Abbildung 5-19c-e werden außerdem die im Versuch eingesetzten Elemente Druckdom (c), Sieb (d) und ein geöffneter Schrotkäfig (ohne oberes Sieb, e) gezeigt.

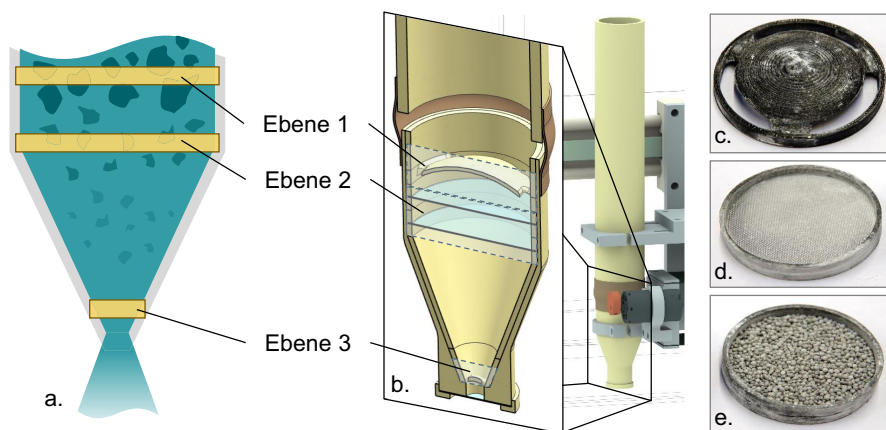


Abbildung 5-19: Positionen der Ebenen in der Modellvorstellung (a) und als gerenderte Schnittansicht (b) sowie Fotografien der Elemente Druckdom (c), Sieb (d) und Schrotkäfig (ohne oberes Sieb, e)

Nachfolgend werden die beschriebenen Elemente in den drei Ebenen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Streuergebnis systematisch untersucht, um eine optimale Konfiguration für die Düse zu finden.

### 5.2.3 Streubilder und Reproduzierbarkeit für Düsenkonfigurationen

Für die Beurteilung des Streuergebnisses werden die Anforderungen aus Kapitel 5.1.1 herangezogen. Um das Streuergebnis zu bewerten, werden Flachproben mit den nachfolgend beschriebenen Düsenkonfigurationen erstellt.

Insgesamt werden 21 Konfigurationen aus Elementen auf den drei Ebenen untersucht. Die einzelnen Konfigurationen sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst. Neben der Konfiguration 0 ohne Elemente werden drei Versuchsreihen durchgeführt:

1. In den Konfigurationen der Reihe 1-a bis 1-k werden die Elementtypen jeweils einzeln auf den drei Positionen getestet. Auf Ebene 3 lässt sich das Element Schrotkäßig aufgrund der beengten Platzverhältnisse nicht umsetzen, daher wird dieses Element lediglich auf den Ebenen 1 und 2 implementiert.
2. In den Konfigurationen 2-a bis 2-d wird das Element Sieb mit sich selbst auf allen Ebenen kombiniert (zwei und drei Siebe), um den Einfluss mehrerer Elemente im Vergleich zu einzelnen Elementen (1-x) zu untersuchen.
3. In den Konfigurationen 3-a bis 3-e werden schließlich die Erkenntnisse aus den Konfigurationen 1-a bis 2-d zu den vielversprechendsten Varianten miteinander kombiniert.

*Tabelle 5-3: Untersuchte Konfigurationen mit den Kombinationen aus Element und Ebene*

Konfiguration	Element Ebene 1	Element Ebene 2	Element Ebene 3
0	-	-	-
1-a	Druckdom	-	-
1-b	Sieb	-	-
1-c	Kombi-S-D	-	-
1-d	Schrot	-	-
1-e	-	Druckdom	-
1-f	-	Sieb	-
1-g	-	Kombi-S-D	-
1-h	-	Schrot	-
1-i	-	-	Druckdom
1-j	-	-	Sieb
1-k	-	-	Kombi-S-D
2-a	-	Sieb	Sieb
2-b	Sieb	Sieb	Sieb
2-c	Sieb	-	Sieb

Konfiguration	Element Ebene 1	Element Ebene 2	Element Ebene 3
2-d	Sieb	Sieb	-
3-a	Druckdom	Schrot	-
3-b	Kombi-S-D	Schrot	-
3-c	Schrot	Sieb	-
3-d	Druckdom	Schrot	Sieb
3-e	Kombi-S-D	Schrot	Sieb

Für die Versuche werden Flachproben linear mit einer Düsenvorschubgeschwindigkeit  $v_D = 33 \text{ mm/s}$  mit Binderpulver bestreut. Es werden jeweils fünf Wiederholungen durchgeführt. Um einen Einfluss der Umgebungsbedingungen auszuschließen, wird während der Versuche Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der Maschine gemessen. Die Lufttemperatur liegt zwischen  $25,6^\circ\text{C}$  und  $27,5^\circ\text{C}$ , die relative Luftfeuchtigkeit zwischen  $34,2\%$  und  $41,6\%$ .

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5-20a zu sehen. Die Probenplatten bestehen aus einer quadratischen Aluminium-Grundplatte, auf welche ein  $220\text{mm} \times 210\text{mm}$  großes schwarzes Tonpapier geklebt ist (A\_Wagner 2019, S. 30). Die Auswertung erfolgt mit dem in Kapitel 5.2.1 beschriebenen bildbasierten Verfahren. Exemplarisch ist der linienförmige Auftrag für die fünfte Wiederholung von Konfiguration 1-g in Abbildung 5-20b sowie die visualisierten Binderflächengewichte in Abbildung 5-20c dargestellt.

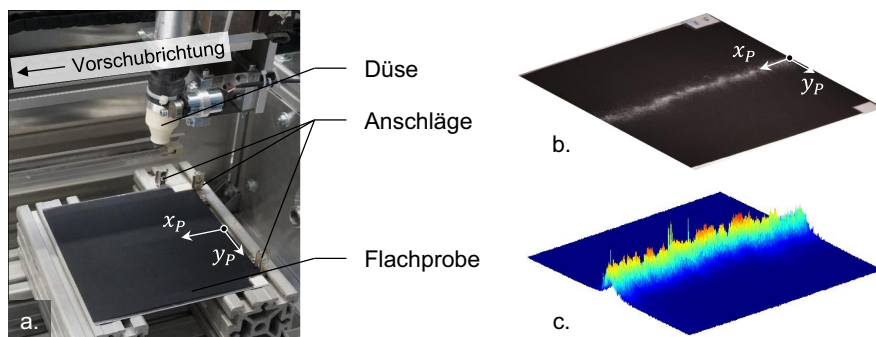


Abbildung 5-20: Versuchsaufbau für Flachproben (a, (A\_Wagner 2019, S. 28)) sowie Fotos des linienförmigen Auftrags (b) und errechnete Binderflächengewichte (c)

Aus den Anforderungen an den Binderauftrag (Kapitel 5.1) werden die nachfolgend beschriebenen Kennzahlen zum Vergleich der Konfigurationen abgeleitet. Zur Beurteilung

der ausgetragenen Bindermenge wird das bildbasiert ermittelte Binderflächengewicht über die Fläche aufsummiert und mittels der Düsenvorschubgeschwindigkeit der Binder­massenstrom berechnet. Als Maß für die Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse wird die Standardabweichung der mittleren Binder­massenströme über die fünf Wiederholungen herangezogen.

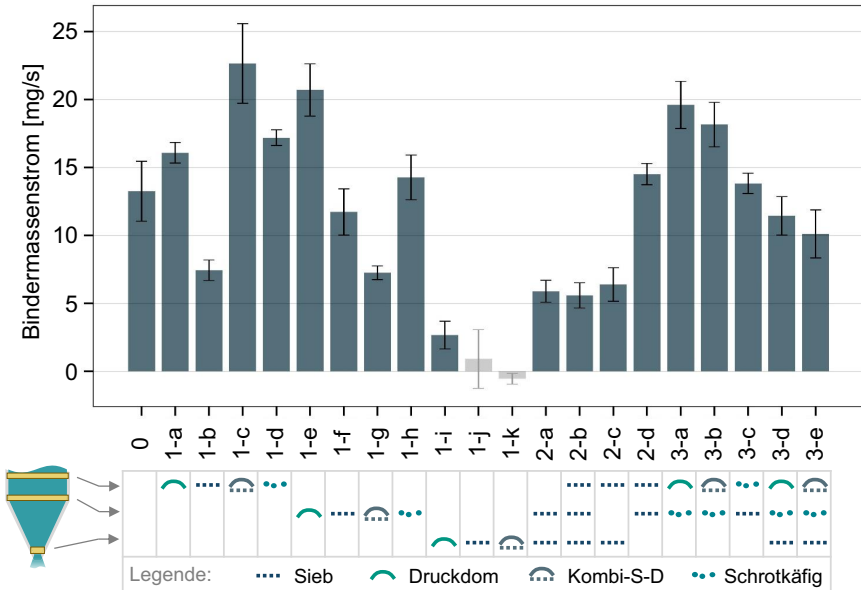


Abbildung 5-21: Mittlere Binder­massenströme für die untersuchten Konfigurationen

In Abbildung 5-21 sind die mittleren Binder­massenströme sowie deren Standardabweichung über die fünf Wiederholungen für jede Konfiguration dargestellt. In Abbildung 5-22a ist der Übersichtlichkeit halber der gleiche Zusammenhang elementweise geclustert und in Abbildung 5-22b nur für das Element Sieb dargestellt. Bei den Konfigurationen mit einzelnen Elementen in der obersten Ebene (1-a bis 1-d) fällt auf, dass Sieb und Druckdom sehr reproduzierbare Bindermengen austragen, wobei die Bindermenge beim Druckdom mit 16 mg/s etwa doppelt so groß ist. Die Kombination beider Elemente führt zu einer nochmaligen Steigerung des Binder­massenstroms um etwa 40% auf 22,7 mg/s, jedoch sinkt die Wiederholgenauigkeit. Sieb und Druckdom verhalten sich auf der mittleren Ebene relativ zueinander ähnlich wie auf der oberen, Kombi-S-D erzeugt hier jedoch einen um 65% geringeren Massenstrom verglichen mit dem Sieb.



Einzelne Elemente auf der untersten Ebene führen zu einem sehr geringen bis keinem Austrag ( $< 3 \text{ mg/s}$ ). Bei den Elementen Sieb und Kombi-S-D stellte sich in der untersten Ebene kein konstanter Binderstrom ein.

Die Kombination mehrerer Siebe (2-a bis 2-d) erzeugt einen geringen Massenstrom, insbesondere bei Konfigurationen mit einem Sieb in der untersten Ebene ( $5,5 \text{ mg/s} - 6,5 \text{ mg/s}$ ). Die Kombination von zwei Sieben führt jedoch auch zur Steigerung der Wiederholgenauigkeit (2-d). Das Element Schrottkäfig kann sowohl auf der oberen als auch auf der mittleren Ebene hohe Massenströme ( $17,2 \text{ mg/s}$  bzw.  $14,3 \text{ mg/s}$ ) mit mittleren bis hohen Wiederholgenauigkeiten erreichen.

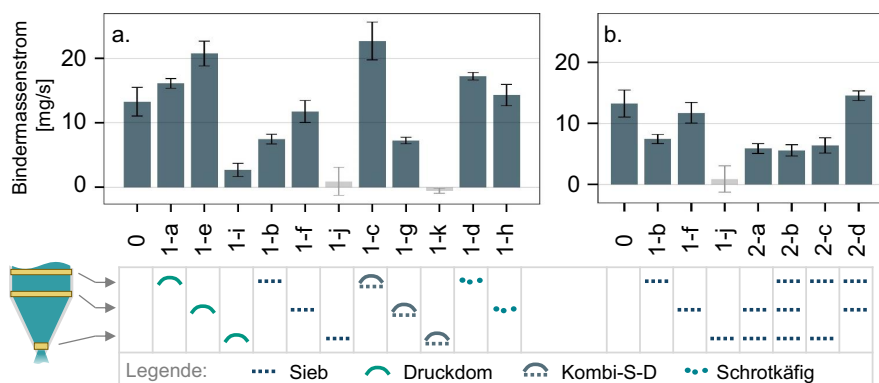


Abbildung 5-22: Mittlere Bindermassenströme für die untersuchten Konfigurationen, sortiert nach den einzelnen Elementen (a) und den Positionen der Siebe (b)

Wie eingangs beschrieben werden aufgrund der o.g. Beobachtungen die Konfigurationen 3-a bis 3-e abgeleitet und untersucht (vgl. rechter Teil von Abbildung 5-21). So wird in jeder Konfiguration der Schrottkäfig in der mittleren Ebene mit Druckdom oder Kombi-S-D in der obersten Ebene kombiniert. In 3-d und 3-e wird zusätzlich ein Sieb in der unteren Ebene eingebracht. In Konfiguration 3-c wird der Schrottkäfig anstatt in der mittleren in der oberen Ebene verwendet und ein Sieb in der mittleren Ebene verwendet. Die Ergebnisse zeigen durchgängig gute Bindermassenströme ( $10,1 \text{ mg/s}$  bis  $19,6 \text{ mg/s}$ ) bei geringer Standardabweichung, also hoher Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse. In den Konfigurationen 3-d und 3-e wird durch das Sieb in der unteren Ebene der Bindermassenstrom bei gleichbleibender Wiederholgenauigkeit im Vergleich zu den Konfigurationen 3-a und 3-b um 42% bzw. 45% deutlich gesenkt.

Eine Entscheidung für eine Düsenkonfiguration kann aufgrund der vorliegenden Auswertung nicht getroffen werden. Neben dem Bindermassenstrom und dessen Wiederholgenauigkeit ist das Streubild auf dem Preform eine entscheidende Zielgröße, welche für die Beurteilung der Konfigurationen analysiert werden muss. Aus den vorliegenden Flachproben lässt sich jedoch kein direkter Rückschluss auf das Streubild auf einem zylindrischen Kern ziehen, da dieses Streubild maßgeblich aus dem Zusammenspiel mehrerer Binderbahnen nebeneinander, wie sie spiralförmig auf dem Preform aufgetragen werden, abhängt. Aufgrund des deutlich größeren Aufwands zur Erstellung von Zylinderproben sowie der zusätzlichen Dimension durch die Spiralförmigkeit ist eine direkte experimentelle Ermittlung der optimalen Düsen-Konfiguration auf Zylinderproben nicht praktikabel umsetzbar. Es wird daher ein Modell benötigt, welches die linienförmigen Streubilder der Flachproben auf den tatsächlichen Auftrag auf Zylinderproben überträgt. Die räumliche Standardabweichung der Binderflächengewichte des berechneten Streubilds der Zylinderproben kann dann als Maß für die Gleichmäßigkeit des Auftrags dienen. Für die Wiederholgenauigkeit des Streubilds werden die Schwankungen der Standardabweichungen, also die Standardabweichungen der Standardabweichungen, herangezogen.

In den nachfolgenden Kapiteln 5.2.4 und 5.2.5 wird daher ein Auftragsmodell hergeleitet, ausgewertet und schließlich in Kapitel 5.2.6 validiert.

#### **5.2.4 Analytisches Binderauftragsmodell**

Eine Bewertung der Streubilder ist nur möglich, wenn beurteilt werden kann, wie sich ein solches auf den zylindrischen Preform, bei dem mehrere Bahnen nebeneinander liegen und sich dementsprechend überlappen, auswirkt. In Abbildung 5-23 ist diese Transformation von den Streubildern der Flachproben auf den zylindrischen, spiralförmigen Auftrag schematisch dargestellt. Da der Binderauftrag auf der zylindrischen Mantelfläche des Preforms erfolgt, wird diese für die weitere Modellbildung gedanklich abgerollt und auch nachfolgend als Rechteck dargestellt.

In Kapitel 2.3.5.4 wurden verschiedene simulative Ansätze zur Modellierung des Pulverauftrags vorgestellt. Die Grundlage für bspw. partikelbasierte DEM-Simulationen sind jedoch extensive Materialcharakterisierungen, was die Flexibilität dieser Methoden stark einschränkt (Turton 2008). Es wird daher ein phänomenologischer Ansatz auf der Grundlage von Flachproben für die Modellbildung gewählt. Dieser setzt die in Kapitel

5.1.5 nachgewiesene Annahme voraus, dass das Binderpulver auch unter dem Einfluss von Gewichts- und Zentrifugalkraft auf dem Preform haftet.

Die Modellierung erfolgt rein analytisch, indem das Binderstreubild der Flachproben  $S$  mittels eines Hilfsbildes  $H$  durch verschiedene Operationen iterativ zu dem Binderstreubild des Preforms  $P$  umgerechnet wird.  $S$ ,  $H$  und  $P$  sind Matrizen, wobei jeder Wert  $s_{i,j}$ ,  $h_{k,l}$  bzw.  $p_{m,n}$  einem Binderflächengewicht  $\rho_B$  an der Position  $(i, j)$ ,  $(k, l)$  bzw.  $(m, n)$  entspricht. Die Parameter  $i \dots n$  werden, um Rundungsverluste durch die Umrechnung zu vermeiden, durchgängig in der Einheit Pixel (px) behandelt – lediglich für die Auswertung wird das Streubild wieder in Millimeter umgerechnet.

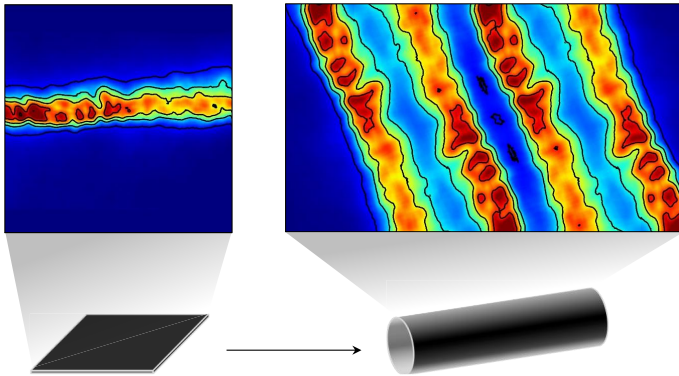


Abbildung 5-23: Übertragung der flächigen Streubilder auf den spiralförmigen Auftrag auf dem Preform (Binderflächengewichte sind zur besseren Sichtbarkeit geglättet.)

Die Vorgehensweise innerhalb des Modells, um aus den Streubildern der Flachproben ein Streubild auf einem Preform vorherzusagen, ist in Abbildung 5-24 dargestellt. Das Modell ist in insgesamt drei Module unterteilt.

Im ersten Modul wird über einfache trigonometrische Beziehungen die Form des Binderauftrags berechnet. Aus dem Soll-Binderflächengewicht  $\rho_{B,soll}$ , dem Kerndurchmesser des Preforms  $d_K$ , der Kernlänge  $l_K$ , der Kerndrehzahl  $n_K$  sowie dem mittleren Bindermassenstrom  $\dot{m}_{B,\phi}$  der jeweiligen Konfiguration  $k$  wird die Düsendrehgeschwindigkeit  $v_D$ , der Binderspuraabstand  $\Delta x_{Spur}$  sowie der Spiralsteigungswinkel  $\alpha_v$  bestimmt. Es gelten die Formeln 5-3 und 5-4:

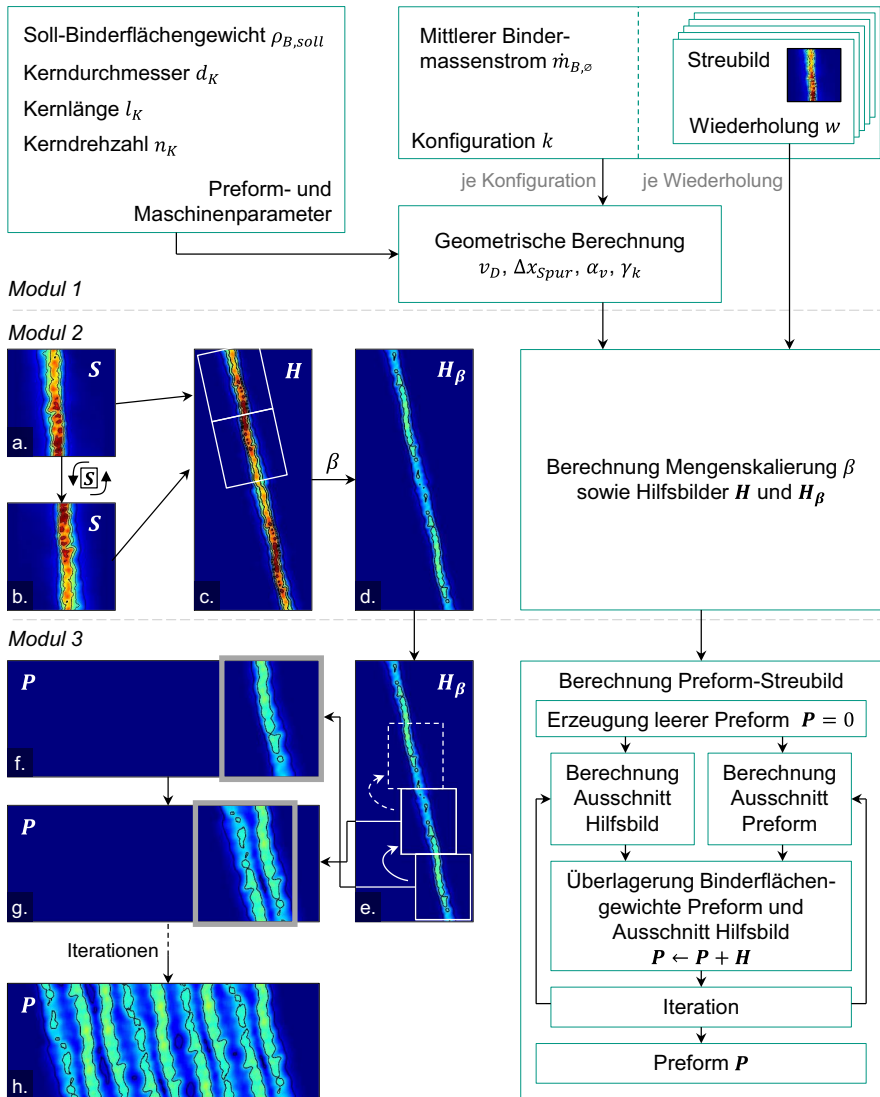


Abbildung 5-24: Vorgehensweise zur analytischen Berechnung des Preformstreubilds  $P$  aus den Streubildern der Flachproben  $S$  (Binderflächengewichte sind zur besseren Veranschaulichung gebläutet.)

$$v_D = \frac{\dot{m}_{B,\varnothing} \cdot \gamma_k}{\pi \cdot d_K \cdot \rho_{B,soll}} \quad 5-3$$

$$\alpha_v = \tan^{-1} \left( \frac{v_D}{v_K} \right) \quad 5-4$$

Der konfigurationsabhängige Überdeckungsfaktor  $\gamma_k$  mit  $\gamma_k \in [0,1]$  ist dabei ein Maß für den Anteil des Binderpulvers, welches aufgrund der Form des Streubilds auf den Preform fällt und nicht vorbeifällt.

Anschließend wird in Modul 2 das Hilfsbild  $\mathbf{H}$  berechnet. Der Zweck von  $\mathbf{H}$  besteht darin, spätere Rechenoperationen zu vereinfachen – grundsätzlich wäre auch ein Verzicht auf diesen Zwischenschritt möglich. Zur Berechnung von  $\mathbf{H}$  wird zuerst eine Nullmatrix mit  $h_{k,l} = 0$  erstellt. Es wird das Binderbild der Flachprobe  $\mathbf{S}$  mit Hilfe einer Drehmatrix  $\mathbf{R}_\alpha$  um den Spiralsteigungswinkel  $\alpha_v$  gedreht und in  $\mathbf{H}$  eingefügt (Abbildung 5-24a und c). Daraufhin wird der gleiche Vorgang mit einem um  $180^\circ$  gedrehten  $\mathbf{S}$  wiederholt und das Ergebnis wie in Abbildung 5-24b und c dargestellt ebenfalls in  $\mathbf{H}$  eingefügt. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis die Höhe des Hilfsbildes  $\mathbf{H}$  größer ist als der dreifache Umfang des Preforms. Dadurch ist sichergestellt, dass im weiteren Vorgehen für jeden Spiralumlauf einfach ein Ausschnitt aus  $\mathbf{H}$  übernommen werden kann. Um sicherzustellen, dass die auf den Preform aufgetragene Bindermenge der Soll-Bindermenge  $\rho_{B,soll}$  entspricht, wird das Verhältnis aus der berechneten, absoluten Binderauftragungsgeschwindigkeit  $v_{abs} = \sqrt{v_D^2 + v_K^2}$  zur Binderauftragungsgeschwindigkeit bei der Herstellung der Flachproben  $v_{D,flach}$  als Skalierungsfaktor  $\beta = v_{D,flach} / v_{abs}$  bestimmt. Mit diesem wird  $\mathbf{H}$  skalar multipliziert, sodass das skalierte Hilfsbild  $\mathbf{H}_\beta$  entsteht (Abbildung 5-24d). Eine schnellere (oder langsamere) Absolutgeschwindigkeit würde theoretisch einer Streckung (oder Stauchung) des Binderbilds entsprechen. Allerdings würde durch eine Streckung bzw. Stauchung die Form des Streubilds verzerrt, sodass die Vereinfachung durch die Skalierung als zulässig betrachtet wird. Die Auswirkungen der Vereinfachung werden in der Modellvalidierung (Kap. 5.2.6) wieder aufgegriffen.

Anschließend wird das Binderstreubild des Preforms  $\mathbf{P}$  berechnet, in dem zuerst wieder eine Nullmatrix  $\mathbf{P}$  mit  $p_{m,n} = 0$  erstellt wird. Wie in Abbildung 5-24e und f dargestellt, wird anschließend über trigonometrische Beziehungen ein Ausschnitt im Hilfsbild  $\mathbf{H}_\beta$  berechnet, welcher als Binderauftrag in den Ausschnitt des Preforms  $\mathbf{P}$  übertragen wird.

Innerhalb des Ausschnitts wird jedem neuen  $p_{m,n}$  die Summe aus dem alten  $p_{m,n}$  und  $h_{k,l}$  zugewiesen:

$$p_{m,n} \leftarrow p_{m,n} + h_{k,l} \quad 5-5$$

Für den zweiten Spiralumlauf (vgl. Abbildung 5-24g) wird der Ausschnitt entsprechend Abbildung 5-24e über trigonometrische Beziehungen verschoben und die Binderflächengewichte auf den neuen Preform-Ausschnitt addiert. Dieser Vorgang wird so lange iteriert, bis schließlich die finale Matrix des Preforms mit Binderflächengewichten vorliegt (Abbildung 5-24h).

Die beschriebene Vorgehensweise wurde in Python 3 in der Umgebung Jupyter Notebook implementiert und für jede der fünf Wiederholungen in allen in Tabelle 5-3 eingeführten Konfigurationen durchlaufen. Dabei ist zu beachten, dass innerhalb einzelner Konfigurationen für jede Wiederholung lediglich das Streubild  $S$  angepasst wird – der mittlere Bindermassenstrom  $\dot{m}_{B,\varphi}$  wird jeweils für die gesamte Konfiguration konstant gehalten, sodass sich schwankende Binder Mengen bei den Flachproben ebenfalls in unterschiedlich starken Binderflächengewichten der berechneten Preforms niederschlagen und diese nicht über eine Anpassung der Düsenvorschubgeschwindigkeit  $v_D$  ausgeglichen werden können.

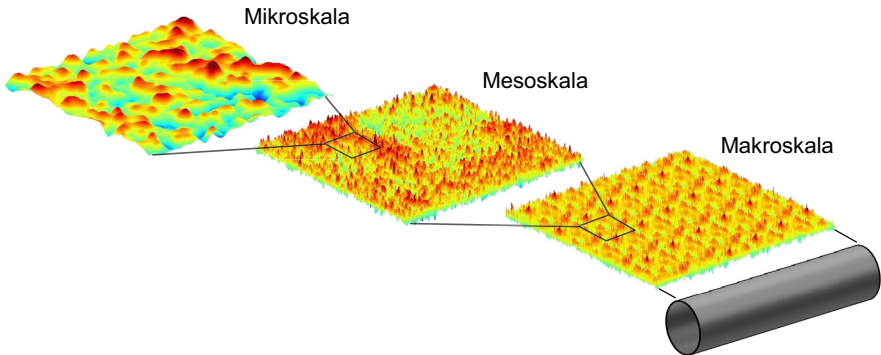


Abbildung 5-25: Einführung der skalenweisen Betrachtung von Streubildern (Exemplarische Darstellung anhand des berechneten Streubilds von Konfiguration 1-g, Wiederholung 4)

### 5.2.5 Betrachtungsskalenabhängige Bewertung von Streubildern

Für die Interpretation der mit dem oben beschriebenen Algorithmus erzeugten Streubilder  $S$  für jede Konfiguration ist eine Vorgehensweise zur Auswertung notwendig, die die Abweichung des lokalen Binderflächengewichts von dem Soll-Binderflächengewicht zugänglich macht. In dieser Auswertung wird das Streubild auf verschiedenen geometrischen Betrachtungsskalen analysiert (vgl. Abbildung 5-25). Auf der größten Betrachtungsskala, der Makroskala, weicht das lokale Binderflächengewicht aufgrund eines schwankenden Bindermassenstroms in der Düse vom Soll-Binderflächengewicht ab. Makroskopische Schwankungen sind leicht mit bloßem Auge zu erkennen. Auf der nächstkleineren Mesoskala kommt es konfigurationsabhängig zu kleineren Binderanhäufungen. Auf der kleinsten Skala, der Mikroskala, sind einzelne Erhebungen erkennbar, die einzelnen Binderteilchen zuzuordnen sind. In Abbildung 5-25 sind die Streuungen auf jeder Betrachtungsskala für ein berechnetes Streubild beispielhaft anhand von Konfiguration 1-g, Wiederholung 4 dargestellt.

Zur Beurteilung der Streubilder über die Betrachtungsskalen hinweg wird eine Methodik verwendet, die sich an eine geometrische, zweidimensionale Frequenzanalyse anlehnt, jedoch in ihrer Berechnung anders abläuft und vergleichsweise einfach interpretierbare Ergebnisse erzeugt. Das Ziel der Auswertung ist die Beurteilung der Abweichung des lokalen Binderflächengewichts  $\hat{\rho}_B$  vom Soll-Binderflächengewicht  $\rho_{B,Soll}$  für eine isolierte Betrachtungsskala. Die Betrachtungsskala kann als ein bestimmter Frequenzbereich für die räumlichen Schwankungen des Binderflächengewichts interpretiert werden.

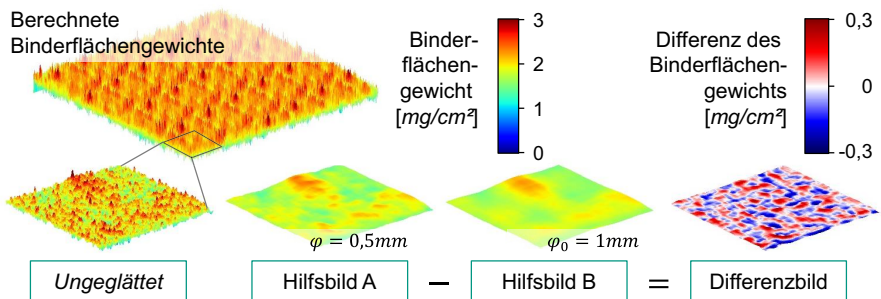


Abbildung 5-26: Vorgehensweise zur Bestimmung der skalenabhängigen Streuung

Zur Berechnung der Abweichungen werden zwei Hilfsbilder berechnet (vgl. Abbildung 5-26). Für die Berechnung wird auf das ungeglättete Original-Streubild ein Weichzeichnungsfilter appliziert, welcher analog zu einem einfachen, ungewichteten 2-dimensionalen gleitenden Mittelwert mit der Ordnung  $\varphi$  berechnet wird.  $\varphi$  stellt dabei anschaulich die Kantenlänge des Quadrats dar, über welche die Binderflächengewichte gemittelt werden. Analog zu einem Tiefpassfilter werden alle Frequenzen größer als  $\varphi$  herausgefiltert. Hilfsbild A wird nun mit  $\varphi$  geglättet, während Hilfsbild B mit  $\varphi_0 = 2\varphi$  geglättet wird.

Aus den Hilfsbildern A und B wird anschließend durch elementweise Subtraktion ein Differenzbild berechnet. Durch die unterschiedliche „Größe“ der Glättung der beiden Hilfsbilder stellt dieses Differenzbild genau die Schwankungen vom Mittelwert und damit die Abweichungen von der Soll-Bindermenge auf der Skala  $\varphi$  dar.

Im in Abbildung 5-26 gezeigten Beispiel wird die Abweichung auf der Skala  $\varphi = 0,5 \text{ mm}$  berechnet, indem das mit einer Kantenlänge  $\varphi = 1 \text{ mm}$  weichgezeichnete Hilfsbild B vom mit einer Kantenlänge  $\varphi = 0,5 \text{ mm}$  weichgezeichnete Hilfsbild A subtrahiert wird. Im Differenzbild entsprechen die weißen Bereiche einer Abweichung von null. Die roten und blauen Bereiche stellen auf dieser isolierten Skala jeweils größere Abweichungen dar.

Als Maß für die Schwankung auf der Skala  $\varphi$  wird über alle Einzel-Differenzen des Binderflächengewichts die Standardabweichung berechnet. Sie stellt somit ein anschauliches Maß für die Abweichung vom Mittelwert auf der Skala  $\varphi$  dar. Wird diese Berechnung nun über sämtliche Betrachtungsskalen durchgeführt, lässt sich ein Graph wie in Abbildung 5-27 gezeigt ableiten. Er zeigt die skalenabhängige Abweichung des Binderflächengewichts von etwa 0,3mm bis über 20mm und wird nachfolgend als *Streubildgraph* bezeichnet. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 5-27b bis e jeweils die Differenzbilder des Streubilds aus Abbildung 5-27a, anhand derer die Standardabweichung berechnet wird, dargestellt. Weiterhin wird in dem Graphen durch die rote, halbtransparente Fläche die Standardabweichung der fünf Wiederholungen – also die Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse – dargestellt.

Mit der vorgestellten Vorgehensweise ist es nun möglich, Streubilder für Preforms ausgehend von den aufgenommenen Streubildern der Flachproben mit einem analytischen Modell zu berechnen und systematisch anhand eines Graphen über mehrere Betrachtungsskalen hinweg auszuwerten.



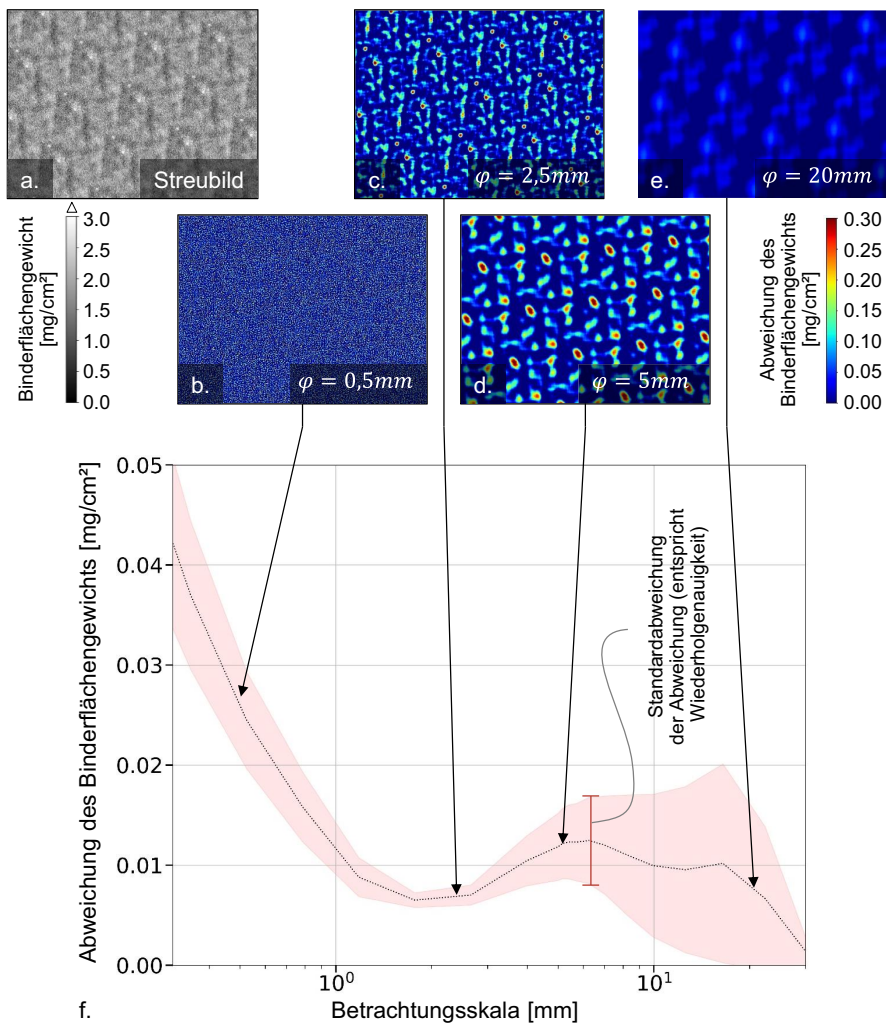


Abbildung 5-27: Skalenweise Betrachtung der Abweichung des Binderflächengewichts: Originalbild (a), Extrahierte Skalenbetrachtung (b)-(e)

### 5.2.6 Modellbasierte Auswahl einer Düsenkonfiguration

Das in Kapitel 5.2.4 beschriebene analytische Auftragsmodell wird zur Berechnung der Streubilder aller Konfigurationen angewendet. Es wird die Geometrie des Schikanebauteils als Berechnungsgrundlage herangezogen. In Tabelle 5-4 sind die verwendeten Preform- und Maschinenparameter zusammengefasst. Um Berechnungszeit zu sparen, wird die Preformlänge auf 200 mm begrenzt, da eine größere Länge keinen Einfluss auf das Streubild hat. Ebenfalls wird die maximale Kerndrehzahl angesetzt (vgl. Kapitel 5.1.5).

Tabelle 5-4: Preform- und Maschinenparameter für die Berechnung der Streubilder

Soll-Binderflächengewicht $\rho_{B,soll}$	1,5 g/cm <sup>2</sup>
Kerndurchmesser des Preforms $d_K$	36 mm
Kernlänge des Preforms $l_K$	200 mm
Kerndrehzahl $n_K$	90 U/min

Bei der Berechnung des Streubilds wird berücksichtigt, dass es beim Binderauftrag der ersten und der letzten Spiralbahnen zu einem Einlauf- und einem Auslaufbereich kommt, in dem weniger Binder aufgetragen wird. Dieser Effekt tritt sowohl in der Realität als auch in der analytischen Berechnung auf (vgl. Abbildung 5-24h). In Abbildung 5-28 werden daher ein Einlauf-, Kern- und ein Auslaufbereich definiert. Die Länge des Kernbereichs entspricht dabei gerade  $l_K$ , die Länge der Ein- und Auslaufbereiche kann in Abhängigkeit der Größe des Streubilds und des Spiralwinkels  $\alpha_V$  über trigonometrische Beziehungen berechnet werden.

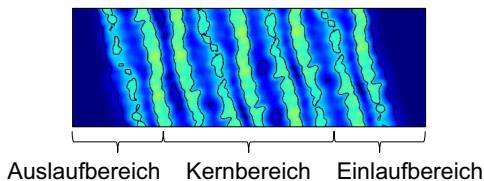


Abbildung 5-28: Einteilung des Preforms in Einlauf-, Kern- und Auslaufbereich

Nach dem Abschluss der analytischen Berechnungen werden die Preforms hinsichtlich ihres Streubilds sowie dessen Wiederholgenauigkeit wie in Kap. 5.2.4 beschrieben ausgewertet.

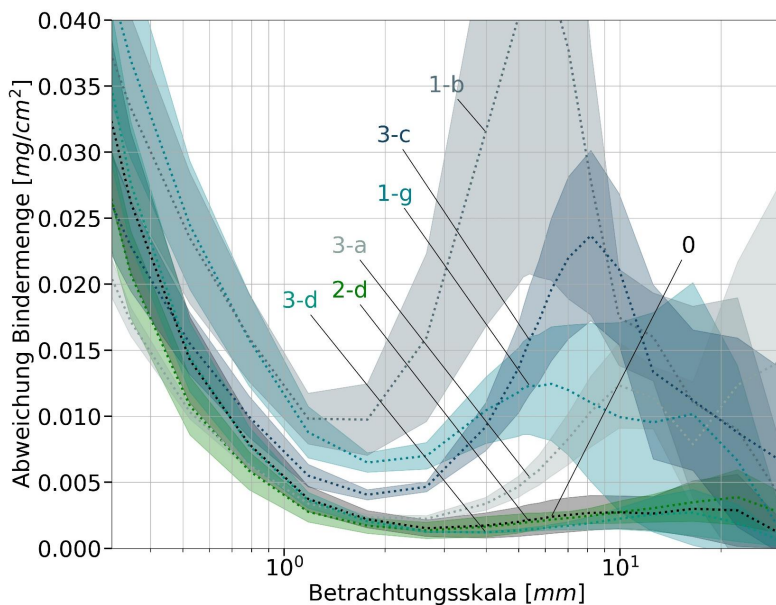
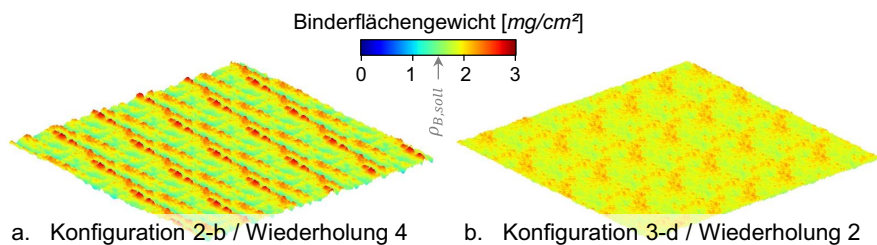


Abbildung 5-29: Streubildgraphen ausgewählter Konfigurationen



a. Konfiguration 2-b / Wiederholung 4

b. Konfiguration 3-d / Wiederholung 2

Abbildung 5-30: Berechnete Streubilder für die Konfigurationen 1-b und 3-d

In Abbildung 5-29 ist der Streubildgraph exemplarisch für die Konfigurationen 0, 1-b, 1-g, 2-d, 3-a, 3-c, und 3-d dargestellt<sup>8</sup>. Es wird anschaulich gezeigt, dass sich die Streubilder für die gezeigten Konfigurationen in ihrem Schwankungsverhalten teilweise sehr deutlich unterscheiden. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 5-30a ein Streubild der Konfiguration 1-b und in Abbildung 5-30b ein Streubild der Konfiguration 3-d abgebildet.

<sup>8</sup> In Anhang A sind Streubildgraphen für sämtliche Konfigurationen enthalten.

Der deutlich sichtbare Unterschied in der Verteilung der Binderflächengewichte spiegelt sich ebenfalls auf Betrachtungsskalen  $\varphi$  größer 1 mm im Verlauf des Streubildgraphen deutlich wieder.

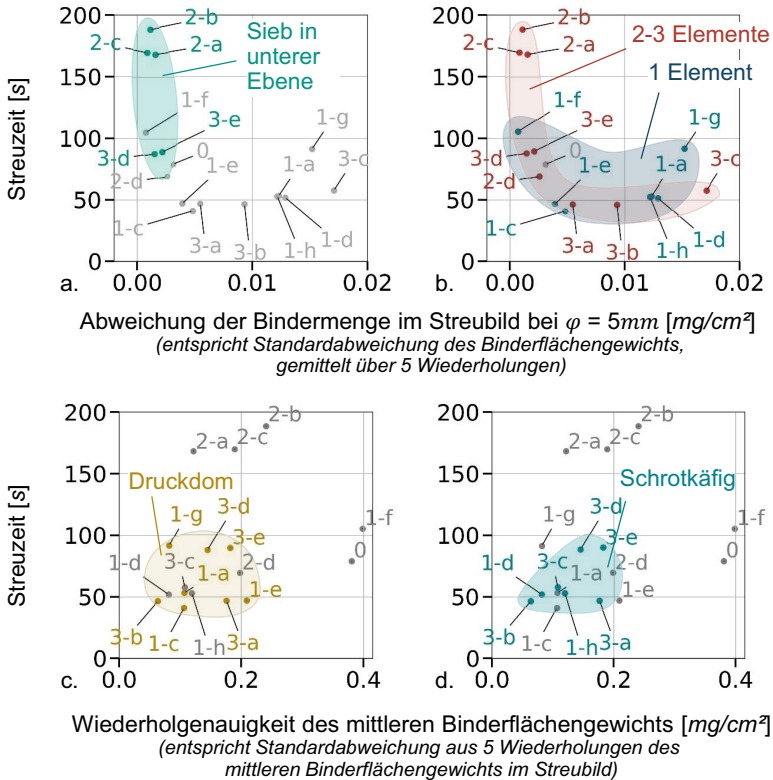


Abbildung 5-31: Gegenüberstellung der Zielgrößen Streuzeit, Abweichung des Streubilds und Wiederholgenauigkeit des Binderflächengewichts für die Konfigurationen

Auf Grundlage der Streubilder sowie der Streuzeit und der Abweichung der Bindermenge zwischen den Wiederholungen soll nachfolgend der Einfluss der Elemente im Trichter und deren Positionen auf eben diese diskutiert werden. Zu diesem Zweck werden in Abbildung 5-31 die Streuzeit, Abweichung des Streubilds sowie die Mittlere Ab-

weichung zwischen den Wiederholungen gegeneinander aufgetragen. In den Abbildungen sind jeweils Gruppen von Konfigurationen durch einen farblichen Cluster hervorgehoben.

In Abbildung 5-31a wird deutlich, dass Konfigurationen mit dem Element Sieb in der unteren Ebene im Vergleich zu Konfigurationen ohne Sieb in der unteren Ebene zwar im Mittel eine höhere Streuzzeit benötigen, andererseits das Streubild deutlich homogener ausfällt. Ein Einfluss aus der Anzahl der Elemente auf Streuzzeit und Streubild kann nicht abgeleitet werden (Abbildung 5-31b).

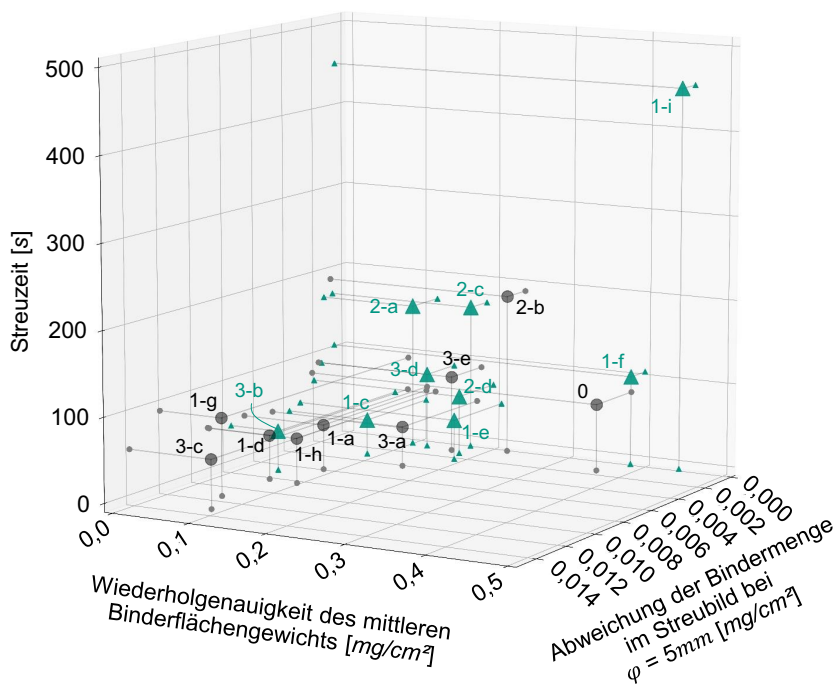


Abbildung 5-32: Dreidimensionale Darstellung der Zielgrößen. Pareto-optimale Konfigurationen sind grün hervorgehoben.

Bei der Betrachtung der mittleren Abweichung der Streumenge zwischen den Wiederholungen innerhalb einer Konfiguration fällt auf, dass sowohl das Element Druckdom als auch das Element Schrotkäfing einen positiven Einfluss auf die mittlere Abweichung

haben. Weiterhin kann durch beide Elemente die Streuzeit verringert werden (Abbildung 5-31c und d).

Aus den berechneten Streubildern, Streuzeiten sowie Wiederholgenauigkeiten soll nun eine optimale Konfiguration gemäß der Anforderungen ausgewählt werden. Da sich die Konfigurationen teilweise gegenläufig auf die drei Kennzahlen auswirken, kann keine einzelne Konfiguration ausgewählt werden, die in den drei Kennzahlen gleichzeitig das Optimum darstellt. Es lassen sich jedoch Pareto-optimale<sup>9</sup> Lösungen im Zielkonflikt aus Streubild, Streuzeit und Wiederholgenauigkeit finden. In Abbildung 5-32 sind die drei Zielgrößen dargestellt, welche alle minimiert werden müssen. Es wird jeweils der Wert im dreidimensional von den Achsen aufgespannten Raum markiert sowie auf die drei Ebenen projiziert. Die Pareto-optimale Lösungen sind durch ein grünes Dreieck markiert.

In Tabelle 5-5 sind die drei Kennzahlen der Pareto-optimale Konfigurationen zusammengefasst dargestellt. Grau hervorgehoben sind dabei die Konfigurationen, bei denen eine Kennzahl deutlich über dem Mittelwert der anderen Konfigurationen liegt und die daher ebenfalls aus dem Lösungsraum ausgeschlossen werden.

Je nach Ausprägung der Anforderungen sind demnach die Konfigurationen 1-e, 2-d und 3-d als optimal zu betrachten. 1-e zeichnet sich durch die kürzeste Streuzeit aus, während 3-d das beste Streubild und die geringsten Abweichungen zwischen Wiederholungen aufweist. 2-d stellt einen Kompromiss zwischen 1-e und 3-d dar.

*Tabelle 5-5: Berechnete Kennzahlen der pareto-optimale Konfigurationen*

Konf.	Abweichung des Streubilds bei $\varphi = 5\text{mm}$ [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]	Mittlere Abweichung zwischen den Wiederholungen [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ]	Streuzeit [s]
1-c	0,0041	0,11	41,0
1-e	0,0034	0,21	47,0
1-f	0,0011	0,40	105,3
1-i	0,0010	0,46	452,4
2-a	0,0018	0,12	168,3
2-c	0,0012	0,19	169,9
2-d	0,0024	0,20	69,1
3-b	0,0080	0,06	46,4
3-d	0,0019	0,14	87,8
$\varnothing$	0,0028	0,21	131,9

<sup>9</sup> Das Set aus pareto-optimale Lösungen (Pareto-Menge) beschreibt genau diejenigen Lösungen in einem Konflikt aus mehreren Zielgrößen, bei denen es nicht möglich ist, eine Zielgröße zu verbessern ohne gleichzeitig eine andere zu verschlechtern. (Schütze & Hernández 2021, S. 7–8).

### 5.2.7 Modellvalidierung

Zum Nachweis der Modellgüte werden zwei Konfigurationen ausgewählt und das berechnete Streubild mit dem realen Streubild verglichen. Die Validierung erfolgt anhand einer der Pareto-optimalen Konfigurationen sowie einer Konfiguration zum Vergleich, deren Kennzahlen möglichst weit von der Pareto-Front entfernt sind. Als Pareto-optimale Konfiguration wird 3-d gewählt, als Vergleichskonfiguration 1-b.

Es werden Zylinderproben mit einem Durchmesser von 36 mm bei fünf Wiederholungen erstellt. Die Maschinenparameter für beide Konfigurationen werden anhand des Modells (vgl. Kapitel 5.2.4) berechnet und sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst.

*Tabelle 5-6: Maschinenparameter und Düsenkonfigurationen für die Validierungsversuche*

	Konfiguration 1-b	Konfiguration 3-d
Düsenvorschub $v_D$ [mm/s]	7,6	5,8
Kerndrehzahl $n_K$ [U/min]	90	90
Element Ebene 1	Sieb	Druckdom
Element Ebene 2	-	Schrotkäfig
Element Ebene 3	-	Sieb



*Abbildung 5-33: Fotos der Streubilder für die Konfigurationen 1-b (a) und 3-d (b)*

In Abbildung 5-33 sind die Ergebnisse des Binderauftrags für eine Wiederholung beider Konfigurationen dargestellt. Es werden die Fotos gezeigt, welche anschließend für die graphische Auswertung verwendet werden. Daher sind im Hintergrund die notwendigen weißen und schwarzen Kontrollfelder sichtbar. Schon beim Betrachten der Fotos wird deutlich, dass das Streubild von Konfiguration 3-d sehr homogen ist, während das

Streubild von Konfiguration 1-b sehr inhomogen ist und makroskopisch viele Binderanhäufungen aufweist.

Die Streubilder beider Konfigurationen werden mittels des in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Verfahrens bildbasiert ausgewertet und jeweils mit den modellierten Streubildern verglichen. In Abbildung 5-34 sind die Streubildgraphen für beide Konfigurationen jeweils für Modell und Experiment dargestellt.

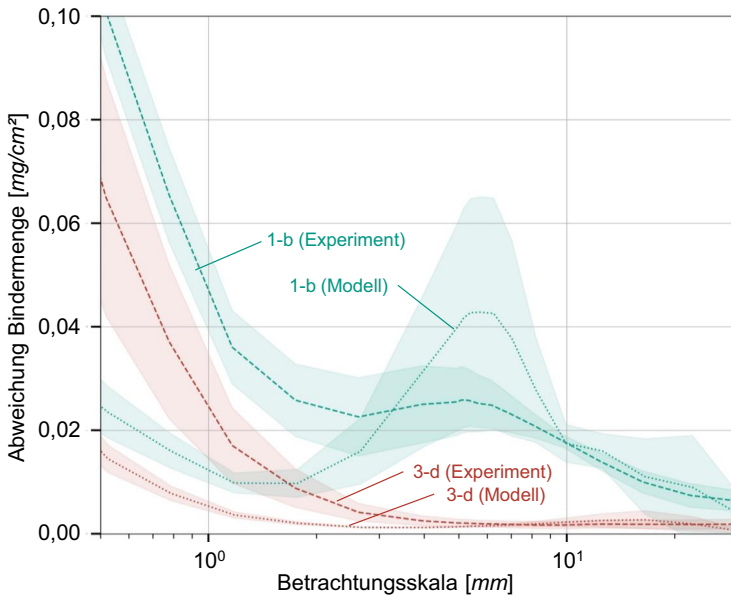


Abbildung 5-34: Vergleich der experimentell ermittelten und modellbasiert berechneten Streubildgraphen für die Konfigurationen 1-b und 3-d

Für Betrachtungsskalen größer als etwa 2 bis 4 mm zeigen Modell und Experiment für beide Konfigurationen eine sehr gute Übereinstimmung. Sowohl die Position der Mittellinie als auch die Breite des Fensters (Wiederholgenauigkeit des Streubilds) wird in diesem Bereich sehr gut durch das Modell vorhergesagt.

Für kleinere Betrachtungsskalen wird die Abweichung der Bindermenge durch das analytische Auftragsmodell unterschätzt. In diesem Bereich steigt die Abweichung der experimentellen Proben teilweise auf mehr als das Dreifache verglichen mit dem Modell an. Der höhere Anstieg resultiert unter anderem aus der Vereinfachung im Modell, dass



das Streubild entsprechend der Verfahrensgeschwindigkeit linear skaliert wird und dadurch der Einfluss einzelner Partikel verzerrt wird.

In Abbildung 5-35 werden die Binderflächengewichte von Modell und Experiment auf drei verschiedenen Betrachtungsebenen gegenübergestellt. Auf makroskopischer Ebene wird eine gute Übereinstimmung der Streubilder sichtbar. Der oben beschriebene Grund für die Abweichung wird insbesondere in der mikroskopischen Betrachtung des Streubilds deutlich. So sind in den experimentellen Streubildern einzelne Erhebungen deutlich sichtbar. In den modellierten Streubildern werden diese jedoch durch die lineare Skalierung „verschmiert“, sodass die Erhebungen in diesem Bereich deutlich geringer ausfallen.

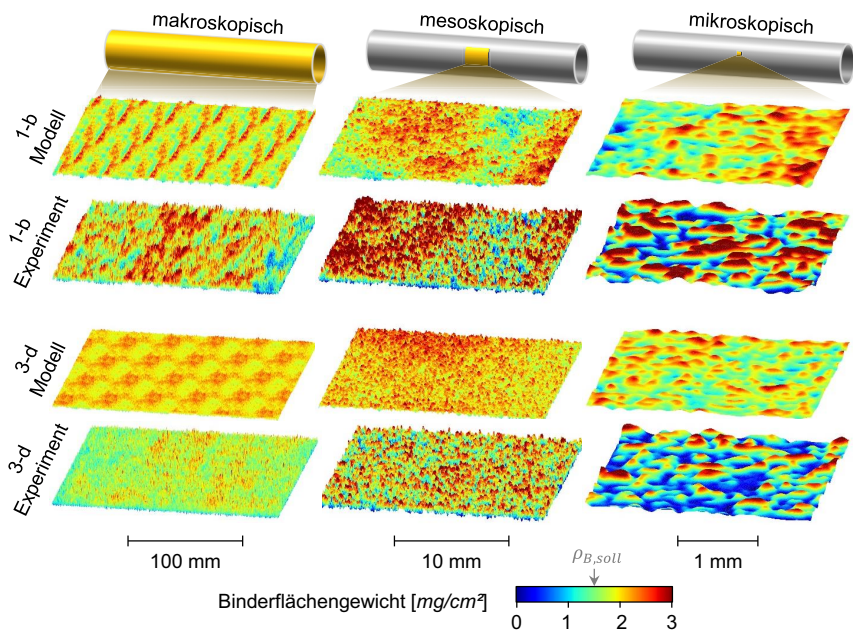


Abbildung 5-35: Makro-, meso- und mikroskopische Darstellung der Binderflächengewichte zum Vergleich von Modell und Experiment für die Konfigurationen 1-b und 3-d

Ein Vergleich der experimentell ermittelten Binderflächengewichte auf der kleinsten Skala mit den mikroskopischen Aufnahmen des Binderpulvers aus Kapitel 5.2.1 (Abbildung 5-10) lässt die Schlussfolgerung zu, dass es sich bei den lokalen Maxima des

Binderflächengewichts um einzelne Binderpulverkristalle handelt. Daher ist es naheliegend, dass diese durch die lineare Skalierung im Modell künstlich „kleiner gerechnet“ wurden, in der Realität einzelne Binderpartikel jedoch in Ihrer Größe nicht durch den Austrag verändert werden. Die Abweichung zwischen Experiment und Modell ist demnach der Art der Modellierung geschuldet. Auf die Aussagekraft des Modells, eine optimale Konfiguration für die Düse auszuwählen, hat die Abweichung jedoch keinen Einfluss.

**Fazit:** Die in Kapitel 4.1 gestellten Randbedingungen für die Gesamtprozesskette wurden auf die Anforderungen für den Prozessschritt Binderauftrag übertragen. Darauf aufbauend wurde ein Modul zum Binderauftrag konzipiert, entworfen und umgesetzt. Eine Herausforderung in der Auslegung des Binderauftragsprozesses stellt die Wahl der Austragsdüse dar. Zu diesem Zweck wird ein analytisches Modell entwickelt, welches ausgehend von Binderauftragsversuchen den Auftrag für verschiedene Düsenkonfigurationen vorhersagt. Das Modell wird experimentell validiert und es wird eine optimale Konfiguration für die Gestaltung der Düse ausgewählt. Der Prozessschritt des Binderauftrags gilt somit als verstanden.

## 6 Einzelprozess: Drapierung

Die Gliederung des Kapitel 6 erfolgt im gleichen Sinne wie die Gliederung des Kapitel 5 (vgl. Abbildung 6-1). Zuerst wird das Anlagenmodul zur Drapierung systematisch entwickelt und ein Grundverständnis über die Prozesse während der Drapierung aufgebaut. Anschließend erfolgt eine Modellierung des Drapiervorgangs, um den Prozess richtig einstellen zu können.

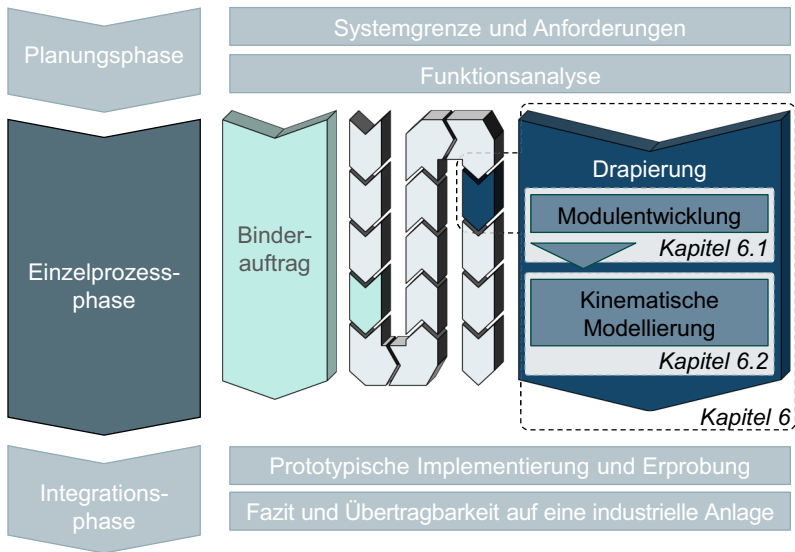


Abbildung 6-1: Einordnung der Prozessschrittentwicklung zur Drapierung in der übergeordneten Vorgehensweise

### 6.1 Modulentwicklung

Das Ziel des Anlagenmoduls Drapierung ist die Umformung des monolithischen Preforms in einer Art und Weise, dass das Geflecht nach der Drapierung der Geometrie des Lasteinleitungselements folgt und somit endkonturnah der Form des späteren Bauteils entspricht. Analog zur Modulentwicklung des Binderauftrags orientiert sich die Vorgehensweise an der VDI 2221-1 (VDI 2221-12019-11-00). Es werden zuerst Anforderungen an das Drapiermodul aus den übergeordneten Anforderungen an die Gesamtanlage abgeleitet (Kap. 6.1.1). Anschließend werden Konzepte für das Modul entwickelt und ein Lösungsprinzip ausgewählt (Kap 6.1.2). Aus dem Konzept wird ein physischer

Entwurf abgeleitet, welcher in Hardware umgesetzt wird (Kap. 6.1.3). Um ein besseres Verständnis für die Vorgänge innerhalb des Moduls zu schaffen, wird schließlich ein Finite-Elemente(FE)-Modell erstellt, mit welchem der Drapiervorgang analysiert werden kann (Kap. 6.1.4). Die Erkenntnisse aus dem FE-Modell bilden die Grundlage für das sich anschließende Kapitel 6.2 zur kinematischen Modellierung der Drapierung.

### 6.1.1 Anforderungsanalyse

Aufbauend auf den Anforderungen an den Gesamtprozess sowie den hybriden Preform werden die Anforderungen für das Drapiermodul abgeleitet.

Im Prozessschritt des Drapierens wird der monolithische Preform umgeformt. Dieser wird im vorherigen Prozessschritt aufgeheizt, sodass das aufschmelzbare Binderpulver verflüssigt wird und somit eine Verformung zulässt. Daraus lassen sich zwei Anforderungen ableiten: Erstens müssen sämtliche Bauteile, welche in Kontakt mit dem Preform stehen, der Bindererweichungstemperatur standhalten. Zweitens muss der Prozess der Drapierung so schnell erfolgen, dass der Binder in der Prozesszeit nicht wieder erstarrt und eine Drapierung somit unmöglich wird. Eine Aufheizung des Drapiermoduls über die Erweichungstemperatur wird ausgeschlossen, da durch ein langes Verbleiben der Preformtemperatur über der Bindererweichungstemperatur der Binder aus dem Bereich zwischen den Lagen herausdiffundiert und somit die Steifigkeit des Preforms abnimmt (vgl. (Dickert 2015, S. 103–105; Coutandin 2020, S. 93–97)).

Das offene Ende des Preforms ist besonders gefährdet für eine Faserfehlorientierung, da der Zusammenhalt der Fasern an dieser Stelle aufgrund des Schnitts herabgesetzt ist und die Fasern unter Belastung zum Ausfransen neigen. Ein Ausfransen ist zu vermeiden bzw. zu minimieren, da die Faserfehlorientierungen Schwachstellen im Bauteil darstellen.

Der hybride Preform muss endkonturnah dem späteren Bauteil entsprechen, damit ein Einlegen in das Schleuderwerkzeug ermöglicht wird. Da in der Drapierung der monolithische Preform umgeformt wird, ist dieser Schritt entscheidend für die Form des hybriden Preforms. In Abbildung 6-2 sind die Ausgangssituation sowie das Zielbild nach der endkonturnahen Drapierung des Preforms auf das LEE schematisch dargestellt.

Durch die Vielzahl an möglichen Überlappgeometrien, Durchmesser und Längen ist das Drapiermodul möglichst einfach und nach Möglichkeit modular aufzubauen, sodass ein Wechsel der Geometrie mit geringem Umrüstaufwand und -kosten möglich ist.

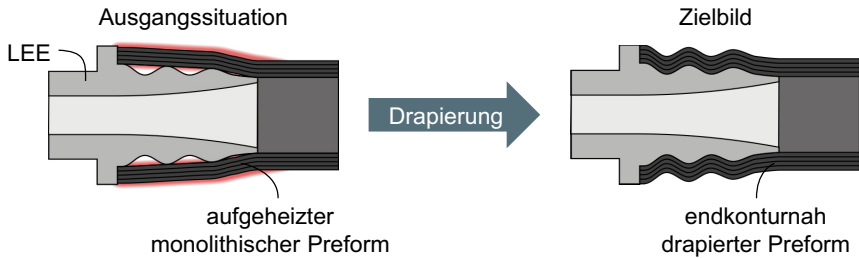


Abbildung 6-2: Ausgangssituation vor der Drapierung und Zielbild nach der endkonturnahen Drapierung des Preforms auf das LEE (Schematische Darstellung)

Das Drapiermodul wird in diesem Kapitel anhand der Schikanegeometrie erprobt und in Kapitel 7 im Rahmen der Erprobung der Gesamtprozesskette auf die Bauteilgeometrie adaptiert.

### 6.1.2 Konzeptionierung

In diesem Kapitel werden die aus den gestellten Anforderungen abgeleiteten Funktionen betrachtet und Lösungsprinzipien für diese diskutiert. Schließlich wird ein Lösungsprinzip für das weitere Vorgehen ausgewählt.

Eine Drapierung bzw. Umformung des Flechtschlauchs erfolgt durch die textilen Hauptdeformationsmechanismen Scherung und Biegung (vgl. Kapitel 2.3.9). Eine Streckung oder Stauchung des Textils in Faserrichtung ist aufgrund der sehr viel höheren Faserzugsteifigkeit verglichen mit der Scher- und Biegesteifigkeit zu vernachlässigen. Eine Stauchung führt aufgrund der niedrigen Biegesteifigkeit in der Regel zu einem Aufwerfen der Faserlagen und damit zu einer unerwünschten Faltenbildung.

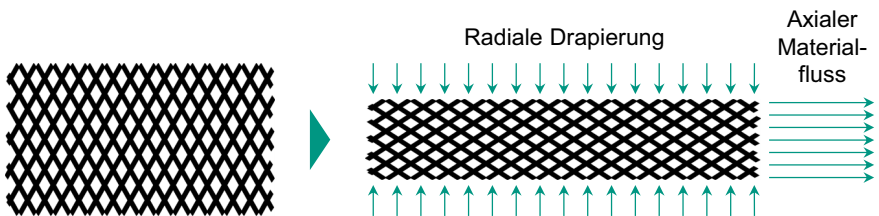


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung für den Zusammenhang aus radialer Drapierung und axialem Materialfluss

Die Scherung eines Flechtschlauchstücks ist schematisch in Abbildung 6-3 dargestellt. Für die endkonturnahen Drapierung des monolithischen Preforms wird insbesondere

eine radiale Drapierung an die Kontur des LEE benötigt. Aufgrund der Kinematik des Flechtschlauchs resultiert eine radiale Verformung in Folge der mesoskopischen Scherung des Textils makroskopisch in einer axialen Verformung. Die axiale Verformung im Prozess muss folglich synchron zur radialen Umformung erfolgen, um eine Faltenbildung zu vermeiden.

Die Hauptfunktionen für die Drapierung des monolithischen Preforms auf das LEE sind daher die **radiale Drapierung** und die **Sicherstellung des axialen Materialflusses**.

Im Stand der Technik existiert bereits eine Vielzahl von Drapierverfahren für die Umformung schalenförmiger Halbzeuge, welche in Kapitel 2.3.7.1 vorgestellt wurden. Die wichtigsten Verfahren sind die Stempel-, die Rollen- und die Membrandrapierung.

In (A\_Lico 2017) werden die schalenförmigen Verfahren auf die hier notwendige radiale Drapierung adaptiert. In Abbildung 6-4 sind die adaptierten Umformverfahren schematisch dargestellt.

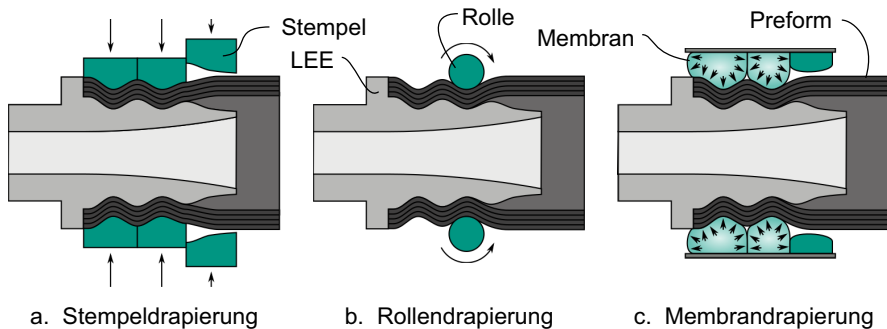


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der Stempel- (a), Rollen- (b) und Membrandrapierung (c) während der radialen Drapierung des Preforms.

Anhand der in Kapitel 6.1 aufgestellten Anforderungen wird das Potential zur Erfüllung der Anforderungen durch die drei Konzepte Stempel-, Rollen- und Membrandrapierung abgeschätzt (vgl. Abbildung 6-5). Es werden die Kriterien Temperaturresistenz (durch den heißen Preform), Geschwindigkeit (der Drapierung), Tendenz zum Ausfransen an den Enden des Preforms, Potential für eine endkonturnahe Drapierung, die Adaptierbarkeit an neue Geometrien sowie die Einfachheit der Lösung (technologische Komplexität) bewertet. Nachfolgend werden die drei Konzepte vorgestellt und die Erfüllung der Anforderungen diskutiert. (A\_Lico 2017, S. 38–40)

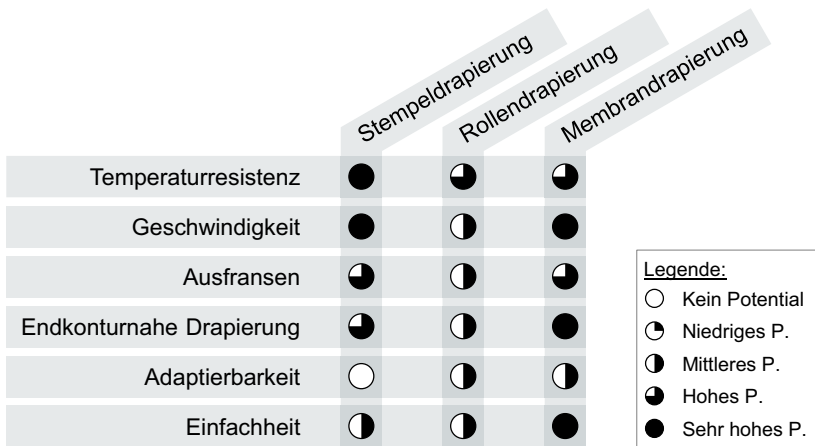


Abbildung 6-5: Potentialanalyse der drei Konzepte für die radiale Drapierung (in Anlehnung an (A\_Lico 2017, S. 39))

Für die Stempeldrapierung (Abbildung 6-4a) wird der Überlappbereich in axialer und in radialer Richtung in diskrete Segmente unterteilt. In axialer Richtung können das bspw. die dargestellten drei Segmente sein. Der Umfang sollte wenigstens 4-mal, besser 8-mal unterteilt werden, um eine möglichst radiale und wenig tangentielle Drapierung zu erreichen. Die Stempel werden jeweils durch einen Linearaktuator in radialer Richtung bewegt. Durch die notwendige Anzahl an Stempeln (24) und deren starren Formausprägung ist die Komplexität dieses Systems sehr hoch und eine Adaptierbarkeit an neue Formen eingeschränkt. (A\_Lico 2017, S. 39–40)

Bei der Rollendrapierung (Abbildung 6-4b) rollt eine starre oder formflexible Rolle auf dem LEE in axialer Richtung ab. Dabei wird die Rolle (bzw. mehrere Rollen über den Umfang) in radialer Richtung entweder über eine Linearachse oder eine gefederte Lagerung entlang der Kontur bewegt. Gleichzeitig müssen die Rollen synchron in axialer Richtung bewegt werden. Vorteilhaft ist bei diesem Konzept je nach Form der Rollen eine gute Adaptierbarkeit an neue Geometrien, jedoch ist die physische Umsetzung sehr aufwändig und fehleranfällig für Ausfransen und eine nicht endkonturnahe Drapierung. (A\_Lico 2017, S. 39)

Das Konzept Membrandrapierung (Abbildung 6-4c) beruht auf der gleichnamigen Membrandrapierung beim schalenförmigen Preforming. Beim schalenförmigen Preforming erfolgt die Formgebung jedoch durch die Erzeugung eines Unterdrucks, durch welchen

die Membran die darunterliegenden Textilien an einer Werkzeughälfte abformt. Da eine Abdichtung des Raumes bei der radialen Drapierung ausgeschlossen scheint, werden bei diesem Konzept Membranen verwendet, welche mit einem Überdruck beaufschlagt werden und somit expandieren. Durch die gezielte Expansion wird der Preform radial in die Vertiefungen gedrückt. Vorteilhaft sind hierbei die hohe mögliche Geschwindigkeit sowie eine endkonturnahe Drapierung. Weiterhin erscheint das Verfahren verglichen mit den anderen Konzepten sehr einfach. Lediglich die Temperaturresistenz der Membranen sowie die eingeschränkte Adaptierbarkeit für begrenzte Durchmesseränderungen werden negativ bewertet. (A\_Lico 2017, S. 39–40)

Insgesamt wird die Membrandrapierung als das überlegene Konzept bewertet (vgl. Abbildung 6-5) und daher als Lösungsprinzip für die Funktion radiale Drapierung weiterverfolgt.

Für die Funktion „Sicherstellung des axialen Materialflusses“ wird ein Lösungsprinzip wie in Abbildung 6-6 verfolgt. Dabei werden der Greifer am LEE und der Greifer am Preform in axialer Richtung relativ zueinander bewegt, sodass genau der notwendige Materialfluss kompensiert wird. Voraussetzung für dieses Prinzip ist jedoch, dass die radiale Drapierung von den Enden des Preforms her zu dessen Mitte hin erfolgt. Daher wird der Bereich der Membranen in diskrete Abschnitte unterteilt, welche in kurzen Abständen nacheinander angesteuert werden.

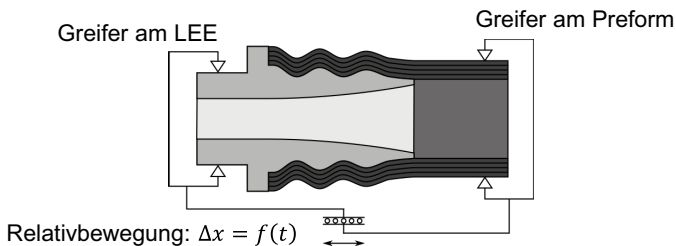


Abbildung 6-6: Relativbewegung zwischen Preform und LEE zur Erreichung des axialen Materialflusses (Schematische Darstellung)

### 6.1.3 Entwurf und Umsetzung Drapiermodul

Nach der vorangegangenen Funktionsanalyse sowie der Auswahl der Lösungsprinzipien für die radiale Drapierung und den axialen Materialfluss wird in diesem Kapitel der Entwurf und die Umsetzung des Drapiermoduls vorgestellt.



In Abbildung 6-7 ist ein 3-D-Rendering des Drapiermoduls innerhalb des Versuchsstands farblich hervorgehoben dargestellt. Der zugehörige Versuchsstand inklusive der zugehörigen Steuerungstechnik wird in (A\_Yangui 2018) entwickelt, in (A\_Döhring 2018) in Betrieb genommen sowie in (A\_Wagner 2020) für einen teilautomatisierten und reproduzierbaren Prozess optimiert. Für eine Beschreibung und Dokumentation des Versuchsstands sei an dieser Stelle auf die entsprechenden Arbeiten verwiesen.

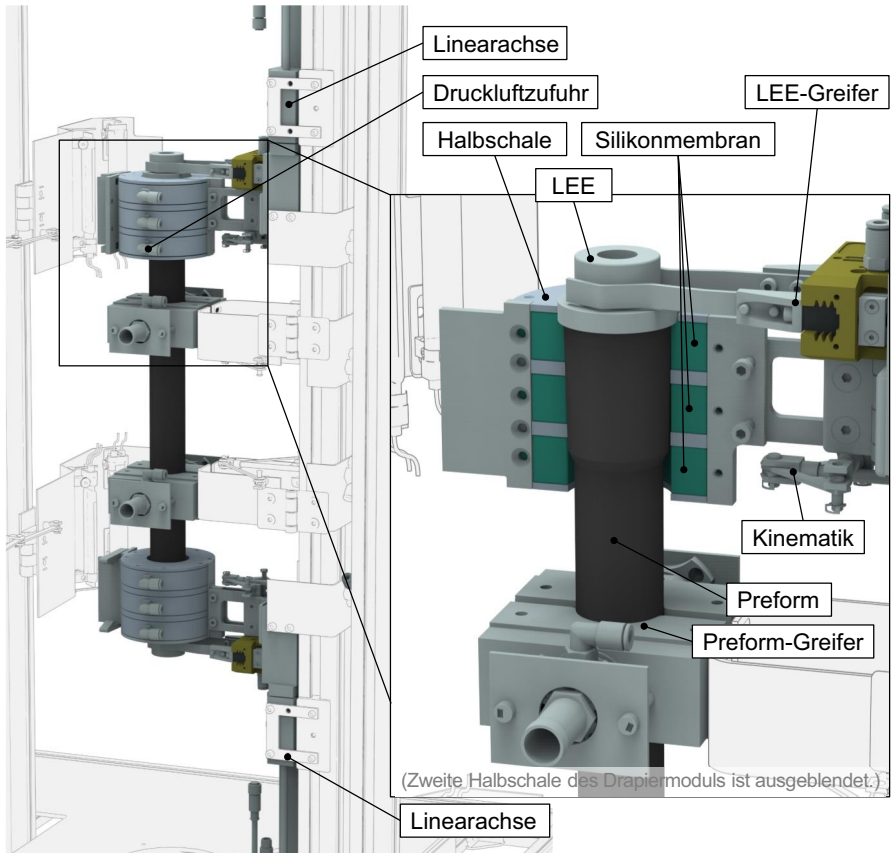


Abbildung 6-7: 3-D-Rendering des Drapiermoduls innerhalb des Versuchsstands

Die Drapiermodule sind so angeordnet, dass die Symmetrieachse des hybriden Preforms im Gegensatz zu den bisherigen schematischen Darstellungen und Skizzen ver-

tikal ausgerichtet ist. Da die radiale Drapierung somit horizontal verläuft wird sichergestellt, dass die Gravitationskraft keinen Anteil an der Radialkraft hat und somit das Drapierergebnis möglichst symmetrisch ist.

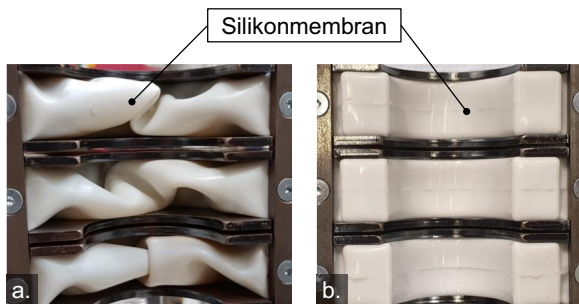
Der axiale Materialfluss wird durch zwei Linearachsen sichergestellt, welche jeweils die Drapiermodule inkl. der Greifer am LEE im Ganzen in axialer Richtung verfahren und somit eine Relativbewegung zwischen den Greifern am LEE und denen am Preform sicherstellen. Die Linearachsen sind vom Typ Festo EPCO 16-3P mit einem maximalen Hub von 125 mm (A\_Yangui 2018, S. 44). Sie werden jeweils am oberen und unteren Bildrand von Abbildung 6-7 gezeigt.

Das Drapiermodul besteht aus zwei Halbschalen, welche über eine Kinematik um den Überlappbereich zwischen Preform und LEE geschlossen werden können, nachdem der Preform im Überlappbereich erwärmt wurde. In jeder Halbschale befinden sich mehrere abgedichtete Kammern, welche zur Innenseite hin mit einer Silikonmembran verschlossen sind. Die Kammern wiederum können einzeln mit Druckluft beaufschlagt werden, sodass sich die Membranen in Richtung des Preforms ausdehnen und den Preform auf die Form des LEE drapieren. Für die Schikanengeometrie werden die beiden Halbschalen entsprechend der Anzahl an Hinterschnitten in 3 Kammern aufgeteilt. (A\_Lico 2017, S. 40–44)

Die Membranen bestehen aus einem temperaturstabilen Silikon, um dem erhitzten Preform standhalten zu können. Für die Herstellung der Membranen werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Im ersten Ansatz werden flächige Silikonmembranen vom Typ Steinbach Silicone 35 White mit einer Stärke von 1 mm verwendet. Aus diesen wird mittels einer Schablone eine passende Membran ausgeschnitten, welche dann in das Drapierwerkzeug eingespannt wird. Aufgrund der Umformung des flächigen Membranmaterials in die Zwangslage innerhalb des Drapierwerkzeugs kommt es zu einer starken Faltenbildung der Membran (vgl. Abbildung 6-8a). Durch die Faltenbildung der Membran kann eine symmetrische radiale Drapierung des Preforms nicht sichergestellt werden, was in Versuchen bestätigt wurde (A\_Lico 2017, S. 58; A\_Döhring 2018, S. 42)

Ein alternativer Ansatz zur Herstellung der Membranen ist ein Gussprozess. Dafür wird ein additiv vernetzendes, bei Raumtemperatur gießfähiges 2-Komponentensilikon drucklos in eine entsprechende Kavität gegossen. Nachteilig ist hierbei, dass für jede neue Membranform ein neues Gusswerkzeug hergestellt werden muss. Dieses besteht

jedoch lediglich aus drei einfachen 3-Achs-Aluminium-Frästeilen mit einseitiger Einspannung, daher wird der Mehraufwand als akzeptabel bewertet. In Abbildung 6-8b sind die so hergestellten Membranen im Drapierwerkzeug dargestellt. Als Material wird das Silikon ELASTOSIL M 4630 verwendet, welches im vulkanisierten Zustand ähnliche Eigenschaften wie die flächigen Silikonmembranen Steinbach Silicone 35 White aufweist (vgl. Materialdaten in Abbildung 6-8). (A\_Döhring 2018, S. 43–48)



Material	Steinbach Silicone 35 White	Wacker ELASTOSIL M 4630
Materialhärte [Shore A]	35 ± 5	28
Reißfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	6,0	6,5
Reißdehnung [%]	700	700
Temperaturbeständigkeit [°C]	200	180

Abbildung 6-8: In das Drapierwerkzeug eingespannte Membranen, hergestellt aus flächigen Membranen (a) und aus gegossenen Membranen (b), sowie Materialdaten nach Herstellerangaben (Steinbach AG 2019; Wacker Chemie AG 2020)

#### 6.1.4 Analyse des Drapierverhaltens

Da das Drapiermodul den Preform und das LEE bündig umschließt, ist eine messtechnische Beobachtung der Drapierung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Um dennoch ein Grundverständnis für die Vorgänge innerhalb des Drapiermoduls während der Drapierung zu erhalten, wird ein FE-Modell in der kommerziellen Software ABAQUS aufgebaut und der Drapiervorgang damit nachgebildet. Die Ergebnisse der dafür notwendigen Materialcharakterisierung sind in (Ruhland & Berger et al. 2019) veröffentlicht worden. Weiterhin ist das FE-Modell selbst in (Ruhland & Li et al. 2021) veröffentlicht. Nachfolgend werden daher die Ergebnisse der Materialcharakterisierung sowie der FE-

Modellierung zusammengefasst. Für Details sei auf die genannten Veröffentlichungen und die Abschlussarbeiten (A\_Berger 2018) sowie (A\_Li 2019) verwiesen.

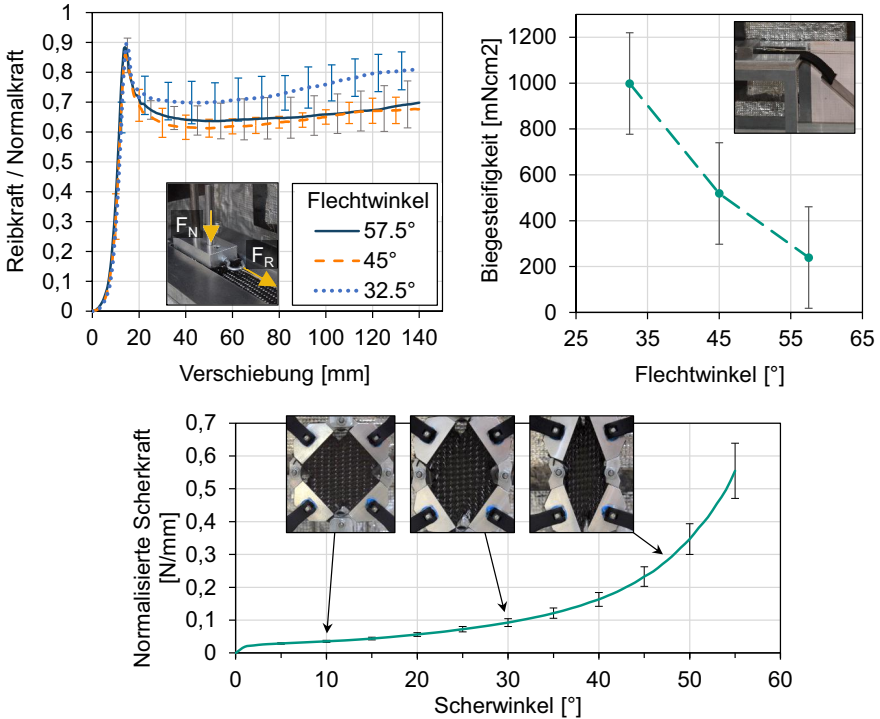


Abbildung 6-9: Materialparameter des verwendeten Flechtschlauchs (Ruhland & Berger et al. 2019)

Für die Modellierung der Drapierung wird ein makroskopischer Ansatz, wie er in (Nishi & Hirashima 2013), (Kärger & Galkin et al. 2018) und (Coutandin & Brandt et al. 2018) beschrieben wird, verwendet. Dabei wird der textile Preform derart modelliert, dass die Zug- und Schereigenschaften über Membranelemente (Typ: FABRIC) und die Biegeeigenschaften über Schalenelemente umgesetzt werden. Die notwendigen Materialparameter des Preforms, welche vorab ermittelt werden müssen, sind daher die Zug-, Scher- und Biegeeigenschaften. Weiterhin werden die Reibeigenschaften zwischen den Lagen des Preforms, zwischen Preform und LEE sowie zwischen Preform und Membran benötigt. Da die Zugsteifigkeit viel größer ist als die Schersteifigkeit, spielen

die Zugeigenschaften eine untergeordnete Rolle und werden aus der Literatur übernommen. Die restlichen Materialeigenschaften sind für die bekannte Materialkombination in Abbildung 6-9 zusammengefasst dargestellt. (Ruhland & Li et al. 2021)

Der Reibkoeffizient wird mit einem Reibschlitten, auf den die jeweiligen Materialpaarungen aufgezogen werden können, in einem Ofen bei den entsprechenden Umformtemperaturen über der Bindererweichungstemperatur ermittelt. Es werden drei Kurven bei drei unterschiedlichen Flechtwinkeln ( $32,5^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $57,5^\circ$ ) untersucht. Es zeigt sich nach einem Losreißen ein gleichmäßiger Verlauf und somit konstanter Reibkoeffizient. Analog zum Reibkoeffizienten werden die Biegeeigenschaften quer zur Längsachse über den Cantilever-Test bei verschiedenen Flechtwinkeln ermittelt. Es zeigt sich der nahe liegende Zusammenhang, dass die Biegesteifigkeit mit steigendem Flechtwinkel abnimmt, da so die Fasern weniger in Richtung der Biegebelastung ausgerichtet sind. Die Ermittlung der Schereigenschaften erfolgt mit dem Picture-Frame-Test, wobei dieser aufgrund des geringen Durchmessers der Flechtschläuche zuerst auf die kleineren Maße durch eine Verringerung der Schenkellängen auf 60 mm adaptiert und mit Hilfe bekannter Materialparameter qualifiziert wird. Es zeigt sich mit steigendem Scherwinkel ein ansteigender Scherkraftverlauf, wie er aus der Scherung von Geweben bekannt ist (z.B. (Coutandin 2020)): Bei geringem Scherwinkel steigt die Scherkraft nahezu linear an. Bei größeren Scherwinkeln, wenn sich die Rovings berühren und somit die Scherung blockieren, steigt die Scherkraft deutlich an und es lassen sich Falten und Welligkeiten beobachten. (Ruhland & Berger et al. 2019)

Der Simulationsbereich des FE-Modells umfasst die Außenkontur des LEE (modelliert als Starrkörper), einen dreilagigen Preform im Überlappbereich sowie die sechs Membranen. Unter Ausnutzung der Symmetrie wird der Simulationsbereich einmal längs axial halbiert. Die Schalenelemente werden in Anlehnung an die Arbeiten in (Korochkina & Jewell et al. 2008) und (Jauffrès & Sherwood et al. 2010) mit S4R-Elementen vernetzt. Die Membranelemente (Materialmodell: FABRIC) werden mit M3D4R-Elementen vernetzt und derart geteilt, dass die Elementkanten der Faserrichtung folgen. Die Silikonmembranen werden mit einem Bottom-Up-Ansatz (Cho & Kim et al. 2004) mit C3D8R-Elementen vernetzt und analog zu (Korochkina & Jewell et al. 2008) mit dem Ogden und dem Neo-Hooke-Materialmodell beschrieben. (Ruhland & Li et al. 2021; A\_Li 2019, S. 53)

Die Belastung der Membranen erfolgt durch einen gleichmäßigen Druck an der Innenseite, welcher linear ansteigt. Die Berechnung erfolgt auf dem Hochleistungsrechner

bwUniCluster auf 28 parallelen Octa-Core Intel Xeon E5-2670-Prozessoren gleichzeitig und dauert mehrere Stunden. (A\_Li 2019, S. 57–59)

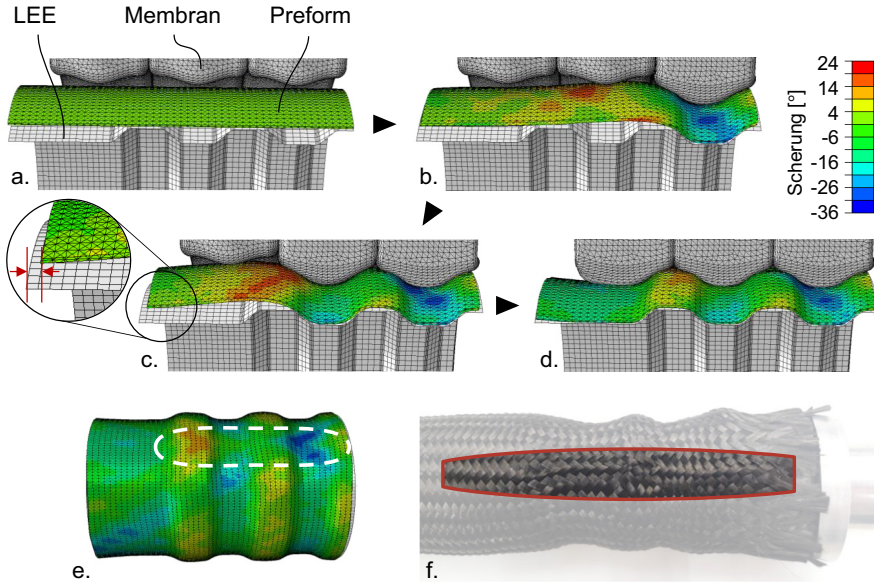


Abbildung 6-10: Ergebnisse der FE-Simulation für die nacheinander aktivierten Drapiermembranen (a-e) sowie Ergebnis eines Vorversuchs (f) (Ruhland & Li et al. 2021)

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Es werden nacheinander der Ausgangszustand (a), die Belastung des ersten (b), des zweiten (c) und des dritten (d) Membranrings als Falschfarbenbild des Scherzustands gezeigt. In Abbildung 6-10e ist weiterhin die Scherung am Umfang hervorgehoben, welche experimentell in einfachen Vorversuchen (f) bestätigt werden konnte.

Folgende Erkenntnisse können aus dem FE-Verständnismodell gezogen werden:

- Der grundsätzliche Ansatz, mittels überdruckbeaufschlagter Membranen eine radiale Drapierung durchzuführen, sowie die Gestaltung des Drapiermoduls, kann in der Simulation erfolgreich überprüft werden.
- An dem freien Ende des Preforms kann ein axialer Materialeinzug, wie er in Kapitel 6.1.2 vorhergesagt wurde, beobachtet werden (vgl. Detailansicht in Abbildung 6-10c). Um eine Faserdesorientierung und Neigung zur Faltenbildung, wie

in Abbildung 6-10e und f gezeigt, im Rahmen einer sicheren und robusten Prozessführung zu vermeiden, ist ein geregelter axialer Materialfluss, welcher synchron zum Aufblasen der einzelnen Membranringe erfolgt, notwendig. Die Höhe der axialen Verfabrbewegung muss dafür bestimmt werden.

- Aufgrund der aufwendigen Modellierung sowie der langen Rechenzeit sollte die Berechnung der axialen Verfabrbewegung über ein einfach zu bedienendes und leicht adaptierbares Modell erfolgen.

Eine experimentelle Erprobung des Drapiermoduls ist an dieser Stelle nicht zielführend, da der axiale Materialfluss nicht vorhergesagt werden kann und die Ergebnisse daher nur eine geringe Aussagekraft hätten. Es wird daher nachfolgend ein kinematisches Modell für die Drapierung erarbeitet, mit welchem der axiale Materialfluss bestimmt und die axiale Verfabrbewegung des Bindermoduls entsprechend im Prozess geregelt werden kann.

## **6.2 Kinematische Modellierung der Maschinenparameter**

In diesem Kapitel wird ein kinematisches Modell zur Berechnung des axialen Materialflusses vorgestellt. Dafür wird im ersten Teil der Modellaufbau sowie der Algorithmus zur Berechnung vorgestellt. Anschließend wird eine Methodik zur Materialcharakterisierung vorgestellt, woraufhin das Modell und das Drapiermodul anhand der Schikangeometrie validiert wird. Schließlich wird mit einer Parameterstudie die Sensitivität der einzelnen Parameter untersucht.

### **6.2.1 Modellaufbau und Vorgehensweise zur Berechnung**

Die übergeordnete Vorgehensweise innerhalb des Modells ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Im ersten Schritt werden die Geometrie des LEEs sowie des monolithischen Preforms diskretisiert. Anschließend erfolgt unter Berücksichtigung der Materialparameter des Flechtschlauchs die Berechnung des Faserverlaufs auf dem LEE. Schließlich wird aus dem Filamentverlauf auf dem LEE und dem undrapierten Preform der axiale Materialfluss für jedes Membransegment bestimmt. Die Vorgehensweise wird in MATLAB R2020a implementiert. Sie lässt sich jedoch auch auf frei zugängliche Sprachen wie Python 3 unter Nutzung gängiger Bibliotheken einfach übertragen.

Nach einer Einführung der Modellannahmen in Kapitel 6.2.1.1 werden die einzelnen Berechnungsschritte ausführlicher beschrieben.

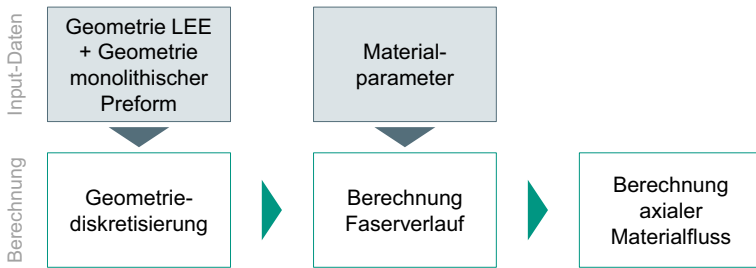


Abbildung 6-11: Vorgehensweise zur Berechnung des axialen Materialflusses

### 6.2.1.1 Annahmen

Die wesentlichen Annahmen zur kinematischen Modellierung der Drapierung sind nach (A\_Schygulla 2021, S. 51–52) folgende:

- Da die Zugsteifigkeit der Fasern sehr viel größer als deren Schersteifigkeit ist, wird die Zugsteifigkeit als unendlich groß betrachtet. Der einzige Deformationsmechanismus ist daher die Schubdeformation und die Biegung des Geflechts. (vgl. (Long 2007, S. 9)).
- Da bei der kinematischen Betrachtung keine Kräfte betrachtet werden, können Falten nicht vorhergesagt werden. Weiterhin werden Reibungseffekte vernachlässigt.
- Die Rovings des Flechtschlauchs sind entlang des Umfangs gleichmäßig verteilt und der Flechtschlauch ist nicht um seine Flechtachse tordiert.
- Die Wandstärke des Flechtschlauchs ist unabhängig vom Scherzustand konstant.
- Faserondulationen werden vernachlässigt.

### 6.2.1.2 Geometriediskretisierung

Der erste Schritt der Modellierung ist die Geometriediskretisierung. Es können Geometriedaten im binären Austauschformat STL verarbeitet werden. Im STL-Format liegt die Geometrie in Form von Dreiecksfacetten, wie in Abbildung 6-12a angedeutet, vor. Sie werden für das weitere Vorgehen aufbereitet, was den rechenintensivsten Prozessschritt ausmacht. Als Alternative wird ebenfalls ein parametrischer Ansatz untersucht, in welchem die Geometrie direkt in MATLAB erzeugt werden kann. Da dieser Ansatz



jedoch nicht allgemeingültig ist, wird er in diesem Fall lediglich für die Sensitivitätsanalyse der Geometrieparameter (vgl. Kapitel 6.2.5) verwendet.

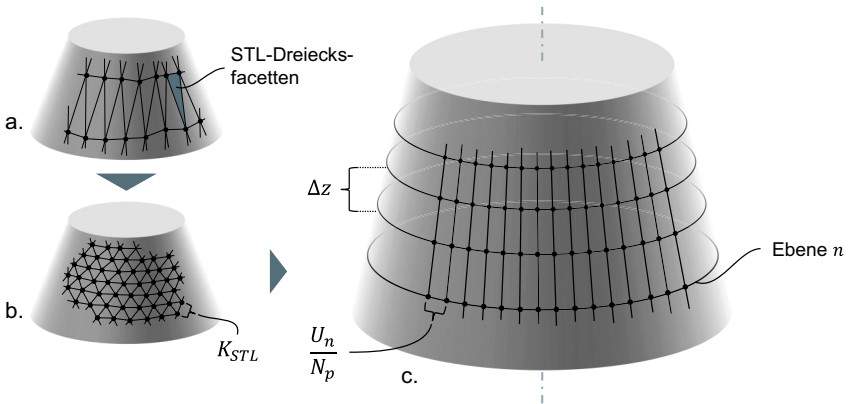


Abbildung 6-12: Schematische Darstellung der Geometriediskretisierung der Originalgeometrie (a), der nach (Manu 2020) mit gleichmäßiger Kantenlänge  $K_{STL}$  vernetzten Geometrie sowie der Diskretisierung in trapezförmigen Zellen (c)

Nach dem Einlesen der STL-Datei in MATLAB wird im ersten Schritt das Koordinatensystem anhand der vorhandenen Symmetrien automatisiert in die Geometrie gelegt. Anschließend wird das Netz der STL-Datei mit der Methode nach (Manu 2020) neu berechnet, sodass wie in Abbildung 6-12b dargestellt es aus gleichmäßigen Kantenlängen  $K_{STL}$  besteht. Die Kantenlänge  $K_{STL}$  hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Berechnungszeit (vgl. Kapitel 6.2.1.5). (A\_Schygulla 2021, S. 55–56)

Für die Diskretisierung wird die Geometrie entlang der Längsachse mit der Methode nach (Pariterre 2021) in Ebenen im gleichmäßigem Abstand  $\Delta z$  aufgeteilt (vgl. Abbildung 6-12c). Jede Ebene wird wiederum gleichmäßig in  $N_p$  Punkte aufgeteilt, deren Abstand zueinander sich über den Umfang der jeweiligen Ebene  $U_n$  berechnen lässt. Es entsteht somit ein Netz mit trapezförmigen Zellen, welches im nächsten Schritt für die Berechnung des Faserverlaufs herangezogen werden kann. (A\_Schygulla 2021, S. 57–58)

### 6.2.1.3 Algorithmus zur Berechnung des Faserverlaufs

Nach der Geometriediskretisierung erfolgt die Berechnung des Faserverlaufs. Die Berechnung beruht, wie eingangs beschrieben, auf der Annahme der reinen Schubdeformation. Die Schubdeformation kann anhand der Elementarzellen des Geflechts (vgl. Abbildung 6-13a) beschrieben werden. Die Elementarzelle wird durch eine Raute mit der Kantenlänge  $K$  mathematisch beschrieben. Bei der reinen Schubdeformation bleibt die Länge der Kanten konstant – sie sind somit nicht dehnbar. Die Verformung der Einheitszelle erfolgt durch eine reine Rotation der Kanten um die Schnittpunkte derselben, welche als Gelenke fungieren (vgl. Abbildung 6-13b). Dadurch ändert sich der Flechtwinkel  $\alpha$  sowie die Breite der Elementarzelle  $B$ . (A\_Schygulla 2021, S. 50–52)

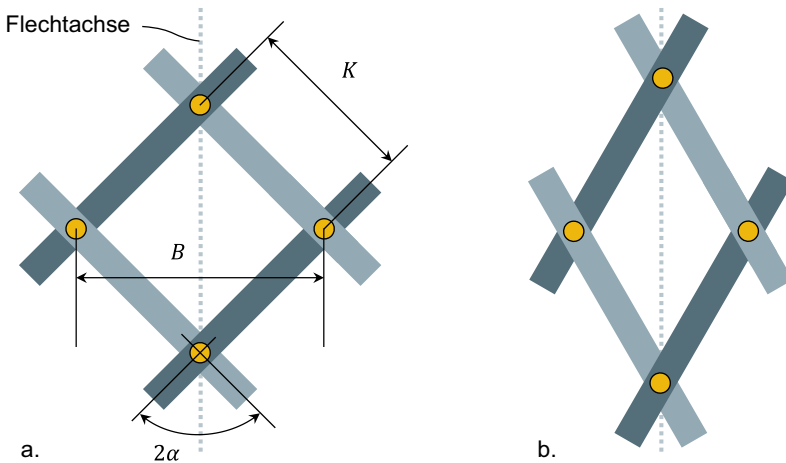


Abbildung 6-13: Größen an der unverformten Elementarzelle (a, eigene Darstellung nach (A\_Schygulla 2021, S. 51)) sowie eine gescherte Elementarzelle (b)

Unter der Voraussetzung, dass sich entlang des Umfangs  $U$  eines Flechtschlauchs mit der Rovinganzahl  $n_F$  genau  $n_F$  Elementarzellen befinden, gilt für die Breite der Elementarzelle  $B = U/n_F$ . Der Flechtwinkel  $\alpha$  lässt sich für jede Elementarzelle nach (A\_Schygulla 2021, S. 53) geometrisch zu Formel 6-1 berechnen:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left( 1 - \left( \frac{B^2}{2 \cdot K^2} \right) \right) = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left( 1 - \left( \frac{U^2}{2 \cdot n_F^2 \cdot K^2} \right) \right) \quad 6-1$$

Formel 6-1 legt damit die Grundlage für den nachfolgend beschriebenen Algorithmus zur kinematischen Berechnung des Faserverlaufs eines Flechtschlauchs entlang einer bestehende LEE-Geometrie.

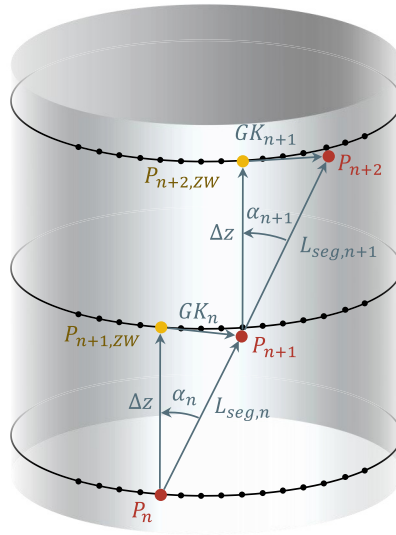


Abbildung 6-14: Geometrische Berechnung des Faserverlaufs

Die Berechnung erfolgt in der in Kapitel 6.2.1.2 eingeführten Diskretisierung der Geometrie und ist in Abbildung 6-14 schematisch dargestellt. Zur Berechnung des Faserverlaufs an einem beliebigen Punkt  $P_n$  wird zuerst mit Formel 6-1 der Flechtwinkel  $\alpha_n$  an dieser Stelle berechnet. Aus dem Ebenenabstand  $\Delta z$  lässt sich eine Gegenkathete  $GK_n$  berechnen, welche ein Dreieck aufspannt, deren Hypotenuse den Faserverlauf zwischen den zwei Ebenen näherungsweise beschreibt. Die Gegenkathete  $GK_n$  verläuft dabei tangential zum Kreisbogen im Zwischenpunkt  $P_{n+1,ZW}$  der nächsten Ebene. Der neue Ausgangspunkt  $P_{n+1}$  ist der gegenüberliegende Punkt auf dem gedachten Dreieck. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis alle Ebenen durchlaufen sind. (A\_Schygulla 2021, S. 53)

Aus den Längen der Einzelfasersegmente  $L_{seg,n}$  kann einfach die Gesamtlänge  $L_f$  der Faser  $f$  durch aufsummieren berechnet werden. (A\_Schygulla 2021, S. 59–60)

### 6.2.1.4 Berechnung des axialen Materialflusses

Für die Berechnung des axialen Materialflusses während der Drapierung wird die Faserlänge des monolithischen Preforms mit der Faserlänge des hybriden Preforms verglichen. Es gilt dabei die inhärente Randbedingung, dass die Faserlänge des drapierten, hybriden Preforms  $L_{f,hybrid}$  der Faserlänge des monolithischen Preforms  $L_{f,monolithisch}$  entsprechen muss (A\_Schygulla 2021, S. 60):

$$L_{f,hybrid} = L_{f,monolithisch} \tag{6-2}$$

Da die Faserlänge des hybriden Preforms aus der Geometrie des LEE vorgegeben ist, wird die Länge des in der Prozesskette davor entstehenden monolithischen Preforms daraus „zurück“-gerechnet (vgl. Abbildung 6-15a). Die Berechnung des Faserverlaufs des monolithischen Preforms wird folglich iterativ so lange fortgesetzt, bis die Randbedingung (Formel 6-2) erfüllt ist. Aus dem Längenvergleich beider Varianten kann dann einfach der notwendige axiale Vorschub der Maschine während der Drapierung berechnet werden.

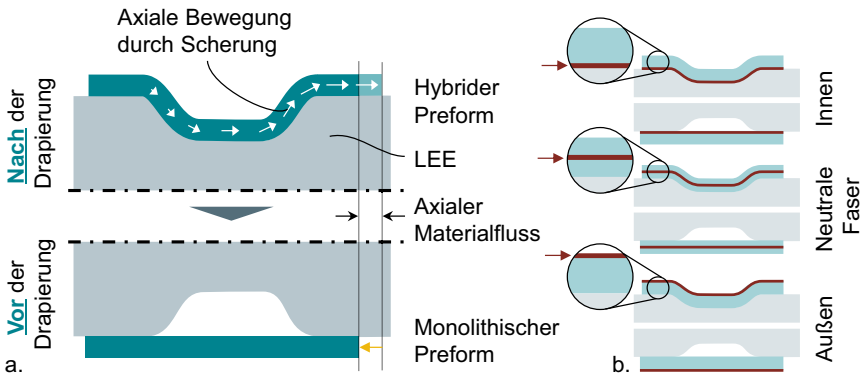


Abbildung 6-15: Schematische Darstellung der Berechnung des axialen Materialflusses aus dem hybriden Preform (a) und Position der Berechnungsposition innerhalb der Lagendicke (b) (eigene Darstellung nach (A\_Schygulla 2021, S. 62))

Einen Einfluss auf das Ergebnis hat die Position der Berechnung innerhalb der diskreten Dicke jeder Lage (vgl. Abbildung 6-15b). Je nachdem, ob die unendlich dünne Berechnungsebene innen, mittig oder außen innerhalb der Flechtschlauchdicke liegt,

ergibt sich eine andere Filamentlänge. Die Berechnungsebene kann durch einen Versatz normal zur Geometrie des LEE verschoben werden. Da erwartet wird, dass eine Berechnung innerhalb der neutralen Faser die geringste Verfälschung aufweist, erfolgt die Auswertung an mittiger Position in der Flechtschlauchdicke. Die Berechnungsebene wird somit um die halbe Flechtschlauchdicke normal zur Geometrie des LEE verschoben. (A\_Schygulla 2021, S. 62)

Für den stückweisen (aufgrund der Membranunterteilung) Axialvorschub wird die diskretisierte Geometrie vorab entsprechend der Anzahl und Position der Drapiermembranen unterteilt. Dadurch kann für jede Membran der individuelle axiale Vorschub berechnet werden. An den Grenzen zwischen den Membranen werden die Bewegungen interpoliert. (A\_Schygulla 2021, S. 61)

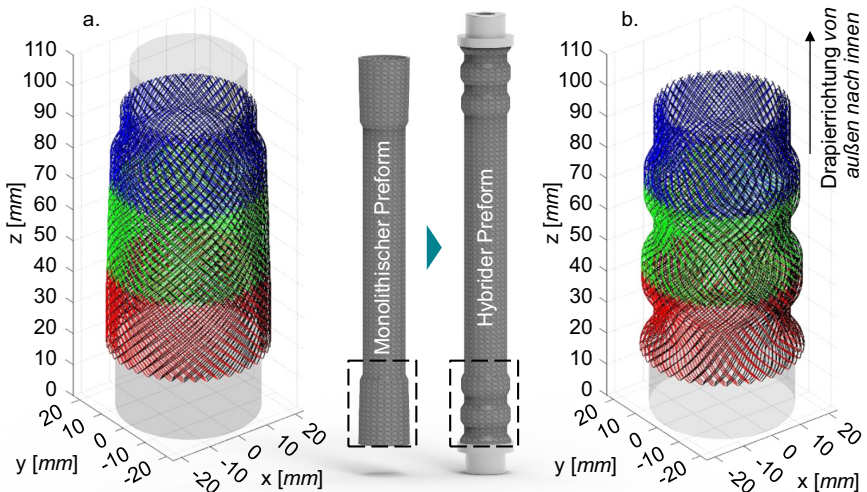


Abbildung 6-16: Berechneter Faserverlauf für den monolithischen (a) und den hybriden Preform (b) (A\_Schygulla 2021, S. 96)

In Abbildung 6-16 ist das Berechnungsergebnis der Schikanengeometrie für den monolithischen (a) und den hybriden Preform (b) dargestellt. Farblich hervorgehoben sind die Bereiche der drei Drapiermembranen (von außen nach innen in den Farben rot, grün und blau). Es wird ein dreilagiger Lagenaufbau mit einer Lagendicke von 1,02 mm und einer Kantenlänge von 2,35 mm betrachtet. Die berechneten axialen Vorschübe betragen für die Membranen (von außen nach innen) etwa -1,3 mm, -1,3 mm und -0,6 mm.

### 6.2.1.5 Bestimmung der Modellparameter

Die wichtigsten Modellparameter, welche maßgeblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben, sind nach (A\_Schygulla 2021, S. 74):

- die Anzahl diskreter Berechnungspunkte je Ebene  $N_p$ ,
- der Abstand der Berechnungsebenen  $\Delta z$  sowie
- die Kantenlänge  $K_{STL}$  des als Zwischenschritt benötigten Dreiecksnetzes.

In einer vollfaktoriellen Effektstudie mit zwei Faktorstufen wird in (A\_Schygulla 2021, S. 74–77) gezeigt, dass alle drei Modellparameter sowohl einen signifikanten Effekt auf den errechneten Verfahrensweg als auch auf die notwendige Berechnungsdauer haben.

Um einen Kompromiss aus möglichst geringer Berechnungsdauer bei gleichzeitig hoher Ergebnisqualität zu erreichen, werden Konvergenzstudien durchgeführt. In diesen werden die Faktoren in der o.g. Reihenfolge nacheinander nach dem One-Factor-At-A-Time-Prinzip jeweils einzeln variiert, während die anderen Faktoren konstant gehalten werden. (A\_Schygulla 2021, S. 78)

Die Ergebnisse der Konvergenzstudie sind in Abbildung 6-17 dargestellt. Hervorgehoben ist für jeden Faktor jeweils die Einstellung, welche für das weitere Vorgehen ausgewählt wird.

Für den ersten betrachteten Faktor, die Anzahl der Berechnungspunkte je Ebene  $N_p$ , ergibt sich der in Abbildung 6-17a gezeigte Verlauf. Bereits ab  $N_p = 60$  wird eine gute Konvergenz erreicht. Der Verfahrensweg ändert sich danach kaum noch, jedoch bleibt die Berechnungszeit ebenfalls bis  $N_p = 600$  in etwa konstant. Bei kleineren  $N_p$  weicht die Berechnung jedoch deutlich ab, da die Form des Querschnitts durch die Approximation hin zu einem  $N_p$ -Eck die Kreisform nur schlecht abbildet. (A\_Schygulla 2021, S. 78)

Im zweiten Schritt wird der Ebenenabstand  $\Delta z$  variiert (Abbildung 6-17b). Ab einem Ebenenabstand kleiner als 0,6 mm konvergiert das Ergebnis. Bei kleiner werdenden  $\Delta z$  steigt der Rechenaufwand stark an. Auch wenn bei größeren  $\Delta z$  die Anzahl der Knoten abnimmt, steigt hier der Berechnungsaufwand für die Interpolation stark an, sodass der Gesamtrechenaufwand ebenfalls zunimmt. Es bildet sich also ein Optimum der Berechnungszeit bei  $\Delta z = 0,5$  mm heraus, was innerhalb der Konvergenz liegt und somit für das weitere Vorgehen verwendet wird. (A\_Schygulla 2021, S. 79–80)

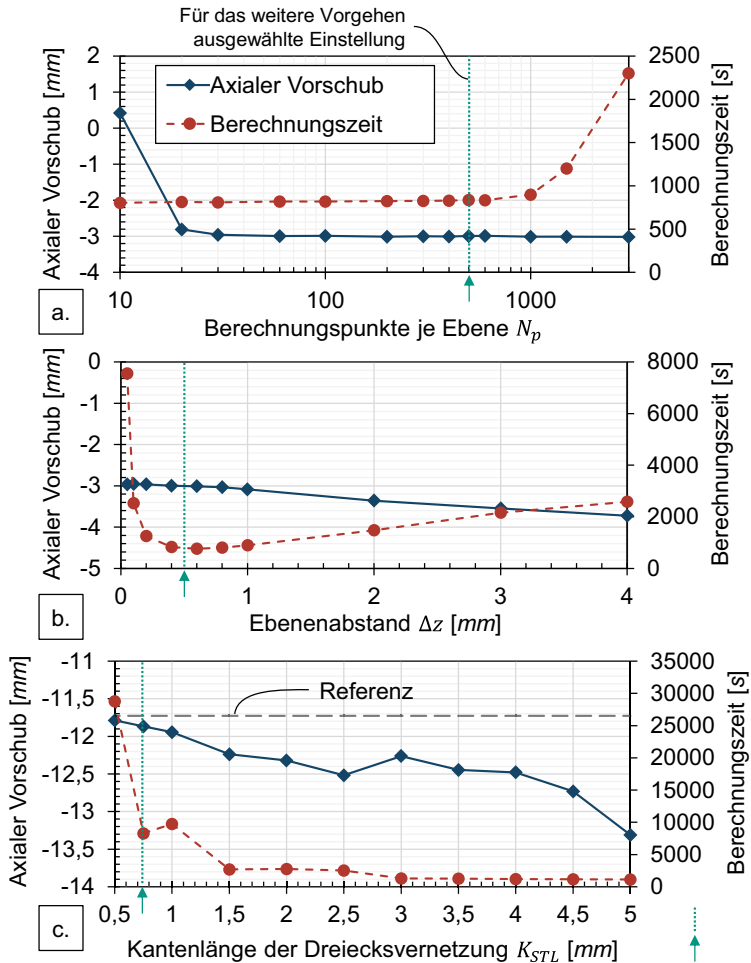


Abbildung 6-17: Konvergenzstudien für Ebenenanzahl  $N_p$  (a), Abstand der Berechnungsebenen  $\Delta z$  (b) sowie Kantenlänge  $K_{STL}$  (c) (A\_Schygulla 2021, S. 79–82)

Als letzter Faktor wird die Kantenlänge  $K_{STL}$  der Dreiecks-Ver-netzung der Geometrie variiert, welche für die Berechnung des Zwischenschritts (vgl. Kapitel 6.2.1.2) aus der ursprünglichen STL-Datei notwendig ist (Abbildung 6-17c). Für die Berechnung wird eine exemplarische Wandstärke von 5mm herangezogen, welche auf die ursprüngliche

Geometrie addiert wird. Da sich keine Konvergenz einstellt, wird als Referenz eine manuell auf die Zieldicke veränderte CAD-Geometrie verwendet, welche somit einen Vergleichswert darstellt. Es zeigt sich, dass die Berechnungszeit ab  $K_{STL} < 1 \text{ mm}$  deutlich ansteigt. Als guter Kompromiss wird für das weitere Vorgehen  $K_{STL} = 0,75 \text{ mm}$  gewählt. (A\_Schygulla 2021, S. 81–82)

Die ausgewählten Modellparameter sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

*Tabelle 6-1: Ermittelte Modellparameter*

$N_p$	$\Delta z$	$K_{STL}$
500	0,5 mm	0,75 mm

## 6.2.2 Methodik zur Materialcharakterisierung

Für die Berechnung des Faserverlaufs entlang der Soll-Geometrie sind, neben der CAD-Geometrie selbst, die Materialparameter des Flechtschlauchs wichtige Input-Parameter. Im Gegensatz zum in Kapitel 6.1.4 vorgestellten FE-Modell sind für die kinematische Modellierung die nachfolgenden Materialparameter notwendig:

- Die Faseranzahl  $n_F$  kann in der Regel direkt aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen werden. Sie entspricht der Klöppelanzahl des Flechtrads, auf welchem der Flechtschlauch produziert wurde und muss somit nicht gemessen werden.
- Die Flechtschlauchdicke  $d_F$  wird maßgeblich durch die Anzahl Filamente je Roving bestimmt.
- Die Kantenlänge der Elementarzelle  $K$  des Flechtschlauchs wird durch die Maschinenparameter beim Flechten (wie bspw. Abzugsgeschwindigkeit) beeinflusst.

Zur Untersuchung der Sensitivität des Berechnungsergebnisses des Modells von der Genauigkeit der Materialcharakterisierung wird in einer Studie der berechnete axiale Vorschub in Abhängigkeit der Flechtschlauchdicke und der Flechtschlauchkantenlänge bei der Schikanengeometrie untersucht (vgl. Abbildung 6-18). Es kann gezeigt werden, dass beide Faktoren einen deutlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben. Insbesondere die Messung der Kantenlänge hat einen starken Einfluss auf das Simulationsergebnis. So zieht eine Variation der Kantenlänge um  $100 \mu\text{m}$  von  $2,3 \text{ mm}$  auf  $2,4 \text{ mm}$  eine Änderung des berechneten axialen Vorschubs von  $1,6 \text{ mm}$  nach sich



(A\_Schygulla 2021, S. 83). Eine Messungenauigkeit bei der Dicke hat einen untergeordneten Einfluss, muss jedoch trotzdem betrachtet werden. Nachfolgend wird daher eine Vorgehensweise zur möglichst genauen Messung der Materialparameter Flecht-schlauchkantenlänge und Flecht-schlauchdicke vorgestellt.

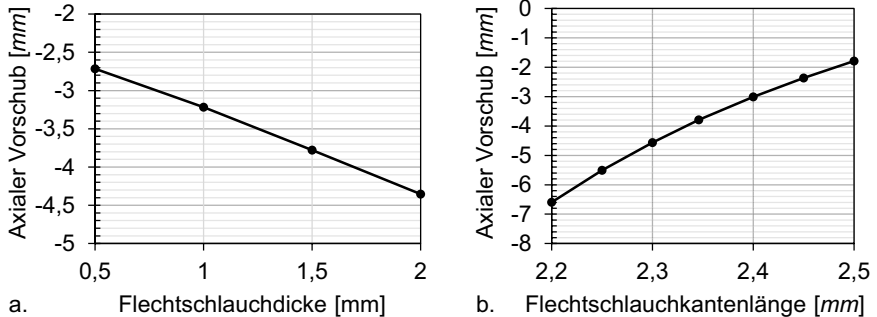


Abbildung 6-18: Sensitivität der Messung der Flecht-schlauchdicke und der Flecht-schlauchkantenlänge auf das Berechnungsergebnis (eigene Darstellung nach (A\_Schygulla 2021, S. 83))

In Abbildung 6-19 sind die Schritte zur Bestimmung der Kantenlänge  $K$  dargestellt. Die Bestimmung von  $K$  beruht auf der Kinematik der in Kapitel 6.2.1.3 eingeführten Elementarzelle und Formel 6-1. Dafür wird der Flecht-schlauch flach liegend gescannt, so dass aus dem gescannten Bild im nächsten Schritt die Kanten der Fasern ausgelesen werden können. Aus deren Verlauf kann der Flechtwinkel ausgelesen und mithilfe der Breite des flach liegenden Flecht-schlauchs die Kantenlänge  $K$  berechnet werden.

Die Flecht-schläuche werden in einer standardisierten Maske in einem Flachbettscanner vom Typ Brother MFC-7360N mit einer Auflösung von 1200 dpi und einer Helligkeitseinstellung von +40% eingescannt. Durch den Einsatz des Scanners kann auf eine komplexe Beleuchtung für die reflektierenden Kohlenstofffasern sowie eine Korrektur objektivbedingter Verzerrungen, wie sie beim Einsatz von Kameras notwendig wäre (Pei & Xiao et al. 2019; Xiao & Wang et al. 2018), verzichtet werden. Die Maske ermöglicht einen automatisierten Zuschnitt in MATLAB sowie eine Kalibrierung der Größenverhältnisse durch zwei Punkte mit bekanntem Abstand. (A\_Schygulla 2021, S. 64)

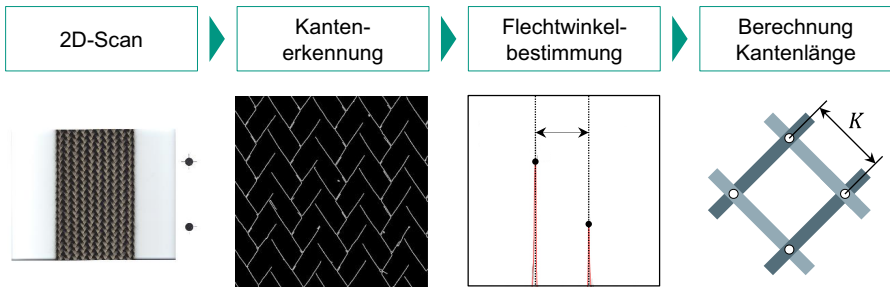


Abbildung 6-19: Vorgehensweise zur Bestimmung der Kantenlänge  $K$

Nach dem Zuschnitt des Gesamtbilds wird dieses in Graustufen umgewandelt und mit den morphologischen Operationen Erosion und Dilatation für die Kantenerkennung vorbereitet. Für die Kantenerkennung werden die drei gebräuchlichsten Filtertypen (Sobel, Prewitt und Canny) untersucht (vgl. Abbildung 6-20) (Burger & Burge 2015, S. 125–144). Durch die beim Canny-Filter einstellbaren Schwellwerte liefert dieser die besten Ergebnisse und wird daher mit den beiden experimentell ermittelten, niedrigen und hohen Helligkeitsschwellwerten 0,2 und 0,55 für das weitere Vorgehen ausgewählt. (A\_Schygulla 2021, S. 65)

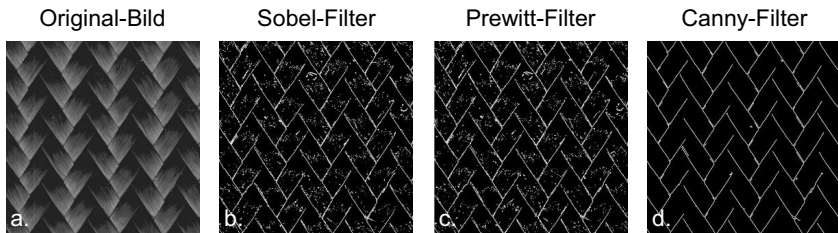


Abbildung 6-20: Filter-Typen für die Kantendetektion: Originalbild (a), Sobel-Filter (b), Prewitt-Filter (c) sowie Canny-Filter (d) (A\_Schygulla 2021, S. 65)

Aus den nun in Grauwerten vorliegenden Kanten muss im nächsten Schritt der Winkel zwischen den Kanten, welcher dem Flechtwinkel entspricht, ermittelt werden. Zu diesem Zweck wird die Hough-Transformation (Hough 1962) verwendet, welche in Anwendungen zur Detektion von Geraden in Bildern weit verbreitet ist (Burger & Burge 2015, S. 170). Für eine Erläuterung der Hough-Transformation sei auf die Grundlagenliteratur, z.B. (Burger & Burge 2015, S. 170–173) oder (Jähne 2012, S. 551–554), verwiesen.

Aus der Hough-Transformation wird ein Array H erzeugt, in welchem sämtliche Geraden im Bild in der Hesse'schen Normalform gespeichert sind. Für die Bestimmung der dominierenden Geraden wird nun eine Häufigkeitsverteilung der Geraden-Winkel (Hough-Summe) erstellt, welche in Abbildung 6-21 dargestellt wird. Zur automatisierten Berechnung der lokalen Maxima wird die Häufigkeitsverteilung noch mit einem kubischen Spline geglättet. Der Flechtwinkel  $\alpha$  kann nun direkt aus dem Diagramm als halbe Differenz der beiden lokalen Maxima berechnet werden. (A\_Schygulla 2021, S. 65–66)

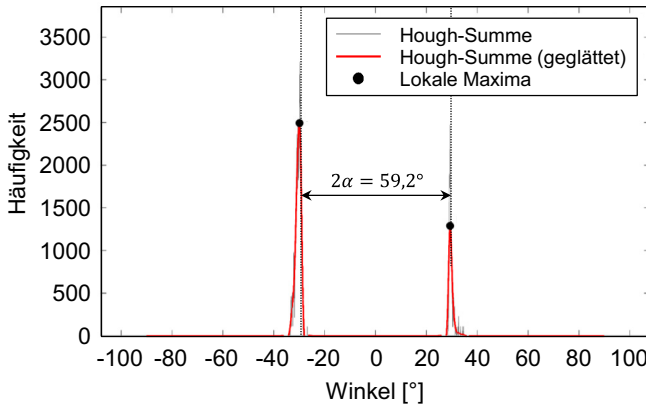


Abbildung 6-21: Häufigkeitsverteilung der Geradenwinkel zur Bestimmung des Flechtwinkels (A\_Schygulla 2021, S. 66)

Die Kantenlänge der Elementarzelle  $K$  lässt sich dann durch Umstellen von Formel 6-1 zu Formel 6-3 berechnen:

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot B_F^2}{n_F^2 \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha))}} \quad 6-3$$

Die Breite des flach liegenden Flechtschlauchs  $B_F$  kann dabei ebenfalls über eine Kantendetektion und Geradenerkennung automatisiert aus dem gescannten Bild ausgelesen werden. (A\_Schygulla 2021, 63; 66-67)

Zur Validierung der Methodik werden drei verschiedene Flechtschläuche vom Typ Siltex 3888, 4064 und 7602 (vgl. Abbildung 6-22) eingescannt und die automatisiert ermittelten Parameter mit manuellen Messungen verglichen.



Abbildung 6-22: Ausschnitte der Flechtmuster zur Validierung der Methodik (A\_Schygulla 2021, S. 68)

Die manuellen Messungen der Flechtwinkel und der Kantenlängen sind in Abbildung 6-23 exemplarisch für den Flechtschlauch Siltex 7602 dargestellt. Es werden für jeden Flechtschlauch drei Scans angefertigt. Die Flechtwinkel werden an 9 Positionen gemessen, indem entlang zweier sich kreuzender Faserkanten die Schenkel eingezeichnet werden und der Winkel ausgelesen wird. Für die Messung der Kantenlängen werden über 16 Elementarzellen hinweg Geraden eingezeichnet und ebenfalls deren Länge in Pixel gemessen und durch die oben eingeführte Kalibrierung umgerechnet. (A\_Schygulla 2021, S. 69–71)

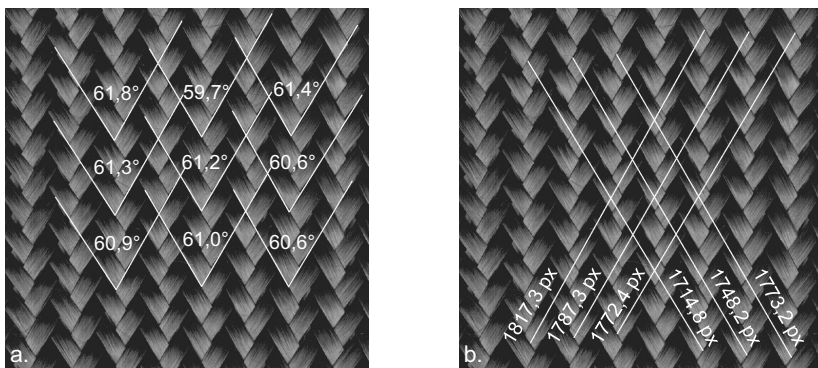


Abbildung 6-23: Manuelle Messung der Flechtwinkel (a) und Kantenlängen (b) (A\_Schygulla 2021, S. 70–71)

In Abbildung 6-24 werden die Mittelwerte der Parametererkennung mit den manuell gemessenen Werten für den Flechtwinkel und die Kantenlänge gegenübergestellt. Die

an den manuell gemessenen Werten eingezeichneten Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung zwischen den Einzelmessungen und sind somit ein Maß für die Messungenauigkeit der manuellen Messung.

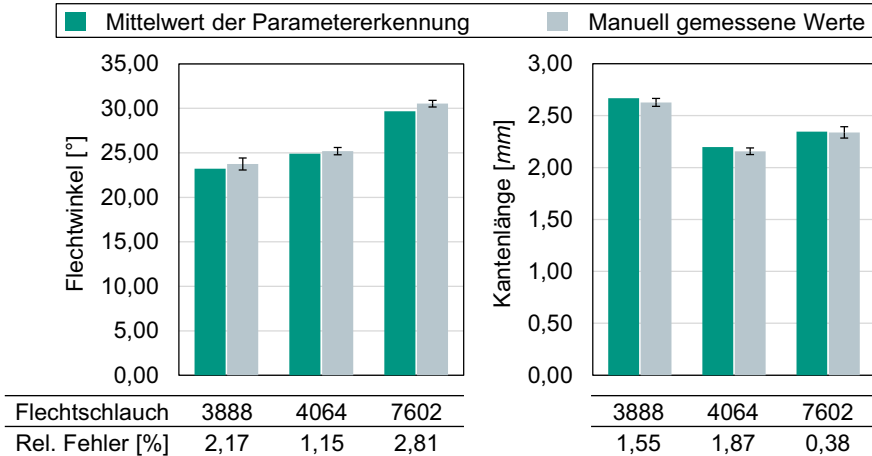


Abbildung 6-24: Vergleich der Parametererkennung und der manuell gemessenen Werte (Eigene Darstellung nach (A\_Schygulla 2021, S. 70–71))

Insgesamt zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen manueller Messung und automatischer Parametererkennung. Die maximale Abweichung des Faserwinkels beträgt 2,81% und die der Kantenlänge 1,87%. In (Liu & Kyosev 2019) und (Xiao & Pei et al. 2019) werden ebenfalls Faserwinkelmessungen auf Basis der Hough-Transformation durchgeführt, welche einen Fehler von bis zu 20,7% bzw. 4,56% aufweisen. Der Vergleich zeigt also, dass die Parametererkennung sogar bessere Ergebnisse liefert. Der maximale Fehler bei der Bestimmung der Kantenlänge von 1,87% führt zu einem Fehler bei der Berechnung des axialen Materialflusses von etwa 0,7 mm (A\_Schygulla 2021, S. 69)

Die Messung der Flechtschlauchdicke erfolgt in Anlehnung an (DIN EN ISO 50841996-10-00) und (DIN EN 61067-21998-02-01) und wird in (A\_Schygulla 2021, S. 72–73) ausführlich beschrieben. Die Messung erfolgt mit einem konstanten Messdruck mit einer Bügelmessschraube vom Typ Mitutoyo 25-50mm mit einer Messauflösung von 0,01 mm. Die Dickenmessungen werden an 5 Positionen jedes Flechtschlauchtyps jeweils wiederholt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Tabelle 6-2: Gemessene Flechtschlauchdicken (A\_Schygulla 2021, S. 73)

Flechtschlauch	Flechtschlauchdicke [mm]
3888	1,18
4064	0,69
7602	1,02

Mit den ermittelten Materialparametern kann die Methodik erprobt und experimentell validiert werden. Dazu werden Versuche an zylindrischen Geometrien durchgeführt, um die Modellierung von Flechtwinkel- und Längenänderung grundsätzlich zu überprüfen. Anschließend wird das Berechnungsmodell durch Versuche mit dem Drapiermodul an der Schikanegeometrie validiert.

### 6.2.3 Validierung an zylindrischen Geometrien

Zur Überprüfung der Flechtwinkel- und Längenberechnung werden im ersten Schritt einfache Drapierversuche an zylindrischen Geometrien durchgeführt. Dafür werden zylindrische Kerne mit den Durchmessern 25 mm, 35 mm und 45 mm hergestellt. Die Zylinder werden in eine Vorrichtung eingespannt und der Flechtschlauch Siltex 7602 manuell auf den Kern gezogen. In Abbildung 6-25a ist der horizontal verlaufende Kern mit einem Flechtschlauch dargestellt. An den Enden des zylindrischen Bereichs wird eine kreisförmige Markierung aufgebracht, sodass die Längenänderung beim Wechsel der Kerne mit unterschiedlichen Durchmessern beurteilt werden kann. Die Länge wird mittels eines in die Vorrichtung integrierten Maßstabs mit der minimalen Messauflösung von 0,5 mm abgelesen. Aufgrund der Breite der Kreidemarkierung wird von einer Messungenauigkeit von 1,5 mm für die Längenmessung ausgegangen. Der Flechtwinkel wird mittels zweier Papierstreifen gemessen, welche entlang der Faserkanten um den Durchmesser ausgerichtet werden. Die beiden Papierstreifen werden anschließend fixiert und mit einem digitalen Winkelmesser mit einer Auflösung von 0,1° gemessen. Aufgrund der manuellen Ausrichtung der Papierstreifen sowie der Verdrehung des Flechtschlauchs bei der Versuchsdurchführung wird eine Messungenauigkeit bei der Winkelmessung von 2° angenommen. (A\_Schygulla 2021, S. 84–85)

Für die Validierung der Längenmessung wird der Flechtschlauch auf den Kern mit einem Durchmesser von 25 mm aufgezogen und die Länge als Referenzlänge markiert. Danach wird der Flechtschlauch nacheinander auf die Kerne mit den Durchmessern 35

mm und 45 mm aufgezogen und die Länge gemessen. Die Ergebnisse der Längenmessung sowie der Ergebnisse aus dem Berechnungsmodell sind in Abbildung 6-25b dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen dabei den Bereich der Messungenauigkeit von 1,5 mm an. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Modell und Experiment. Da jeweils nur eine Wiederholung mit mehreren Messpunkten durchgeführt wurde, ist die Aussagekraft der Messung hauptsächlich qualitativ möglich. (A\_Schygulla 2021, S. 86)

Die Ergebnisse des Vergleichs der Flechtwinkelmessung mit den modellierten Flechtwinkeln sind in Abbildung 6-25c dargestellt. Auch hier zeigen die Fehlerbalken den Bereich der Messunsicherheit von 2°. Es zeigt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung von Modell und Experiment. (A\_Schygulla 2021, S. 86–88)

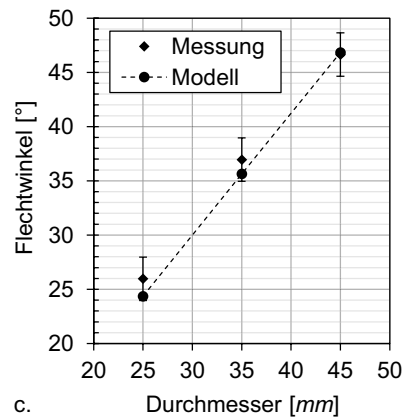
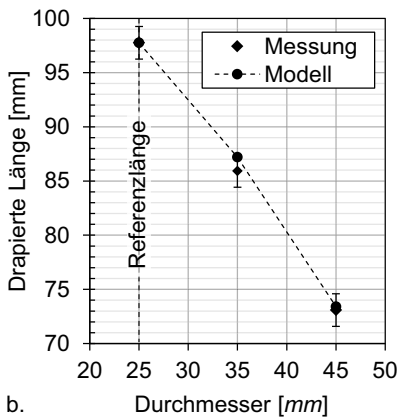
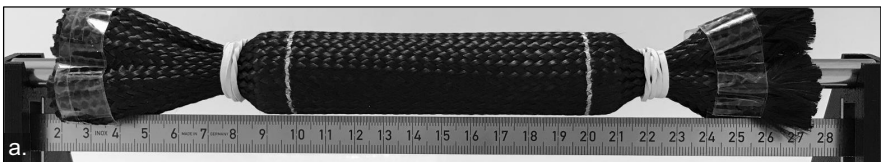


Abbildung 6-25: Validierungsversuche mit zylindrischem Kern (A\_Schygulla 2021, S. 85–88)

Es kann somit festgehalten werden, dass die Parametererkennung für die Flechtschläuche sowie die Berechnung der Flechtwinkel und Längenänderungen in sehr guter Nä-

herung durch das eingeführte Berechnungsmodell für einfache Geometrien vorhergesagt werden können. Im nachfolgenden Kapitel wird das Modell für komplexe Geometrien auf dem Drapiermodul erprobt und validiert.

### 6.2.4 Validierung an Schikanengeometrie

Für die Validierung des Modells an komplexeren Geometrien wird die Schikanengeometrie zur Untersuchung herangezogen. In diesem Zuge wird das Anlagenmodul zur Drapierung erstmals erprobt, indem Drapierversuche auf dem Drapiermodul durchgeführt und ausgewertet werden. Zur Entnahme und Untersuchung der drapierten Bauteile wird ein Gestell mit einer magnetischen Aufnahme für die LEEs verwendet, wie es in Abbildung 6-26a dargestellt ist. Dadurch ist ein sicheres und reproduzierbares Handling gewährleistet. Nach der Entnahme wird die Außenkontur des Bauteils mit einem auf einen *Faro Platinum Arm* befestigten Laserscanner vom Typ *Faro Laser Line Probe V3* aufgenommen. Zur Vermeidung von Artefakten werden die stark reflektierenden Kohlenstofffasern mit einem Entwickler vom Typ *MR 70 Entwickler weiß* der Firma *MR Chemie GmbH* besprüht, sodass eine matte Oberfläche entsteht. In Abbildung 6-26b ist ein Foto des Scanvorgangs für die Bauteilgeometrie mit dem bereits entwickelten Preform dargestellt. (A\_Schygulla 2021, S. 91–92)

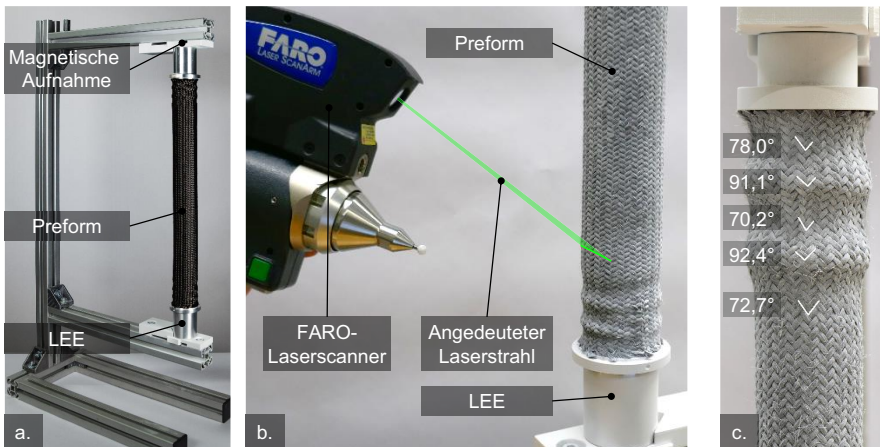


Abbildung 6-26: Versuchsdurchführung – Gestell zur Entnahme und Untersuchung des hybriden Preforms (a), Darstellung des Scans (b) und Flechtwinkelmessung (c) (A\_Schygulla 2021, 92-94)



Die 3-D-Scans werden mit der Software *Geomagic Control 2014.4.0* aufbereitet und als STL-Datei exportiert. Die Auswertung der STL-Dateien erfolgt in MATLAB R2020a, sodass ein direkter Vergleich mit dem Modell ermöglicht wird. Die gescannte und die berechnete Geometrie werden über die Lasteinleitungselemente zueinander ausgerichtet. Es werden insgesamt vier Versuchskonfigurationen mit jeweils drei Wiederholungen durchgeführt. Um eine Aussage über die Modellgüte treffen zu können, wird der axiale Vorschub um den berechneten Wert herum variiert. Weiterhin wird unterschieden, ob der axiale Vorschub vor- oder nach der Drapierung erfolgt (Ein gleichzeitiges Verfahren kann in der prototypischen Anlage nicht erprobt werden.). Daraus ergeben sich die folgenden vier Versuchskonfigurationen:

- Referenz (ohne Längenausgleich)
- DvL / 1-fach (Drapierung erfolgt vor Längenausgleich / Längenausgleich wie berechnet)
- LvD / 1-fach (Längenausgleich erfolgt vor Drapierung / Längenausgleich wie berechnet)
- LvD / 2-fach (Längenausgleich erfolgt vor Drapierung / Doppelter Längenausgleich)

Als wichtigstes Qualitätskriterium, ob der errechnete axiale Materialfluss korrekt vorhergesagt wurde, wird der mittlere Durchmesser  $\tilde{D}$  je Schnittbene herangezogen. Dieser wird aus dem gemessenen Umfang  $U$  über die Kreisformel  $\tilde{D} = U/\pi$  berechnet. Weiterhin wird der Flechtwinkel über fotografische Aufnahmen analog zu Kap. 6.2.2 gemessen und mit dem berechneten Flechtwinkel verglichen (vgl. Abbildung 6-26c). Aufgrund der ständig wechselnden Durchmesser gestaltet sich die Messung der Flechtwinkel jedoch schwierig. Die Messung ist somit sehr unsicherheitsbehaftet und liefert lediglich eine qualitative Aussage. Der berechnete Flechtwinkel wird, um Einflüsse aus dem Verfahren auszuschließen, auf Grundlage der gescannten Kontur berechnet (A\_Schygulla 2021, S. 92–94).

In Abbildung 6-27 sind die Ergebnisse der Messwerte und der Modellierung gegenübergestellt. Es wird jeweils die Messung am oberen LEE gezeigt. Die Ergebnisse am unteren LEE zeigen verfahrensbedingt aufgrund der Schwerkraft eine größere Abweichung, worauf in Kapitel 7.2 näher eingegangen wird.

In Abbildung 6-27a wird der mittlere Durchmesser der äußersten Flechtschlauchlage entlang der z-Achse (Längsachse) für den oberen Teil des hybriden Preforms gezeigt.

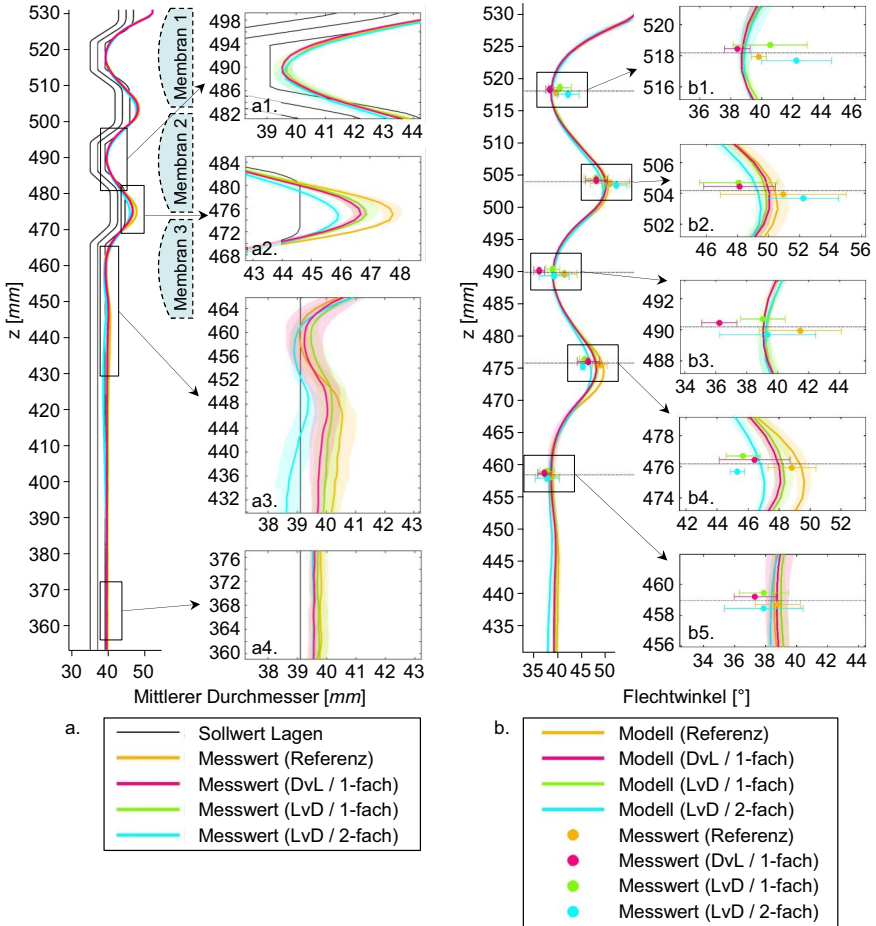


Abbildung 6-27: Vergleich von Modell und Experiment: Mittlerer Durchmesser (a) und Flechtwinkel (b) am oberen LEE, jeweils mit Detailausschnitten (a1-a4, b1-b5) (A\_Schygulla 2021, 99-105)

Weiterhin sind einzelne Ausschnitte des Diagramms vergrößert dargestellt. Der halbtransparent hinterlegte Bereich zeigt jeweils die Standardabweichung der drei Wiederholungen. Insgesamt wird bei allen Konfigurationen die Geometrie des LEEs endkonturnah abgeformt. Beide Konfigurationen mit 1-fachem Längenausgleich zeigen über

die komplette Länge nahezu identische Verläufe. Es wird daher nachfolgend der Längenausgleich stets vor der Drapierung durchgeführt.

Zwischen den drei Variationen des Längenausgleichs können deutliche Unterschiede in der Qualität der drapierten Geometrie ausgemacht werden. Im Bereich der (ersten und) zweiten Drapiermembran (Abbildung 6-27a1) ist der Verlauf des mittleren Durchmessers weitestgehend gleich. In Abbildung 6-27a2 zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede: Am besten wird die Geometrie durch den doppelten Längenausgleich abgeformt. Beim einfachen Längenausgleich zeigt sich eine moderate Abweichung, während der Durchmesser ohne Längenausgleich deutlich größer ist. Der Nachteil des doppelten Längenausgleichs zeigt sich jedoch im freien Bereich, nachdem das LEE endet (Abbildung 6-27a3). Hier führt der zu große axiale Vorschub zu einer Einschnürung unterhalb der Soll-Geometrie. Der einfache Längenausgleich zeigt hier eine gute Übereinstimmung mit dem Soll-Durchmesser. Im weiter entfernten freien Bereich, der nicht durch die IR-Strahler aufgeheizt wurde (Abbildung 6-27a4), zeigen alle Konfigurationen den gleichen Durchmesser. Es kann somit zusammenfassend festgehalten werden, dass die Konfiguration mit dem berechneten Längenausgleich die beste Übereinstimmung des mittleren Durchmessers mit der Soll-Geometrie aufweist. Der berechnete axiale Vorschub und daher auch das kinematische Drapiermodell können somit als validiert angesehen werden. (A\_Schygulla 2021, S. 98)

In Abbildung 6-27b sind zusätzlich die gemessenen und aus den gemessenen Oberflächen der vier Konfigurationen berechneten Flechtwinkel entlang der z-Achse aufgetragen. Es zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Flechtwinkel.

### 6.2.5 Parametersensitivität

Um die Sensitivität des axialen Vorschubs bzw. des axialen Materialflusses bei der Drapierung in Abhängigkeit der Geometrie- und Materialparameter zu bestimmen, werden mit Hilfe des kinematischen Modells Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dazu wird jeweils ein Parameter variiert, während alle anderen Parameter konstant bleiben, und somit der Einfluss des isoliert betrachteten Parameters auf den axialen Materialfluss ermittelt.

Für die Berechnung wird ein einzelnes Segment der Schikanengeometrie ausgewählt und der Materialfluss für diesen Bereich berechnet. Das Segment ist in Abbildung 6-28 dargestellt. Es wird in MATLAB parametrisch modelliert, sodass auf den Import einer

STL-Datei sowie die rechenzeitintensive Neuvernetzung gänzlich verzichtet werden kann. Die Länge  $L$  des Segments beträgt 28 mm und wird für die Berechnung konstant gehalten. Die variierten Geometrieparameter sind:

- Innendurchmesser  $D$
- Höhe der Wellenschultern  $H$
- Länge des zylindrischen Bereichs  $L_1$ , wobei gilt:  $2 \cdot L_1 < L$
- Übergangsradius  $r$

Darüber hinaus werden die Materialparameter des Flechtschlauchs variiert:

- Kantenlänge der Elementarzelle  $K$
- Faseranzahl  $n_F$

Die Initialparameter, welche der Schikanengeometrie und den Materialkennwerten des Flechtschlauchs Siltex 7602 aus Kapitel 6.2.2 entsprechen, sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

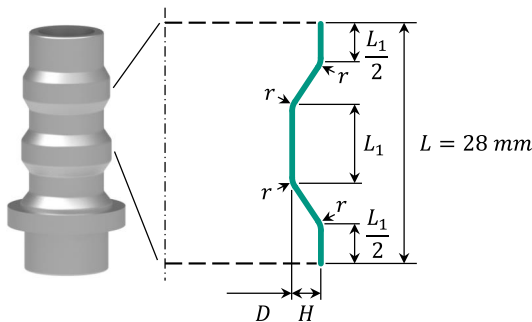


Tabelle 6-3:  
Initialparameter für die  
Sensitivitätsanalyse

$D$	33 mm
$H$	3,35 mm
$L_1$	9 mm
$r$	2 mm
$K$	2,35 mm
$N$	42

Abbildung 6-28: Geometrie des untersuchten Segments

Die Parameter  $D$ ,  $H$  und  $L_1$  werden jeweils in 10%-Schritten bis zu 50% um den Initialwert variiert. Der Übergangsradius  $r$  wird bis zu einem minimalen Radius von 0,4 mm und einem maximalen Radius von 6 mm variiert, an dem das konische Segment durch die beiden sich annähernden benachbarten Radien beinahe verschwindet. Die Kantenlänge der Elementarzelle  $K$  wird aufgrund des großen Einflusses in 1%-Schritten und die Faseranzahl  $n_F$  ganzzahlig um den Initialwert 42 variiert.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudien sind in Abbildung 6-29 dargestellt. Hervorgehoben ist jeweils der Initialwert, um den die Parameter variiert werden.

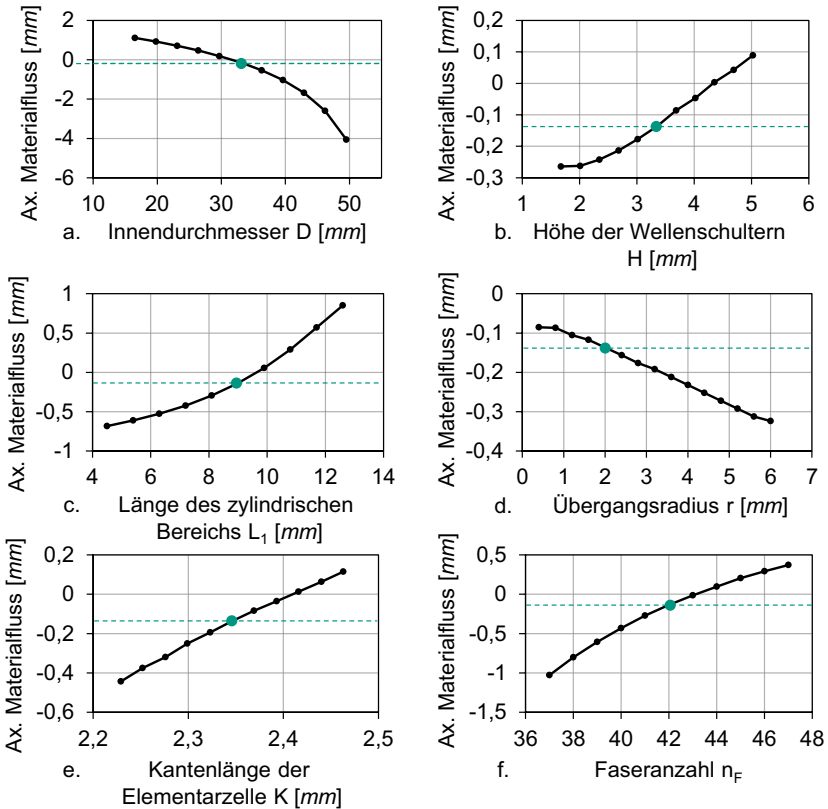


Abbildung 6-29: Ergebnisse der Sensitivitätsstudien für die Parameter  $D$  (a),  $H$  (b),  $L_1$  (c),  $r$  (d),  $K$  (e) und  $n_F$  (f)

Zur Berechnung der Sensitivität wird die Steigung der Kurve (1. Ableitung) am Initialpunkt durch die beiden benachbarten Berechnungspunkte bestimmt. Größere Steigungen lassen auf eine hohe Sensitivität schließen. Die Ergebnisse werden in Abbildung 6-30 in einem Balkendiagramm zusammengefasst dargestellt. Von den geometrischen Parametern hat der Durchmesser  $D$  den größten Einfluss, die Länge des zylindrischen Bereichs  $L_1$  sowie die Höhe der Wellenschulter  $H$  sind weniger sensitiv. Der Übergangsradius  $r$  hat erwartungsgemäß nur einen untergeordneten Einfluss. Die Materialparameter Kantenlänge  $K$  und Faseranzahl  $n_F$  haben den stärksten Einfluss, wodurch die Bedeutung der genauen Materialcharakterisierung nochmals unterstrichen wird.

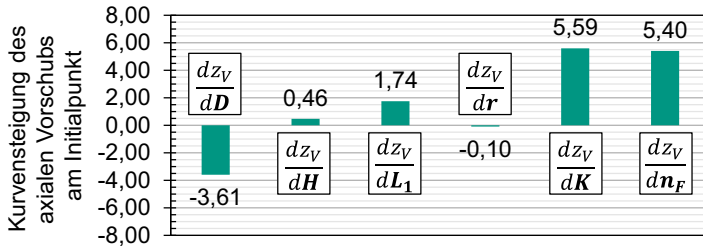


Abbildung 6-30: Sensitivität der Parameter, dargestellt als Balkendiagramm der Kurven-Steigungen am Initialpunkt

**Fazit:** Der Prozessschritt der Drapierung stellt einen qualitätskritischen Schritt innerhalb der Gesamtprozesskette dar, da hier der Faserverlauf und die endkonturnahe Geometrie des Preforms festgelegt wird. In einem systematischen Entwicklungsprozess wird ein Drapiermodul entworfen, in dem mittels außenliegender, sequentiell druckbeaufschlagter Membranen der Preform radial in die hinterschnittige Geometrie formschlüssiger Lasteinleitungselemente drapiert wird. Aufgrund der Kinematik der Flechtstruktur ist eine gezielte axiale Materialflussführung notwendig, für den ein kinematisches Drapiermodell vorgestellt wurde. Für die Bestimmung der Materialparameter wird ein effizienter und hochgenauer, bildbasierter Charakterisierungsprozess vorgestellt. Dieser dient als Grundlage für die kinematische Modellierung der Drapierung. Das kinematische Modell erlaubt es, abhängig von der Geometrie und Materialparametern, den axialen Vorschub des Drapiermoduls zu berechnen, sodass qualitativ hochwertige hybride Preforms gefertigt werden können. Das Berechnungsmodell und das Drapiermodul können schließlich in Versuchen experimentell validiert werden. Der Prozessschritt der Drapierung gilt somit als verstanden.

## 7 Integrationsphase

Nach der Planungs- und der Einzelprozessphase liegt für alle Prozessschritte zur Herstellung hybrider Preforms das notwendige Prozesswissen vor, sodass die Einzelprozesse zu einer durchgängigen Prozesskette integriert werden können. Es wird daher in diesem Kapitel die prototypische Implementierung der Prozesskette vorgestellt. Anschließend werden die Erkenntnisse aus dieser Erprobung für einen möglichen industriellen Prozess übertragen und zusammengefasst (vgl. Abbildung 7-1).

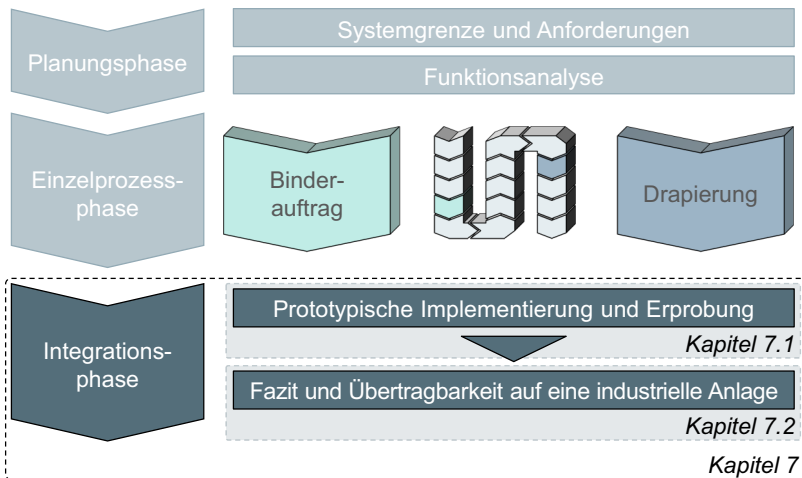


Abbildung 7-1: Einordnung der Integrationsphase innerhalb der übergeordneten Vorgehensweise

### 7.1 Prototypische Implementierung der Gesamtprozesskette

Aufbauend auf dem Prozesskettenkonzept aus Kapitel 4 wird eine Prozesskette aufgebaut, mit der hybride Preforms prototypisch hergestellt werden können. Die Prozesskette wird mit Hilfe der in Kapitel 4.1 vorgestellten realen Bauteilgeometrie erprobt. Anschließend werden die gefertigten Preforms hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen aus Kapitel 4.1 untersucht.

#### 7.1.1 Prototypische Prozesskette

Die Prozesskette folgt dem in Kapitel 4.2 entwickelten Funktionsplan (vgl. Abbildung 4-3). Sie basiert dabei auf den in (A\_Radler 2018), (A\_Wagner 2019), (A\_Yanguí 2018),

(A\_Lico 2017), (A\_Witt 2018), (A\_Döhring 2018) und (A\_Wagner 2020) entwickelten Versuchsständen und Komponenten. Die Erprobung erfolgt in (A\_Schygulla 2021). Nachfolgend werden die implementierten Einzelschritte anhand der prototypischen Versuchsstände vorgestellt. Insgesamt werden drei Versuchsstände entwickelt, die die folgenden Funktionen aus dem Funktionsplan jeweils gerätetechnisch zusammenfassen:

Die **Preformanlage** fasst die Schritte *Flechtschlauchspule abrollen* (a), *Flechtschlauch ablängen* (b), *Flechtschlauch weitergeben* (c), *Flechtschlauch auf Kern ziehen* (d), *Binderpulver auftragen* (e), *Binderpulver erweichen* (f) sowie *Preform von Kern abziehen* (g) zusammen.

In der **Besäumungsanlage** wird der Prozessschritt *Preform besäumen* (h) durchgeführt.

Die **Hybridisierungsanlage** beinhaltet die Schritte *Lasteinleitungselement spannen* (n), *Lasteinleitungselemente in Preform fügen* (o), *Binderpulver erweichen* (p), *Preform umformen* (q) sowie *hybrider Preform entspannen* (r).

Die Schritte *Speicher für Lasteinleitungselemente* (k), *Lasteinleitungselemente entnehmen* (l) sowie *Lasteinleitungselement weitergeben* (m) werden für die prototypische Implementierung aufgrund des geringen Erkenntnisgewinns ausgeklammert.

Die Prozessschritte in der monolithischen Preformanlage sind in Abbildung 7-2 dargestellt. In der Anlage befindet sich ein Kern, welcher wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben von einem Schrittmotor gedreht werden kann und der Innenkontur des monolithischen Preforms entspricht (0). Auf den Kern wird mittels einer zylindrischen Transferhilfe ein Flechtschlauch gezogen (Schritt 1). Durch die Transferhilfe wird verhindert, dass der Flechtschlauch um seine Längsachse bei der Handhabung tordiert wird. Außerdem wird auf dem Preform liegendes Binderpulver durch das Aufziehen der nächsten Lage nicht verschoben. In Schritt 2 werden die Flechtschlauchlagen an den Enden mit einem Klebeband fixiert. Anschließend erfolgt wie in Kapitel 5 beschrieben der vibrationsbasierte Binderauftrag auf den Preform. Aufgrund des Binderauftragsmodells (vgl. Kapitel 5.2) wird Konfiguration 3-d (Ebene 1: Druckdom, Ebene 2: Schrotkäfig, Ebene 3: Sieb) ausgewählt und eine Vorschubgeschwindigkeit von 5,8 mm/s und eine Kerndrehzahl von 90 1/min berechnet. Die Schritte 1 bis 3 werden entsprechend des Lagenaufbaus des Preforms bis zur äußersten Lage wiederholt. Auf die äußerste Lage wird kein Binderpulver appliziert.



Der vollständige Lagenaufbau wird in Schritt 4 durch einen Infrarotstrahler aufgeheizt. Der Preform wird dabei kontinuierlich gedreht, damit alle Seiten gleichmäßig erwärmt werden. Das Ziel ist es, den pulverförmigen Binder zwischen sämtlichen Lagen aufzuschmelzen, sodass dieser die Faserlagen miteinander verklebt.

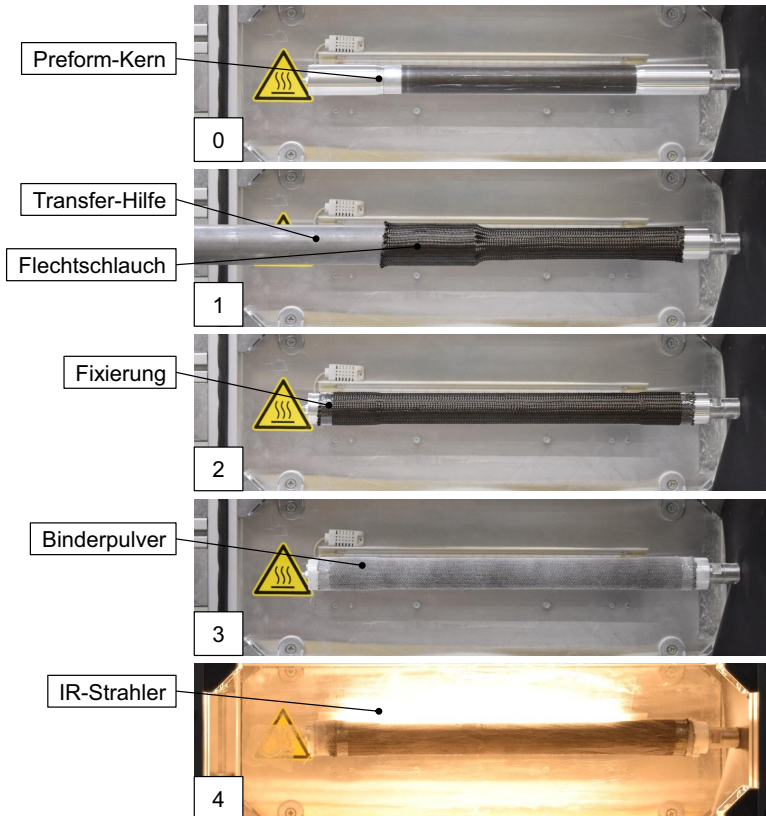


Abbildung 7-2: Prozessschritte in der monolithischen Preformanlage

In (A\_Kobusz 2020) wird in Anlehnung an (Coutandin 2020, S. 66–72) ein Simulationsmodell für den Aufheizvorgang implementiert und in Experimenten validiert. Das Modell wird in Matlab mit Hilfe der PDE-Toolbox umgesetzt und basiert auf den Gesetzen zur instationären Wärmeleitung. Es wird ermittelt, dass nach 180 Sekunden die Temperatur an der inneren Binderschicht die notwendige Bindererweichungstemperatur von 70°C

übersteigt, während die äußere Binderschicht eine Temperatur von 90°C hat (A\_Kobusz 2020, S. 96–97).

Nach der Abkühlung und Erstarrung des Binders wird der fixierte Lagenaufbau (sog. monolithischer Preform) entnommen.

Die Enden des Preforms werden im nächsten Schritt in der Besäumungsanlage auf die richtige Länge zugeschnitten. Ein Besäumen der Flechtschläuche, bevor diese durch den Binder fixiert sind, ist nicht möglich, da die losen Fasern andernfalls an den Enden des Preforms stark ausfransen.

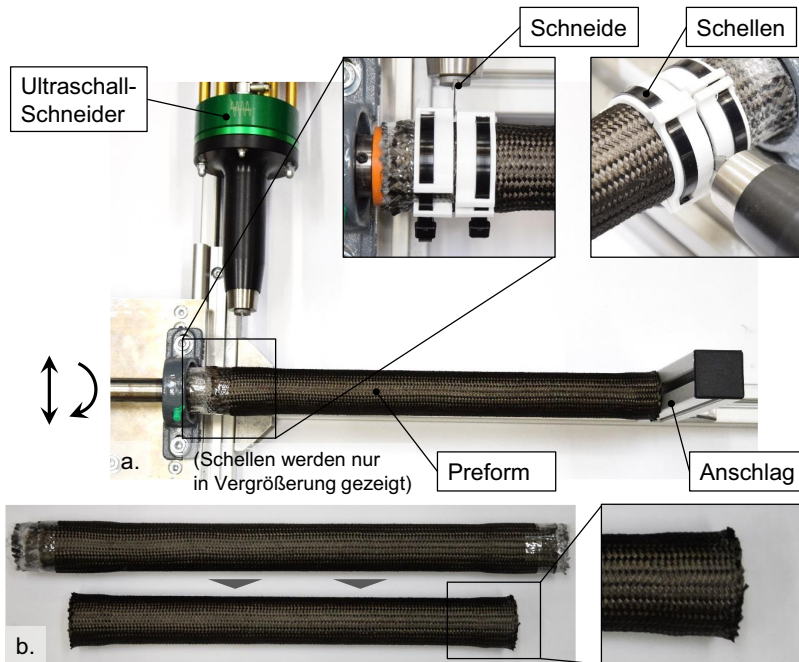


Abbildung 7-3: Besäumungsanlage (a) sowie Preform vor und nach dem Besäumen (b)

In Abbildung 7-3a ist die Besäumungsanlage dargestellt. Der Preform wird auf einen Kern mithilfe zweier Schellen gespannt. Zwischen den Schellen taucht die Schneide eines Ultraschallschneiders vom Typ ProteUS der Firma EM-Systeme GmbH in den Lagenaufbau ein und trennt somit die Lagen. Der Kern kann radial in Richtung des Ultraschall-Schneiders mittels eines Handrads verfahren werden, um die Eindringtiefe

des Messers einzustellen. Weiterhin wird der Kern gedreht, sodass das Messer tangential um den Preform herumschneiden kann. In Abbildung 7-3b ist ein Preform vor- und nach dem Besäumen dargestellt.

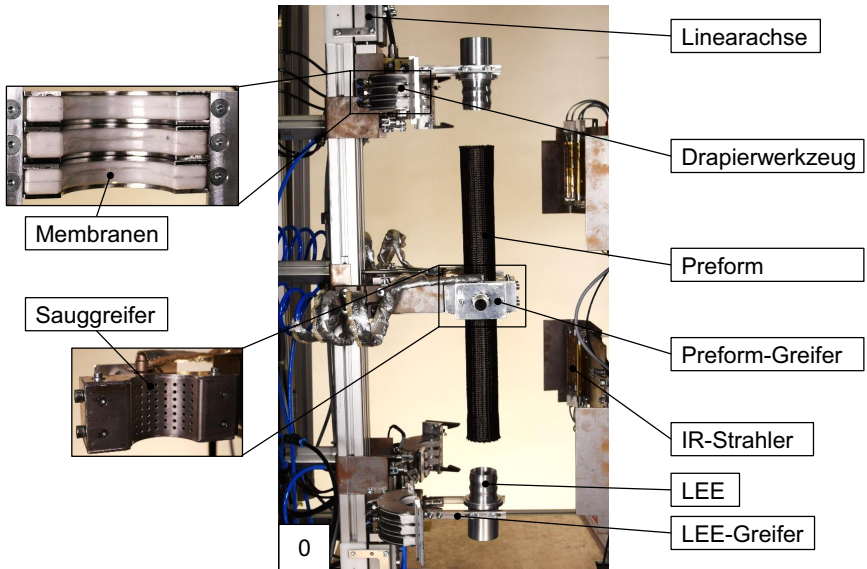


Abbildung 7-4: Hybridisierungsanlage im Schritt 0 mit bestückten LEEen und monolithischem Preform

Der besäumte monolithische Preform wird im nächsten Schritt in die Hybridisierungsanlage eingespannt (vgl. Abbildung 7-4). Die wichtigsten Komponenten der Hybridisierungsanlage sind die Greifer für die LEEe, die Greifer für den Preform, die Drapierwerkzeuge (vgl. Kapitel 6.1) sowie Infrarotstrahler zum Aufheizen des Binders. Die einzelnen Module können nacheinander von außen nach innen mithilfe diverser Kinematiken verfahren werden, sodass die Bearbeitung jeweils entlang der Längsachse des Preforms erfolgt.

Der Preform wird durch zwei Greifer gehalten, welche nach dem Coanda-Prinzip mittels Druckluft einen Unterdruck erzeugen und somit den Preform ansaugen. Die Saugfläche entspricht dabei der zylindrischen Form des Preforms (vgl. Abbildung 7-4, links oben). (A\_Witt 2018, S. 55–58)

Die LEEe werden mittels zweier Zweibackengreifer vom Typ Schunk PGN-plus 100 und passender Greiferfinger axial fluchtend ober- und unterhalb des Preforms ergriffen.

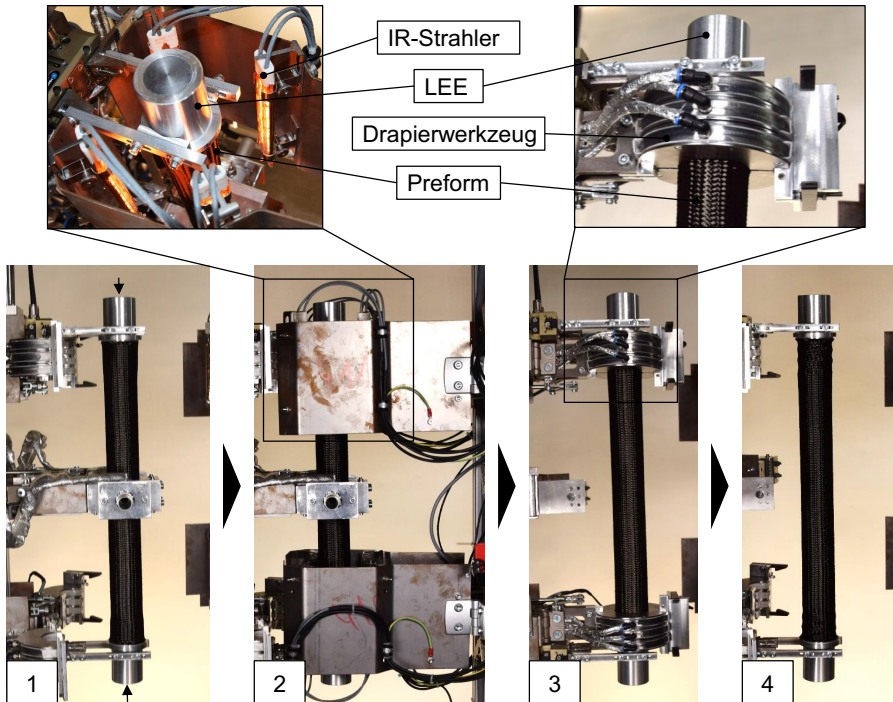


Abbildung 7-5: Hybridisierungsanlage mit den Einzelschritten Lasteinleitungselemente und Preform ineinanderschieben (Schritt 1), Binderpulver durch IR-Strahler erweichen (Schritt 2), Preform drapieren (Schritt 3) und hybriden Preform entnehmen (Schritt 4)

Im ersten Schritt werden die LEE axial in den Preform durch ein Verfahren der Linearachse, an welcher Drapierwerkzeug und LEE-Greifer befestigt sind, ineinandergeschoben (Abbildung 7-5, Schritt 1). Im zweiten Schritt werden die IR-Strahler derart um die Überlappbereiche geklappt, dass diese von vier Richtungen auf den Preform strahlen (siehe Detailansicht in Abbildung 7-5, Schritt 2). Die Temperatur im Überlappbereich wird durch zwei Pyrometer vom Typ RS PRO 161-8103 überwacht, welche die Strahlerleistung auf eine Oberflächentemperatur des Preforms von 90 °C regeln (A\_Wagner

2020, S. 53–55). Die Haltedauer auf der Temperatur von 90 °C wird analog zur Aufheizung des monolithischen Preforms durch das MATLAB-Tool aus (A\_Kobusz 2020) bestimmt und beträgt 20 s (A\_Wagner 2020).

Nachdem der Binder erweicht ist, klappen die IR-Strahler wieder nach außen, sodass sich die Drapierwerkzeuge um den Überlappbereich schließen können (vgl. Abbildung 7-5, Schritt 3). Nun erfolgt die schrittweise Drapierung des Überlappbereichs, indem die einzelnen Membranen nacheinander mit Druckluft mit einem Druck von 0,8 bar beaufschlagt werden. Gleichzeitig erfolgt der axiale Längenausgleich durch die Linearachse, welcher durch das in Kapitel 6.2 eingeführte kinematische Modell berechnet werden kann. Für die drei nacheinander aktivierten Membranen beträgt der berechnete axiale Vorschub der Linearachse -0,6 mm, -0,7 mm und 0,1 mm. Die Länge des monolithischen Preforms beträgt 425,5 mm, die des hybriden Preforms nach der Drapierung 426,7 mm (A\_Schygulla 2021, S. 110).

Nach Abschluss der Drapierung öffnen sich die Drapierwerkzeuge wieder, sodass der hybride Preform aus der Anlage entnommen werden kann (Abbildung 7-5, Schritt 4).

### **7.1.2 Ergebnisse der Erprobung**

Wie oben beschrieben erfolgt die Erprobung der Gesamtprozesskette anhand der realen Bauteilgeometrie. Um eine Bewertung der Prozesskette vornehmen zu können, werden die Anforderungen an den hybriden Preform aus Kapitel 4.1 aufgegriffen. Daraus lassen sich die folgenden Testfälle für den Preform ableiten:

Zur Beurteilung der Steifigkeit des hybriden Preforms und damit seiner Handhabbarkeit in einer automatisierten Prozesskette wird seine Durchbiegung unter Eigen- sowie unter einem Zusatzgewicht betrachtet. Für die Überprüfung der endkonturnahen Drapierung wird die Geometrie des drapierten hybriden Preforms analog zur in Kapitel 6.2.4 vorgestellten Vorgehensweise mit einem Faro Laser-Scanner vermessen und mit der Soll-Geometrie verglichen. Weiterhin wird das Ausfransen an den Enden des hybriden Preforms untersucht.

#### **7.1.2.1 Validierung der Preformsteifigkeit**

Die Biegesteifigkeit wird mithilfe zweier Versuchsreihen abgeschätzt. Im ersten Schritt wird die Durchbiegung des horizontal liegenden hybriden Preforms unter Eigengewicht gemessen. Dazu werden die Lasteinleitungselemente gegriffen und die Durchbiegung

entlang der Längsachse an mehreren Punkten (vgl. Abbildung 7-6) mit einem Messschieber gemessen. Bei drei Wiederholungen kann eine maximale Durchbiegung von 0,4 mm ermittelt werden.

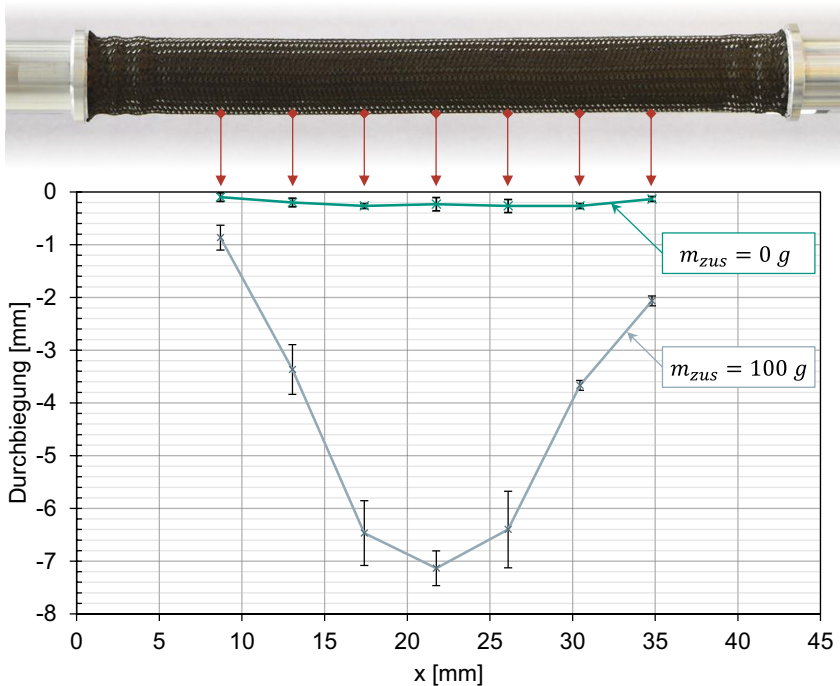


Abbildung 7-6: Durchbiegung des Preforms unter Eigengewicht sowie unter einer Zusatzmasse von 100g.

In einer zweiten Versuchsreihe wird mittig ein Zusatzgewicht  $m_{zus}$  mit einer Masse von 100 g angebracht. Die Masse entspricht in etwa dem Eigengewicht des Preforms (~125 g). Der Preform wird unter der Belastung elastisch mit einer maximalen Durchbiegung von 7,5 mm verformt, geht bei der Entlastung demnach wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Dadurch kann eine Handhabbarkeit des hybriden Preforms in einer hochdynamischen Produktionsumgebung (bspw. unter Einsatz von Industrierobotern) ohne zusätzliche Abstützung des textilen Bereichs des Preforms sichergestellt werden.

Durch den gleichmäßigen Binderauftrag sowie die entsprechende Aufheizung kann somit ein ausreichend steifer Preform entsprechend der Anforderungen hergestellt werden.

### 7.1.2.2 Validierung der endkonturnahen Drapierung

In Kapitel 6.2.4 wurde eine Vorgehensweise zur Messung der drapierten Außengeometrie des Preforms mittels eines Laser-Scanners beschrieben, welche ebenfalls für die Beurteilung der Formabweichung der drapierten Bauteilgeometrie verwendet wird.

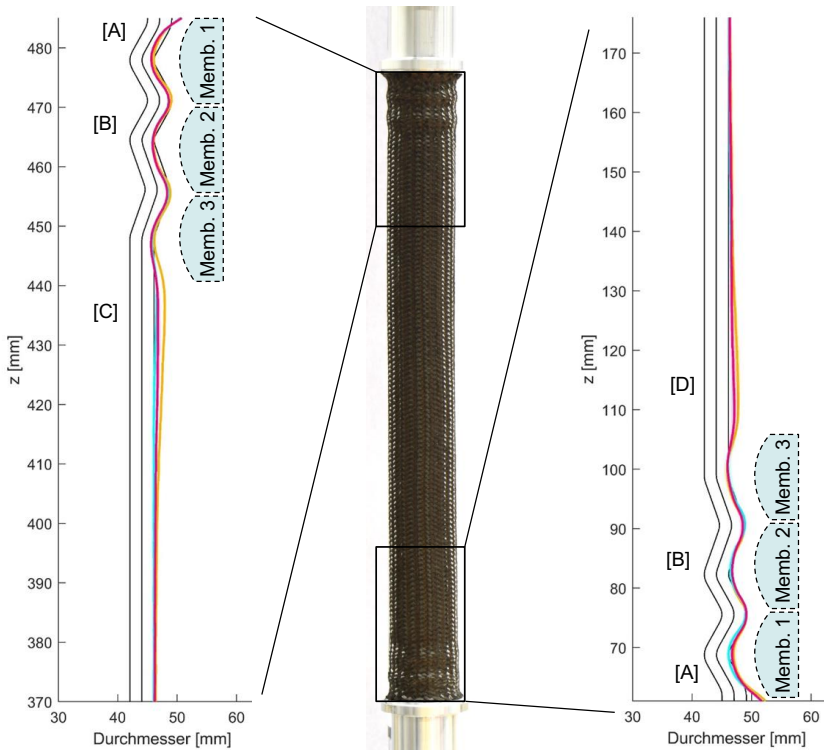


Abbildung 7-7: Ergebnisse der Drapierung: Mittlerer Durchmesser am oberen und unteren Überlappbereich (A\_Schygulla 2021, S. 111–113)

In Abbildung 7-7 sind die Ergebnisse des Scans im Vergleich zur theoretischen Soll-Geometrie für den oberen (a) und den unteren (b) Überlappbereich dargestellt. Die

Sollgeometrie wird berechnet, indem auf die Außenkontur des LEEs die Dicke der drei Flecht Schlauchlagen addiert wird.

Es zeigt sich insgesamt eine gute Drapierung der Geometrie im Überlappbereich. Die größte Abweichung von der Sollgeometrie befindet sich an den Enden (Markierung [A]) – Hier wird der Preform aufgrund seiner Biegesteifigkeit, wenn die ersten Membranen in den äußersten Hinterschnitt drücken, nach außen geformt und vergrößert somit den Durchmesser an den Enden. In den weiteren Teilen des Überlappbereichs besitzt der Preform oft einen kleineren Durchmesser als berechnet, was für eine gute Kompaktierung der Textilien und damit eine gute Drapierung insgesamt spricht [B]. Der obere und untere Teil unterscheiden sich insbesondere in dem Bereich, welcher an den Überlappbereich angrenzt [C], [D]. Dieser Bereich wird durch die IR-Strahler sowie durch Wärmeleitung mit aufgeheizt. Hier zeigt sich, dass im unteren Teil aufgrund der Gewichtskraft Material von oben nach unten fließt, wenn der Preform aufgeheizt ist. Dieser Zustand führt zu einem größeren Durchmesser im zylindrischen Teil des Preforms oberhalb des unteren Überlappbereichs [D]. Im oberen Bereich des Preforms ist dieses Phänomen kaum ausgeprägt [C].

Insgesamt befindet sich die Kontur des Preforms innerhalb der gesteckten maximalen Geometrieabweichungen von 1 mm, daher wird die Anforderung durch die Prozesskette hinsichtlich der endkonturnahen Drapierung erfüllt.

### **7.1.2.3 Validierung des Ausfransens an den Preformenden**

An den Enden des Preforms ist dieser gefährdet für ein Ausfransen, da die einzelnen Fasern durch die unterbrochene Flechtstruktur nicht mehr als Textil zusammenhalten. Eine Bewegung der Fasern untereinander kann hier zu einer Öffnung des Geflechts und somit einer Faserfehlorientierung führen. Durch die Verwendung des Binderpulvers, den gezielten Aktivierungsprozess durch die Aufheizung sowie die schonende Drapierung durch die Membranen soll ein Ausfransen verhindert werden.

In Abbildung 7-8 sind die beiden Enden eines repräsentativen hybriden Preforms dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Fasern an den Rändern weiterhin als Geflecht vorliegen. Es liegt eine saubere Schnittkante der Fasern vor, welche lediglich an einigen Stellen (z.B. am unteren Ende im linken Teil des Bildes) durch unzureichend geschnittene Fasern unterbrochen wird. Diese Fehlschnitte sind jedoch nicht auf den Drapierprozess sondern auf die nicht näher untersuchte Besäumung zurückzuführen und stehen daher nicht im Fokus der Untersuchung.



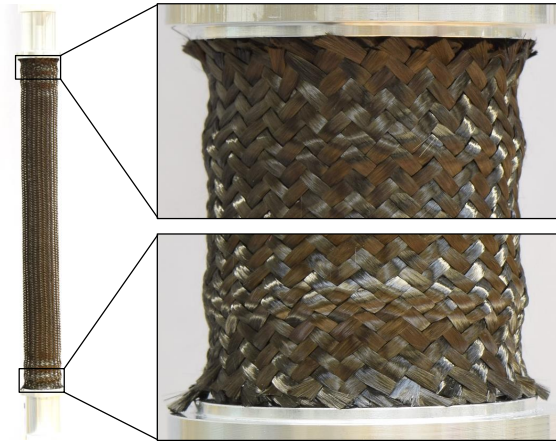


Abbildung 7-8: Randbereiche des Preforms

Die Faserorientierung entspricht weiterhin der Soll-Orientierung im Randbereich. Bei einem Ausfransen wären die Fasern an den Enden deutlich in axialer Richtung orientiert, was nicht beobachtet werden kann. Die Prozesskette kann demnach geflechtschonend den Preform drapieren, ohne Ausfransungen zu bewirken.

Es kann zusammengefasst werden, dass die prototypische Prozesskette für die Herstellung hybrider Preforms anhand der Bauteilgeometrie sämtliche Anforderungen, welche in Kapitel 4.1 gestellt wurden, erfüllt.

## 7.2 Fazit der Erprobung und Übertragbarkeit auf eine industrielle Anlage

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine prototypische Prozesskette aufgebaut, sodass ein Machbarkeitsnachweis des Prozesses erbracht wurde, die Gültigkeit der in den Kapitel 5 und 6 entwickelten Modelle nachgewiesen wurde und alle Anforderungen an den Prozess erfüllt werden konnten. Nachfolgend werden die Erkenntnisse und Verbesserungspotentiale für die Übertragung des Prozesses in eine industrielle Prozesskette für die Prozessschritte des Binderauftrags und der Drapierung zusammengefasst:

- Der vibrationsbasierte **Binderaustrag** kann sehr reproduzierbare und gleichmäßige Streubilder erzeugen. Durch die geringe Bauteil-Komplexität des Systems ist es mechanisch wenig anfällig für Störungen, sodass von einer geringen Wartungsintensität ausgegangen werden kann.

- Aus den untersuchten Elementen im Pulvertrichter zur Beeinflussung des Streubilds, ausgetragener Bindermenge sowie Reproduzierbarkeit können pareto-optimale Konfigurationen ausgewählt werden.
- Bisher werden, um den Prozess schnell für neue Konfigurationen anpassen zu können, additiv hergestellte Komponenten im Bereich des Trichters verwendet. Aufgrund der hohen Oberflächenrauheit ist eine Reinigung der Düse und des Pulversilos sehr aufwändig. Weiterhin wird vermutet, dass durch das Verweilen von Pulver in bzw. an den Wänden aufgrund der hohen Rauigkeit der Pulverfluss gestört werden kann. Für einen industriellen Prozess wird daher empfohlen, Oberflächen mit Pulverkontakt metallisch auszuführen. Die Auswirkungen auf das Schwingungsverhalten sind entsprechend zu betrachten.
- Das Binderaustragssystem besitzt nicht oder nur unter großem Aufwand regelbare Einflussfaktoren wie bspw. die im Raum vorherrschende Luftfeuchtigkeit oder Temperatur. Diese Faktoren haben einen untergeordneten Einfluss auf das Streubild, jedoch kann die ausgetragene Bindermenge beeinflusst werden. In Anlehnung an die in Kapitel 5 beschriebene Prozesskette zur Auswertung der Bindermenge aufgrund des gemessenen Grauwerts, lässt sich in zukünftigen Arbeiten ein Qualitätsregelkreis aufbauen, bei dem die Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit eines auf dem Preform gemessenen Helligkeitswerts geregelt wird. Eine ausgetragene Bindermenge innerhalb des Prozessfensters ist somit stets sichergestellt.
- Im Sinne einer ressourcenschonenden Fabrik kann das Pulver, welches beim Streuen am Preform vorbeifällt, wiederverwendet werden. Hierzu ist sicherzustellen, dass keine weiteren Stäube oder Verunreinigungen das Pulver in der Auffangschale kontaminieren.
- Die **Drapierung** mittels Membranen zeigt ein großes Potential für industrielle Anwendungen. Der Prozess verläuft robust und wiederholgenau.
- Eine optimale, endkonturnahe Drapierung ist nur möglich, wenn zeitgleich zur radialen Drapierung ein axialer Längenausgleich stattfindet, welcher den axialen Materialfluss steuert. Andernfalls kommt es zu Materialanhäufungen oder ungewollten Durchmessererhöhungen bzw. -verringerungen.
- Durch das in Kapitel 6.2 eingeführte kinematische Drapiermodell lässt sich der Faserverlauf auf dem drapierten Überlappbereich vorhersagen und damit der notwendige axiale Materialfluss für jeden Schritt der Drapierung berechnen.

- Es wurde gezeigt, dass sich der erwärmte Preform bei der Hybridisierung aufgrund der Gravitationskraft, insbesondere am unteren Ende, ungewollt verformt. Zur Abhilfe sind zwei Ansätze denkbar: 1.: Durch ein um 180° drehbares Anlagenmodul wird das LEE stets von oben in den Preform gefügt und drapiert. Es wird dadurch notwendig, dass die beiden LEE sequentiell hybridisiert werden, was je nach Taktzeit zulässig erscheint. Durch diese Lösung kann auf ein Drapierwerkzeug inkl. Linearantrieb und IR-Strahler verzichtet werden. 2.: Durch eine Abschirmung und ggf. Kühlung der Preformbereiche bei der Aufheizung, welche nicht drapiert werden sollen, wird verhindert, dass sich diese unter der Gravitation verformen können. Technologisch erscheint dieser Ansatz jedoch aufwändiger.
- Die Membranen erlauben eine zuverlässige Drapierung des Preforms in die Vertiefungen und Hinterschnitte des LEEs. Aufgrund der Unterteilung der Kammern der Membranen ist eine Drapierung an den Grenzen der Kammern jedoch nicht oder nur schwer möglich, da an diesen Stellen die Membranen radial keine Kraft auf den Preform ausüben können. Zielführend ist es daher, die Anzahl an Kammern möglichst gering zu halten. Es sind Konzepte denkbar, in denen der zweischalige Aufbau des Drapierwerkzeugs durch einen einschaligen Aufbau ersetzt werden könnte, bei dem eine Membran das LEE komplett umschließt. Derartige Konzepte sind jedoch nur bei einer entsprechenden Gestaltung des LEEs umsetzbar.
- Die Unterteilung der Länge des Überlappbereichs in mehrere Segmente ist der Tatsache geschuldet, dass die Drapierung von einem Ende des Preforms zu dessen Mitte hin erfolgen muss. Die einzelnen Segmente werden nacheinander mit Druckluft beaufschlagt, um so einen gerichteten Materialfluss zu ermöglichen. Bei einer durchgängigen Membran in einer Kammer wäre ein ähnlicher Materialfluss möglich, indem eine Membran mit unterschiedlichen Wandstärken derart gestaltet wird, dass sie sich an den äußeren Enden (dünnere Material) zuerst an den Preform anlegt, während sie an den zur Preform-Mitte hin orientierten Vertiefungen erst später anlegt, da dort die Wandstärke der Membran dicker ausgeführt wird. Eine entsprechende Auslegung dieser Membranen ist mittels des in Kapitel 6.1.4 vorgestellten FE-Modells möglich, die Fertigbarkeit dieser Membranen wird durch den Gussprozess sichergestellt.
- Ein paralleles Gestalten und Dimensionieren der Bauteilform, insbesondere der Geometrie des Überlappbereichs, sowie der zugehörigen Fertigungs- und insbesondere Preformingprozesse, ist für die Hybridisierung essentiell. Es konnte gezeigt

---

werden, dass insbesondere Überlappgeometrien mit großen Übergangsradien vorteilhaft bei der Drapierung sind. Kleine Radien können aufgrund der Biegesteifigkeit des Preforms nur schlecht abgeformt werden. Für eine hohe Bauteilqualität kann somit frühzeitig im Prozess eine Preforming-gerechte Gestaltung berücksichtigt werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Hybride Faserverbund-Metall-Stäbe erreichen durch die Nutzung des Multi-Material-Designs besonders hohe Leichtbaugrade und sind daher in Branchen wie der Luftfahrtindustrie, Automotive oder dem Anlagenbau technologisch den monolithischen Strukturen überlegen. Im Schleuderverfahren lassen sich derartige Bauteile intrinsisch hybridisieren, sodass während der Entstehung des Faserverbunds die notwendigen metallischen Lasteinleitungselemente stoff- und formschlüssig angebunden werden können. In vorangegangenen Arbeiten (u.a. (Koch 2017)) konnte die Infiltration von zylindrischen Bauteilen im Schleuderverfahren bereits erarbeitet werden.

Für eine hohe Tränkungs- und Bauteilqualität ist die Beschaffenheit des Preforms, welcher in das Schleuderwerkzeug gemeinsam mit den Lasteinleitungselementen eingelegt wird, entscheidend. Der Preform muss endkonturnah und faltenfrei in der späteren Bauteilgeometrie drapiert werden. Außerdem ist eine Stabilisierung des Preforms durch einen Binder, welcher die Lagen gegeneinander fixiert und somit eine Handhabung des Preforms in einer automatisierten Produktionsanlage befähigt, notwendig.

Eine durchgängige Prozesskette für die Herstellung hybrider Faser-Metall-Preforms, ausgehend von flechttechnisch hergestellten Halbzeugen und den metallischen Lasteinleitungselementen, ist zum Beginn der Arbeit unbekannt. Die Erarbeitung der Prozesskette sowie die Schaffung eines durchgehenden Verständnisses stellen daher das Ziel für diese Dissertation dar. Die aus der Zielsetzung abgeleitete Vorgehensweise gliedert sich in drei Phasen: Planungsphase, Einzelprozessphase und Integrationsphase.

In Kapitel 4 werden in der Planungsphase in einem ersten Schritt Anforderungen an die Prozesskette zusammengetragen. Die Anforderungen lassen sich in Anforderungen aus dem Produkt (wie beispielsweise die Form des Überlappbereichs zwischen Faserverbund und Metall oder ein homogener Binderpulverauftrag) und Anforderungen aus dem Prozess (wie beispielsweise eine hohe Wiederholgenauigkeit der Fertigung) einteilen. Auf Grundlage der Anforderungen wird eine Prozesskette in Form eines Funktionsplans aufgestellt. Die identifizierten Einzelprozesse werden diskutiert und hinsichtlich ihres Reifegrades analysiert. Es zeigt sich, dass einzelne Prozesse, wie das Be-

säumen der Textilien, die Handhabung des Preforms oder das Aufschmelzen des Binderpulvers, im Stand der Forschung schon bekannt und hinlänglich erforscht sind oder die Prozesse aus dem Preforming schalenförmiger Bauteile auf die betrachtete Bauteilkategorie stabförmiger Bauteile und Preforms mit geringem Aufwand übertragen werden können. Für die Prozessschritte Binderauftrag und Drapierung existieren keine verwendbaren Ansätze in aktuellen Forschungsarbeiten, daher werden diese beiden Prozessschritte in der anschließenden Einzelprozessphase weiterentwickelt und untersucht.

Der Prozessschritt Binderauftrag (Kapitel 5) ist entscheidend für eine homogene Verteilung einer definierten Binderpulvermenge auf dem Flechtschlauch. Ein Modul zum Binderauftrag muss den Binder in einer möglichst geringen Streuzeit, hohen Wiederholgenauigkeit und mit einem homogenen Streubild auf den Flechtschlauch auftragen. In einer Konzept- und einer Entwurfsphase wird eine vibrationsbasierte Binderdüse entwickelt und prototypisch umgesetzt. Die Adhäsion des Binderpulvers führt zu einer Klumpenbildung innerhalb der Düse und somit zu einem inhomogenen und nicht reproduzierbaren Austrag. Es werden daher verschiedene Elemente zur Manipulation des Binderstroms innerhalb der Düse konzipiert und erprobt. Zur Auswahl einer optimalen Konfiguration der Elemente wird ein Modell entwickelt, welches das Binderstreubild sowie die Wiederholgenauigkeit des Streubilds auf einem zylindrischen Preform, ausgehend von einem linienförmigen Streubild auf einer flachen Platte, vorhersagt. In dem Modell wird analytisch durch Algorithmen aus der Bildverarbeitung das linienförmige Streubild so verzerrt, verschoben und skaliert, dass es auf die abgerollte, rechteckige Mantelfläche des Preforms übertragen werden kann. Durch das Modell werden drei pareto-optimale Konfigurationen ausgewählt. Es wird eine sehr gute Vorhersagegenauigkeit des Modells beim Vergleich mit dem Experiment ermittelt. Somit steht ein Binderauftragsmodul zur Verfügung, welches den an die Gesamtprozesskette gestellten Anforderungen genügt.

In Kapitel 6 wird der Prozessschritt Drapierung für die Anwendung in der Gesamtprozesskette ertüchtigt. Durch die Drapierung wird der Preform endkonturnah in die spätere Bauteilgeometrie umgeformt und der Faserverlauf eingestellt. Es werden daher, ausgehend von Drapierverfahren aus schalenförmigen Bauteilen, verschiedene Konzepte für ein Drapiermodul diskutiert. Aufgrund der erwarteten hohen Drapierqualität, der vergleichsweise geringen Komplexität des Moduls sowie der Flexibilität wird ein membranbasierter Ansatz ausgewählt, auskonstruiert und prototypisch aufgebaut. Das

Modul besteht aus einem zweischaligen Werkzeug mit jeweils drei Kammern, über die Silikonmembranen gespannt sind. Die von den Membranen verschlossenen Kammern können mit Druckluft beaufschlagt werden, sodass die Membranen sich radial nach innen ausdehnen und den Preform in die Hinterschnitte des Lasteinleitungselements drücken. Aufgrund der Kinematik des Geflechts führt eine radiale Durchmesseränderung zu einem axialen Materialfluss des Textils, welcher, wenn er nicht durch eine geeignete Prozessführung ausgeglichen wird, in Drapierfehlern wie Faltenbildung oder Formabweichungen resultiert. Um den notwendigen axialen Materialfluss vorhersagen zu können, muss der Faserverlauf des hybriden Preforms bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird ein kinematisches Drapiermodell vorgestellt. In diesem wird nach einer Diskretisierung der Geometrie des Überlappbereichs der Faserverlauf auf dieser berechnet. Über den Faserverlauf des monolithischen Preforms wird schließlich der axiale Materialfluss und somit die axiale Verbewegung des Drapiermoduls bestimmt. In Versuchen wird das kinematische Modell und die Funktionsweise des Drapiermoduls validiert.

In der dritten Phase, der Integrationsphase (Kapitel 7), wird die in der Planungsphase aufgestellte Prozesskette aufgegriffen und prototypisch in Form mehrerer (teilautomatisierter) Versuchsstände umgesetzt. Die gesamte Prozesskette wird anhand einer realen Bauteilgeometrie erprobt. Es wird nachgewiesen, dass alle an die prototypische Prozesskette gestellten Anforderungen hinsichtlich zulässiger Geometrieabweichung und Steifigkeit des Preforms für eine automatisierte Handhabung erfüllt werden. Aufgrund der Erkenntnisse dieser Arbeit wird in Kapitel 7.2 schließlich das Fazit gezogen, dass die vorgestellte Prozesskette zur Herstellung hybrider Faser-Metall-Preforms mit geringfügigen Anpassungen und Weiterentwicklungen industrialisiert werden kann.

## **8.2 Ausblick**

Im Rahmen dieser Dissertation wurde eine Prozesskette zur automatisierten Herstellung hybrider, trockener Preforms für das Schleuderverfahren hergeleitet, welche nun mit den in Kapitel 7.2 vorgestellten Vorschlägen für eine industrielle Fertigung ertüchtigt werden kann.

Aus den in dieser Arbeit beantworteten wissenschaftlichen Fragestellungen lassen sich jedoch auch weitere Aspekte in der Zukunft aufgreifen, die forschungsseitig beantwortet werden müssen.

Neben den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Bauteilen, bei denen die Fügestelle zwischen LEE und FVK so gestaltet ist, dass der FVK außen und das LEE innen liegt, sind auch andere Kombinationen im Schleuderverfahren herstellbar (vgl. (Koch 2017)). Insbesondere die Drapierung des Preforms von innen in ein außenliegendes LEE stellt aufgrund der beengten Platzverhältnisse bei kleinen Bauteildurchmessern eine technologische Herausforderung dar.

Bisher ausgeklammert wurde die mechanische Auslegung der Fügeverbindung zwischen Metall und FVK. Durch die nun vorliegende (automatisierte) Herstellbarkeit stoff- und formschlüssiger Verbindungen lassen sich hybride Preforms für statisch, dynamisch und auf Crash beanspruchte Bauteile reproduzierbar herstellen. Eine Auslegung der Verbindungen mittels FE-Modellen wird aktuell und in Zukunft am wbk Institut für Produktionstechnik erforscht.

Denkbar ist weiterhin eine Konsolidierung thermoplastischer Flechtstrukturen im Schleuderverfahren. Die vorliegenden Ansätze zur kinematischen Modellierung der Drapierung lassen sich einfach auf thermoplastische Strukturen übertragen. Beachtet werden muss jedoch die deutlich größere viskose Reibung bei der Umformung aufgrund des schmelzflüssigen Thermoplasts, was durch ein geeignetes FE-Modell abgebildet werden kann. Gemeinsam mit weiteren Partnern aus Industrie und Wissenschaft wird sich das wbk im DFG-geförderten Projekt PROMI mit dieser Fragestellung beschäftigen.

Schließlich ist zu überprüfen, inwieweit einzelne im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prozessschritte und Modelle sich für andere Anwendungen adaptieren lassen. Insbesondere die erarbeiteten Prozesse und Modelle zur Binderapplikation lassen sich sowohl auf den Binderauftrag bei schalenförmigen Bauteilen als auch auf andere industrielle Pulverapplikationsprozesse übertragen.



## Literaturverzeichnis

(A\_Berger 2018)

Berger, M. C. (2018), *Experimentelle Bestimmung des textilen Verhaltens von bebinderten Flechtschläuchen bei der Drapierung*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Döhring 2018)

Döhring, A. (2018), *Inbetriebnahme und Optimierung eines Montagestandes zur Herstellung hybrider Faser-Metall-Preforms*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Kobusz 2020)

Kobuß, P. (2020), *Entwicklung eines Simulationsmodells zur Analyse des Aufheizverhaltens von bebinderten Faserpreforms*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Lico 2017)

Lico, C. (2017), *Endeffektorenentwicklung für die Drapierung von zylindrischen Kohle- und Glasfaserpreforms*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Li 2019)

Li, Y. (2019), *Systematische Entwicklung eines parametrischen FE-Prozessmodells für den Umformprozess von textilen Halbzeugen mit Abaqus*. Masterarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Radler 2018)

Radler, T. (2018), *Entwicklung und Konstruktion einer Maschine für die Herstellung von Kohlefaserpreforms mittels Pulverbinder*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Schygulla 2021)

Schygulla, F. (2021), *Kinematische Modellierung des Umformverhaltens von geflochtenen Preforms zur Prozessoptimierung*. Masterarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Wagner 2020)

Wagner, B. (2020), *Automatisierung des Drapierprozesses für hohle hybride Faser-Metall-Halbzeuge*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Wagner 2019)

Wagner, J. (2019), *Konzeption und Optimierung des Binder-Auftragsprozesses für die Herstellung von Faser-Preforms*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Witt 2018)

Witt, D. R. (2018), *Konzeptionierung und Konstruktion eines Endeffektors zum Greifen von biegeschlaffen Hohlprofil-Preforms*. Bachelorarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(A\_Yangui 2018)

Yangui, O. (2018), *Konzeption, Konstruktion und Inbetriebnahme einer automatisierten Montageanlage für FVK-Hybridwellen*. Masterarbeit. wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

(Al-Shroofy & Zhang et al. 2017)

Al-Shroofy, M.; Zhang, Q.; Xu, J.; Chen, T.; Kaur, A. P. & Cheng, Y.-T. (2017), „Solvent-free dry powder coating process for low-cost manufacturing of LiNi<sub>1</sub>/3Mn<sub>1</sub>/3Co<sub>1</sub>/3O<sub>2</sub> cathodes in lithium-ion batteries“, *Journal of Power Sources*, vol. vol. 352, S. 187–193.

(Angerer & Ehinger et al. 2011)

Angerer, A.; Ehinger, C.; Hoffmann, A.; Reif, W. & Reinhart, G. (2011), „Design of an automation system for preforming processes in aerospace industries“. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Trieste, Italy, IEEE, S. 557–562. ISBN: 978-1-4577-1730-7.

(Arold & Neumann et al. 2013)

Arold, B.; Neumann, U. H. & Seefried, H., *Stabilising device, stabilising process and method for producing fibre compound components* (2013). Europäisches Patent, EP2873517.

(Ayranci & Carey 2008)

Ayranci, C. & Carey, J. (2008), „2D braided composites: A review for stiffness critical applications“, *Composite Structures*, vol. 85, no. 1, S. 43–58.

(Balke 2010)

Balke, H. (2010), *Einführung in die Technische Mechanik*, Springer, Berlin, Heidelberg, 3. Auflage. ISBN: 978-3-642-10397-1.

(Ballier 2019)

Ballier, F. J. (2019), *Systematic gripper arrangement for a handling device in light-weight production processes*. Dissertation. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-8440-6704-0.

(Barfuss & Garthaus et al. 2015)

Barfuss, D.; Garthaus, C. & Gude, M. (2015), „Advanced Waviness modelling of thermoplastic tape braids“. *Proceedings of the 20th International Conference on Composite Materials*. Kopenhagen, Dänemark, Hrsg. O. T. Thomsen, C. Berggreen & B. F. Sørensen, Aalborg, Dänemark, S. 1–10.

(Barfuss & Garthaus et al. 2016)

Barfuss, D.; Garthaus, C.; Gude, M. & Grützner, R. (2016), „Design of multi-scale-structured Al-CF/PA6 contour joints“, *International Journal of Automotive Composites*, vol. 2, no. 3/4, S. 299–315.

(Barfuss & Grützner et al. 2016)

Barfuss, D.; Grützner, R.; Garthaus, C.; Gude, M.; Müller, R. & Langrebe, D. (2016), „Intrinsic manufacture of hollow thermoplastic composite/metal structures“. *ESAFORM 2016. Proceedings of the 19th International ESAFORM Conference on Material Forming : Nantes, France, 27-29 April 2016*. Nantes, France, Hrsg. F. Chinesta, E. Cueto & E. Abisset-Chavanne, AIP Publishing, Melville, New York, S. 170024. ISBN: 978-0-7354-1427-3.

(Barfuss & Würfel et al. 2018)

Barfuss, D.; Würfel, V.; Grützner, R.; Gude, M. & Müller, R. (2018), „Integral blow moulding for cycle time reduction of CFR-TP aluminium contour joint processing“ in *Proceedings of the 21st International ESAFORM Conference on Material Forming. ESAFORM 2018 : Palermo, Italy, 23-25 April 2018*, Hrsg. L. Fratini, R. Di Lorenzo, G. Buffa & G. Ingarao, AIP Publishing, Melville, New York, S. 50003. ISBN: 978-0-7354-1663-5 [08.06.2018].

(Barfuss & Grützner et al. 2018)

Barfuss, D.; Grützner, R.; Hirsch, F.; Gude, M.; Müller, R. & Kästner, M. (2018), „Multi-scale structuring for thermoplastic-metal contour joints of hollow profiles“, *Production Engineering*, vol. 12, no. 2, S. 229–238 [08.06.2018].

(Barron & Entringer et al. 1992)

Barron, J. H.; Entringer, J.; Moore, R. S.; Barron, J. H. & Moore, R. S., *METHOD FOR MAKING PREFORMS* (1992). Kanadisches Patent, CA CA2098567 (A1).

(Bender & Gericke 2021)

Bender, B. & Gericke, K. (2021), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, Springer, Berlin, Heidelberg, 9. Auflage. ISBN: 978-3-662-57303-7 [16.04.2021].

(Berthel & Cherif et al. 2013)

Berthel, A.; Cherif, C.; Diestel, O.; Girdauskaite, L.; Gries, T.; Helbig, R.; Hübner, M.; Klingele, J.; Krzywinski, S.; Küppers, S.; Planck, H.; Thielemann, G. & Weser, T. (2013), „Halbzeugentwicklung und Strukturfixierung“ in *Leichtbau mit Textilverstärkung für Serienanwendungen. Bindematerialien - Textile Preforms - Verbundbauteile ; Buch zum DFG-AiF-Clustervorhaben - Leichtbau und Textilien*, Hrsg. C. Cherif, Verl. Wissenschaftliche Skripten, Dresden, S. 81–230. ISBN: 978-3-942267-81-6.

(Besenhard & Faulhammer et al. 2015)

Besenhard, M. O.; Faulhammer, E.; Fathollahi, S.; Reif, G.; Calzolari, V.; Biserni, S.; Ferrari, A.; Lawrence, S. M.; Llusa, M. & Khinast, J. G. (2015), „Accuracy of micro powder dosing via a vibratory sieve-chute system“, *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics : official journal of Arbeitsgemeinschaft für Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V.*, vol. 94, S. 264–272.

(Birkefeld & Röder et al. 2012)

Birkefeld, K.; Röder, M.; Reden, T. von; Bulat, M. & Drechsler, K. (2012), „Characterization of Biaxial and Triaxial Braids. Fiber Architecture and Mechanical Properties“, *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3-4, S. 259–273 [15.10.2017].

(Birkefeld 2013)

Birkefeld, K. (2013), *Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013. IFB Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Verl. Dr. Hut, München, 1. Aufl. ISBN: 978-3-8439-1205-1.

(BMW 2021)

BMW (2021), *Leichtbaustrategie für den Industriestandort Deutschland (Broschüre) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*, Berlin.  
[https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/leichtbaustrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/leichtbaustrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=10) [30.04.2021].

(Böger 1998)

Böger, T. (1998), *Beitrag zur Projektierung von Greifelementen für die Handhabung flächiger, biegeweicher Materialien*. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., Universität Dortmund, Dortmund, Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen.

(Böhm & Häntzschel et al. 2013)

Böhm, S.; Häntzschel, N.; Heinrich, G.; Mäder, E.; Thiede, H. & Wiegand, N. (2013), „Binderdesign und Binderapplikation“ in *Leichtbau mit Textilverstärkung für Serienanwendungen. Bindematerialien - Textile Preforms - Verbundbauteile ; Buch zum DFG-AIF-Clustervorhaben - Leichtbau und Textilien*, Hrsg. C. Cherif, Verl. Wissenschaftliche Skripten, Dresden, S. 27–80. ISBN: 978-3-942267-81-6.

(Böhrnsen 2002)

Böhrnsen, J.-U. (2002), *Dynamisches Verhalten von Schüttgütern beim Entleeren aus Silos*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2002. Braunschweiger Schriften zur Mechanik, Mechanik-Zentrum, Braunschweig. ISBN: 3-920395-44-1.

(Boisse & Zouari et al. 2006)

Boisse, P.; Zouari, B. & Daniel, J.-L. (2006), „Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 12, S. 2201–2212.

(Boisse 2010)

Boisse, P. (2010), „Simulations of Composite Reinforcement Forming“ in *Woven Fabric Engineering*, Hrsg. P. Dobnik, IntechOpen, London, United Kingdom, S. 387–414. ISBN: 978-953-307-194-7.

(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*, vol. 71, no. 5, S. 683–692.

(Brabandt 2018)

Brabandt, D. (2018), *Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels optischer Messtechnik*. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-8440-6070-6.

(Brillowski & Zhang et al. 2017)

Brillowski, F.; Zhang, H.; Orlik, J. & Gries, T. (2017), „Application of Evolutionary Algorithms on the Draping Process“, *Lightweight Design worldwide*, vol. 10, no. 6, S. 48–53.

(Brune 2006)

Brune, M. (2006), „Hotmelt-Sprühbilder im rotierenden Verfahren“, *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, vol. 50, no. 11, S. 15–19. [https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect\\_uri=https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/bf03243708.pdf&casa\\_token=hlqvdsoczkaa-aaac4ktvolaxi1cxq7ae-viecltdrq7osngmjzqns1hbkozv0cu8cbvzc9j\\_ziwhgb83n4avfrvayj3da](https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/bf03243708.pdf&casa_token=hlqvdsoczkaa-aaac4ktvolaxi1cxq7ae-viecltdrq7osngmjzqns1hbkozv0cu8cbvzc9j_ziwhgb83n4avfrvayj3da).

(Brunnschweiler 1953)

Brunnschweiler, D. (1953), „BRAIDS AND BRAIDING“, *Journal of the Textile Institute Proceedings*, vol. 44, no. 9, S. 666–686.

(Burger & Burge 2015)

Burger, W. & Burge, M. J. (2015), *Digitale Bildverarbeitung*, Springer, Berlin, Heidelberg, 3. Auflage [06.03.2021].

(Caumanns & Flambard et al. 2019)

Caumanns, T.; Flambard, A. R.; Geschewski, A.; Greif, A.; Heidelberger, M.; Schumacher, G. & Weber, M. (2019), *Ex-Ante Evaluation für ein Technologietransfer-Programm Leichtbau*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Jülich [30.04.2021].

(Chen 2016)

Chen, S. (2016), *Fabric forming simulation and process optimisation for composites*. PhD-Thesis, University of Nottingham, Nottingham, Faculty of Engineering.

(Chen & McGregor et al. 2017)

Chen, S.; McGregor, O.; Endruweit, A.; Elsmore, M. T.; Focatiis, D. de; Harper, L. T. & Warrior, N. A. (2017), „Double diaphragm forming simulation for complex composite structures“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 95, S. 346–358.

(Cherif 2011)

Cherif, C. (2011), *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 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, Verl. Wissenschaftliche Skripten, Dresden. ISBN: 978-3-942267-81-6.

(Cherif 2016)

Cherif, C. (2016), *Textile Materials for Lightweight Constructions*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1. Auflage. ISBN: 978-3-662-46340-6.

(Cho & Kim et al. 2004)

Cho, J. R.; Kim, K. W.; Yoo, W. S. & Hong, S. I. (2004), „Mesh generation considering detailed tread blocks for reliable 3D tire analysis“, *Advances in Engineering Software*, vol. 35, no. 2, S. 105–113.

(Corves & Brinker et al. 2015)

Corves, B.; Brinker, J.; Prause, I.; Hüsing, M.; Abbas, B.; Krieger, H. & Kosse, P. (2015), „AutoHD—Automated Handling and Draping of Reinforcing Textiles“ in *Mechanisms, Transmissions and Applications*, Hrsg. B. Corves, E.-C. Lovasz & M.

Hüsing, Springer International Publishing, Cham, S. 301–309. ISBN: 978-3-319-17066-4.

(Coutandin & Brandt et al. 2018)

Coutandin, S.; Brandt, D.; Heinemann, P.; Ruhland, P. & Fleischer, J. (2018), „Influence of punch sequence and prediction of wrinkling in textile forming with a multi-punch tool“, *Production Engineering*, vol. 12, no. 6, S. 779–788.

(Coutandin 2020)

Coutandin, S. (2020), *Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem*. Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT-Bibliothek, Karlsruhe.

(Dickert & Ziegmann 2012)

Dickert, M. & Ziegmann, G. (2012), „Influence of binder on the mechanical properties and the permeability of a non-crimp carbon fabric preform“ in *ECCM 15th European Conference on Composite Materials. 24-28. Jun. 2012*. Proceedings, Venedig, Italien. <http://www.escm.eu.org/eccm15/data/assets/843.pdf>. ISBN: 978-88-88785-33-2.

(Dickert & Kroll et al. 2013)

Dickert, M.; Kroll, L.; Nossol, P.; Tröltzsch, J. & Ziegmann, G. (2013), „Entwicklung von Prozessen zur Bauteilfertigung“ in *Leichtbau mit Textilverstärkung für Serienanwendungen. Bindematerialien - Textile Preforms - Verbundbauteile ; Buch zum DFG-AiF-Clustervorhaben - Leichtbau und Textilien*, Hrsg. C. Cherif, Verl. Wissenschaftliche Skripten, Dresden, S. 259–338. ISBN: 978-3-942267-81-6.

(Dickert 2015)

Dickert, M. (2015), *Einfluss von Binder auf die Herstellung von Faserkunststoffverbunden*. Dissertation, Universitätsbibliothek der TU Clausthal, Clausthal, Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik.

(DIN EN ISO 5084)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V., no. DIN EN ISO 5084 (1996-10-00), *Textilien - Bestimmung der Dicke von Textilien und textilen Erzeugnissen (ISO 5084:1996); Deutsche Fassung EN ISO 5084:1996*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. 59.080.30.



(DIN EN 61067-2)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V., no. DIN EN 61067-2 (1998-02-01), *Bestimmung für gewebte Bänder aus Textilglas oder Textilglas und Polyesterfilamenten - Teil 2: Prüfverfahren (IEC 61067-2:1992); Deutsche Fassung EN 61067-1:1997*, Beuth Verlag GmbH; VDE-VERLAG GMBH, Berlin. 29.035.30.

(DIN 8593-1)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V., no. DIN 8593-1 (2003-09-00), *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 1: Zusammensetzen; Einordnung, Unterteilung, Be-griffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. 01.040.25, 25.020, 25.120.99.

(Döbrich & Gereke et al. 2014)

Döbrich, O.; Gereke, T.; Diestel, O.; Krzywinski, S. & Cherif, C. (2014), „Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation“, *Journal of Industrial Textiles*, vol. 44, no. 1, S. 70–84.

(Du & Popper 1994)

Du, G. w. & Popper, P. (1994), „Analysis of a Circular Braiding Process for Complex Shapes“, *Journal of the Textile Institute*, vol. 85, no. 3, S. 316–337.

(Dunst & Bornmann et al. 2018)

Dunst, P.; Bornmann, P.; Hemsel, T. & Sextro, W. (2018), „Vibration-Assisted Handling of Dry Fine Powders“, *Actuators*, vol. 7, no. 2, S. 1–11.

(Ehinger 2013)

Ehinger, C. A. (2013), *Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012. Forschungsberichte IWB, Utz, München. ISBN: 978-3-8316-4233-5.

(Ehleben 2002)

Ehleben, M. (2002), *Herstellung von endlosfaserverstärkten Rohren mit thermoplastischer Matrix im Schleuderverfahren*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2001. Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Shaker, Aachen. ISBN: 3-8322-0282-X.

(Ehleben & Schürmann 2006)

Ehleben, M. & Schürmann, H. (2006), „Manufacturing of centrifuged continuous

fibres-reinforced precision pipes with thermoplastic matrix“, *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 15, S. 2601–2609.

(Ehrenstein 2006)

Ehrenstein, G. W. (2006), *Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2. völlig überarbeitete Auflage. ISBN: 3446457542.

(Esmaeel & Taheri 2009)

Esmaeel, R. A. & Taheri, F. (2009), „Stress Analysis of Tubular Adhesive Joints with Delaminated Adherend“, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, no. 13-14, S. 1827–1844.

(Fahrenwaldt & Schuler et al. 2013)

Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V. & Twrdek, J. (2013), *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 5., vollständig überarbeitete Auflage. ISBN: 978-3-658-03141-1.

(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*, vol. 63, no. 2, S. 679–701 [21.04.2021].

(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“, *Proceedings of the International Conference on "New Developments Sheet Metal Forming"*, Stuttgart, S. 51–70.

(Fleischer & Koch et al. 2016)

Fleischer, J.; Koch, S.-F. & Ruhland, P. (2016), „Rotational molding of fiber reinforced plastics with elastic composite core“. *International Conference on Competitive Manufacturing. COMA '16 : 27 January-29 January 2016, Stellenbosch, South Africa : proceedings*, Hrsg. D. Dimitrov & T. Oosthuizen, Global Competitiveness Centre in Engineering Department of Industrial Engineering Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, S. 181–186. ISBN: 978-0-7972-1602-0.

(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*, vol. 67, no. 2, S. 603–626.

(Fleischer 2021)

Fleischer, J. (2021), *Intrinsische Hybridverbunde Für Leichtbautragstrukturen*. Grundlagen der Fertigung, Charakterisierung und Auslegung, Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662628331.

(Förster 2016)

Förster, F. (2016), *Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte*. Dissertation. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker Verlag GmbH, Aachen. ISBN: 978-3-8440-5091-2.

(Frauenhofer & Ströhlein et al. 2008)

Frauenhofer, M.; Ströhlein, T.; Fabig, S.; Böhm, S.; Herbeck, L. & Dilger, K. (2008), „Induction technique in manufacturing preforms“, *Mechanics of Composite Materials*, vol. 44, no. 5, S. 523–530.

(Fuchs & Schoeberl et al. 2013)

Fuchs, A. N.; Schoeberl, M.; Tremmer, J. & Zaeh, M. F. (2013), „Laser Cutting of Carbon Fiber Fabrics“, *Physics Procedia*, vol. 41, S. 372–380.

(Fuerst 2011)

Fuerst, T., *Verfahren, Anlage und Vorrichtung zum Auftragen eimeherschichtigen Vorformlings* (2011). Deutsches Patent, DE DE102011076150 (A1).

(Gatouillat & Bareggi et al. 2013)

Gatouillat, S.; Bareggi, A.; Vidal-Sallé, E. & Boisse, P. (2013), „Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 54, S. 135–144.

(Gereke & Döbrich et al. 2018)

Gereke, T.; Döbrich, O.; Malik, S. A.; Kocaman, R. T.; Aibibu, D.; Schmidt, K.; Antonyuk, S.; Ripperger, S. & Cherif, C. (2018), „Numerical micro-scale modelling of the mechanical loading of woven fabrics equipped with particles“, *IOP Conference*

series: *Materials Science and Engineering*, vol. 460, S. 12006.  
<https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F460%2F1%2F012006>.

(Grieser & Mitschang 2014)

Grieser, T. & Mitschang, P. (2014), „Kontinuierliches Profil-Preforming für Versteifungsstrukturen“, *Lightweight Design*, vol. 7, no. 4, S. 24–29.

(Grieser 2016)

Grieser, T. (2016), *Textiles Formgebungsverhalten beim kontinuierlichen Preforming*. Dissertation. IVW-Schriftenreihe, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, Als Manuskript gedruckt. ISBN: 978-3-944440-17-0 [15.10.2017].

(Gröger & Tüzün et al. 2003)

Gröger, T.; Tüzün, U. & Heyes, D. M. (2003), „Modelling and measuring of cohesion in wet granular materials“, *Powder Technology*, vol. 133, no. 1-3, S. 203–215.

(Gross & Hauger et al. 2019)

Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J. & Wall, W. A. (2019), *Technische Mechanik 1*. Lehrbuch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 14., aktualisierte Auflage. ISBN: 978-3-662-59156-7.

(Gude & Lenz et al. 2015)

Gude, M.; Lenz, F.; Gruhl, A.; Witschel, B.; Ulbricht, A. & Hufenbach, W. (2015), „Design and automated manufacturing of profiled composite driveshafts“, *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 22, no. 2, S. 187–197.

(Guess & Reedy et al. 1995)

Guess, T. R.; Reedy, E. D. & Am Slavin (1995), „Testing Composite-to-Metal Tubular Lap Joints“, *Journal of Composites Technology and Research*, vol. 17, no. 2, S. 117–124.

(Guyader & Gabor et al. 2013)

Guyader, G.; Gabor, A. & Hamelin, P. (2013), „Analysis of 2D and 3D circular braiding processes: Modeling the interaction between the process parameters and the pre-form architecture“, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 69, S. 90–104.

(Haberhauer 2018)

Haberhauer, H. (2018), *Maschinenelemente*. Gestaltung, Berechnung, Anwen-

Lehrbuch, Springer Vieweg, Berlin. <http://www.springer.com/de/book/9783662530474>, 18., überarbeitete Auflage. ISBN: 978-3-662-53047-4.

(Härtel 2015)

Härtel, F. (2015), *Entwicklung eines Vorentwurfansatzes für die automatisierte Drapierung von Faserhalbzeugen*. Zugl.: Universität Stuttgart, Diss., 2015, Verlag Dr. Hut, München.

(Helber & Schrick et al. 2018)

Helber, F.; Schrick, B.; Carosella, S. & Middendorf, P. (2018), „Tailored preform production with customizable UD materials for hybrid material design“. *SAMPE Europe Conference & Exhibition 2017 Stuttgart*. Stuttgart, Germany, 14-16 November 2017. Stuttgart, Hrsg. SAMPE Europe, Curran Associates Inc, Red Hook, NY, S. 1–8.

(Helms 2006)

Helms, O. (2006), *Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise*. Dissertation, TU Dresden, Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK).

(Henning & Moeller 2011)

Henning, F. & Moeller, E. (2011), *Handbuch Leichtbau*. Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Hanser, München, Wien, 1. Auflage. ISBN: 978-3-446-42267-4.

(Hesse 2011)

Hesse, S. (2011), *Greifertechnik*. Effektoren für Roboter und Automaten, Hanser, München. <http://www.hanser-elibrary.com/action/show-Book?doi=10.3139/9783446427419>, 1. Aufl. ISBN: 3446424229.

(Hesse & Malisa 2020)

Hesse, S. & Malisa, V. (2020), *Grundlagen der Handhabungstechnik*, Carl Hanser Verlag, München, 5., neu bearbeitete Auflage von Viktorio Malisa. ISBN: 978-3-446-46359-2.

(Hough 1962)

Hough, P. V. C., *Method and means for recognizing complex patterns* (1962), U.S. Patent 3,069,654.

(Hübner & Rocher et al. 2016)

Hübner, M.; Rocher, J.-E.; Allaoui, S.; Hivet, G.; Gereke, T. & Cherif, C. (2016), „Simulation-based investigations on the drape behavior of 3D woven fabrics made of commingled yarns“, *International Journal of Material Forming*, vol. 9, no. 5, S. 591–599.

(Hübschen & Altpeter et al. 2016)

Hübschen, G.; Altpeter, I.; Tschuncky, R. & Herrmann, H.-G. (Hrsg.) (2016), *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods*, Elsevier/WP Woodhead Publishing, Amsterdam, Boston, Cambridge. ISBN: 9780081000403.

(Hufenbach & Kroll et al. 2005)

Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbricht, A. & Grothaus, R. (2005), „Integrative Rohrgewinde in Wickeltechnik für hochbeanspruchte Verbindungen bei Leichtbaustrukturen“ in *VDI-Bericht Nr. 1903*, S. 301–316.

(Hufenbach & Lenz et al. 2012)

Hufenbach, W. A.; Lenz, F.; Spitzer, S. & Renner, O. (2012), „Welle-Nabe-Verbindungen für Leichtbauantriebswellen in Faserverbund-Metall-Mischbauweise. Untersuchung formschlussdominierter Verbindungstypen und Erarbeitung praxisnaher Gestaltungshinweise“ in *Welle-Nabe-Verbindungen. 5. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen : Gestaltung - Fertigung - Anwendungen ; mit Fachausstellung ; Nürtingen bei Stuttgart, 25. und 26. September 2012*, VDI Verlag, Düsseldorf, S. 141–153. ISBN: 3180921765.

(Hufenbach & Ulbricht et al. 2014)

Hufenbach, W. A.; Ulbricht, A.; Wohlfahrt, D.; Witschel, D.-I. B.; Wenzel, H.; Birke, M.; Lenz, F. & Kiele, J. (April 2014), *Validierung des Innovationspotentials von neuartigen Gelenkwellen in funktionsintegrativer Faserverbund-Leichtbauweise*. VIWEL Abschlussbericht, Dresden.

(Imole & Krijgsman et al. 2016)

Imole, O. I.; Krijgsman, D.; Weinhard, T.; Magnanimo, V.; Chávez Montes, B. E.; Ramaioli, M. & Luding, S. (2016), „Reprint of "Experiments and discrete element simulation of the dosing of cohesive powders in a simplified geometry"“, *Powder Technology*, vol. 293, S. 69–81.

(Jähne 2012)

Jähne, B. (2012), *Digitale Bildverarbeitung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg [06.03.2021].

(Jambor 2016)

Jambor, E. (2016), *Manufacturing and testing of spline geometry using carbon fiber reinforced composite*. Masters Thesis, Colorado State University., Fort Collins, Colorado, USA.

(Jauffrès & Sherwood et al. 2010)

Jauffrès, D.; Sherwood, J. A.; Morris, C. D. & Chen, J. (2010), „Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming“, *International Journal of Material Forming*, vol. 3, no. S2, S. 1205–1216.

(Jost & Schwarz et al. 2021)

Jost, H.; Schwarz, M.; Grossmann, F.; Sauer, J.; Hell, A. & Herrmann, H.-G. (2021), „Nondestructive and Destructive Testing on Intrinsic Metal-CFRP Hybrids“ in *Technologies for economic and functional lightweight design*, Hrsg. K. Dröder & T. Viotor, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-62923-9.

(Kache 2010)

Kache, G. (2010), *Verbesserung des Schwerkraftflusses kohäsiver Pulver durch Schwingungseintrag*. Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2009, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik.

(Kärger & Galkin et al. 2018)

Kärger, L.; Galkin, S.; Zimmerling, C.; Dörr, D.; Linden, J.; Oeckerath, A. & Wolf, K. (2018), „Forming optimisation embedded in a CAE chain to assess and enhance the structural performance of composite components“, *Composite Structures*, vol. 192, S. 143–152.

(Koch & Dackweiler et al. 2015)

Koch, S.-F.; Dackweiler, M.; Pottmeyer, F. & Fleischer, J. (2015), „Intrinsische Hybridisierung im Schleuderverfahren“, *Lightweight Design*, vol. 8, no. 4, S. 12–19.

(Koch 2017)

Koch, S.-F. (2017), *Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren*. Ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe, Shaker, Aachen, 1. Auflage. ISBN: 9783844054415.

(Kolks & Tserpes 2014)

Kolks, G. & Tserpes, K. I. (2014), „Efficient progressive damage modeling of hybrid composite/titanium bolted joints“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 56, S. 51–63.

(Kollmann 2002)

Kollmann, T. (2002), *Schwingungsinduziertes Fließen feinstkörniger, kohäsiver Pulver*. Magdeburg, Univ., Fak. für Verfahrens- und Systemtechnik, Diss., 2002, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik.

(Kordi & Husing et al. 2007)

Kordi, M. T.; Husing, M. & Corves, B. (2007), „Development of a multifunctional robot end-effector system for automated manufacture of textile preforms“. *2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Zurich, Switzerland, 4 - 7 September 2007*. Zurich, Switzerland, Hrsg. IEEE Robotics and Automation Society, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, S. 1–6. ISBN: 978-1-4244-1263-1.

(Kordi 2009)

Kordi, M. T. (2009), *Entwicklung von Roboter-Endeffektoren zur automatisierten Herstellung textiler Preforms für Faserverbundbauteile*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2009. Produktentwicklung, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832284497.

(Korochkina & Jewell et al. 2008)

Korochkina, T. V.; Jewell, E. H.; Claypole, T. C. & Gethin, D. T. (2008), „Experimental and numerical investigation into nonlinear deformation of silicone rubber pads during ink transfer process“, *Polymer Testing*, vol. 27, no. 6, S. 778–791.

(Kunz & Löchte et al. 2015)

Kunz, H.; Löchte, C.; Dietrich, F.; Raatz, A.; Fischer, F.; Dröder, K. & Dilger, K.



(2015), „Novel form-flexible handling and joining tool for automated preforming“, *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 22, no. 2, S. 199–213.

(Kunze & Galkin et al. 2020)

Kunze, E.; Galkin, S.; Böhm, R.; Gude, M. & Kärger, L. (2020), „The Impact of Draping Effects on the Stiffness and Failure Behavior of Unidirectional Non-Crimp Fabric Fiber Reinforced Composites“, *Materials*, vol. 13, no. 13, S. 1–34.

(Kwade & Haselrieder et al. 2018)

Kwade, A.; Haselrieder, W.; Leithoff, R.; Modlinger, A.; Dietrich, F. & Droeder, K. (2018), „Current status and challenges for automotive battery production technologies“, *Nature Energy*, vol. 3, no. 4, S. 290–300.

(Lee & Lee 2007)

Lee, S. W. & Lee, D. G. (2007), „Torque transmission capability of composite–metal interference fit joints“, *Composite Structures*, vol. 78, no. 4, S. 584–595.

(Liebsch & Kupfer et al. 2017)

Liebsch, A.; Kupfer, R.; Defranceski, A.; Rösler, B.; Janik, J. & Gude, M. (2017), „Automated Preforming of Braided Hoses Made of Thermoplast-glass Fiber Hybrid Yarns“, *Procedia CIRP*, vol. 66, S. 57–61 [16.10.2017].

(Liu & Kyosev 2019)

Liu, Y. & Kyosev, Y. (2019), „Automatic analysis the braiding angle of the braided fabrics using image processing“, *Proceedings of the 22nd International Conference STRUTEX 2018, 05.-07.12.2018, Liberec, Czech Republic*, no. 26, S. 63–68 [06.03.2021].

(Löhr 2013)

Löhr, S. (2013), *Zur Gestaltung von hochbelasteten Leichtbau-Speichersystemen und -Hydraulikzylindern aus Faser-Thermoplast-Verbunden*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013. Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Shaker, Aachen, 1., Aufl. ISBN: 3844021701.

(Long 2007)

Long, A. C. (Hrsg.) (2007), *Composites forming technologies*, Woodhead, Cambridge. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781845690335>. ISBN: 0-8493-9102-4.

(Lotter & Wiendahl 2012)

Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (Hrsg.) (2012), *Montage in der industriellen Produktion*. Ein Handbuch für die Praxis ; mit 18 Tabellen, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-29061-9.

(Lu & Yang et al. 2006)

Lu, X.; Yang, S. & Evans, J. R. G. (2006), „Studies on ultrasonic microfeeding of fine powders“, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, no. 11, S. 2444–2453.

(Lu & Yang et al. 2009)

Lu, X.; Yang, S. & Evans, J. R. G. (2009), „Microfeeding with different ultrasonic nozzle designs“, *Ultrasonics*, vol. 49, no. 6-7, S. 514–521.

(Ludwig & Zheng et al. 2016)

Ludwig, B.; Zheng, Z.; Shou, W.; Wang, Y. & Pan, H. (2016), „Solvent-Free Manufacturing of Electrodes for Lithium-ion Batteries“, *Scientific Reports*, vol. 6, S. 23150.

(Mack & Taylor 1956)

Mack, C. & Taylor, H. M. (1956), „39—The Fitting of Woven Cloth to Surfaces“, *Journal of the Textile Institute Transactions*, vol. 47, no. 9, S. 477–488.

(Mack & Mitschang 2015)

Mack, J. & Mitschang, P. (2015), „Efficient and Flexible Technology for Binder Roving Manufacturing“, *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, vol. 8, no. 2, S. 93–100.

(Mack 2015)

Mack, J. (2015), *Entwicklung eines adaptiven Online-Bebinderungsprozesses für die Preformherstellung*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2015. IVW-Schriftenreihe, Inst. für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, Als Ms. gedr. ISBN: 978-3-944440-11-8.

(Manu 2020)

Manu (2020), *Patch Remesher*. MATLAB Central File Exchange. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49691-patch-remesher> [05.03.2021].

(Marannano & Zuccarello 2015)

Marannano, G. & Zuccarello, B. (2015), „Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints“, *Composites Part B: Engineering*, vol. 71, S. 28–39. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681400537X>.

(Margossian & Bel et al. 2014)

Margossian, A.; Bel, S.; Balvers, J. M.; Leutz, D.; Freitas, R. & Hinterhoelzl, R. (2014), „Finite element forming simulation of locally stitched non-crimp fabrics“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 61, S. 152–162.

(Matsuzaki & Shibata et al. 2008)

Matsuzaki, R.; Shibata, M. & Todoroki, A. (2008), „Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 2, S. 154–163.

(Melenka & Hunt et al. 2017)

Melenka, G. W.; Hunt, A. J.; van Ravenhorst, J. H.; Akkerman, R.; Pastore, C. M.; Ko, F. K.; Munro, M. & Carey, J. P. (2017), „Manufacturing processes for braided composite materials“ in *Handbook of Advances in Braided Composite Materials*, Elsevier, Cambridge (UK), Cambridge (USA), Kidlington (UK), S. 47–153. ISBN: 9780081003695.

(Meyer 2008)

Meyer, O. (2008), *Kurzfaser-Preform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Institut für Flugzeugbau.

(Neitzel & Mitschang et al. 2014)

Neitzel, M.; Mitschang, P. & Breuer, U. (2014), *Handbuch Verbundwerkstoffe*. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. ISBN: 978-3-446-43696-1.

(Neumann 2017)

Neumann, U. H. (2017), *Kontinuierliches Ultraschall-Preformen zur Fertigung von CFK-Bauteilen in der Luftfahrt*. Dissertation. IVW-Schriftenreihe, Als Manuskript gedruckt. ISBN: 978-3-944440-20-0.

(Niemann & Winter et al. 2019)

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R. & Stahl, K. (2019), *Maschinenelemente 1*,

Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 5., vollständig überarbeitete Auflage. ISBN: 978-3-662-55481-4.

(Nieschlag & Ruhland et al. 2018)

Nieschlag, J.; Ruhland, P.; Daubner, S.; Koch, S.-F. & Fleischer, J. (2018), „Finite element optimisation for rotational moulding with a core to manufacture intrinsic hybrid FRP metal pipes“, *Production Engineering*, vol. 28, no. 1, S. 329.

(Nieschlag & Ruhland et al. 2019)

Nieschlag, J.; Ruhland, P.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Rotational Molding for the Production of Hybrid FRP Metal Tension and Compression Rods with Form Fit“ in *Production at the leading edge of technology*, Hrsg. J. P. Wulfsberg, W. Hintze & B.-A. Behrens, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 131–138. ISBN: 978-3-662-60416-8.

(Nieschlag & Coutandin et al. 2020)

Nieschlag, J.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2020), „Production and Tensile Testing of Rotationally Molded Hybrid Composite Rods“. *SAMPE Virtual Conference Proceedings*. Seattle / Online-Konferenz, Hrsg. SAMPE North America, Seattle, S. 1–11.

(Nishi & Hirashima 2013)

Nishi, M. & Hirashima, T. (2013), „Approach for dry textile composite forming simulation“, *Proceedings of 19th International Conference on Composite materials (ICCM-19)*, 28.07-02.08.2013, Montreal, Kanada, S. 7486–7493 [09.08.2018].

(Nosrat-Nezami & Gereke et al. 2014)

Nosrat-Nezami, F.; Gereke, T.; Eberdt, C. & Cherif, C. (2014), „Characterisation of the shear–tension coupling of carbon-fibre fabric under controlled membrane tensions for precise simulative predictions of industrial preforming processes“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 67, S. 131–139.

(Pantaleev & Yordanova et al. 2017)

Pantaleev, S.; Yordanova, S.; Janda, A.; Marigo, M. & Ooi, J. Y. (2017), „An experimentally validated DEM study of powder mixing in a paddle blade mixer“, *Powder Technology*, vol. 311, S. 287–302.

(Parashar & Mertiny 2012)

Parashar, A. & Mertiny, P. (2012), „Adhesively bonded composite tubular joints: Review“, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 38, S. 58–68.

(Pariterre 2021)

Pariterre (2021), *sliceDelaunay*. MATLAB Central File Exchange. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56536-slicedelaunay> [05.03.2021].

(Pei & Xiao et al. 2019)

Pei, L.; Xiao, Z.; Geng, L.; Wu, J.; Zhang, F. & Sun, Y. (2019), „Surface parameters measurement for braided composite preform based on gray projection“, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, S. 1–16 [06.03.2021].

(Pendar & Pascoa 2019)

Pendar, M. R. & Pascoa, J. (2019), „Numerical Investigation of Electrostatic Spray Painting Transfer Processes for Vehicle Coating“. *SAE Int. J. Advances & Curr. Prac. in Mobility*, SAE International, Warrendale, PA, United States, S. 747–754.

(Pfrommer & Zimmerling et al. 2018)

Pfrommer, J.; Zimmerling, C.; Liu, J.; Kärger, L.; Henning, F. & Beyerer, J. (2018), „Optimisation of manufacturing process parameters using deep neural networks as surrogate models“, *Procedia CIRP*, vol. 72, S. 426–431.

(Pham & Döbrich et al. 2019)

Pham, M. Q.; Döbrich, O.; Trümper, W.; Gereke, T. & Cherif, C. (2019), „Numerical Modelling of the Mechanical Behaviour of Biaxial Weft-Knitted Fabrics on Different Length Scales“, *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 12, no. 22.

(Potluri & Sharma et al. 2001)

Potluri, P.; Sharma, S. & Ramgulam, R. (2001), „Comprehensive drape modelling for moulding 3D textile preforms“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 10, S. 1415–1424.

(Purol 2011)

Purol, H. (2011), *Entwicklung kontinuierlicher Preformverfahren zur Herstellung gekrümmter CFK-Versteifungsprofile*. Science Report aus dem Faserinstitut Bremen, Logos, Berlin. ISBN: 978-3-8325-2844-7.

(Rawal & Gupta et al. 2015)

Rawal, A.; Gupta, S.; Saraswat, H. & Sibal, A. (2015), „Geometrical modeling of near-net shape braided preforms“, *Textile Research Journal*, vol. 85, no. 10, S. 1055–1064.

(REFA 2015)

REFA (2015), *Industrial Engineering*. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung. REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung, Hanser, München, 2. Aufl. ISBN: 978-3-446-44787-5.

(Reinhart & Straßer et al. 2010)

Reinhart, G.; Straßer, G. & Ehinger, C. (2010), „Highly Flexible Automated Manufacturing of Composite Structures Consisting of Limp Carbon Fibre Textiles“, *SAE International Journal of Aerospace*, vol. 2, no. 1, S. 181–187.

(Reinhold & Juergens et al. 2009)

Reinhold, R.; Juergens, S. & Jürgens, S., *Device and process for the production of fibre-reinforced components* (2009). Europäisches Patent, EP EP2179839 (A2).

(Reinhold & Mehlenhoff 2011)

Reinhold, R. & Mehlenhoff, T. (2011), „Continuous Preforming System for Curved Composite Profiles“, *SAE International Journal of Aerospace*, vol. 4, no. 2, S. 681–689.

(Ringwald 2014)

Ringwald, H. (2014), *Entwicklung und Charakterisierung von Binderaktivierungsverfahren zur Herstellung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014, Dr. Hut, München. ISBN: 3843917175.

(Rudd & Turner et al. 1999)

Rudd, C.; Turner, M.; Long, A. & Middleton, V. (1999), „Tow placement studies for liquid composite moulding“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 9, S. 1105–1121.

(Ruhland & Berger et al. 2019)

Ruhland, P.; Berger, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Production of Hybrid Tubular Metal-Fiber-Preforms: Material Characterization of Braided Hoses with a Binder. Material Characterization of Braided Hoses with a Binder“, *Procedia CIRP*, vol. 85, S. 121–126.

(Ruhland & Nieschlag et al. 2020)

Ruhland, P.; Nieschlag, J.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2020), „Hybrides Rotational-Moulding-Verfahren/Hybrid rotational moulding process – Cost-efficient manufacturing of lightweight components by intrinsic hybridization“, *wt Werkstattstechnik online*, vol. 110, no. 07-08, S. 517–520.

(Ruhland & Li et al. 2021)

Ruhland, P.; Li, Y.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2021), „Production of hybrid tubular metal-fibre preforms: development of a digital twin for the draping process. Development of a Digital Twin for the Draping Process“, *Procedia CIRP*, vol. 99, S. 437–442.

(Sauer 2016)

Sauer, B. (2016), *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-39500-0.

(Schillfahrt & Schledjewski 2017)

Schillfahrt, C. & Schledjewski, R. (2017), „Analytical Modelling of Textile Parameters and Draping Behaviour of 2D Biaxial Braided Sleeveings“, *Polymers & Polymer Composites*, vol. 25, no. 5, S. 315–326.

(Schillfahrt & Fauster et al. 2017)

Schillfahrt, C.; Fauster, E. & Schledjewski, R. (2017), „Influence of process pressures on filling behavior of tubular fabrics in bladder-assisted resin transfer molding“, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 3, no. 4, S. 148–158.

(Schillfahrt & Fauster et al. 2018)

Schillfahrt, C.; Fauster, E. & Schledjewski, R. (2018), „A methodology for determining preform compaction in bladder-assisted resin transfer molding with elastomeric bladders for tubular composite parts“, *International Journal of Material Forming*, vol. 17, no. 2, S. 159.

(Schulz 2004)

Schulz, M. (2004), *Druckluftspeicher aus Faser-Kunststoff-Verbunden in modularer Bauweise*. Techn. Univ., Diss.–Darmstadt, 2003. Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Shaker, Aachen. ISBN: 3832224882.

(Schulze 2019)

Schulze, D. (2019), *Pulver und Schüttgüter*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-58775-1.

(Schütze & Hernández 2021)

Schütze, O. & Hernández, C. (2021), *Archiving Strategies for Evolutionary Multi-objective Optimization Algorithms*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 978-3-030-63772-9.

(Seliger & Szimmat et al. 2003)

Seliger, G.; Szimmat, F.; Niemeier, J. & Stephan, J. (2003), „Automated Handling of Non-Rigid Parts“, *CIRP Annals*, vol. 52, no. 1, S. 21–24. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607605216>.

(Siebertz & van Bebber et al. 2010)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2010), *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*. VDI-Buch, Springer, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-05492-1 [26.10.2017].

(Skhabovskiy & Batista et al. 2017)

Skhabovskiy, I.; Batista, N. L.; Damato, C. A.; Reis, R. P.; Botelho, E. C. & Scotti, A. (2017), „Appraisal of fiber-metal laminate panels reinforced with metal pins deposited by CMT welding“, *Composite Structures*, vol. 180, S. 263–275.

(Snape & Turner et al. 2018)

Snape, A. E.; Turner, J. L.; El-Dessouky, H. M.; Saleh, M. N.; Tew, H. & Scaife, R. J. (2018), „Stabilising and Trimming 3D Woven Fabrics for Composite Preforming Applications“, *Applied Composite Materials*, vol. 25, no. 4, S. 735–746.

(Sofi & Neunkirchen et al. 2018)

Sofi, T.; Neunkirchen, S. & Schledjewski, R. (2018), „Path calculation, technology and opportunities in dry fiber winding: a review“, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 4, no. 3, S. 57–72.

(Steinbach AG 2019)

Steinbach AG (2019), *Technisches Datenblatt Silicone 35 White*, Detmold. [https://www.steinbach-ag.de/fileadmin/user\\_upload/produkte/Datenblaetter/forming-solutions/Silicone\\_35\\_White\\_deu\\_1.7\\_17042019.pdf](https://www.steinbach-ag.de/fileadmin/user_upload/produkte/Datenblaetter/forming-solutions/Silicone_35_White_deu_1.7_17042019.pdf) [01.05.2021].



(Steinhauser 2016)

Steinhauser, M. O. (2016), *Computational Multiscale Modeling of Fluids and Solids*. Theory and Applications, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.  
<http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4755387>, 2nd ed. ISBN: 978-3-662-53224-9.

(Stichel & Laumer et al. 2014)

Stichel, T.; Laumer, T.; Baumüller, T.; Amend, P. & Roth, S. (2014), „Powder Layer Preparation Using Vibration-controlled Capillary Steel Nozzles for Additive Manufacturing“, *Physics Procedia*, vol. 56, S. 157–166.

(Stieß 2009)

Stieß, M. (2009), *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Springer-Lehrbuch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3., vollst. neu bearb. Aufl. ISBN: 9783540325512.

(Straßer 2012)

Straßer, G. (2012), *Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011. Forschungsberichte IWB, Utz, München. ISBN: 978-3-8316-4161-1 [07.06.2018].

(Ströhlein & Kleineberg et al. 2007)

Ströhlein, T.; Kleineberg, M. & Frauenhofer, M. (2007), „Induktives Preformen“ in *Innovationsbericht 2007*. Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Hrsg. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig, S. 10–11.

(Sun & Kawashita et al. 2018)

Sun, X.; Kawashita, L. F.; Wollmann, T.; Spitzer, S.; Langkamp, A. & Gude, M. (2018), „Experimental and numerical studies on the braiding of carbon fibres over structured end-fittings for the design and manufacture of high performance hybrid shafts“, *Production Engineering*, vol. 12, no. 2, S. 215–228.

(Thielmann & Lerch et al. 2014)

Thielmann, A.; Lerch, C.; Seeliger, W. & Günther, B. (2014), *Wertschöpfungspotentiale im Leichtbau und deren Bedeutung für Baden-Württemberg*. Eine Studie im Auftrag der Leichtbau BW GmbH, Stuttgart [30.04.2021].

(Thoma & Weidenmann et al. 2012)

Thoma, B.; Weidenmann, K. A. & Henning, F. (2012), „Chemical-Stitching, ein vielversprechender Ansatz für die automatisierte Preform-Fertigung“, *Zeitschrift Kunststofftechnik*, vol. 2012, no. 5, S. 490–514. <https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/index/index/docid/72882>.

(Thoma 2015)

Thoma, B. (2015), *Methodische Umsetzung und Bewertung eines neuartigen Prozesses zur lokalen und automatisierten Fixierung von textilen Preformlingen*. Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Inst. für Technologie (KIT), Diss., 2015. Wissenschaftliche Schriftenreihe des Fraunhofer ICT, Fraunhofer-Verl., Stuttgart. ISBN: 3839608872.

(Turton 2008)

Turton, R. (2008), „Challenges in the modeling and prediction of coating of pharmaceutical dosage forms“, *Powder Technology*, vol. 181, no. 2, S. 186–194.

(Tykhoniuk & Tomas et al. 2004)

Tykhoniuk, R.; Tomas, J. & Luding, S. (2004), „Simulation der Scherdynamik kohäsiver Pulver“, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 76, no. 12, S. 59–62.

(Ucsnik & Scheerer et al. 2010)

Ucsnik, S.; Scheerer, M.; Zaremba, S. & Pahr, D. H. (2010), „Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 3, S. 369–374.

(Ulbricht & Hufenbach et al. 2014)

Ulbricht, A.; Hufenbach, W. A.; Wohlfahrt, D.; Witschel, D.-I. B. & Lenz, F. (2014), „Innovative Leichtbau-Gelenkwellen in hochintegrativer Faserverbundbauweise. Entwicklung und Realisierung eines Demonstrators am Beispiel einer hochbelasteten Gelenkwelle für Schienenfahrzeuge“ in *6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen. Dimensionierung - Fertigung - Anwendungen ; Karlsruhe, 05. und 06. November 2014*, VDI-Verl., Düsseldorf, S. 247–251. ISBN: 9783180922386.

(van Ravenhorst 2018)

van Ravenhorst, J. H. (2018), *Design tools for circular overbraiding of complex mandrels*. PhD-Thesis, University of Twente, Enschede, Niederlande.

(VDI 2860)

Verein deutscher Ingenieure & Gesellschaft Produktionstechnik, no. VDI 2860

(1990-05-00), *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf. 25.040.30.

(VDI 2694)

Verein deutscher Ingenieure, no. VDI 2694 (2012-07-00), *Bunker und Silos - Beschickung, Lagerung und Austrag von Schüttgut*, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf. VDI-Norm, 53.080, 65.040.20.

(VDI 2694)

Verein deutscher Ingenieure, no. VDI 2694 (2012-07-00), *Bunker und Silos - Beschickung, Lagerung und Austrag von Schüttgut*, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf. VDI-Norm, 53.080, 65.040.20.

(VDI 2221-1)

Verein deutscher Ingenieure, no. VDI 2221-1 (2019-11-00), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. 2221-1.

(VDI 2222-1)

Verein deutscher Ingenieure, no. VDI 2222-1 (2019-11-00), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. 2222-1.

(VDI 2803-1)

Verein deutscher Ingenieure, no. VDI 2803-1 (2019-01-00), *Funktionsanalyse - Grundlagen und Methode*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. 03.100.40.

(Voit & Reinhart et al. 2017)

Voit, M.; Reinhart, G. & Metzger, T. (2017), „Experimental Study on Water Jet Cutting of Unidirectional Carbon Fiber Fabrics“, *Procedia CIRP*, vol. 66, S. 221–226.

(Vorobiov & Bischoff et al. 2015)

Vorobiov, O.; Bischoff, T. & Tulke, A. (2015), „Micro-meso draping modelling of non-crimp fabrics“ in *Proceedings of the 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany*, Hrsg. DYNAMORE GmbH, S. 15–17.

(Wacker Chemie AG 2020)

Wacker Chemie AG (2020), *Technisches Datenblatt ELASTOSIL M 4630 A/B*,

München. <https://www.wacker.com/h/de-de/medias/ELASTOSIL-M-4630-AB-de-2020.07.01.pdf> [01.05.2021].

(Wagner 2016)

Wagner, H. (2016), *Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen*. Dissertation. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie. ISBN: 9783844046038.

(Weiland 2012)

Weiland, F. M. (2012), *Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK-Luftfahrtstrukturen*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.

(Wittel & Jannasch et al. 2019)

Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J. & Spura, C. (2019), *Roloff/Matek Maschinenelemente*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-26279-2.

(Witten 2013)

Witten, E. (2013), *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 4. ISBN: 978-3-658-02754-4.

(Xiao & Wang et al. 2018)

Xiao, S.; Wang, P.; Soulat, D.; Legrand, X. & Gao, H. (2018), „Studies of in-plane shear behaviour of braided composite reinforcements“. Palermo, Italy, Author(s), S. 20039.

(Xiao & Pei et al. 2019)

Xiao, Z.; Pei, L.; Zhang, F.; Sun, Y.; Geng, L.; Wu, J. & Tong, J. (2019), „Parameter Measurement of Biaxial Braided Composite Preform Based on Phase Congruency“, *Autex Research Journal*, vol. 19, no. 1, S. 8–16 [06.03.2021].

(Ye & Steigleder et al. 2002)

Ye, Q.; Steigleder, T.; Scheibe, A. & Domnick, J. (2002), „Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun“, *Journal of Electrostatics*, vol. 54, no. 2, S. 189–205.

(Zeeuw & Peeters et al. 2020)

Zeeuw, C. M. de; Peeters, D. M. J.; Bergsma, O. K. & Benedictus, R. (2020), „Strategies for swift automated pick-and-place operations of multiple large-sized

layers of reinforcement - a critical review“, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 6, no. 2, S. 57–71.

(Zimmerling & Dörr et al. 2019)

Zimmerling, C.; Dörr, D.; Henning, F. & Kärger, L. (2019), „A machine learning assisted approach for textile formability assessment and design improvement of composite components“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 124, S. 105459.

## Anhang A

In Kapitel 5.2.5 werden Streubildgraphen für die Interpretation des Streubilds auf Pre-forms eingeführt. Nachfolgend werden die Graphen für alle Konfigurationen (Abbildung A-2), für die Konfiguration ohne Elemente (Abbildung A-3), für Elemente in der oberen Ebene (Abbildung A-4), Elemente in der mittleren Ebene (Abbildung A-5), Elemente in der unteren Ebene (Abbildung A-6), Kombinationen des Elements Sieb (Abbildung A-7) sowie Konfigurationen unterschiedlicher Elemente (Abbildung A-8) dargestellt. Die Zuordnung der Bezeichnungen der Konfigurationen wird vorab in Abbildung A-1 nochmals zusammenfassend aufgezeigt.



Abbildung A-1: Zusammensetzung der einzelnen Konfigurationen

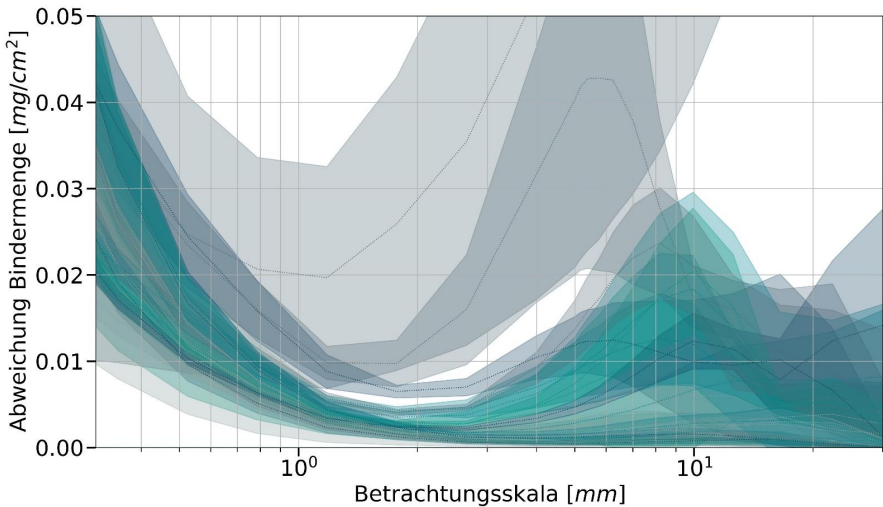


Abbildung A-2: Streubildgraphen aller getesteten Konfigurationen

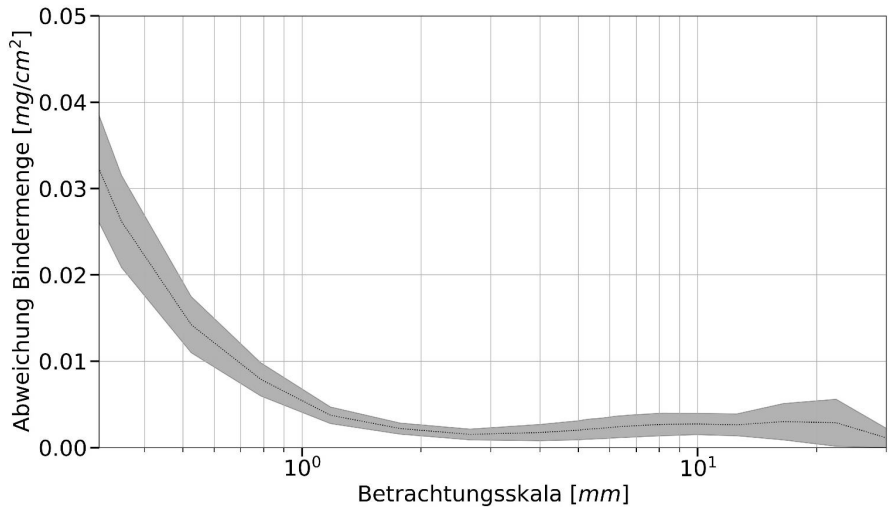


Abbildung A-3: Streubildgraph der Düse ohne Elemente

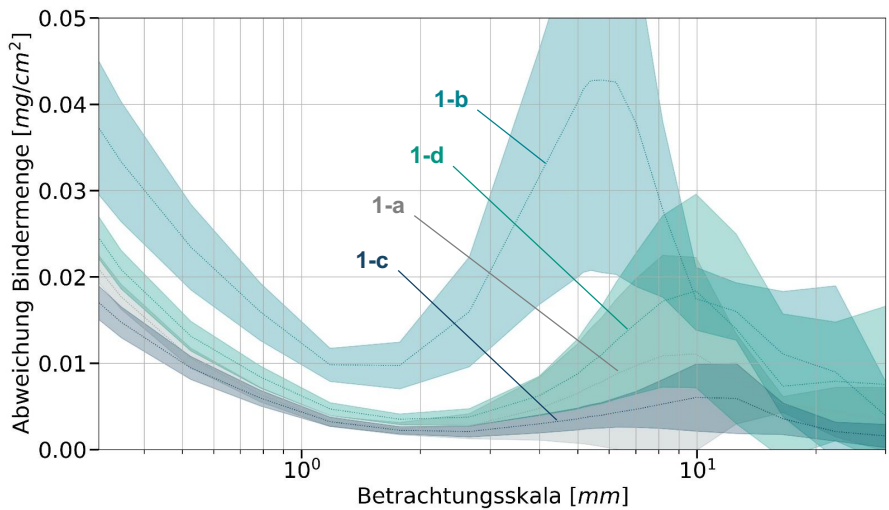


Abbildung A-4: Konfigurationen mit einzelnen Elementen in der oberen Ebene

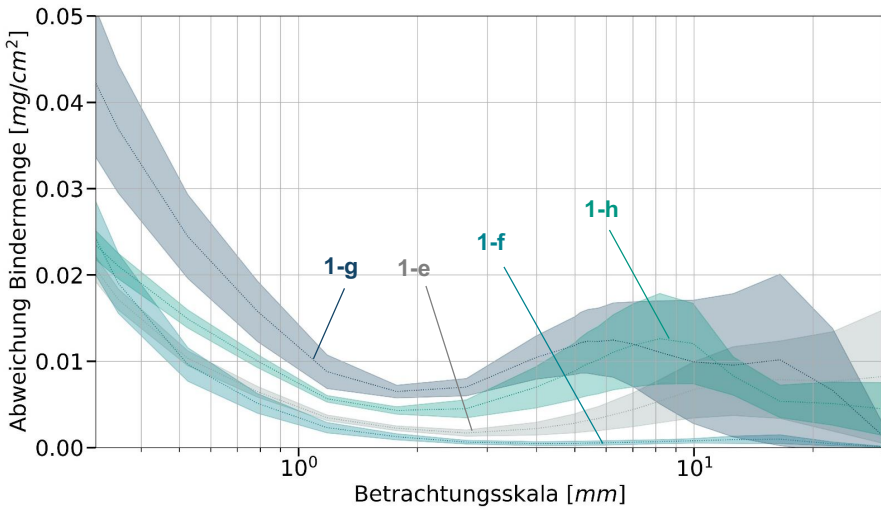


Abbildung A-5: Konfigurationen mit einzelnen Elementen in der mittleren Ebene

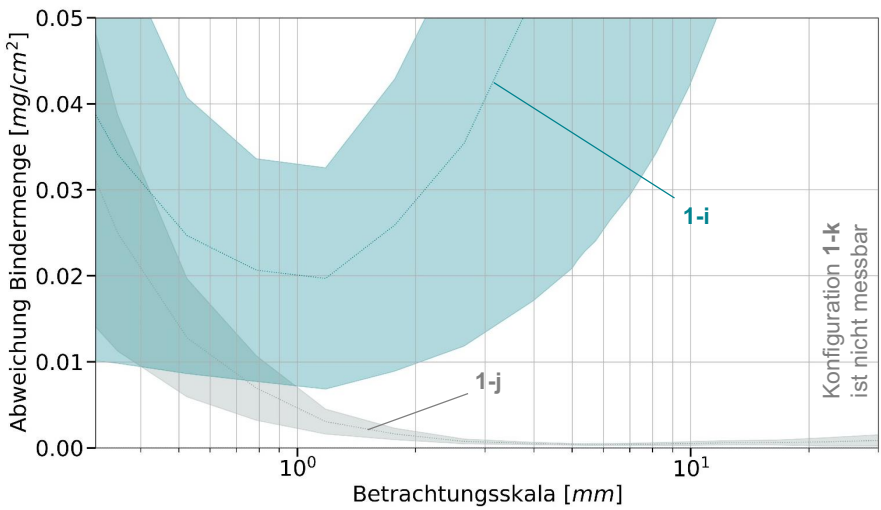


Abbildung A-6: Konfigurationen mit einzelnen Elementen in der unteren Ebene



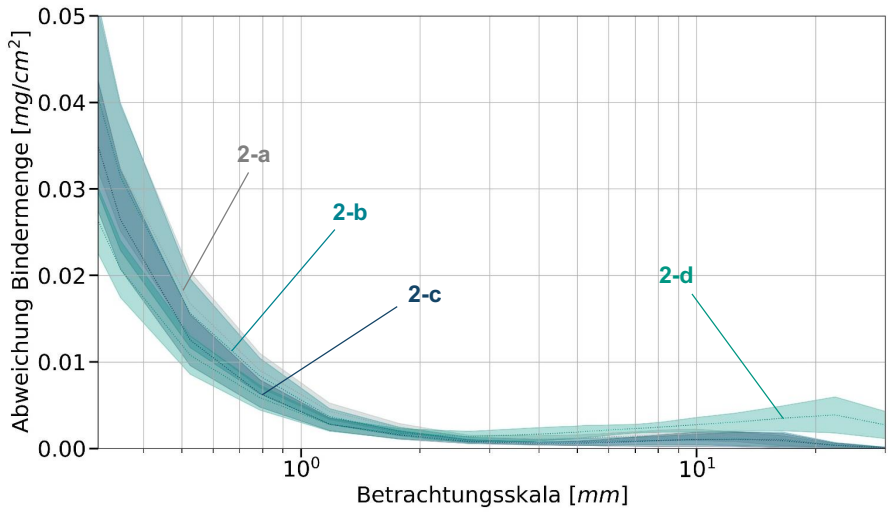


Abbildung A-7: Konfigurationen mit Kombinationen des Elements Sieb

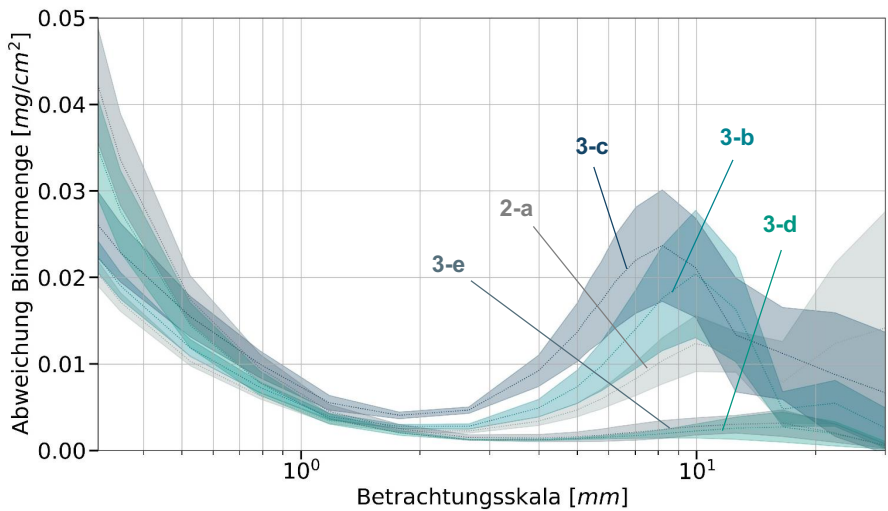


Abbildung A-8: Konfigurationen mit Kombinationen unterschiedlicher Elemente

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  $\mu$ MIM-Bauteile**

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme**



Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit  
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von 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**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms**  
Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile





