

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Carbon Composites

Strategien zur Steigerung der Variabilität bei der Herstellung von geflochtenen Hohlbauteilen

Maximilian Mitwalsky

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Univ.-Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Thomas Gries, RWTH Aachen

Die Dissertation wurde am 19.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.07.2015 angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: info@lcc.mw.tum.de

Web: www.lcc.mw.tum.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Carbon Composites der TU München in den Jahren 2012 bis 2014.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler möchte ich danken, dass er es mir ermöglicht hat, über dieses interessante Themengebiet zu promovieren. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries für die Übernahme des Mitberichts. Dr.-Ing. Christian Wellhausen hat mich als Mentor beratend begleitet, dafür mein herzlicher Dank.

Diese Dissertation wurde im Rahmen eines Industrieprojects mit der BMW AG angefertigt. Mein herzlicher Dank gilt Bernd Veihelmann, meinem Betreuer bei BMW. Die wertvollen fachlichen Diskussionen und die gute Zusammenarbeit waren stets hilfreich.

Für das gute Miteinander und das angenehme Arbeitsklima bedanke ich mich bei meinen Kollegen am LCC. Ich habe die kollegiale Atmosphäre sehr geschätzt und werde meine Zeit am Lehrstuhl in bester Erinnerung behalten. Mein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Michael Brand, Christoph Ebel und Andreas Mierzwa für die Unterstützung mit Rat und Tat und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Dr. rer. nat. Alexander und Martina Mitwalsky für ihre grenzlose Geduld und die Unterstützung in allen Lebenslagen. Der familiäre Rückhalt hat mir diesen Weg überhaupt erst ermöglicht.

München, März 2015

Maximilian Mitwalsky

Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe finden auf Grund ihres hohen Leichtbaupotenzials zunehmend Anwendung im Fahrzeugbau. Die für die Automobilindustrie üblichen Stückzahlen erfordern Fertigungsprozesse, die über einen hohen Automatisierungsgrad und Materialdurchsatz verfügen. Der Flechtprozess erfüllt diese beiden Anforderungen und eignet sich daher für die Großserienherstellung von Hohlbauteilen.

Die Funktionsweise des aus der Textilindustrie übernommenen Flechtprozesses führt jedoch zu Einschränkungen bei der Auslegung der Bauteilgeometrie. So hat die Variation des Bauteilumfangs zwangsläufig eine Veränderung der Geflechtarchitektur zur Folge. Da die Geflechtarchitektur wiederum die mechanische Belastbarkeit des Laminats beeinflusst, kann für eine vorgegebene Flechtanlagenbesetzung und einen definierten Flechtwinkel ein direkter Zusammenhang zwischen dem Bauteilumfang und der mechanischen Leistungsfähigkeit des Verbundes hergestellt werden. Die quantitative Beschreibung dieses Zusammenhangs bildet die Grundlage für diese Arbeit. Aus dieser Betrachtung wird die Zielsetzung abgeleitet: die für die mechanische Leistungsfähigkeit abträglichen Geflechtarchitekturen müssen durch die Weiterentwicklung der Anlagentechnik vermieden werden.

Diese Arbeit befasst sich mit der Konzeptionierung, Umsetzung und Charakterisierung von zwei Anlagenkonzepten, welche die Beseitigung der bestehenden Restriktionen bei der Umfangsvariation ermöglichen. Der erste Ansatz sieht die Integration eines Spreizprozesses vor, welcher die Breite der Fasern während oder unmittelbar nach der Verarbeitung in der Flechtanlage an den zu beflechtenden Umfang anpasst. Mit dem zweiten Konzept wird eine Flechtanlage realisiert, die durch die Variation der Fadenanzahl die Herstellung von Bauteilen mit großen Umfangsänderungen erlaubt. Beide Ansätze werden zu konkreten Prozessabläufen ausgearbeitet und erfahren mittels Prüfständen eine Umsetzung im Labormaßstab. Der an den Prüfständen vorgenommene Funktionsnachweis schließt die Prozessentwicklung ab. Um einen Vergleich zum Status quo ziehen zu können, findet mit Hilfe der an den Prüfständen Hergestellten Materialproben eine eingehende Charakterisierung der neuartigen Geflechtarchitekturen statt.

Die Arbeit wird durch eine vergleichende Diskussion der beiden Konzepte abgeschlossen. Hierbei wird geklärt für welche Einsatzzwecke die Umsetzung der neuen Prozesse sinnvoll ist und welche weiteren Schritte für die Überführung in einen Serienprozess vollzogen werden müssen.

Abstract

Due to their high lightweight potential, fiber reinforced plastics are increasingly used in the automotive industry. The large part quantities in the automotive sector require manufacturing processes that have a high degree of automation and material output. The braiding process meets both of these requirements and is therefore suitable for mass production of hollow parts.

However, the operation principle of the braiding process leads to limitations in the design of the component geometry. The variation of the component circumference results in the change of the fiber architecture. Since the fiber architecture influences the mechanical properties of the laminate, a direct relationship can be established between the circumference and the mechanical performance. The quantitative description of this relationship is the basis for this thesis. On basis of this perspective, the objective is derived: the fiber architectures causing the decrease in mechanical performance must be avoided by the development of new process steps.

This thesis deals with the conceptual design, implementation and characterization of two concepts that enable the removal of the existing restrictions concerning the variation of the circumference. The first approach involves the integration of a tow spreading process, which adjusts the width of the fibers during or immediately after the braiding process, according to the circumference. In the second approach, a braiding machine is developed which allows the variation of the tow numbers. Both approaches are developed to concrete process sequences and are transferred to test rigs. The proof of function on the test rigs completes the process development. In order to make a comparison to the status quo, a detailed characterization of the novel fiber architectures is performed.

This thesis is completed by a comparative discussion of the two concepts. It is clarified for which purposes the implementation of the new processes is useful and what further steps for the conversion into a serial process must be taken.

Inhaltsangabe

1. Einleitung	12
2. Grundlagen und Stand der Technik	14
2.1. Der Flechtprozess	14
2.1.1. Funktionsweise	14
2.1.2. Material	16
2.1.3. Prozessparameter	18
2.2. Experimentelles Vorgehen	19
2.2.1. Messen der Garnbreite	19
2.2.2. Probenherstellung und Versuchsdurchführung zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte	22
2.3. Methodische Vorgehen bei der Entwicklung und Konstruktion von technischen Systemen	27
2.3.1. Vorgehen nach VDI 2221	28
2.3.2. Finden von Lösungen	30
2.3.3. Bewertung und Auswahl	30
2.4. Statistische Versuchsplanung	32
3. Variation des Kernumfangs bei biaxialen Geflechtem	37
3.1. Das Prozessfenster	38
3.2. Geflechtarchitekturen auf einem Konus	40
3.3. Experimentelle Charakterisierung ausgewählter Geflechtarchitekturen	42
3.3.1. Zug-Versuche	42
3.3.2. Druck-Versuche	48
3.3.3. Dreipunktbiegeversuche zur Bestimmung der ILSS	51
3.4. Zusammenfassung und Definition der Aufgabenstellung für die Prozessentwicklung	53
4. Anpassung der Garnbreite	54
4.1. Der Spreizprozess: Bestandsaufnahme und Übertragung auf den Flechtprozess	56
4.1.1. Aufgabenstellung und Prozessanforderung	56
4.1.2. Stand der Technik – Wirkzusammenhänge beim Spreizen	57
4.1.3. Möglichkeiten für das Garnspreizen im Flechtprozess	60
4.1.4. Technische Bewertung der Spreizmöglichkeiten	63
4.2. Spreizen im Flechtprozess: prinzipielle Lösungen	63
4.2.1. Spreizen am Flechtring	65
4.2.2. Spreizen am Flechtkegel	68
4.2.3. Spreizen auf dem Kern	71

4.2.4.	Bewertung und Auswahl	73
4.3.	Entwurf eines Prüfstandes für das prozessintegrierte Spreizen	76
4.3.1.	Modul 1: Ultraschallangeregter Flechtring	76
4.3.2.	Modul 2: Pulsierender Flechtring	77
4.3.3.	Modul 3: Düsenring	81
4.3.4.	Modul 4: Walzenring	85
4.3.5.	Integration der Module zum Gesamtprüfstand <i>prozessintegriertes Spreizen</i>	88
4.4.	Parameterstudie an dem Prüfstand <i>prozessintegriertes Spreizen</i> ...	90
4.4.1.	Festlegung der Faktoren und Zielgrößen.....	90
4.4.2.	Aufstellung des Versuchsplans.....	102
4.4.3.	Versuchsdurchführung.....	104
4.4.4.	Auswertung.....	106
4.5.	Wirkmechanismen beim prozessintegrierten Faserspreizen	117
4.6.	Experimentelle Charakterisierung der gespreizten Geflechtarchitekturen	119
4.6.1.	Beschreibung der neuartigen Geflechtarchitekturen und deren Herstellung	119
4.6.2.	Zug-Versuche	121
4.6.3.	Druck-Versuche	124
4.6.4.	Dreipunktbiegeversuche zur Bestimmung der ILSS	126
4.7.	Bedeutung des prozessintegrierten Spreizens für das Prozessfenster	127
5.	Variation der Fadenanzahl	129
5.1.	Beschreibung des Flechtprozesses mit variabler Fadenanzahl	131
5.1.1.	Variation der Fadenanzahl mit bestehender Anlagentechnik	131
5.1.2.	Aufgabenstellung und Anforderungen an einen fadenvariablen Flechtprozess	133
5.2.	Vorversuche an einer 3D-Flechtanlage	139
5.2.1.	Versuchsaufbau.....	139
5.2.2.	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	143
5.2.3.	Fadenhandhabung an einer Rundflechtanlage.....	149
5.3.	Definition und Analyse der Prozessschritte	150
5.3.1.	Prozessschritte bei der Einbringung von Fäden	151
5.3.2.	Prozessschritte bei der Entnahme von Fäden	156
5.3.3.	Detaillierung des Prozessschritts <i>Bewegung der Fadenenden entlang des Flechtkegels</i>	161
5.4.	Aufstellung des Gesamtprozesses	166
5.4.1.	Teilprozess <i>Fäden Einbringen</i>	166
5.4.2.	Teilprozess <i>Fäden Entnehmen</i>	168
5.4.3.	Zusammenfassung der Anforderungen	170

5.5. Prüfstandentwurf	171
5.5.1. Randbedingungen und Vereinfachungen	171
5.5.2. Vorstellung der Prüfstandkonstruktion	172
5.6. Funktionsnachweis und Materialcharakterisierung.....	177
5.6.1. Prozessschritte am Prüfstand.....	178
5.6.2. Charakterisierung und Bewertung der Fehlstellen.....	183
5.7. Ausblick: Entwurf einer Serienanlage.....	187
6. Vergleichende Diskussion der vorgestellten Anlagenkonzepte	190
6.1. Kostenrechnung für die Lebenslaufkosten	190
6.1.1. Investitionskosten	191
6.1.2. Betriebskosten.....	193
6.1.3. Fazit zur Kostenrechnung.....	193
6.2. Alternative Einsatzmöglichkeiten.....	194
6.2.1. Anlagenkonzept Spreizen.....	194
6.2.2. Anlagenkonzept variable Fadenanzahl.....	195
6.3. Neue Restriktionen.....	196
6.4. Abschließende Bewertung	197
7. Zusammenfassung und Ausblick	198
Anhang	202
A. Betreute Studienarbeiten	202
B. Versuchsplan zur Parameterstudie	204
C. Faserdatenblatt 1	205
D. Faserdatenblatt 2	206
Literaturverzeichnis	207

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Kurzbezeichnung
a	mm	Flechtringabstand
A	mm ²	Querschnittsfläche
b _G	mm	Garnbreite
b _L	mm	Lückenbreite
B	%	Dehnungsabweichung
D	mm	Durchmesser
E	Pa	E-Modul
F	N	Kraft
h	mm	Probendicke
H	mm	Hub
k	mm	Probenbreite
l	mm	Probenlänge
n	-	Fadenanzahl
p	Pa	Druck
U	mm	Kernumfang
v	m/s	Geschwindigkeit
β	°	Abzugswinkel
ε	-	Dehnung
θ	°	Flechtwinkel
ρ	g/cm ³	Dichte

σ	Pa	Festigkeit
τ	Pa	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMW	Bayerische Motoren Werke
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
DoE	Design of Experiments
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
FVG	Faservolumengehalt
HT	High Tenacity
ILSS	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit
ISO	International Organization for Standardization
ITA	Institut für Textiltechnik
LCC	Lehrstuhl für Carbon Composites
n FWW	n fachwechselwirkungen
OA	off-axis
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UD	Unidirektional
VAP	Vacuum Assisted Process

1. Einleitung

In der Luft- und Raumfahrt wird dem Leichtbau seit jeher ein hoher Stellenwert eingeräumt. Jedes in der Struktur eingesparte Gramm kann durch Nutzlast ersetzt werden. Auf Grund der in den letzten Jahrzehnten rasant gestiegenen Fahrzeuggesamtmassen - so ist das Gewicht des VW Golf innerhalb von sechs Generationen um über 60 % angewachsen [1] – müssen nun auch in der Automobilindustrie neue Wege beschritten werden, um das Fahrzeuggewicht zu verringern. Mit dem Einsatz von Werkstoffen mit einer hohen gewichtsspezifischen Leistungsfähigkeit wird ein wichtiger Beitrag geleistet, um einerseits das Fahrverhalten zu verbessern und andererseits die Einhaltung von Emissionsrichtlinien zu ermöglichen. Einer der bedeutendsten Vertreter dieser Werkstoffgruppe sind die Faserverbundwerkstoffe.

Mit der Verwendung einer Karosserie aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff bei den neuentwickelten i-Modellen hat BMW einen ersten großen Schritt hin zur industriellen Nutzung dieses Werkstoffs vollzogen. Dabei stellt die Entwicklung von effizienten und schnellen Fertigungsverfahren eine Hauptaufgabe bei der Etablierung dieses neuen Werkstoffs dar. Angesichts ihres hohen Materialdurchsatzes haben etliche textile Herstellungsprozesse Anwendung bei der Produktion von Faserverbundbauteilen gefunden. Eines dieser Verfahren ist der Flechtprozess, welcher sich insbesondere für die Herstellung von Hohlbauteilen eignet. Die Ablage der Fasern findet entsprechend der Endkontur des Bauteils statt, sodass keine weiteren Umformschritte notwendig sind und nur ein sehr geringer Verschnitt verursacht wird. Nach dem Einsatz des Flechtprozesses in automobilen Kleinserien, wie dem Mercedes-Benz SLR und dem BMW M6 hat der Prozess mit der Verwendung für die Produktion von Karosseriebauteilen des BMW i3 eine vollständige Automatisierung erfahren. Dieser Schritt ist die Grundvoraussetzung für den Einsatz in anderen, stückzahlreicheren Fahrzeugklassen. Mit der Legung dieses Grundsteins hat der Flechtprozess jedoch bei Weitem noch nicht sein volles Potential ausgeschöpft. Etliche Restriktionen verhindern die vollständige Ausnutzung des Leichtbaupotentials. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an: mit einer Weiterentwicklung der Anlagentechnik sollen Einschränkungen aufgehoben und somit die gestalterische Freiheit bei der Auslegung von geflochtenen Faserverbundbauteilen gesteigert werden.

Eine wesentliche Einschränkung des Flechtprozesses ergibt sich aus dem von Birkefeld definierten Prozessfenster (Abbildung 1.1). Aus der Grafik geht hervor, dass der Umfang des Flechtbauteils in Abhängigkeit der Flechtwinkels nur in einem kleinen Bereich verändert werden darf.

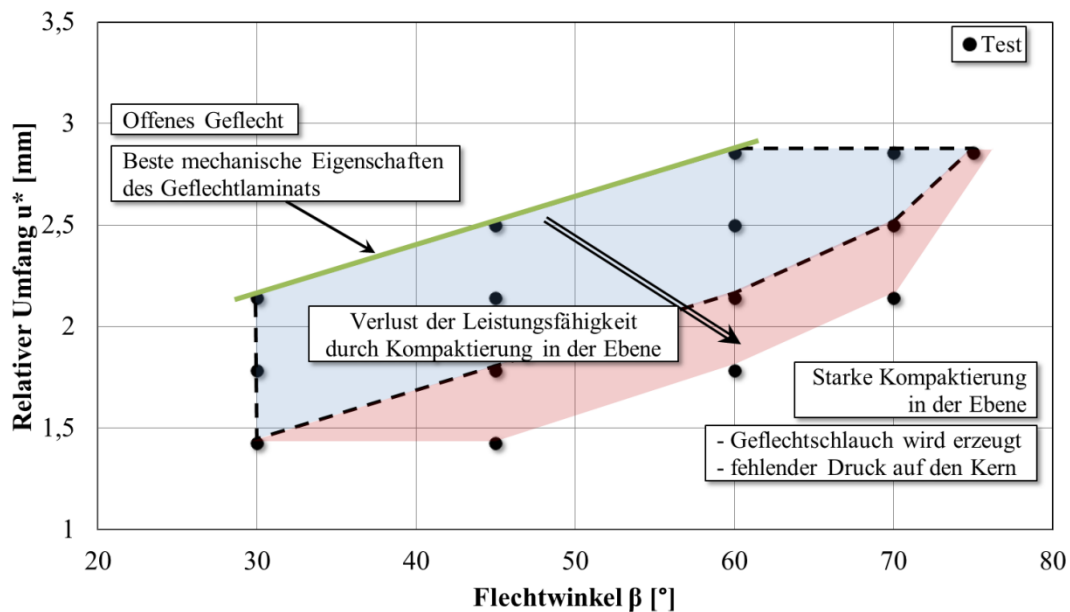


Abbildung 1.1: Flechtprozessfenster nach Birkefeld [36]

Daher wird in dieser Arbeit der konkrete Fall eines Flechtbauteils mit variierendem Umfang betrachtet. Bisher unterliegt die Variationsmöglichkeit des Bauteilumfangs engen Einschränkungen und kann nur über Einbußen bei der Leistungsfähigkeit des Laminats erkauft werden. Ursächlich ist der Zusammenhang zwischen *Bauteilumfang* und *Geflechtarchitektur*, das heißt all jenen charakteristischen Geflechtmerkmalen, welche einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des Geflechts haben. Erst wenn diese beiden Parameter voneinander entkoppelt werden, können die Einschränkungen bei der Umfangsvariation aufgehoben werden. Dieses Ziel wird durch die Entwicklung von neuartigen Anlagenkonzepten erreicht.

Nach der Vorstellung der für das Verständnis der Arbeit benötigten Grundlagen in Kapitel 2, werden in Kapitel 3 unterschiedliche, auf Grund der Variation von Prozessparametern auftretende Geflechtarchitekturen untersucht. Aus dieser experimentellen Charakterisierung leitet sich die Motivation und Aufgabenstellung für die anschließende Anlagenentwicklung ab. Es werden bestimmte Merkmale der Geflechtarchitektur identifiziert, welche einen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Geflechts haben. Aufgabe der Anlagenentwicklung ist es ebendiese Geflechtarchitekturen zu verhindern und somit die Leistungsfähigkeit des Bauteils zu verbessern. In den Kapitel 4 und 5 findet die Konzeptionierung zweier Anlagen statt, welche mittels einer Erprobung an Prüfständen einen Funktionsnachweis und eine Charakterisierung erfahren. In dem abschließenden Vergleich der beiden Konzepte in Kapitel 6 wird die Anwendung in der Serienfertigung diskutiert und in den Kontext mit weiteren Einsatzmöglichkeiten der Anlagenkonzepte gesetzt. Im Rahmen des Ausblicks in Kapitel 7 werden die nächsten Entwicklungsschritte hin zu einem Flechtprozess, welcher ein größtmögliches Maß an Variabilität erlaubt, definiert.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel stellt gewissermaßen den „Werkzeugkasten“ dieser Arbeit dar. Nach der Klärung aller wichtigen Begriffe rund um den Flechtprozess werden Vorgehensweisen und Methoden, die für die Experimente und Entwicklungsvorhaben benötigt werden, definiert. Dabei wird auf eine möglichst allgemeingültig Formulierung geachtet, sodass eine Anwendung auf alle Phasen der Arbeit übertragbar ist. Findet im Laufe der Arbeit eine Vorgehensweise oder Methode Anwendung, so wird diese an den konkreten Fall angepasst.

2.1. Der Flechtprozess

Die Flechttechnik ist in ihrer manuellen Ausprägung bereits seit Jahrtausenden bekannt und wurde zur Herstellung von Gegenständen des täglichen Bedarfs, wie beispielsweise Haushaltsutensilien, eingesetzt. Mitte des 18ten Jahrhunderts entstanden nahezu zeitgleich in den Regionen Barmen und Manchester die ersten Flechtmaschinen [2]. Diese und weiterentwickelte Versionen kamen über die vergangenen Jahrzehnte in verschiedenen Branchen mit unterschiedlichem Material (Natur-, Chemiefasern, Drähte) zum Einsatz [3] [4] [5]. Dabei wurden die Anlagen stets an das jeweils verwendete Material und das zu produzierende Erzeugnis angepasst [6]. In den 1970er und 1980er Jahren wurden erste Anstrengungen unternommen den Flechtprozess für die Herstellung von Faserverbundbauteilen zu verwenden [7]. Seither fanden eine Reihe von Anpassungen statt, welche die Verarbeitung von Verstärkungsfasern ermöglichen. Die folgenden Abschnitte dienen der Vermittlung der Grundlagen zu dem Faserverbundfertigungsverfahren *Flechten*.

2.1.1. Funktionsweise

Die Funktionsweise beruht auf dem Bewegungsablauf der Handflechttechnik, bei welchen drei Fäden abwechselnd von links und rechts ineinander geschlagen werden, sodass ein Zopf entsteht. Eine Flechtmaschine automatisiert diese Bewegung und ermöglicht die Verarbeitung von mehr als drei Fäden. Abbildung 2.1 zeigt die Spur der Spulenträger, auch Klöppel genannt, und das daraus resultierende Geflecht. Je nach Länge der Spur und Anzahl der darin bewegten Klöppel entsteht ein unterschiedlich breites Bandgeflecht, eine sogenannte Litze. Durch das Verbinden der Spuren, wie in der rechten Darstellung von Abbildung 2.1, schließen sich die beiden Kanten der Litze zu einem Schlauch. Dieses sogenannte Prinzip des Rundflechtens findet bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen am Häufigsten Anwendung.

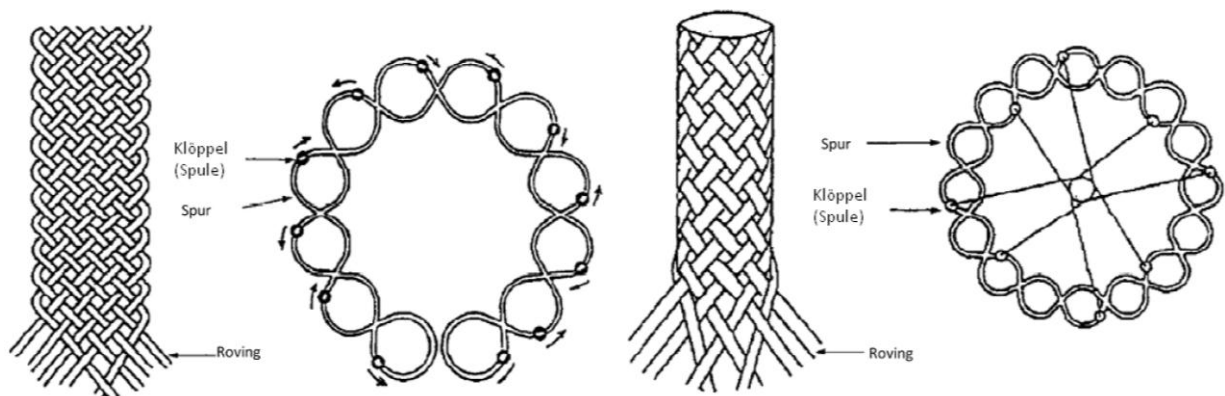


Abbildung 2.1: Prinzip des Band- und Rundflechtens [8]

Bei Klöppelflechtmaschinen wird der Transport der Klöppel von Flügelrädern durchgeführt, welche den Klöppel für eine halbe Umdrehung mitführen, um ihn anschließend an das benachbarte Flügelrad weiterzugeben. Unterschieden wird dabei zwischen Axial- und Radialflechtanlagen (Abbildung 2.2 links bzw. rechts), je nach Positionierung der Flügelräder und somit der Klöppel.

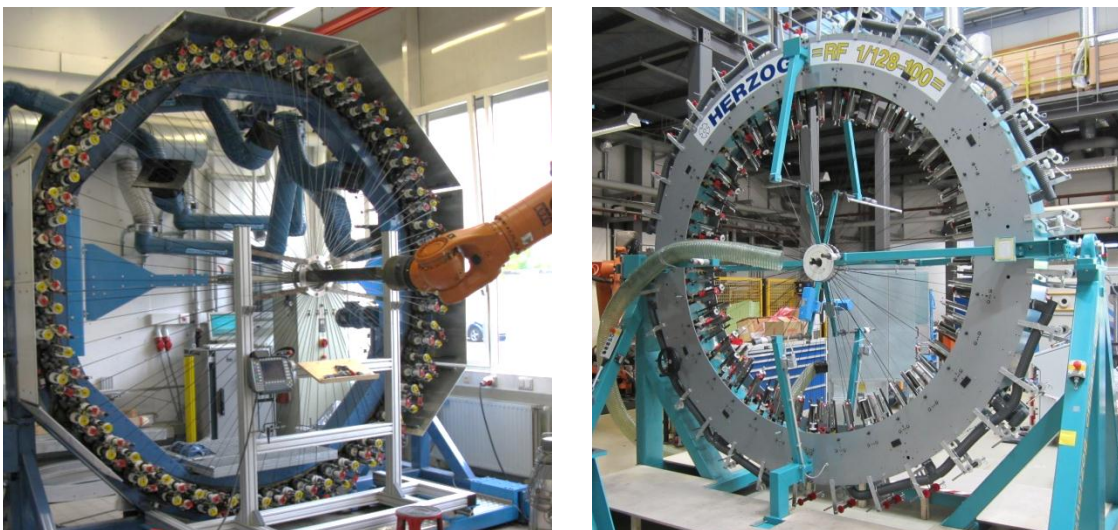


Abbildung 2.2: Rundflechtanlagen in axialer (links) [9] und radialer (rechts) Bauweise

Zwar kommen beide Bauweisen zum Einsatz, jedoch wird die radiale Bauart bevorzugt, da keine radiale Auslenkung des Klöppels stattfindet und somit der Abstand zwischen Spule und Flechtzentrum im Prozess nur geringfügig schwankt. Dies hat eine gleichmäßigere Fadenspannung und geringere Faserschädigung zur Folge.

Die Flechtfäden laufen in dem Zentrum der Maschine, dem sogenannten Flechtzentrum, zu einem Geflechtsschlauch zusammen. Führt ein Roboter einen Kern durch das Anlagenzentrum, wird dieser umflochten und ein sogenannter Vorformling entsteht. Somit lässt sich dem Geflecht die Form des Kerns aufprägen. Auf diese Weise

können sowohl gekrümmte, als auch sich in ihrem Querschnitt verändernde Geometrien abgebildet werden (Abbildung 2.3).



Abbildung 2.3: Beispiele für umflochtene Kerne

Die Fasern werden nur auf Grund ihrer Spannung auf dem Kern gehalten, daher geht die Form des Geflechts verloren, sobald dieser entfernt oder das Geflecht aufgetrennt wird. Infolgedessen wird der Kern, sofern ein Verbleib im Bauteil unerwünscht ist, erst nach der Injektion mit der Matrix entfernt.

2.1.2. Material

DIN 60000 definiert Geflechte als Materialien, welche durch das regelmäßige Verkreuzen von mindestens drei Garnen, die diagonal zur Produktionsrichtung verlaufen, entstehen und eine regelmäßige Fadendichte und geschlossenes Warenbild aufweisen [10]. Die Wahl des Garns hängt von der Anwendung und den daraus resultierenden Anforderungen ab. Bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen werden üblicherweise Glas- oder Kohlenstofffasern, seltener Aramid-, Bor- und Keramikfasern verarbeitet. Durch die Kombination unterschiedlicher Materialien lassen sich Hybridgeflechte herstellen. So stellt Somboonsong [11] Streben aus einem Kohlenstoff-Aramid-Hybrid vor, welche auf Grund des Hybridverbundes ein pseudo-duktilen Versagensverhalten aufweisen.

Um den der Vorformlingherstellung nachfolgenden Schritt der Matrixinjektion einzusparen, werden Ansätze verfolgt, bei welchen das Matrixmaterial bereits im Flechtprozess eingebracht wird. Rapp [12] beschreibt die Verarbeitung von vorimprägnierten Fasern auf Basis einer duroplastischen Matrix. Eine thermoplastische Matrix kann durch die Verwendung von Hybridfasern, welche aus miteinander versponne-

nen Kunststoff- und Kohlenstofffilamenten bestehen, hergestellt werden [13] [14] [15].

Unabhängig von der Wahl des Fasermaterials werden Geflechte anhand ihres Faserverlaufs klassifiziert: unidirektionale (UD), biaxiale und triaxiale Geflechte (Abbildung 2.4). Die ursprüngliche und daher auch als Standardgeflecht bezeichnete Ausprägung ist das biaxiale Geflecht. Zwei Fadensysteme umlaufen spiralenförmig den Kern, eine Richtung im Uhrzeigersinn, die andere entgegen.

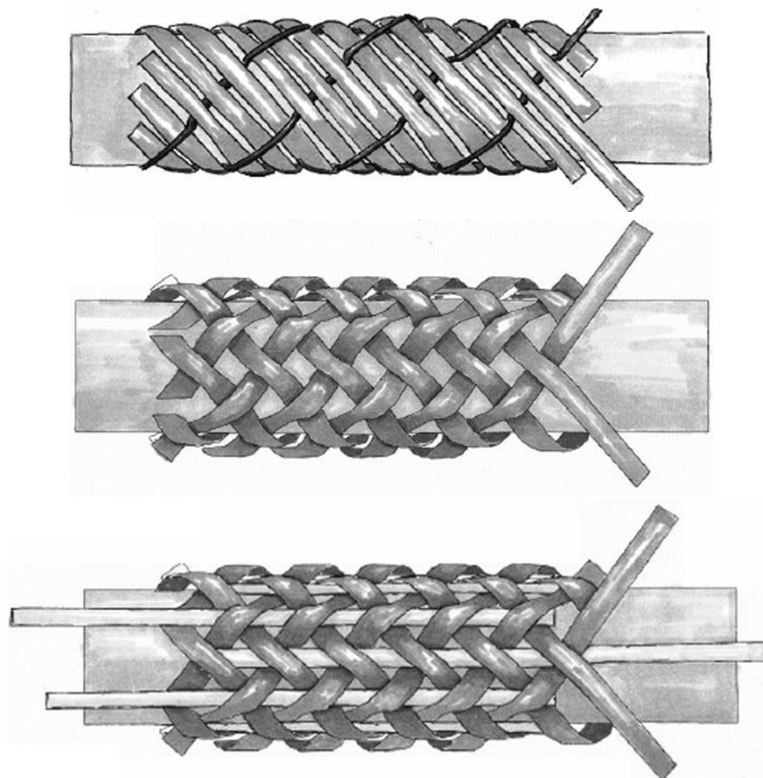


Abbildung 2.4: Stilisierte Darstellung der drei Geflechtsarten: unidirektionales, biaxiales und triaxiales Geflecht (von oben nach unten) [16]

Wird eine Richtung vollständig durch ein dünnes, thermoplastisches Stützgarn ersetzt, verlaufen die Verstärkungsfasern nunmehr in eine Richtung. Der dünne Stützfasern verursacht eine wesentlich geringere Welligkeit im Geflecht, sodass die mechanischen Kennwerte verbessert werden. Ein typisches Anwendungsgebiet ist die Luftfahrt mit den hohen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Materials. Triaxiale Geflechte verfügen über ein drittes Fadensystem, die sogenannten Stehfäden. Diese werden mittig durch die Flügelräder geführt und daher nicht verflochten. Sie liegen in axialer Richtung zum Kern zwischen den Flechtfäden. Triaxiale Geflechte finden bei Bauteilen mit einer hohen axialen Belastung Anwendung. Alle drei Geflechtarten können mit den vorgestellten Rundflechtanlagen hergestellt werden.

2.1.3. Prozessparameter

Das bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen mittels der Flechttechnik gebräuchlichste Vorgehen ist das bereits beschriebene Umflechten. Dabei wird die Drapierfähigkeit des Geflechts genutzt, um diesem die Form des durch den Anlagenmittelpunkt geführten Kerns aufzuprägen. Die Geflechtarchitektur, also die Summe der charakteristischen Merkmale eines Geflechts wie die Garnbreite oder der Flechtwinkel, ist dabei nahezu unabhängig von der Querschnittsgeometrie. Lediglich Kernquerschnitte mit einem stark von eins abweichenden Aspektverhältnis, können einen ungleichmäßigen Faserverlauf hervorrufen.

Die in Abbildung 2.3 dargestellten Kerne veranschaulichen die hohe Drapierfähigkeit eines biaxialen Geflechts. Trotz der deutlichen Querschnittsänderung behält das Geflecht über den Übergang hinweg seine Architektur bei. Solange sich der Umfang des Kerns nicht verändert, bleiben die Merkmale der Geflechtarchitektur (Faden-, Lückenbreite und Flechtwinkel) gleich. Ändert sich der Umfang, so muss sich auch mindestens einer der drei Geflechtparameter ändern:

$$U = \frac{(b_G + b_L) \cdot n}{2 \cdot \cos(\theta)} \quad (2.1)$$

U *Kernumfang*

b_G *Garnbreite*

b_L *Lückenbreite*

n *Garnanzahl*

θ *Flechtwinkel*

Der Flechtwinkel kann durch die Anpassung der Abzugsgeschwindigkeit, also der Geschwindigkeit mit der das Geflecht aus der Anlage gefördert wird, eingestellt werden. Die übrigen Faktoren sind entweder von durch die Bauweise der Flechtanlage (Fadenanzahl) oder durch das verwendete Fasermaterial (Fadenbreite und somit auch Lückenbreite) vorgegeben. Da alle drei Faktoren die mechanischen Eigenschaften des Geflechts erheblich beeinflussen, darf der Umfang nur in einem begrenzten Maß verändert werden.

2.2. Experimentelles Vorgehen

Die folgenden Abschnitte beschreiben das allgemeine Vorgehen für die in der Arbeit durchgeführten Experimente. Wird in einem konkreten Fall von diesem Vorgehen abgewichen oder sind zusätzliche Details zu beachten, wird bei der Versuchsbeschreibung darauf hingewiesen.

2.2.1. Messen der Garnbreite

Da die Breite des Flechtgarns ein wichtiges Merkmal der Geflechtarchitektur ist, wird diese zur Charakterisierung des Geflechts benötigt. Das Messen der Breite beschränkt sich in dieser Arbeit auf in einem Geflecht abgebundene, trockene Garne. Die Garne sind zwar durch die Abbindung leicht fixiert, können aber unter der Einwirkung äußerer Kräfte verschoben werden. Somit führt die Breitenmessung mittels eines taktilen Messverfahrens, wie beispielsweise das Anlegen eines Lineals oder einer Schieblehre, meist zu einer Verfälschung des Messergebnisses. Mit einer berührungslosen optischen Messung kann diese Ungenauigkeit vermieden werden. Im Folgenden wird ein System zur Aufnahme und Auswertung von Bilddateien vorgestellt.

2.2.1.1. Optische Erfassung des Geflechts

Kohlenstofffasern lassen sich auf Grund ihrer Oberflächenbeschaffenheit mit herkömmlichen Kamerasystemen meist nur mit mäßiger Qualität erfassen. Die schwarze Farbe in Verbindung mit der durch die Schlichte verursachte glänzende Wirkung der Fasern, führt häufig zu Spiegungen und einem niedrigen Kontrast. Eine gute und reproduzierbare Bildqualität kann nur mit konstanten Belichtungsverhältnissen erreicht werden. Ist die Beleuchtung von den Umgebungsbedingungen abhängig, kann keine gleichbleibende Bildqualität sichergestellt werden. Dies ist bei einer anschließenden Verarbeitung der Aufnahmen mit einem Bildauswertungsprogramm besonders problematisch. Für die optische Erfassung des Geflechts, mit dem Ziel Messungen vorzunehmen, wird in dieser Arbeit der Faserwinkelsensor FScan der Firma Profactor verwendet. Das Objektiv des Sensors befindet sich in einer konisch zulaufenden, runden Kunststoffeinhäusung. Der Sensor wird mit der Einhäusung auf das Geflecht gestellt (Abbildung 2.5). Somit beeinflussen keine unerwünschten Lichtquellen die Bildqualität und die korrekte Fokussierung, also der Abstand zwischen Objekt und Linse, ist sichergestellt.

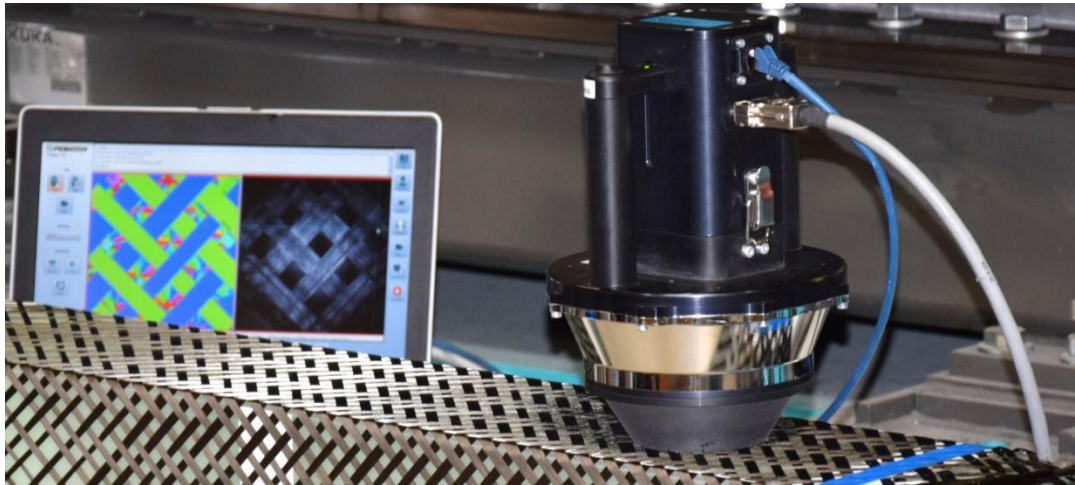


Abbildung 2.5: Aufnahme eines Geflechts mit dem Faserwinkelsensor FScan

Mittels mehrerer interner Lichtquellen kann ein kontraststarkes Bild des Geflechts aufgenommen werden. Das Bild wird von dem dazugehörigen Programm direkt an einem Rechner wiedergegeben. Über die Einfärbung der Pixel wird die Orientierung der Fasern dargestellt. Jedes Bild kann in einer MATLAB-Datei abgespeichert werden, aus welcher mit Hilfe von geeigneten Routinen weitere Informationen, wie beispielsweise die Garnbreite, gewonnen werden können.

2.2.1.2. MATLAB-Programm zur Garnbreitenmessung

Aus der von der Profactor Software generierten MATLAB-Datei lassen sich mit Hilfe eines im Rahmen einer Semesterarbeit [17] entstandenen MATLAB-Programms die Garnbreiten messen. An Hand der über den Winkel gelieferten Information werden die Kanten zwischen den sich kreuzenden Garnen identifiziert. In Abbildung 2.6 zeigt das linke Bild die für die Kantenerkennung benötigte Zuordnung des Faserwinkels. An jedem Kreuzungspunkt der Garne wird ein Messpunkt angetragen (Abbildung 2.6 rechts). Anschließend wird entweder automatisch über einstellbare Kriterien oder manuell zwischen den korrekten (grün) und fehlerhaften (rot) Messpunkten entschieden. Bei fehlerhaften Messpunkten entspricht die angetragene Breite nicht der tatsächlichen.

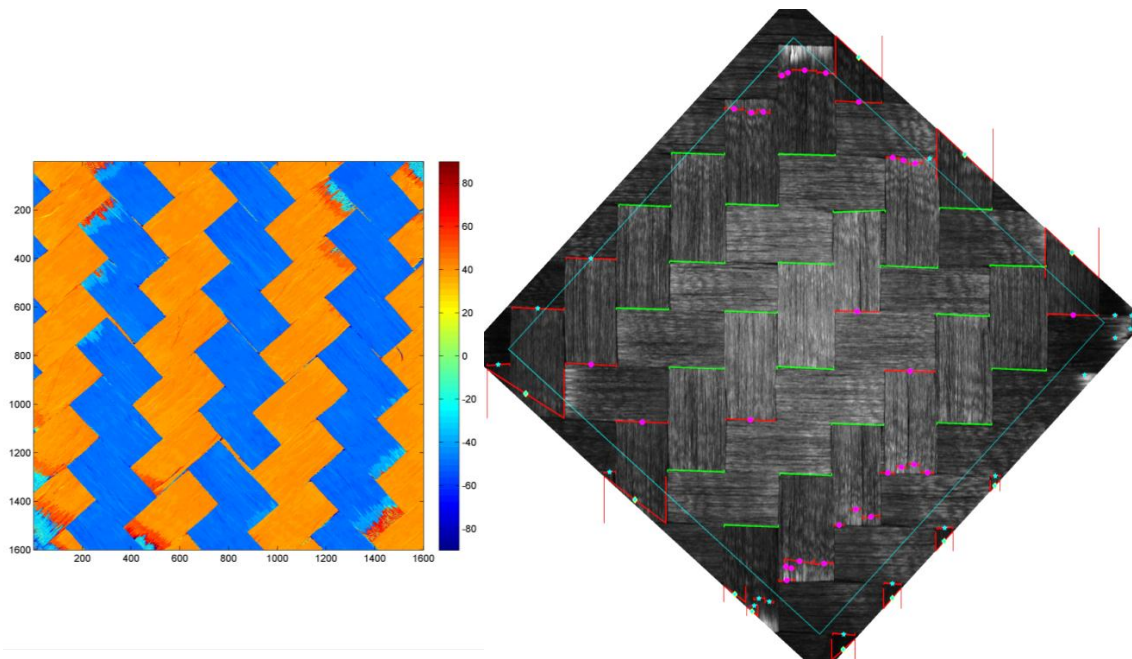


Abbildung 2.6: Falschfarbendarstellung in Abhängigkeit des Winkels (links); Messstellen der Garnbreitenmessung an den Garnkreuzungspunkten (rechts)

Die Breitenmessung geschieht für beiden Faserrichtungen. Die Einzelmesswerte und der sich daraus ergebende Mittelwert mit Standardabweichung und Konfidenzintervall werden in einer Exceltabelle aufgeführt.

2.2.2. Probenherstellung und Versuchsdurchführung zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte

Um einen Zusammenhang zwischen der Geflechtarchitektur und der mechanischen Leistungsfähigkeit des Geflechts herstellen zu können, finden in dieser Arbeit drei Arten der Werkstoffprüfung statt. Mit der Durchführung von Zug- und Druckversuchen wird der Einfluss der Geflechtarchitektur auf die Belastbarkeit des Laminats in Faserrichtung untersucht. Die dritte Prüfmethode, die Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit, gibt Aufschluss über die interlaminare Leistungsfähigkeit. Sofern nicht anderweitig vermerkt, gilt für die Herstellung und Prüfung der zur Ermittlung mechanischer Kennwerte verwendeten Prüfkörper, die hier beschriebene Vorgehensweise.

2.2.2.1. Herstellung der Prüfplatten

Da die Flechtgarne auf einem runden Kern sehr gleichmäßig zur Ablage kommen, werden die Lagen bevorzugt durch das Beflechten eines Rohrs hergestellt. Anschließend wird das Geflecht entlang der zur Fixierung angebrachten Klebebänder mit einem scharfkantigen Messer geschnitten (Abbildung 2.7).

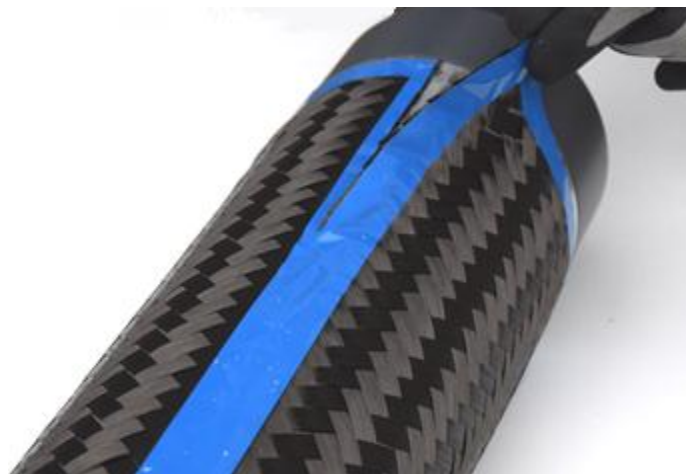


Abbildung 2.7: Abschneiden des Geflechts von einem Rohr

Nach der Abwicklung werden die sequenziell hergestellten Geflechtlagen gestapelt. Beim Stapeln ist darauf zu achten, dass die Orientierung der Garne in allen Lagen gleich ist. Je nach Dicke der Einzelgeflechtlage muss die Anzahl der Lagen so gewählt werden, dass die von der Prüfnorm geforderte Gesamtdicke erreicht wird. Die der Norm entsprechend dimensionierten Prüfkörper werden mit einer Nasskreissäge aus den Prüfplatten geschnitten.

Die Infiltrationen finden mittels des Vacuum Assisted Process (VAP) [18] statt.

2.2.2.2. Zug-Versuche nach DIN EN ISO 527-4

Um einen möglichst aussagekräftigen Vergleich zwischen den Geflechtarchitekturen anstellen zu können, müssen die generierten Kennwerte faserdominiert sein. Daher werden die Prüfkörper parallel zu einer Faserrichtung aus der Probenplatte entnommen (Abbildung 2.8). Durch die Verwendung von $\pm 45^\circ$ Geflechtem liegt die zweite Faserrichtung orthogonal zur Prüfkörperlängsrichtung. Somit liegt ein ausgeglichener Kreuzverbund vor, sodass der Entstehung von Dehnungs-Schiebungs-Koppelungen vorgebeugt wird [19]. Das heißt, die Zugbeanspruchung verursacht ausschließlich eine Dehnung in Belastungsrichtung und keine weitere Verzerrung des Laminats.

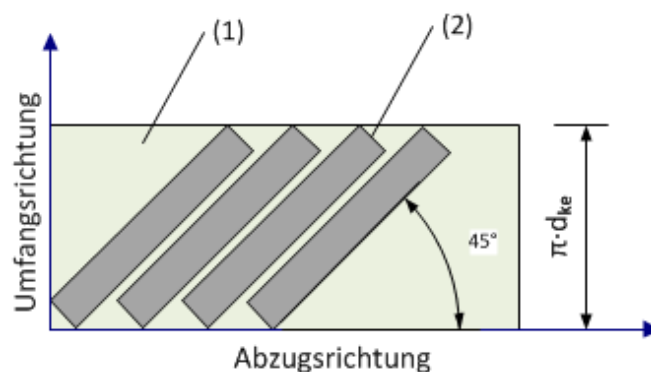


Abbildung 2.8: Anordnung der Zugprüfkörper (2) in einer Geflechtprobenplatte (1) [20]

Abbildung 2.9 zeigt die Abmessungen eines Zugprüfkörpers nach DIN 527-4 [21]. Bei einzelnen Versuchsreihen musste von dieser Geometrie abgewichen werden, beispielsweise wenn der Umfang des Kerns nicht für die Probenlänge von 250 mm ausreicht. Hierauf wird im Rahmen der Ergebnisauswertung hingewiesen.

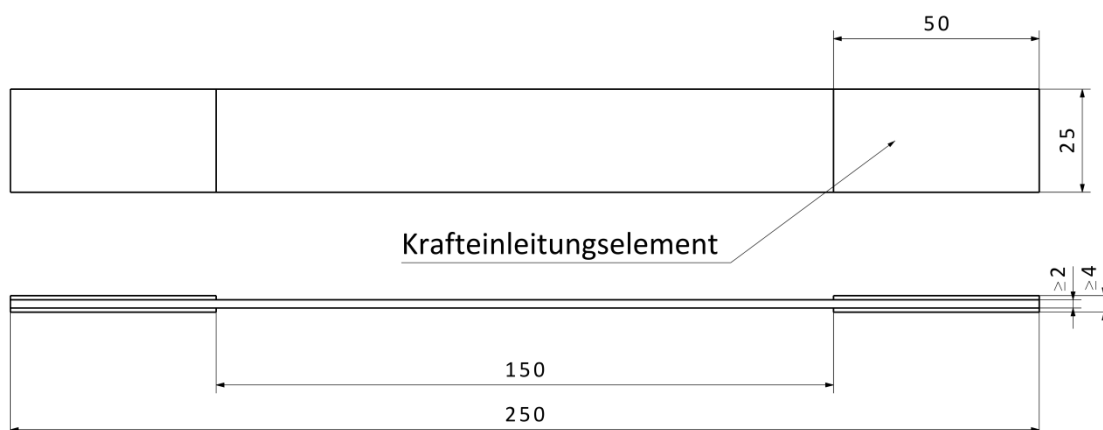


Abbildung 2.9: Abmessungen eines Zugprüfkörpers nach Din 527-4; Maße in mm [22]

Im Krafteinleitungsbereich wurden Schleifleinen oder 2 mm dicke Aufleimer aus glasfaserverstärktem Kunststoff verwendet. Die Schleifleinen, ein Sandpapierstreifen, welcher mit der rauen Seite in Richtung des Prüflings befestigt wird, vereinfachen die

Prüfkörperherstellung. Allerdings führen diese ab einem gewissen Kraftniveau zum Herausrutschen der Probe aus den Klemmbacken, sodass Aufleimer verwendet werden müssen. Sofern kein Rutschen in den Klemmbacken stattfindet und das Versagen innerhalb der freien Weglänge auftritt, führen beide Einspannungsarten zum gleichen Ergebnis.

Die Bruchfestigkeit wird wie folgt berechnet:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \quad (2.2)$$

Für F_{Max} wird die im Zugversuch erreichte Maximalkraft eingesetzt. Der Querschnitt A errechnet sich aus der Probenbreite und -dicke. Hierfür wird jeweils der Mittelwert dreier Messungen, welche verteilt über den Bereich der freien Weglänge stattfinden, verwendet.

Der E-Modul ist wie folgt definiert:

$$E = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'} \text{ mit } \varepsilon' = 0,05 \% \text{ und } \varepsilon'' = 0,25 \% \quad (2.3)$$

Für die Berechnung der Dehnung wird das System ARAMIS 4M der Firma GOM verwendet. Die Proben werden hierfür weiß grundiert, um anschließend mit einem zufälligen Fleckenmuster versehen zu werden. Über ein Kamerasystem wird die Verschiebung dieses Musters optisch erfasst und anschließend ausgewertet. Dabei wird ein virtueller Dehnmessstreifen erzeugt.

Die Versuche wurden in der Prüfmaschine Inspekt 250 der Firma Hegewald und Peschke durchgeführt. In Tabelle 2-1 sind die Parameter der Zugprüfung dokumentiert.

Tabelle 2-1: Parameter der Zugprüfung

Prüfgeschwindigkeit	Kraftniveau Start	Kraftniveau Ende	Einspanndruck
2 mm/min	5 N	65% Kraftabfall	150 bar ± 50 bar

2.2.2.3. Druck-Versuche nach ASTM D 6641

Die Druckproben werden den Geflechtprobeplatten auf gleiche Weise entnommen, wie bei der Herstellung der Zugprobekörper. (Abschnitt 2.2.2.2) Die Probekörper sind entsprechend Abbildung 2.10 dimensioniert [23]. Die Norm schreibt eine Mindestbreite von 12 mm vor, welche überschritten werden darf, zum Beispiel um eine repräsentative textile Struktur abbilden zu können. Da der Geflechtsausschnitt in einer 12 mm breiten Probe sehr klein ist, wird die Breite auf 25 mm festgelegt.

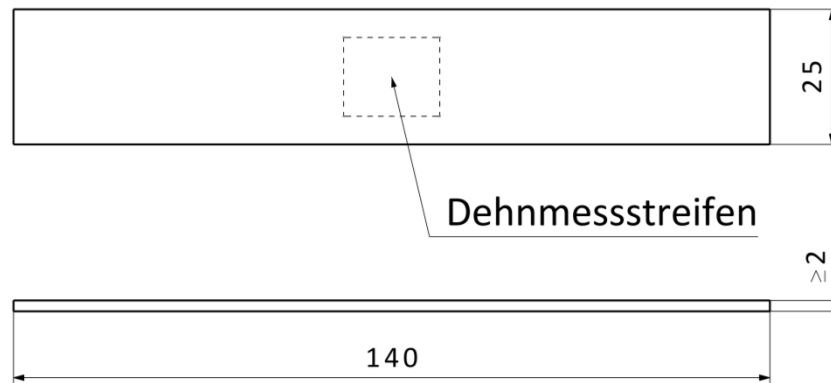


Abbildung 2.10: Abmessungen eines Druckprüfkörpers nach ASTM D 6641; Maße in mm [22]

Während des Versuchs ist die Probe in eine Einspannvorrichtung geklemmt (Abbildung 2.11). In dieser wird die Kraft sowohl über Druck an den Stirnseiten, als auch über Schub in den Krafteinleitungsbereichen in die Probe eingebracht.

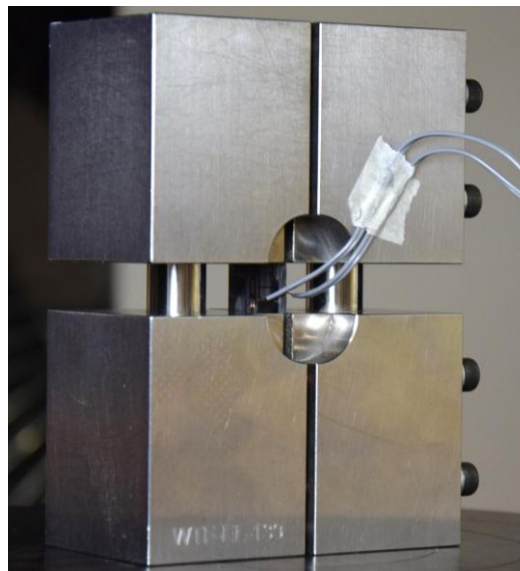


Abbildung 2.11: Einspannvorrichtung mit senkrecht eingespannter Druckprobe

Die Einspannung findet an den beiden Enden jeweils auf einer Länge von 64 mm statt, sodass sich in der Mitte eine freie Länge von 12 mm ergibt. Durch die massive Bauweise der Einspannung und der geringen freien Länge, kann das Aramis System, welches bei den Zugversuchen Verwendung findet, den Versagensbereich nicht er-

fassen. Daher kommen zur Dehnungsmessung Dehnmessstreifen (DMS) zum Einsatz. Auf Grund ihrer Länge (3 mm) wird die Dehnung nur in einem kurzen Bereich gemessen. Die aus dieser Messungenauigkeit eventuell resultierende hohe Streuung des E-Moduls muss bei der Auswertung berücksichtigt werden. Jede Probe wird sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite mit einem DMS versehen. Somit kann das ungewollte Auftreten einer Biegung detektiert werden. Übersteigt die Abweichung (Formel (2.4) B) der beiden gemessenen Dehnungen ε_1 und ε_2 an der Stelle $\varepsilon = 0,2\%$ den Grenzwert von 10 %, ist die Probe als ungültig zu werten, da die Gefahr besteht, dass kein reines Druckversagen eintritt.

$$B = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Grundsätzlich sieht die Norm im Bereich der Krafteinleitung keine Aufleimer vor, lediglich bei hohen Maximalkräften. In dieser Arbeit werden daher einzelne Versuchsreihen, welche eine Geflechtarchitektur mit einer besonders hohen Festigkeit aufweisen, mit Aufleimern versehen. An entsprechender Stelle wird darauf hingewiesen.

Festigkeit und Steifigkeit werden analog zu den Zugversuchen berechnet (Formel (2.2) beziehungsweise Formel (2.3)), bei der Berechnung des E-Moduls gilt:

$$\varepsilon_1 = 0,1\% \quad \text{und} \quad \varepsilon_2 = 0,3\%$$

2.2.2.4. Dreipunktverfahren mit kurzem Balken zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit (ILSS) nach DIN EN ISO 14130

Die ILSS Werte ergeben Aufschluss über die interlaminaren Eigenschaften eines Laminates. Ähnlich einem Dreipunktverfahren zur Bestimmung der Biegeeigenschaften, wird die Probe mittels zweier Auflager und einer beweglichen Druckfinne auf Biegung belastet (Abbildung 2.12).



Abbildung 2.12: Links: Prüfaufbau mit zwei Auflagern (unten) und Druckfinne (oben) zur Bestimmung der ILSS; rechts: Probengeometrie in Seiten- und Vorderansicht

Durch ein kleines Stützweite-Probendicke-Verhältnis (laut Norm fünf) wird die Schubspannung gegenüber der Biegespannung erhöht, sodass ein Versagen durch interlaminare Scherung begünstigt wird [24]. Abbildung 2.12 zeigt die von der Norm geforderte Probengeometrie, wobei als Probendicke (h) 2 mm empfohlen werden. Mit

den Probeabmaßen und der maximalen Prüfkraft F_{\max} lässt sich die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit τ berechnen:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{\max}}{4 \cdot k \cdot h} \quad (2.5)$$

Der Kennwert wird mit dem Adjektiv *scheinbar* versehen, da der ermittelte Wert keine absolute Größe darstellt. Der ILSS Wert kann auf Grund einer veränderten Probengeometrie oder unterschiedlicher Prüfbedingungen für ein bestimmtes Material variieren [24]. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, muss daher auf eine einheitliche Probendimensionierung und konstante Prüfbedingungen geachtet werden.

Der Zuschnitt wird so vorgenommen, dass die Proben über einen 0°/90° Garnverlauf verfügen. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min; bei einem Kraftniveau von 5 N startet der Versuch und endet nach einem Kraftabfall von 15 %.

2.3. Methodische Vorgehen bei der Entwicklung und Konstruktion von technischen Systemen

Die Grundlagen des methodischen Vorgehens bei der Entwicklung und Konstruktion von technischen Systemen bestehen aus:

- der Unterteilung des Konstruktionsprozesses in einzelne Arbeitsschritte
- der systematischen Behandlung dieser Schritte
- der Zuordnung von darstellenden Modellen
- der Variation, Auswahl und Verknüpfung dieser Modelle zu einer funktionsfähigen Anlage [25]

Die Entwicklung und Konstruktion ist ein Teil des Lebenszyklus einer Anlage oder eines Produkts (Abbildung 2.13).

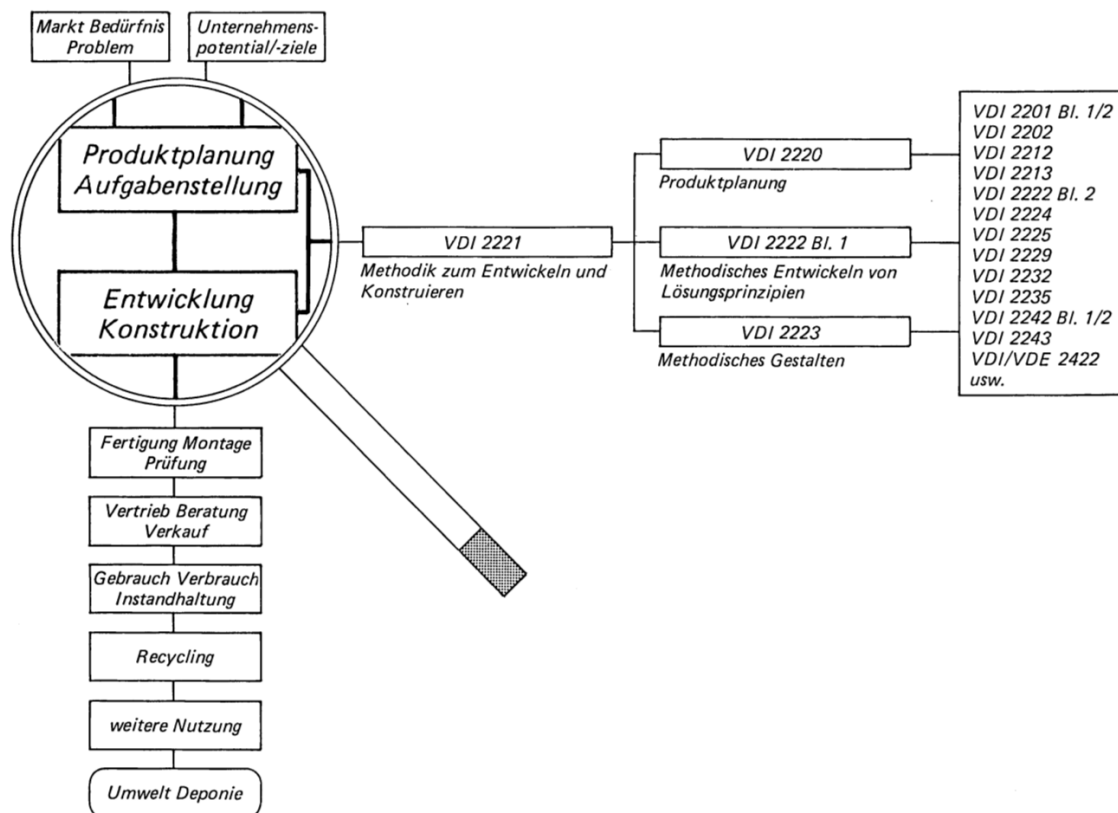


Abbildung 2.13: Das VDI-Richtliniengerüst für Produktplanung, Aufgabenstellung, Entwicklung und Konstruktion [25]

Für die Umsetzung von Prüfständen sind ausschließlich diese Schritte relevant, erst bei Serienanlagen muss auch der restliche Lebenszyklus in Betracht gezogen werden.

Das im Folgenden vorgestellte Vorgehen nach VDI 2221 ist in sieben Arbeitsschritte unterteilt. Zwei dieser Schritte sind von besonderer Wichtigkeit und bedürfen daher einer klaren Methodik: die *Lösungsfindung* und die *Lösungsbewertung/-auswahl*. Mit einem methodischen Vorgehen soll sichergestellt werden, dass keine Lösungen übersehen beziehungsweise zu früh aufgegeben werden. Für diese beiden Entwicklungsschritte liefern weitere VDI Richtlinien detaillierte Vorgehensvorschläge (Abbildung 2.13). Daher werden diese beiden Schritte, nach der Vorstellung von VDI 2221, näher beleuchtet.

2.3.1. Vorgehen nach VDI 2221

In VDI 2221 [26] wird das Vorgehen bei der Entwicklung und Konstruktion in sieben Arbeitsschritte, von der Definition der Aufgabenstellung bis hin zur Anlagenspezifikation, unterteilt (Abbildung 2.14). Mit dieser Struktur soll sichergestellt werden, dass die entwickelte Anlage die gestellte Aufgabe möglichst effizient erfüllt. Die Möglichkeit von Iterationsschleifen über den linken äußeren Pfad der Grafik verdeutlicht,

dass der Ablauf der sieben Schritte nicht als starr zu verstehen ist, sondern einzelne Schritte bei Bedarf zusammengefasst oder wiederholt werden können. Durch die Pfeile zwischen den Arbeitsschritten/-ergebnissen und den Anforderungen am rechten Grafikrand wird verdeutlicht, dass stets die Anforderungen aus vorangegangene Schritten berücksichtigt werden müssen und durch jeden Schritt neue hinzukommen. Die Anforderungsliste ist ein lebendes Dokument, welches dem Erkenntnisstand entsprechend erweitert werden muss.

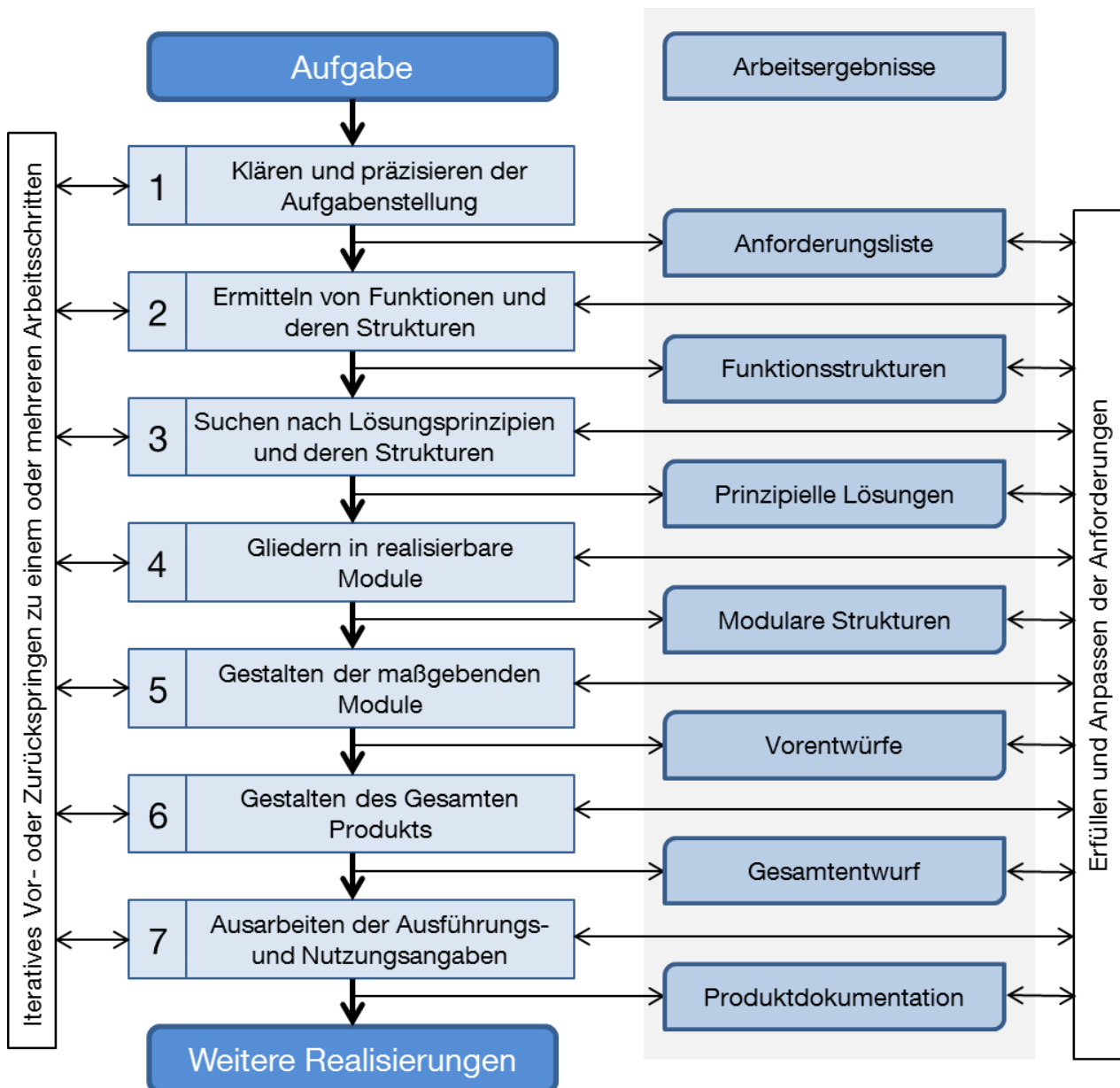


Abbildung 2.14: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [26]

2.3.2. Finden von Lösungen

Bei dem in Abbildung 2.14 vorgestellten Vorgehen müssen an zwei Stellen Lösungen entwickelt werden: prinzipielle Lösungen in Schritt drei und Vorentwürfe in Schritt fünf. Zwar ist der Detaillierungsgrad unterschiedlich, allerdings ist in beiden Fällen wichtig, dass nicht beliebige Ideen vorschnell umgesetzt werden, sondern zielgerichtet nach möglichst vielen Alternativen gesucht wird [27]. In VDI 2222 ist die übersichtliche Darstellung geeigneter physikalischer Effekte als wichtiges Hilfsmittel bei der Lösungsfindung angeführt. Ein Effekt ermöglicht die Realisierung einer gewissen Funktion und versteht sich als Sammelbegriff für das Vorhandensein einer physikalischen, chemischen oder biologischen Gesetzmäßigkeit, Erscheinung oder eines Ablaufs [25]. Somit lautet die eigentliche Aufgabe: finde Effekte, mit welchen sich das gestellte Problem lösen lässt. Hierfür gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, wie beispielsweise die Recherche, Analyse natürlicher und technischer Systeme, Brainstorming und Gruppenarbeiten [28].

Um das Vorgehen transparent und übersichtlich zu gestalten, ist die Verwendung von graphischen Darstellungen ratsam. Geeignete Möglichkeiten sind der Morphologische Kasten und Ordnungsschemata [27][29].

2.3.3. Bewertung und Auswahl

Durch die steigende Anzahl an Anforderungen wird das anfänglich sehr breite Lösungsfeld zunehmend eingeschränkt. Einerseits ist eine frühe Einschränkung sinnvoll um die Lösungsfindung zu vereinfachen, andererseits ist darauf zu achten, dass geeignete Wirkprinzipien nicht unbeabsichtigt entfallen [28]. Um dies zu vermeiden muss eine nachvollziehbare Bewertungs- und Auswahlmethodik angewandt werden. Diese wird nach Arbeitsschritten, in welchen konkrete Lösungsvarianten erarbeitet werden, verwendet. Somit wird sichergestellt, dass theoretisch denkbare, aber praktisch nicht umsetzbare Lösungen erkannt und nicht weiterverfolgt werden. Sofern der Entwicklungsprozess nicht mit einer endgültigen Entscheidung abgeschlossen werden soll, wird eine Vorauswahl getroffen.

Bei einer Vorauswahl werden die Lösungsvorschläge anhand von Kriterien unabhängig voneinander bewertet [27]. Sofern die Kriterien in dem gewünschten Maß erfüllt sind, wird diese Lösung weiter verfolgt. Es können mehrere oder sogar alle Lösungskonzepte positiv bewertet werden. Eine übersichtliche Darstellung bietet die Auswahlliste [28]. Für jeden Lösungsvorschlag wird angegeben ob die Kriterien erfüllt (+) sind oder nicht (-). Kann eine Lösung auf Grund von Informationsmangel nicht eindeutig bewertet werden, wird ein Fragezeichen eingetragen (Abbildung 2.15).

Analyse und Beurteilung		Entscheidung							
Lösungsvorschläge nach den Kriterien beurteilen mit: + ja - nein ? Informationsmangel ! Anforderungen überprüfen		Entscheidung kennzeichnen mit: + Lösung weiter verfolgen - Lösung scheidet aus ? Informationen beschaffen ! Anforderungen überprüfen							
	Verträglichkeit gegeben								
	Forderungen der Anforderungsliste erfüllt								
	grundsätzlich realisierbar								
	Aufwand zulässig (technologisch)								
	im vorgegebenen Zeitrahmen realisierbar								
	Kosten im Rahmen (Entwicklung)								
				...					
Lösung	A	B	C	D	E	F	G	Bemerkungen	
1	+	+	+	+	+	+			+
2	?	-	+	+	-	+			-
3	+	+	?	+	+	+			?
4									
	Datum	Bearbeiter:							

Abbildung 2.15: Beispiel einer Auswahlliste [28]

Abschließend wird entschieden, wie mit der Lösung weiter verfahren wird. Die Kriterien gehen aus der Anforderungsliste hervor und können unterteilt werden in:

- **Festforderungen**, welche unter allen Umständen erfüllt werden müssen,
- **Mindestforderungen**, die nach der günstigen Seite über- oder unterschritten werden dürfen,
- **Wünsche**, die nach Möglichkeit berücksichtigt werden sollen. [30]

Muss eine abschließende Entscheidung getroffen werden, soll aus der Bewertung nur eine, nämlich die beste Lösungsvariante hervorgehen. Hierfür sind gewichtete Punktbewertungen geeignet. Anstelle der Ja/Nein (+/-) Bewertung werden die Lösungen mit Punkten, je nach Grad der Anforderungserfüllung, bewertet. Abbildung 2.16 zeigt die von VDI 2225 vorgeschlagene Bewertungsskala.

Annäherung an die ideale Verwirklichung:	
sehr gut (ideal)	$p = 4$ Punkte
gut	$p = 3$ Punkte
ausreichend	$p = 2$ Punkte
gerade noch tragbar	$p = 1$ Punkt
unbefriedigend	$p = 0$ Punkte

Abbildung 2.16: Punktbewertungsskala nach VDI 2225 [30]

Zusätzlich zu der Zuweisung der Punktzahl, kann jede Anforderung gewichtet werden. Somit kann der unterschiedlichen Bedeutung der Anforderungen Rechnung getragen werden. Aus der Summation der pro Anforderung erzielten Punktzahl, kann die Lösung mit den meisten Punkten als Optimum identifiziert werden.

2.4. Statistische Versuchsplanung

Bei der Entwicklung von Prozessen müssen oftmals bestimmte Annahmen durch Experimente verifiziert werden. Der Erkenntnisgewinn aus solchen Experimenten ist zwar hoch, dem gegenüber stehen jedoch der häufig nicht unerhebliche Zeit- und Kostenaufwand. Ziel der statistischen Versuchsplanung (englisch: Design of Experiments, DoE) ist es, diesen Aufwand zu minimieren, ohne dabei statistische Aussagekraft (Signifikanz) zu verlieren [31] [32].

Das Vorgehen lässt sich in vier Schritte unterteilen [33], welche in den folgenden Abschnitten zu einem Leitfaden für das Vorgehen in Kapitel 4.4 ausgearbeitet werden.

Schritt 1: Festlegung der Zielgrößen und Faktoren

Wird ein Prozess untersucht, sind die Zielgrößen in der Regel die Merkmale, welche durch die Prozessierung des Produkts verändert werden sollen. Gegebenenfalls kommen unerwünschte Merkmale, welche zu minimieren sind, hinzu. Bei der Messung der Zielgröße ist darauf zu achten, dass die Messstreuung im Vergleich zu den tatsächlichen Unterschieden der einzelnen Versuchsreihen klein ist. Dies kann mit einer Messmittelfähigkeitsuntersuchung überprüft werden [33].

Faktoren sind all jene Prozessparameter, welche im Rahmen des Versuchsplans untersucht werden. Sie gehen aus einer Auswahl aus der Gesamtheit der Einflussgrößen hervor. Einflussgrößen sind alle Größen, welche das Versuchsergebnis (Zielgrößen) möglicherweise beeinflussen. Dabei wird zwischen den einstellbaren Steuergrößen und den nicht einstellbaren Störgrößen unterscheiden. Zunächst werden möglichst alle Einflussgrößen, unabhängig von der Größe ihres vermuteten Einflusses, zusammengetragen. Erst nach der vollständigen Auflistung erfolgt die Auswahl

ein handhabbaren Anzahl an Faktoren (typischerweise drei bis sechs, selten mehr als 10), welche im Versuchsplan untersucht werden sollen. Alle übrigen Einflussgrößen sind während der Versuche konstant zu halten. Die Auswahl der Faktoren richtet sich zuvorderst nach der vermuteten Bedeutung für die Zielgröße. Weitere Auswahlkriterien sind die Einstellgenauigkeit und -reproduzierbarkeit und der Einstellaufwand [33]. Mit Hilfe von Vorversuchen kann ein Verständnis über Wirkzusammenhänge aufgebaut werden, was die Auswahl der Faktoren erleichtert.

Stehen die Faktoren fest, müssen Anzahl und Betrag der Faktorstufen festgelegt werden. Die Faktorstufen sind die Werte, welche ein Faktor im Versuch annehmen soll. Um den Umfang und somit Aufwand des Versuchsplans zu begrenzen, werden Pläne, welche fünf oder mehr Faktoren enthalten, zweistufig durchgeführt. Somit ergibt sich bei der Auswertung ein linearer Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße. Dies bildet zwar häufig nicht die tatsächliche Abhängigkeit ab, genügt aber für die Bestimmung der Wichtigkeit und des lokalen Optimums des Faktors. Bei der Festlegung der Werte der Faktorstufen sind einige Punkte zu beachten:

- Je kleiner der Abstand zwischen den Stufen, desto kleiner der Unterschied in der Zielgröße und desto wahrscheinlicher, dass der Unterschied in der Streuung untergeht (Abbildung 2.17, links).
- Je größer der Abstand zwischen den Stufen, desto größer kann die Abweichung von der Linearität sein (Abbildung 2.17, rechts). Da diese Abweichung nicht erkannt wird, werden die Ergebnisse verfälscht.
- Eine Extrapolation auf Werte außerhalb des untersuchten Bereichs ist unzulässig.

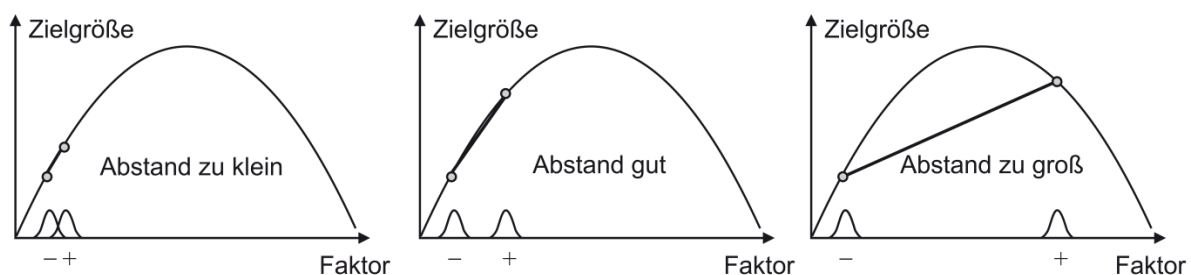


Abbildung 2.17: Wahl der Stufenwerte eines Faktors [33]

Können die Stufen mit den vorhandenen Informationen nicht sinnvoll definiert werden, muss eine nähere Untersuchung der betreffenden Faktoren stattfinden.

Als nächstes wird ein Versuchsplan für die ausgewählten k Faktoren mit zwei Stufen erstellt.

Schritt 2: Aufstellung des Versuchsplans

Handelt es sich um einen neuentwickelten Prozess, welcher mit Hilfe einer ersten Versuchsreihe charakterisiert werden soll, eignen sich fraktionelle faktorielle Versuchspläne. Im Gegensatz zu vollfaktoriellen Versuchsplänen, bei denen alle 2^k

Kombinationen betrachtet werden, wird nur ein bestimmter Anteil $\frac{1}{2^p}$ untersucht. Daher werden sie auch als 2^{k-p} -Versuchspläne bezeichnet [33]. Somit kann der Versuchsumfang erheblich verringert werden. Allerdings kommt es auf Grund der Reduktion der untersuchten Kombinationen zu einer Vermengung der Effekte und Wechselwirkungen. Vermengung bedeutet, dass bei der Auswertung nicht feststellbar ist, auf welchen der vermengten Effekte das Ergebnis zurückzuführen ist. Die sogenannte Auflösung des Versuchsplans sinkt damit. Abbildung 2.18 zeigt den Zusammenhang zwischen Auflösung, Anzahl der Faktoren k und Anzahl der Faktorstufenkombinationen m .

m \ k	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	2^{3-1} III									
8	2^3 vollst.	2^{4-1} IV	2^{5-2} III	2^{6-3} III	2^{7-4} III					
16		2^4 vollst.	2^{5-1} V	2^{6-2} IV	2^{7-3} IV	2^{8-4} IV	2^{9-5} III	2^{10-6} III	2^{11-7} III	2^{12-8} III
32			2^5 vollst.	2^{6-1} VI	2^{7-2} IV	2^{8-3} IV	2^{9-4} IV	2^{10-5} IV	2^{11-6} IV	2^{12-7} IV
64				2^6 vollst.	2^{7-1} VII	2^{8-2} V	2^{9-3} IV	2^{10-4} IV	2^{11-5} IV	2^{12-6} IV
128					2^7 vollst.	2^{8-1} VIII	2^{9-2} VI	2^{10-3} V	2^{11-4} V	2^{12-5} IV

Abbildung 2.18: Auflösung (III-VIII) in Abhängigkeit von der Anzahl der Faktoren k und der Anzahl der Faktorstufenkombination m [33]

Aus Abbildung 2.19 wird ersichtlich welchen Einfluss die Auflösung auf die auftretenden Vermengungen hat. Die mit n FWW abgekürzten n -Fachwechselwirkungen beschreiben die Abhängigkeit des Einfluss eines Faktors von der Stufe n anderer Faktoren.

Auflösung	Vermengung	Bewertung
III	Faktor mit 2FWW	kritisch
IV	Faktor mit 3FWW 2FWW mit 2FWW	weniger kritisch
V	Faktor mit 4FWW 2FWW mit 3FWW	unkritisch
VI	Faktor mit 5FWW 2FWW mit 4FWW 3FWW mit 3FWW	unkritisch

Abbildung 2.19: Auftretende Vermengungen in Abhängigkeit der Auflösung [33]

Bei einer Auflösung von III findet beispielweise eine Vermengung von Faktoren und Zweifachwechselwirkungen (2FWW) statt. Dies ist als kritisch zu bewerten, da der Einfluss der Faktoren durch die 2FWW eventuell verfälscht wird, ohne dass eine Aussage über die Wirkung der 2FWW gemacht werden kann. Schlussendlich muss je nach zu untersuchendem technischen Zusammenhang entschieden werden, welche Wechselwirkungen zu erwarten sind und somit in Betracht gezogen werden müssen. Können beispielsweise 3FWW ausgeschlossen werden und interessieren nur die Effekte der Faktoren, ist eine Auflösung der Stufe IV bereits ausreichend. Gegebenenfalls können bei der Auswertung durch technische Überlegungen bestimmte Wechselwirkungen ausgeschlossen werden, sodass trotz Vermengung eine eindeutige Aussage möglich ist [33].

Für die Erstellung und spätere Auswertung des Versuchsplans wurde im Rahmen dieser Arbeit das Programm Minitab 17 verwendet. Nach der Wahl des Versuchsplans und der gewünschten Auflösung, werden die Faktoren mit den dazugehörigen Stufen in eine Tabelle eingetragen. Daraus wird ein Versuchsplan erstellt. Um zu verhindern, dass unerkannte Umwelteinflüsse das Ergebnis beeinflussen, wird die Reihenfolge randomisiert.

Schritt 3: Versuchsdurchführung

Da bei der statistischen Versuchsplanung jeder einzelne Messwert zur Berechnung aller Effekte herangezogen wird, muss bei jedem Versuch mit äußerster Sorgfalt vorgegangen werden. Besonders auf eine korrekte Nutzung der Messgeräte und eindeutige Zuweisung der Messergebnisse ist zu achten. Können Anlagenparameter nicht konstant gehalten werden oder verändern sich die Umweltbedingungen, ist eine ausführliche Dokumentation im Versuchsprotokoll vorzusehen [33].

Schritt 4: Ergebnisauswertung und Interpretation

Nach der Versuchsdurchführung werden die Messwerte in das Programm Minitab eingetragen. Zunächst werden die Faktoren und Wechselwirkungen ihrem Einfluss auf die Zielgröße nach in einem sogenannten Pareto-Diagramm aufgelistet. Diesem Diagramm kann entnommen werden, welche Faktoren und Wechselwirkungen mit einer zuvor definierten Fehlerwahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die Zielgröße besitzen. Der lineare Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Faktor und der Zielgröße ist graphisch in sogenannten Haupteffektdiagrammen dargestellt. In Wechselwirkungsdiagrammen ist der Einfluss der in Wechselwirkung stehenden Faktoren auf die Zielgröße ersichtlich. Wie in den Haupteffektdiagrammen wird der lineare Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße abgebildet, allerdings unter Berücksichtigung der Stufe des beeinflussenden Faktors.

3. Variation des Kernumfangs bei biaxialen Geflechtem

Um das Ziel der maximalen Ausnutzung des Leichtbaupotenzials zu erreichen, ist eine möglichst genaue Anpassung der Bauteilgeometrie an die zu erwartenden Lastfälle und den zur Verfügung stehenden Bauraum erstrebenswert. Dies erfordert in einigen Fällen Umfangsveränderungen innerhalb eines Bauteils (Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Geflochtene Bauteile mit Umfangsänderungen: Antriebswelle (links [34]) und Spoiler (rechts [35])

Gemäß Formel (2.1) bedeuten diese Umfangsänderungen automatisch eine Veränderung der Geflechtarchitektur und somit der mechanischen Eigenschaften.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse verschiedener Geflechtarchitekturen, welche durch die Umfangsvariation hervorgerufen werden. Abschließend findet eine quantitative Untersuchung ihres Einflusses auf die mechanischen Kennwerte statt. Das Ziel ist dabei negative Geflechtarchitekturen zu identifizieren, um im Anschluss (Kapitel 4 und 5) Strategien für die Vermeidung eben dieser Architekturen zu entwickeln.

3.1. Das Prozessfenster

Birkefeld [36] legt an Hand von experimentellen Erkenntnissen ein Prozessfenster für ein ausgewähltes biaxiales Geflecht fest. Dieses Prozessfenster wird über gewisse Merkmale der Geflechtarchitektur definiert. Da je nach Anwendungsfall die Anforderungen an das Material unterschiedlich sein können, müssen die Merkmale unter Berücksichtigung der Anwendung spezifiziert werden. Birkefeld [36] geht von einer Luftfahrtanwendung aus und definiert das Prozessfenster über das Vorhandensein folgender drei Geflechtmerkmale:

- Keine Lücken im Geflecht ($b_L = 0$ mm)
- Über die gesamte Kernlänge liegt das Geflecht am Kern an
- Vermeidung von Geflechtdefekten durch Faserschädigung, verursacht durch eine zu hohe Fadenspannung

Alle Geflechtarchitekturen mit diesen Merkmalen befinden sich innerhalb des in Abbildung 3.2 mit der grünen und den gestrichelten Linien eingerahmten Prozessfensters.

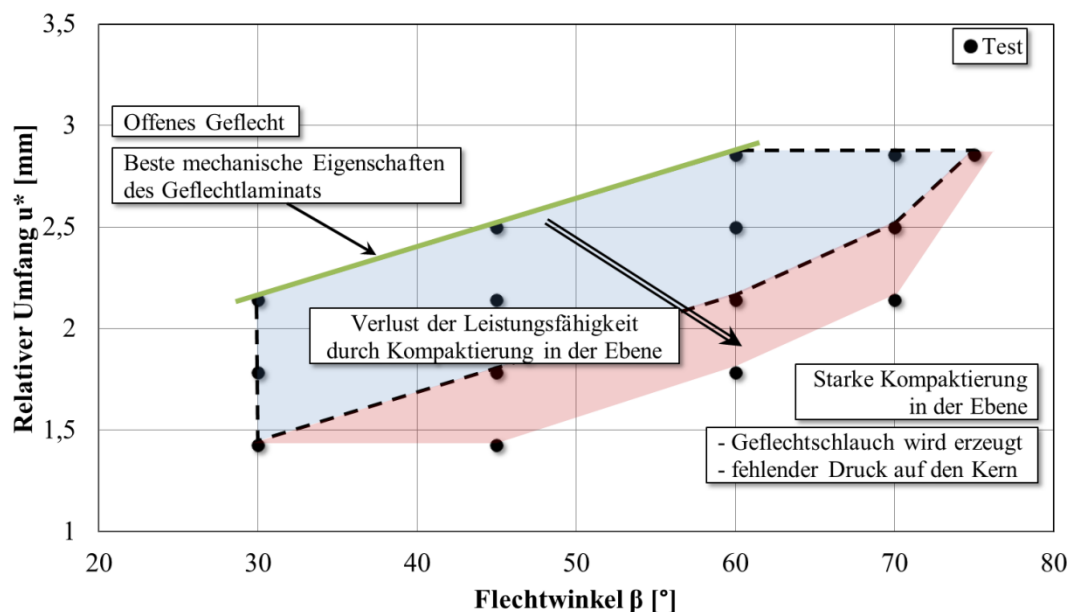


Abbildung 3.2: Prozessfenster für biaxiale Geflechte bei einer Flechtmaschine mit 176 Flechtäden vom Typ Tenax HTS40 12k F13 [36]

Das Prozessfenster ist jedoch nicht als homogener Bereich zu verstehen. An jedem Punkt innerhalb dieses Fensters liegt ein anderer Flechtwinkel und/oder relativer Umfang (absoluter Umfang normiert auf die Flechtfadenzahl, ähnlich dem Flächengewicht) vor. Das Geflecht ändert innerhalb des Prozessfensters seine Struktur und somit seine mechanischen Eigenschaften.

Soll aus diesem Prozessfenster eine Gestaltungsrichtlinie für ein Flechtbauteil mit *maximaler* Umfangsva-riation abgeleitet werden, muss eine Variation des Flechtwinkels zwischen 30° und mindesten 60° erfolgen. Für das in Abbildung 3.2 beschriebene Geflecht ließe sich somit der Umfang, ausgehend von dem kleinsten Durchmesser, nahezu verdoppeln. Dies setzt jedoch voraus, dass der Flechtwinkel weitestgehend nach dem zu beflechtenden Umfang eingestellt werden kann. Wie bereits festgestellt, werden die mechanischen Eigenschaften des Geflechtes auch durch den Flechtwinkel beeinflusst. Cichosz [37] stellt die mechanische Leistungsfähigkeit eines biaxialen $\pm 30^\circ$ Geflechtes in Abhängigkeit der Belastungsrichtung dar. (Abbildung 3.3)

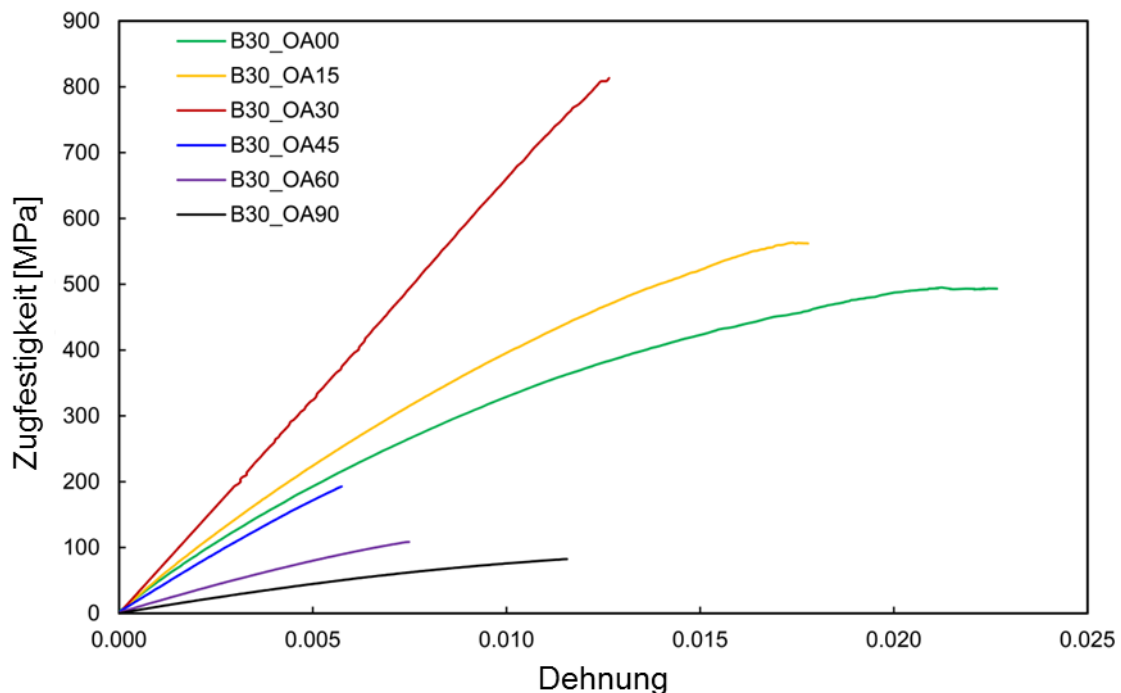


Abbildung 3.3: Spannungsdehnungskurven unterschiedlicher Belastungsrichtungen (Zahl hinter OA gibt die Differenz zwischen Belastungs- und Faserrichtung an) eines biaxialen $\pm 30^\circ$ Geflechtes [37]

In der Bezeichnung der Kurven geben die beiden Zahlen hinter OA (für *off-axis*) den Winkel zwischen Belastungs- und Abzugsrichtung an. Wie zu erwarten, erreichen sowohl Steifigkeit, als auch Festigkeit ihr Maximum bei einer Belastung in Garnrichtung (30°). Bereits eine Differenz von 15° zwischen Belastungs- und Faserrichtung beeinträchtigt die Leistungsfähigkeit des Laminats erheblich. Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt Kilchert [38]. Soll das Bauteil über einen belastungsgerechten Garnverlauf verfügen, darf der Flechtwinkel somit nicht zur Umfangsva-riation herangezogen werden.

Geht man vereinfacht von einem konstanten Belastungsfall und somit einem festgelegten Flechtwinkel aus, darf die Umfangsänderung innerhalb des Prozessfensters nur entlang einer Senkrechten stattfinden. Für ein $\pm 45^\circ$ Geflecht verringert sich die maximale Umfangsänderung somit auf den Faktor 1,4. Birkefeld [36] stellt jedoch

fest, dass für jeden Flechtwinkel nur ein Punkt existiert, an welchem die mechanischen Eigenschaften das Maximum erreichen (grüne Linie in Abbildung 3.2). Auf diesem Umfang legen sich die Garne mit ihrer maximalen Breite ab, ohne dabei Lücken zu bilden. Entfernt man sich im Prozessfenster von dieser Linie, also hin zu kleineren Umfängen, verringert sich die Leistungsfähigkeit des Geflechts. Birkefeld [36] beschreibt die Ursache für diese Abnahme als *Kompaktierung in der Ebene*. Durch die engere Ablage der Garne auf einem kleineren Umfang werden diese stärker onduziert. Wäre eine solche Abnahme der mechanischen Kennwerte für einen Belastungsfall unzulässig, müsste die untere Linie des Prozessfensters nach oben verschoben werden. Folglich würde sich die Möglichkeit einer Umfangsvariation zusätzlich verringern.

Birkefeld [36] untermauert die eben erwähnten Aussagen zu den mechanischen Eigenschaften des Geflechts mit einer numerischen Berechnung ausgewählter E-Moduln und eines Schubmoduls. Die Ergebnisse lassen jedoch nur qualitative Aussagen zu, sodass eine experimentelle Untersuchung empfohlen wird. Diese Untersuchung geschieht in dem folgenden Abschnitt.

3.2. Geflechtarchitekturen auf einem Konus

In Kapitel 3.1 wurde festgestellt, dass der Flechtwinkel ein wichtiger Auslegungsparameter ist und daher nicht zur Umfangsvariation herangezogen werden soll. Der Flechtwinkel wird daher für die folgenden Betrachtungen auf $\pm 45^\circ$ festgesetzt. Mit dieser Randbedingung wird untersucht, welche Auswirkungen die Umfangsänderung eines Flechtbauteils auf die Geflechtarchitektur hat.

Abbildung 3.4 [39] zeigt einen mit 64 Kohlenstoffäden (24k HT) beflochtenen Konus, wobei das Geflecht an vier Durchmessern (50 mm, 70 mm, 90 mm, 130 mm) detailliert abgebildet ist. An diesen vier Stützstellen wird das Geflecht im Folgenden näher untersucht.

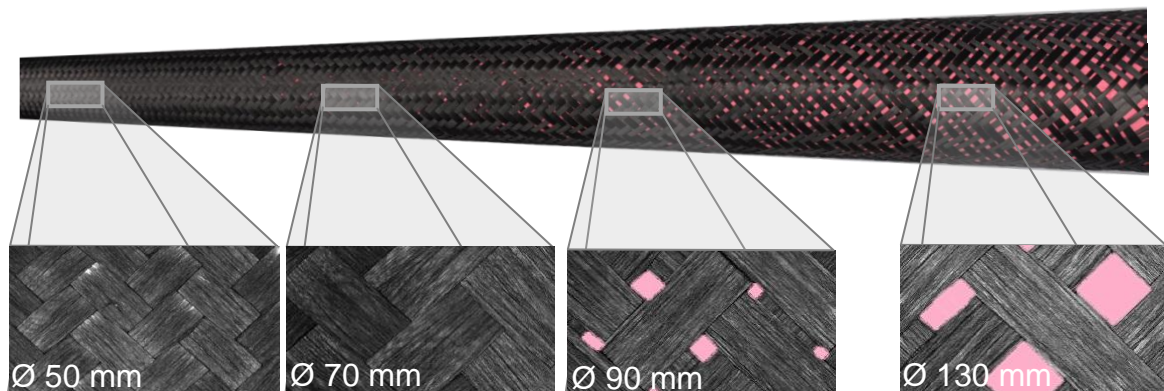


Abbildung 3.4: Unterschiedliche Architekturen eines $\pm 45^\circ$ 24k Geflechts auf einem konischen Kern

Das in Kapitel 3.1 definierte Prozessfenster befindet sich zwischen dem 50 mm und dem 70 mm Durchmesser. Für kleinere Durchmesser reicht die Fadenkraft (350 g Klöppelfedern) nicht mehr aus, um das Geflecht auf dem Kern zu fixieren, ein loser Geflechtschlauch entsteht. Auf dem 70 mm Durchmesser legen sich die Garne lückenlos und mit maximaler Breite ab. Das Diagramm in Abbildung 3.5 zeigt den linearen Anstieg der Garnbreite zwischen diesen beiden Durchmessern. Da keine Lücken im Geflecht vorhanden sind, deckt sich der Verlauf mit der Kurve der errechneten maximal möglichen Ablagebreite. Ab dem 70 mm Durchmesser kann die Kernoberfläche (in Abbildung 3.4 rosa) nicht mehr vollständig bedeckt werden. Für größere Durchmesser steigt die Fadenbreite nur noch geringfügig, wohingegen die Lückenbreite, erkennbar an dem Abstand der beiden Graphen, stark zunimmt.

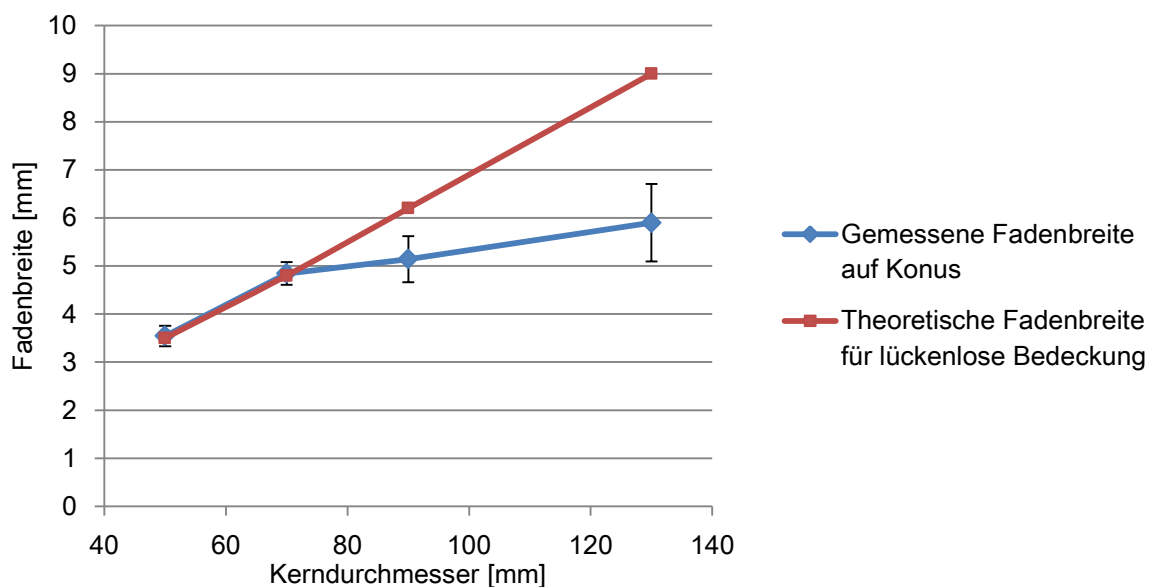


Abbildung 3.5: Fadenbreite mit Standardabweichung in Abhängigkeit des Kerndurchmessers

Die höhere Streuung der Garnbreite wird durch einzelne breite Fäden verursacht, welche auf Grund der Lücken nicht mehr durch die angrenzenden Garne zusammengeschoben werden. In Abbildung 3.4 ist zu erkennen, dass die Lückengröße auch entlang eines Umfangs stark schwankt. Da sich die Garne nicht gegenseitig fixieren, können sie in ihrer Bahn „schlingern“, sodass die Lücken rechts und links eines Garns unterschiedlich groß sind. Es entsteht ein sehr inhomogenes Geflecht, in welchem es zu starken lokalen Abweichungen von der mittleren Garn- und Lückenbreite kommt. Bereits der optische Vergleich der vier Stützstellen in Abbildung 3.4 lässt einen Unterschied in den mechanischen Kennwerten vermuten. Dieser wird in dem folgenden Abschnitt quantifiziert.

3.3. Experimentelle Charakterisierung ausgewählter Geflechtarchitekturen

Die Geflechtarchitekturen der Stützstellen des in Kapitel 3.2. vorgestellten Konus werden im Folgenden auf ihre mechanische Leistungsfähigkeit hin untersucht. Um sowohl einen Vergleich der Leistungsfähigkeit in Faserrichtung, als auch der interlaminaeren Eigenschaften anstellen zu können, werden Zug-, Druck- und ILSS-Kennwerte vorgestellt.

Die Probekörper für alle vier Stützstellen wurden auf Rohren mit konstanten Durchmessern hergestellt.

3.3.1. Zug-Versuche

Entsprechend der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Vorgehensweise für die Erzeugung von Zugkennwerten, wurden die Prüfkörper der vier Stützstellen hergestellt. (Tabelle 3-1) Das Datenblatt der verwendeten Faser befindet sich in Anhang C.

Tabelle 3-1: Anzahl, Aufbau und Abmessungen der Probekörper

Stützstelle	Anzahl Probekörper		Lagenanzahl	Probenabmessungen [mm]		
	hergestellt	ausgewertet		Länge	Breite	Dicke
50 mm	6	6	4	190	25	3,41
70 mm	8	8	4	250	25	2,45
90 mm	8	7	5	250	30	2,79
130 mm	6	5	7	250	40	2,78

Von der dritten und vierten Versuchsreihe musste jeweils ein Prüfkörper auf Grund eines Ausreißers beziehungsweise nicht normgerechten Versagens (Versagen in der Einspannung) von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Die in Tabelle 3-1 angegebenen Werte für die Länge und Breite geben die Sollmaße an. Die Dickenwerte sind die Mittelwerte der gemessenen Probendicken.

Die Geflechtplatinen des 50 mm Rohrs verfügen nicht über die notwendige Breite, um die von der Norm verlangten 250 mm Probenlänge erzeugen zu können. Daher ist die Länge auf 190 mm verkürzt, wobei die freie Weglänge zwischen den Einspannungen 120 mm beträgt.

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits auf die sehr inhomogene Struktur des Geflechts im Bereich der vierten Stützstelle eingegangen. Um einer zu erwartenden

starken Streuung der Zugkennwerte entgegenzuwirken, beträgt die Probenbreite der mit einem 130 mm Rohr hergestellten Versuchsreihe 40 mm, anstelle der üblichen 25 mm.

Wird die Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers angetragen (Abbildung 3.6), bestätigt sich der von Birkefeld [36] vermutete Effekt. Für jeden Flechtwinkel gibt es einen Umfang, an welchem das Geflecht seine maximale Leistungsfähigkeit erreicht (Abbildung 3.2 grüne Linie). Dies ist in der vorliegenden Versuchsreihe bei einem Durchmesser von 70 mm der Fall. Augenscheinlich resultiert sowohl die engere Garnablage auf einem kleineren, als auch die Lückenbildung auf einem größeren Durchmesser in einer Abnahme der Zugfestigkeit.

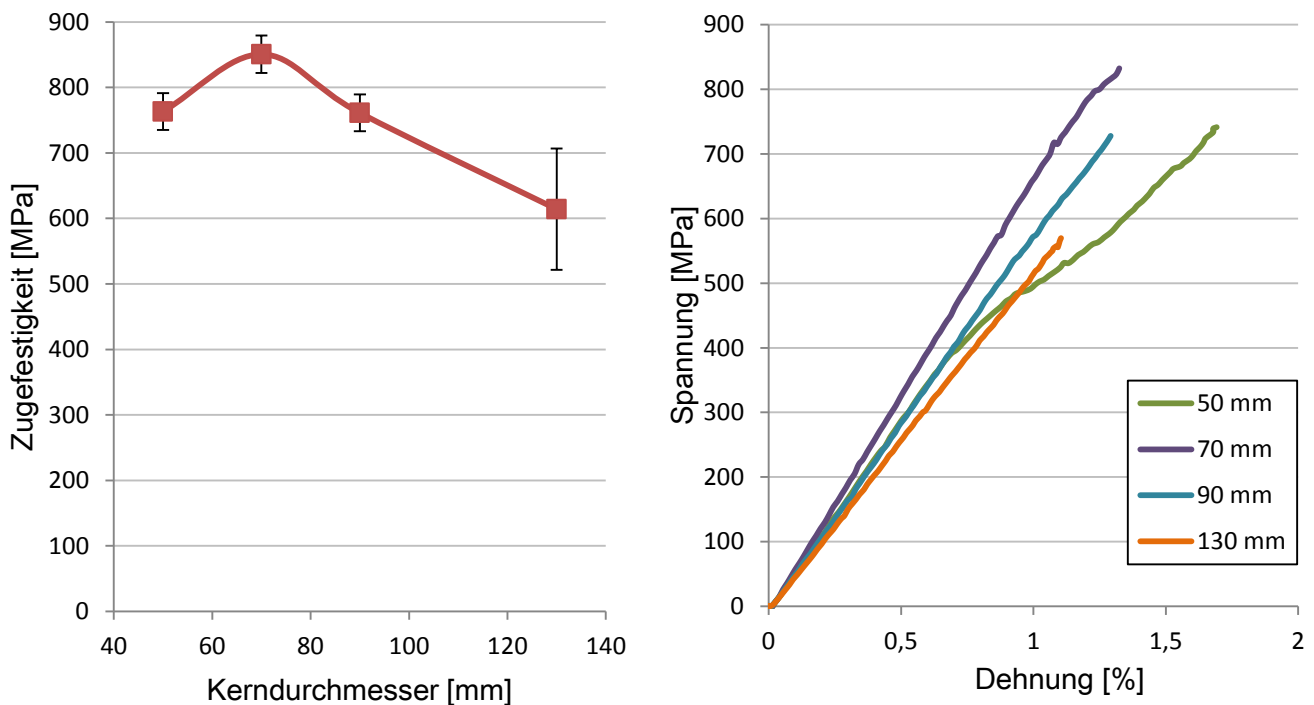


Abbildung 3.6: Links: Mittlere Zugfestigkeit mit Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$); rechts: Repräsentative Spannungs-Dehnungs-Verläufe der vier Versuchsreihen

Ausgehend von 100 % bei der Versuchsreihe des 70 mm Durchmessers, sinkt die Zugfestigkeit sowohl für die Probenreihe des 50 mm als auch für die des 90 mm Durchmessers um rund 10 %. Das Geflecht der 130 mm Probenreihe verfügt nur noch über 72 % der maximalen Zugfestigkeit. Für diese Geflechtarchitektur verfügt sowohl die Festigkeit, als auch der E-Modul über eine auffällig hohe Standardabweichung (Tabelle 3-2). Dies ist auf den inhomogenen Aufbau der Proben zurückzuführen. Auf Grund des zufälligen Garnverlaufs innerhalb einer Probe, schwankt der Faservolumengehalt.

Der in Tabelle 3-2 angegebene E-Modul ist entsprechend der Vorgabe in DIN EN ISO 527-4 zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung berechnet. Die in Abbildung 3.6

dargestellten, repräsentativen Spannungs-Dehnungs-Verläufe weisen in diesem Bereich nur geringfügige Unterschiede auf. Dies spiegelt sich auch in den gemittelten E-Moduln in Tabelle 3-2 wider. Unter Berücksichtigung der Streuung sind die Unterschiede nicht oder nur in einem sehr geringen Maße signifikant.

Tabelle 3-2: Ergebnis der Zugversuche mit unterschiedlichen Geflechtarchitekturen

Stütz- stelle	Zugfestigkeit [MPa]		E-Modul [GPa]		Bruchdehnung [%]	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
50 mm	763,3	26,8	59,7	2,8	1,68	0,09
70 mm	850,7	34,2	63,3	4,7	1,39	0,10
90 mm	761,2	30,4	55,6	2,9	1,33	0,09
130 mm	614,2	74,6	51,5	8,6	1,14	0,11

Interessant ist der Vergleich der Verläufe bei höheren Dehnungen. Die 70 mm, 90 mm und 130 mm besitzen einen nahezu linearen Anstieg und versagen bei einer ähnlichen Dehnung, allerdings mit den bereits erwähnten Unterschieden bei der Zugfestigkeit. Die Abnahme der Zugfestigkeit lässt sich auf zwei Effekte zurückführen, beide werden durch die Lücken im Geflecht verursacht: die Lücken werden im Laminat entweder von dem Harz oder von den Fasern der benachbarten Lagen geschlossen. Letzteres hat ein Ineinander legen der Geflechtlagen zur Folge und wird als *Nesting* bezeichnet. Dieser Effekt tritt bei allen textilen Halbzeugen auf Grund ihrer welligen Oberflächenbeschaffenheit auf. Lomov [40] und Chen [41] beschreiben das Nesting und dessen Auswirkungen bei der Verarbeitung von Geweben.

Das Schlibbild einer Probe der 90 mm Versuchsreihe in Abbildung 3.7 zeigt, dass die vergleichsweise kleinen Lücken dieser Probenreihe hauptsächlich mit Harz gefüllt werden, da die Fasern der benachbarten Lagen die Lücken überspannen und somit ein von den Lücken verursachtes Nesting weitestgehend verhindert wird. Vergleicht man den Verlauf der in der Schliffebene liegenden Faserrichtung mit dem der 70 mm Probe, ist zu erkennen, dass dieser nur geringfügig beeinflusst wird. Jedoch führen die Harztaschen zu einem niedrigeren Faservolumengehalt (FVG). Bei gleicher Prozessführung während der Infiltration, erreicht das Geflecht der 90 mm Probenreihe einen FVG von 52 %, wohingegen die 70 mm Versuchsreihe über 56 % verfügt. Diese Abnahme ist materialimmanent, sodass die Normierung der Festigkeit auf einen höheren FVG die Leistungsfähigkeit der untersuchten Geflechtarchitektur verzerren würde. Die in Tabelle 3-2 angegebenen Festigkeitswerte beziehen sich daher auf den tatsächlichen FVG der Proben.

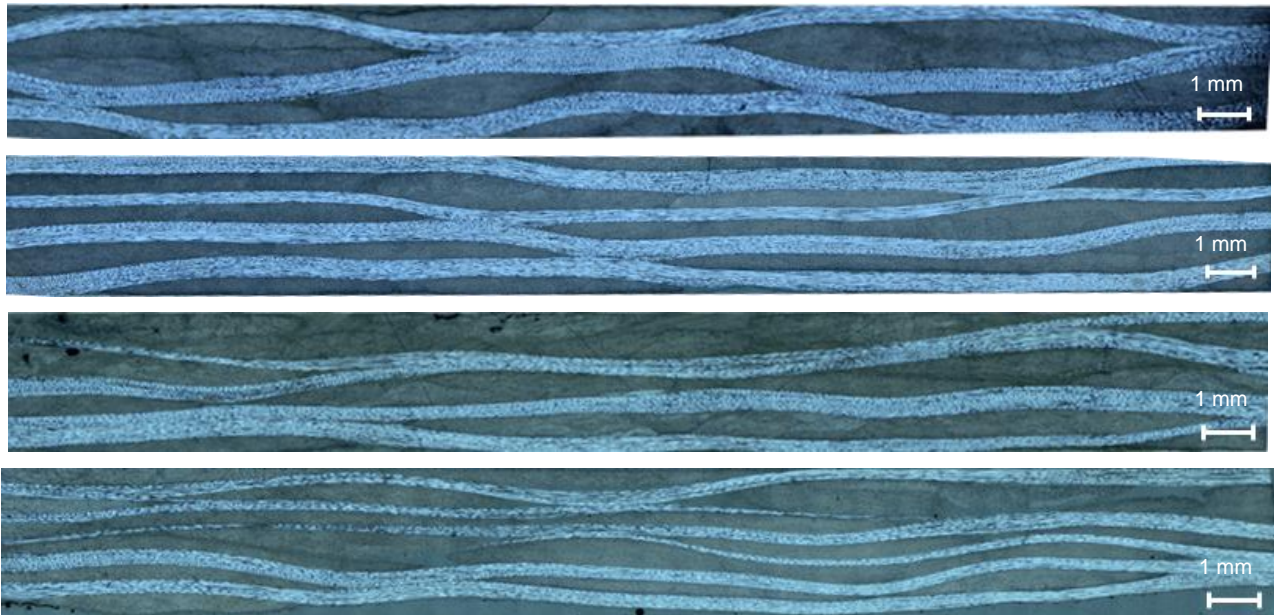


Abbildung 3.7: Schliffbilder der geprüften Geflechtarchitekturen, parallel zu einer Garnrichtung; v.o.n.u.: 50 mm, 70 mm, 90 mm, 130 mm

Bei größeren Lücken, wie sie in den Geflechtlagen der 130 mm Probenreihe vorkommen, tritt zusätzlich ein ausgeprägtes Nesting auf. Erkennbar ist dies an der stärkeren Welligkeit der Garne (Abbildung 3.7). Da die Lücken durch das Nesting teilweise von den benachbarten Geflechtlagen geschlossen werden, steigt der FVG wieder etwas an (54 %). Die geringere Festigkeit rührt sowohl von dem, im Vergleich zu den 70 mm Proben niedrigeren FVG, als auch von der, durch das Nesting eingebrachte, zusätzlichen Ondulation. Bei Faserverbundwerkstoffen wird das endgültige Versagen durch die Kumulation von makroskopischen Versagensmechanismen (Brüche, Risse, Delamination) verursacht. Die Ondulation führt bei einer Zugbelastung von gewobenen oder geflochtenen Strukturen zu einer Druckbelastung in der transversalen Faserrichtung, was die Entstehung von mikroskopischen Rissen zur Folge hat [42] [43]. Unter Mikrorissen versteht man kleine Matrixbrüche und lokale Ablösungen von Faser und Matrix. Mit steigender Belastung wachsen die Risse auf ein makroskopisches Niveau an und durchlaufen ganze Laminatlagen [44] [45].

Nishikawa [46] beobachtet die Entstehung von Rissen während der zyklischen Aufbringung einer Zugbelastung. Die Mikroskopaufnahme in Abbildung 3.8 zeigt zwei Risse, welche sich ausgehend von dem auf Druck belasteten Schussfaden (weft) zu einem Riss entlang des in Belastungsrichtung verlaufenden Kettfadens (warp) ausbilden. Je stärker die Garne onduliert sind, desto früher und intensiver tritt dieses Erstversagen auf und desto eher versagt die Probe.

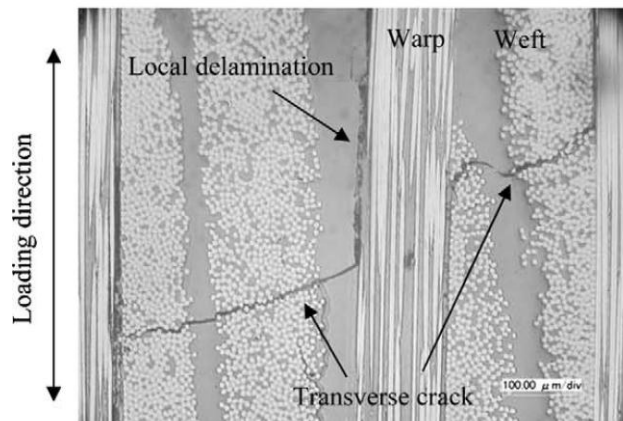


Abbildung 3.8: Von einer Zugbelastung verursachter makroskopische Riss durch die transversale Garnrichtung [46]

Der gleiche Mechanismus kann für die geringere Festigkeit der Proben des 50 mm Kerns verantwortlich gemacht werden. Wie der Vergleich der Schliiffproben der Geflechte des 50 mm und 70 mm Durchmessers in Abbildung 3.7 zeigt, wird die Garnwelligkeit in der 50 mm Probe in doppelter Hinsicht erhöht. Durch die schmalere Garnablage, rücken die Abbindungen näher aneinander, was ein häufigeres Auf und Ab des Garnverlaufs (höhere Frequenz) zur Folge hat. Des Weiteren wird durch die größere Garndicke die Amplitude der Auslenkung größer. Da bei dieser Geflechtarchitektur jedoch keine zusätzlichen Lücken entstehen, ist der FVG wie bei der 70 mm Versuchsreihe bei 56 %.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Proben der Kerns mit einem Durchmesser von 50 mm weisen im Vergleich zu den übrigen Versuchsreihen einen in zweierlei Hinsicht bemerkenswerten Verlauf auf (Abbildung 3.6 zeigt einen repräsentativen Verlauf). Zum einen knickt der Graph bei rund 450 MPa ein, um, zum anderen ab 600 MPa bis zum Versagen wieder einen steileren Verlauf anzunehmen. Durch diesen vorübergehenden Steifigkeitsverlust erreichen die Proben eine vergleichsweise hohe Bruchdehnung (Tabelle 3-2). Ehrenstein [47] bezeichnet diesen charakteristischen Verlauf als *Knie*. Dieser wird durch die Risse in der transversalen Faserrichtung verursacht. In den Bruchbildern in Abbildung 3.9 manifestiert sich die ausgeprägte Rissbildung durch die starken Delaminationen bei der 50 mm Probe. Die drei Versuchsreihen mit den linearen Anstiegen (70 mm, 90 mm, 130 mm) besitzen einen eindeutig definierbaren Versagensbereich, mit lokaler Delamination. Bei den Probekörpern der 50 mm Versuchsreihe kann kein durchgängiger Riss quer zur Belastungsrichtung identifiziert werden. Stattdessen findet eine ausgeprägte Delamination über nahezu die gesamte Probenlänge statt. Der Beginn dieser Delaminationen setzt während der Versuche hörbar im Bereich des Steifigkeitsverlusts ein. Durch das großflächige Trennen der Lagen, können sich die ondulierten, unter Zug belasteten Fasern ausrichten und zusätzliche Last aufnehmen. Nach dem Ausrichten nimmt die Steifigkeit wieder zu. Die erhöhte Bruchdehnung wird somit durch ein „Glattziehen“

der Fasern erzeugt. Dieser Effekt tritt bei den ebenfalls stark ondulierten Fasern der 130 mm Proben nicht auf. Dies ist vermutlich auf das bereits erwähnte, stark ausgeprägte Nesting innerhalb der Lücken zurückzuführen. Da die Lagen teilweise ineinander liegen, können sich die Delaminationsrisse wesentlich schlechter ausbreiten. Das flächige Loslösen der Lagen voneinander ist somit nicht möglich.

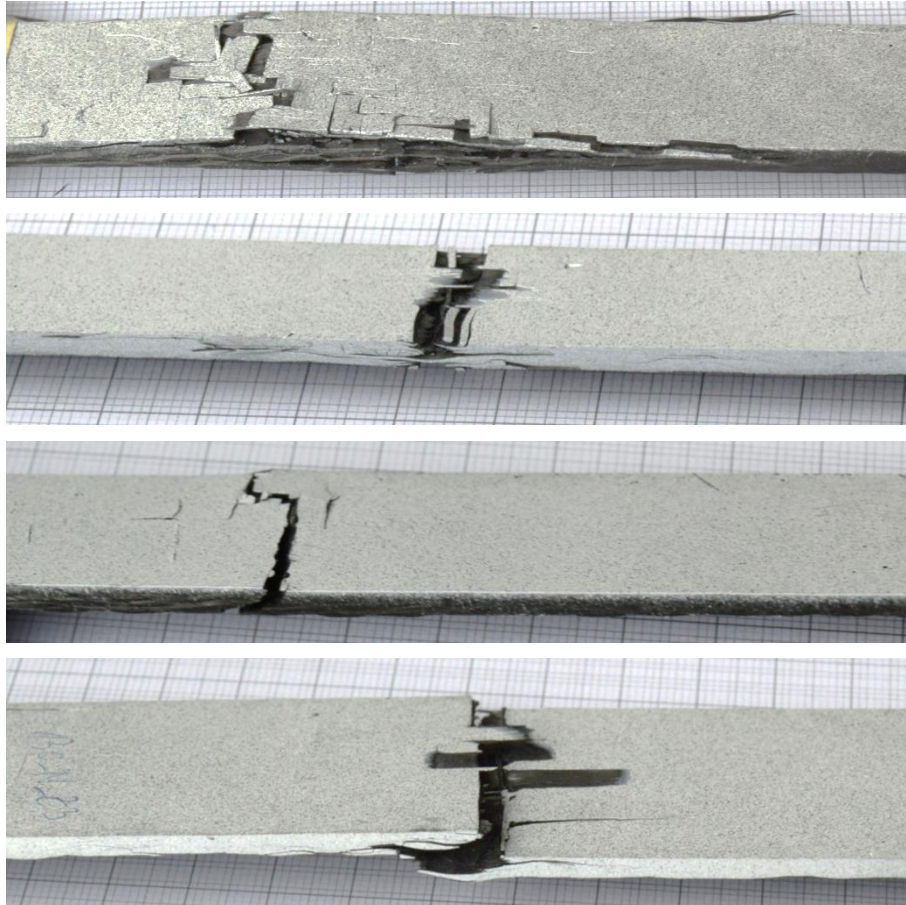


Abbildung 3.9: Typische Bruchbilder der Probenreihen 50 mm, 70 mm, 90 mm, 130 mm (v.o.n.u)

Dieser eingeschränkten Leistungsfähigkeit in Faserrichtung wird bei der Bauteilauslegung mittels Gestaltungsrichtlinien Rechnung getragen. Für das vorgestellte Geflecht lässt sich ein Durchmesserbereich von $70 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ ausmachen, in welchem die Zugfestigkeit mindestens $95 \%¹$ des Maximalwerts beträgt. Der Durchmesser und somit auch der Umfang dürfen sich in diesem Fall um maximal $\pm 14 \%$ ändern. Diese prozessbedingte Einschränkung kann durch eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik, welche die nachteiligen Geflechtarchitekturen verhindert, aufgehoben werden.

¹ Wie groß dieser Bereich gewählt wird, hängt von der Anwendung und der Auslegungsphilosophie ab. Sind auch größere Einbußen in der Festigkeit hinnehmbar, lässt sich der Bereich entsprechend vergrößern.

3.3.2. Druck-Versuche

Mit der Untersuchung des Laminatverhaltens unter einer Druckbelastung werden die Geflechtarchitekturen in Ergänzung zu den Zug-Versuchen hinsichtlich ihrer Eigenschaften in Faserrichtung untersucht. Die Herstellung der Prüfplatten entspricht der Vorgehensweise bei den Zug-Versuchen, die Dimensionierung und Vorbereitung der einzelnen Prüfkörper findet gemäß Abschnitt 2.2.2.3 statt. Eine Übersicht über die Anzahl, Aufbau und Dimensionierung liefert Tabelle 3-3. Das Datenblatt der verwendeten Faser befindet sich in Anhang D.

Tabelle 3-3: Anzahl, Aufbau und Abmessungen der Probekörper

Stütz- stelle	Anzahl Probekörper		Lagenanzahl	Probenabmessungen [mm]		
	hergestellt	ausgewertet		Länge	Breite	Dicke
50 mm	7	7	4	140	15	3,09
70 mm	7	5	4	140	25	2,38
90 mm	7	6	5	140	25	2,6
130 mm	6	6	7	140	25	2,76

Nicht ausgewertete Probekörper blieben auf Grund eines nicht normgerechten Versagens (beispielsweise Versagen in der Einspannung) unberücksichtigt.

Um einen größeren und somit repräsentativeren Bereich des Geflechts abprüfen zu können, beträgt die Probenbreite für die 70 mm, 90 mm und 130 mm Versuchsreihen 25 mm.

Analog zu der Darstellung der Ergebnisse der Zugversuche, ist in dem linken Diagramm von Abbildung 3.10 die Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Kerndurchmessers angetragen. Die Faservolumengehalte entsprechen denen der Zugproben. Die Kennwerte sind aus den bei der Auswertung der Zugversuche diskutierten Gründen nicht auf das FVG normiert. Verglichen mit dem Verlauf der Zugfestigkeit (siehe Abbildung 3.6) ergeben sich zwei Unterschiede. Zum einen scheint der unterschiedliche Ondulationsgrad der 50 mm und 70 mm Versuchsreihe keinen Einfluss auf die Festigkeit zu haben. Zum anderen steigt die Druckfestigkeit der 130 mm Reihe im Vergleich zu den Proben der 90 mm Stützstelle.

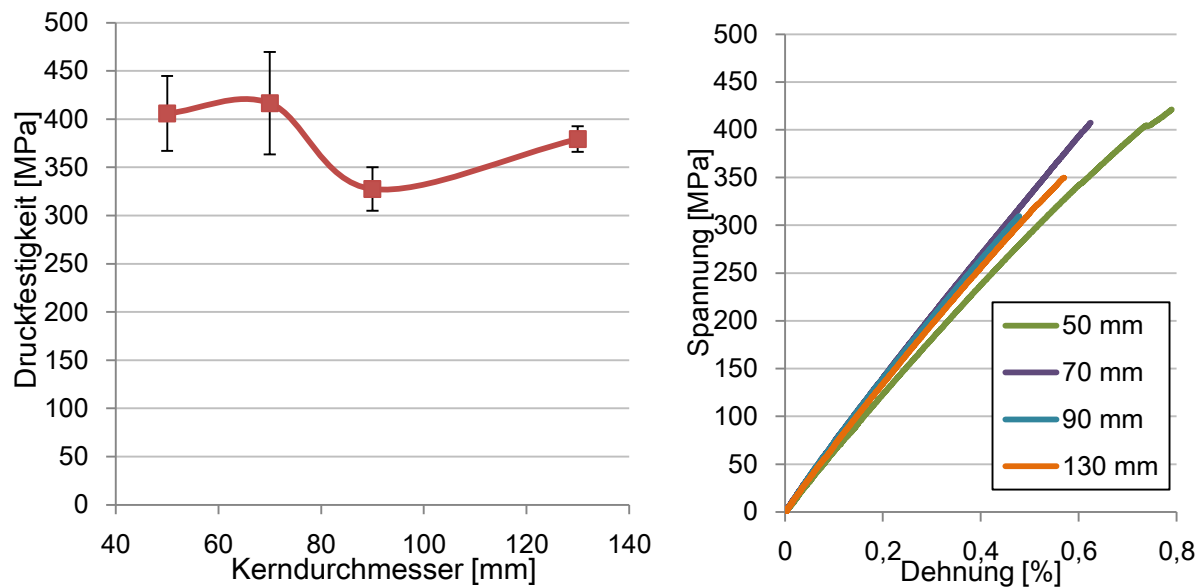


Abbildung 3.10: Links: Mittlere Druckfestigkeit mit Konfidenzintervall ($\alpha=0,05$); rechts: Repräsentative Spannungs-Dehnungs-Verläufe der vier Versuchsreihen

Der Unterschied in der Garnwelligkeit der 50 mm und 70 mm Probenreihen hat zwar einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit, nicht aber auf die Druckfestigkeit. Die Erkenntnisse von Adams [48] [49] liefern dazu einen Erklärungsansatz. Durch die kontrollierte Einbringung verschieden stark ausgeprägter Ondulationen in Druckproben stellt Adams einen Zusammenhang zwischen der Stärke der Ondulation und der Verringerung der Druckfestigkeit her. Dabei stellt Adams fest, dass bis zu einem Welligkeitsfaktor² von $f_w = 0,33$ ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Welligkeit und der Druckfestigkeit besteht. Wird die Welligkeit über diesen Wert hinaus weiter erhöht, tritt keine nennenswerte Reduktion der Festigkeit mehr auf, sie stagniert bei rund 65 % der Festigkeit des ondulationsfreien Materials. Ab einer gewissen Ausprägung verschwindet offenbar der Einfluss der Ondulation auf die Druckfestigkeit. Andere Effekte, wie die Fasermatrixanbindung - die Druckfestigkeit wird stark von der Matrix dominiert [47] - bestimmen nun den Versagenszeitpunkt. Die beiden Probenreihen 50 mm und 70 mm befinden sich anscheinend in diesem Ondulationsbereich; die Stärke der Welligkeit hat auf die Druckfestigkeit keinen Einfluss mehr.

Die Abnahme der Festigkeit zwischen dem 70 mm und dem 90 mm Umfang ist hauptsächlich auf den niedrigeren Faservolumengehalt der 90 mm Probenreihe zurückzuführen. Wie bei den Zugversuchen besteht ein linearer Zusammenhang zwischen FVG und der Druckfestigkeit [47]. Da der FVG der 130 mm Probenreihe ansteigt, steigt auch die Druckfestigkeit wieder an. Hinzu kommt, dass der Abstand

² Gibt an wieviel Prozent der in Belastungsrichtung liegenden Fasern bei der Probenvorbereitung onduliert wurden. Beispiel: $f_w = 0,33$ bedeutet 33 % der 0°-Fasern wurden onduliert.

zwischen den Kreuzungspunkten der gegenläufigen Garne auf Grund des größeren Kernumfangs ansteigt. Auf dem 130 mm Kerndurchmesser beträgt der Abstand zwischen zwei Kreuzungspunkten rund 18 mm. Die von der Norm vorgegebene freie Weglänge der Druckprobe umfasst nur 12 mm. Daher erfährt ein Teil der Garne innerhalb des zu prüfenden Bereichs keine Abbindung. Somit ist die Ondulation im belasteten Abschnitt der Probe vergleichsweise gering. Der Versuchsaufbau führt dazu, dass Geflechte von einem großen Kern tendenziell zu positiv bewertet werden.

Die vier ausgewählten Spannungs-Dehnungs-Verläufe im rechten Teil der Abbildung 3.10 unterscheiden sich nur durch ihren Maximalwert. Der E-Modul und das Verhalten bis zum Versagen sind bei allen vier Geflechtarchitekturen im Rahmen der statistischen Signifikanz gleich.

Aus dem Kurvenverlauf der Druckfestigkeit kann analog zu den Zugversuchen ein Prozessfenster definiert werden. Wird erneut das Kriterium angewendet, dass überall innerhalb des Prozessfensters mindestens 95 % der maximalen Druckfestigkeit erreicht werden muss, ergibt sich eine Durchmesserspanne von 50 mm bis rund 80 mm. Somit kann ein Bauteil, welches nach der Druckfestigkeit ausgelegt wird, über Umfangsänderungen im Bereich von maximal $\pm 23\%$ verfügen³.

³ Diese Aussage gilt für das betrachtete Garn und einen Flechtwinkel von $\pm 45^\circ$.

3.3.3. Dreipunktbiegeversuche zur Bestimmung der ILSS

In Abschnitt 2.2.2 ist die Vorgehensweise für die Herstellung der Proben für die Dreipunktbiegeversuche beschrieben. Die Proben wurden aus der gleichen Platte wie die Zugproben entnommen, sodass die Probendicke der in Tabelle 3-1 aufgeführten Dicke der Zugproben entspricht. Die Länge und Breite der Probe ist entsprechend der in Abbildung 2.12 dargestellten Verhältnisse gewählt.

Der Verlauf des Graphen in Abbildung 3.11 weist für steigende Durchmesser einen monoton fallenden Verlauf der Scherfestigkeit auf. Dieses Verhalten darf im Anbetracht des Konfidenzintervalls⁴ allerdings nur als schwache Tendenz verstanden werden.

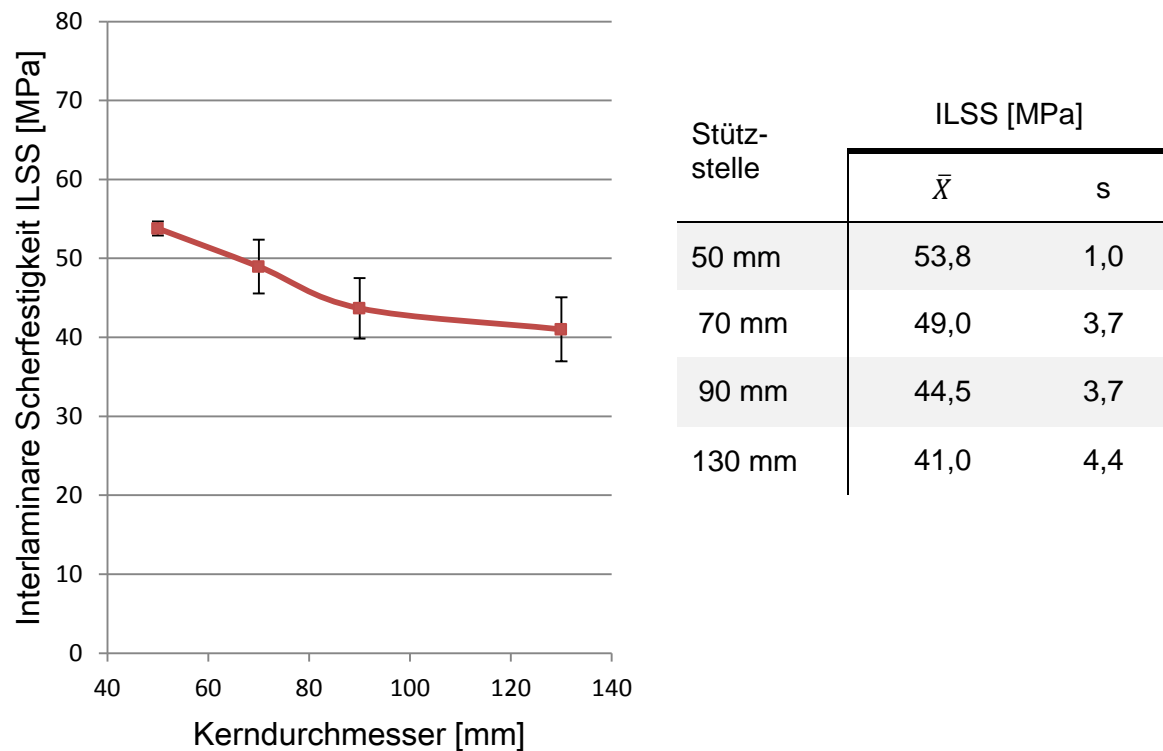


Abbildung 3.11: Mittlere scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in Abhängigkeit des Kerndurchmessers, links mit Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$) und rechts mit Standardabweichung

In [22] werden die ILSS Werte auf den Einfluss der durch unterschiedliche Abbin-dungen hervorgerufenen Ondulation hin verglichen. Es wird ein ähnlicher Effekt, wie bei dem Vergleich der Werte der 50 mm und 70 mm Proben identifiziert: die Verstärkung der Ondulation in den 50 mm Proben hat nur einen sehr geringen, statistisch kaum nachweisbaren Einfluss auf die interlaminare Scherfestigkeit. Tendenziell be-

⁴ Bedingt durch die begrenzte Probenanzahl: pro Stützstelle acht

deutet jedoch eine stärkere Ondulation, eine bessere Verzahnung der Lagen untereinander und somit einen höheren interlaminaren Zusammenhalt.

Obwohl die Ondulation in den Proben der 90 mm und 130 mm Versuchsreihe wieder zunimmt, sinkt die interlaminare Scherfestigkeit weiter. Dies ist auf die Harztaschen zurückzuführen. Bei der Untersuchung von vernähten Laminaten wurde in [50] beobachtet, dass das Erstversagen häufig in Bereich größerer Harzansammlungen eintritt. Folglich nimmt die Wahrscheinlichkeit für ein frühes Erstversagen mit zunehmender Lückengröße im Geflecht zu.

Von den ermittelten ILSS Werten kann nur begrenzt auf andere interlaminare Kennwerte, wie die Schadenstoleranz oder die Energiefreisetzungsrates bei einem fortschreitenden Riss, geschlossen werden. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die Veränderungen in den betrachteten Geflechtarchitekturen zu gering sind, um die interlaminaren Kennwerte nennenswert zu beeinflussen.

3.4. Zusammenfassung und Definition der Aufgabenstellung für die Prozessentwicklung

Die vorgestellten Ergebnisse der Zug- und Druckversuche zeigen, dass Gestaltungsrichtlinien, welche eine maximale Umfangsvaariation bei Flechtbauteilen vorschreiben, dringend notwendig sind. Dies gilt jedoch nur solange die Umfangsänderung mit der Entstehung von ungünstigen Geflechtarchitekturen einhergeht. Es müssen also Methoden entwickelt werden, welche negative Geflechtmerkmale, wie Lücken und starke Ondulation, auch bei großen Umfangsänderungen verhindern.

Aus Formel (2.1) lassen sich drei Stellgrößen ableiten, mit welchen das Geflecht auf den zu umflechtenden Umfang eingestellt werden kann:

- Garnbreite b_G
- Garnanzahl n
- Flechtwinkel θ

Der einzige Parameter, der sich mit derzeitiger Flechtanlagentechnik während des Prozesses variieren lässt, ist der Flechtwinkel. Die negativen Folgen einer Winkelveränderung zu Gunsten der Bedeckungsgradanpassung wurden bereits bei der Vorstellung des Prozessfensters in Kapitel 3.1 diskutiert. Somit bleiben die Variation der **Garnbreite** und der Garn- oder **Fadenanzahl** (Nomenklatur gemäß Abschnitt 2.1.2) als mögliche Stellgrößen übrig. Die folgenden beiden Kapitel beschäftigen sich mit der Erarbeitung, Umsetzung und Bewertung von Konzepten, mit welchen die Variation von mindestens einem dieser beiden Parametern ermöglicht wird. Wichtigste Anforderung ist dabei die vollständige Prozessintegration. Es darf nicht zu einer Einschränkung der Produktivität des Flechtprozesses kommen.

4. Anpassung der Garnbreite

Grundsätzlich muss die Breite so angepasst werden, dass die in Kapitel 3.3 als nachteilig identifizierten Geflechtarchitekturen vermieden werden. Dies betrifft zum einen die enge, stark ondulierte Architektur auf einem kleinen und zum anderen die Lückenbildung auf einem großen Umfang.

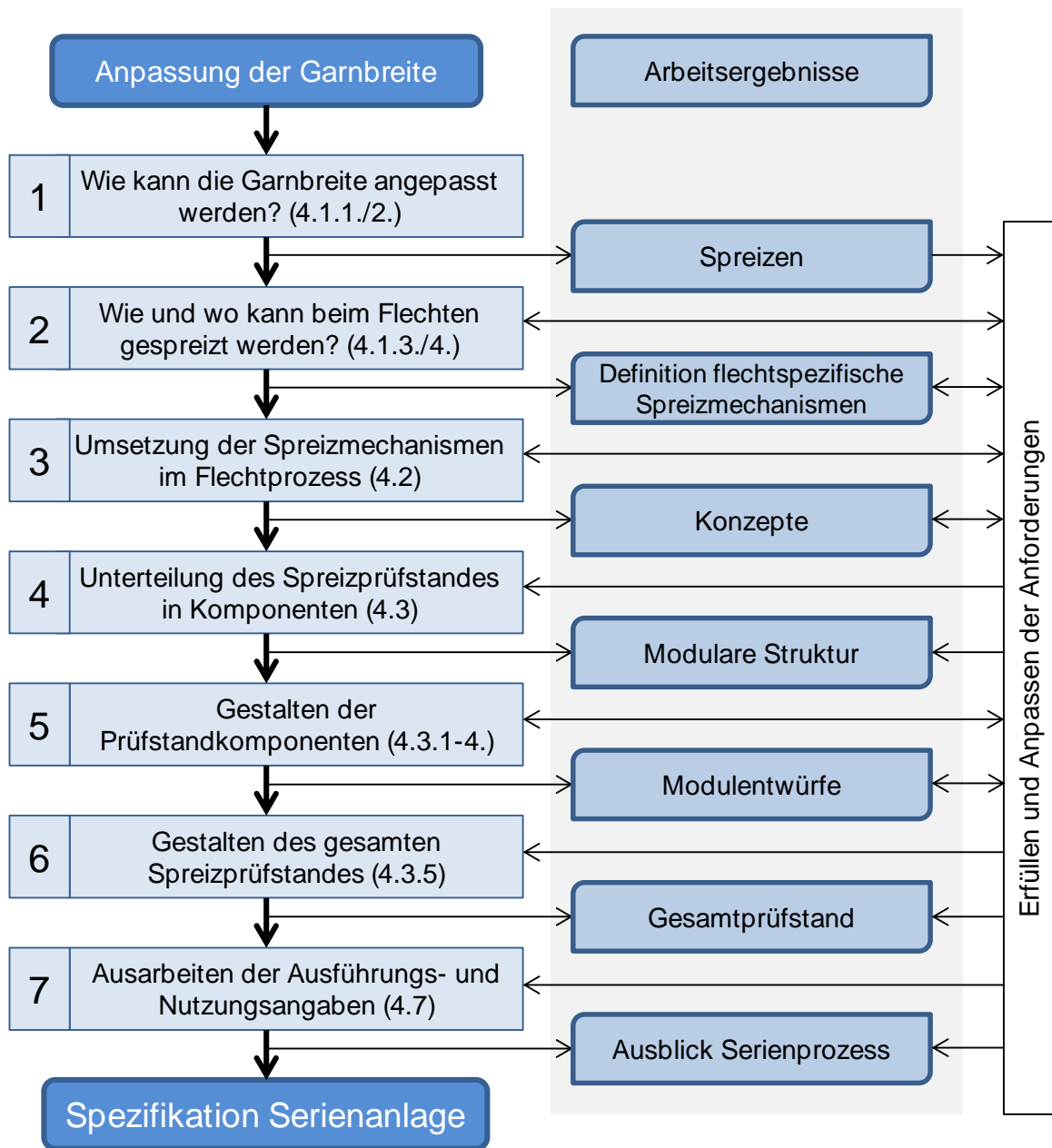
Die durch die enge Garnablage provozierte Ondulation auf kleinen Umfängen lässt sich nicht vermeiden. Um die Ursache für die Beeinträchtigung der Kennwerte zu beheben, müsste die Breite erhöht werden. Dies würde jedoch dem eigentlichen Ziel, dem Beflechten eines kleinen Umfangs, entgegenwirken. Als Untergrenze muss daher ein Umfang definiert werden, für den die mechanischen Einbußen hinnehmbar sind.

Der Lückenbildung auf großen Umfängen kann durch das Spreizen der Garne entgegengewirkt werden. Die natürliche Breitenvariation eines Garns unterliegt gewissen Grenzen. Diese können allerdings durch geeignete Maßnahmen erweitert werden. Folglich ist das Ziel der Anpassung der Ablagebreite die Schließung der Lücken im Geflecht.

Die Arbeitsschritte für die Entwicklung eines solchen Spreizprozesses sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Strukturierung entspricht der in Kapitel 2.3 vorgestellten VDI-Richtlinie. Jedem Schritt ist eine Fragestellung oder Aufgabe mit Kapitelverweis zugeordnet. Die Arbeitsergebnisse sind die erarbeiteten Lösungen, welche in den entsprechenden Kapiteln vorgestellt werden.

Die Richtung der Pfeile zwischen den Arbeitsschritten/-ergebnissen und den Anforderungen geben an, ob neue Anforderungen hinzukommen (Pfeil nach rechts) und/oder Anforderungen aus vorherigen Arbeitsschritten berücksichtigt werden müssen (Pfeil nach links). Die Liste der Anforderungen wird somit während des Durchlaufens der Arbeitsschritte zunehmend konkreter.

Nach Schritt sechs, der Ausarbeitung des Gesamtentwurfs, findet die Umsetzung im Rahmen einer Versuchsanlage statt. An dieser wird der entwickelte Prozess charakterisiert und abschließend bezüglich der Erfüllung der Zielsetzung bewertet.

Abbildung 4.1: Struktur für das Vorgehen zur Prozessentwicklung *Anpassung der Garnbreite*

4.1. Der Spreizprozess: Bestandsaufnahme und Übertragung auf den Flechtprozess

In diesem Kapitel wird die Vorarbeit für die in Kapitel 4.2 stattfindende Entwicklung der prinzipiellen Lösungen geleistet. Neben der Präzisierung der Aufgabenstellung muss ein Wissensstand generiert werden (mittels Recherche, Brainstorming usw.; siehe 2.3.2), mit welchem ein möglichst breites Lösungsfeld erzeugt werden kann. Nach einer klaren Definition der Aufgabenstellung, liefert ein Überblick zum Stand der Technik eine Zusammenfassung der Rechercheergebnisse.

Das Spreizen von einzelnen Garnen für die Herstellung von Faserverbundbauteilen ist bereits ein etablierter Prozess. Die Erkenntnisse über diesen Prozess dienen als Ausgangslage für die Suche nach Lösungsprinzipien für flechtspezifischen Spreizmethoden. Nach der Bestandsaufnahme folgt eine Analyse der Fertigungskette von geflochtenen Vorformlingen, um Möglichkeiten für einen stabilen und effizienten Einsatz des Spreizprozesses identifizieren zu können.

4.1.1. Aufgabenstellung und Prozessanforderung

Von den beiden ungünstigen Geflechtarchitekturen des in Kapitel 3.2 vorgestellten Konus (zu enge und wellige Garnablage auf zu kleinen Umfängen und lückenhafte Ablage auf zu großen Umfängen), lässt sich nur die Lückenbildung vermeiden. Durch das Spreizen der Garne bis zu vollständigen Schließung der Lücken, wird die Ursache für die Abnahme der mechanischen Kennwerte beseitigt. Anzumerken ist, dass die Lückengröße bei einem Bauteil mit kontinuierlicher Umfangsänderung ebenfalls variiert. Das heißt, der Spreizprozess muss eine auf den zu beflechtenden Umfang angepasste Garnbreite bereitstellen. Aus dieser Aufgabenstellung ergibt sich die erste Festforderung⁵: die Spreizbreite muss variabel einstellbar sein. Erst mit der Erfüllung einer variablen Spreizbreite kann der Konus auch für Umfänge größer als $\pi \cdot 70$ mm lückenlos beflechtet werden.

⁵ Nach VDI 2225 [30]: Anforderungen, welche unter allen Umständen erfüllt werden müssen.

4.1.2. Stand der Technik – Wirkzusammenhänge beim Spreizen

Das Spreizen von Garnen geschieht üblicherweise in einem der eigentlichen Vorformlingherstellung vorgelagerten Schritt. Um das Spreizergebnis während der anschließenden Verarbeitung beizubehalten, muss das Garn fixiert werden. Somit lässt sich die Herstellung eines gespreizten Garns in zwei Schritte unterteilen: das Spreizen und das Fixieren.

Meyer [51] liefert einen Überblick über zahlreiche Patente, welche das Ziel des Garnspreizens verfolgen. Grundsätzlich wird eine Kraft benötigt, welche die Filamente auseinander treibt. Diese Kraft kann entweder pneumatisch, durch einen Luftstrom oder mechanisch, durch eine Umlenkung des Garns, eingebracht werden.

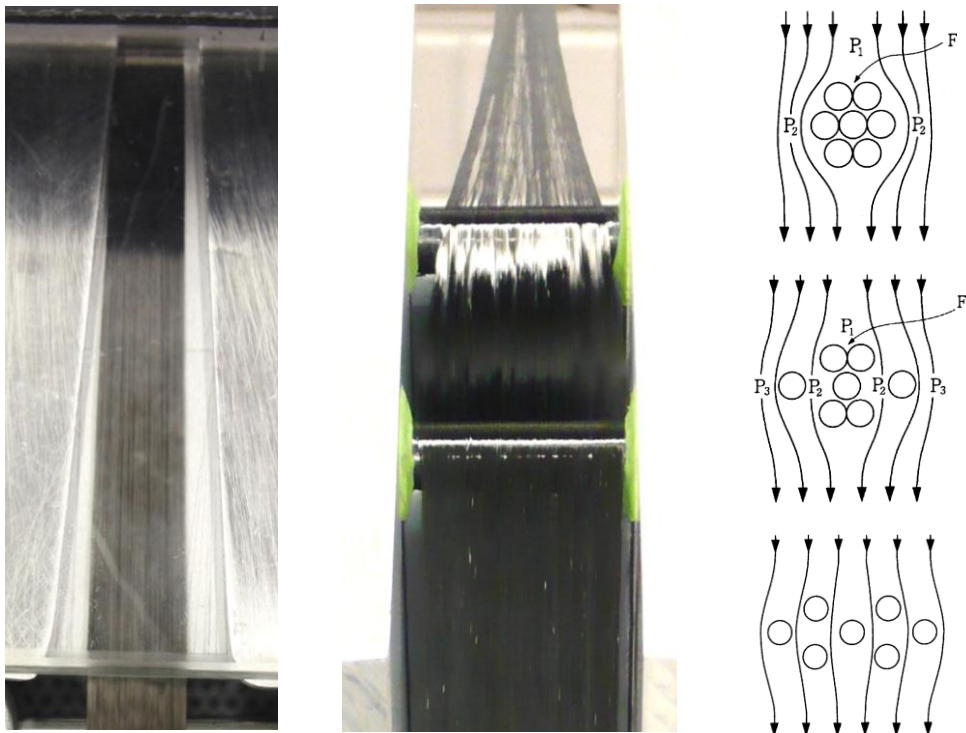


Abbildung 4.2: Pneumatisches Spreizen mit Luftströmung parallel (links) [9] und senkrecht zur Garnrichtung (Mitte) [10]; Verschiebung der Filamente während des pneumatischen Spreizens mit einem senkrechten Luftstrom (rechts) [11]

Abbildung 4.2 zeigt zwei Möglichkeiten für die Umsetzung des pneumatischen Spreizens: mit einem Luftkanal, welcher parallel zur Garnrichtung durchströmt wird (links) [52] und einer Vakuumkammer, welche für eine Strömung senkrecht zur Garnoberfläche sorgt (Mitte). [53] Im rechten Teil von Abbildung 4.2 ist die Luftströmung und die Bewegung der Filamente während des Spreizens mit einer senkrechten Anströmung des Garns in drei Schritten dargestellt.

Die strömende Luft wird mit Hilfe der Bernoulli Gleichung beschrieben:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konst.} \quad (4.1)$$

In Bereichen mit einer hohen Filamentdichte verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit der Luft (v), was einen Anstieg der statischen Drucks (p) zur Folge hat. Für die in Abbildung 4.2 rechts in der obersten Skizze abgebildeten Drücke gilt somit $p_1 > p_2$. Die Druckdifferenz sorgt für das Auseinandertreiben der Filamente [54]. Bei einer parallelen Anströmung des Garns, treten auf ähnliche Weise Druckdifferenzen auf und spreizen somit das Garn. Zudem wird durch eine divergente Kanalgeometrie die Entstehung von Wirbeln vermieden [55].

Das mechanische Spreizen wird durch die Umlenkung um einen oder mehrere Radien bewerkstelligt (Abbildung 4.3 links) [56].

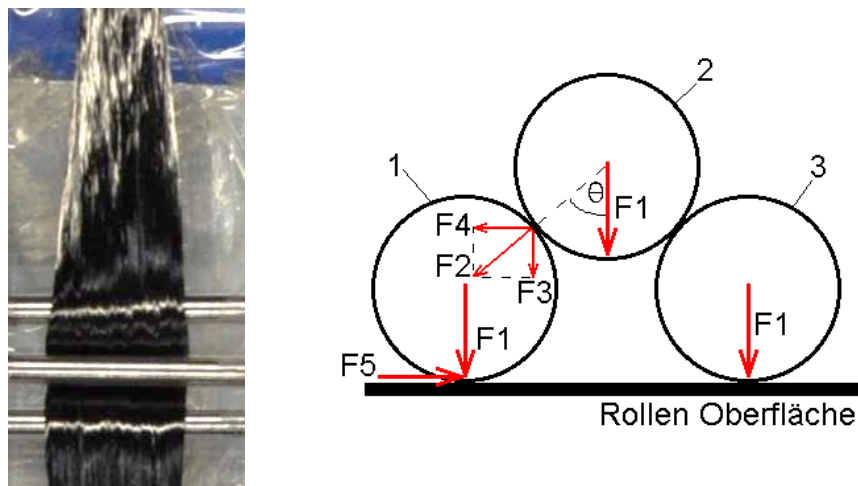


Abbildung 4.3: Links: Mechanisches Spreizen an drei Bolzen; rechts: Kräfte zwischen den Filamenten während des mechanischen Spreizens [13]

Ursächlich für das Spreizen ist die Einbringung der Kraft F_1 . Über die Kontaktflächen zwischen den Filamenten 2 und 1 beziehungsweise 3 ergibt sich eine Kraftkomponente F_4 , welche ein Auseinandertreiben der Filamente bewirkt. Diese muss groß genug sein, um die ihr entgegenwirkende Reibung F_5 zu überwinden [57].

Die Kraft F_1 wird durch den Längenunterschied bei der Umlenkung um einen Radius (beispielsweise eine Rolle) erzeugt. Je weiter ein Filament von der Rollenoberfläche entfernt ist, desto größer die Dehnung und somit die Spannung im Filament. Dies hat die Kraft F_1 zur Folge. Das Spreizergebnis hängt somit hauptsächlich von dem Verhältnis von F_1 zu F_5 ab. F_5 muss durch eine geeignete Oberfläche minimiert werden und F_1 muss durch einen möglichst großen Umschlingungswinkel und eine hohe Fadenzugkraft maximiert werden. Da die Filamente ab einem gewissen Kraftniveau geschädigt werden, ist dem mechanischen Spreizen eine Grenze auferlegt [57]. Daher wird eine Kombination mit dem pneumatischen Spreizverfahren empfohlen. In [57] wird eine Anordnung vorgestellt, welche ein optimiertes Spreizergebnis liefert

(Abbildung 4.4): zuerst wird das Garn (13) mit feststehenden Rollen mechanisch (R) und anschließend mit einer Vakuumkammer pneumatisch (P) gespreizt.

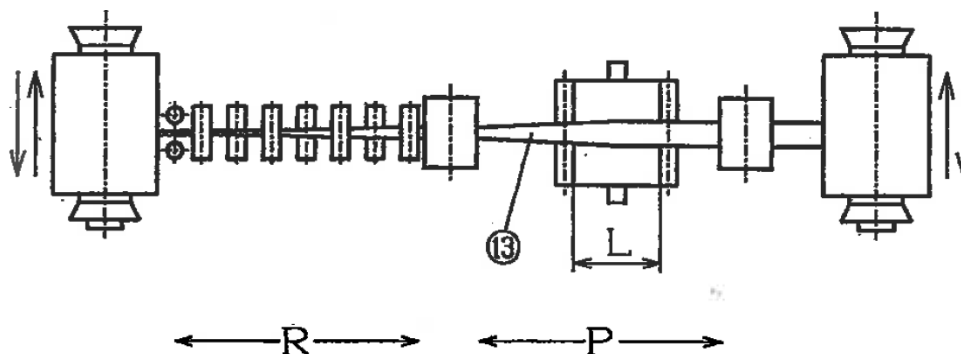


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung eines kombinierten Spreizstandes [57]

Unabhängig von dem gewählten Spreizverfahren müssen drei Voraussetzungen gegeben sein:

1. Gelockerte Schlichte⁶ (starke Verklebung der Filamente durch die Schlichte muss gelöst werden)
2. Keine Verdrehung im Garn
3. Zeitlich konstante Garnkraft [51]

Ist eine der drei Faktoren nicht gegeben, leidet die Spreizbarkeit des Garns erheblich.

Bereits sehr geringe Querkräfte (Kräfte parallel zur Garnbreite) führen zu einem erneuten Einschnüren des gespreizten Garns. Da solche Kräfte in der Weiterverarbeitung meist unumgänglich sind, muss eine Fixierung stattfinden. Für gewöhnlich wird dies über die Auftragung eines sogenannten Binders bewerkstelligt. Dabei wird ein Duroplast oder Thermoplast entweder als Pulver oder als Vlies auf das Garn gebracht und aufgeschmolzen. Nach dem Erstarren des Binders sind die Filamente in ihrer Position fixiert und können weitaus größeren Querkräften standhalten.

Die Verarbeitung von gespreizten und binderstabilisierten Garnenbändchen im Flechtprozess ist bereits Stand der Technik und wird beispielsweise in [58] vorgestellt. Dieser Ansatz verschafft jedoch keine Abhilfe bei der Bewältigung von Umfangsv Variationen. Das Garn ist auf genau eine Breite gespreizt und fixiert, was bereits bei geringen Umfangsänderungen zu Lücken oder Überlappungen der Bändchen führt. Ein gleichmäßiges Zusammenschieben eines bebinderten Garns ist nicht möglich, stattdessen findet ein Einklappen oder Verdrillen des Bändchens statt. Dies führt wiederum zu einer negativen Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften. Um Umfangsänderungen berücksichtigen zu können, müsste das Garn mit an-

⁶ Um die Fasern während der weiteren Verarbeitung zu schützen und die Matrixanhaftung zu verbessern, werden diese bei der Herstellung mit einem Polymer, der sogenannten Schlichte, überzogen (0,5 % - 2 %). [19]

gepasster Breite vorkonfektioniert werden. Dies lässt sich praktisch jedoch nicht umsetzen, da sich auf Grund manueller Eingriffe nicht vorhersehen lässt, an welcher Stelle des Kerns ein bestimmter Punkt des Fadens auftritt.

4.1.3. Möglichkeiten für das Garnspreizen im Flechtprozess

Die Forderung nach einer variablen Spreizbreite lässt sich, wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, mit dem Einsatz eines vorgespreizten Garnbändchens nicht erfüllen. Folglich muss das Spreizen während des Flechtprozesses stattfinden. Nur so kann gewährleistet werden, dass die passende Garnbreite für den jeweilig zu bedeckenden Umfang bereitgestellt wird. In den folgenden Überlegungen wird der gesamte Verlauf eines Fadens im Flechtprozess betrachtet, um Positionen zu identifizieren, an welchen ein prozessintegriertes Spreizen (pneumatisch und/oder mechanisch) durchgeführt werden kann. Hierfür wird der Flechtprozess in drei Bereiche unterteilt:

Bereich 1: **Klöppel** – Die Fäden sind auf Spulen bevorratet, von welchen sie über mehrere Umlenkungen im Klöppel abgezogen werden.

Bereich 2: **Flechtring/-kegel** – Dieser Bereich umfasst den Verlauf des Fadens vom Verlassen des Klöppels, bis hin zur Ablage auf dem Kern. Dabei werden sie am Flechtring in Richtung des Kernabzugs umgelenkt.

Bereich 3: **Auf dem Kern** – Erst nach der Ablage auf dem Kern erfahren die Fäden keine Bewegung mehr und befinden sich in einem stationären Zustand, welcher durch die Reibung zwischen den sich kreuzenden Garnsystemen und der Oberfläche des Kerns beschrieben wird.

Im Folgenden wird untersucht, in wie weit sich die drei Bereiche für die Integration einer Spreizeinheit eignen. Die beschriebenen Vorversuche und Überlegungen dienen als Grundlage für die in Kapitel 4.2 zu entwickelnden Lösungsprinzipien.

4.1.3.1. Spreizen am Klöppel

Der Grundgedanke des Spreizens am Klöppel ist es, das Garn auf die maximal benötigte Breite zu spreizen. Ist der Umfang geringer, sodass nur eine kleinere Breite benötigt wird, werden die Fäden auf Grund der Kompaktierung am Flechtunkt automatisch zusammengeschoben.

Das Spreizen am Klöppel ist nur auf mechanische Weise denkbar. Jeden der sich bewegenden Klöppel mit einem konstanten Luftstrom zu versorgen und mit einer Vakuumkammer auszustatten, ist bei dem begrenzten Bauraum derzeitiger Flechtanlagen nicht denkbar. Im Gegensatz dazu lässt sich ein mechanisches Spreizmodul ohne Weiteres umsetzen. In einem einfachen Vorversuch wird der Faden durch ein am

Klöppelaustritt angebrachtes Spreizmodul geführt, in welchem eine Umlenkung um drei Bolzen stattfindet (Funktionsweise ähnlich Abbildung 4.3 links). Mit diesem Aufbau verlässt der Faden den Klöppel mit einer deutlich gesteigerten Breite. Über den Durchmesser, die Anordnung und Anzahl der Bolzen ließe sich die erzielte Breite vermutlich weiter optimieren, allerdings fällt bereits bei dem ersten Versuch auf, dass die am Klöppel gewonnene Garnbreite auf dem Kern nicht mehr messbar ist.

Generell lässt sich bei einem Vergleich der Breite eines Fadens direkt am Klöppelaustritt kein Zusammenhang mit der Breite des gleichen Fadens auf dem Kern erkennen. Einige Fäden, die sich auf dem Kern besonders breit ablegen, sind am Klöppel übermäßig stark eingeschnürt, andere wiederum werden vergleichsweise breit von dem Klöppel abgezogen, um sich mit nur geringer Breite abzulegen. Bei der Beobachtung der Fäden während des Flechtens stellt man fest, dass auf Grund der Relativbewegung zwischen den Fäden diese zwischen Klöppel und Flechtring willkürlich entweder eingeschnürt und oder etwas gespreizt werden. Der am Klöppel gespreizte Faden müsste somit stabilisiert werden. Ein Binderauftrag am Klöppel ist jedoch nicht einem vertretbaren Aufwand umsetzbar.

4.1.3.2. Spreizen am Flechtring/-Flechtkegel

Auf dem Weg zur Ablage auf dem Kern, werden die Fäden am Flechtring umgelenkt (Abbildung 4.5). Nach dem Flechtring schnürt sich das Geflecht kontinuierlich ein, bis es am Flechtpunkt (Abbildung 4.5 gelbe Linie) die Form des Kerns angenommen hat.

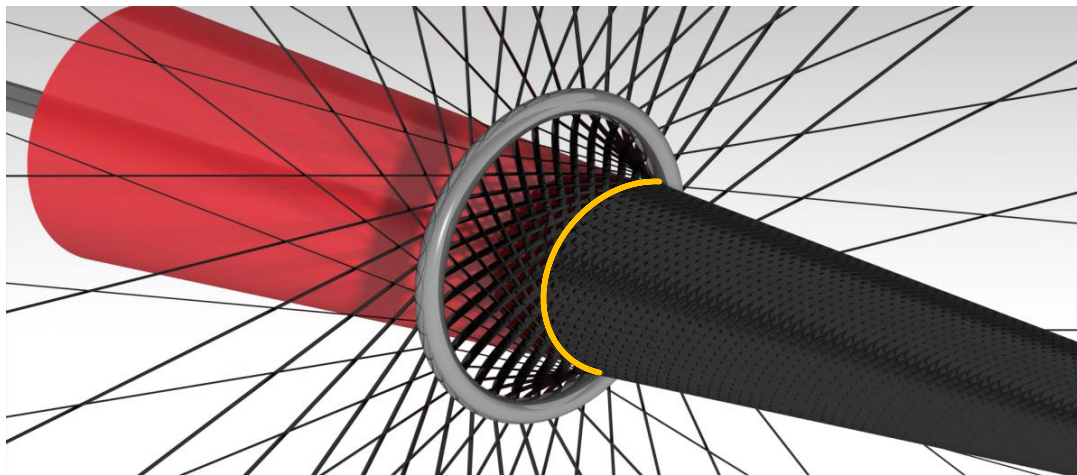


Abbildung 4.5: Umlenkung der Fäden am Flechtring und Geflechtbildung bis hin zur Kernablage (gelbe Linie)

Dieser Bereich eignet sich aus zwei Gründen für einen etwaigen Spreizprozess:

1. Die Fäden sind bereits recht stark durch die Abbindung mit den anderen Fäden fixiert und müssen nur noch eine geringe Strecke bis zum Flechtunkt zurücklegen. Es besteht somit die Chance, dass das Spreizergebnis bis zur Kernablage Bestand hat.
2. Die Form des Flechtrings und -kegels ändern sich nicht beziehungsweise nur geringfügig mit der Geometrie des Kerns. Folglich muss sich der Spreizmechanismus nicht der Kerngeometrie anpassen.

Zu beachten ist, dass das Spreizen an dieser Stelle nicht mehr an den einzelnen Fäden vorgenommen werden kann. Folglich muss ein neuer Mechanismus entwickelt werden, welcher die Fäden gemeinsam in ihrer textilen Abbindung spreizt.

Auf Grund der Produktionsgeschwindigkeit und des begrenzten Bauraums im Bereich des Flechtrings, lässt sich ein Binderauftrag nur schwer umsetzen. Da die Relativbewegung und somit die, für die gespreizten Fäden schädlichen Querkräfte bis zur Kernablage gering sind, kann eventuell auf eine Fixierung verzichtet werden.

4.1.3.3. Spreizen auf dem Kern

Bei diesem Ansatz findet das Spreizen in einem dem eigentlichen Flechtprozess nachgelagerten Schritt statt. Das Geflecht wird mit Lücken auf dem Kern abgelegt und anschließend als Textil gespreizt. Hieraus ergeben sich zwei Vorteile:

1. Da die Fäden den Flechtprozess zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig durchlaufen haben, erfahren diese keine Bewegung mehr. Folglich ist eine Fixierung der Fäden nicht mehr notwendig.
2. Bei der Positionierung eines Spreizaggregats für die nachträgliche Bearbeitung, können Randbedingungen, wie Bauraumbeschränkungen und Prozessgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Lässt beispielsweise das Kernhandhabungssystem oder die Produktionsgeschwindigkeit die Integration des Spreizaggregats in den Flechtprozess nicht zu, kann das Spreizen in einem zeitlich und räumlich nachgeschalteten Schritt stattfinden.

Sofern sich der zum Spreizen benötigte Kraftvektor relativ zum Faden nicht verändern darf, muss eine Anpassung der Ausrichtung der Spreizkraft an die Kerngeometrie stattfinden. Dies kann je nach Bauteilgeometrie zu einer komplexen Anlagensteuerung und -aufbau führen.

4.1.4. Technische Bewertung der Spreizmöglichkeiten

In den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels 4.1 sind zwei Mechanismen und vier Orte, mit beziehungsweise an welchen gespreizt werden kann, vorgestellt worden. In Tabelle 4-1 sind alle aufgeführt und werden bezüglich der Erfüllung der Festforderung nach einer variablen Breite bewertet.

Tabelle 4-1: Bewertung der Spreizmöglichkeiten

Spreizmöglichkeit		Festforderung	Bemerkung
Effekt	Mechanisch	erfüllt	Variable Breite umsetzbar
	Pneumatisch	erfüllt	Variable Breite umsetzbar
Ort	Vor dem Flechten	nicht erfüllt	Binderfixierung lässt keine Breitenvariation zu
	Klöppel	nicht erfüllt	Erforderliche Garnfixierung nicht möglich
	Flechtring/-kegel	erfüllt	Variable Breite umsetzbar
	Auf dem Kern	erfüllt	Variable Breite umsetzbar

Weshalb ein vorgelagertes Spreizen und ein Spreizen am Klöppel ungeeignet sind, ist in den Abschnitten 4.1.2 beziehungsweise 4.1.3 ausführlich geschildert. Diese Ansätze werden daher bei der nachfolgenden Entwicklung von Lösungsprinzipien nicht berücksichtigt. Ob die übrigen Ansätze die Festforderung tatsächlich erfüllen, muss nach der Findung und Umsetzung einer prinzipiellen Lösung abgesichert werden.

4.2. Spreizen im Flechtprozess: prinzipielle Lösungen

Prinzipielle Lösungen oder *Lösungsprinzipien* stellen eine grundsätzliche Lösung für eine abgegrenzte Konstruktionsaufgabe, die lediglich bestimmte grundlegende Festlegungen zur physikalischen Wirkungsweise und zur Art und Anordnung von festen Körpern und Fluiden vorgibt, dar. Die genaue Umsetzung ist noch nicht im Detail definiert [25].

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 erwähnt, stellt VDI 2222 die Suche nach Effekten, mit welchen die Aufgabe gelöst werden kann, als wichtigen Ansatz zur Findung prinzipieller Lösungen vor. Neben dem Effekt ist der Ort, an welchem dieser Effekt eingesetzt wird, ein weiterer Aspekt, nach welchem die Lösungen kategorisiert werden können. Daher sollen in einem nach Effekt und Ort gegliederten Ordnungsschema

alle denkbaren Lösungen eingeordnet werden. Sofern alle möglichen Effekte und Orte in Betracht gezogen werden, kann über die Kombination dieser beiden ordnenden Gesichtspunkte sichergestellt werden, dass keine Lösungsvariante übersehen wird. Grundlage für dieses Ordnungsschema (Tabelle 4-2) ist die in Tabelle 4-1 gebündelte Zusammenfassung der Recherche und der Vorüberlegungen.

Der Flechtring und Flechtkegel werden nun separat betrachtet, da unabhängige Lösungen erarbeitet werden sollen. Hinzu kommt auch noch ein weiterer Spreizeffekt: das passive Spreizen. Die aktiven Spreizmechanismen sind aus der Recherche hervorgegangen (siehe Abschnitt 4.1.2). Das passive Spreizen beruht auf der Umkehrung des Effekts des aktiven Spreizens: wird bei dem aktiven Spreizen eine Kraft, welche die Filamente auseinandertreibt, eingeleitet, so werden bei dem passiven Spreizen Kräfte reduziert, welche genau das Gegenteil bewirken. Diese Kräfte treten im Flechtprozess überall dort auf, wo die Fäden relativ zu einem anderen Körper eine Bewegung in ihrer Breitenrichtung durchlaufen. Durch die dabei entstehende Reibung ergibt sich eine Querkraft, welche die Filamente einschnürt und die Fadenbreite verringert.

Tabelle 4-2: Ordnungsschema zur Darstellung aller prinzipieller Lösungen

Ort		Effekt	Aktives Spreizen		Passives Spreizen
			Mechanisch	Pneumatisch	Verringerung der Reibung
Außerhalb des Flechtprozesses	Herkömmlicher Spreizprozess		x	x	x
	Klöppel		x	x	x
Während des Flechtprozesses	Flechtring		+	+	+
	Flechtkegel		+	+	+
	Auf dem Kern		+	+	x

Aus Tabelle 4-2 geht hervor, dass mindestens acht prinzipielle Lösungen existieren. Die mit einem x versehenen Varianten werden auf Grund der in Abschnitt 4.1.4 angestellten Bewertung nicht weiter verfolgt. Zusätzlich wird die Option des passiven Spreizens auf dem Kern ausgeschlossen, da an dieser Stelle keine Bewegung der Fäden stattfindet und somit die zu minimierenden Querkräfte ohnehin nicht mehr auftreten.

Dieses Kapitel ist nach dem Ort des Spreizens gegliedert und enthält zu jedem Ort Lösungsvorschläge, welche auf den vorgestellten Effekten beruhen.

4.2.1. Spreizen am Flechtring

Nach der Umlenkung um den Flechtring sind die Fäden bis zur Kernablage der Reibung der entgegengesetzt laufenden Fäden ausgesetzt. Folglich besteht die Möglichkeit, dass die durch das Spreizen gewonnene Garnbreite wieder zunichte gemacht wird. Allerdings würde eine Binderaufbringung vor der Ablage auf dem Kern das Verflechten der Fäden behindern und die Anpassung des Geflechtschlauchs an den Kern erschweren. Daher befassen sich die folgenden Konzepte lediglich mit der Umsetzung der Spreizeffekte; ob die gewonnene Garnbreite auch noch nach der Ablage auf dem Kern messbar ist müssen Absicherungsversuche zeigen.

4.2.1.1. Mechanisches Spreizen

Da die Fäden auf Grund der bereits stattgefundenen Verflechtung nicht getrennt umgelenkt und gespreizt werden können, müssen alle Flechtfäden gemeinsam umgelenkt werden (Abbildung 4.6).

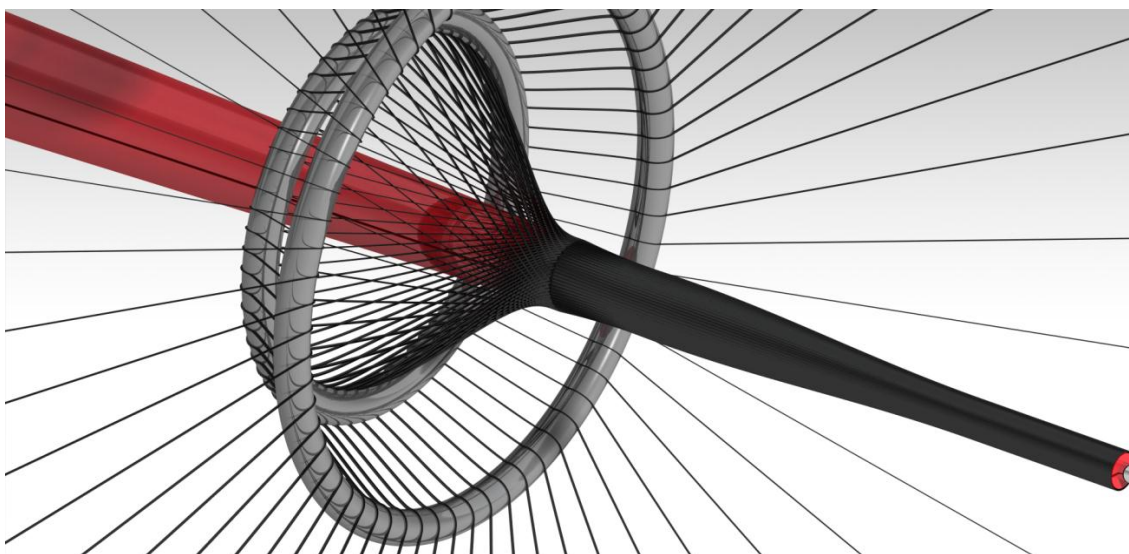


Abbildung 4.6: Umlenkung der Fäden um einen zweiten Flechtring [59]

Die Fäden werden über mindestens einen zusätzlichen Flechtring geführt, um eine zusätzliche Umschlingung und somit Spreizung zu erreichen. Auch wenn der Ansatz im ersten Moment durch seine Einfachheit besticht, führt die Betrachtung des Flechtvorgangs am Flechtring zur Verwerfung dieses Konzepts. Das Kreuzen der gegenläufigen Fadenscharen am Flechtring verursacht die für die Fadenbreite schädlichen Querkräfte. Die Fäden behindern sich gegenseitig und schnüren sich dabei regelrecht ein (Abbildung 4.7).



Abbildung 4.7: Behinderung der sich kreuzenden Fäden am Flechtring

Des Weiteren findet dabei eine nicht unerhebliche Schädigung statt, was sich durch die Ablagerung von gebrochenen Filamenten bemerkbar macht. Das mechanische Spreizen an Umlenkungen ist nur zielführend, wenn keine in Querrichtung wirkenden Kräfte hinzukommen.

Fazit: Die Einbringung zusätzlicher Umlenkungen stellt keine Option für das mechanische Spreizen dar. Ganz im Gegenteil, auf Grund der sich kreuzenden Flechtfäden verhindert die Umlenkung am Flechtring sogar eine breitere Ablage.

4.2.1.2. Pneumatisches Spreizen

Ursächlich für die Funktionsweise des pneumatischen Spreizens sind die Druckdifferenzen bei einer Umströmung der einzelnen Filamente. Grundsätzlich können die bereits im Geflecht eingebundenen Fäden ähnlich eines Einzelgarns angeströmt werden. Allerdings ist zu klären, ob sich die in Abschnitt 4.1.2 vorgestellten Erkenntnisse über das pneumatische Spreizen einzelner Garne übertragen lassen.

Mit einem hohlen, perforierten Flechtring kann eine Luftströmung eingebracht werden (Abbildung 4.8).

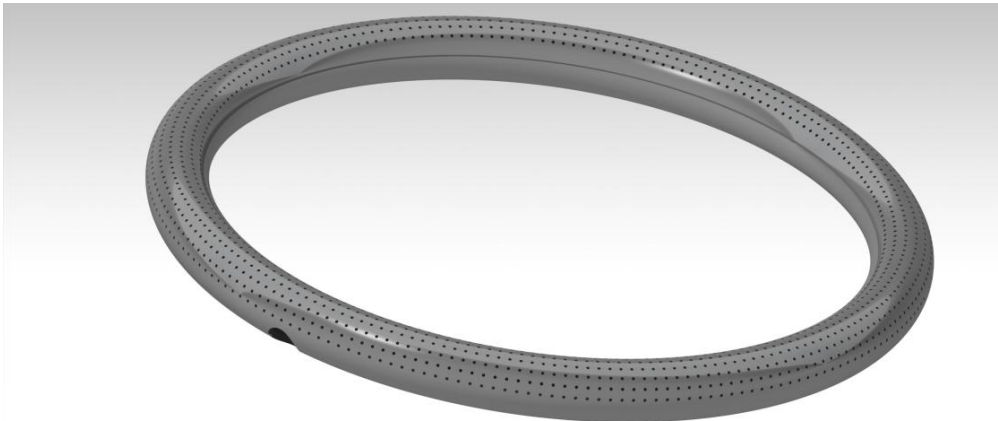


Abbildung 4.8: Hohler, perforierter Flechtring zum pneumatischen Spreizen [59]

Sowohl das Anlegen eines Vakuums, als auch eines Überdrucks sind denkbar. Allerdings erscheint ein Überdruck sinnvoller, da die Fäden dabei von der Ringoberfläche abgehoben werden. Somit werden einerseits das aneinander Abgleiten der Fäden erleichtert und andererseits die Fäden gespreizt.

Fazit: Ein mit Überdruck betriebener perforierter Flechtring würde die Fäden vermutlich aktiv und passiv spreizen. Zusätzlich macht der geringe Bauraum das Konzept interessant. Allerdings lässt sich der Luftstrom nicht frei positionieren; er ist über die Anordnung des Flechtrings festgelegt.

4.2.1.3. Passives Spreizen

Um dem Problem der sich kreuzenden Fäden am Flechtring (Abbildung 4.7) zu begegnen, wird in der Patentschrift [60] eine Konstruktion mit zwei axial beweglichen Flechtringen vorgestellt (Abbildung 4.9). Infolge einer periodischen Hubbewegung in Richtung der eingezeichneten Pfeile (10 und 11), liegt der Flechtkegel abwechselnd am äußeren (5) und am inneren Flechtring (4) an. Für die Bewegung wird in der Patentschrift eine Frequenz von 0,1 Hz bis 10 Hz und eine Amplitude von 5 mm bis 100 mm vorgeschlagen. Das wechselseitige Abheben des Geflechts führt gemäß der Patentschrift zu einer Verringerung der auf die Fäden wirkenden Scherkraft und der damit einhergehenden Faserschädigung. Zudem werden die, durch das Aufstauen der Fäden (Abbildung 4.7) hervorgerufenen Querkräfte verringert, was einen positiven Effekt auf die Fadenbreite erwarten lässt. Zu untersuchen ist, wie groß der Zuwachs an Ablagebreite ist und ob die Fäden durch die Bewegung der Flechtringe geschädigt werden.

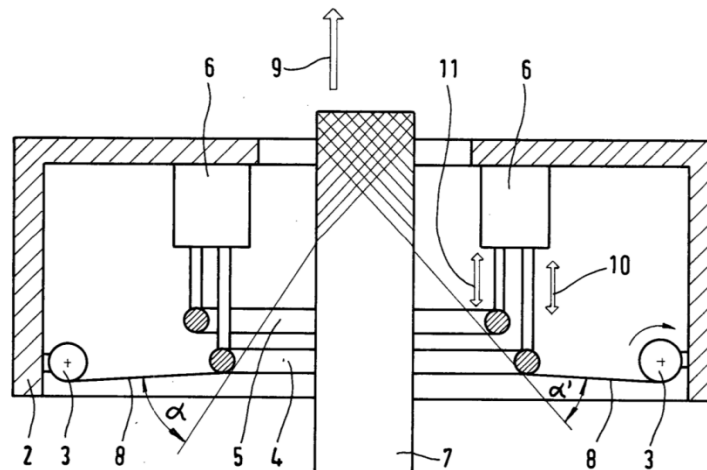


Abbildung 4.9: Zwei konzentrische, axial bewegliche Flechringe zur Reduktion der auf die Fäden wirkenden Querkräfte [60]

Eine weitere Möglichkeit, welche das Abgleiten der Fäden am Flechtring erleichtern kann, ist eine Ultraschallanregung des Rings. Die Erfahrung mit einer Anregung mittels eines elektrischen Rüttlers zeigt, dass eine Vibration des Flechtrings zu einer Homogenisierung und Erhöhung der Fadenablagebreite führt. Durch das hochfrequente Schwingen kann dieser Effekt eventuell verbessert werden.

Fazit: Die Anregung des Flechtrings ist bereits bewährter Stand der Technik. Eine Verbesserung des Effekts mittels eines zweiten, pulsierenden Flechtrings oder einer Ultraschallanregung muss untersucht werden.

4.2.2. Spreizen am Flechtkegel

Im Gegensatz zum Spreizen am Flechtring, kann der Spreizeffekt für diese Betrachtung frei zwischen Klöppel und Ablage auf dem Kern positioniert werden. Durch diesen zusätzlichen Freiheitsgrad besteht eine weitere Möglichkeit, das Spreizergebnis zu optimieren.

4.2.2.1. Mechanisches Spreizen

Rosenbaum [8] beschreibt einen Ansatz, mit welchem sich das Spreizen der einzelnen Flechtfäden in der Nähe des Flechtrings umsetzen ließe. Der Faden wird bis über den Flechtring durch einen am Klöppel befestigten Kunststoffschlauch (Abbildung 4.10) geführt. Erst wenn die Fäden diesen kurz vor dem Flechtpunkt verlassen, berühren sie einander.

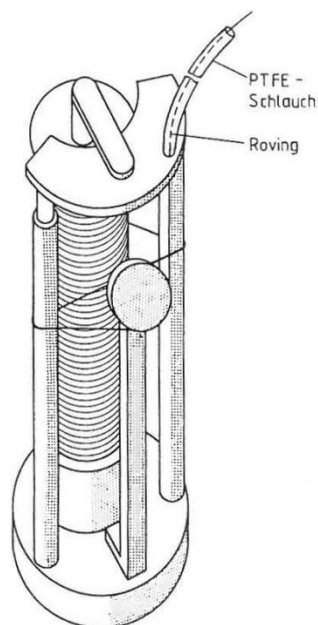


Abbildung 4.10: Ummantelung des Flechtfadens mit einem Kunststoffschlauch [8]

Somit werden die aus der Relativbewegung der Flechtfäden resultierenden Querkräfte vermieden. Dieser Gedanke wird unter dem Punkt des passiven Spreizens erneut aufgegriffen. Zusätzlich böte sich eine Möglichkeit, Bolzen in den Kunststoffschlauch einzubringen. Durch die Umschlingung der Bolzen kurz vor dem Austritt aus dem PTFE Röhrchen kann der gleiche Effekt wie beim mechanischen Spreizen am Klöppel erzielt werden, jedoch näher am Flechtpunkt. Allerdings ist es fraglich, ob die Schläuche nah genug an die Kernablage herangeführt werden können, um ihre Wirkung entfalten zu können. Der Schlauchlänge wird durch die fortschreitende Verflechtung im Flechtkegel Grenzen auferlegt sein. Hinzu kommt der von Rosenbaum [8] angesprochene Einfädelaufwand. Besonders die zum Erzielen des Spreizeffekts eingesetzten Bolzen hätten einen sehr aufwändigen und zeitraubenden Einfädelprozess zur Folge. Für eine Anwendung in einem Großserienprozess ist dies kaum vorstellbar.

Fazit: Der ungewisse Nutzen gepaart mit dem zu erwartenden hohen Aufwand führt zu einer niedrigen Priorisierung des Konzepts.

4.2.2.2. Pneumatisches Spreizen

Alternativ zur der Anströmung der Fäden durch einen perforierten Flechtring, kann der Flechtkegel erst nach der Umlenkung mit einem Luftstrom bearbeitet werden. Da kein direkter Kontakt zu den Fäden notwendig ist, können Form und Anordnung der Luftdüsen für eine optimale Anströmung angepasst werden. Die Strömung kann entweder von außen oder von innen sowie entweder mittels Vakuum oder Überdruck in den Flechtkegel eingeleitet werden (Abbildung 4.11).

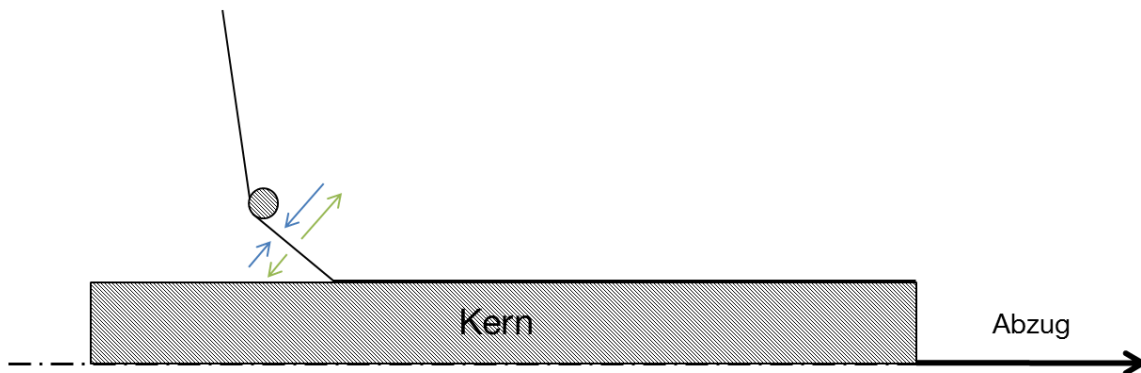


Abbildung 4.11: Möglichkeiten für die Anströmung des Flechtkegels: von innen oder von außen, mit Vakuum (grün) oder mit Überdruck (blau)

Die Luftströmung von innerhalb des Flechtkegels einzuleiten bietet keine Vorteile, ist aber auf Grund des begrenzten Bauraums aufwendiger. In Abbildung 4.12 ist daher ein Aufbau vorgeschlagen, bei dem die auf den Flechtkegel ausgerichteten Düsen über einen Ring mit Vakuum oder Druckluft versorgt werden. Die Funktionsweise entspricht dabei weitestgehend der des perforierten Flechtrings, mit dem Unterschied, dass über Position, Geometrie und Ausrichtung der Düsen das Spreizergebnis eventuell zusätzlich optimiert werden kann.

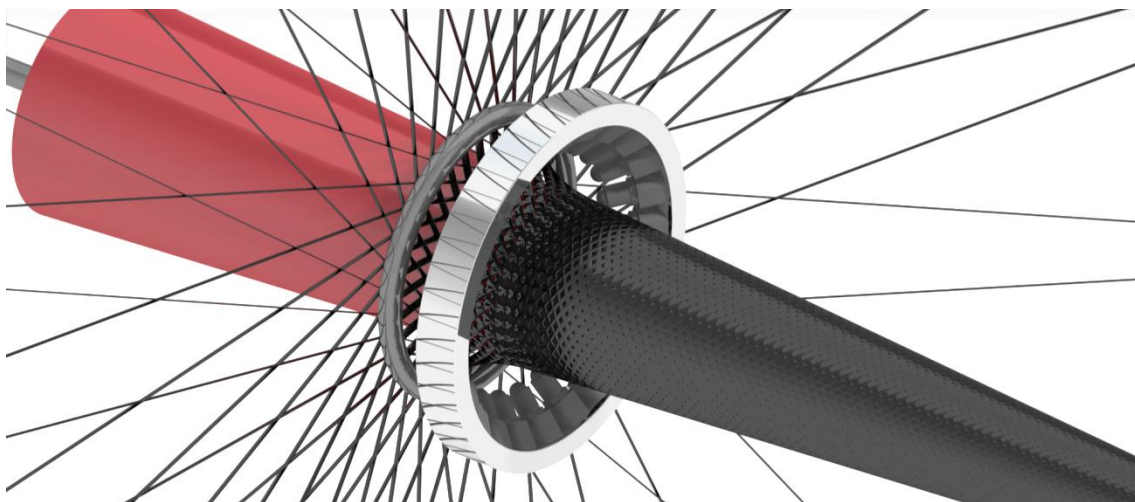


Abbildung 4.12: Düsenring zum pneumatischen Spreizen des Flechtkegels [59]

Fazit: Eine Anströmung des Flechtkegels von außen ist ohne Bauraum- und Prozesseinschränkungen möglich. Des Weiteren bietet die hohe Variabilität etliche Einstellmöglichkeiten für eine Optimierung des Spreizergebnisses.

4.2.2.3. Passives Spreizen

Die aus [8] entlehene Idee der Flechtfadenummantelung wurde bereits als prinzipielle Lösung für das mechanische Spreizen am Flechtkegel vorgestellt. Der ursprüngliche Gedanke besteht darin, die Reibung zwischen den Fäden auf ein Minimum zu

beschränken. Somit werden Faserschädigung und Querkräfte reduziert, welche eine Einschnürung der Fäden verursachen. Um einen großen Effekt erzielen zu können, sollten die Schläuche möglichst lang sein. Dies ist jedoch durch die zunehmende Verflechtung begrenzt, eventuell sogar so stark, dass ein positiver Effekt nicht mehr nachweisbar ist. Hinzu kommt der erhöhte Einfädelaufwand.

Fazit: Analog zu den Überlegungen zum mechanischen Spreizen, ist die Flechtfadenummantelung auf Grund der Produktivitätseinschränkung für den Zweck des passiven Spreizens ebenfalls von untergeordnetem Interesse.

4.2.3. Spreizen auf dem Kern

Die nach der Ablage auf dem Kern gespreizten Fäden bedürfen keiner Fixierung, da sie zu diesem Zeitpunkt den Prozess bereits vollständig durchlaufen haben und somit nicht mehr in Bewegung sind. Da sich die Fäden auf Grund der Abbindung gegenseitig fixieren, verfügt das Geflecht über eine gewisse Robustheit bei der weiteren Prozessierung.

4.2.3.1. Mechanisches Spreizen

Eine Umlenkung einzelner Fäden oder des gesamten Geflechts ist nach der Ablage auf dem Kern nicht mehr möglich. Um dennoch die für das Spreizen notwendige Kraft (siehe Abschnitt 4.1.2) aufbringen zu können, kann eine Rolle oder Walze über das Geflecht geführt werden. In Vorversuchen wurde ein mit Lücken beflochtenes Rohr nachträglich mit Walzen bearbeitet. Dabei zeigte sich, dass drehbar gelagerte, profilierte Kunststoffwalzen, welche in Kernlängsrichtung auf und ab bewegt werden, das beste Ergebnis liefern. Neben der Wirkung auf die Fadenbreite muss auf die Schädigung der Fasern geachtet werden. Die Nachbearbeitung kann unmittelbar hinter dem Flecht punkt (Abbildung 4.13) oder nach Abschluss einer Geflechtlage geschehen.

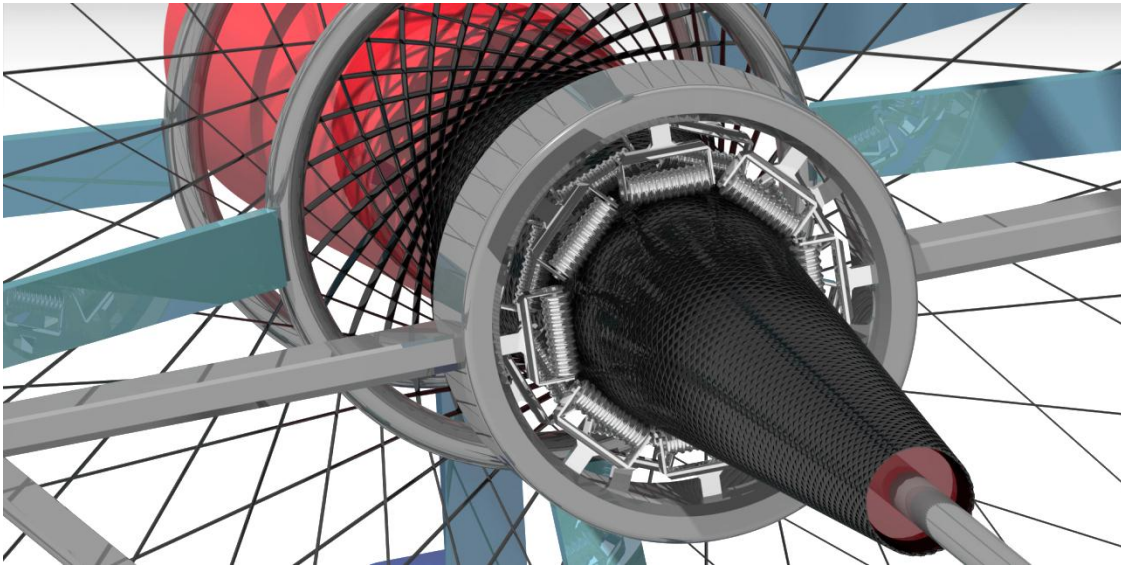


Abbildung 4.13: Profilierte Walzen zum nachträglichen Spreizen der Fäden [59]

Bei der in Abbildung 4.13 vorgeschlagenen Versuchsanordnung kommt durch die Kernabzugsbewegung eine Relativgeschwindigkeit zwischen Geflecht und Walze zustande. Ist diese zu gering, müssen die Walzen zusätzlich bewegt werden. Um das bei den Vorversuchen erzielte Spreizergebnis unter reproduzierbaren Bedingungen nachweisen und optimieren zu können, muss eine Umsetzung als Prüfstand erfolgen.

Fazit: Auf Grund der Fixierung der Fäden auf dem Kern muss das Prinzip des mechanischen Spreizens umgekehrt werden: eine bewegliche Rolle oder Walze wird über die ruhenden Fäden bewegt.

4.2.3.2. Pneumatisches Spreizen

Die Herangehensweise ist analog zu den Überlegungen bezüglich des pneumatischen Spreizens am Flechtkegel. Die Strömung kann von zwei unterschiedlichen Seiten eingebracht und entweder mittels Vakuum oder Überdruck erzeugt werden. Über einen perforierten Kern kann das Geflecht von der Unterseite gespreizt werden. Allerdings bedeutet dies einen höheren Fertigungsaufwand für den Kern und eventuell Schwierigkeiten bei weiteren Prozessschritten, wie dem Infiltrieren. Des Weiteren ist ab der zweiten Geflechtlage die Wirkung durch die bereits abgelegte Lage stark eingeschränkt. Somit sieht die Umsetzung dem pneumatischen Ansatz für den Flechtkegel sehr ähnlich. (Abbildung 4.14) Die Düsen sind lediglich auf den Kern gerichtet.

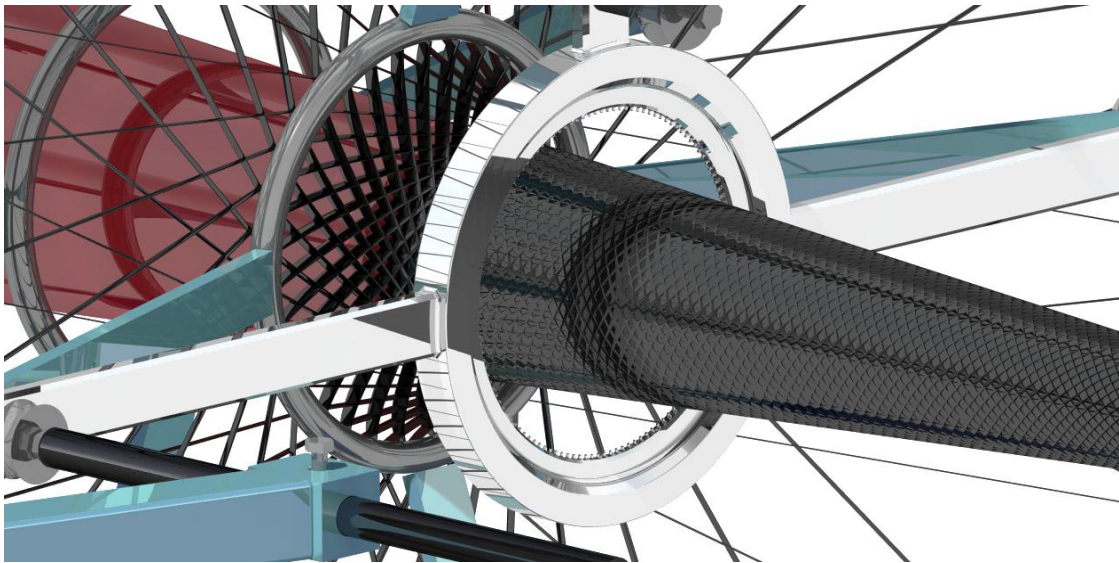


Abbildung 4.14: Düsenring für das pneumatische Spreizen des Geflechts nach der Ablage auf dem Kern [59]

Der Kern kann ebenso erst nach dem Abschluss einer Geflechtlage durch den Düsenring geführt werden. Ein Prüfstand kann für das Spreizen nach der Ablage und am Flechtkegel entworfen werden, die Einstellbarkeit der Düsen muss entsprechend anpassbar sein.

Fazit: Die Einbringung einer Luftströmung durch den Kern ist aufwändiger und verliert bei mehreren Geflechtlagen die Wirkung. Ein Prüfstand für das Spreizen am Flechtkegel könnte mit leichten Modifikationen für diese Versuchsreihe verwendet werden.

4.2.4. Bewertung und Auswahl

Ein wichtiger Bestandteil des methodischen Auswählens ist ein transparentes und nachvollziehbares Vorgehen. Eines der in der Einführung in die methodische Entwicklung und Konstruktion (siehe Kapitel 2.3) vorgestellten Werkzeuge ist die Auswahlhilfe. Die Lösungsprinzipien werden anhand der Anforderungen qualitativ bewertet. Neben der übersichtlichen Darstellung der Vor- und Nachteile, dient die Liste der Entscheidungsfindung, ob ein Lösungsprinzip weiterverfolgt werden soll.

Für die in Tabelle 4-3 vorgenommene Entscheidung gilt die Festlegung, dass nur die Lösungen ausscheiden, welche mindestens eine Festforderung nicht uneingeschränkt erfüllen. Für die Mindestforderungen von Schädigung und Spreizbreite, ist noch kein Maximal- bzw. Minimalwert festgelegt. Für eine realistische Einschätzung der tolerierbaren Schädigung beziehungsweise der erzielbaren Breite, müssen die Ergebnisse der ersten Versuche abgewartet werden. Die hier vorgenommene Bewertung spiegelt wider, ob eine starke Ausprägung der jeweiligen Mindestforderung zu erwarten ist.

Aus der Auswahlliste gehen fünf prinzipielle Lösungen für die Weiterentwicklung hervor. Diese fünf Lösungen beschreiben jeweils einen Effekt, mit welchem sich das prozessintegrierte Spreizen mutmaßlich umsetzen lässt. Sie stehen nicht zwangsläufig in Konkurrenz zu einander, sondern können mit einander kombiniert werden, um das Spreizergebnis zu maximieren. Als wichtige Anforderung für die Prüfstandkonstruktion ergibt sich daher, möglichst viele der Effekte miteinander kombinieren zu können. Nur so können Wechselwirkungen identifiziert und ein globales Prozessoptimum bestimmt werden.

Tabelle 4-3: Auswahlliste zur Bewertung der Lösungsprinzipien *prozessintegriertes Spreizen*

Erfüllung der Anforderung: + ja o eingeschränkt - nein ? Informationsmangel			Variable Breite							Entscheidung			
			Keine Verlangsamung der Prozessgeschwindigkeit			Festforderung							
Entscheidung weiteres Vorgehen: + weiter verfolgen o eventuell zu einem späteren Zeitpunkt - scheidet aus			Geringe Faserschädigung				Mindestforderung						
			Hohe erzielbare Fadenbreite			Hohe Einstellbarkeit							
Ort			Effekt		Lösungsprinzip		Geringer Fertigungsaufwand/-kosten		Wunsch				
			Bemerkungen										
Flechtring	Mechanisch	Doppelter Flechtring	-	+	-	-	-	+	o	Festforderung verletzt			-
	Pneumatisch	Perforierter Flechtring	+	+	+	?	o	-	-	Düsenring eignet sich besser für Erprobung, evtl. für Serienprozess			o
	Passiv	Pulsierender Flechtring	+	+	?	?	o	o	-	Wirkung nicht nachgewiesen, lediglich aus Patentschrift			+
		Ultraschallanregung	+	+	+	?	o	-	-	Wirkung nicht abgesichert, interessant wegen kompakter Bauweise			+
Flechtkegel	Mechanisch	PTFE-Schläuche mit Bolzen	+	-	+	?	o	+	-	Festforderung verletzt			-
	Pneumatisch	Düsenring	+	+	o	?	o	+	+	Düsenring eignet sich besser für Erprobung, evtl. für Serienprozess			+
	Passiv	PTFE-Schläuche	+	-	+	?	o	+	-	Festforderung verletzt			-
Kern	Mechanisch	Walzenring	+	+	o	+	+	+	+	Einfache Umsetzung			+
	Pneumatisch	Perforierter Kern	o	+	o	-	+	-	-	Stark eingeschränkte Wirkung; aufwändige Umsetzung			-
		Düsenring	+	+	o	+	+	+	+	Einfache Umsetzung			+

4.3. Entwurf eines Prüfstandes für das prozessintegrierte Spreizen

Tabelle 4-3 kann entnommen werden, dass für einige prinzipielle Lösungen bereits Vorversuche durchgeführt wurden. Dabei wurde abgesichert, dass der Effekt auch tatsächlich das erwünschte Ergebnis erzielt. In diesem Kapitel werden mit Hinblick auf die Prüfstandkonstruktion die Ergebnisse weiterer Vorversuche vorgestellt. Das dabei erworbene Verständnis wird für die Konkretisierung der Anforderungsliste benötigt.

Die fünf Lösungsprinzipien werden vorerst separat als Module betrachtet. Nach der konstruktiven Ausarbeitung der Module wird ein Gesamtprüfstand entworfen, welche möglichst viele Kombinationen zulässt.

4.3.1. Modul 1: Ultraschallangeregter Flechtring

Die Anregung des Flechtrings mit pneumatischen oder elektrischen Vibratoren ist ein weit verbreiteter Ansatz zur Homogenisierung des Geflechtbildes. Die starke Streuung bei der Ablagebreite der Fäden wird verringert, sodass kleine, unregelmäßig auftretende Lücken im Geflecht geschlossen werden. Durch die Vibration wird am Flechtring das aneinander Abgleiten der gegenläufigen Fadenscharen erleichtert. Ein ähnlicher Effekt kann bei einer Ultraschallanregung des Flechtrings erwartet werden.

In einem einfachen Vorversuch soll geklärt werden, ob sich der gewünschte Effekt einstellt. Ein Ultraschallhandgerät (Firma EM-Systeme) wird hierfür an den Flechtring angeflanscht. Üblicherweise wird eine Klinge oder ein Schweißstempel mit der Sonotrode angeregt. Für diesen Versuch wird stattdessen der Flechtring mit der Sonotrode verschraubt (Abbildung 4.15).

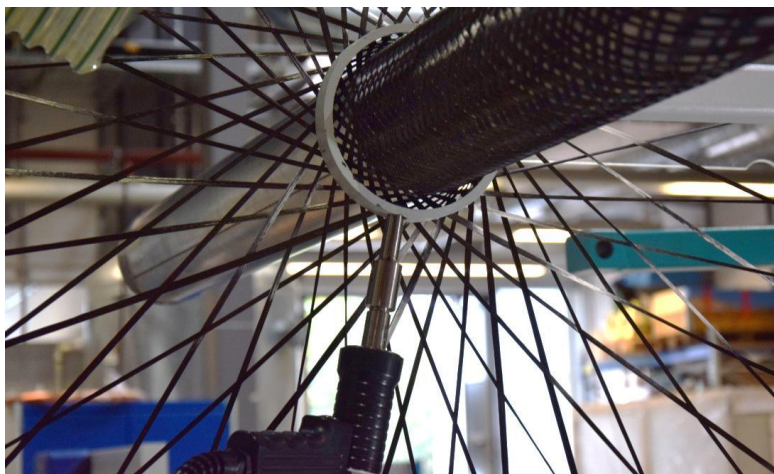


Abbildung 4.15: An Flechtring angeflanshtes Handultraschallgerät

Am Steuergerät wird die Startfrequenz (maximal 30,5 kHz) eingestellt. Die Ultraschallanregung beginnt bei dieser Frequenz, wobei diese anschließend kontinuierlich um bis zu 1 kHz verringert wird, bis die Eigenfrequenz des angeflanshten Bauteils erreicht ist. Bei dem abgebildeten Aufbau konnte die Eigenfrequenz des Systems nicht gefunden werden, sodass der Ultraschallvorgang abgebrochen wurde. Daher wurde in einem zweiten Versuch auf eine feste Anbindung der Sonotrode an den Flechtring verzichtet. Stattdessen wurde die Ultraschallpistole in Betrieb genommen und erst als diese ihre Eigenfrequenz erreicht hatte, per Hand an den Flechtring gepresst. Die Fäden wurden zu diesem Zeitpunkt nicht verflochten, sondern lagen ruhend an dem Flechtring an. Durch die Anregung des Rings konnten sich die Fäden voneinander lösen und eine leichte Steigerung der Breite war zu beobachten. Sobald die Flechtanlage in Betrieb genommen wurde, ging der Effekt jedoch verloren. Die Vibration des Flechtrings reicht nicht aus, um den bei stehender Anlage erzielten Effekt auch während der Produktion zu erreichen. Dies liegt vermutlich an der schlechten Einkopplung des Ultraschalls. Für weiterführende Untersuchungen muss ein Gesamtsystem entwickelt werden, welches auf die Eigenfrequenz des Flechtrings abgestimmt ist.

4.3.2. Modul 2: Pulsierender Flechtring

Die EADS Patentschrift [60] beschreibt die Konstruktion als zwei konzentrisch zueinander angeordnete Flechtringe, welche sich axial in entgegengesetzter Richtung zueinander bewegen. Ziel der Bewegung ist es, die Fäden abwechselnd von dem äußeren und dem inneren Ring vollständig abzuheben. Daraus ergibt sich für die axiale Relativbewegung (Hub) der Flechtringe eine Mindeststrecke. Der Hub muss mindestens so groß gewählt werden, dass die Fäden in den beiden Totpunkten der Hubbewegung an nur einem Ring umgelenkt werden, sodass sie den jeweils anderen tangential berühren.

Bei dem in Abbildung 4.16 dargestellten Totpunkt findet die Umlenkung um den äußeren Flechtring statt. Damit die Umlenkung ausschließlich um den inneren Flechtring stattfindet, muss dieser um H entgegen der äußeren Ring in Richtung des Kernabzugs bewegt werden. Alternativ können, wie in [60] beschrieben, auch beide Ringe jeweils einen Anteil des Hubes zurücklegen, sodass ihre Bewegung in Summe wieder H ergibt.

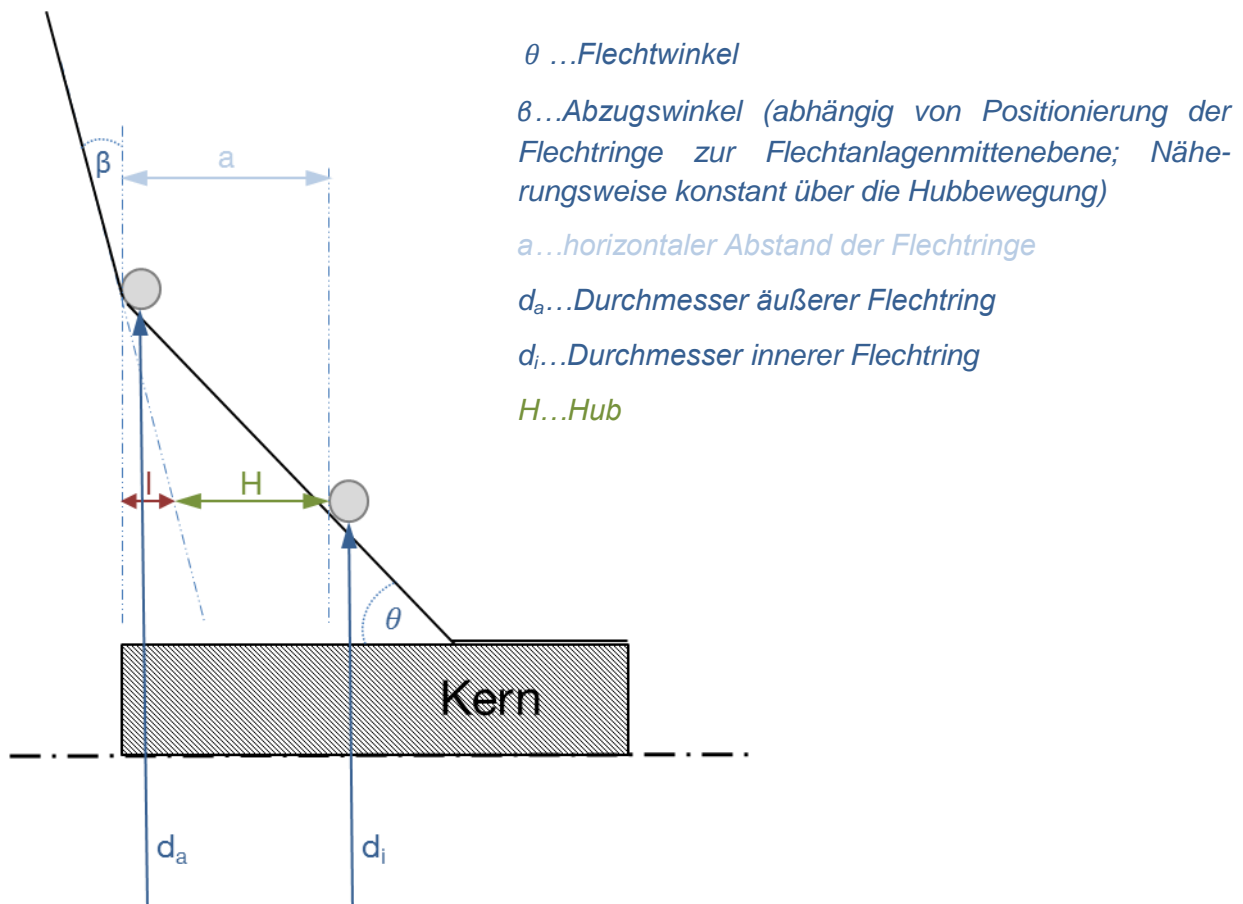


Abbildung 4.16: Geometrische Zusammenhänge an den Flechtringen

Mit dem in Abbildung 4.16 eingezeichneten Hub H werden die Fäden in den Totpunkten zwar nur um einen Ring umgelenkt, allerdings berühren sie, wenn auch nur in einem Punkt, weiterhin den anderen Flechtring. Um sicherzustellen, dass kein Kontakt und somit auch keine Reibung stattfinden, wird bei der Berechnung des Mindesthubes eine Sicherheitsreserve von 2 mm vorgesehen:

$$H_{min} = a - l = \frac{d_a - d_i}{2 \cdot \tan(\theta)} - \frac{d_a - d_i}{2} \cdot \tan(\beta) + 2 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Für die Auslegung gelten folgende Festlegungen:

- Der innere Flechtring hat eine Dicke von 10 mm und der Spalt zwischen den beiden Ringen soll 10 mm betragen. Somit ergibt sich: $d_a - d_i = 40 \text{ mm}$.
- Die Flechtringe befinden sich näherungsweise in der Flechtanlagenmittebene, $\beta = 0^\circ$.
- Der minimale Flechtwinkel beträgt 25° .

Mit diesen Werten ergibt sich ein Mindesthub von knapp 45 mm.

Um den benötigten Hub im Prozess umsetzen zu können, muss die Kraft ausreichend sein, um die Fadenkraft bei der Bewegung entgegen der Abzugsrichtung überwinden zu können. Da die Abzugskraft von vielen Parametern, welche erst in der Versuchsplanung festgelegt werden, abhängt (Garnart, Flechtwinkel, Produktionsgeschwindigkeit usw.) soll sie überschlagsmäßig abgeschätzt werden. Erfahrungsgemäß liefert Formel (4.3) eine konservative Größenordnung für die Abzugskraft.

$$F_{\text{Abzug}} = F_{\text{Klöppel}} \cdot n_{\text{Klöppel}} \quad (4.3)$$

F_{Abzug}	Abzugskraft des Geflechts
$F_{\text{Klöppel}}$	Abzugskraft eines Fadens aus dem Klöppel
$n_{\text{Klöppel}}$	Anzahl der besetzten Klöppel

Die Abzugskraft eines Fadens aus dem Klöppel wird über die Federstärke eingestellt, welche in den Auslösemechanismus integriert ist. Die von Seiten des Flechtanlagenherstellers (Firma Herzog) bereitgestellten Federn erlauben eine maximale Fadenabzugskraft von 9,5 N. Werden diese in der mit 128 Klöppeln ausgestatteten Flechtanlage des LCC verwendet, beträgt die maximale Abzugskraft 1216 N.

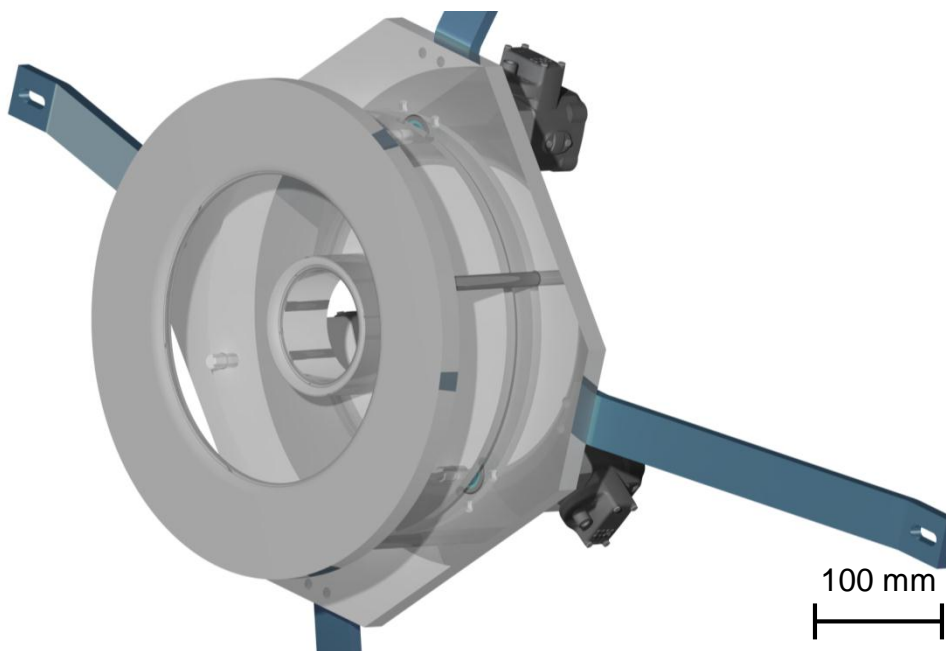
Neben der Länge und Kraft der Hubbewegung, ist die Frequenz ein entscheidender Parameter. Die Patentschrift [60] schlägt einen Einstellbereich von 0,1 Hz bis 10 Hz vor. Da sich die Flechtfäden während des Betriebs nach weniger als einer Sekunde aufstauen, sind vermutlich vor allem Frequenzen höher als 1 Hz interessant.

In Tabelle 4-4 sind die Anforderungen für das Modul *pulsierender Flechtring* zusammengefasst.

Tabelle 4-4: Anforderungen an das Modul *pulsierender Flechtring*

Anforderung	Beschreibung
Hub	In den Totpunkten Kontakt mit nur einem Flechtring: $H_{min} = 45 \text{ mm}$
Kraft	Überwindung der Abzugskraft: $F_{Abzug} = 1216 \text{ N}$
Frequenz	Empfehlung Patent [60]: bis zu 10 Hz

Die axiale Bewegung beider Flechtringe, wie in der Patentschrift [60] beschrieben, führt zur Erhöhung der Anlagenkomplexität und wird nicht für die Erfüllung der Grundfunktion, dem wechselseitigen Abheben der Flechtfäden, benötigt. Daher wird nur der innere Flechtring bewegt, wohingegen der äußere fest ist. Abbildung 4.17 zeigt das CAD Modell des Prüfstandmoduls *pulsierender Flechtring*. Die beiden Flechtringe sind an einer achteckigen Grundplatte befestigt, welche wiederum über vier Arme an der Flechtanlage angebracht wird.

Abbildung 4.17: Konstruktive Umsetzung des Moduls *pulsierender Flechtring*

Der Abstand des äußeren Flechtrings kann über drei Gewindestangen eingestellt werden. Der innere Flechtring wird auf den Kolbenstangen von drei Pneumatikzylindern montiert. Durch das kontinuierliche, synchrone Ein- und Ausfahren der Zylinder, oszilliert der Flechtring axial. Die Zylinder müssen entsprechend den in Tabelle 4-4 aufgeführten Anforderungen spezifiziert werden.

4.3.3. Modul 3: Düsenring

Mit dem Modul *Düsenring* werden zwei Lösungsprinzipien betrachtet: das pneumatische Spreizen am Flechtkegel und auf dem Kern. Da beide Lösungsansätze gänzlich neu sind, muss mit Hilfe von Vorversuchen zum einen ein prinzipieller Funktionsnachweis geliefert und zum anderen Verständnis über die Wirkprinzipien aufgebaut werden. Folgende Parameter sind dabei zu untersuchen:

1. Spreizort: am Flechtkegel und/oder auf dem Kern?
2. Über- oder Unterdruck
3. Düsengeometrie
4. Druck
5. Düsenabstand
6. Düsenausrichtung
7. Relativbewegung zwischen Düse und Geflecht

In einem ersten Versuch wird mit der Kunststoffdüse Windjet 727 ein runder Kern bearbeitet, welcher mit einem offenen $24k \pm 45^\circ$ Köpergeflecht beflochten ist. Bei diesem Versuch wurde die Düse mit 2,5 bar betrieben und in unterschiedlichen Abständen, Ausrichtungen und Bewegungsrichtungen über das offene Geflecht geführt. Dabei fällt auf, dass die Druckluft die Fäden je nach Düsenführung sowohl positiv (spreizen), als auch negativ (verschieben und einschnüren) beeinflussen kann. Die Verschiebung und Einschnürung der Fäden werden durch eine falsche Wahl der **Parameter sechs** und **sieben** hervorgerufen. Wird die Düse nicht senkrecht zum Geflecht gehalten, schiebt die schräge Anströmung das Geflecht gewissermaßen vor sich her. Die unmittelbar am Düsenaustritt befindlichen Fasern werden in Strömungsrichtung ausgelenkt (Abbildung 4.18, links). Diese Richtungsabweichung bleibt auch nach der Beendigung der Düsenbearbeitung erhalten, sodass diese unbedingt vermieden werden muss. Durch eine Düsenbewegung quer zur Faserrichtung werden die Filamente auseinandergetrieben, mit der Folge, dass noch größere Lücken entstehen (Abbildung 4.18, rechts, rote Markierung).

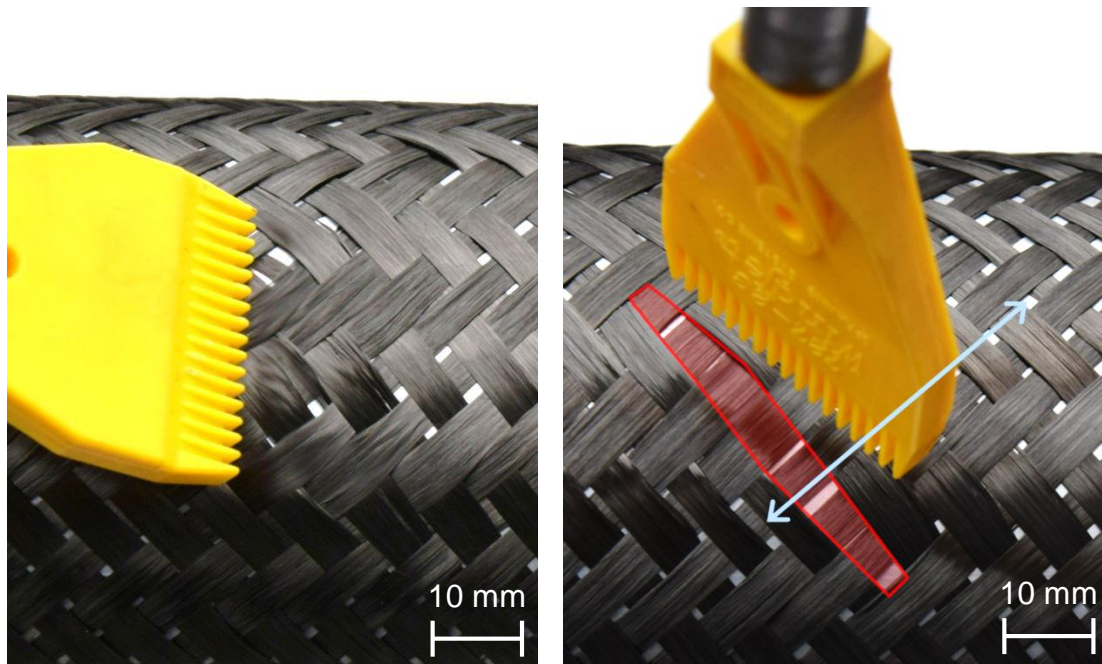


Abbildung 4.18: Ungewollte Faserverschiebung durch falsche Düsenausrichtung (links) und -bewegung (rechts)

Die Düse muss somit senkrecht zur Kernoberfläche gehalten und möglichst in Faserlängsrichtung bewegt werden. Da sich die Fäden in dem betrachteten $\pm 45^\circ$ Geflecht unter einem Winkel von 90° schneiden, muss die Düse in Abzugsrichtung bewegt werden.

Die Parameter eins bis fünf bestimmen wie effektiv das Spreizen stattfindet. Mit den **Parametern vier** und **fünf** lässt sich die Spreizbreite einstellen. Je höher der Druck und je geringer der Abstand zum Geflecht, desto breiter werden die Fäden gespreizt. Begrenzt werden beide Optimierungsmöglichkeiten durch die zunehmende Schädigung der Fasern. Sowohl der Druck, als auch der Abstand müssen in einem Prüfstand genau einstellbar sein. Nur so kann ein optimales Spreizergebnis bei hinnehmbarer Faserschädigung identifiziert werden. Aus dieser Erkenntnis heraus ergibt sich die Entscheidung für **Parameter zwei**. Durch das Anlegen eines Unterdrucks kann maximal ein Druckunterschied von einem bar erzeugt werden. Die Versuche mit Überdruck haben jedoch gezeigt, dass der Druck jenseits von 2 bar liegen muss. Die von einem Unterdruck erzeugte Strömung reicht somit nicht aus, um ein Spreizeffekt zu erzielen.

Die bisher verwendete Düse Windjet 727 verfügt über 16 kreisförmige Öffnungen mit 1 mm Durchmesser. Um den Einfluss des **dritten Parameters** (Düsengeometrie) zu untersuchen, wurden mit den in Abbildung 4.19 dargestellten Düsen Vergleichsversuche durchgeführt.

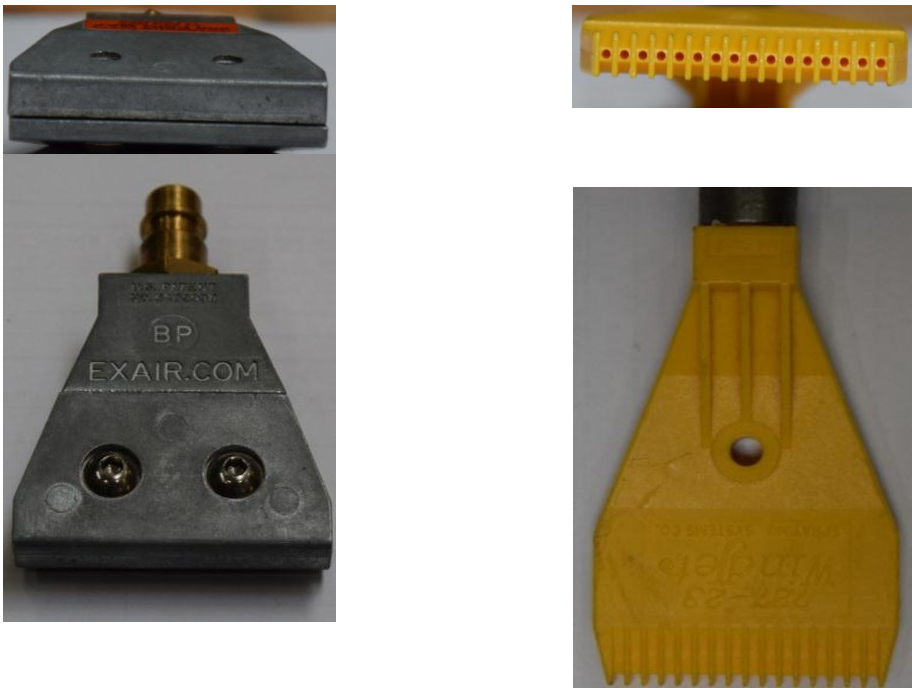


Abbildung 4.19: Schlitzförmige (links) und runde Düsenaustrittsgeometrie (rechts)

Die Flachstrahldüse mit einem länglichen Schlitz als Austrittsgeometrie schneidet dabei wesentlich schlechter ab. Die einzelnen, feinen Strahle der Windjet Düse treiben die Filamente deutlich effektiver auseinander. Diese Düse wird daher für alle weiteren Versuche verwendet. Eventuell kann durch eine eigens für den Spreizprozess entwickelte Düse das Ergebnis weiter verbessert werden, allerdings sind hierfür weiterführende Untersuchungen notwendig.

Mit einem Versuch, bei dem die Düse unmittelbar hinter dem Flechtring, mit Ausrichtung auf den Flechtkegel, angebracht ist, soll **Parameter eins** bestimmt werden. In Abbildung 4.20 ist zu erkennen, dass die Fäden im Flechtkegel zwar gespreizt werden, durch die anschließende, wenn auch nur kurze Bewegung bis zur Ablage auf dem Kern jedoch wieder gestaucht werden. Der Spreizeffekt lässt sich bei den auf dem Kern abgelegten Fäden kaum noch nachweisen. Das pneumatische Spreizen nach der Ablage auf dem Kern ist erheblich effektiver.

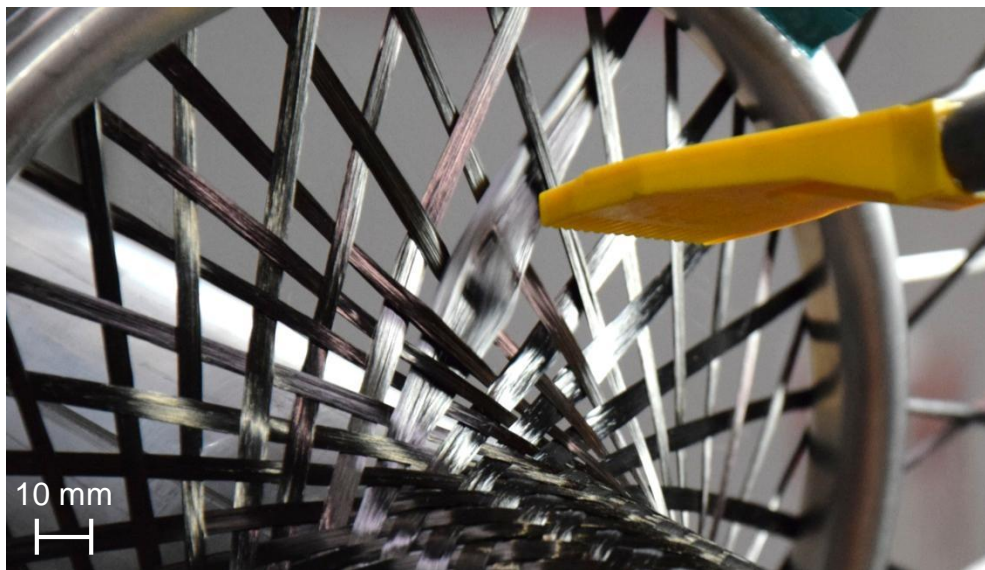


Abbildung 4.20: Pneumatisches Spreizen am Flechtkegel

Abbildung 4.21 zeigt den Aufbau des Prüfstandmoduls *Düsenring*. Die Düse ist in ihrem Abstand senkrecht zur Kernoberfläche frei einstellbar. Durch den Kernabzug entsteht eine Relativbewegung zwischen Düse und Geflecht. Zusätzlich ist die Düse axial beweglich gelagert (grüner Pfeil), sodass die Bewegung verstärkt werden kann.

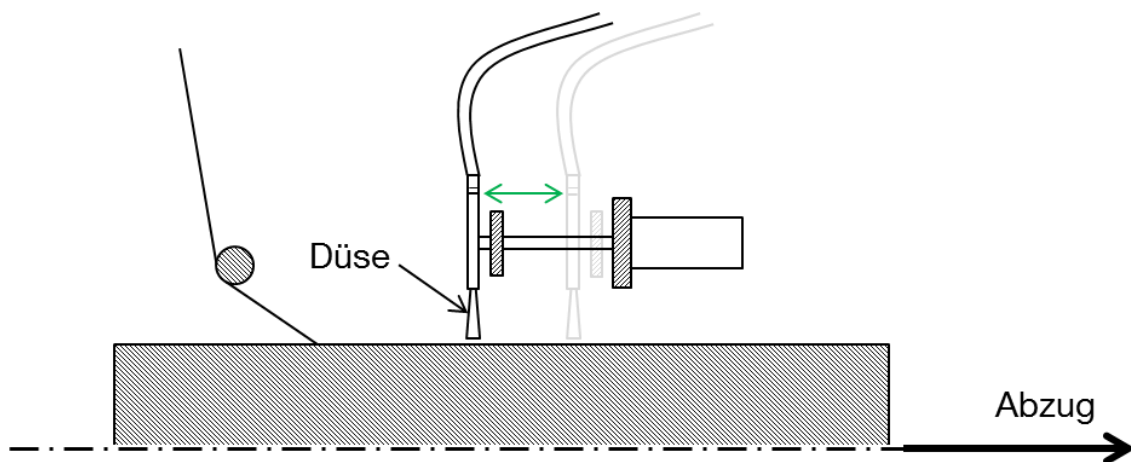


Abbildung 4.21: Schematische Darstellung des Prüfstandmoduls *Düsenring*

In Tabelle 4-5 sind alle Ergebnisse der Vorversuche zusammengefasst, welche bei der Konstruktion des Gesamtprüfstandes berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 4-5: Parameter für das Prüfstandmodul *Düsenring*

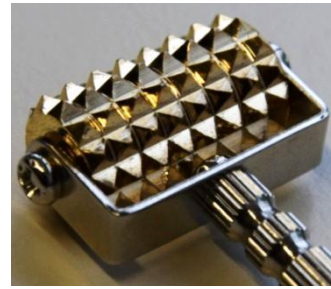
Parameter	Einstellung
Spreizort	Nach der Ablage
Strömungsart	Druckluft
Düsenart	Windjet 727
Druck	Einstellbar; mindestens 2 bar
Abstand	Einstellbar; ca. 5 mm- 10 mm
Ausrichtung	Senkrecht zur Geflechttoberfläche
Bewegungsrichtung	Parallel zur Abzugsrichtung

4.3.4. Modul 4: Walzenring

Die **Oberflächengeometrie** der Walzen hat einen erheblichen Einfluss auf das Spreizergebnis. Eine glatte Oberfläche zeigt nahezu keine Wirkung, wohingegen bestimmte Profile zu einer straken Schädigung des Geflechts führen. In Abbildung 4.22 sind vier Walzen dargestellt, welche während der per Hand durchgeführten Vorversuche Verwendung fanden. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Oberfläche mit spitzzulaufenden Ausprägungen, wie im Fall der Geometrie (3), das beste Ergebnis erzielt. Durch diese Geometrien wird die Kraft nur lokal eingebracht, was in diesen Bereichen ein Auseinandertreiben der Filamente zur Folge hat. Da die Fasern nicht über die gesamte Länge der Walze, wie bei Walzengeometrie (1), durch die Anpresskraft fixiert sind, können die Filamente aneinander abgleiten und sich somit breiter ablegen. Die Oberfläche der Walze (2) führt allerdings bereits nach wenigen Bearbeitungszyklen zu einer erheblichen Schädigung der Fasern. Die rillenförmige Ausprägung der Oberfläche ist daher vorzuziehen. Die Oberflächenbeschaffenheit ist somit für die Versuche festgelegt; der Walzendurchmesser soll hingegen einstellbar sein.



(1)



(2)



(3)

Abbildung 4.22: In Vorversuchen untersuchte Walzengeometrien (10 mm Durchmesser)

Die **drehbare Lagerung** der Walze ist für die Spreizbreite von untergeordneter Bedeutung, allerdings führt eine feste Walze zu einer Gleitbewegung gegenüber dem Geflecht, was die Fasern deutlich schädigt.

Die **Bewegungsrichtung** folgt der gleichen Logik, wie die der Düsen. Ideal ist eine Bewegung parallel zur Faserrichtung und am nachteiligsten ist die Bewegung quer zum Faden. Auf Grund der zwei Fadenrichtungen in einem biaxialen Geflecht, stellt die Kernlängsachse, also die Abzugsrichtung das Optimum dar.

Bei den Vorversuchen konnte die Dosierung der **Anpresskraft** zwar nur qualitativ stattfinden, gleichwohl konnte eine starke Korrelation zwischen der aufgebrachten Kraft und dem Spreizergebnis festgestellt werden. Je höher die Anpresskraft, desto breiter werden die Fäden gespreizt. Begrenzt wird dieser Zusammenhang durch die mit der steigenden Anpresskraft zunehmende Faserschädigung, daher die Beschränkung auf circa 50 N.

Tabelle 4-6 beinhaltet eine Zusammenstellung der Parameter für den Walzenring.

Tabelle 4-6: Parameter für das Prüfstandmodul *Walzenring*

Parameter	Einstellung
Walzengeometrie	Rillen in Umfangsrichtung; Durchmesser variabel
Walzenlagerung	Drehbar
Bewegungsrichtung	Parallel zur Abzugsrichtung
Anpresskraft	Einstellbar; bis ca. 50 N

Bei der Konstruktion der Walzenführungselemente, welche zu dem Modul Walzenring zusammengebaut werden, muss auf die Einstellbarkeit der Anpresskraft geachtet werden. Abbildung 4.23 zeigt den Aufbau eines solchen Elements. Die Walze wird drehbar auf einem U-förmigen Träger befestigt. Dieser ist auf der Stirnfläche eines Zylinders angebracht, welcher mit einer Spielpassung in dem Führungsrohr axial verschiebbar gelagert ist.

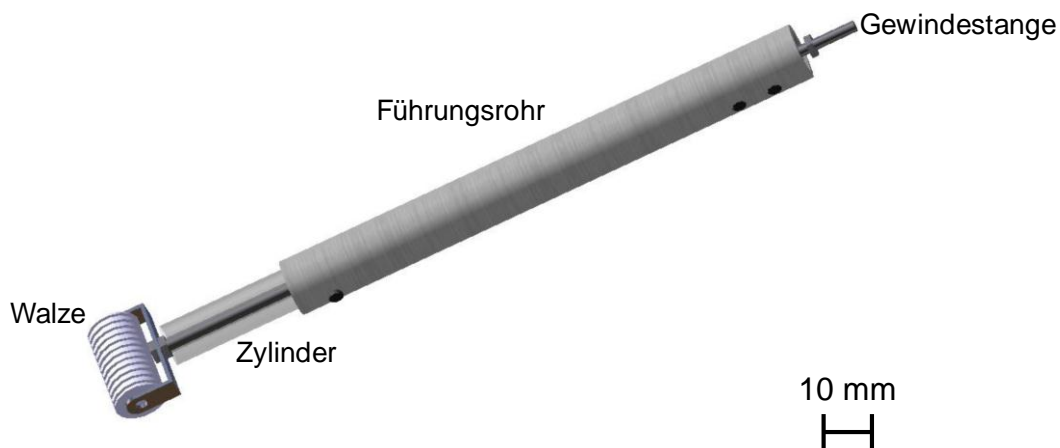


Abbildung 4.23: Aufbau eines Walzenführungselements

Der Zylinder ist wesentlich kürzer als das Führungsrohr, sodass der Zylinder nur um ein kurzes Stück in das Rohr hineinragt. Der Hohlraum bis zum oberen, geschlossenen Ende des Rohrs wird mit einer Feder besetzt, welche den Zylinder aus dem Führungsrohr drückt und somit die Anpresskraft der Walze erzeugt. Diese kann durch den Einsatz unterschiedlicher Federstärken variiert werden. An dem im Rohr befindlichen Ende des Zylinders, wird eine Gewindestange angebracht, welche durch eine kleine Öffnung am oberen Ende des Führungsrohrs geführt wird. Durch das Aufbringen einer Mutter wird das vollständige Herausrutschen des Zylinders vermieden. Um während des Betriebs die korrekte Ausrichtung der Walze zur Bewegungsrichtung sicherzustellen, wird der Zylinder mit einer axial verlaufenden Nut gefertigt, in wel-

cher ein im Führungsrohr befestigter Bolzen läuft. Über das Führungsrohr findet die Anbindung der Walzenführungselemente an die restliche Konstruktion statt.

4.3.5. Integration der Module zum Gesamtprüfstand *prozessintegriertes Spreizen*

Von den vier vorgestellten Modulen, sollen nur die letzten drei umgesetzt werden. Bei dem ersten Modul (ultraschallangeregter Flechtring) zeigte sich im Laufe der Vorversuche, dass eine Umsetzung nur mit einem abgestimmten System aus Ultraschallsonotrode und Flechtring Aussicht auf Erfolg hat. Da ein solches System nur mit beträchtlichen Kosten umzusetzen ist, wird auf eine Realisierung zu Gunsten der anderen Konzepte verzichtet.

Mit dem zu entwerfenden Gesamtprüfstand wird das Ziel verfolgt, eine dem späteren Serienprozess ähnliche Umgebung zu schaffen, in welcher Verständnis des neuen Prozesses aufgebaut werden kann. Der Prüfstand muss eine reproduzierbare Versuchsdurchführung ermöglichen.

Abbildung 4.24 zeigt das CAD-Modell des Gesamtprüfstands. Ähnlich dem in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Aufbau des Moduls *pulsierender Flechtring*, besteht die Konstruktion aus zwei Hauptbestandteilen: einer statischen Baugruppe, welche über vier Haltearme mit der Flechtanlage verbunden ist, und einer beweglichen Baugruppe, welche auf den Kolbenständen dreier Pneumatikzylinder montiert ist.

Das tragende Element der statischen Baugruppe ist eine achteckige Grundplatte, an welcher die Haltearme, die Pneumatikzylinder und der äußere, feststehende Flechtring befestigt sind. Die bewegliche Baugruppe umfasst die drei Spreizmodule: den pulsierenden Flechtring, die Düsen und die Walzen.

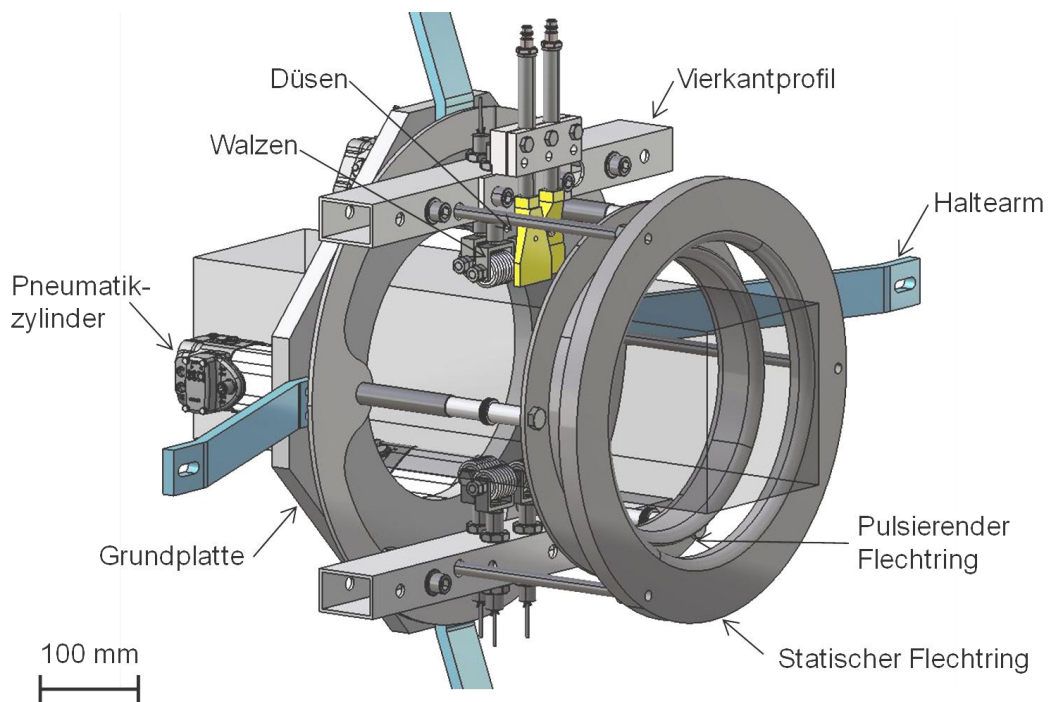


Abbildung 4.24: Gesamtprüfstand *prozessintegriertes Spreizen* [61]

Die Versuche sollen auf einem rechteckigen Kern durchgeführt werden, wobei nur eine Seite des Kerns bearbeitet wird. Die Beschränkung auf eine Seite reduziert den Aufwand bei der Einstellung der Parameter und hat eine schlankere Konstruktion zur Folge. Daher werden die Düsen und Walzen nicht ringförmig angeordnet, sondern auf einem Vierkantprofil befestigt. In Abbildung 4.25 ist eine Detailaufnahme dieser Baugruppe dargestellt. Die Führungsrohre der Walzenführungen sind hohle Gewindestangen, welche jeweils über zwei Muttern mit dem Vierkantprofil verschraubt sind. Die Halterung für die zwei Düsen kann sowohl an dem vorderen, als auch an dem hinteren Steg des Profils befestigt werden.

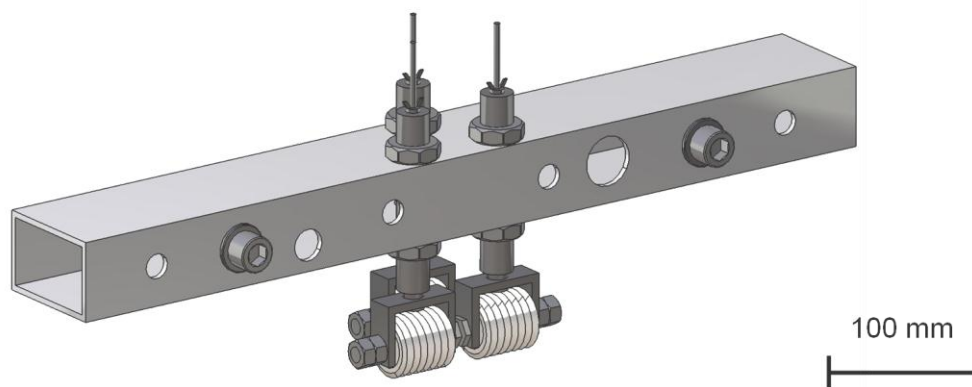


Abbildung 4.25: Anbringung der Walzenführungselemente über ein Vierkantprofil [61]

Eine einseitige Walzenbearbeitung würde auf Grund der Anpresskraft zu einer Auslenkung des Flechtkegels führen, sodass auf der Unterseite ebenfalls Walzen vorzusehen sind. Das untere und obere Vierkantprofil wird auf einem Ring montiert, welcher die von der Anpresskraft der Walzen verursachten Radialkräfte aufnimmt. Dieser Ring wird an den Pneumatikzylindern befestigt. An Verlängerungsstäben, welche den Flechtkegel von dem Vierkantprofil entfernen, wird der pulsierende Flechtring angebracht. Auf einen ausreichenden Abstand zwischen der Nachbearbeitung mit den Düsen und Walzen und dem Flechtkegel ist zu achten, damit kein Kontakt mit dem Flechtkegel zustande kommt.

Der Prüfstand kann sowohl mit allen Spreizmodulen, wie in Abbildung 4.24, gleichzeitig betrieben werden, als auch nur mit einzelnen.

4.4. Parameterstudie an dem Prüfstand *prozessintegriertes Spreizen*

An dem in Abschnitt 4.3.5 vorgestellten Prüfstand ergeben sich eine Vielzahl an Einstellmöglichkeiten. Um den Einfluss und die Wechselwirkungen einer möglichst großen Anzahl von diesen Parametern bewerten zu können, wird ein Screening-Versuch mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung durchgeführt. Mit dem erworbenen Wissen kann die Anlage optimiert und eine serientaugliche Weiterentwicklung spezifiziert werden.

4.4.1. Festlegung der Faktoren und Zielgrößen

Bei der statistischen Versuchsplanung wird zwischen Einflussgrößen und Faktoren unterschieden. Einflussgrößen sind alle beeinflussbaren (Steuergrößen) und nicht beeinflussbaren (Störgrößen) Größen, welche möglicherweise einen Einfluss auf die Zielgröße haben. Als Faktoren wird die Teilmenge der Einflussgrößen bezeichnet, welche im Rahmen eines Versuchsplans untersucht wird. [33] Bevor also der Versuchsplan erstellt werden kann, muss die Auswahl der Faktoren stattfinden.

4.4.1.1. Sammlung und Diskussion der Einflussgrößen

In Tabelle 4-7 sind alle Einflussgrößen, welche an dem Prüfstand selbst und an der Flechtanlage eingestellt werden können, aufgeführt. Störgrößen, wie beispielsweise die Luftfeuchtigkeit oder Produktionstoleranzen von Seiten des Faserherstellers, sollen vorerst nicht berücksichtigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Steuergrößen wesentlich stärker ist und die Störeinflüsse somit ohnehin kaum messbar sind. Treten bei der Auswertung jedoch unerklärliche Effekte

auf, muss dieser Gedanke erneut aufgegriffen und das Versuchsprotokoll nach möglichen Störeinflüssen durchsucht werden.

Wie bereits erwähnt, werden nicht alle Einflussgrößen als Faktoren für die Versuchsplanung herangezogen. Mit der in Tabelle 4-7 aufgeführten, hohen Anzahl an Stellgrößen, wäre selbst eine teilfaktorielle Versuchsdurchführung schlichtweg nicht praktikabel. Daher werden einige Größen in Vorversuchen untersucht und nur die mit *Faktor* gekennzeichneten Größen halten Einzug in den Versuchsplan.

Das gesamte Modul *pulsierender Flechtring* wird in einem Vorversuch getrennt betrachtet. Die Entwicklung der Module *Walzen* und *Düsen* in Kapitel 4.3 wurde mit Hilfe von Voruntersuchungen durchgeführt. Auf Grund der Beobachtungen konnten einige Einflussgrößen, wie beispielsweise die Bewegungsrichtung der Düsen, bereits festgelegt werden. Analog dazu sollen mit Vorversuchen am pulsierenden Flechtring Einflussgrößen untersucht werden. Ihr Optimum wird in dem anschließenden Screening-Versuch als Konstante eingehen.

Die Variation des Walzendurchmessers im Versuchsplan führt zu einem hohen Umbauaufwand, sodass diese Steuergröße ebenfalls in einem Vorversuch betrachtet wird.

Tabelle 4-7: Einflussgrößen beim prozessintegrierten Spreizen

	Einflussgröße	Untersuchungsart
Pulsierender Flechtring	Hub	Vorversuche
	Durchmesserunterschied innerer Flechtring zu Kern ($d_i - d_{Kern}$)	Vorversuche
	Frequenz	Vorversuche
Düsen	Abstand	Faktor
	Druck	Faktor
	Frequenz	Faktor
	Strömung	Faktor
Walzen	Anpresskraft	Faktor
	Durchmesser	Vorversuche
	Frequenz	Faktor
Gesamt-modul	Abstand Walzen/Düsen zum Flechtpunkt	Vorversuche
	Reihenfolge Düsen/Walzen	Faktor
Flechthanlage	Abbindung	Konstante
	Fadenspannung	Faktor
	Fasertyp	Konstante
	Flechtwinkel	Konstante
	Produktionsgeschwindigkeit	Konstante

Die Steuergrößen an der Flechthanlage (Fasertyp, Flechtwinkel, Produktionsgeschwindigkeit und Anlagenbesetzung) werden für den Screening Versuch nicht variiert. Ihre Ausprägung wird bei der Erstellung des Versuchsplans festgelegt. Nach der Auswertung muss untersucht werden, ob sich die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Ausprägungen übertragen lassen.

4.4.1.2. Vorversuche zur Untersuchung ausgewählter Einflussgrößen

In den folgenden Abschnitten werden die Einflussgrößen aus Tabelle 4-7 untersucht, welche nicht als Faktoren in den Versuchsplan aufgenommen werden sollen.

Pulsierender Flechtring

Das Modul pulsierender Flechtring wurde auf Basis der Patentschrift [60] konzipiert. Darin wird argumentiert, dass die geringere Scherbelastung der Fasern die Schädigung verringert und die Materialqualität somit verbessert. Der erhoffte Effekt auf die Faserbreite muss noch nachgewiesen und auf den Einfluss der Parameter untersucht werden. Die drei Parameter sind Tabelle 4-7 zu entnehmen. Drei doppelwirkende *Integrated Valve Actuator Control (IVAC)* Pneumatikzylinder der Firma Norgren treiben den pulsierenden Flechtring an. Sie verfügen nominell über einen Hub von 50 mm und bei 6 bar über eine Kraft von jeweils 754 N. Die Frequenz wird durch die Aerodynamik innerhalb des Zylinders begrenzt. Zwar ist auch eine Frequenz jenseits von 10 Hz einstellbar, allerdings kann die Luft den Zylinder in der Zeit von einer Hubbewegung nicht mehr vollständig füllen, sodass der Hub niedriger ausfällt. Abbildung 4.26 kann diesen Zusammenhang entnommen werden: bei 6 Hz sind nur noch 42 mm und bei 10 Hz 28 mm Hub möglich.

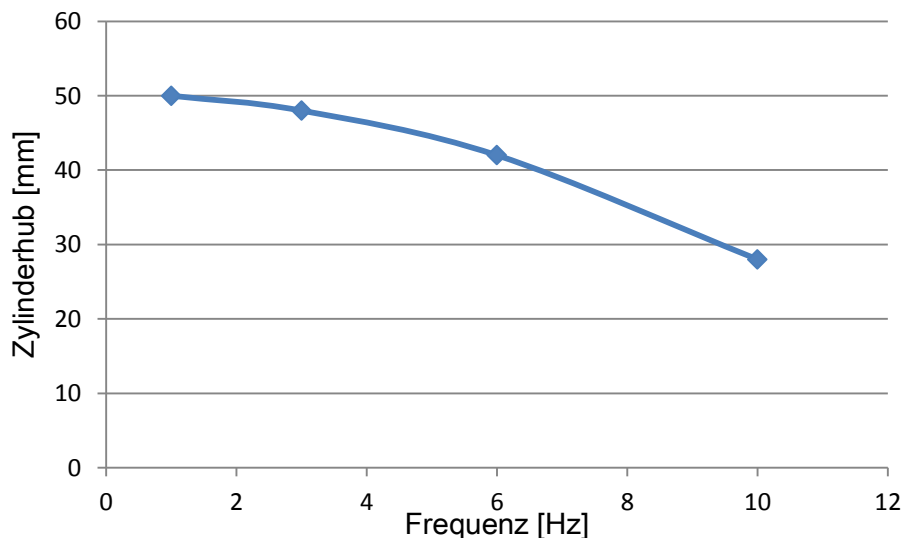


Abbildung 4.26: Abhängigkeit des Zylinderhubs von der Frequenz

Die Auswirkung der Frequenz auf den Hub muss bei deren Einstellung berücksichtigt werden. Die drei Pneumatikzylinder erfüllen somit die an das Modul *pulsierender Flechtring* gestellten Anforderungen. (siehe Abschnitt 4.3.2)

Tabelle 4-8 enthält die Zusammenstellung der Versuchsparameter für die im Folgenden beschriebenen Versuche.

Tabelle 4-8: Parameter für die Vorversuche am pulsierenden Flechtring

Parameter	Einstellung
Fasern	24k HT, 1600 tex
Klöppelfeder	350 g
Flechtwinkel	$\pm 45^\circ$
Kerndurchmesser	110 mm

In der ersten Versuchsreihe wird der Einfluss der **Frequenz** auf die Faserbreite untersucht. Mit der gewählten Flechtringpaarung ($d_i = 120$ mm, $d_a = 170$ mm) ist gemäß Formel (4.2) ein Mindesthub von 27 mm notwendig. Dieser wird in allen Frequenzbereichen erreicht. Die Fadenbreite wurde mit dem in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Messsystem an sechs, entlang der Kernachse und des Kernumfangs verteilten Aufnahmen gemessen. Versuche wurden für die vier Stützstellen 0 Hz, 3 Hz, 6 Hz und 10 Hz durchgeführt. Abbildung 4.27 zeigt die Mittelwerte der an den Stützstellen gemessenen Faserbreite und das dazugehörige Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$ %).

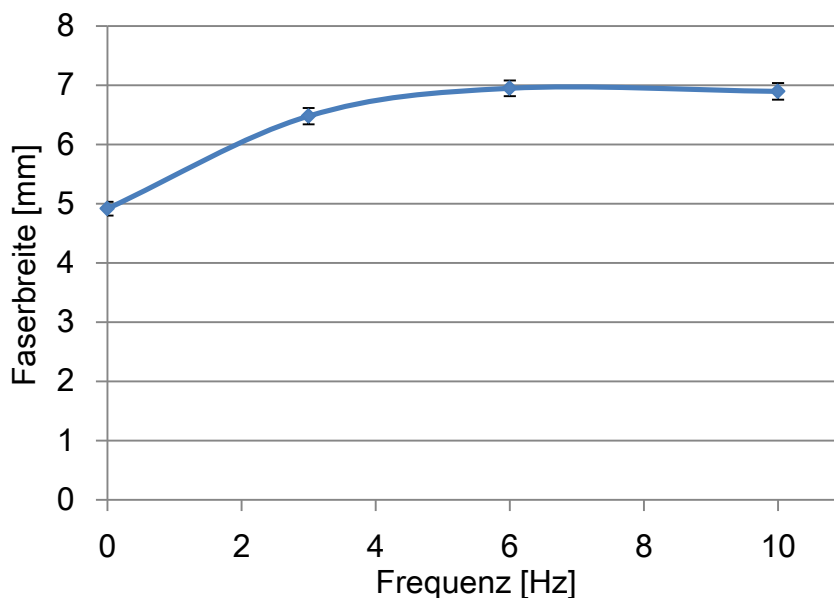


Abbildung 4.27: Abhängigkeit der Faserbreite von der Frequenz des pulsierenden Flechtrings

Die Messwerte zeigen, dass der pulsierende Flechtring einen erheblichen Einfluss auf die Faserbreite besitzt. Die Beobachtung der Flechtfäden im Bereich der Umlenkung um den Flechtring bestätigt die in der Patentschrift beschriebenen Wirkzusammenhänge. Die Behinderung und daraus resultierende Einschnürung der sich kreuzenden Fasern wird durch das kurzzeitige Abheben vom Flechtring vermieden. (Abbildung 4.28) Die Fasern sind gleichmäßig über den Umfang des Rings verteilt, da die Reibung zwischen den Fasern nie groß genug wird, um sie aufzustauen.

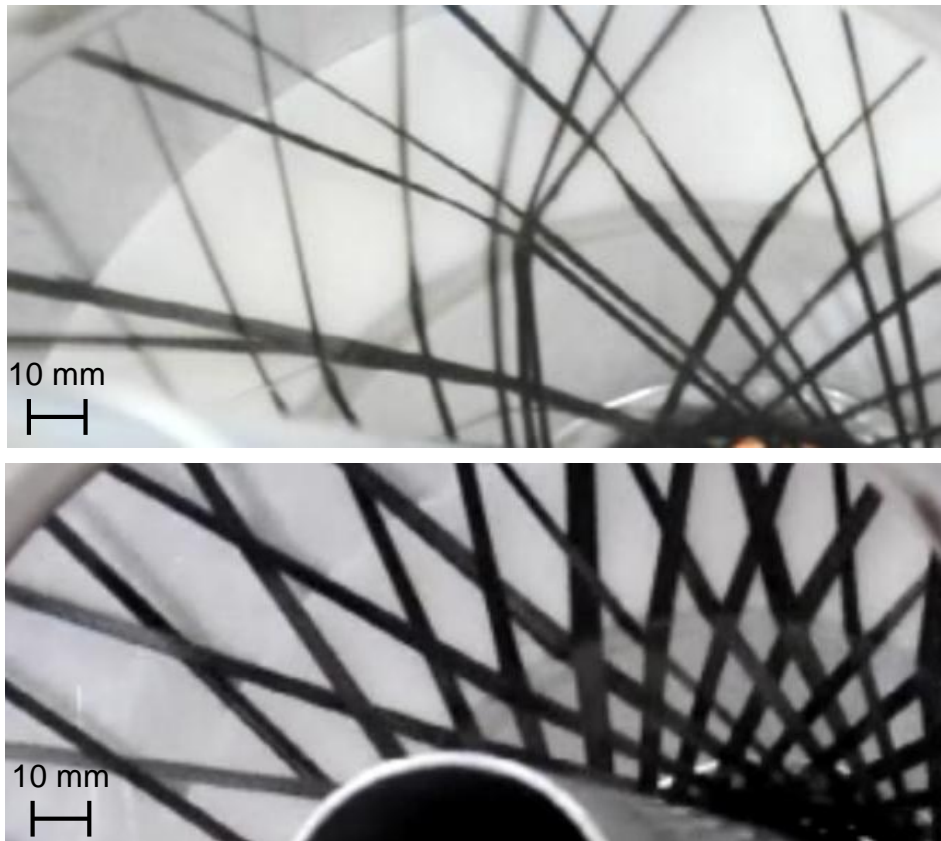


Abbildung 4.28: Geflecht bei der Umlenkung am Flechtring; ohne (oben) und mit (unten) pulsierendem inneren Flechtring

Der Verlauf des Graphs in Abbildung 4.27 verdeutlicht, dass eine bestimmte Mindestfrequenz nötig ist, um das Aufstauen der sich kreuzenden Fadenrichtungen vollständig zu vermeiden. Werden die Fasern noch häufiger (mehr als 6 Hz) angehoben, führt dies zu keiner weiteren Erhöhung der Faserbreite. Laufen die Überkreuzungspunkte schneller über den Flechtring, weil mit einem kleineren Flechtringdurchmesser oder einer größeren Produktionsgeschwindigkeit gearbeitet wird, muss die Frequenz somit höher gewählt werden. Unter den Bedingungen der Screening Versuchsreihe ist eine Frequenz von 6 Hz allerdings ausreichend.

In der zweiten Versuchsreihe wird die Einflussgröße **Hub** betrachtet. Folgt man der Argumentation der Patentschrift, so darf der Hub für eine definierte Flechtringpaarung (d_i/d_a) und einen definierten Flechtwinkel nicht verändert werden; er nimmt nach Formel (4.2) einen fixen Wert an. Der Hub darf, wie in dem vorangegangenen Versuch zur Frequenzvariation, größer sein als der berechnete Wert, was allerdings zu einem unnötig großen Bauraum führt und daher bei einer Serienanlage unerwünscht wäre. Ist der Hub hingegen zu klein, wird der Flechtkegel in den Totpunkten der Hubbewegung nicht vollständig von dem jeweils anderen Ring abgehoben. Somit wird die in der Patentschrift beschriebene Wirkung, nämlich die Verringerung der Reibung zwischen den sich kreuzenden Fasern, nur eingeschränkt erzielt. Diese Aussage soll in dem folgenden Versuch verifiziert werden. Der Hub der Pneumatikzy-

linder kann nicht eingestellt werden, sodass über eine Änderung der Flechtringpaarung ein veränderter Hub simuliert werden muss. Wird $d_a - d_i$ zu groß gewählt, reicht der Hub der Zylinder nicht mehr aus, um den inneren Flechtring am hinteren Totpunkt von den Fasern abzuheben. Somit wird der gleiche Effekt, wie bei einer Verringerung des Zylinderhubes, erzielt. Der Versuch wird mit 6 Hz und einem äußeren Flechtring mit 210 mm Durchmesser ($d_i = 120$ mm) durchgeführt. Für diese Flechtringpaarung ergibt sich ein Mindesthub von 47 mm. Da der Flechtring lediglich um 42 mm verfährt, können nicht beide Flechtringe von dem Flechtkegel abgehoben werden. Die Flechtringe werden daher so positioniert, dass die Fasern im vorderen Totpunkt der Zylinder von dem äußeren Flechtring abgehoben werden, im hinteren Totpunkt der innere Flechtring noch anliegt. Der Vergleich der in Abbildung 4.29 dargestellten Mittelwerte zeigt, dass ein zu geringer Hub (simuliert durch die Flechtringpaarung 120 mm/210 mm) nicht zwangsläufig zu einer niedrigeren Faserbreite führt. Die Fasern werden, obwohl sie nicht mehr vollständig von dem inneren Flechtring abgehoben werden, anscheinend ausreichend entlastet, sodass die Reibung zwischen den Fasern zu niedrig ist, um eine nennenswerte Einschnürung hervorzurufen. Besonders interessant ist dieses Erkenntnis für die Spezifikation einer Serienanlage. Je geringer der Hub gewählt werden kann, desto kleiner fällt der Bauraum des pulsierenden Flechtrings aus. Allerdings muss untersucht werden, wie stark der Hub reduziert werden darf, bis eine Beeinträchtigung des Spreizergebnisses eintritt.

Die dritte Einflussgröße ist der **Abstand zwischen Kern und innerem Flechtring**. Je größer der Abstand, desto länger der Flechtkegel und somit umso länger der Abstand bis zur Kernablage. Hat dieser Parameter einen Einfluss auf die Faserbreite, muss bei der Wahl der Flechtringe auf den Kernumfang geachtet werden. Anstelle des Flechtrings mit 120 mm Durchmesser wird nun einer mit 160 mm verwendet. Die Differenz zwischen den Flechtringen und somit der benötigte Hub, werden wie bei der Frequenzvariation gewählt. Der Vergleich der Mittelwerte in Abbildung 4.29 zeigt, dass der größere Abstand zwischen dem inneren Flechtring und dem Kern eine leichte Abnahme der Faserbreite zur Folge hat. Somit gilt das gleich wie bei einem herkömmlichen Flechtring: dieser sollte möglichst gut an den Umfang des Kerns angepasst werden.

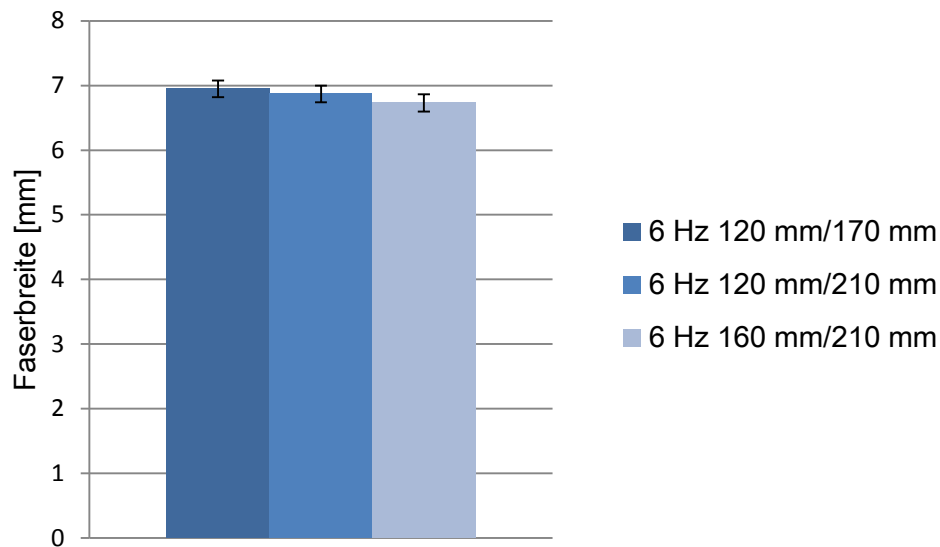


Abbildung 4.29: Faserbreite in Abhängigkeit der Flechtringpaarung d/d_a

Als **Fazit** für die Versuchsplanung bleibt festzuhalten: eine Frequenz von 6 Hz und eine an den Versuchskern angepasste Flechtringpaarung, welche einen ausreichenden Hub ermöglicht, liefern das beste Spreizergebnis.

Walzendurchmesser

Für diese Versuche wurde der Prüfstand nur mit den Walzen betrieben. Die Oberflächegeometrie wurde entsprechend der Erkenntnisse aus den Vorversuchen bei der Modulentwicklung (Abschnitt 4.3.4) mit Rillen in Umfangsrichtung gewählt. Drei Durchmesser wurden betrachtet: 10 mm, 20 mm, 30 mm. Die Versuche fanden unter den gleichen Rahmenbedingungen wie der anschließend durchgeführte Screening Versuch statt. Die Anpresskraft der Walzen betrug circa 20 N. Die Faserbreite wurde nicht gemessen, das Ergebnis war augenscheinlich ähnlich. Erhebliche Unterschiede gab es jedoch bei der Schädigung. Besonders die 10 mm, aber auch die 20 mm Walzen hatten teilweise eine erhebliche Faserschädigung zur Folge. (Abbildung 4.30)

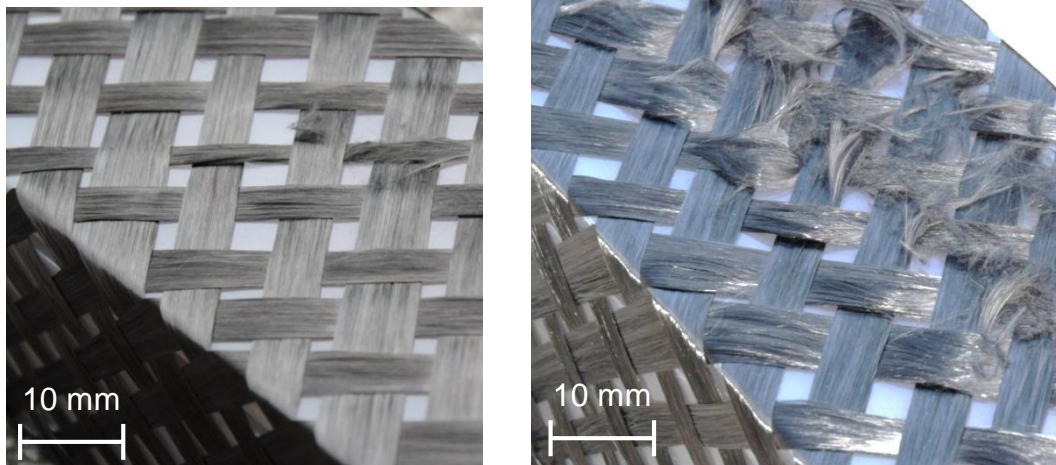


Abbildung 4.30: Leichte (links) und starke (rechts) Faserschädigung durch die Verwendung der 10 mm und 20 mm Walzen

Durch den geringen Durchmesser befindet sich die Führung der kleineren Walzen näher an der Geflechtsfläche. Einzelne, abstehende Filamente können sich darin verhaken und werden von den sich bewegenden Walzen mitgerissen. Dabei werden weitere Filamente gebrochen, was den Schädigungsmechanismus von vorne in Gang setzt. Des Weiteren hat der kleinere Durchmesser eine lokalere Belastung der Fasern zur Folge. Der größere Durchmesser schont die Fasern somit. Da kein Einfluss des Walzendurchmessers auf die Faserbreite ersichtlich war, werden auf Grund der Schädigung die Walzen mit einem Durchmesser von 30 mm für den Versuchsplan verwendet.

Abstand der Nachbearbeitung zum Flechtunkt

Je näher die Nachbearbeitung des Geflechts mit den Düsen und Walzen an den Flechtunkt rückt, desto lockerer ist das Geflecht. Bereits bei den Vorversuchen zur Modulentwicklung des Düsenrings stellte sich heraus, dass das Spreizen des Geflechts im Flechtkegel zu einer unerwünschten Verschiebung der Fasern führt und somit vermieden werden muss. Die Klärung der Frage, wie nah die Walzen und Düsen an den Flechtkegel geführt werden dürfen, ist wichtig für die Festlegung des Flechtwinkels. Je kleiner der Flechtwinkel, umso weiter bewegt sich der Flechtunkt in Richtung Abzug. Für diese Vorversuche wurden daher unterschiedliche Flechtwinkel betrachtet. Das Gesamtmodul wurde mit allen Einzelmodulen und einer Frequenz von 6 Hz betrieben. Die übrigen Parameter entsprechen denen des Hauptversuchs.

Bei einem $\pm 25^\circ$ Geflecht wird der Flechtkegel auf Grund seiner Länge mit den Walzen bearbeitet. Dies führt zu einer starken Schädigung der Fasern, verursacht durch das Verfangen der nicht auf dem Kern abgelegten Fasern in den Walzen. (Abbildung 4.31)

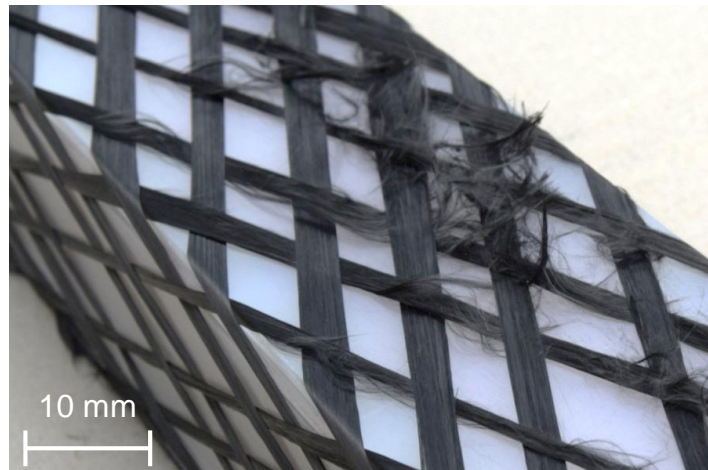


Abbildung 4.31: Schädigung der Fasern bei einem zu geringem Flechtwinkel

Bei dem Prüfstand muss der Flechtwinkel mindestens $\pm 35^\circ$ betragen, um den Kontakt zwischen Walzen und Fasern vermeiden zu können. Für den anschließenden Hauptversuch soll daher ein Winkel von $\pm 45^\circ$ verwendet werden.

Sollen bei einer späteren Serienanlage auch deutlich kleinere Flechtwinkel berücksichtigt werden, muss der Abstand der Walzen und Düsen entsprechend groß gewählt werden. Eventuell ist das Spreizaggregat mit Walzen und Düsen von dem Flechtprozess zu trennen.

4.4.1.3. Die Zielgrößen

Das Ziel des prozessintegrierten Spreizens besteht in der Vermeidung der für die mechanischen Kennwerte ungünstigen Lücken in der Geflechtarchitektur. Dies wird durch die Erhöhung der Faserbreite erreicht. Wird die Faserbreite gemessen, kann direkt beurteilt werden, in wie weit der Prozess seine Aufgabe erfüllt. Folglich ist dies die wichtigste Zielgröße. Die Faserbreite wird mit dem in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Messsystem bestimmt.

Bei den Voruntersuchungen zeigte sich, dass bei einer ungünstigen Wahl der Parameter besonders bei der Nachbearbeitung mit den Düsen und Walzen, teilweise erhebliche Faserschädigung entsteht. Die Schädigung wirkt dem eigentlichen Ziel, nämlich die mechanische Leistungsfähigkeit der Geflechtarchitektur zu erhöhen, entgegen. Somit wird die Schädigung als weitere Zielgröße, welche es zu minimieren gilt, aufgenommen. Da keine quantifizierbare Größe für die Charakterisierung der Schädigung von Geflechten existiert, findet die Bewertung an Hand einer Zuweisung in fünf Kategorien statt. (

Tabelle 4-9) Die Zuweisung in diese Kategorien wird über Geflechtmerkmale, welche optisch identifiziert werden, vollzogen.

Tabelle 4-9: Schädigungsklassen zur Bewertung der Zielgröße Faserschädigung

Schädigungsklasse	Beschreibung
0	Keine Schädigung
1	Leichte Schädigung; einzelne Filamente stehen ab
2	Mittlere Schädigung; viele einzelne Filamente und einige größere Filamentbündel stehen ab
3	Starke Schädigung; viele abstehende Filamentbündel
4	Sehr starke Schädigung; keine Faserbereiche ohne ausgeprägte Schädigung

Ab der dritten Stufe kann davon ausgegangen werden, dass eine negative Beeinträchtigung der mechanischen Kennwerte in Faserrichtung messbar ist. Abbildung 4.32 zeigt Beispielaufnahmen der fünf Schädigungsklassen.

Auf Grund der subjektiven Bewertung der Schädigung, darf den Ergebnissen nicht die gleiche Geltung, wie die der Faserbreitenuntersuchung beigemessen werden. Die Erkenntnisse der Versuche sollen lediglich als Anhaltspunkte dienen, welche bei der Prozessoptimierung die Identifizierung von ungünstigen Parameterkombinationen erleichtert.

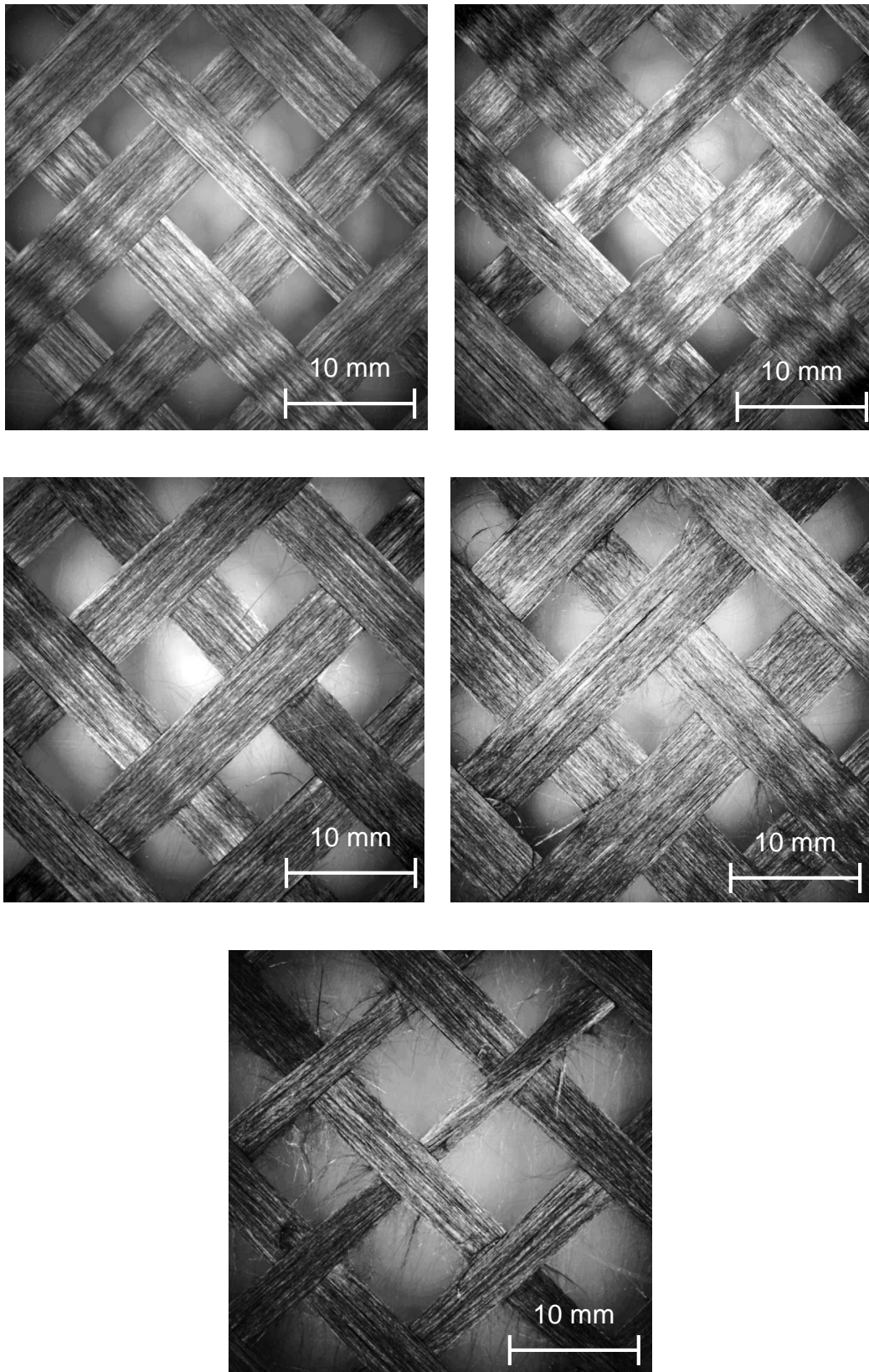


Abbildung 4.32: Beispielaufnahmen zu den Schädigungsklassen 0 bis 4 (von oben links nach unten)

4.4.2. Aufstellung des Versuchsplans

Aus der vorangegangenen Diskussion der Einflussgrößen gehen die acht, in Tabelle 4-10 aufgeführten, Faktoren hervor. Um mit einer bewältigbaren Anzahl an Versuchen eine ausreichende statistische Genauigkeit erlangen zu können, wird der Versuchsplan zweistufig erstellt. Jeder Faktor kann zwei Stufen einnehmen, sodass bei der Auswertung ein linearer Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße ermittelt wird. Die genaue Abhängigkeit wird somit nicht beschrieben, sondern lediglich die Tendenz. Bei der Wahl der Stufen muss den in Abschnitt 0 erläuterten Hinweisen Rechnung getragen werden.

Der **pulsierende Flechtring** wird mit einem Faktor berücksichtigt, welcher vorgibt, ob der innere Flechtring im Gesamtmodul eingebaut ist. Sowohl die Festlegung auf den fixen Abstand der **Düsen** als auch die Abstufung zwischen 0 bar und 2,5 bar entspringen den in den Vorversuchen gesammelten Erfahrungen. Ähnlich wie bei der Abstufung der **Walzenanpresskraft** muss zwischen zu starker Schädigung und ausreichender Spreizwirkung abgewogen werden. Die **pulsierende Druckluft** ist in Tabelle 4-7 als *Strömung* bezeichnet. Hiermit wird geprüft, ob das periodische Ein- und Ausschalten der Druckluft, im Gegensatz zu einer kontinuierlichen Strömung, einen zusätzlichen Spreizeffekt erzielt. Unter **Zylinderfrequenz** ist die Frequenz der Walzen und Düsen zusammengefasst, da beide auf den gleichen Pneumatikzylindern montiert sind. Sofern der pulsierende Flechtring eingebaut ist, wird dieser ebenfalls mit 0 Hz oder 6 Hz angetrieben. Durch das Umdrehen des im Gesamtmodul verbauten Vierkants, kann die **Nachbearbeitungsreihenfolge** verändert werden.

Tabelle 4-10: Faktoren für den Screening Versuch

Faktoren	Stufen	Bezeichnung im Versuchsplan
Pulsierender Flechtring	Ja	Flechtring
	Nein	
Düsen (Abstand: 6 mm)	0 bar	Düsen
	2,5 bar	
Pulsierende Druckluft	0 Hz	puls. Luft
	5 Hz	
Zylinderfrequenz	0 Hz	Zylinder
	6 Hz	
Anpresskraft	0 N	Walzen
	24 N	
Nachbearbeitungsreihenfolge	Düsen zuerst	Reihenfolge
	Walzen zuerst	
Klöppelfedern	350 g	Federn
	600 g	

Die Fadenspannung kann über den Wechsel der innerhalb des Klöppels befindlichen Federn variiert werden. Die verwendeten 24k Fasern lassen sich erfahrungsgemäß am besten mit den 350 g Federn verarbeiten. Da von dem Spreizen einzelner Fasern bereits bekannt ist, dass die Fadenspannung einen großen Einfluss auf das Spreizergebnis hat, wird mit dem Einsatz der 600 g Federn untersucht, ob dies auch für das flechtprozessintegrierte Spreizen gilt. Mit der höheren Fadenspannung geht eine leichte Faserschädigung einher, welche sich durch abstehende Filamente bemerkbar macht. Das Ausmaß ist jedoch so gering, dass eine Auswirkung auf die mechanischen Kennwerte unwahrscheinlich ist.

Die sieben Faktoren mit jeweils zwei Stufen ergeben 128 Faktorstufenkombinationen. Auf Grund des Umrüstaufwands zwischen jeder Versuchsreihe, wird auf einen vollfaktoriellen Versuchsplan verzichtet. Daher wird nur ein teilfaktorieller Versuchsplan mit 32 Faktorstufenkombinationen aufgestellt. Mit diesem Umfang kann eine Auflösung der Stufe IV erreicht werden. (siehe Abschnitt 0) Die Reduzierung der Versuchsanzahl führt zu einer Vermengung der Faktoren mit Dreifachwechselwir-

kungen (3FWW) und der 2FWW mit anderen 2FWW. Für den betrachteten Prozess kann davon ausgegangen werden, dass 4FWW nicht existieren oder zumindest nur einen geringen Einfluss besitzen. Daher werden sie vernachlässigt. Treten Effekte auf, welche auf Grund der Vermengung mit einer 2FWW oder 3FWW nicht eindeutig zugeordnet werden können, müssen weitere Versuche durchgeführt werden, sofern eine der Wechselwirkungen nicht technisch ausgeschlossen werden kann.

Anhang B enthält den vollständigen Versuchsplan.

4.4.3. Versuchsdurchführung

In Tabelle 4-11 sind die Einflussgrößen, welche während der Versuchsdurchführung konstant sind, aufgeführt. Der Versuchskern besitzt einen quadratischen Querschnitt. Mit der quadratischen Form kann eine gleichmäßige Faserablage gewährleistet werden. Durch eine Veränderung des Aspektverhältnisses, weg von einem quadratischen Querschnitt, würde es zu einer zunehmenden Verzerrung des Flechtwinkels kommen (sogenannter S-Schlag). Zwei gegenüberliegende Seiten müssen stets parallel zu den bearbeitenden Düsen und Walzen ausgerichtet sein. Die anderen beiden Seiten werden von keinem der beiden Nachbearbeitungsmechanismen behandelt.

Tabelle 4-11: Konstante Einflussgrößen

Parameter	Einstellung
Fasern	24k HT, 1600 tex
Flechtwinkel	$\pm 45^\circ$
Anlagenbesetzung	64 Flechtfäden
Abzugsgeschwindigkeit	0,0286 m/s
Flügelraddrehzahl	80 U/min
Kernumfang	670 mm
Flechtringdurchmesser d_i/d_a	250 mm/ 290 mm

Pro Faktorstufenkombination wird der Kern einmal beflochten. Nach dem Beflechten des gesamten Kerns mit der zu untersuchenden Faktorstufenkombination, wird das Geflecht an den Enden mit Klebeband fixiert und der Geflechtschlauch abgetrennt. Die Aufnahmen mit dem Profactor Sensor werden nach der Entnahme des Kerns aus der Robotereinspannung gemacht. Jeder Kern wird auf der Ober- und Unterseite an

vier unterschiedlichen Positionen erfasst. (Abbildung 4.33) Die Messpunkte der Oberseite werden für den eigentlichen Screening Versuch herangezogen.

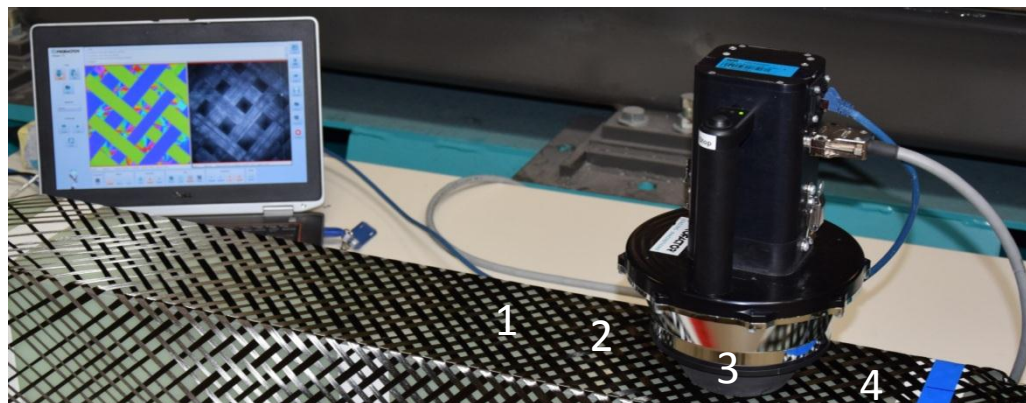


Abbildung 4.33: Aufnahmepositionen des Geflechts mit dem Profactor Sensor

Die Unterseite verfügt über keine Düsenbearbeitung, sondern lediglich über die Walzen, welche als Widerlager zu der Kraft der Walzen auf der Oberseite dienen. (siehe Konstruktionsbeschreibung Abschnitt 4.3.5) Da die zusätzliche Aufnahme der Messpunkte auf der Unterseite bei der Versuchsdurchführung nur einen geringfügigen Mehraufwand bedeutet, werden diese ebenfalls erfasst. Bei der Auswertung werden die Messwerte der Ober- und Unterseite gegenübergestellt, um eine Aussage über die Güte der gemessenen Faserbreiten treffen zu können. Sofern keine Düsen verwendet werden, sollte die gemessene Breite auf der Ober- und Unterseite im Rahmen der Fehlerwahrscheinlichkeit gleich sein. Darüber hinaus kann der Vergleich Anhaltspunkte liefern, welche bei der Erklärung der Haupteffekte und Wechselwirkungen dienlich sind.

Da die Bearbeitung sowohl mit den Walzen, als auch mit den Düsen nicht über die gesamte Breite der Ober- und Unterseite stattfindet, muss darauf geachtet werden, dass die Aufnahmen im Bereich der Bearbeitung liegen.

Die Auswertung der Aufnahmen findet mit der in Abschnitt 2.2.1.2 beschriebenen MATLAB-Routine nach Beendigung der Versuche statt.

4.4.4. Auswertung

Die Auswertung der Versuche mit Minitab findet in drei Schritten statt:

1. Bestimmung der Effekte und Wechselwirkungen mit einem signifikanten Einfluss auf die Zielgröße
2. Analyse der Haupteffekte
3. Analyse der Wechselwirkungen

Diese Schritte werden für die beiden Zielgrößen *Faserbreite* und *Faserschädigung* getrennt vollzogen.

4.4.4.1. Betrachtung der Zielgröße *Faserbreite*

Bevor die drei Schritte gemäß der Auswertung nach Minitab abgearbeitet werden, findet die Gegenüberstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen von den Messungen an der Ober- und Unterseite des Kerns statt.

Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen der Einzelversuche

Die konkreten Zusammenhänge zwischen den Faktoren und der Zielgröße Faserbreite können erst mit Hilfe der von Minitab erzeugten Diagramme identifiziert werden. Die Betrachtung der Mittelwerte in Abbildung 4.34 dient lediglich einer qualitativen Vorbetrachtung, welche die Interpretation der Effekt- und Wechselwirkungsdiagramme erleichtern soll.

Die graphische Darstellung aller Messpunkte (die Streuung ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angetragen) in Abbildung 4.34 zeigt, dass je nach Faktorkombination ein erheblicher Unterschied in der Faserbreite und somit ein deutlicher Spreizeffekt feststellbar ist. Entlang der grünen Linie pendeln sich all jene Messpunkte ein, welche einem Geflecht entstammen, was keinem der Spreizmechanismen ausgesetzt wurde. Diese Linie repräsentiert das Referenzgeflecht, also das Geflecht, wie es der herkömmliche Flechtprozess produziert.

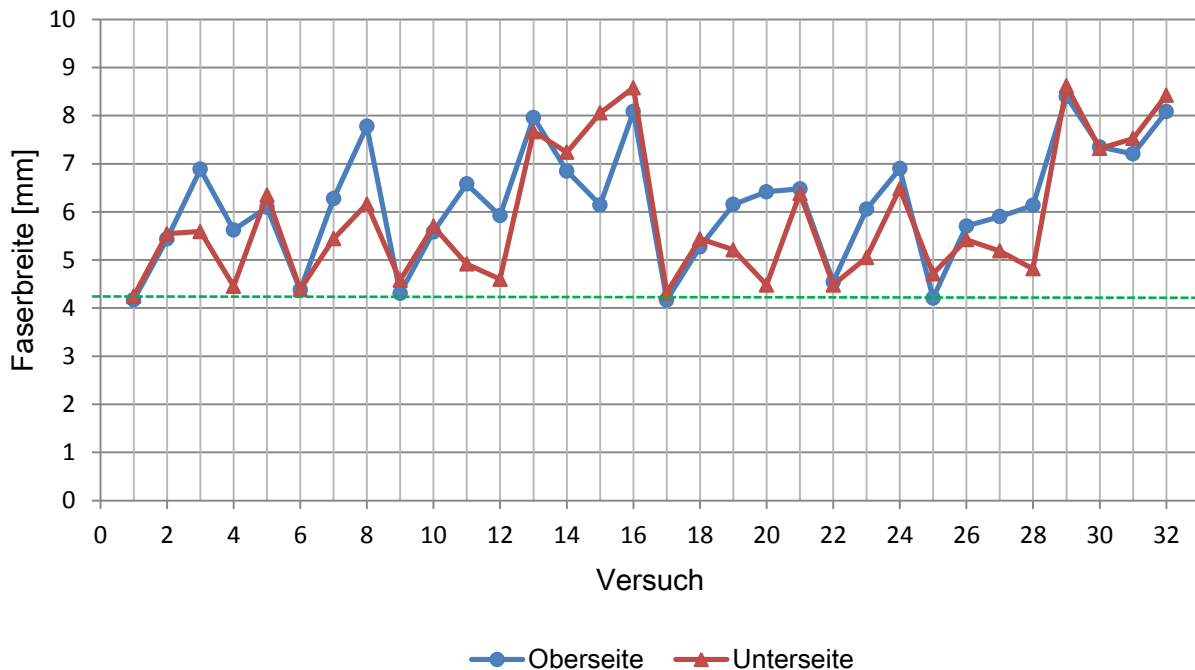


Abbildung 4.34: Mittelwerte der in den Versuchen gemessenen Faserbreite

Bis auf eine Ausnahme sind die Messwerte an der Oberseite gleich oder größer denen auf der Unterseite. Dort wo sie signifikant höher sind, fand eine Nachbearbeitung mit den Düsen statt, welche nur an der Oberseite angebracht sind. Lediglich in Versuch 15 ist die gemessene Breite auf der Unterseite signifikant höher, als die auf der Oberseite. Laut Versuchsprotokoll wurde bei diesem Versuch eine starke Verschiebung der Fasern durch die Düsen beobachtet. Vermutlich wurden die Fasern durch die besonders ungünstige Faktorkombination, mit der Düse an vorderster Position und ohne die fixierende Wirkung der Walzen, durch die strömende Luft verschoben und dabei eingeschnürt.

Jeder Messwert einer Versuchsreihe setzt sich aus den vier Aufnahmepositionen entlang des Kerns zusammen (siehe Abbildung 4.33). In jedem dieser vier Aufnahmepositionen werden wiederum im Schnitt acht Messstellen erkannt, jede an einer anderen Faser. Die Anzahl der Messstellen kann auf Grund der MATLAB-Auswerteroutine schwanken. Somit ergeben sich pro Messwert im Schnitt 32 an unterschiedlichen Fasern gemessene Breiten. Abbildung 4.35 zeigt, dass sich die Standardabweichungen von einem Großteil der Messwerte zwischen 0,4 mm und 0,8 mm befinden.

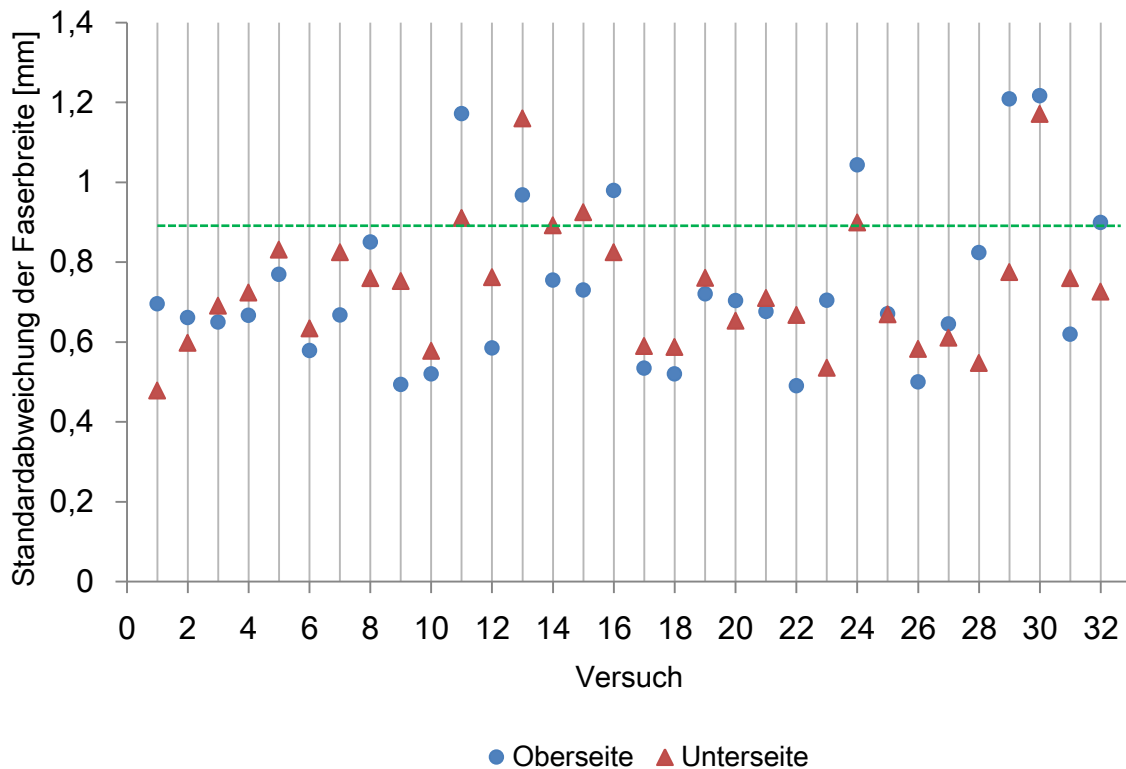


Abbildung 4.35: Standardabweichung der in den Versuchen gemessenen Faserbreite

Allerdings liegen knapp 10 % der Standardabweichungen um einiges höher, als die eingezeichnete grüne Linie, unter welcher die restlichen Werte liegen. Der Abgleich mit dem Versuchsprotokoll ergibt, dass alle Faktorstufenkombinationen mit einer Standardabweichung deutlich jenseits der 0,9 mm mindestens einen der drei Spreizmechanismen pulsierender Flechtring, Düsen und Walzen enthielten. Unabhängig von der erzielten Breite, führen die Spreizmechanismen - ob alle oder nur einer lässt sich an Hand des Diagramms nicht feststellen - zu einer stärkeren Streuung der Faserbreite. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Beobachtungen während der Versuchsdurchführung: einzelne Fasern, welche beispielsweise verdreht sind, lassen sich kaum spreizen, die übrigen erreichen durch die Spreizmechanismen eine höhere Ablagebreite. Die Differenz zwischen maximaler und minimaler Ablagebreite wächst, was den Anstieg der Streuung zur Folge hat.

Identifizierung der signifikanten Einflussgrößen

Dem Pareto-Diagramm der Effekte (Abbildung 4.36) kann entnommen werden, welche Faktoren und Wechselwirkungen einen Einfluss auf die Zielgröße besitzen. Alle Effekte, die den Schwellwert von 0,394 mm überschreiten, haben mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % einen Einfluss auf die Faserbreite. Insgesamt sind vier Faktoren und drei Wechselwirkungen für das Spreizergebnis maßgeblich.

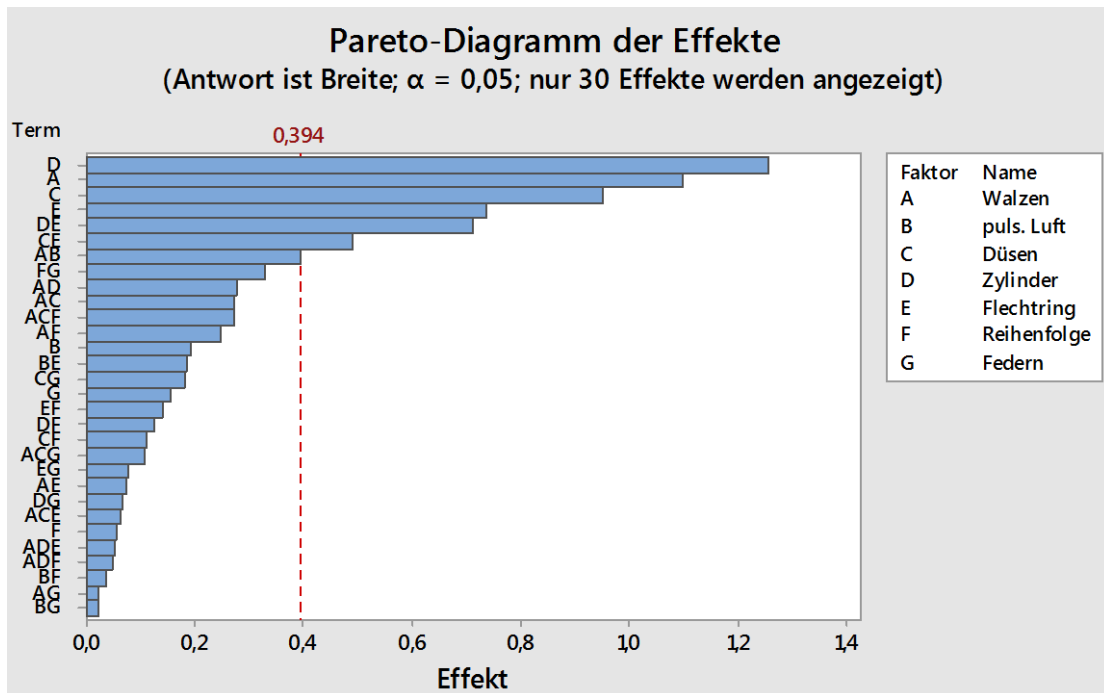


Abbildung 4.36: Signifikante Effekte für die Zielgröße *Faserbreite*

Auf Grund der teilfaktoriellen Versuchsdurchführung kann es jedoch zu Vermengungen zwischen den Effekten kommen. In dem Pareto-Diagramm ist nur jeweils die erste Effekt angegeben, welche aber nicht zwangsläufig die signifikante ist. Die sogenannte Alias-Struktur gibt Aufschluss über die auftretenden Vermengungen. In Tabelle 4-12 sind alle Wechselwirkungen mit einer Vermengung aufgeführt, wobei die hervorgehobene die im Pareto-Diagramm angezeigte Effekt ist.

Tabelle 4-12: Vermengungen signifikanter Effekte

Vermengung
D + ABC
A + BCD
C + ABD
DE + CFG
CE + DFG
AB + CD + EFG

Berücksichtigt werden maximal Dreifachwechselwirkungen. Von allen Wechselwirkungen höherer Ordnung (vierfach und höher) wird angenommen, dass der Einfluss verschwindend gering und somit vernachlässigbar ist.

In den folgenden beiden Abschnitten wird detailliert auf die signifikanten Effekte eingegangen.

Die Haupteffekte

In dem Haupteffektdiagramm (Abbildung 4.37) ist der lineare Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße dargestellt. Auch für die Faktoren, welche im Pareto-Diagramm nicht den Schwellwert erreichen, wird die aus den Messwerten berechnete Abhängigkeit angezeigt. Allerdings kann infolge der geringen Signifikanz nicht ausgeschlossen werden, dass der errechnete Zusammenhang lediglich durch die Streuung verursacht ist. Die vier signifikanten Faktoren entsprechen den, aus den Erkenntnissen der Vorversuche abgeleiteten Erwartungen. Drei dieser Faktoren sind mit jeweils einer Dreifachwechselwirkung vermengt. (Tabelle 4-12) Nur mit Hilfe der Statistik kann daher nicht festgestellt werden, ob der Spreizeffekt auf den einzelnen Faktor oder die Dreifachwechselwirkung zurückzuführen ist. Welcher Ursache ein Effekt entspringt, muss daher durch technische Überlegungen herausgefunden werden. [33] Da die Ergebnisse der Vorversuche nahelegen, dass die vier als signifikant eingestuft Faktoren einen großen Einfluss auf die Faserbreite haben und die Kombination der Dreifachwechselwirkungen nicht plausibel sind, ist davon auszugehen, dass die Dreifachwechselwirkungen vernachlässigt werden können.

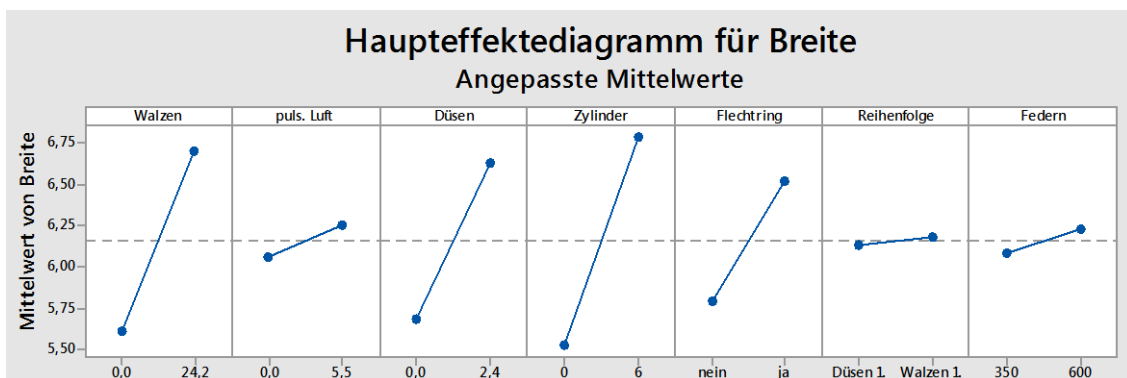


Abbildung 4.37: Einfluss der Faktoren auf die Zielgröße *Faserbreite*

Die drei Spreizmechanismen Walzen, Düsen und pulsierender Flechtring haben einen positiven Einfluss auf die Faserbreite. Die Höhe des Einflusses, also die Steigung der Gerade zwischen den beiden Faktorstufen ist unterschiedlich groß, was allerdings nicht zwangsläufig bedeutet, dass ein Spreizmechanismus besser funktioniert als der andere. Beispielsweise ließe sich der Effekt der Düsen durch die Erhöhung der zweiten Stufe von 2,4 bar auf 3,0 bar verstärken. Für diese Stufeneinstellung wäre vermutlich der Faktor Düse signifikanter als der Faktor Walzen. Bezüglich

des pulsierenden Flechtrings lässt sich diese Aussage mit Hilfe der Vorversuche jedoch begründen. Gemäß der Erkenntnis aus Abbildung 4.27 ist der Spreizeffekt des pulsierenden Flechtrings mit der verwendeten Frequenz von 6 Hz ausgeschöpft, das heißt die Signifikanz kann nicht weiter gesteigert werden. Da die Walzen und Düsen bereits mit den für die Parameterstudie gewählten Stufen eine höhere Signifikanz als der pulsierende Flechtring aufweisen, ist das erzielbare Spreizergebnis höher. Vermutlich kann der Effekt sogar noch durch die Steigerung der Anpresskraft bzw. des Drucks vergrößert werden.

Die Frequenz der Pneumatikzylinder (Zylinder) als solches hat keinen Einfluss. Sind weder Flechtring, noch Walzen, noch Düsen auf den Zylindern montiert, wird mit dem bloßen Ein- und Ausfahren der Kolbenstangen kein Spreizeffekt erzielt. Auf Grund des Aufbaus des Versuchsplans kommen alle Stufen gleich häufig vor, das heißt beispielsweise für den Flechtring, dass die Hälfte der Versuche mit und die andere Hälfte ohne dem Ring durchgeführt werden. Somit ist während eines Großteils der Versuche mindestens ein Spreizmechanismus auf den Zylindern montiert. Die Bewegung der Zylinder hat auf alle drei Mechanismen einen positiven Einfluss bezüglich der Spreizbreite, sodass den Zylindern eine hohe Signifikanz zugewiesen wird.

Die pulsierende Strömung der Druckluft, die Reihenfolge der Bearbeitung und die Wahl der Klöppelfeder, also die Fadenspannung, haben keinen oder nur einen sehr geringen, in der Streuung verschwindenden Einfluss auf die Faserbreite. Daraus lassen sich drei wichtige Aussagen ableiten: 1. Durch das regelmäßige Ausschalten der Druckluft sinkt der Druckluftbedarf um die Hälfte. In Anbetracht der kostenintensiven Erzeugung von Druckluft, stellt dies ein erhebliches Einsparpotential dar. 2. Die Unabhängigkeit des Spreizergebnisses von der Fadenspannung bedeutet, dass durch den Spreizprozess keine Restriktion bezüglich der zu verwendenden Klöppelfedern entsteht. 3. Mit der Aufnahme der Bearbeitungsreihenfolge in den Versuchsplan sollte geklärt werden, ob eventuell ein Spreizmechanismus durch die Vorarbeit des anderen Mechanismus besonders profitiert. Da der Wechsel der Bearbeitungsreihenfolge von Düse und Walze keinen Effekt zur Folge hat, hängt die Funktionsweise des einen Spreizmechanismus nicht der Vorarbeit des anderen ab.

Die Wechselwirkungen

Wie bei den Haupteffekten, lassen sich auch für die Wechselwirkungen alle Zusammenhänge darstellen. Abbildung 4.38 zeigt einen Ausschnitt der Wechselwirkungsdiagramme, in welchem die signifikanten Wechselwirkungen enthalten sind. Eine Wechselwirkung ist dann signifikant, wenn der Verlauf der Gerade zwischen zwei Stufen von der Einstellung eines weiteren Faktors abhängt, das heißt die Steigung der beiden Geraden im Wechselwirkungsdiagramm unterschiedlich ist. Jede Wechselwirkung ist in zwei Diagrammen dargestellt. Bei einer Wechselwirkung XY ist in dem einen Diagramm der Zusammenhang zwischen X und der Zielgröße in Abhängigkeit von Y dargestellt und in dem anderen der Zusammenhang zwischen Y und der Zielgröße in Abhängigkeit von X .

Die signifikanteste Wechselwirkung tritt zwischen den Faktoren **D** und **E** auf, also zwischen der Frequenz der Zylinder und dem pulsierenden Flechtring. Nach Tabelle 4-12 ist diese Wechselwirkung mit der Dreifachwechselwirkung CFG vermenget. Da weder die Reihenfolge (F), noch die Federstärke (G) als Einzelfaktoren signifikant sind, ist diese Dreifachwechselwirkung sehr unwahrscheinlich und wird somit vernachlässigt. Das in Abbildung 4.38 mit Zylinder*Flechtring gekennzeichnete Diagramm zeigt, dass die Wahl der Zylinder Frequenz mit montiertem pulsierendem Flechtring einen größeren Einfluss auf die Faserbreite hat, als ohne den Flechtring. Beträgt die Frequenz der Zylinder 0 Hz bewirkt das Vorhandensein des pulsierenden Flechtrings erwartungsgemäß keinen Unterschied bei der Faserbreite. Erst durch die Bewegung der Zylinder mit 6 Hz kann der pulsierende Flechtring seine Wirkung entfalten. Dieser Zusammenhang entspricht den Erkenntnissen aus den Vorversuchen mit dem pulsierenden Flechtring in Abschnitt 4.4.1.2. Dass die Frequenz der Zylinder auch ohne pulsierenden Flechtring einen positiven Effekt auf die Faserbreite hat, ist auf die anderen beiden Spreizmechanismen zurückzuführen. Bereits in den, den Prüfstandentwurf begleitenden Versuchen wurde festgestellt, dass die axiale Bewegung sowohl der Düsen als auch der Walzen das Spreizergebnis verbessert. Bei allen Faktorstufenkombinationen, welche zwar keinen pulsierenden Flechtring haben, aber mindestens einen der beiden Spreizmechanismen Düse und Walze aufweisen, liefert die Frequenz der Zylinder einen positiven Beitrag zur Faserbreite. Das zweite Diagramm zu dieser Wechselwirkung Flechtring*Zylinder zeigt, dass der pulsierende Flechtring natürlich nur dann einen Effekt hat, wenn die Zylinder eingeschaltet sind.

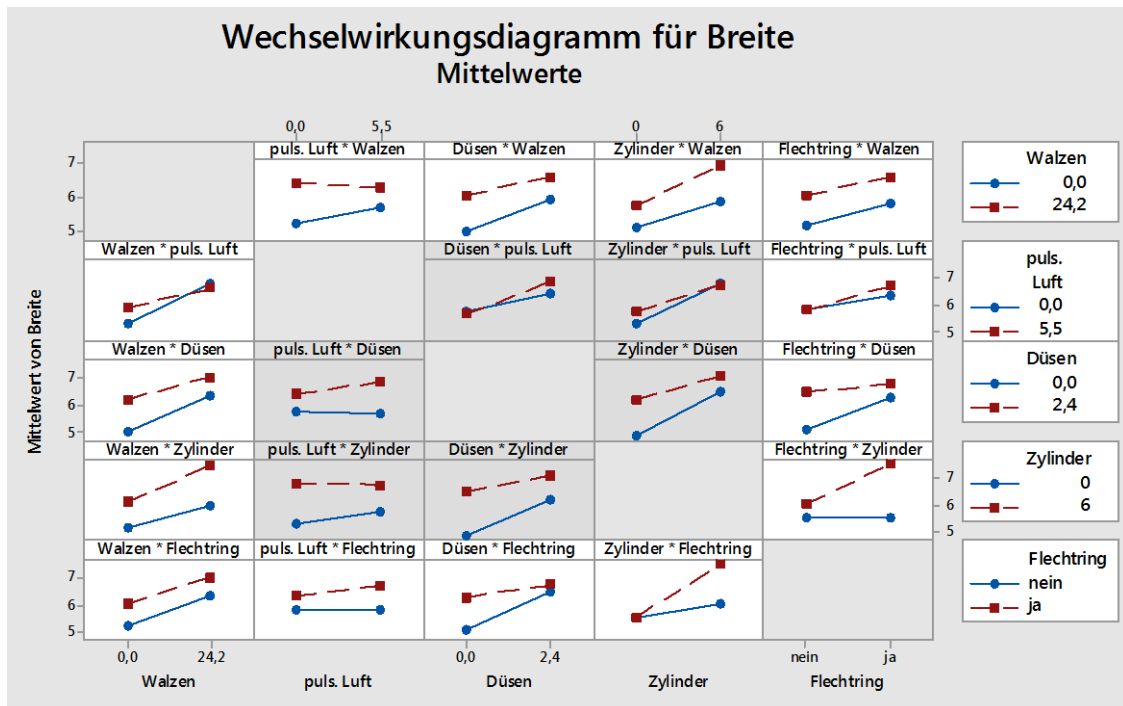


Abbildung 4.38: Wechselwirkungsdiagramm für die Zielgröße *Faserbreite*

Bei der zweiten Wechselwirkung, welche zwischen den Faktoren Düsen und Flechtring (C und E) besteht, kann die Vermengung mit der Dreifachwechselwirkung DFG mit der gleichen Argumentation wie bei der Vermengung der ersten Wechselwirkung ausgeschlossen werden. Eine Dreifachwechselwirkung mit zwei nicht signifikanten Faktoren ist sehr unwahrscheinlich. Die beiden Diagramme Düsen*Flechtring und Flechtring*Düsen zeigen, dass die Kombination der beiden Spreizmechanismen im Vergleich zur Verwendung von nur einem der beiden Mechanismen, nur einen geringen Zuwachs an Faserbreite bedeutet. Dies kann zwei Ursachen haben: entweder die Fasern werden durch die Verwendung der Düsen oder des Flechtrings bereits so weit gespreizt, dass mit der Kombination mit dem jeweils anderen kein weiteres Spreizen erreicht werden kann, oder die beiden Mechanismen beschränken sich gegenseitig bei ihrer Spreizwirkung. Da die Walzen in keiner Wechselwirkung zu einem der anderen Spreizmechanismen (Düsen und pulsierender Flechtring) stehen, führt eine Kombination dieser Faktoren (also Walzen mit Düsen und Walzen mit pulsierendem Flechtring) augenscheinlich zu einer Addition der zusätzlichen Faserbreite. Folglich müsste auch mit der Kombination der Düsen und des pulsierenden Flechtrings eine größere Faserbreite erzielbar sein. Die Wechselwirkung dieser beiden Faktoren ist somit auf eine gegenseitige negative Beeinträchtigung der beiden Mechanismen zurückzuführen. Vermutlich liegt die Ursache hierfür im Versuchsaufbau. Der eckige Querschnitt des Kerns hat einen unregelmäßigen Flechtkegel zur Folge, welcher im mittleren Bereich der Seitenflächen besonders lang ist, also genau dort, wo der Wirkungsbereich der Düsen liegt. In den Vorversuchen hat sich gezeigt, dass der Spreizeffekt der Düsen vor der Ablage auf dem Kern wesentlich geringer ausfällt,

da sich die Fasern zu diesem Zeitpunkt noch in Bewegung befinden. Durch das Oszillieren des pulsierenden Flechtrings wird der Flechtkegel zusätzlich in Bewegung versetzt. Die daraus resultierende Bewegung der Fasern, in Kombination mit dem bis kurz vor die Düsen reichenden Flechtkegel verhindert offenbar, dass das Spreizpotenzial der Düsen vollständig ausgenutzt wird. Bei den Walzen ist dieses Phänomen nicht zu beobachten, da diese das Geflecht durch die Anpresskraft fixieren.

Die dritte als signifikant eingestufte Wechselwirkung liegt zwischen den Faktoren Anpresskraft der Walzen und pulsierende Druckluft vor (**A** und **B**). Es tritt eine Vermengung mit den Wechselwirkungen CD und EFG auf. Eine Wechselwirkung zwischen den Walzen (A) und der Strömungsart der Düsen (B) kann ausgeschlossen werden, da weder die Düsen mit den Walzen in Wechselwirkung stehen, noch die Düsen mit der Strömungsart. Als signifikante Wechselwirkung bleibt **CD** übrig (Düsen und Zylinder), da EFG analog zu den übrigen Dreifachwechselwirkungen ausgeschlossen werden kann. Auf Grund der ausgeprägten Wechselwirkung zwischen der Frequenz der Zylinder und dem pulsierenden Flechtring, hat CD die gleiche Ursache wie CE. Die Wirkung der Düsen wird durch die Verwendung des pulsierenden Flechtrings (welcher nur bei eingeschalteten Zylindern einen Effekt hat) eingeschränkt, sodass diese nur noch einen verringerten Beitrag zur Steigerung der Faserbreite liefern können.

Gemäß den Erkenntnissen aus den Vorversuchen während der Spreizprozessentwicklung, wären durchaus weitere Wechselwirkungen zu erwarten gewesen. An dieser Stelle wird der Nachteil von Screening Versuchen mit einer umfangreichen Anzahl an Faktoren deutlich. Auf Grund des teilfaktoriellen Versuchsplans werden einige signifikanten Wechselwirkungen nicht als solche erkannt, da die statistische Auflösung zu gering ist. Beispielsweise lässt das Diagramm Walzen*Zylinder die Tendenz zu einer erwartungsgemäßen Wechselwirkung erkennen: durch die Bewegung der Walzen mit 6 Hz verbessert sich deren Spreizergebnis. Diese Wechselwirkung kann zwar an Hand der unterschiedlichen Steigungen im Diagramm ausgemacht werden, ist jedoch nicht stark genug ausgeprägt, um sicher nachgewiesen werden zu können. Hierfür wird ein vollfaktorieller Versuchsplan mit weniger Faktoren benötigt. [62]

4.4.4.2. Betrachtung der Zielgröße *Faserschädigung*

Bei der Festlegung der Zielgrößen wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Auswertung der Versuche nach der Schädigung nur eine sehr begrenzte Aussagekraft besitzt und lediglich der Orientierung bei weiteren Prozessuntersuchungen dienen soll. Angesichts des schwer quantifizierbaren Ausmaßes der Schädigung, also der tatsächlichen Auswirkung auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechts, ist selbst eine Einstufung eines Faktors als signifikant noch kein hinreichender Beweis, dass die Schädigung zu stark ist.

Das Pareto-Diagramm zeigt, dass nur die Düsen einen signifikanten Einfluss auf die Schädigung haben. (Abbildung 4.39)

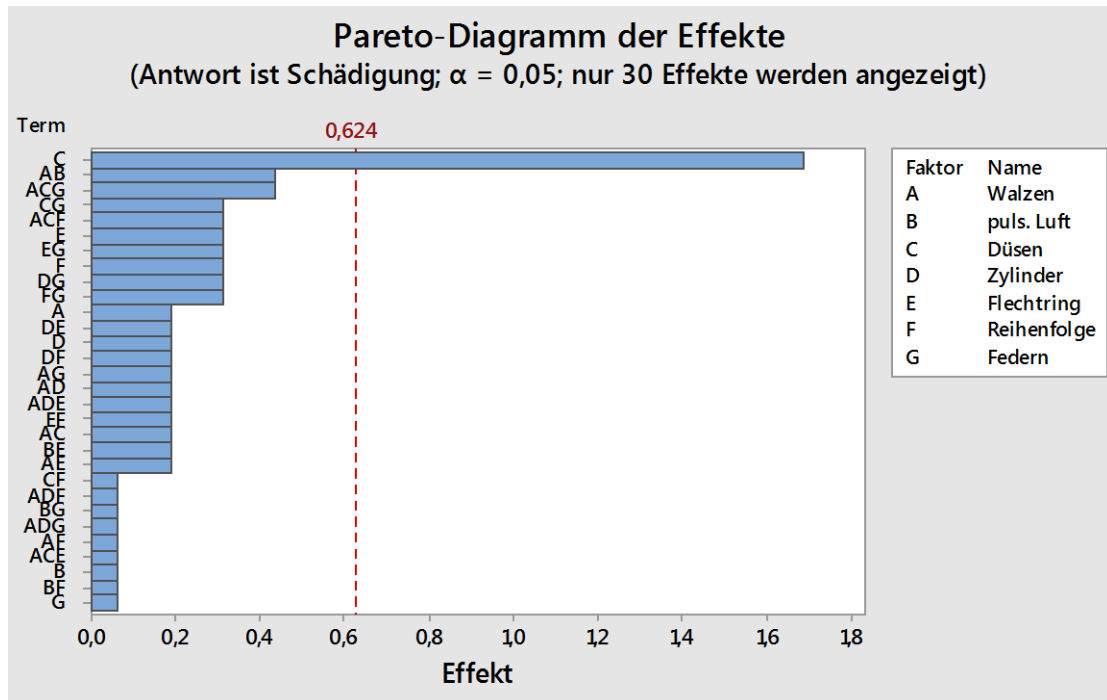


Abbildung 4.39: Signifikante Effekte für die Zielgröße *Faserschädigung*

Aus den Haupteffektdiagrammen geht der deutliche Beitrag der Düsen zur Faserschädigung hervor, wesentlich stärker ausgeprägt als die von den Walzen hervorgerufene Schädigung.

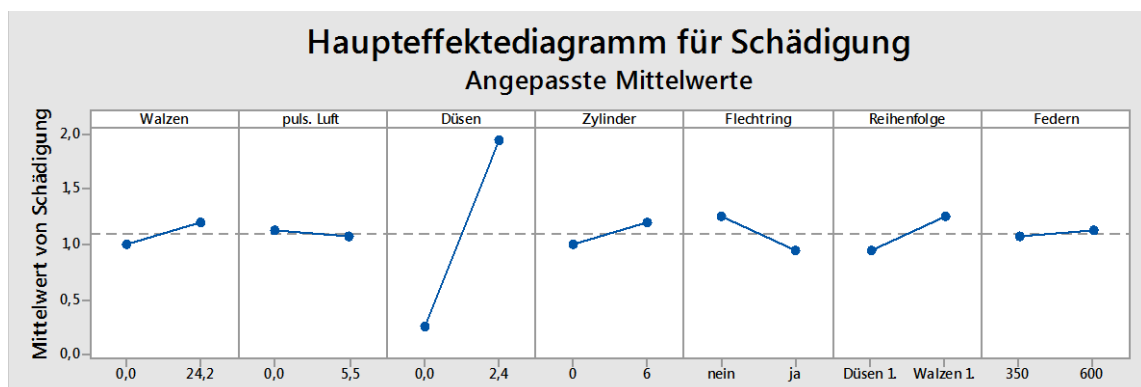


Abbildung 4.40: Einfluss der Faktoren auf die Zielgröße *Faserschädigung*

Auch wenn die Düsen als einziger Spreizmechanismus einen signifikanten Einfluss auf die Schädigung haben, kann eine Schädigung der Fasern beispielsweise durch die Walzen nicht ausgeschlossen werden. Es ist denkbar, dass Filamente auf Grund der Krafteinwirkung der Walzen brechen, allerdings nur bei einer gleichzeitigen Bearbeitung mit den Düsen aufgewirbelt und somit sichtbar werden. Damit würde die Schädigung fälschlicherweise den Düsen angelastet werden. Eine abschließende

Bewertung der Schädigung kann erst mit Hilfe einer geeigneten Messmethode stattfinden.

4.4.4.3. Schlussfolgerungen aus der Parameterstudie

Nach D. Shainin existieren nur einige wenige Faktoren, welche einen Einfluss auf die Zielgröße haben, den wichtigsten nennt er „rotes X“. [63] Genau diese Faktoren können mit Hilfe eines Screening Versuchs aus einer Vielzahl von Einflussgrößen ermittelt werden. Die Parameterstudie hat gezeigt, dass die drei Spreizmechanismen Walzen, Düsen und pulsierender Flechtring in Kombination mit der Bewegung durch die Zylinder einen signifikanten Einfluss auf die Faserbreite haben. Die übrigen Faktoren, die Strömungsart der Druckluft, die Reihenfolge der Nachbearbeitung mit den Düsen und Walzen und die Fadenspannung, haben keinen Einfluss auf das Spreizergebnis und können daher bei weiteren Untersuchungen vernachlässigt werden. Bei der Fadenspannung sei jedoch angemerkt, dass dies nur in dem untersuchten Rahmen gilt und eine Extrapolation auf Fadenspannungen außerhalb des untersuchten Bereichs nicht möglich ist. Besonders hohe oder niedrige Fadenspannungen könnten eventuell doch einen Einfluss haben.

Die Wechselwirkungen haben gezeigt, dass eine nähere Untersuchung der Walzen und Düsen unabhängig voneinander stattfinden kann. Da keine Wechselwirkung besteht, ist ohnehin fraglich, ob eine Kombination der Mechanismen sinnvoll ist. Der negative Einfluss des pulsierenden Flechtrings auf die Wirkung der Düsen, ist aller Wahrscheinlichkeit nach der Bauweise des Prüfstands geschuldet. Durch einen größeren Abstand zwischen Flechtpunkt und den Düsen kann diese Beeinflussung behoben werden, sodass sich die Spreizwirkung, wie bei der Kombination von pulsierendem Flechtring und Walzen, addiert.

Die genaue Prozessführung, mit welcher das optimale Spreizergebnis erreicht wird, hängt von einigen weiteren Faktoren ab, wie der Geometrie der Walze oder Düse, der Kerngeometrie und dem Fasermaterial. Dieses Prozessoptimum muss im Fall einer Anwendung in der Serienfertigung mit festen Randbedingungen gefunden werden.

4.5. Wirkmechanismen beim prozessintegrierten Faserspreizen

Die Parameterstudie zeigte, dass die drei Spreizmechanismen Walzen, Düsen und pulsierender Flechtring einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Faserbreite liefern. Alle drei Mechanismen gingen aus der Recherche von physikalischen Effekten hervor, welche die breitere Ablage der Faser zur Folge haben. Um die Prozessentwicklung und -charakterisierung abzuschließen, wird in diesem Abschnitt geklärt, ob die physikalischen Effekte durch die Integration in den Flechtprozess die gleichen geblieben sind. Hierzu werden die in Abschnitt 4.1.2 detailliert beschriebenen Effekte kurz rekapituliert und auf ihre Übertragbarkeit auf das flechtprozessintegrierte Spreizen untersucht.

Der pulsierende Flechtring wurde im Wesentlichen gemäß dem Patent [60] entworfen. Daher beruht die Wirkung auf dem in der Patentschrift beschriebenen Effekt der Reduzierung der Querkräfte. Das regelmäßige Abheben des Flechtkegels von den Flechtringen erleichtert das Abgleiten der Fäden aneinander, sodass die Kraftkomponente senkrecht zur Faserlängsrichtung erheblich verringert wird. Dieser Effekt konnte während der Versuche am Flechtring beobachtet werden und kann daher bestätigt werden.

Die Walzen wurden von dem Prinzip des mechanischen Spreizens von Einzelfasern durch das Umlenken um einen Radius abgeleitet. Durch die Umlenkung entstehen Kräfte zwischen den Filamenten, welche das Auseinandertreiben der selbigen zur Folge hat. Mit den Walzen wird der gleiche Effekt erzielt. Die Druckkraft der Walze führt zu den gleichen Kräfteverhältnissen zwischen den Filamenten, wie bei der Umlenkung einer Einzelfaser.

Bei dem Spreizen von Einzelfasern mit einem Luftstrom, werden aerodynamische Effekte für die Spreizwirkung verantwortlich gemacht. Die Strömung wird in der Faser durch den Widerstand der Filamente verlangsamt, sodass der Druck innerhalb der Faser höher ist, als in dem Luftstrom neben der Faser. Diese Druckdifferenz hat das Auseinandertreiben der Filamente zur Folge und wird durch die Bernoulli Gleichung beschrieben. Eine Übertragung auf die Vorgänge beim Spreizen mit Düsen kann nicht ohne weiteres vorgenommen werden. Die Randbedingung, dass sich die Strömung in einem stationären Zustand befindet, ist nicht erfüllt. Die Luft strömt aus der Düse und prallt an der Kernoberfläche ab. Vor und nach dem Abprallen werden die Fasern durchströmt. Da diese Durchströmung jedoch sehr turbulent ist, kann sie nicht mit der gleichmäßigen Strömung in der Vakuumkammer einer Einzelfaserspreizanlage verglichen werden. Um Aufschluss über die auftretenden Effekte bei dem Spreizen mit Düsen zu erlangen, wurde der Vorgang mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera analysiert. Abbildung 4.41 zeigt zwei Aufnahmen während der

Bewegung der Düsen mit 6 Hz entlang der Kernlängsachse. In beiden Aufnahmen befindet sich der rote Strich der gleichen Position auf dem Kern.

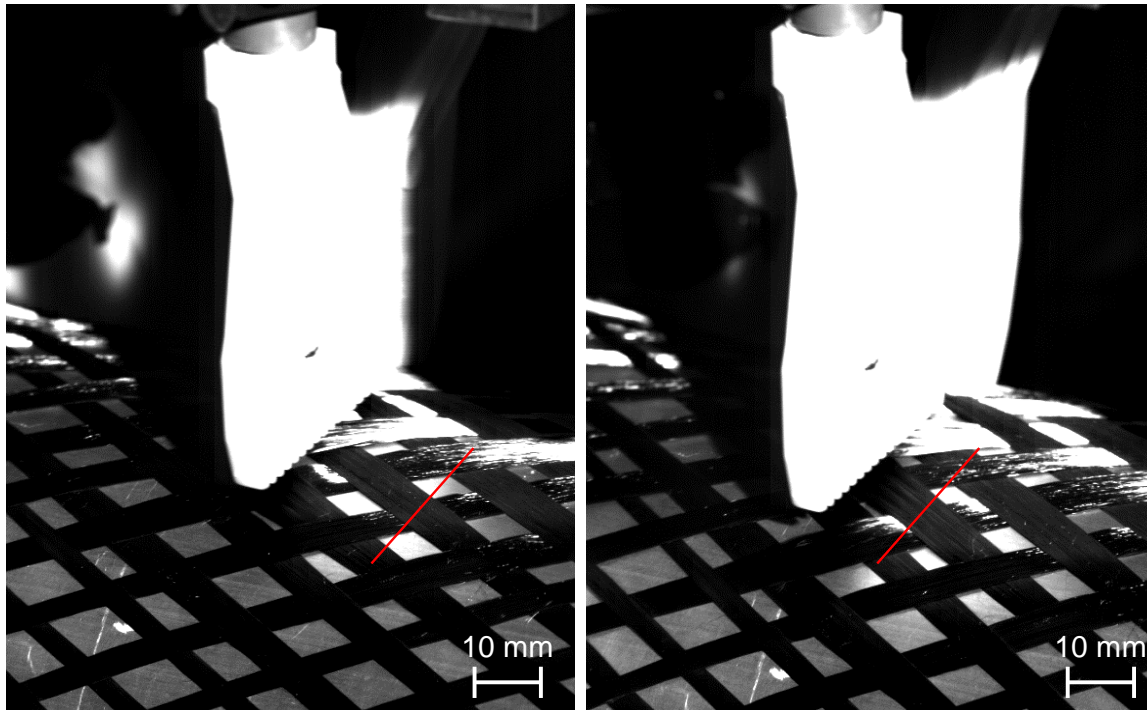


Abbildung 4.41: Bewegung der Düsen relativ zum Kern

An der Breite der Fasern ist die Stelle zu erkennen, an der die Düsen während ihrer Bewegung die Fasern spreizen. Erst unmittelbar an der roten Linie werden die Fasern von den Düsen gespreizt. Beträgt der Abstand mehr als 10 mm, wie in der linken Abbildung, lässt sich noch keine Veränderung in der Faser feststellen. Mit dieser Beobachtung kann ausgeschlossen werden, dass eine Strömung, welche nach der Umlenkung an der Kernoberfläche parallel zu dieser verläuft, die Fasern spreizt. Die Veränderung der Faserbreite findet unmittelbar unterhalb der Düse statt, also dort wo die Strömung am stärksten und sehr turbulent ist. Sehr wahrscheinlich ist daher die durch den Staudruck verursachte Kraft senkrecht zur Faseroberfläche ursächlich für den Spreizeffekt.

Das Spreizen des Geflechts auf dem Kern wird bei den Walzen und den Düsen gewissermaßen durch das Plattdrücken der Fasern erreicht. Bei einer Kombination der beiden Mechanismen wird daher der gleiche Effekt erzielt, wenn zwei Düsen oder zwei Walzen hintereinander angeordnet sind. Die Düsen bieten den Vorteil, dass sich die von dem Staudruck verursachte Kraft besser an gekrümmte Oberflächen anpassen kann, wohingegen die Walzen über eine definierte Auflagefläche verfügen.

4.6. Experimentelle Charakterisierung der gespreizten Geflechtarchitekturen

Die Motivation für die in diesem Kapitel vorgestellte Anlagenentwicklung entsand aus der Bewertung von vier verschiedenen Geflechtarchitekturen entlang eines konischen Demonstratorkerns. (siehe Kapitel 3.3) Die entwickelten Anlagenkonzepte sind mit dem Ziel entstanden, die für die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechts nachteiligen Architekturen zu vermeiden. Mit dem prozessintegrierten Faserspreizen können die Lücken der beiden Stützstellen 90 mm und 130 mm geschlossen werden. Diese beiden Stützstellen werden nun unter Verwendung der Spreizmechanismen erneut charakterisiert und mit dem herkömmlichen Material verglichen.

4.6.1. Beschreibung der neuartigen Geflechtarchitekturen und deren Herstellung

Untersucht wird das gleiche Geflecht wie in Kapitel 3. Das linke Bild von Abbildung 4.42 zeigt die bereits untersuchte Geflechtarchitektur, wie sie bei dem Beflechten des Kerns mit einem 90 mm Durchmesser auftritt. Die rosa Oberfläche des Kerns ist in den Lücken sichtbar, welche bereits an jedem Kreuzungspunkt der Fasern auftreten. Durch die Verwendung des pulsierenden Flechtrings können diese Lücken vollständig geschlossen werden. (Abbildung 4.42 rechts) Der eingesetzte pulsierende Flechtring hatte einen Durchmesser von 120 mm und der statische einen Durchmesser von 150 mm.

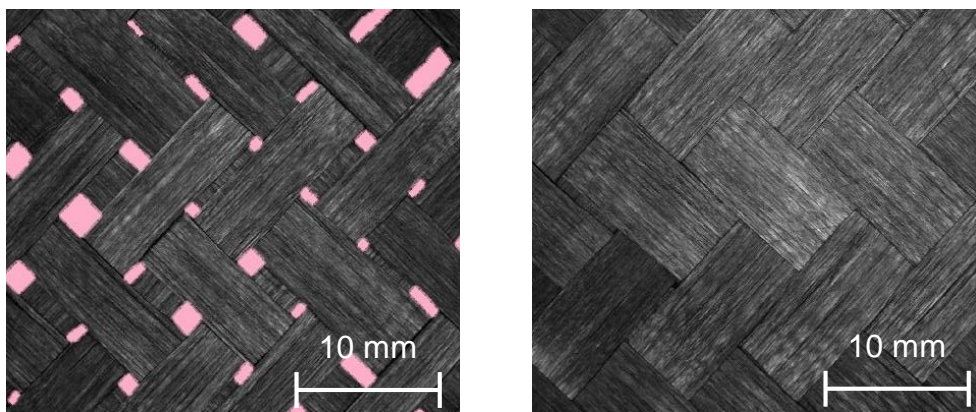


Abbildung 4.42: Geflecht auf dem 90 mm Durchmesser ohne (links) und mit (rechts) Spreizen

Die pulsierende Bewegung (6 Hz) verringert die Querkräfte während der Umlenkung am Flechtring erheblich, sodass die Fasern breiter abgelegt werden und sich die Lücken schließen.

Die Lücken des Geflechts der Stützstelle mit dem nächstgrößeren Kerndurchmesser (130 mm) lassen sich durch den alleinigen Einsatz des pulsierenden Flechtrings nicht

mehr schließen. Daher muss ein weiterer Mechanismus (entweder Düsen oder Walzen) angewandt werden, um mit der zusätzlichen Spreizwirkung das Geflecht zu schließen. Die Geflechtlagen sollen zur Herstellung von Prüfkörpern verwendet werden, sodass die Lagen auf einem runden Kern abgelegt werden müssen. (siehe Abschnitt 2.2.2 Prüfkörperherstellung) Die runde Oberfläche erfordert eine speziell angepasste, konkave Walzenoberfläche, da eine zylindrische Walze das Geflecht nur punktuell spreizen würde. Dahingegen ist der Spreizeffekt der Düsen auch bei einer runden Oberfläche gleichmäßig, sodass diese zur Herstellung der gespreizten Faserlagen auf dem 130 mm Kerndurchmesser verwendet werden. Durch die Vergrößerung des Abstands zwischen den Düsen und dem pulsierenden Flechtring kann die bei der Parameterstudie identifizierte negative Wechselwirkung zwischen den beiden Spreizmechanismen vermieden werden. Die Spreizeffekte addieren sich nun auf, sodass das Geflecht des 130 mm Kerns geschlossen werden kann. (Abbildung 4.43)

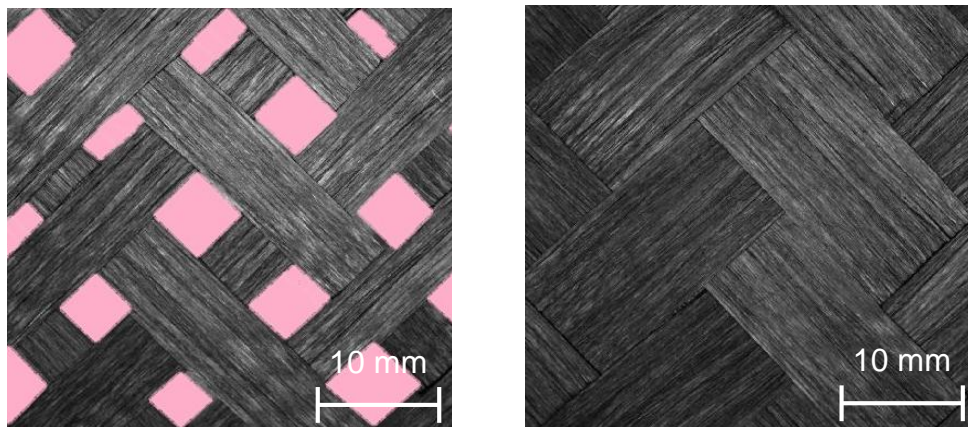


Abbildung 4.43: Geflecht auf dem 130 mm Durchmesser ohne (links) und mit (rechts) Spreizen

In Abbildung 4.44 sind die beiden Totpunkte der Bewegung des für die Herstellung der Prüfkörper umgebauten Spreizprüfstands dargestellt. Im oberen Bild befinden sich Düsen und pulsierender Flechtring im hinteren Anschlag, sodass das Geflecht nur um den äußeren, festen Flechtring umgelenkt wird. In dem vorderen Totpunkt (Abbildung 4.44 unten) hebt der pulsierende Flechtring das Geflecht von dem äußeren ab und gibt den Blick auf das von den Düsen noch nicht gespreizte Geflecht frei. Deutlich sind die Lücken erkennbar, welche sich erst durch die Nachbearbeitung mit den Düsen schließen. Die Düsen sind über den gesamten Umfang verteilt und haben einen Abstand von 5 mm zur Geflechtsoberfläche. Der Düseneingangsdruck beträgt 2 bar und die Flechtringdurchmesser 140 mm (pulsierender) und 170 mm (statischer).

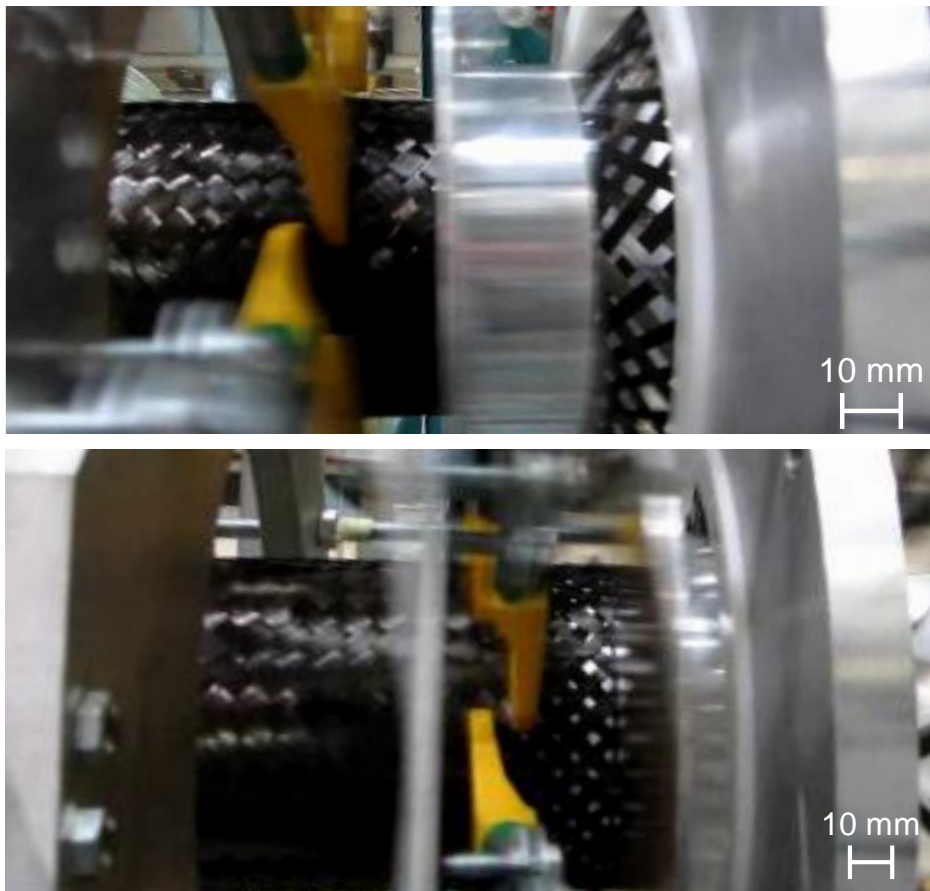


Abbildung 4.44: Spreizen der Fasern auf dem 130 mm Kerndurchmesser durch eine Kombination des pulsierenden Flechtrings und der Düsen

Aus den zwei neuen Faserarchitekturen müssen in einem nächsten Schritt Prüfkörper hergestellt werden, sodass ein Vergleich zu den bereits untersuchten Faserarchitekturen gezogen werden kann.

4.6.2. Zug-Versuche

Die Herstellung der Proben findet gemäß der Beschreibung in Abschnitt 2.2.2 und unter Verwendung des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Spreizprüfstands statt. Tabelle 4-13 enthält die Übersicht über den Umfang des Probenprogramms. Das Datenblatt der verwendeten Faser befindet sich in Anhang C. Probenlänge und -breite geben das Sollmaß der Proben vor, die Dicke entspricht den gemessenen Werten an den Proben vor der Prüfung. Die Diskrepanz zwischen hergestellten und ausgewerteten Probekörpern ergibt sich durch nicht normgerecht versagte Prüflinge.

Tabelle 4-13: Anzahl, Aufbau und Abmessungen der Probekörper aus gespreizten Geflechtlagen

Stütz- stelle	Anzahl Probekörper		Lagenanzahl	Probenabmessungen [mm]		
	hergestellt	ausgewertet		Länge	Breite	Dicke
90 mm	7	6	5	250	30	2,49
130 mm	6	6	7	250	40	2,79

Im linken Diagramm von Abbildung 4.45 sind die sechs Faserarchitekturen nach Zugfestigkeit und Kerndurchmesser geordnet. Der rote Verlauf ist aus Kapitel 3.3 entnommen und beinhaltet die Faserarchitekturen ohne Spreizen. Die blaue Kurve verläuft entlang der neu untersuchten, gespreizten Geflechte.

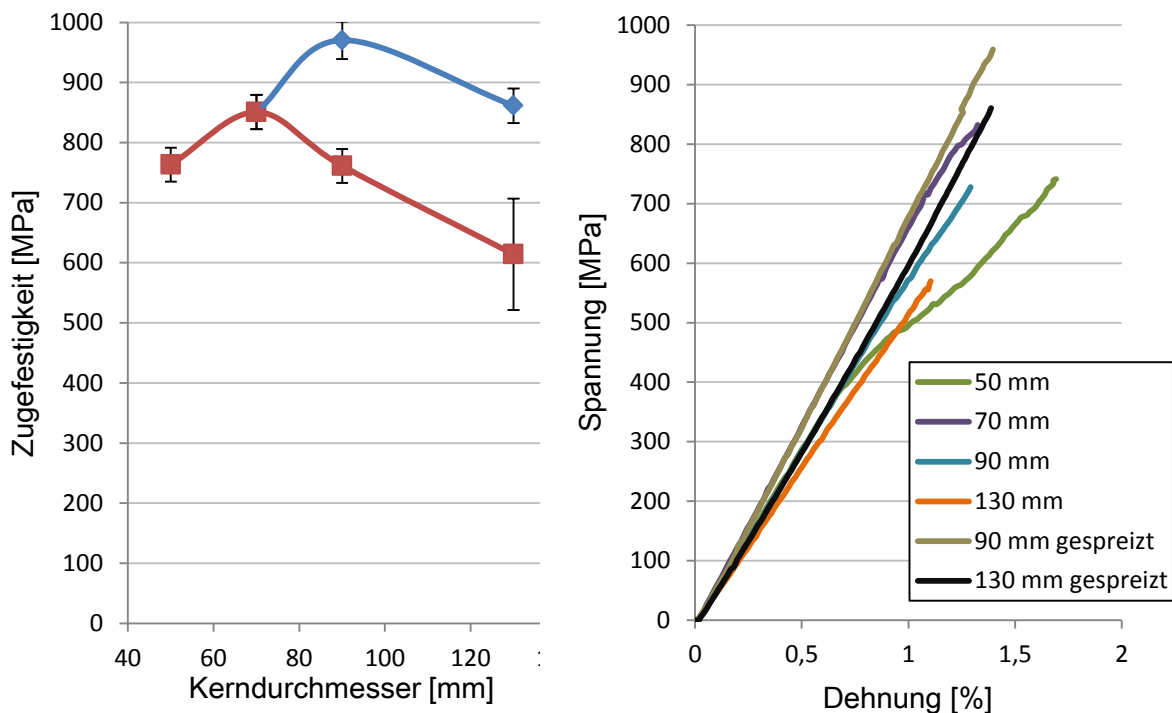


Abbildung 4.45: Links: mittlere Zugfestigkeit mit Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$); rechts: repräsentative Spannungs-Dehnungs-Verläufe der sechs Versuchsreihen

Durch die Verwendung des pulsierenden Flechtrings werden die Lücken im Geflecht geschlossen, sodass der Faservolumengehalt dem der Proben mit einem geschlossenen Geflecht (50 mm und 70 mm) mit 56 % entspricht. Zusätzlich wird durch die breitere Faserablage die Ondulation der Fasern verringert, sodass die Festigkeit des Geflechtes von dem 70 mm Kerndurchmesser um 12 % übertroffen wird. Insgesamt steigert der pulsierende Flechtring die Festigkeit, ausgehend von der Geflechtarchitektur von dem gleichen Kern, um 22 %.

Die Zugfestigkeit des mit pulsierendem Flechtring und Düsen gespreizten Geflechts auf dem 130 mm Durchmesser befindet sich marginal oberhalb der Festigkeit der 70 mm Stützstelle. Damit kann eine Verbesserung von 29 % zum Referenzgeflecht, ohne die Spreizmechanismen auf dem gleichen Kerndurchmesser, erzielt werden. Trotz der weiteren Reduzierung der Ondulation nimmt die Festigkeit gegenüber dem 90 mm Durchmesser mit pulsierendem Flechtring nicht zu, sondern sogar ab. Es ist davon auszugehen, dass die bereits in der Parameterstudie festgestellte von den Düsen verursachte Faserschädigung ursächlich für diese Abnahme ist.

Die repräsentativen Verläufe im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abbildung 4.45 rechts) weisen einen Verlauf mit einer nahezu konstanten Steifigkeit bis zu dem abrupten Endversagen auf. Tabelle 4-14 enthält alle Zahlenwerte zu den durchgeführten Zugversuchen.

Tabelle 4-14: Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Zugversuchen

Stütz- stelle	Zugfestigkeit [MPa]		E-Modul [GPa]		Bruchdehnung [%]	
	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s
50 mm	763,3	26,8	59,7	2,8	1,68	0,09
70 mm	850,7	34,2	63,3	4,7	1,39	0,10
90 mm	761,2	30,4	55,6	2,9	1,33	0,09
130 mm	614,2	74,6	51,5	8,6	1,14	0,11
90 mm gespreizt	970,4	29,7	65,5	2,5	1,42	0,04
130 mm gespreizt	861,3	23,1	56,1	1,1	1,20	0,09

Die Schliffbilder in Abbildung 4.46 bestätigen, dass durch das Spreizen der Fasern die Welligkeit im Vergleich zu den ungespreizten Geflechten reduziert wird. Auch der Unterschied in der Ondulation zwischen den beiden unterschiedlich stark gespreizten Faserarchitekturen ist klar erkennbar. Allerdings kann auf Grund der durch das Spreizen verursachten Faserschädigung das volle Potential der gespreizten Faserablage nicht ausgeschöpft werden.

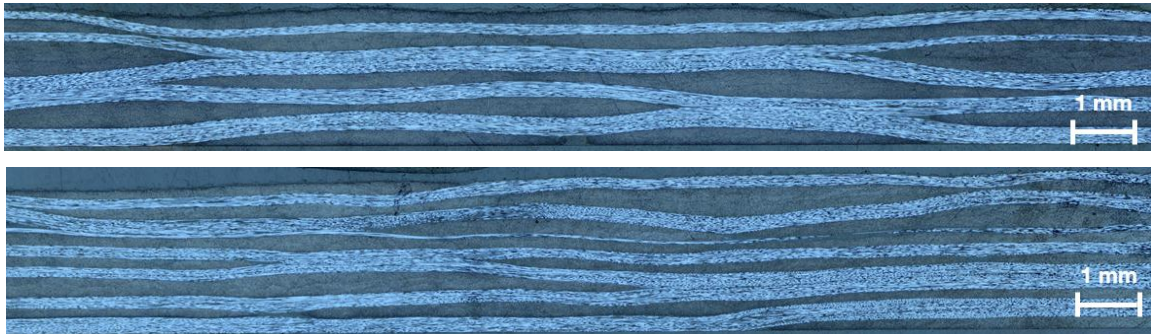


Abbildung 4.46: Schlibfbilder der gespreizten Geflechte: 90 mm (oben) und 130 mm (unten)

Ausgehend von den Ergebnissen der ungespreizten Geflechte in Kapitel 3.3 wurde für das beschriebene Geflecht ein Prozessfenster definiert, in dem die Festigkeit mindestens 95 % des Maximalwerts beträgt. Daraus ergab sich eine Umfangsspanne von 60 mm bis 80 mm. Auf allen kleineren und größeren Kerndurchmessern sank die Festigkeit unterhalb von 95 %. Mit dem Einsatz des Spreizprüfstands kann dieser Bereich bis über den 130 mm Durchmesser hinaus vergrößert werden, sodass sich eine Umfangsspanne von über $\pm 40\%$ ergibt. Die Umfangsva⁷riation kann somit von 1,33 auf über 2,17 vergrößert werden.

Weitere Untersuchungen müssen klären, bis zu welchem Umfang der Ausgangswert des Geflechts auf dem 70 mm Kerndurchmesser aufrechterhalten werden kann. Damit einhergehend muss der genaue Schädigungsmechanismus der Düsen identifiziert werden. Eventuell kann durch die Verwendung der Walzen die Schädigung vermieden und somit eine höhere Festigkeit erzielt werden.

4.6.3. Druck-Versuche

In Tabelle 4-15 sind der Umfang und die Dimensionierung gemäß der Zusammenstellung wie bei der ersten Druckversuchsreihe in Abschnitt 3.3.2 zusammengefasst.

Tabelle 4-15: Anzahl, Aufbau und Abmessungen der Probekörper aus gespreizten Geflechtlagen

Stütz- stelle	Anzahl Probekörper		Lagenanzahl	Probenabmessungen [mm]		
	hergestellt	ausgewertet		Länge	Breite	Dicke
90 mm	6	6	5	140	25	2,80
130 mm	8	5	7	140	25	2,82

Das Datenblatt der verwendeten Faser befindet sich in Anhang D.

⁷ Größtmöglicher Umfang bezogen auf den minimalen Umfang: U_{\max}/U_{\min}

Abbildung 4.47 enthält die Ergebnisse der Druckversuche mit den vier konventionellen Geflechtarchitekturen und den beiden gespreizten Geflechten. (gespreizt: blaue Messpunkte im linken Diagramm) Mit dem Spreizen der Fasern in den offenen Geflechten (90 mm und 130 mm) werden die Lücken geschlossen, sodass sich die Faserarchitekturen der unterschiedlichen Durchmesser nur noch durch die Ausprägung der Ondulation unterscheiden. Daher ergibt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei Adams [49]. Die Mittelwerte der Druckfestigkeit der drei Versuchsreihen 50 mm, 70 mm und 90 mm unterscheiden sich im Rahmen der Fehlerwahrscheinlichkeit kaum, allenfalls kann mit dem Anstieg des Durchmessers eine leichte Zunahme der Festigkeit ausgemacht werden. Dies entspricht der Erkenntnis von Adams, dass ab einem gewissen Mindestniveau an Faserondulation eine weitere Zunahme der Ondulation keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat. Unterhalb dieses Niveaus besteht jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen Welligkeit und Druckfestigkeit. Offenbar liegt das gespreizte 130 mm Geflecht in diesem Bereich.

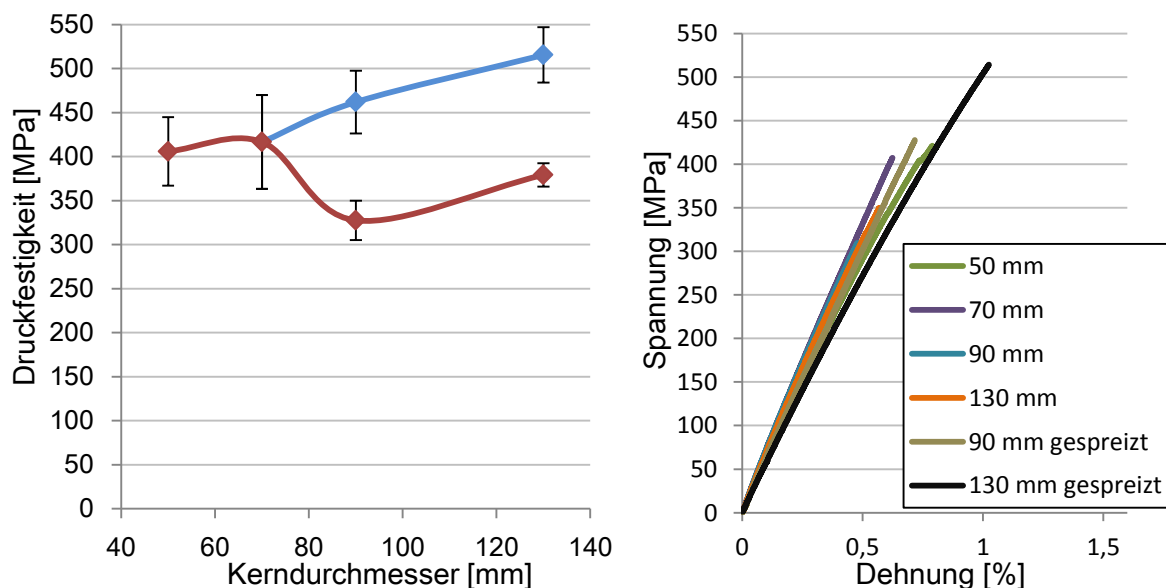


Abbildung 4.47: Links: mittlere Druckfestigkeit mit Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$); rechts: repräsentative Spannungs-Dehnungs-Verläufe der sechs Versuchsreihen

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der beiden gespreizten Geflechte (Abbildung 4.47 rechts) weisen keinen, von den übrigen Geflechtarchitekturen abweichenden Verlauf auf.

Der Bereich mit einer konstant hohen Druckfestigkeit kann somit auch auf Durchmesser von über 130 mm vergrößert werden. Es ergibt sich, wie bei den Zugversuchen eine Erweiterung des Prozessfensters. Bei den Zugversuchen deutete sich auf Grund der zunehmenden Faserschädigung eine Begrenzung des positiven Effekts durch das Spreizen an, welche bei einer Druckbelastung nicht erkennbar ist. Die Abnahme der Faserwelligkeit überwiegt offenbar, sodass ein intensiveres Spreizen auf noch niedrigere Flächengewichte sinnvoll erscheint.

4.6.4. Dreipunktbiegeversuche zur Bestimmung der ILSS

In Abschnitt 2.2.2 ist die Vorgehensweise für die Herstellung der Proben für die Dreipunktbiegeversuche beschrieben. Die Proben wurden aus der gleichen Platte wie die Zugproben entnommen, sodass die Probendicke der in Tabelle 3-1 und Tabelle 4-13 aufgeführten Dicke der Zugproben entspricht. Die Länge und Breite der Probe ist entsprechend der in Abbildung 2.12 dargestellten Verhältnisse gewählt.

Analog zu den Zugversuchen sind in dem Diagramm in Abbildung 4.48 die ILSS-Werte der sechs untersuchten Geflechtarchitekturen eingetragen. Die Werte der vier ungespreizten Geflechte (rot) wurden bereits in Abschnitt 3.3.3 diskutiert, neu hinzugekommen sind die blauen Werte der gespreizten Architekturen. Die beiden Proben des 90 mm Kerndurchmessers (gespreizt und ungespreizt) unterscheiden sich im Rahmen der statistischen Genauigkeit nicht. Für das gespreizte Geflecht des 130 mm Durchmessers steigt die interlaminare Scherfestigkeit jedoch deutlich an. In Abschnitt 3.3.3 wurde anhand von Quellen diskutiert, dass die ILSS mit abnehmender Ondulation sinkt. Folglich müsste das am stärksten gespreizteste Geflecht auch den geringsten ILSS-Wert aufweisen. Der bereits bei der Zugfestigkeit manifestierte Einfluss der Schädigung wird auch bei der interlaminaren Scherfestigkeit erkennbar. Erber [64] stellt bei der Untersuchung von Geflechtem einen Zusammenhang zwischen Faserschädigung und interlaminaren Eigenschaften fest. Die gebrochenen Filamente führen zu einer Verzahnung der Lagen und steigern somit den interlaminaren Zusammenhalt.

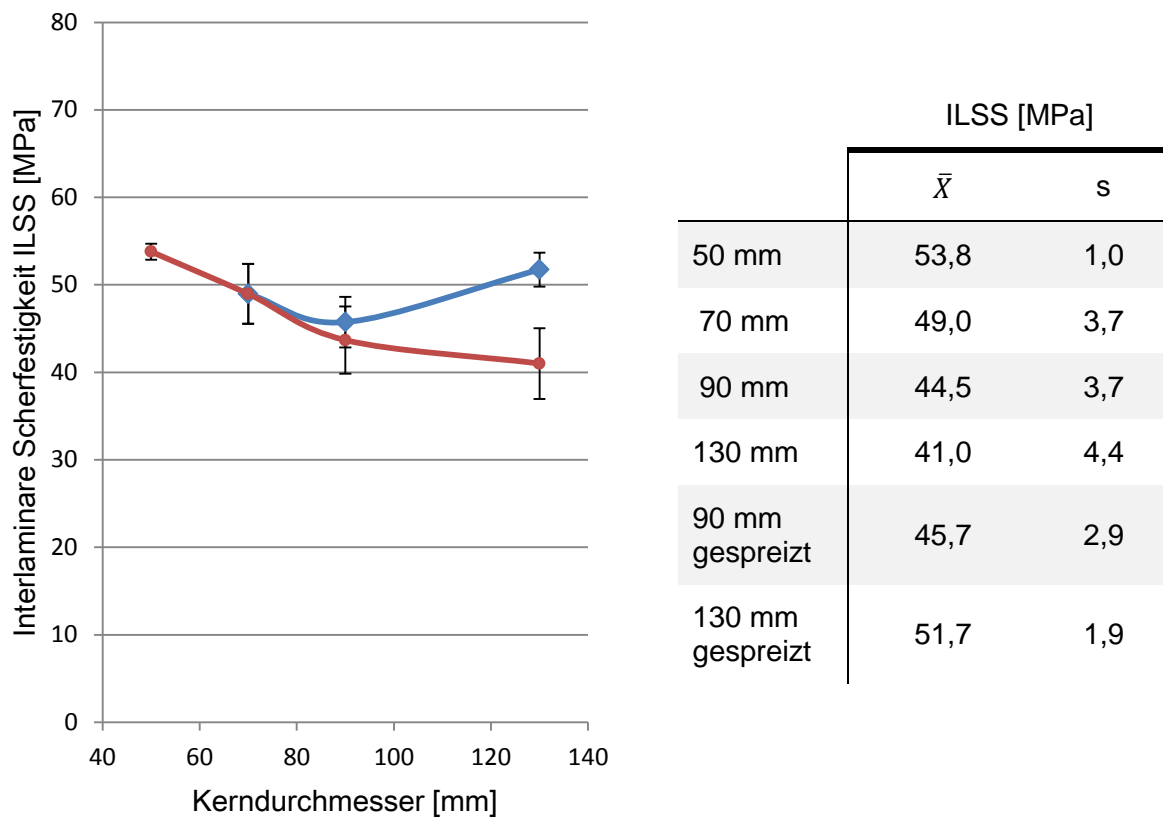


Abbildung 4.48: Mittlere scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in Abhängigkeit des Kerndurchmessers, links mit Konfidenzintervall ($\alpha = 0,05$) und rechts mit Standardabweichung

Die Schädigung der Fasern durch die Einwirkung der Düsen bestätigt sich auch bei den ILSS-Kennwerten. Bei Anwendungen, welche eine hohe Schadenstoleranz erfordern, ist dieser Effekt sogar erstrebenswert. Für gewöhnlich sind jedoch bei der Auslegung die Kennwerte in Faserrichtung relevant, sodass die Schädigung unerwünscht ist.

4.7. Bedeutung des prozessintegrierten Spreizens für das Prozessfenster

Das von Birkefeld [36] definierte Prozessfenster wurde mit der mechanischen Materialcharakterisierung in dieser Arbeit für den eindimensionalen Fall eines konstanten Flechtwinkels von $\pm 45^\circ$ verifiziert. Für größer werdende Umfänge ist das Prozessfenster durch die grüne Linie begrenzt (siehe Abbildung 3.2), welche zugleich das Optimum für die mechanischen Eigenschaften des Laminats darstellt. Durch die Erweiterung der Flechtanlage mit dem entwickelten Spreizaggregat wird diese Linie weiter in Richtung größere Kernumfänge verschoben. Das Prozessfenster kann auf Grund der untersuchten Geflechtarchitekturen mehr als verdoppelt werden.

Mit der erweiterten Anlagentechnik ist ein erster großer Schritt zur Herstellung von Flechtbauteilen mit großen Umfangsänderungen vollzogen. Für eine vollständige Charakterisierung des neuen Prozesses muss zum einen die maximal erreichbare Vergrößerung des Prozessfensters geklärt und zum anderen der Einfluss des Flechtwinkels untersucht werden. Die Zugversuche zeigten bereits, dass das Spreizpotenzial durch die Faserschädigung begrenzt wird. Durch die Weiterentwicklung der Spreizmechanismen kann diese Grenze jedoch weiter verschoben werden. Um das Prozessfenster in seiner ursprünglichen, zweidimensionalen Form darstellen zu können, ist die Wechselwirkung zwischen Spreizprozess und Flechtwinkel zu untersuchen. Es ist nicht auszuschließen, dass die für den konstanten Flechtwinkel von $\pm 45^\circ$ nachgewiesene Vergrößerung des Prozessfensters nicht auf andere Flechtwinkel übertragbar ist. Stellt sich heraus, dass gewisse Flechtwinkel besser spreizbar sind als andere, darf die Obergrenze des von Birkefeld aufgestellten Prozessfensters nicht parallelverschoben werden, sondern muss mit ihrer Form dem Spreizpotenzial der unterschiedlichen Flechtwinkel Rechnung tragen.

5. Variation der Fadenanzahl

Die Motivation für einen Flechtprozess mit einer variablen Anzahl an Flechtfäden ist die Einschränkung der Komplexität von geflochtenen Bauteil durch die in Kapitel 3.3 gewonnen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der Geflechtarchitektur und der mechanischen Leistungsfähigkeit des Faserverbundes. Das Fazit dieser Untersuchungen ist, dass das Flächengewicht einen maßgeblichen Einfluss auf die Zug- und Druckkennwerte des Geflechts besitzt. Das Geflecht darf daher weder ein zu niedriges noch ein zu hohes Flächengewicht aufweisen, also weder zu wenige noch zu viele Fäden, bezogen auf den Umfang, enthalten.

Durch die gezielte Anpassung der Fadenanzahl während einer Umfangsänderung, kann das Flächengewicht konstant gehalten werden. In diesem Kapitel wird ein Prozess, welcher diese Variation während des Flechtbetriebs erlaubt, vorgestellt. Entsprechend des in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Vorgehens nach VDI 2221 ist in Abbildung 5.1 die Struktur für dieses Kapitel dargestellt.

Nach der Konkretisierung der Aufgabenstellung im ersten Schritt, wird anschließend der neuartige Prozess im Detail analysiert, um die Schwerpunkte der Anlagenweiterentwicklung identifizieren zu können. Die bis dahin angestellten theoretischen Überlegungen werden im dritten Schritt mit Versuchen an einer 3D-Flechtanlage verifiziert. Ausgehend von den in diesen Versuchen gesammelten Erkenntnissen wird ein vorläufiger Prozessablauf definiert und in Schritt vier in Teilprozesse untergliedert. Nach der technischen Entwicklung dieser Schritte (Schritt fünf) entsteht der Entwurf für einen neuen Prozessablauf, welcher in Schritt sieben in einem Prüfstand umgesetzt wird. Der Funktionsnachweis und die Bewertung des Prozesses und der damit erreichbaren Materialqualität schließen die Prozessentwicklung ab.

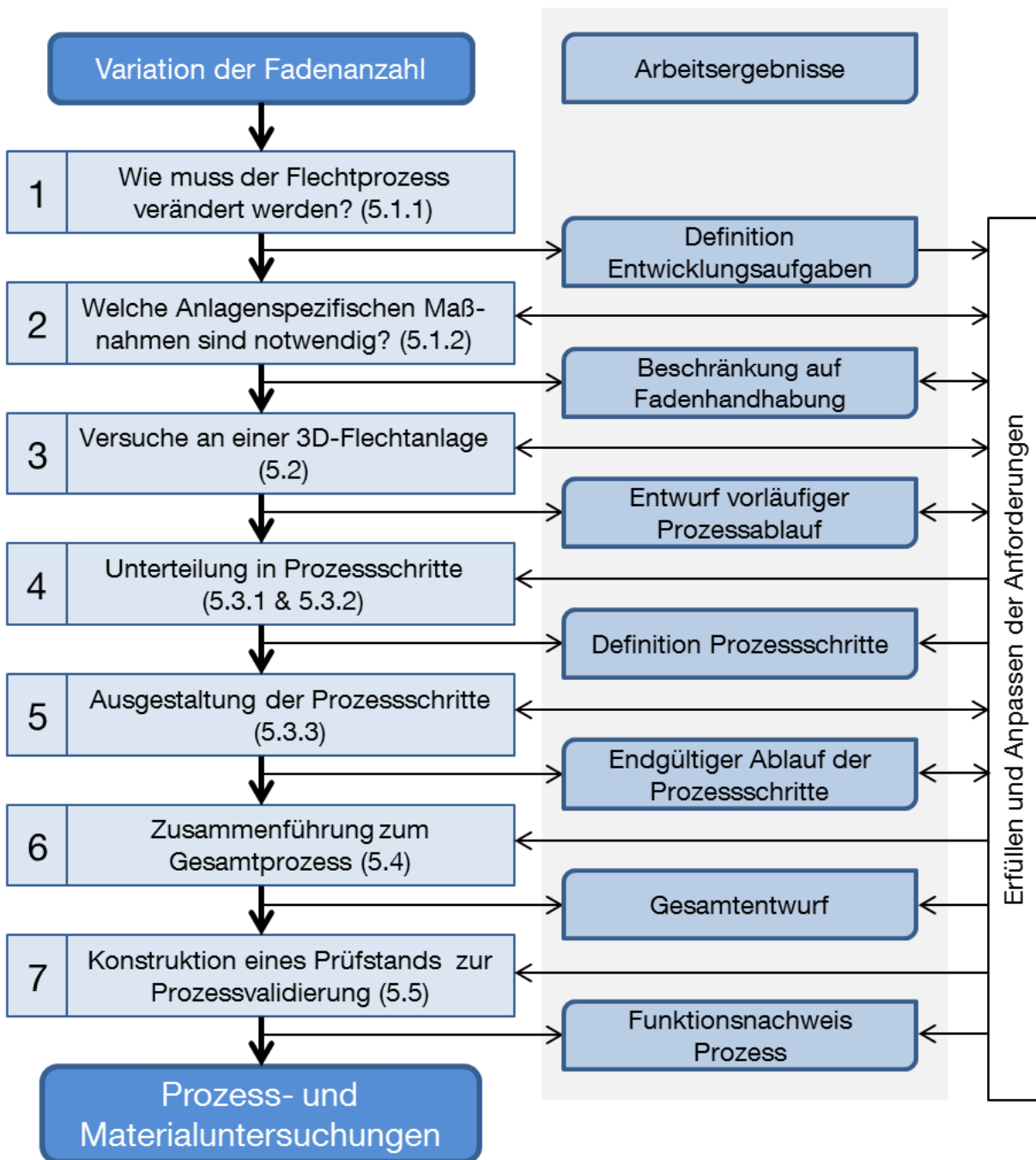


Abbildung 5.1: Struktur für das Vorgehen zur Prozessentwicklung *Variation der Fadenanzahl*

5.1. Beschreibung des Flechtprozesses mit variabler Fadenanzahl

In diesem Kapitel wird geklärt, über welche prinzipiellen Mechanismen ein Flechtprozess, der eine automatisierte Variation der Fadenanzahl zulässt, verfügen muss. Das Ziel ist die Erarbeitung einer konkreten Aufgabenstellung mit definierten Anforderungen als Ausgangsposition für die Entwicklung eines solchen Prozesses.

5.1.1. Variation der Fadenanzahl mit bestehender Anlagentechnik

Bei herkömmlichen Klöppelflechanlagen ist die maximale Anzahl der Flechtfäden durch die Anzahl der Flügelräder vorgegeben. Jedes Flügelrad kann eine bestimmte Anzahl an Klöppel aufnehmen. Handelt es sich um eine Anlage für die Serienproduktion, wird die Flügelradanzahl entsprechend der zu produzierenden Bauteilgröße gewählt. Je nach dem über wie viele Aussparungen jedes Flügelrad verfügt, kann eine bestimmte Anzahl an Klöppeln aufgenommen werden. Für gewöhnlich können auf einem Flügelrad zwei Klöppel positioniert werden, sodass eine Flechanlage mit n_{FR} Flügelrädern $2 \cdot n_{FR}$ Klöppel besitzt. Allerdings muss nicht von jedem Klöppel ein Faden abgezogen werden. Durch das Abschneiden einzelner Fäden wird die Funktionalität des Flechtprozesses nicht eingeschränkt. Folglich kann durch das Abtrennen einiger Fäden am Klöppel, das Flächengewicht des Geflechts bei einer Umfangsänderung konstant gehalten werden. Abbildung 5.2 zeigt jedoch, dass sich mit diesem Ansatz nicht der gewünschte Effekt einer gleichmäßigen Reduzierung des Flächengewichts erzielen lässt. Zwei unerwünschte Merkmale können beobachtet werden:

1. das grün markierte **Fadenende** liegt mit willkürlicher Ausrichtung teilweise unterhalb und teilweise oberhalb des Geflechts und
2. der abgeschnittene Faden hinterlässt die rot markierte **Gasse**.

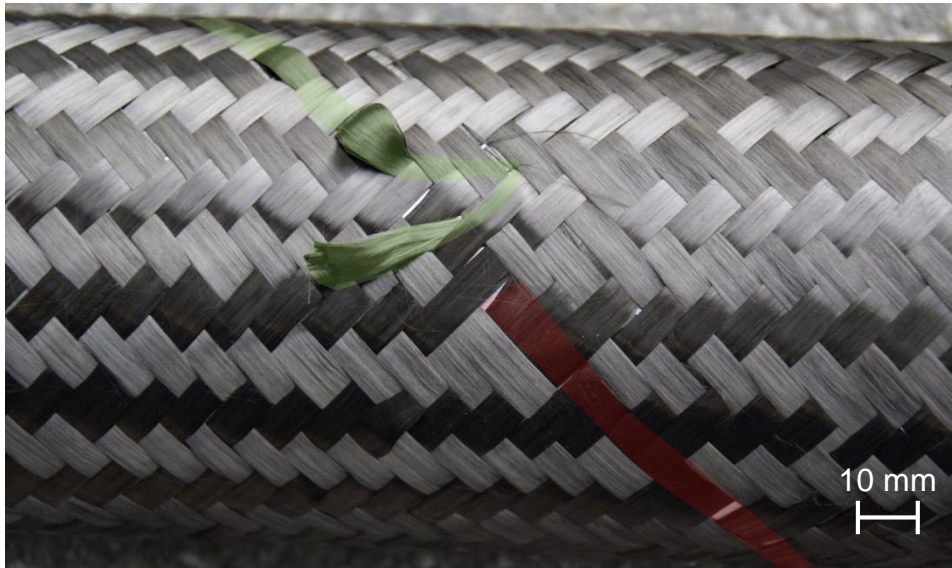


Abbildung 5.2: Fadenverlauf (grün) eines abgeschnittenen Fadens und die daraus resultierende Gasse (rot)

Diese beiden Fehlerbilder können nur durch eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik vermieden werden. Für die Führung des abgeschnittenen, losen Fadenendes fehlt ein Handhabungssystem, welche den Faden bis zur endgültigen Einbindung im Geflecht positioniert. Die Gasse ist der ungleichmäßigen Verteilung der Fasern auf die Flügelräder geschuldet. Da nach wie vor alle Flügelräder (n_{FR}) verwendet werden, hat sich das Verhältnis von vorher $2 \cdot n_{FR}$ zu $2 \cdot n_{FR} - 1$ Fäden verändert. Zwar schränkt dies die Funktionsweise des Flechtprozesses nicht ein, allerdings entsteht eine unregelmäßige Geflechtstruktur. Das eigentliche Ziel, den Geflechtschlauch gleichmäßig zu verkleinern und somit an einen kleineren Kernumfang anzupassen, kann nicht erreicht werden. Folglich muss die Flechtanlage selbst angepasst werden, sodass nicht nur Fäden, sondern auch die entsprechende Anzahl an Flügelrädern dem Prozess entnommen werden können.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass auch mit herkömmlicher Anlagentechnik ein regelmäßiges Geflecht mit reduzierter Fadenanzahl hergestellt werden kann. Dies tritt ein, wenn an allen Flügelrädern gleich viele Fäden abgetrennt werden. Das Ergebnis ist eine sogenannte halbe Besetzung. (Beispiel: eine Anlage mit 64 Klöppeln wird mit nur 32 Fäden bestückt) Somit ergibt sich zwar wieder ein homogenes Geflecht, allerdings entstehen zwei gravierende Nachteile:

Zum einen ändert sich die Abbindung: entsteht bei einer vollen Anlagenbesetzung eine 2x2 Abbindung, so ergibt sich nach der Halbierung eine 1x1 Abbindung. Auf Grund der größeren Anzahl an Überkreuzungspunkte und der daraus resultierenden stärkeren Faserondulation in einer 1x1 Abbindung, sinken die mechanischen Kennwerte in Faserrichtung (Druck und Zug). [22]

Zum anderen wird die Produktionsgeschwindigkeit halbiert. Da die Anzahl der Flügelräder und deren Drehzahl konstant bleiben, der Umfang des Kerns aber nur halb so groß ist, muss die Abzugsgeschwindigkeit halbiert werden. Für die Serienproduktion von umfangsvariablen Bauteilen kommt der Wechsel zwischen vollen und halben Besetzungen daher nicht in Frage.

5.1.2. Aufgabenstellung und Anforderungen an einen fadenvariablen Flechtprozess

Die Analyse des Geflechtbildes (Abbildung 5.2) nach der Entnahme eines Fadens aus dem Flechtprozess ergibt, dass die Flechtanlagentechnik für eine material- und prozessoptimierte Fadenvariation an zwei Schwerpunkten weiterentwickelt werden muss:

1. In der Flechtanlage selbst muss die **Klöppellaufbahn** so angepasst werden, dass durch die Entnahme von Fäden kein Flechtfehler entsteht.
2. Unabhängig von der eigentlichen Funktionsweise der Flechtanlage bedarf es einer **Fadenhandhabung**, welche Fäden, die dem Geflecht entnommen oder zusätzlich eingebracht werden sollen, führt.

Diese beiden Entwicklungsbereiche sind weitestgehend unabhängig voneinander. In den nächsten beiden Abschnitten wird daher getrennt eine Aufgabenstellung erarbeitet, welche als Ausgangspunkt für die Prozessentwicklung dient.

5.1.2.1. Die Flechtanlage

Bereits in der Einleitung des Kapitels 5 *Variation der Fadenanzahl* wurde auf die grundlegende Motivation für die durchzuführende Prozessentwicklung hingewiesen: die für die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechts ideale Architektur soll auch bei großen Umfangsänderungen beibehalten werden. Somit kann die Lösung nicht darin bestehen, durch die Fadenanzahlvariation neue Fehlstellen in Form von Gasen oder Abbindungsunregelmäßigkeiten zu erzeugen. Daher ergibt sich als erste Anforderung, dass sich auch nach einer Reduzierung oder Steigerung der Fadenanzahl von allen Flügelrädern gleich viele Fäden abgezogen werden. Nur so lässt sich ein homogenes Geflecht herstellen. Neben der Anzahl der Fäden muss also auch die Anzahl der am Flechtprozess teilhabenden Flügelräder variabel sein. An einer herkömmlichen Rundflechtanlage, bei der alle Flügelräder in Reihe geschaltet sind, lässt sich dies nicht umsetzen, da das Abschalten eines oder mehrerer Flügelräder keine geschlossene Klöppelbahn ergäbe. Erst mit einer zweiten, parallelgeschalteten Flügelradreihe kann dieses Prinzip umgesetzt werden. Abbildung 5.3 zeigt die Flügelradkonfiguration, mit der ein Geflecht sowohl mit 16, als auch mit 20 Fäden hergestellt werden kann. Die grüne und rote Linie zeigt den Verlauf der beiden Klöppelrich-

tungen. Der Kreis aus acht Flügelrädern wird durch die Flügelräder 3 und 4 ergänzt. Zusätzlich müssen, um die Fadenanzahl variieren zu können, Weichen zwischen den Flügelrädern 1 und 2, 2 und 3, und 1 und 4 angebracht werden. Im linken Bild drehen sich die Flügelräder 3 und 4 nicht, sie dienen als „Parkplatz“ für die vier Klöppel der nicht im Geflecht eingebundenen Fasern. Die Weichen sind so gestellt, dass die Gangbahnen den Verlauf wie bei einer gewöhnlichen Rundflechtanlage aufweisen.

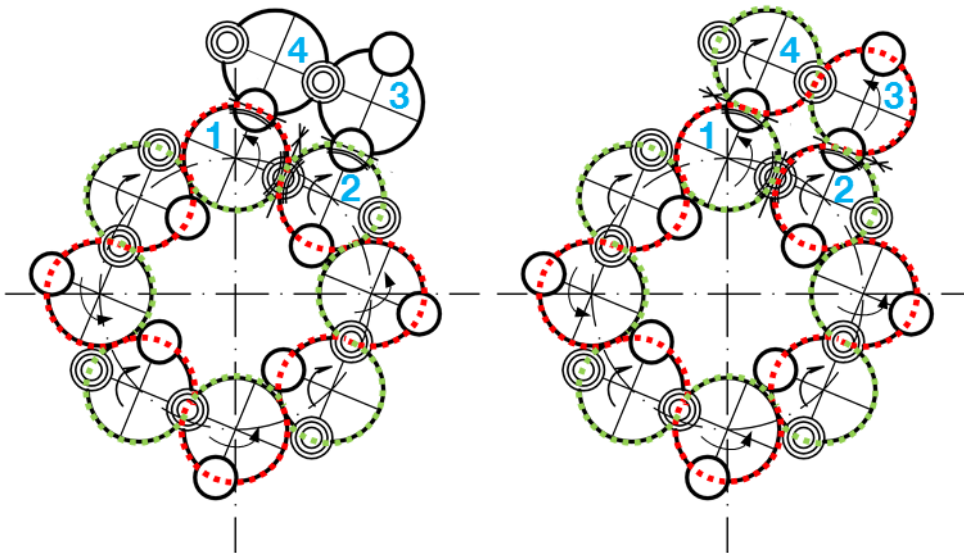


Abbildung 5.3: Konzept der Firma Steeger für eine Flügelradkonfiguration für das Flechten mit 16 (links) oder 20 (rechts) Fäden

Gilt es nun einen größeren Umfang zu beflechten, müssen zum einem die Flügelräder 3 und 4 angetrieben und zum anderen die Weichen umgestellt werden. Die veränderte Weichenstellung führt zu einer Klöppelübergabe zwischen den Flügelrädern 2 und 3, und 1 und 4. Zwischen den Flügelrädern 1 und 2 findet keine Übergabe mehr statt. Die vier auf Flügelrad 3 und 4 „geparkten“ Klöppel werden automatisch in den Flechtprozess integriert. Dieser Vorgang lässt sich auch in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Die Flügelräder 3 und 4 werden angehalten, die Weichen wieder umgestellt und der Prozess läuft erneut mit 16 Fäden. Das hier beschriebene Anlagenkonzept für eine axiale Bauweise (Achse der Flügelräder parallel zur Abzugsrichtung, siehe Abschnitt 2.1.1) kann auch auf Flechtanlagen mit einer radialen Bauweise übertragen werden. In diesem Fall werden die zusätzlichen Flügelräder axial versetzt an den Flügelradring angebaut (Abbildung 5.4).

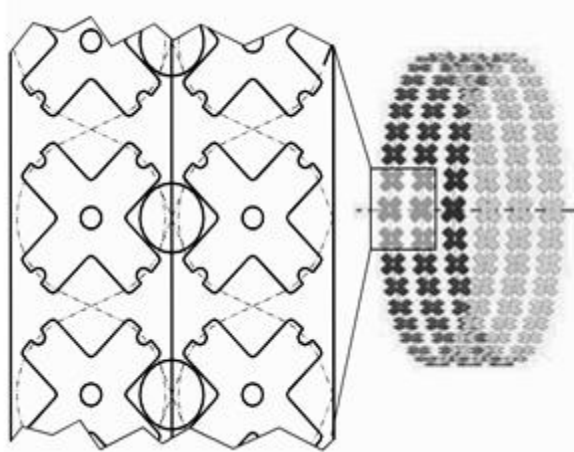


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der Erweiterung einer konventionellen radialen Flechtanlage um weitere Flügelradreihen [65]

Aus der Beschreibung des Übergangs zwischen den beiden Flechtkonfigurationen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Die abschaltbaren Flügelräder müssen parallel zu dem eigentlichen Flügelradkreis angeordnet sein, damit es zu keiner Unterbrechung der Klöppelaufbahn kommt. Des Weiteren können sie nicht über Zahnräder mit den übrigen Flügelrädern verbunden sein, sondern müssen separat angetrieben werden.
- In dem Bereich der zusätzlichen Flügelräder müssen Weichen die Anpassung der Klöppelgangbahnen ermöglichen.
- Der geschlossene Flügelradkreis (in Abbildung 5.3 acht Flügelräder) muss mit mindestens zwei zusätzlichen Flügelrädern erweitert werden. Das Zuschalten lediglich eines Flügelrads hätte ein Zusammenstoßen der Klöppel zur Folge. Somit beträgt bei der betrachteten Anlagenbesetzung die kleinste Abstufung bei der Fadenvariation die Einbringung oder Entnahme von vier Fäden in beziehungsweise aus dem Geflechtsschlauch.
- Das in Abbildung 5.3 vorgestellte Konzept kann nach dem vorhandenen Muster erweitert werden: entweder in radialer Richtung, durch das Anbringen zwei weiterer Flügelräder an die Flügelräder 3 und 4 oder in Umfangsrichtung, bis ein zweiter Kreis mit weiteren 8 Flügelrädern gebildet ist.

Eine speziell für diese Anwendung entwickelte Anlage lässt sich zwar aufbauend auf vorhandenen Konzepten spezifizieren, müsste allerdings hinsichtlich der Anlagesteuerung neu entwickelt werden, um keine oder zumindest möglichst wenig Zeit bei den Weichen- und Flügelradschaltungen aufbringen zu müssen.

An sogenannten 3D-Flechtanlagen lassen sich bereits mit bestehender Anlagentechnik die nötigen Änderungen in der Flügelradanzahl und Klöppelaufbahn vornehmen. In Abschnitt 5.2 werden Versuche an einer 3D-Flechtanlage durchgeführt, um zum einen den Funktionsnachweis für das vorgestellte Anlagenkonzept zu liefern und um zum anderen die dabei entstehende Geflechtstruktur zu charakterisieren. Im

Rahmen der Versuchsbeschreibung wird auch auf die Funktionsweise der Anlage eingegangen.

Die Umsetzung des ausgehend von Abbildung 5.3 beschriebene Anlagenkonzepts, also die konkrete Konstruktion einer Anlage und die Entwicklung einer dazugehörigen Steuerung, muss durch einen Flechtanlagenhersteller vorgenommen werden. Daher liegt in dieser Arbeit der Fokus auf der Entwicklung eines geeigneten Fadenhandhabungssystems.

5.1.2.2. Die Fadenhandhabung

Mit dem in Abschnitt 5.1.2.1 beschriebenen Flechtanlagenkonzepts wird lediglich die für die Herstellung eines homogenen Geflechtschlauchs benötigte Klöppelkinematik charakterisiert. Bei der Integration der, auf den zugeschalteten Flügelrädern positionierten Klöppeln, müssen die Fadenenden in das Geflecht eingebunden werden. Genauso müssen bei der Reduzierung der Fadenanzahl die aus dem Prozess entnommen Fäden abgeschnitten und bis zu ihrem erneuten Einsatz bevorratet werden. Die Fadenhandhabung hat also folgende Aufgaben:

1. Bei der **Fadeneinbringung**: Fadenenden zum Flechtpunkt führen und am Geflecht befestigen (beispielsweise kleben), eventuell überstehende Fadenenden abschneiden
2. Bei der **Fadenentnahme**: entnommene Fäden greifen, trennen und bevorraten

Alle Aufgaben finden in der Nähe des Flechtpunktes statt und sind daher weitestgehend unabhängig von der Funktionsweise der eigentlichen Flechtanlage. Da die Fadenenden unabhängig von dem Prozessschritt stets fixiert sein müssen, ist das grundlegende Element der Fadenhandhabung ein Greifer. Aufbauend auf dieser Funktion müssen weitere Funktionen, wie das Schneiden und Kleben, integriert werden. In Abbildung 5.5 ist der Fadenverlauf analog zu den Flügelradkonfigurationen in Abbildung 5.3 dargestellt. Im linken Bild wird der kleinere Geflechtschlauch nur mit dem inneren Flügelradkreis hergestellt; die Fadenenden der auf den zusätzlichen Flügelrädern „geparkten“ Klöppel werden in ausreichender Entfernung zum Flechtpunkt gehalten.

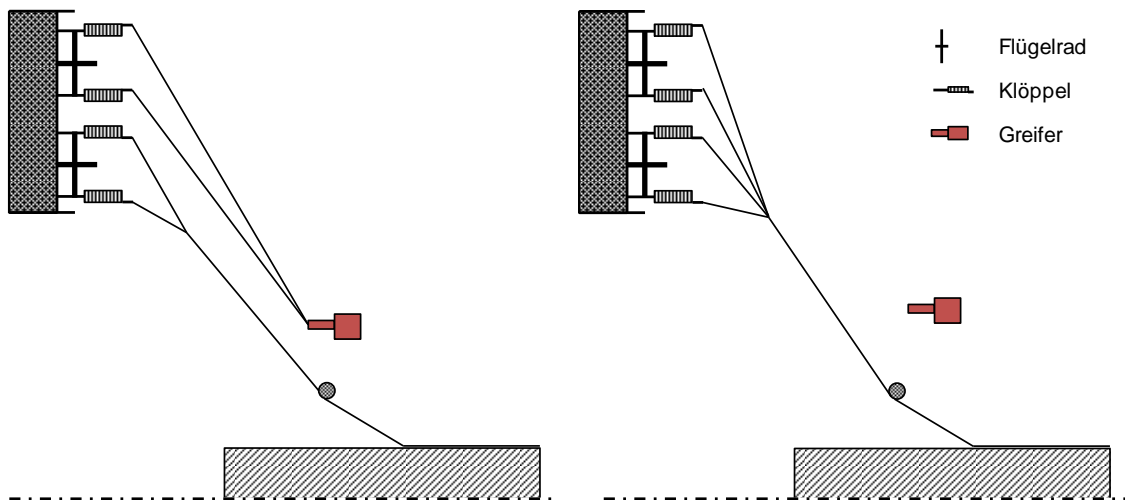


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Fadenhandhabung ohne (links) und mit (rechts) zusätzlichen Fäden im Geflecht

Nach der Einbringung der zusätzlichen Fäden, werden diese wie die übrigen Fäden am Flechtring umgelenkt und der Greifer wartet auf den nächsten Entnahmevergang. (Abbildung 5.5 rechts) Zwischen diesen beiden stationären Zuständen liegen die zu entwickelnde Prozesse der Fadeneinbringung und -entnahme. Hiervon hängt ab, wie ausgeprägt die in Abbildung 5.2 identifizierten Fehlerbilder auftreten.

Neben der Materialqualität hängt auch die Prozessdauer von der Handhabung ab. Die Schaltung der Weichen und Flügelräder bedarf entweder keiner oder nur einer kurzen Unterbrechung des Flechtprozesses. Ebenso darf durch den Bewegungsablauf der Fadenhandhabung keine Verzögerung des Flechtprozesses entstehen. Da die Fadenanzahl bei einer kontinuierlichen Umfangsveränderung in mehreren Schritten um jeweils vier Fäden angepasst wird, würde sich eine etwaige Stillstandzeit der Flechtanlage über die Anzahl der Einbringungs- und Entnahmevergänge aufsummieren. Die Kinematik des Fadenhandhabungssystems muss daher so ausgelegt werden, dass diese während des laufenden Flechtprozesses stattfinden kann.

In Tabelle 5-1 sind die Anforderungen, welche bei dem Entwurf einer Fadenhandhabungseinheit berücksichtigt werden müssen, aufgeführt.

Tabelle 5-1: Anforderungen an ein Fadenhandhabungssystem

Anforderung	Beschreibung
Prozesssicherheit	Solange die zusätzlichen Fäden nicht im Geflecht eingebunden sind, müssen diese fixiert sein
Materialqualität	Minimierung der Fehlerbilder (Schlaufen, Lücken, überstehende Fadenenden) an der Einbringungs-/Entnahmestelle
Prozessdauer	Flechtprozess darf für den Einbringungs-/Entnahmeprozesses nicht unterbrochen werden

5.2. Vorversuche an einer 3D-Flechtanlage

Bei den vorgestellten Versuchen geht es zum einen um die Validierung des in Abschnitt 5.1.2.1 vorgestellten Flechtanlagenfunktionsprinzips und zum anderen um die Findung geeigneter Lösungsprinzipien für eine automatisierte Fadenhandhabung. Das Vorgehen bei der Findung der Lösungsprinzipien kann als *versuchsbasiertes Brainstorming* bezeichnet werden. Die zum Ablauf der Fadenhandhabung entwickelten Ideen werden direkt in einem Versuch bewertet. Auf Grund der vielen, meist nicht vorhersehbaren Einflussgrößen und Wechselwirkungen, kann nur mit Hilfe eines Versuchs eine zuverlässige Bewertung stattfinden. Mit den Versuchen muss ein ausreichendes Prozessverständnis aufgebaut werden, um anschließend die Konstruktion eines Prüfstands zu ermöglichen. Da dieser Prüfstand für die Rundflechtanlage des LCC entworfen wird, findet als abschließende Betrachtung die Übertragung der Versuchserkenntnisse auf eine Rundflechtanlage statt.

5.2.1. Versuchsaufbau

Im Gegensatz zu der einreihigen, runden Anordnung der Flügelräder bei herkömmlichen Rundflechtanlagen, verfügen 3D-Flechtanlagen über eine kartesische Anordnung der Flügelräder (Abbildung 5.6).

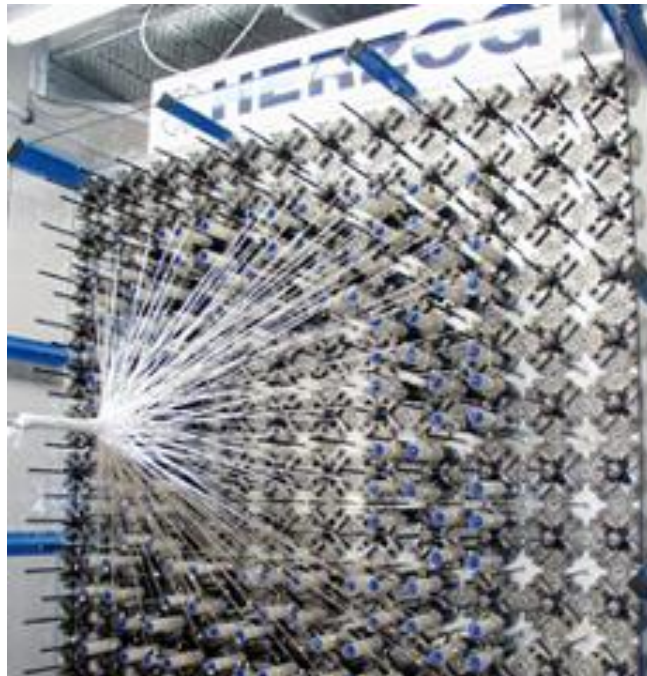


Abbildung 5.6: 3D-Flechtanlage der Firma Herzog [66]

Jedes Flügelrad ist einzeln angetrieben und ansteuerbar. Alle Übergänge zwischen den Flügelrädern sind über Weichen frei einstellbar. Meist wird diese Anlagentechnik eingesetzt, um dreidimensionale Geflechte, wie beispielsweise T-Träger herzustellen.

len. Auf Grund des hohen Grades an Flexibilität, kann die Flügelradanordnung, wie sie für das Flechten mit variabler Fadenanzahl notwendig ist, ebenfalls abgebildet werden. Für die Versuche wurde die Anlage CAB-9/32/220 des Instituts für Textiltechnik Aachen (ITA) verwendet, die ein Feld von 12x12 Flügelrädern besitzt. Diese Anlage ist eine von zwei Prototypenanlagen, welche auf eine gemeinsame Entwicklung des ITA und der Firma Herzog zurückgehen.

Die Anlagensteuerung und -besetzung muss so vorgenommen werden, dass, wie bei einer Rundflechtanlage, eine in Umfangsrichtung geschlossene Flügelradreihe den Grundaufbau des Prozesses bildet. Hinzu kommt eine möglichst hohe Anzahl an Flügelradpaaren, welche an der geschlossenen Flügelradreihe anliegen und mit den einzubringenden Klöppeln besetzt sind. Abbildung 5.7 zeigt die für die Versuchsdurchführung gewählte Besetzung.

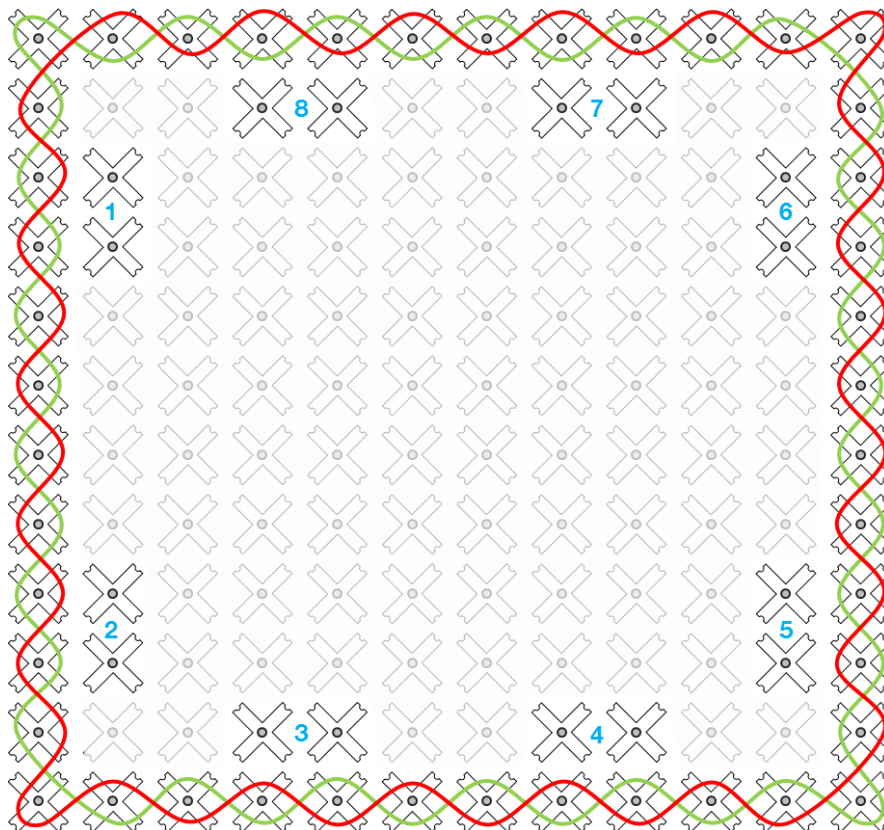


Abbildung 5.7: Klöppelbesetzung der 3D-Flechtanlage (alle schwarzen Flügelräder) und Klöppelbahn bei minimaler Fadenanzahl (rote und grüne Linien)

Damit sich jedes Flügelrad unabhängig von dem benachbarten drehen kann, befinden sich zwischen den Aufnahmepositionen für die Klöppel Aussparungen, sodass die Flügelräder die Form eines Kreuzes annehmen. Alle schwarzen Flügelräder sind mit jeweils zwei Klöppeln (auf deren Abbildung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet) besetzt, einen für jede Laufrichtung. Die äußeren 44 Flügelräder bilden die geschlossene Flügelradreihe, welche die minimale Fadenanzahl vorgibt. Auf Grund der kartesischen Anordnung der Flügelräder ist diese Anordnung eckig,

was aber keine Auswirkung auf den Geflechtschlauch hat. Die insgesamt 32 zusätzlich einsetzbaren Fäden befinden sich auf den Flügelradpaaren 1 bis 8. In der dargestellten Weichenstellung drehen sich nur die äußeren 44 Flügelräder, wobei die eine Klöppelrichtung der roten Linie folgt und die andere der grünen.

Mit dem in Abbildung 5.7 dargestellten Klöppelverlauf wird der kleine Umfang ($d_k = 100 \text{ mm}$) des Versuchskerns (Abbildung 5.8) beflochten. Entlang der Rampe, hin zu dem größeren Umfang ($d_g = 135 \text{ mm}$), werden nach und nach die zusätzlichen Flügelradpaare eingeschaltet.

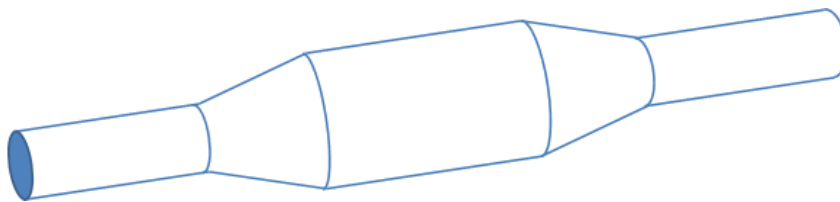


Abbildung 5.8: Kern für die Versuche an der 3D-Flechthanlage

Durch die Steigerung der Fadenanzahl von 88 auf 120 bleibt das Flächengewicht, trotz Umfangsänderung und konstantem Flechtwinkel ($\pm 45^\circ$), näherungsweise gleich. Die acht Flügelradpaare werden gleichmäßig verteilt über die 200 mm lange Rampe zugeschaltet, wobei die zwei aufeinanderfolgenden Zuschaltungen in Umfangsrichtung möglichst weit voneinander entfernt gewählt werden. Wird beispielsweise das Flügelradpaar 1 als erstes zugeschaltet, so folgt darauf die Nummer 5. Somit liegen die von den Fadenenden verursachten Fehlstellen weit auseinander und eine gegenseitige Beeinflussung kann ausgeschlossen werden.

Bei einer Zu- oder Abschaltung eines Flügelradpaares muss der Flechtprozess angehalten werden. In einem zusätzlichen Programmabschnitt werden die Weichen umgestellt und die betroffenen Flügelräder so positioniert, damit die Klöppel bei der Wiederaufnahme des Flechtens nicht kollidieren. Bis zu der darauffolgenden Zu- oder Abschaltung wird ein Teil des konischen Bereichs mit der neu eingestellten Fadenanzahl beflochten.

Abbildung 5.9 zeigt die veränderte Klöppelbahn nach der ersten Zuschaltung. Das dabei entstehende Geflecht besteht aus 92 Fäden, wobei die Fäden auf der Fläche der Flechthanlage ungleichmäßig verteilt sind. Im Bereich eines zugeschalteten Flügelradpaares entsteht gewissermaßen eine Falte im Geflechtschlauch. Während der Versuchsdurchführung gilt es darauf zu achten, ob sich die Falte bis zur Kernablage glättet und der gewünschte gleichmäßige Schlauch entsteht.

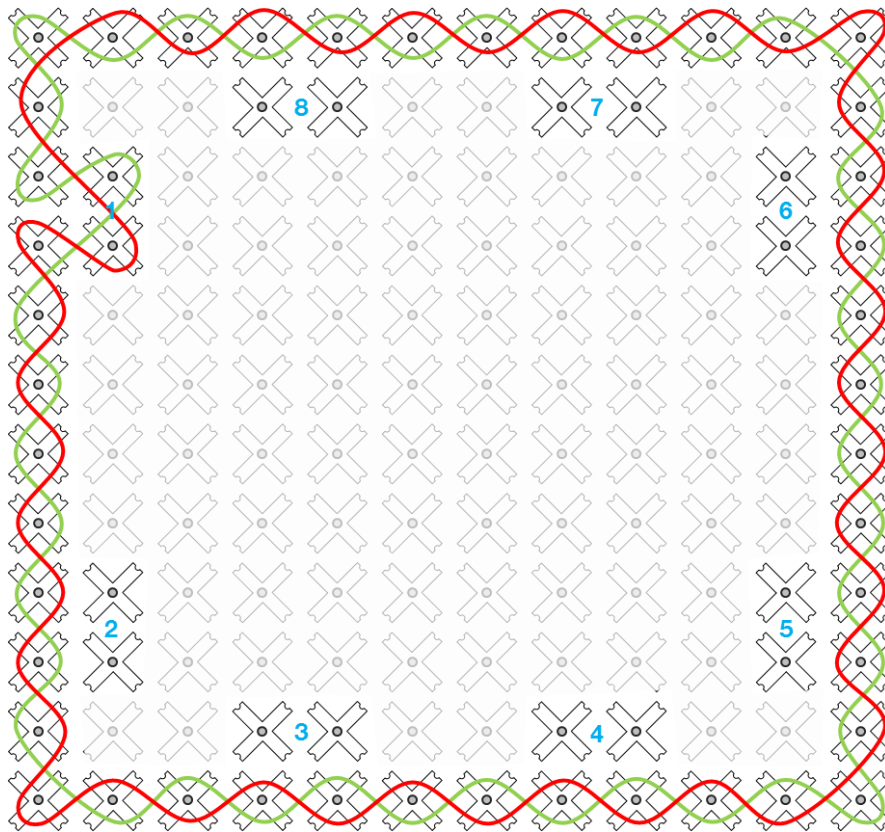


Abbildung 5.9: Klöppelbahn nach der Zuschaltung des ersten Flügelradpaares (rote und grüne Linien)

Die 3D-Flechtanlage verfügt in der für die Versuche verwendeten Konfiguration über keinen zentralen Durchbruch, durch welchen der Kern geführt werden kann. Da das Geflecht ohne Flechtring hergestellt wird, bildet sich ein ausreichend großer Flechtkegel um den 1 m langen Kern zwischen Flechtanlage und Flechtrumpf zu platzieren. Der Kern wird über eine Seilwinde mit der für den gewünschten Flechtwinkel benötigten Geschwindigkeit abgezogen.

In Tabelle 5-2 sind die Parameter für die Versuche zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Parameter für die Versuche an der 3D-Flechtanlage

Parameter	Einstellung
Fasermaterial	24k HT, 1600 tex
Flechtwinkel	$\pm 45^\circ$
Fadenanzahl	88 - 120
Flügelraddrehzahl	20 min ⁻¹
Versuchskern	$d_{\text{klein}} = 100 \text{ mm}$, $d_{\text{groß}} = 135 \text{ mm}$; Übergänge 200 mm lang
Klöppefeder	350 g

5.2.2. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Neben der Untersuchung, ob die programmierten Klöppelaufbahnen das erwünschte Geflecht liefern, liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der Bewertung von unterschiedlichen Möglichkeiten die Fadenenden dem Geflecht zu entnehmen bzw. einzubringen. Die Handhabung der Fadenenden findet ausschließlich per Hand statt, um maximale Flexibilität für die Optimierung des Flechtbildes zuzulassen. Das Vorgehen und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse werden im Folgenden für das Einbringen und die Entnahme der Fäden getrennt vorgestellt.

5.2.2.1. Einbringen der Fäden

Während die Flechtanlage für die Durchführung der Programmschritte zur Integration des zusätzlichen Flügelradpaares angehalten wird, müssen die vier Fadenenden am Kern befestigt werden. Sobald der Flechtprozess erneut gestartet wird, werden die Fäden mit dem Kern abgezogen und durch die Klöppelbewegung in das Geflecht eingebunden. Bei der Anbindung der Fadenenden ergeben sich die in Abbildung 5.10 dargestellten beiden Möglichkeiten: entweder die Fäden werden noch vor dem Flechtkegel direkt auf der Kernoberfläche respektive der vorherigen Geflechtlage angebracht, oder durch den Flechtkegel hindurchgeführt und auf der Abzugseite fixiert.

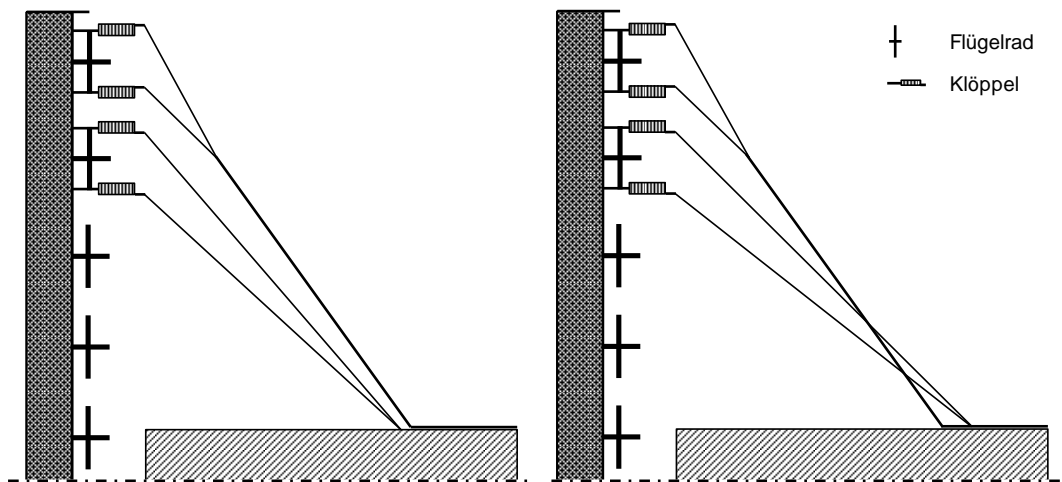


Abbildung 5.10: Anbindung der zusätzlichen Fäden vor (links) oder hinter (rechts) dem Flecht- punkt

Werden die Fäden vor dem Flechtunkt fixiert, befindet sich das zur Befestigung herangezogene Hilfsmittel nach dem Durchschreiten des Flechtpunkts unter der Geflechtlage und verbleibt somit im Laminat. Folglich sollte die Fixierung möglichst klein ausfallen, wie beispielsweise mittels eines Klebepunktes. Durch die Wahl eines an das Harzsystem angepassten Flüssigklebers ließe sich zwar eine gute Verträglichkeit mit dem späteren Verbund realisieren, allerdings sind die mindestens im Sekundenbereich liegenden Aushärtezeiten der Klebstoffe nicht mit der Forderung nach einer kurzen Prozessdauer in Einklang zu bringen. Wird stattdessen ein Klebeband verwendet, kann zwar die Aushärtezeit eingespart werden, allerdings erweist sich diese Art der Anbindung nur bei einer großflächigen Aufbringung als zuverlässig. Grundsätzlich lässt sich auf Grund der Fadenspannung und der Ungleichmäßigkeit Fadenenden kaum ein reproduzierbarer Vorgang für die Fixierung mittels eines Klebstoffes finden, welcher gleichzeitig den Prozess nicht verlangsamt und keinen übermäßigen Eintrag an Fremdmaterial erfordert. Hinzu kommt, dass die überstehenden Fadenenden, welche nicht in das Geflecht eingebunden werden, ebenfalls unterhalb des Geflechts liegen und daher nicht entfernt werden können.

Werden die Faserenden, wie in Abbildung 5.10 rechts, erst durch den Flechtkegel geführt, ist es möglich die Fäden mit allen erdenklichen Hilfsmitteln zu fixieren, da diese im Anschluss an den Flechtvorgang wieder entfernt werden können. Wie genau dieses Hilfsmittel beschaffen sein muss, wird in der Konzeptentwicklung geklärt. In den Versuchen wurden die Fadenenden mittels eines Kabelbinders auf der Kernoberfläche fixiert. (Abbildung 5.11) Die Fäden durchlaufen circa 200 mm vor dem Flechtunkt den Flechtkegel und werden anschließend direkt am Flechtunkt durch die Klemmwirkung des Kabelbinders fixiert. Wird der Kabelbinder ausreichend fest angezogen, kann das Herausrutschen der Fäden, wie beispielsweise bei einer Klebverbindung, ausgeschlossen werden.

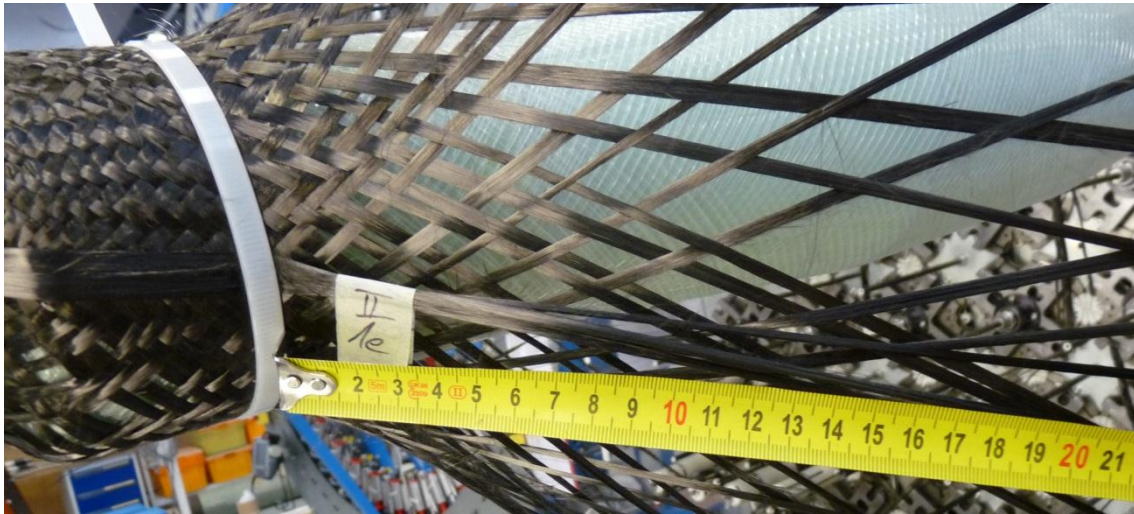


Abbildung 5.11: Anbindung eingebrachter Fäden mittels eines Kabelbinders

Der Prozessschritt der Anbindung der eingebrachten Fäden lässt sich mit dieser Vorgehensweise reproduzierbar stabil durchführen. Allerdings unterliegt die Materialqualität, also das Ausmaß der Verwerfungen im Geflecht, die durch die eingebrachten Fäden ausgelöst werden, einer starken Streuung. Das hauptsächlich auftretende Fehlerbild ist eine oder mehrere, unterschiedlich groß ausfallende Lücke im Bereich des Eintritts der Fäden in das Geflecht. (Abbildung 5.12) Etwa 35 mm nach der Steigerung der Fadenanzahl vergleichmäßigt sich das Geflecht wieder, jedoch kann auf Grund der Größe der Lücke von einer erheblichen lokalen Schwächung des Laminats ausgegangen werden.



Abbildung 5.12: Durch das Einbringen der zusätzlichen Fäden verursachten Lücken im Geflecht

Bevor mit der Ursachensuche für die Entstehung der Lücke fortgefahren wird, sei angemerkt, dass mit der Anlagenbesetzung das gewünschte Ergebnis erzielt werden kann. Sowohl der eckige Verlauf der geschlossenen Flügelradreihe, als auch die Anordnung der zuschaltbaren Flügelräder ergeben einen runden, homogenen Geflechtsschlauch.

Zurück zu den durch die Fadeneinbringung verursachten Lücken. Es erwiesen sich zwei Faktoren als treibende Einflussgrößen bei deren Entstehung:

1. die Position des Durchtrittes durch den Flechtkegel und
2. die Position der Fixierung der Fäden durch den Kabelbinder.

Um den ohnehin schwer automatisierbaren Vorgang des Durchreichens durch den Flechtkegel zu vermeiden, muss bei der Anlagenspezifikation festgelegt werden, dass sich die zusätzlichen Flügelräder außerhalb des Flügelradrings befindet (wie in Abbildung 5.3 umgesetzt). Da sich bei dieser Bauweise die einzuführenden Klöppel bereits auf der äußersten Bahn befinden, muss der Flechtkegel nicht durchlaufen werden.

Die fixierende Kraft muss direkt an dem Punkt, wo die Fäden in das Geflecht laufen, angreifen. Bei den in Abbildung 5.13 eingebrachten Fäden befindet sich der zur Fixierung angebrachte Kabelbinder rechts außerhalb des Bildes. Die Fäden erfahren allerdings erst im Bereich der grünen Markierung die erste Abbindung mit den übrigen Fasern des Geflechts. Bis dieser Bereich auf dem Kern abgelegt ist, werden die vier Klöppel der eingebrachten Fäden bereits einige Flügelräder weiter transportiert, jeweils zwei in eine Richtung. Auf Grund dieser Bewegung und der gleichzeitig anliegenden Fadenspannung, ergeben sich durch die Fixierung die mit roten Pfeilen angedeuteten Kraftvektoren. Der senkrecht zu der $\pm 45^\circ$ Ausrichtung der Flechtfäden wirkende Kräfteanteil hat das Auseinanderziehen des Geflechts zur Folge. Nur wenn die Fäden so fixiert werden, dass sie entlang der blauen Linien verlaufen, entsteht keine Kraftkomponente, die das Geflecht verzerrt und dabei die Lücken hervorruft. Folglich darf die Fixierung der Fasern nicht sofort am Kern vorgenommen werden. Sie muss an dem Schnittpunkt der beiden blauen Linien erfolgen. Dieser Punkt bewegt sich mit der Abzugsgeschwindigkeit erst innerhalb des Flechtkegels und nach dem Flechtpunkt auf dem Kern. Daraus ergibt sich eine weitere Anforderung für die Fadenhandhabung: die Fäden dürfen nicht statisch nach dem Flechtpunkt fixiert werden, sondern müssen eine gezielte Führung erfahren.

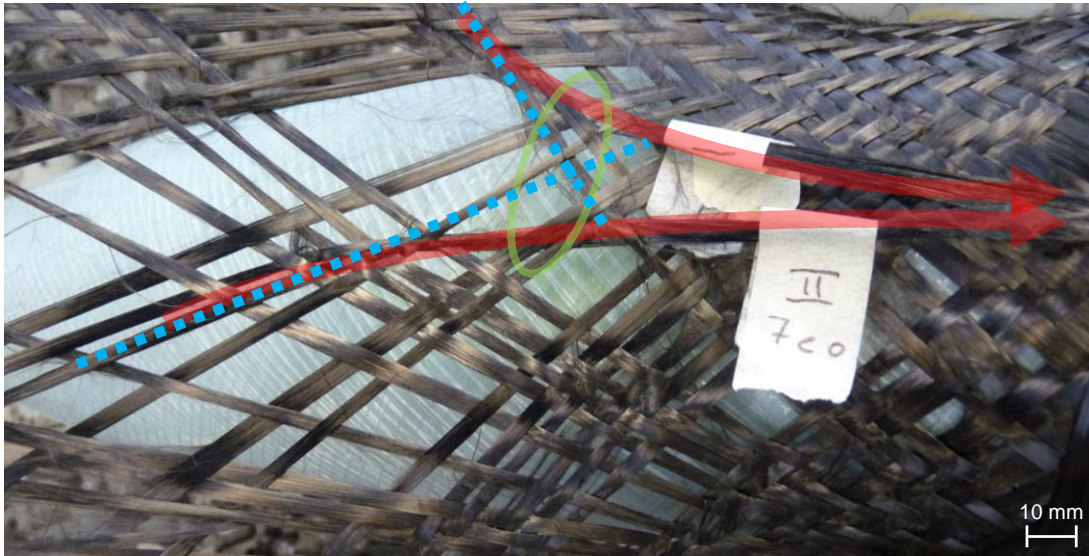


Abbildung 5.13: In das Geflecht eingebrachte Fäden und deren Kraftvektor (rote Pfeile)

Findet die Anbindung der Fasern nicht mit einem stationären Kabelbinder statt, sondern wird sie per Hand vorgenommen, kann durch die gezielte Bewegung des Fixierungspunktes das Entstehen der Lücken vermieden werden. Erst wenn der in Abbildung 5.13 grün markierte Bereich auf dem Kern abgelegt ist, können die Fäden auf dem beflochtenen Kern fixiert werden.

Für das weitere Vorgehen lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

1. Die gewählte Anlagenkonfiguration ermöglicht die Herstellung eines homogenen Geflechtschlauches mit einer veränderbaren Anzahl an Fäden. Der Funktionsnachweis für eine Anlagenbauweise nach Abschnitt 5.1.2.1 ist geliefert. Bei der Anordnung der Flügelräder ist darauf zu achten, dass die zuschaltbaren Flügelradpaare außerhalb des geschlossenen Flügelradkreises liegen. Somit können die Fäden oberhalb des Geflechts geführt und fixiert werden.
2. Die Position der Fixierung der Fäden entscheidet über die Größe der entstehenden Fehlstellen. Nur wenn die Fixierung direkt an der Stelle, wo die Fäden ins Geflecht laufen, stattfindet, kann die Größe der Lücken minimiert werden.
3. Die Fixierung der eingebrachten Fäden kann nach ca. 100 mm abgelegtem Geflecht entfernt werden. Auf Grund der bis dahin entstandenen Abbindung übersteigt die Reibung im Geflecht die Abzugskräfte der Fäden. Ein Herausziehen wird somit verhindert.
4. Aus dem Geflecht überstehende Fadenenden lassen sich nicht vermeiden. Eine Beschnittvorrichtung ist vorzusehen.

5.2.2.2. Entnahme der Fäden

Wie bei der Einbringung der Fäden, muss bei der Entnahme ebenfalls ein Unterprogramm abgefahren werden, um die Weichen und Flügelräder in die gewünschte Position zu bringen. Zu diesem Zeitpunkt sind die Fäden noch vollständig in das Geflecht eingebunden und können daher noch nicht abgetrennt werden. Erst wenn der Flechtprozess ohne die abgeschalteten Flügelräder fortfährt, werden die entnommenen Fäden abgezogen, ohne dabei eine Abbindung zu erfahren. Sofern die auf den stehenden Flügelrädern befindlichen Fäden nicht abgetrennt werden, kommen sie als 0° -Fäden unterhalb des Geflechts zum Liegen. (Abbildung 5.14) Auch hier zeigt sich die gewählte Anlagenbesetzung mit der Anordnung der zusätzlichen Flügelräder innerhalb des geschlossenen Flügelradkreises als nachteilig. Befinden sich die Fäden außerhalb des Geflechtschlauchs, können die Fäden wesentlich leichter abgetrennt werden.

Durch die Fadenspannung werden die Fäden aus der $\pm 45^\circ$ Flechtrichtung in die 0° Richtung umgelenkt. Die roten Pfeile verdeutlichen den Fadenverlauf und den daraus resultierenden Kraftvektor. Die aus der Fadenspannung resultierende Kraftkomponente senkrecht zum Faserverlauf des Geflechts hat das Entstehen der Lücke zur Folge.

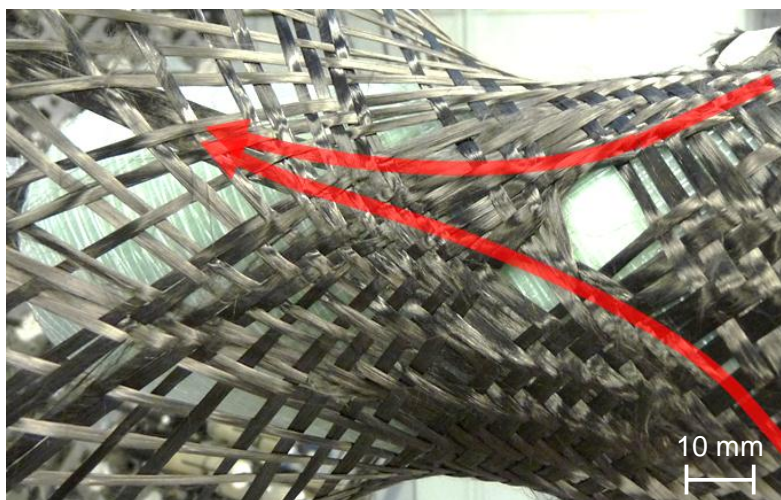


Abbildung 5.14: Von der Fadenspannung (rote Pfeile) der entnommenen Fäden verursachte Lücke

Die Fäden müssen bereits bevor die letzte Abbindung den Flechtpunkt erreicht gebündelt, gegriffen und entlastet werden. Das Abtrennen darf erst stattfinden, sobald die letzte Abbindung den Flechtpunkt erreicht hat. Dann gilt es die Fäden möglichst nah am Kern abzutrennen, sodass nur ein kurzer Fadenüberstand entsteht.

Das Fadenende, welches zu den „geparkten“ Klöppeln führt, muss nun bis zu einem erneuten Einbringungsvorgang bevorratet werden. Hiermit beginnen die in Abschnitt 5.2.2.1 beschriebenen Schritte.

Für das weitere Vorgehen bleibt festzuhalten:

1. Auch die Entnahme der Fäden gestaltete sich leichter mit der Anordnung der abschaltbaren Flügelräder außerhalb des geschlossenen Flügelradrings. Diese Bauweise ist daher unbedingt zu bevorzugen.
2. Die nicht mehr am Prozess teilnehmenden Fäden müssen so früh wie möglich erfasst und von der Fadenspannung entlastet werden. Ansonsten verursacht die Auslenkung der Fäden aus der Flechtrichtung Lücken im Geflecht.
3. Sobald die letzte Abbindung den Flechtpunkt erreicht hat, können die Fäden abgetrennt werden, eine weitere Fixierung ist nicht notwendig.

5.2.3. Fadenhandhabung an einer Rundflechtanlage

Bei den Versuchen an der 3D-Flechtanlage hat sich gezeigt, dass für die Gestaltung der Fadenhandhabung die Bauweise der Flechtanlage eine wichtige Randbedingung darstellt. Die zu- und abschaltbaren Flügelräder können entweder außerhalb oder innerhalb des geschlossenen Flügelradrings angebracht werden. Die Anordnung entscheidet darüber, ob die zusätzlichen Fäden von außen oder von innen in den Geflechtschlauch laufen. Durch die Besetzung der 3D-Flechtanlage befinden sich die zusätzlichen Flügelräder innen, sodass die Fäden ebenfalls von innen in den Geflechtschlauch laufen. Sowohl beim Einbringen als auch bei der Entnahme der Fäden hat sich diese Anordnung als nachteilig erwiesen, da die Zugänglichkeit für die Handhabung der Fäden stark eingeschränkt ist. Unabhängig davon, ob eine axiale oder radiale Anlagenbauweise verwendet wird, müssen die zusätzlichen Flügelräder so angeordnet sein, dass die Fäden von außen in das Geflecht laufen und das Handhabungssystem somit auf der Seite des Kernabzugs agieren kann (Abbildung 5.15).

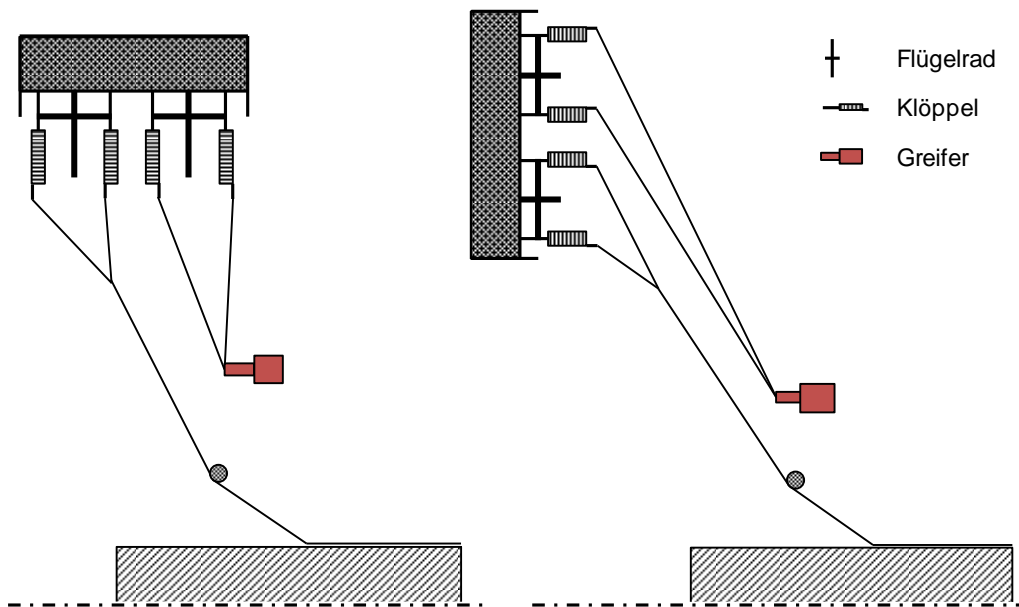


Abbildung 5.15: Anlagenkonfiguration bei einer axialen (links) und einer radialen (rechts) Bauweise

Die Bewegungsabläufe, die der in Abbildung 5.15 schematisch dargestellte Greifer zur Fadenhandhabung vollziehen muss, sind für beide Anlagenbauweisen gleich. Daher wird auf Grund der radialen Anlage des LCC in allen weiteren Abbildungen von dieser Bauweise ausgegangen. Eine Übertragung auf eine axiale Flechtanlage ist aber stets möglich.

5.3. Definition und Analyse der Prozessschritte

Die an der 3D-Flechtanlage durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass das Flechtanlagenkonzept zur Umsetzung der benötigten Klöppelaufbahnen funktioniert. Hauptherausforderung ist dabei die Entwicklung einer robusten und schnellen Steuerung, welche es erlaubt die Weichenumstellung und Positionierung der einzubringenden oder zu entnehmenden Flügelräder während des laufenden Prozesses vorzunehmen.

Wesentlich komplexer ist die Entwicklung einer Fadenhandhabung, welche die Fäden zuverlässig und schnell positioniert und gleichzeitig die Fehlstelle im Geflecht minimiert. Die Vorversuche haben gezeigt, wie die prinzipiellen Abläufe der Fadenbringung und -entnahme zu gestalten sind. Um einen geeigneten Prozessablauf definieren zu können, wird dieser zu Beginn in einzelne Schritte unterteilt. Diese Schritte werden anschließend getrennt analysiert, mit dem Ziel einen detaillierten Ablauf aufstellen zu können. Aus diesem Ablauf werden die Prozessanforderungen formuliert, welche wiederum die Grundlage für die Erstellung des Lastenhefts für den Prüfstand bilden. Reicht die bloße Aufstellung der Funktionsstruktur nicht aus, um

aus der Anforderung eine konkrete Spezifikation für die konstruktive Ausgestaltung des Prüfstands abzuleiten, muss die Anforderung in einer weiteren Konzeptionsrunde detailliert werden. Dies geschieht jedoch nicht mehr bei der Betrachtung der Einzelschritte, sondern erst nachdem alle Schritte einmal analysiert wurden. Somit kann sichergestellt werden, dass alle Anforderungen bei der Ausgestaltung der zu konkretisierenden Anforderung berücksichtigt werden können. Erst wenn alle Schritte vollständig charakterisiert sind *und* alle Prozessanforderungen in Spezifikationen für das Lastenheft überführt wurden, wird der Gesamtprozess aufgestellt.

Der Prozessablauf und der daraus abgeleitete Prüfstand werden unter der Vereinfachung, dass nur ein Flügelradpaar zu- oder abgeschaltet wird, entworfen. Die Übertragung in ein Anlagenkonzept, welches auch eine höhere Anzahl an Fadenvariationen zulässt, findet im Anschluss statt.

5.3.1. Prozessschritte bei der Einbringung von Fäden

Die Ausgangsposition des Teilprozesses *Fadeneinbringung* ist der in Abbildung 5.15 dargestellte Zustand. Der Greifer mit den einzubringenden Fäden befindet sich in einer Halteposition in der Nähe des Flechtpunktes. Abbildung 5.16 zeigt die Prozessschritte, wie sie bei der Durchführung der Vorversuche an der 3D-Flechtanlage vollzogen wurden. Diese gilt es nun zu automatisieren. Nach der Zuschaltung des Flügelradpaares werden die vier zusätzlichen Fäden in das Geflecht eingeflochten. Sobald die erste Abbindung die Position des Greifers (bei den Vorversuchen die Hand), welcher die Fadenenden hält, erreicht, muss sich dieser erst entlang des Flechtkegels und schließlich entlang des Kerns mitbewegen. Nach einer ausreichend langen Bewegung mit dem Kernabzug, wenn die Reibung im Geflecht zur Fixierung der eingebrachten Fäden ausreicht, können die Fadenenden zwischen Geflechoberfläche und Greifer abgetrennt werden. Der Greifer entsorgt nun die verbleibenden Faserstücke und begibt sich in die Ausgangsposition für die Fadenentnahme.



Abbildung 5.16: Prozessschritte bei der Einbringung von Fäden

Die beiden von der Fadenhandhabung durchzuführenden Schritte werden in den folgenden zwei Abschnitten im Detail analysiert. Dies geschieht mit dem Ziel, Anforderungen abzuleiten und etwaigen Detaillierungsbedarf zu identifizieren.

5.3.1.1. Schritt 1: Bewegung der Fadenenden

Bei den Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass die Entstehung von Lücken im Bereich des Eintritts der zusätzlichen Fäden in das Geflecht maßgeblich von der Bewegung der Fadenenden während des Einbringungs Vorgangs bestimmt wird. Nur wenn die Fäden direkt an der Stelle, wo sie ihre erste Abbindung erfahren, gehalten werden, lässt sich das Ausmaß der Lücken minimieren. Der Start- und Endzustand dieser Bewegung sind in Abbildung 5.17 dargestellt.

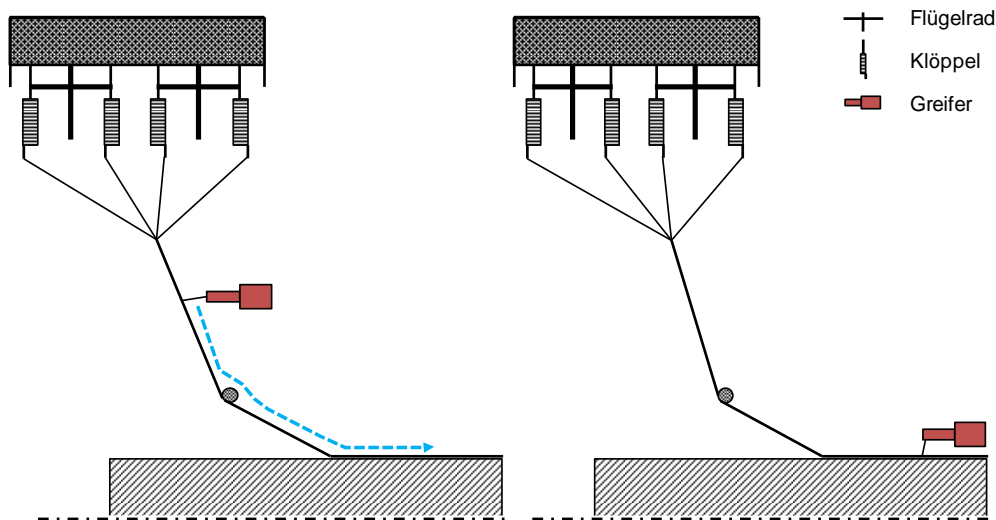


Abbildung 5.17: Position der Fadenhandhabung vor und nach der Einbringung der zusätzlichen Fäden

Der im linken Bild durch die blaue Linie verdeutlichte Verlauf des Greifers lässt ein Problem bei der Übertragung des an der 3D-Flechtanlage verwendeten Versuchsablaufs auf herkömmliche Rundflechtanlagen erkennen: während der Bewegung wird der Flechtring passiert. Werden die Fäden an der Abzugseite, also rechts des Flechtrings vorbeigeführt, hätte dies ein Einflechten des Rings zur Folge. Die eingebrachten Fäden müssen daher mit dem übrigen Geflecht an dem Flechtring vorbeilaufen. Werden hierfür die Fadenenden mit dem Greifer auf der dem Geflecht zugewandten Seite des Flechtrings vorbeibewegt, wird wiederum der Greifer eingeflochten. Somit ergibt sich die Aufgabe einen Mechanismus zu entwickeln, der einerseits die Fixierung und Führung der Fadenenden sicherstellt und andererseits die eingebrachten Fasern dem Verlauf des Geflechts um den Flechtring herum folgen lässt. Nachdem der Flechtring passiert ist, muss lediglich die Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung an die des Geflechts angepasst werden, bis die Faserenden keine zusätzlichen Fixierung durch den Greifer mehr benötigen. Es folgt der Prozessschritt des Abtrennens der überstehenden Faserenden.

Tabelle 5-3 fasst die Anforderungen, welche sich aus dem ersten Prozessschritt an das Fadenhandhabungssystem ergeben zusammen.

Tabelle 5-3: Anforderungen bei der Umsetzung des Prozessschritts *Bewegung der Fadenenden*

Anforderung	Beschreibung	Weiteres Vorgehen
Sichere Fixierung	Die Faserenden dürfen dem Greifer nicht unbeabsichtigt entkommen	Aufnahme ins Lastenheft
Bewegung entlang des Geflechts	Am Flechtkegel: radial und axial Auf dem Kern: axial	Aufnahme ins Lastenheft
Umlenkung um den Flechtring	Fixierung <i>und</i> korrekter Faserverlauf müssen am Flechtring gewährleistet sein	Detaillierung der Spezifikation

Die ersten beiden Anforderungen entspringen den in den Vorversuchen generierten Erkenntnissen. Beide können in das Lastenheft des Prüfstands aufgenommen werden, um bei der Konstruktion und Auslegung der Anlagenkomponenten berücksichtigt zu werden. Für die prozesstechnische Umsetzung der dritten Anforderung muss jedoch in einem weiteren Schritt erst eine Lösung entwickelt werden. Nach der Spezifikation der Lösung können wiederum konkrete Anforderungen für die Prüfstandkonstruktion abgeleitet werden. Dieser Schritt findet allerdings erst nach der Analyse der übrigen Prozessschritte statt. So kann sichergestellt werden, dass keine Konflikte mit Anforderungen aus anderen Prozessschritten entstehen.

5.3.1.2. Schritt 2: Abtrennen der Fadenenden

Die Länge der Fadenenden setzt sich aus dem Abstand zwischen Greifer und Kern, der Länge des im Greifer befindlichen Fadenabschnitts und einem etwaigen Überhang zusammen. Hinsichtlich der Laminatqualität ist ein möglichst kurzes oder gar kein überstehendes Fadenende erstrebenswert. Sowohl das Mehrgewicht, als auch die, von dem willkürlichen Verlauf der nicht im Textil eingebundenen Fasern hervorgerufene Ondulation können durch den Beschnitt vermieden werden. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass der Nutzen den Mehraufwand nicht rechtfertigt, sodass auf diesen Prozessschritt gegebenenfalls verzichtet werden kann.

Abbildung 5.18 zeigt schematisch den zweiten Prozessschritt. Auf Grund des auf dem Kern abgelegten Geflechts ist die Reibung der eingebrachten Fäden im Geflecht groß genug, um ein Herausziehen durch die Fadenspannung zu verhindern. Daher wird die Fixierung durch den Greifer nicht mehr benötigt.

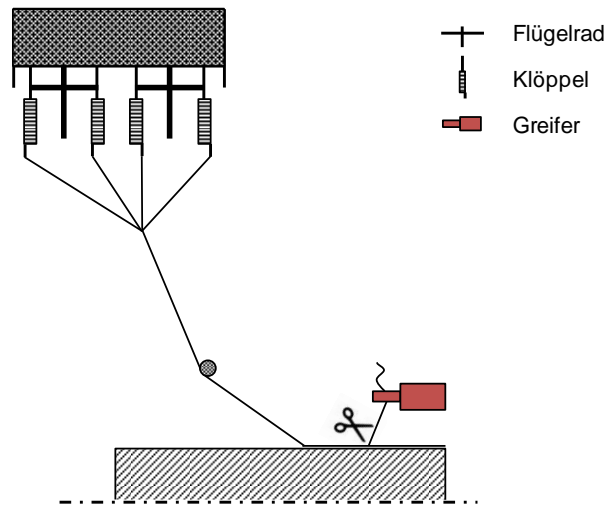


Abbildung 5.18: Beschnitt der überstehenden Fadenenden

Um der Entstehung der Lücken vorzubeugen, ist der Greifer sehr nah an der Kernoberfläche positioniert, was den Bauraum der Beschnitteinheit einschränkt. Für deren Bauweise ergeben sich zwei Möglichkeiten: entweder der Beschnitt wird durch eine zusätzliche Anlagenkomponente vorgenommen oder die Klängen werden in den Greifer integriert. Bei dem ersten Konzept muss berücksichtigt werden, dass sich der Greifer mit der Kernabzugsgeschwindigkeit bewegt und der Beschnitt während dieser Bewegung stattfinden muss. In beiden Fällen muss die Bauweise eine Positionierung der Klängen unmittelbar über der Geflechtsoberfläche erlauben. Nur so können die Fadenenden vollständig abgetrennt werden. In Tabelle 5-4 sind alle Anforderungen, welche bei der konstruktiven Umsetzung dieses Prozessschritts zu beachten sind, aufgeführt. Alle drei Anforderungen können in das Lastenheft des Prüfstands überführt werden.

Tabelle 5-4: Anforderungen bei der Umsetzung des Prozessschritts *Abtrennen der Fadenenden*

Anforderung	Beschreibung	Weiteres Vorgehen
Vollständiges Abschneiden	Alle Filamente der vier Fasern müssen durchtrennt werden	Aufnahme ins Lastenheft
Korrekte Schnittposition	Fäden müssen direkt an der Kernoberfläche geschnitten werden	Aufnahme ins Lastenheft
Schnitt während der Abzugsbewegung	Der Greifer bewegt sich mit dem Geflecht mit, bei einer separaten Beschnitteinheit muss dies berücksichtigt werden	Aufnahme ins Lastenheft

5.3.2. Prozessschritte bei der Entnahme von Fäden

Der offene Greifer befindet sich nach dem Durchlaufen des Prozesses *Einbringen* in einer Warteposition, von der aus die Prozessschritte von Abbildung 5.19 durchlaufen werden. Bevor sich der Greifer jedoch in Bewegung setzt, werden die zwei abschaltbaren Flügelräder angehalten und die Weichen entsprechend geschaltet. Die Fäden der vier auf den abgeschalteten Flügelrädern platzierten Klöppel werden nunmehr abgezogen, ohne in das Geflecht eingeflochten zu werden. Die Stelle, an der die Fäden ihre letzte Abbindung erfahren, bewegt sich entlang des Flechtkegels in Richtung des Flechtpunkts. Ist diese Stelle ausreichend weit gewandert, kann der Greifer mittels einer Schwenkbewegung zwischen den Flechtkegel und die vier Fäden greifen und die Fäden erfassen (Schritt 1). In Schritt 2 wird die Fadenspannung durch den Greifer aufgenommen, sodass keine Lücke im Geflecht entsteht. Wie bei dem Einbringen der Fäden, bewegt sich in Schritt 3 der Greifer entlang des Flechtkegels und Kerns, der Stelle der letzten Abbindung folgend. Sobald die Kernablage erreicht ist, können die Fäden in Schritt 4 am Kern abgetrennt werden.

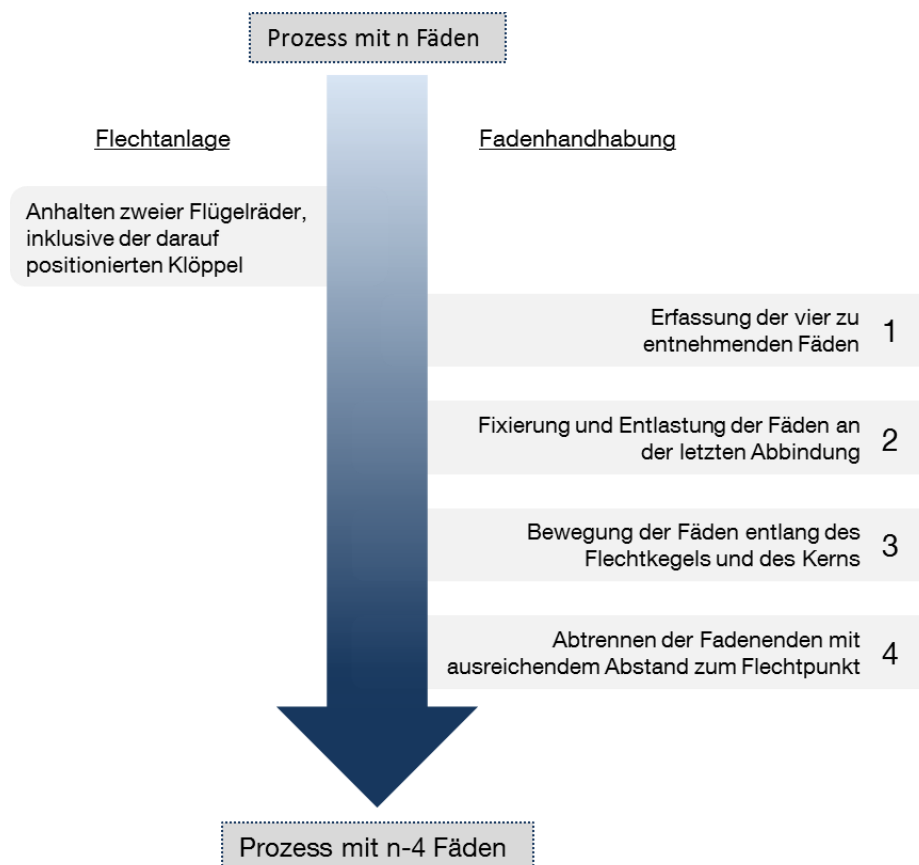


Abbildung 5.19: Prozessschritte bei der Entnahme der Fäden

Nach dem Abtrennen behält der Greifer die Fäden im Eingriff und bewegt sich in eine Warteposition, sodass der Flechtprozess bis zum nächsten Einbringen störungsfrei weiterlaufen kann.

In den folgenden vier Abschnitten findet eine Analyse der Schritte statt.

5.3.2.1. Schritt 1: Erfassung der Fäden

Da die Klöppel der vier zu entnehmenden Fäden nach dem Abschalten der Flügelräder nicht mehr am Flechtprozess teilnehmen, findet keine weitere Abbindung im Geflecht statt. Die letzte Abbindung wandert mit dem weiteren Verlauf des Flechtvorgangs in Produktionsrichtung entlang des Flechtkegels (Abbildung 5.20). Der dabei entstehende Abstand zwischen dem Flechtkegel und den Fäden bietet die Möglichkeit den Greifer mit einer Schwenkbewegung (Abbildung 5.20 blauer Pfeil) zwischen die Fadensysteme zu positionieren.

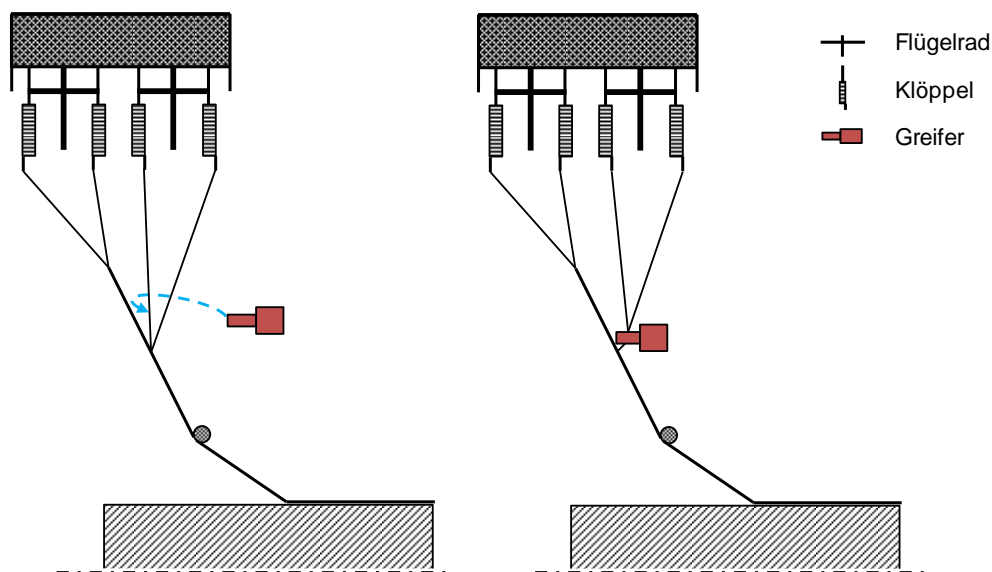


Abbildung 5.20: Position des Greifers vor (links) und nach (rechts) der Schwenkbewegung (blauer Pfeil)

Die Fäden müssen möglichst nah an deren Austritt aus dem Flechtkegel gegriffen werden. Ist der Abstand in diesem Bereich nicht groß genug, um das Erfassen einzelner Fasern des Flechtkegels ausschließen zu können, muss die Schwenkbewegung in einem größeren Abstand zur letzten Abbindung stattfinden. Um anschließend an die gewünschte Position für die Fixierung der Fäden zu gelangen, muss der Greifer in radialer Richtung zum Flechtkegel bewegt werden. Erst wenn die Stelle der letzten Abbindung erreicht ist, wird der Greifer geschlossen und die Fäden fixiert.

Die Anforderungen (Tabelle 5-5) beziehen sich hauptsächlich auf den Bewegungsablauf des Greifers während des ersten Schritts.

Tabelle 5-5: Anforderungen bei der Umsetzung des Prozessschritts *Erfassung der Fäden*

Anforderung	Beschreibung	Weiteres Vorgehen
Präzise Erfassung	Vollständige Erfassung der vier Fäden, ohne Fäden des Flechtkegels	Aufnahme ins Lastenheft
Exakte Positionierung der Fixierung	Fixierung unmittelbar am Austritt aus dem Flechtkegel	Aufnahme ins Lastenheft

Konstruktive Anforderungen ergeben sich nicht zwingend, eventuell kann durch eine geschickte Wahl der Formgebung der Greiferbacke die Fangbewegung zum Erfassen der Fäden erleichtert werden.

5.3.2.2. Schritt 2: Fixierung und Entlastung der Fäden

Die Fixierung im Greifer muss so vorgenommen werden, dass keiner der Fäden unter der Einwirkung der vom Klöppel ausgehenden Fadenspannung aus der Klemmung herausrutschen kann. Diese Anforderung wurde bereits im ersten Schritt des Prozesses *Fadeneinbringen* formuliert und gilt auch bei der Entnahme. Spätestens nach dem Abtrennen der Fäden in Schritt 4 müssen diese vollständig fixiert sein, da ein loser Faden den Fortgang des Flechtprozesses behindern kann. Die Entlastung der Fäden von der Fadenspannung muss vorgenommen werden, um die axiale Ausrichtung des noch im Geflecht eingebundenen Teils der entnommenen Fäden zu verhindern. So können die bei den Vorversuchen an der 3D-Flechtanage beobachteten Lücken im Geflecht verhindert werden. Um die Fäden zu entlasten, muss der Greifer nach deren Fixierung ein kurzes Fadenstück aus dem Klöppel abziehen. Dadurch wird die Fadenspannung von dem Greifer aufgenommen und der Fadenabschnitt zwischen Greifer und Flechtkegel ist entlastet.

Tabelle 5-6 fasst die aus Schritt 2 abgeleiteten Anforderungen zusammen.

Tabelle 5-6: Anforderung bei der Umsetzung des Prozessschritts *Fixierung und Entlastung der Fäden*

Anforderung	Beschreibung	Weiteres Vorgehen
Sichere Fixierung	Die Fäden dürfen dem Greifer nicht unbeabsichtigt entkommen	Aufnahme ins Lastenheft
Aufnahme der Fadenspannung	Reduzierung der Fadenspannung, sodass keine Lücken im Geflecht entstehen	Aufnahme ins Lastenheft

5.3.2.3. Schritt 3: Bewegung der Fäden

Die Bewegung des Greifers bei der Entnahme der Fäden folgt dem gleichen Prinzip, wie bei dem Einbringen: die Bewegung findet entlang des Flechtkegels und des Kerns statt, sodass der Austritt der zu entnehmenden Fäden aus dem Geflecht nachverfolgt wird (Abbildung 5.21 blaue Linie). Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Fäden abgeschnitten werden können, sobald der Flechtpunkt überschritten ist.

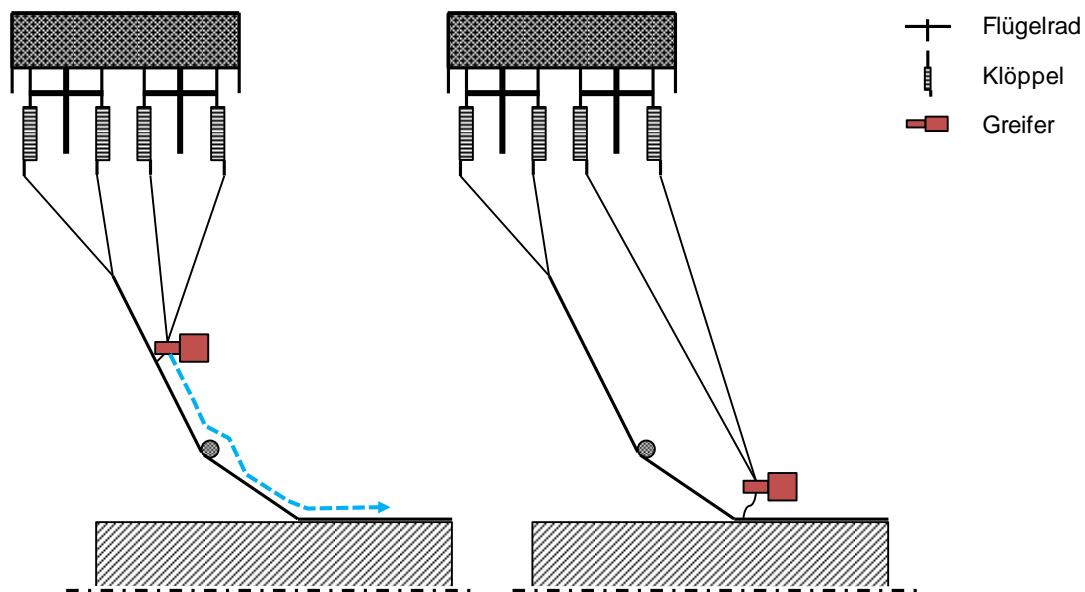


Abbildung 5.21: Position der Fadenhandhabung vor und nach der Entnahme der zusätzlichen Fäden

Es stellt sich jedoch das gleiche Problem, wie bei dem Einbringen der Fäden: der für die Fixierung der Fäden benötigte Greifer kann nicht auf der Seite des Geflechts den Flechtring passieren, da dieser entweder mit eingeflochten werden würde oder das Geflecht massiv schädigen würde. Gibt der Greifer die Fäden kurz vor dem Ring frei, ist es nicht mehr möglich, diese nach dem Ring erneut zu fassen. Durch die Umlenkung legen sich die Fasern an den Flechtkegel an und können nicht mehr durch eine Schwenkbewegung erfasst werden. Der Verlauf des Greifers um den Flechtring muss auch für den Entnahmeprozess geklärt werden.

Auf Grund des identischen Bewegungsablaufs, ergeben sich für diesen Prozessschritt die gleichen Anforderungen wie beim Einbringen (siehe Tabelle 5-3).

5.3.2.4. Schritt 4: Abtrennen der Fäden

Beim Abtrennen der Fäden ergeben sich die gleichen Anforderungen wie bei dem Abtrennen der Fadenenden nach dem Einbringen. Der Zeitpunkt des Schneidens kann nach der Kernablage frei gewählt werden. Allerdings ist es sinnvoll den Schritt möglichst frühzeitig durchzuführen, um weitere Prozessschritte nicht einzuschränken.

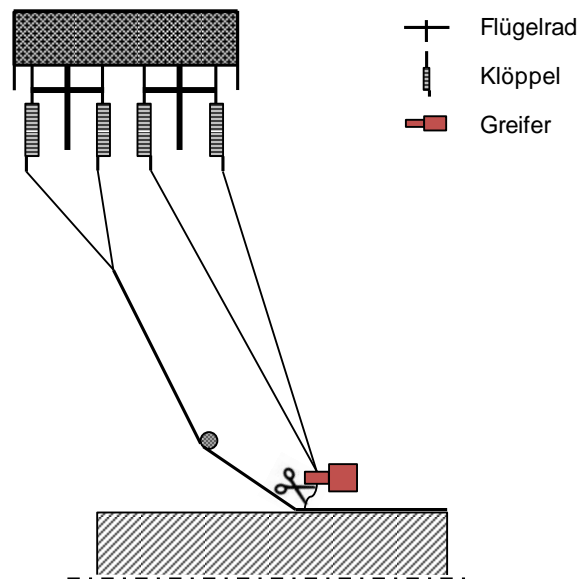


Abbildung 5.22: Abtrennen der Fäden nach der Entnahme aus dem Flechtprozess

Der Prozess unterscheidet sich erst nach dem Abtrennen von der Fadeneinbringung. Der Greifer muss an eine Position bewegt werden, wo er den weiteren Verlauf des Flechtprozesses nicht einschränkt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Fadenreserve im Klöppel nur eine begrenzte Fadenlänge aufnehmen kann. Die Bewegung muss daher so vorgenommen werden, dass die Fäden nicht durchhängen. Die eingenommene Position ist zugleich Startpunkt für den Prozess des Fadeneinbringens.

Die Anforderungen entsprechen denen des Abtrennens bei der Fadeneinbringung und können Tabelle 5-4 entnommen werden.

5.3.3. Detaillierung des Prozessschritts *Bewegung der Fadenenden entlang des Flechtkegels*

Aus der vorangegangenen Analyse der Prozessschritte wurden stets Anforderungen abgeleitet, welche bei der konstruktiven Auslegung des Prüfstands zu berücksichtigen sind. Ein Großteil dieser Anforderungen ist konkret genug, sodass sie in das Lastenheft überführt werden können. Lediglich eine Anforderung, welche sich aus dem Prozessschritt der Bewegung der Fadenenden entlang des Flechtkegels und des Kerns ergibt, muss genauer analysiert werden: die korrekte Umlenkung der zusätzlichen Fäden um den Flechtring. Nach der Konkretisierung der Problemstellung werden Lösungsprinzipien vorgestellt. Mit dem geeignetsten Ansatz werden die Prozessschritte erneut analysiert und Anforderungen abgeleitet.

5.3.3.1. Problemstellung

In diesem Prozessschritt hat der Greifer die Aufgabe die zusätzlichen Fäden zu fixieren und an der Stelle, wo sie aus dem Geflecht austreten beziehungsweise in das Geflecht eintreten, mit dem Flechtkegel mitzuführen. In Abbildung 5.23 ist der Abschnitt des Prozessschritts dargestellt, welcher von dieser Anforderung betroffen ist. Die Pfeile in der linken Abbildung verdeutlichen die Bewegung des Greifers (rot) und der Fasern (schwarz) um den Flechtring herum an. Die zusätzlichen Fasern müssen auf Grund ihrer Abbindung im Geflecht auch auf der Seite des Geflechts den Ring passieren. Würde der Greifer ebenfalls auf dieser Seite des Flechtrings entlangbewegt werden, würde er mit eingeflochten und das Geflecht dabei massiv zerstören.

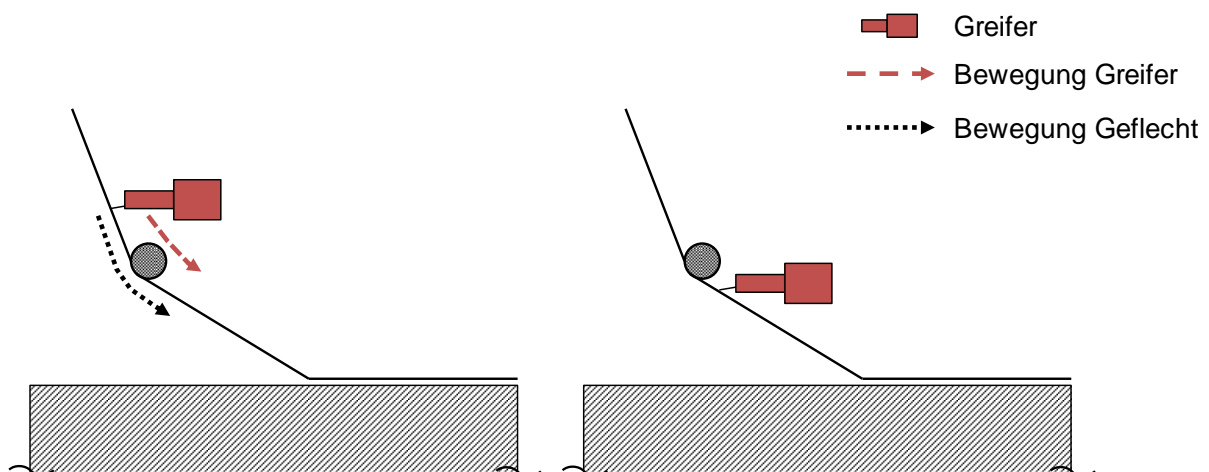


Abbildung 5.23: Greiferposition vor (links) und nach (rechts) der Bewegung um den Flechtring

Die Anforderung, dass die vom Greifer gegriffenen Fasern jederzeit fixiert sein müssen, lässt eine vorübergehende Freigabe der Fasern, während der Bewegung entlang des Flechtrings, nicht zu.

Somit ergeben sich zwei Lösungsmöglichkeiten:

1. die Fäden werden kurzzeitig an einen zweiten, auf der anderen Seite des Flechtrings befindlichen Greifer übergeben oder
2. der Flechtring bewegt sich um den Greifer herum.

Diese beiden Lösungsprinzipien werden im Folgenden diskutiert.

5.3.3.2. Lösungsprinzip zweiter Greifer

Für diesen Ansatz wird der Prozessschritt in drei Unterschritte unterteilt (Abbildung 5.24). Bevor die Fäden am Flechtring vorbeilaufen, findet die Übergabe an den zweiten Greifer (blau) statt. Nach der Übergabe bewegen sich beide Greifer an dem Flechtring vorbei. Sobald der Flechtring passiert ist, findet eine erneute Übergabe statt, sodass die Fäden wieder von dem ursprünglichen Greifer fixiert werden. Danach wird der Prozess entsprechend des vorgestellten Ablaufs fortgesetzt.

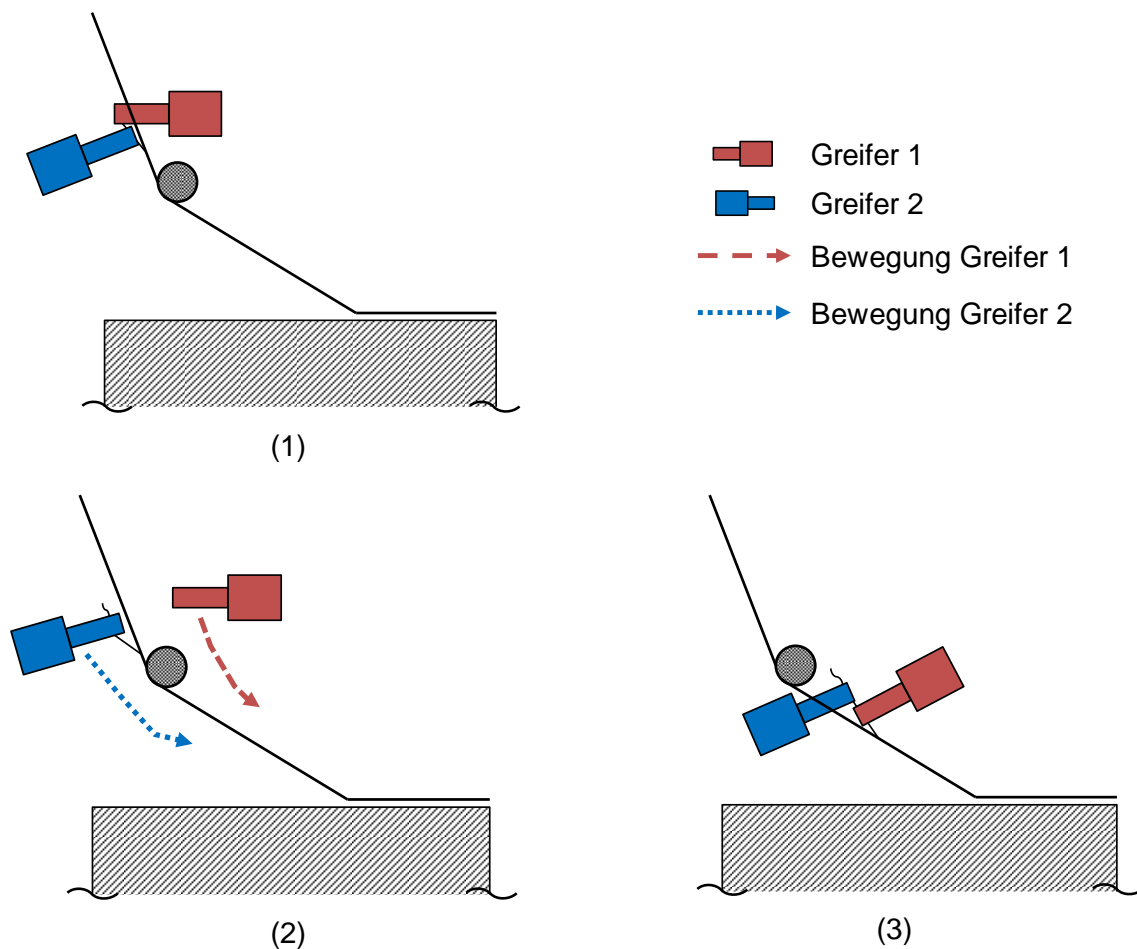


Abbildung 5.24: Zusätzliche Schritte mit einem zweiten Greifer: (1) Übergabe vor dem Flechtring, (2) Bewegung am Flechtring vorbei, (3) Übergabe nach dem Flechtring

Mit dem Vorgehen nach Abbildung 5.24 werden zwar alle Anforderungen erfüllt, allerdings ergeben sich eine Reihe von Schwierigkeiten. Bei beiden Übergaben muss einer der beiden Greifer durch den Flechtkegel hindurch fahren. Dabei kann eine Schädigung des Geflechts nicht ausgeschlossen werden. Für Schritt (3) muss der Abstand zwischen Flechtring und Kern ausreichend groß gewählt werden, damit der zweite Greifer durch den Flechtkegel bewegt werden kann. Es wird jedoch ein möglichst nah an die Kernkontur angepasster Flechtring bevorzugt, um eine homogene Faserablage zu erreichen. Und nicht zu Letzt bedeutet die Abstimmung der beiden Greifer aufeinander einen erheblichen Steuerungsaufwand, da von der Positioniergenauigkeit das Gelingen der Fadenübergabe abhängt.

Es bleibt festzuhalten: das gewünschte Ergebnis kann erzielt werden, allerdings sind Einschränkungen bei der Prozessstabilität und Materialqualität nicht auszuschließen.

5.3.3.3. Lösungsprinzip beweglicher Flechtring

Der Greifer bewegt sich, wie bei der Vorstellung der Prozessschritte vorgesehen, entlang des Flechtkegels. Sobald sich der Greifer mit den Fäden dem Flechtring nähert, bewegt sich dieser um den Greifer herum (Abbildung 5.25 blaue Linie). Der Greifer kann währenddessen ohne Unterbrechung entlang der Kontur des Flechtkegels weiterfahren. Der Flechtring muss also über einen Aktuator verfügen, welcher den eingezeichneten Bewegungsablauf ermöglicht. Zusätzlich muss der Flechtring teilbar ausgeführt sein, damit während der Bewegung eine Öffnung im Ring erzeugt werden kann, durch welche die Halterung des Greifers bewegt wird.

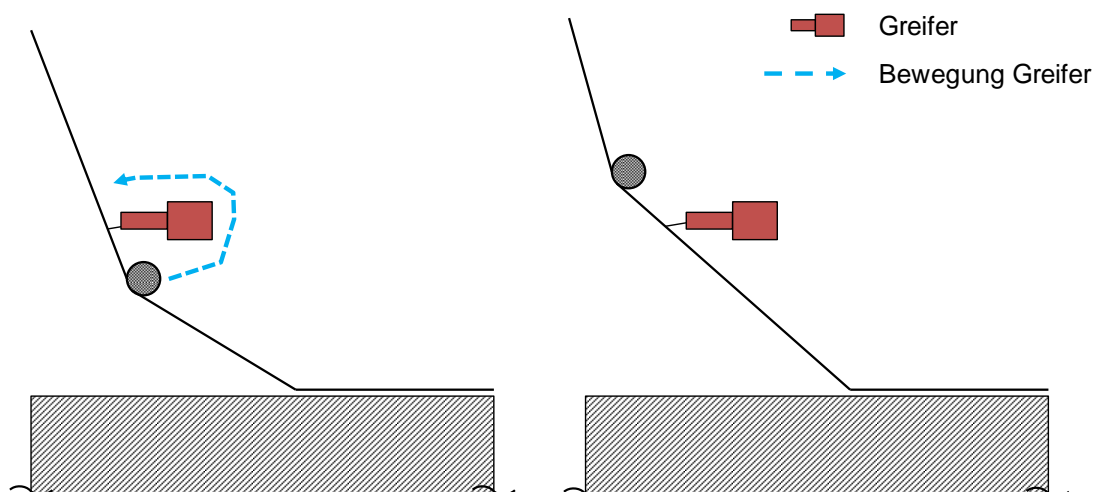


Abbildung 5.25: Flechtring vor und nach der Bewegung um den Greifer

Bei dieser Vorgehensweise ergeben sich allerdings zwei gravierende Nachteile. Während der Bewegung des Flechtrings wird der Flechtkegel nicht mehr umgelenkt und damit auch nicht mehr zurückgehalten. Das Geflecht würde somit an den Greifer gedrückt werden und dabei vermutlich eine Schädigung erfahren. Des Weiteren ist der

Flechtring nach der erneuten Positionierung am Flechtkegel (Abbildung 5.25 rechts) nun exzentrisch. Um den größeren Abstand zum Kern auszugleichen, müsste dieser eigentlich seinen Umfang ändern. Geschieht dies nicht, befindet sich der Flechtring außerhalb der Mitte, in Richtung des Greifers versetzt. Dies hat wiederum einen negativen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit des Faserverlaufs. Beide Probleme können durch den Einsatz eines zweiten Flechtrings behoben werden. Anstatt den Flechtring um den Greifer zu bewegen, schließt sich ein zweiter Flechtring oberhalb des Greifers, kurz bevor dieser den ursprünglichen Flechtring erreicht. Sobald der zweite Flechtring positioniert ist, kann der erste Ring entfernt werden (Abbildung 5.26).

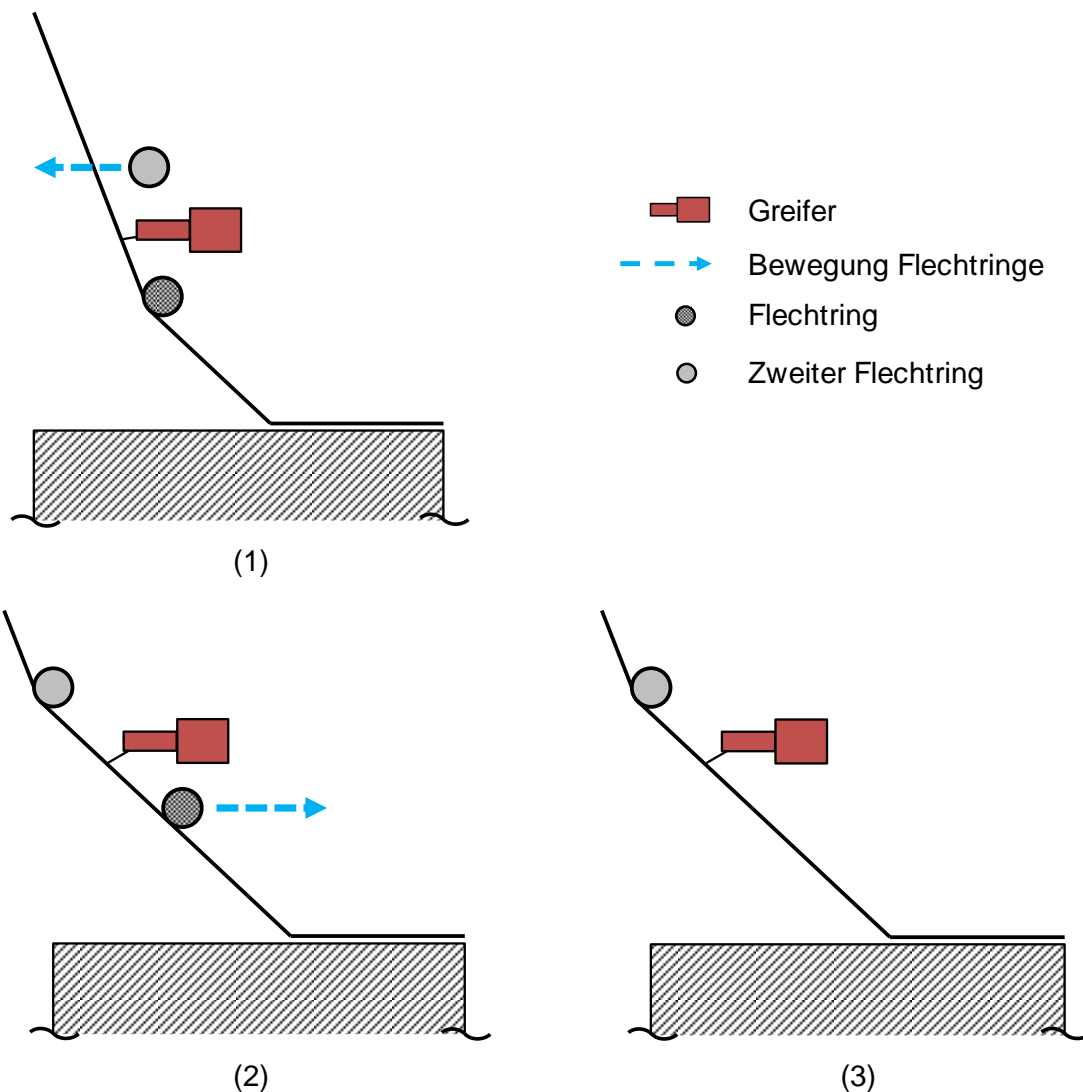


Abbildung 5.26: Schritte mit einem zweiten Flechtring: (1) Zweiter Flechtring schließt sich und bewegt sich zum Flechtkegel, (2) Zweiter Flechtring in Position, ursprünglicher Flechtring entfernt sich vom Flechtkegel, (3) Geflecht wird nur noch um den zweiten Flechtring umgelenkt

Das Konzept beruht also darauf, dass der Flechtkegel von dem ursprünglichen Flechtring auf einen größeren Ring übergeben wird, während sich der Greifer mit den Fäden im Eingriff zwischen diesen beiden Flechtringen befindet. [67] Da der Greifer die Fäden nicht freigeben muss, ergibt sich keine Einschränkung der Prozessstabilität. Zu der Bewegung des Greifers ergibt sich lediglich die Steuerung der Flechtringe als Mehraufwand.

5.3.3.4. Vergleich der Lösungsprinzipien und Auswahl

An Hand einer Auswahlliste wird die Entscheidung zur Ausgestaltung der Prozessschritts *Bewegung der Fäden entlang des Flechtkegels und Kerns* herbeigeführt (Tabelle 5-7). Die Fest- und Mindestforderungen sind den Anforderungslisten der bisherigen Prozessentwicklung entnommen. Die Wünsche sind mit Hinblick auf die Umsetzung als Prüfstand entstanden.

Tabelle 5-7: Auswahlliste zur Bewertung der Lösungsprinzipien

Auswahlkriterien für Lösungsprinzipien: + ja o eingeschränkt - nein	Sichere Fixierung							Entscheidung	
	Bewegung entlang des Geflechts						Festforderung		
	korrekte Umlenkung					Mindestford.			
	Prozessintegration				Geringe Schädigung		Wunsch		
	Steueraufwand gering			Geringer Fertigungsaufwand/-kosten					
Bemerkungen									
Lösungsprinzip									
Zweiter Greifer	o	+	+	o	o	o	-	Unklarheit über die Einhaltung zweier Festforderungen	-
Bewegliche Flechtringe	+	+	+	+	+	o	o	Alle Fest- und Mindestforderungen erfüllt, Einschränkung nur bei Wünschen	+

Die Festforderungen werden vermutlich zwar von beiden Konzepten erfüllt, allerdings bestehen bei dem Lösungsprinzip mit zwei Greifern zwei Unsicherheiten. Zum einen besteht die Gefahr, dass auf Grund der beiden Übergaben zwischen den Greifern die sichere Fixierung aller Fäden nicht gewährleistet wird. Zum anderen ist unklar, ob die Integration in den laufenden Flechtprozess ohne Einschränkung der Produktionsgeschwindigkeit gelingt. Obendrein besteht die Gefahr, dass durch die Greiferbewegung durch den Flechtkegel die Fasern zu stark beschädigt werden. Somit wird das Konzept der beiden sich abwechselnden Flechtringe für die weitere Prozessentwicklung und der anschließenden Prüfstandkonstruktion verwendet.

Aus den in Abbildung 5.26 beschriebenen Schritten ergeben sich die in Tabelle 5-8 aufgeführten Anforderungen. Zusätzliche Anforderungen entstehen ausschließlich für

die beiden Flechtringe. Der Greifer und dessen Bewegungsablauf sind davon nicht betroffen.

Tabelle 5-8: Zusätzliche Anforderungen bei der Umsetzung der Prozessschritte 2 und 5

Anforderung	Beschreibung	Weiteres Vorgehen
Beweglichkeit innerer Flechtring	Ausreichend große axiale Beweglichkeit des inneren Flechtrings	Aufnahme ins Lastenheft
Beweglichkeit und Teilbarkeit äußerer Flechtring	Ausreichend große axiale Beweglichkeit und Teilbarkeit zur Umschließung des Greifers	Aufnahme ins Lastenheft

5.4. Aufstellung des Gesamtprozesses

Das zu Beginn des Kapitels vorgestellte Vorgehen für die Prozessentwicklung mit anschließender Prüfstandkonstruktion sieht nach der getrennten Analyse der Prozessschritte deren Integration in einen Gesamtprozess vor. Auf Grund der vielen Einzelschritte wird die Unterteilung in die beiden Teilprozesse *Fäden Einbringen* und *Fäden Entnehmen* beibehalten. Erst wenn im Anschluss an die Prüfstandkonstruktion und -erprobung die Übertragung der beiden Teilprozesse auf einen Serienprozess, der das Einbringen und die Entnahme mehrerer Flügelradpaare erlaubt, stattfindet, wird die Verknüpfung dieser beiden Teilprozesse vorgenommen.

Die folgenden Abschnitte sind die letzten Schritte der Prozessentwicklung, bevor der Übergang zur Prüfstandkonstruktion erfolgt. Daher schließen die Betrachtungen mit der Zusammenstellung aller Anforderungen in einem Lastenheft ab.

5.4.1. Teilprozess *Fäden Einbringen*

Wird der Teilprozess *Fäden Einbringen* aus den in Abschnitt 5.3.1 definierten Einzelschritten zusammengesetzt und durch die in Abschnitt 5.3.3 vorgenommenen Detaillierungen ergänzt, ergibt sich der in Abbildung 5.27 dargestellte Prozessablauf.

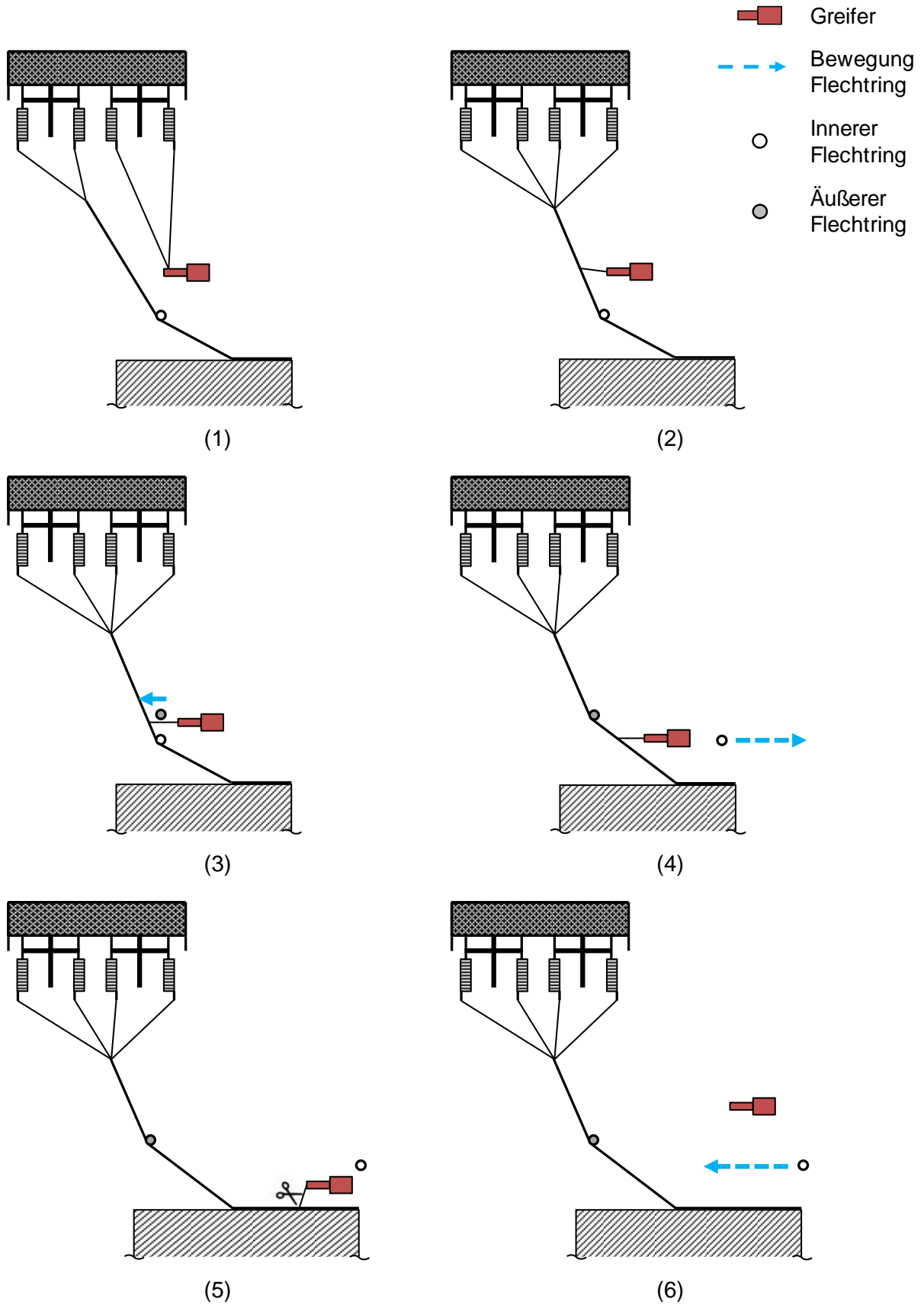


Abbildung 5.27: Prozessschritte des Teilprozesses *Fäden Einbringen*

In **(1)** ist die Ausgangslage dargestellt. Die Weichen werden umgeschaltet und die Flügelräder zugeschaltet. Noch sind die zusätzlichen Fäden, deren Enden von dem Greifer gehalten werden, nicht im Geflecht eingebunden. Fährt der Flechtprozess mit den zugeschalteten Flügelrädern fort, wandert die erste Abbindung der zusätzlichen Fäden sukzessive den Flechtkegel entlang, in Richtung des Flechtpunkts: **(2)**. In **(3)** hatte die erste Abbindung bereits die Höhe des Greifers erreicht, sodass sich dieser mit dem Flechtkegel mitbewegt. Dabei hat sich der Greifer dem Flechtring soweit angenähert, dass der äußere Flechtring geschlossen werden kann. Direkt im Anschluss an den Schließvorgang bewegt sich der Flechtring an den Flechtkegel heran, sodass der innere Ring in **(4)** dem Greifer ausweichen kann. Der Greifer kann nun die Fadenenden weiter entlang des Flechtkegels und anschließend entlang des Kerns führen. Der innere Flechtring muss soweit zurückweichen, bis die Schnittposition des Greifers in **(5)** erreicht ist. Nach dem Abschneiden der Fadenenden begibt sich der Greifer in die Warteposition, welche so gewählt ist, dass der innere Flechtring erneut den Flechtkegel erreichen kann **(6)**. Ist dieser in seiner ursprünglichen Position, wird der äußere Ring wieder entfernt und die Ausgangsstellungen der Flechtringe und des Greifers sind erreicht.

Die Flechtanlage produziert nun ein um vier Fäden erweitertes Geflecht.

5.4.2. Teilprozess *Fäden Entnehmen*

In Abbildung 5.28 sind die Schritte, welche zur Entnahme der Fäden notwendig sind, dargestellt. **(1)** zeigt die Ausgangsposition, welche sich aus dem letzten Schritt des Einbringens der Fäden ergibt. Wird das Flügelradpaar aus dem Flechtprozess entnommen, erfahren die vier Fäden der darauf positionierten Klöppel keine Abbindung mehr. Die Stelle der letzten Abbindung bewegt sich in **(2)** entlang des Flechtkegels, sodass der Greifer zwischen die Fäden und den Flechtkegel schwenken kann. Nachdem die Fäden gegriffen sind, bewegt sich der Greifer mit dem Geflecht mit, wobei die zu entnehmenden Fäden zur Vermeidung von Lücken zugentlastet werden. Ist in **(3)** der Flechtring beinahe erreicht, wird der äußere Flechtring zwischen Flechtkegel und der im Greifer fixierten Fäden geschlossen. Daraufhin findet in **(4)** der Wechsel der Flechtringe statt, sodass dem Greifer für die weitere Bewegung ausreichend Platz geboten wird. Sobald die letzte Abbindung am Kern abgelegt wurde, werden in **(5)** die Fäden am Geflecht getrennt. Danach fährt der Greifer in die Warteposition, sodass der innere Flechtring den Flechtkegel erneut übernehmen kann **(6)**.

Der Flechtprozess wird nun mit der verringerten Anzahl an Fäden weitergeführt, bis ein größerer Kernumfang zusätzliche Fäden erfordert.

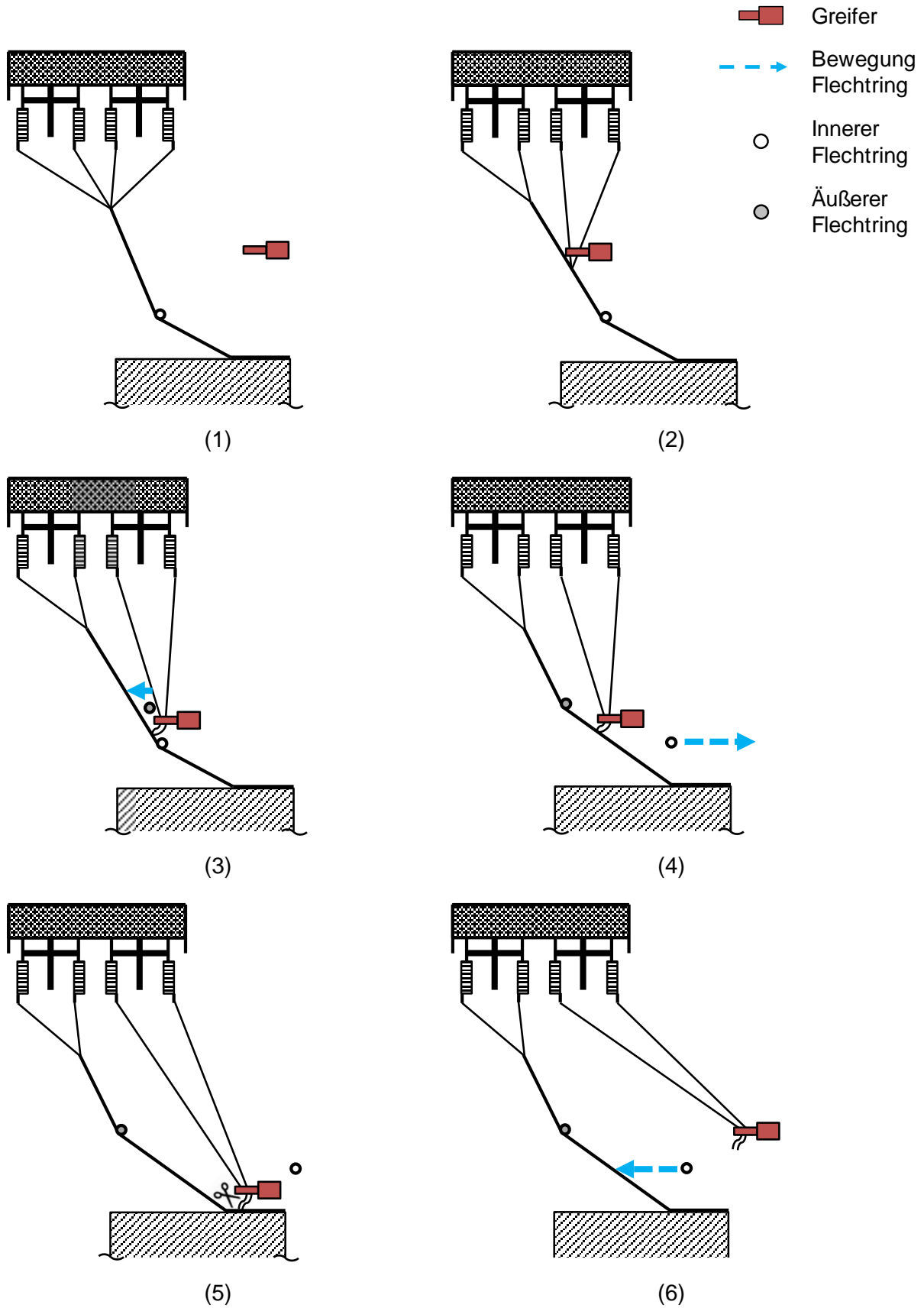


Abbildung 5.28: Prozessschritte des Teilprozesses *Fäden Entnehmen*

5.4.3. Zusammenfassung der Anforderungen

Aus jedem Schritt der Entwicklung des fadenanzahlvariablen Flechtprozesses wurden Anforderungen an den Prozess abgeleitet. Diese sind in Tabelle 5-9, nach Baugruppen geordnet, zusammengetragen.

Tabelle 5-9: Lastenheft mit allen Anforderungen an den Gesamtprozess

Baugruppe	Anforderung	Beschreibung
Gesamtprozess	Vollständige Prozessintegration	Alle Schritte der Fadenhandhabung finden während des laufenden Flechtprozesses statt
	Hohe Materialqualität	Keine oder nur marginale Schädigung aller Fäden durch die Handhabung
Greifer	Sichere Fixierung	Die Fadenenden dürfen dem Greifer nicht unbeabsichtigt entkommen
	Bewegung entlang des Geflechts	Im Flechtkegel: radial und axial Auf dem Kern: axial
	Präzise Erfassung	Schwenkbewegung zur Erfassung der zu entnehmenden Fäden
	Exakte Positionierung der Fixierung	Positionierung bei der Entnahme am Austritt der Fäden aus dem Flechtkegel
	Aufnahme der Fadenspannung	Entlastung der zu entnehmende Fäden von der Fadenspannung
Beschnitteinheit	Vollständiges Abschneiden	Alle Filamente der vier Fäden müssen durchtrennt werden
	Korrekte Schnittposition	Fäden müssen direkt an der Kernoberfläche geschnitten werden
	Schnitt während der Abzugsbewegung	Der Greifer bewegt sich mit dem Geflecht mit, bei einer separaten Beschnitteinheit muss dies berücksichtigt werden
Flechtringe	Beweglichkeit innerer Flechtring	Ausreichend große axiale Beweglichkeit des inneren Flechtrings
	Beweglichkeit und Teilbarkeit äußerer Flechtring	Ausreichend große axiale Beweglichkeit und Teilbarkeit zur Umschließung des Greifers

5.5. Prüfstandentwurf

Der Prüfstand soll der Prozess- und Materialcharakterisierung dienen. Durch das Abbilden des entwickelten Prozesses kann zum einen der Funktionsnachweis geliefert und eine Aussage hinsichtlich der Prozesssicherheit gemacht werden. Zum anderen kann untersucht werden, mit welchen Parametern sich die Fehlstellen im Geflecht minimieren lassen, also wie das Material optimiert werden kann.

Da der Prüfstand für die Rundflechtanlage des LCC ausgelegt wird, kann lediglich die Funktionsweise der Fadenhandhabung untersucht werden. Ein Zusammenspiel mit der Steuerung der Flechtanlage in Form von abschaltbaren Flügelrädern ist nicht möglich. Dies führt zu einigen Randbedingungen, welche bei der Auslegung des Prüfstands berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren werden die Schritte des Gesamtprozesses teilweise vereinfacht, um den Konstruktionsaufwand zu verringern. Nach der Vorstellung dieser Randbedingungen und Vereinfachungen wird der Prüfstand vorgestellt.

5.5.1. Randbedingungen und Vereinfachungen

Da die Flechtanlage des LCC eine konventionelle Rundflechtanlage mit 32 Flügelrädern, ohne abschaltbare Flügelradpaare, ist, müssen die vier zusätzlichen Fäden behelfsmäßig von den Klöppeln des geschlossenen Flügelradkreises entnommen werden.

Der Prozess beginnt mit 64 Flechtfäden. Um den Teilprozess *Fäden Entnehmen* abzubilden, werden vier Fäden von zwei benachbarten Flügelrädern am Klöppel abgetrennt. Diese vier Fäden werden nun per Hand etwas außerhalb des Flechtanlagenrumpfs gehalten, in etwa dort, wo sich die zusätzlichen Flügelräder bei einer entsprechenden Anlagenbauweise befänden. Sobald der Greifer die Fäden erfasst hat, kann der Teilprozess *Fäden Entnehmen* beginnen.

Um die abgetrennten Fäden wieder einzubringen, muss der Moment abgewartet werden, bis die vier Klöppel erneut auf den beiden benachbarten Flügelrädern zum Stehen kommen. Die Enden der Fäden müssen per Hand von den Klöppeln abgezogen und in dem Greifer fixiert werden. Somit ist die Ausgangssituation für den Teilprozess *Fäden Einbringen* erreicht.

Die beschriebene Vorgehensweise hat zwei **Randbedingungen** zur Folge:

1. Der Flechtprozess muss für das Abtrennen und Einziehen der Fäden angehalten werden. Erst wenn die Fäden an den Greifer übergeben worden sind, können Flechtprozess und der jeweilige Teilprozess parallel ablaufen.
2. Die Entnahme der Fäden von dem geschlossenen Flügelradkreis hat in dem Bereich der fehlenden Fäden das in Abschnitt 5.1.1 diskutierte Fehlerbild

(Gasse mit Abbindungsfehlern) zur Folge. Dies darf bei der Bewertung der Materialqualität nicht der Fadenhandhabung angelastet werden.

Die beiden Teilprozesse, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten entwickelt wurden, müssen nicht in ihrer Gänze automatisiert abgebildet werden. Schritte, die keines Funktionsnachweises bedürfen, sollen per Hand durchgeführt werden, um die Prüfstandkosten zu senken. Daher wurden folgende **Vereinfachungen** vorgenommen:

1. Auf die Schwenkbewegung des Greifers zur Erfassung der Fäden zu Beginn der Fadenentnahme wird verzichtet. Die zusätzliche, vergleichsweise komplexe, weil mehrachsige Bewegung führt zu erheblichen Mehrkosten und steigert den Steuerungsaufwand. Stattdessen werden die Fäden per Hand in dem Greifer fixiert.
2. Um die Greiferbewegung während der Führung der Fadenenden entlang des Kerns zu vereinfachen, wird der Prüfstand lediglich für das Beflechten von geraden Kernen ohne Krümmung ausgelegt.
3. Das Abtrennen der Fäden bzw. der Fadenenden am Schluss der beiden Teilprozesse wird mit einer Schere durchgeführt. Das automatisierte Durchtrennen von Kohlenstofffasern ist nicht Gegenstand der Untersuchungen.

5.5.2. Vorstellung der Prüfstandkonstruktion

Der Prüfstand ist, unter Berücksichtigung der definierten Randbedingungen und Vereinfachungen, entsprechend des Lastenhefts aus Abschnitt 5.4.3 konzipiert. Abbildung 5.29 zeigt ein CAD-Modell des zusammengebauten und an der Flechtanlage des LCC montierten Prüfstands. Ausgehend von der im Lastenheft vorgenommenen Unterteilung in Baugruppen, lässt sich der Prüfstand in zwei Komponenten untergliedern: der Greifer inklusive des dazugehörigen Antriebs (rot hinterlegt) und die beiden Flechtringe mit der entsprechenden Kinematik (gelb hinterlegt).

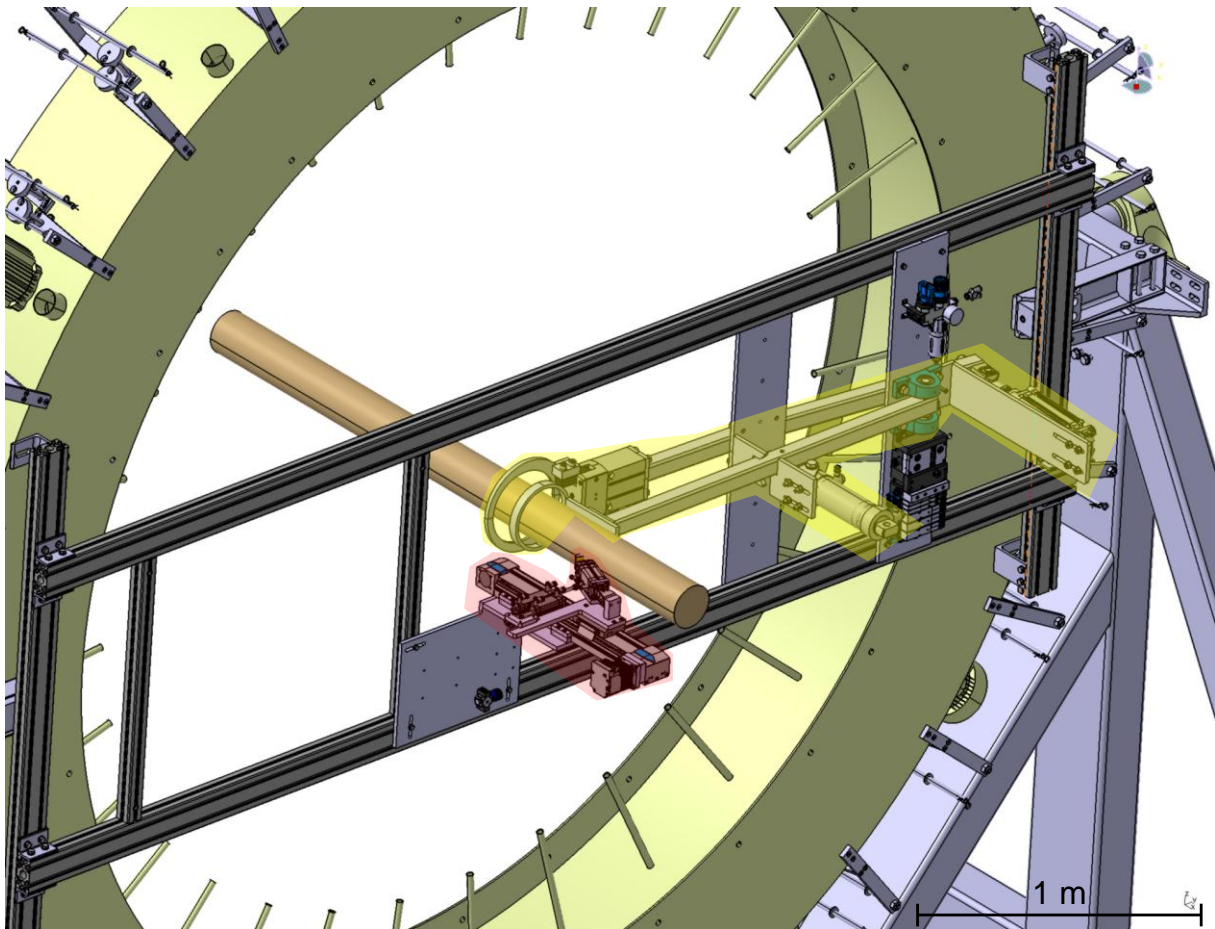


Abbildung 5.29: CAD-Modell des Prüfstands zur Fadenhandhabung mit den Baugruppen Greifer (rot) und doppelter Flechtring (gelb) [67]

Die Funktionsweise der beiden Baugruppen wird in den folgenden beiden Abschnitten erläutert.

5.5.2.1. Baugruppe Greifer

Der Greifer selbst besteht aus zwei Greiferbacken und einem Pneumatikzylinder, welcher die bewegliche auf die feste Backe bewegt (Abbildung 5.30). Die Schließkraft des Zylinders ist mit 295 N so gewählt, dass die Fäden ausreichend stark fixiert werden. Durch eine mehrere Millimeter dicke Gummibeschichtung wird die Reibung zwischen den Fäden und den Backen erhöht. Den Vereinfachungen entsprechend, werden die Fäden per Hand zwischen den beiden Greiferbacken positioniert.

Die Bewegung des Greifers erst entlang des Flechtkegels und anschließend entlang des Kerns, wird durch die Kombination einer vertikalen und einer horizontalen Zustellung ermöglicht. Die vertikale Zustellung geschieht über zwei Pneumatikzylinder, sodass eine Abstufung des Verfahrensweges möglich ist. Die Geschwindigkeit wird über Drosselventile an den Zylindern eingestellt.

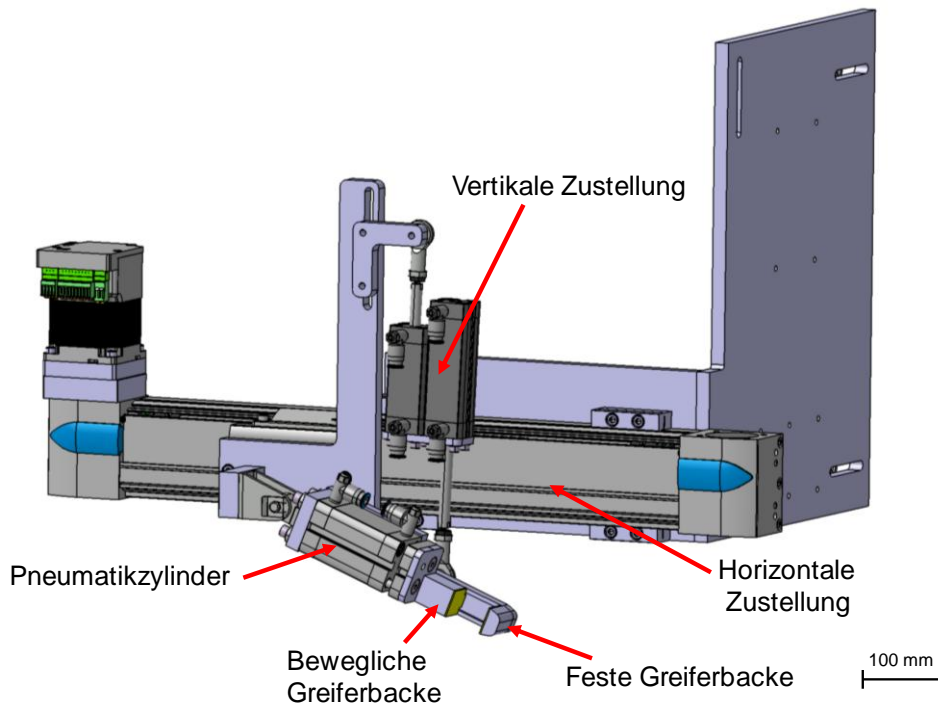


Abbildung 5.30: CAD-Modell des Aufbaus der Baugruppe Greifer [67]

Die horizontale Zustellung muss auf Grund der Bewegung der Fadenenden mit dem Kern eine wesentlich größere Strecke zulassen. Hierfür wird eine Zahnriemenachse, welche mit einem Schrittmotor angetrieben wird, verwendet. Geschwindigkeit und Strecke werden von der Steuerung des Motors vorgegeben. Das Motordrehmoment von 1,13 Nm sorgt für eine Vorschubkraft von 90 N. Die Zugkraft der vier Fäden kann somit überwunden werden.

Die Baugruppe ist über die Aluminiumplatte mit den Profilträgern der Flechtanlage verbunden. Die Fixierung über Langlöcher ermöglicht die korrekte Positionierung zu den Flechtringen.

5.5.2.2. Baugruppe Flechtringe

Gemäß dem Lastenheft müssen beide Flechtringe axial beweglich sein, wobei der äußere Ring zusätzlich noch teilbar sein muss. Abbildung 5.31 zeigt die Baugruppe in der Einstellung, bei welcher der Flechtprozess abläuft, sofern keine Fäden entnommen oder eingebracht werden. Das Geflecht wird an dem inneren, geschlossenen Flechtring umgelenkt und der äußere befindet sich im geöffneten Zustand auf Höhe des Flechtpunkts.

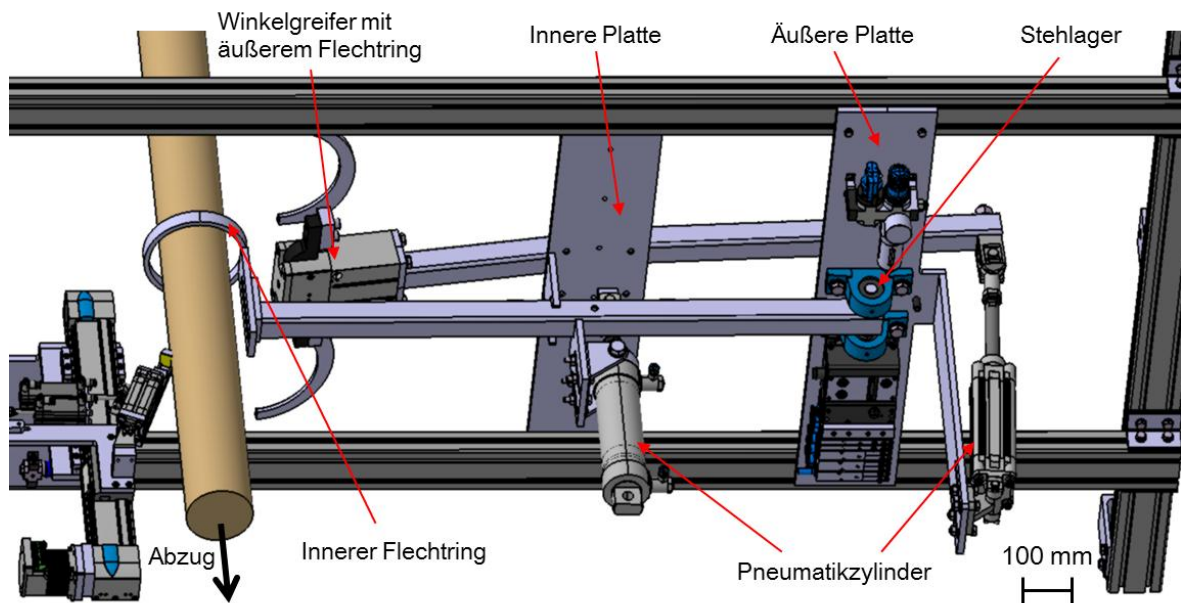


Abbildung 5.31: CAD-Modell der Baugruppe Flechtringe in der Ausgangsposition [67]

Durch die Montage auf einem Winkelgreifer, können die beiden Flechtringhälften um 90° geöffnet werden. Wenn sich der Greifer mit den Fäden knapp außerhalb des inneren Flechtrings befindet, wird der äußere geschlossen (Abbildung 5.32).

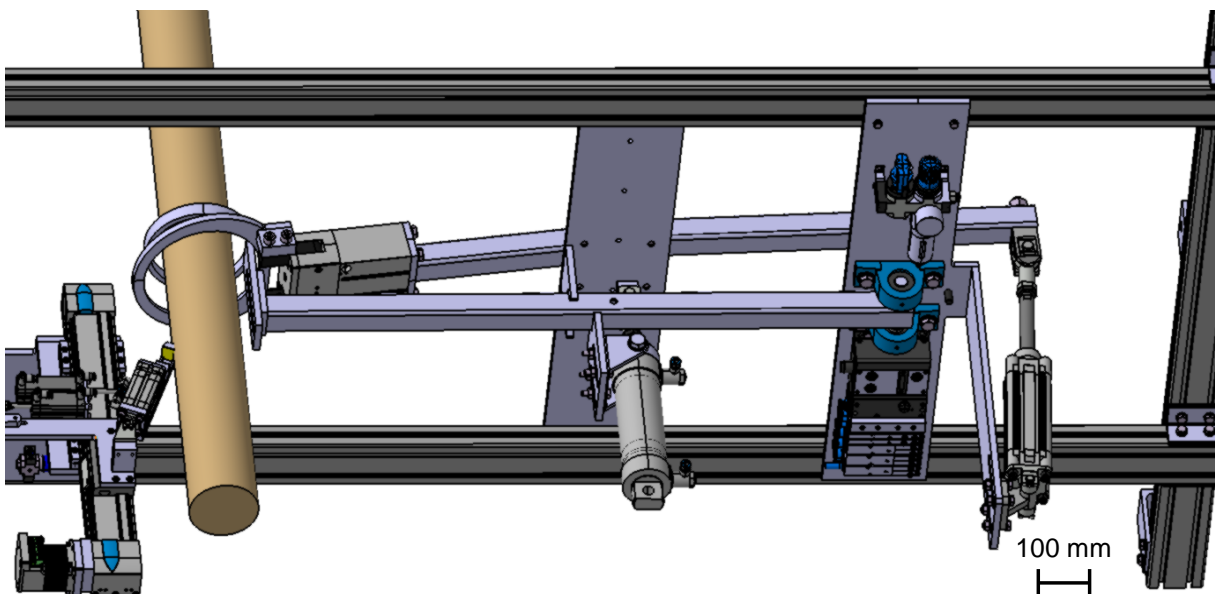


Abbildung 5.32: Position der Flechtringe unmittelbar vor der Übergabe des Flechtkegels [67]

Sobald der äußere Flechtring geschlossen ist, kann dieser den Flechtkegel von dem inneren Ring übernehmen. Für diesen Wechsel müssen beide Ringe axial verfahren werden, der äußere in Richtung des Geflechts, sodass der Flechtpunkt an der gleichen Stelle bleibt und der innere in Richtung des Kernabzugs, um die weitere Bewegung des Greifers nicht einzuschränken. Die axiale Bewegung der Flechtringe findet

über die Bewegung zweier Vierkantrohre statt. Die Rohre sind jeweils mittels eines Stehlagers und eines Pneumatikzylinders gelagert. Für den inneren Flechtring sind das Stehlager an der äußeren Befestigungsplatte und der Zylinder an der inneren Platte angebracht. Bei dem äußeren Flechtring ist die Anbringung von Stehlager und Zylinder genau andersherum. Die Flechtringe bewegen sich auf Grund der Lagerung eigentlich auf einer Kreisbahn mit der Vierkantrohrlänge als Radius. Angesichts der Länge der Rohre und der relativ kurzen Verfahrstrecke, ist die Bewegung näherungsweise linear.

Während der Greifer bis zum Abtrennen der Fäden entlang des Kerns verfährt, läuft der Flechtprozess mit der in Abbildung 5.33 dargestellten Position der Flechtringe ab.

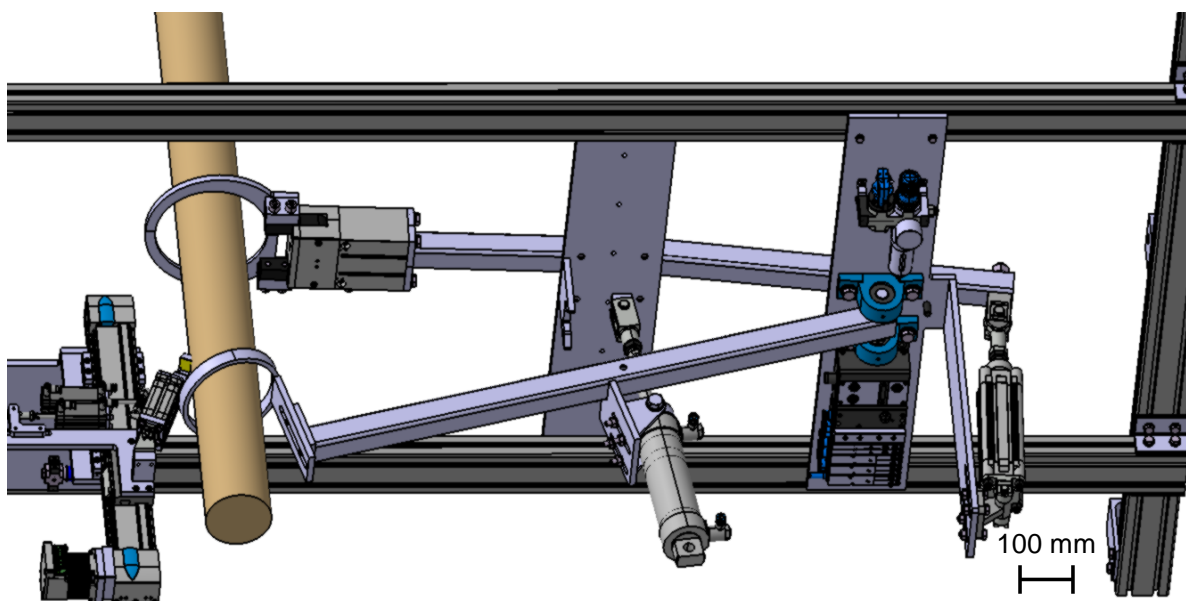


Abbildung 5.33: Position der Flechtringe am Ende des Prozesses [67]

Erst wenn die Fäden abgetrennt wurden und der Greifer in die Warteposition verfahren ist, findet der erneute Wechsel der Flechtringe statt, sodass der Ausgangszustand aus Abbildung 5.31 wiederhergestellt ist.

Die Ansteuerung aller Pneumatikzylinder, inklusive derer der Greiferbaugruppe, findet über eine Ventilinsel statt, welche von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) gesteuert wird.

5.6. Funktionsnachweis und Materialcharakterisierung

Abbildung 5.34 zeigt den Prüfstand gemäß des Entwurfs in Kapitel 5.5. Zu den beiden Baugruppen kommen die beiden Schaltschränke hinzu, welche die SPS und Netzteile zur Steuerung bzw. Stromversorgung der Ventilinsel und der Linearachse beinhalten.

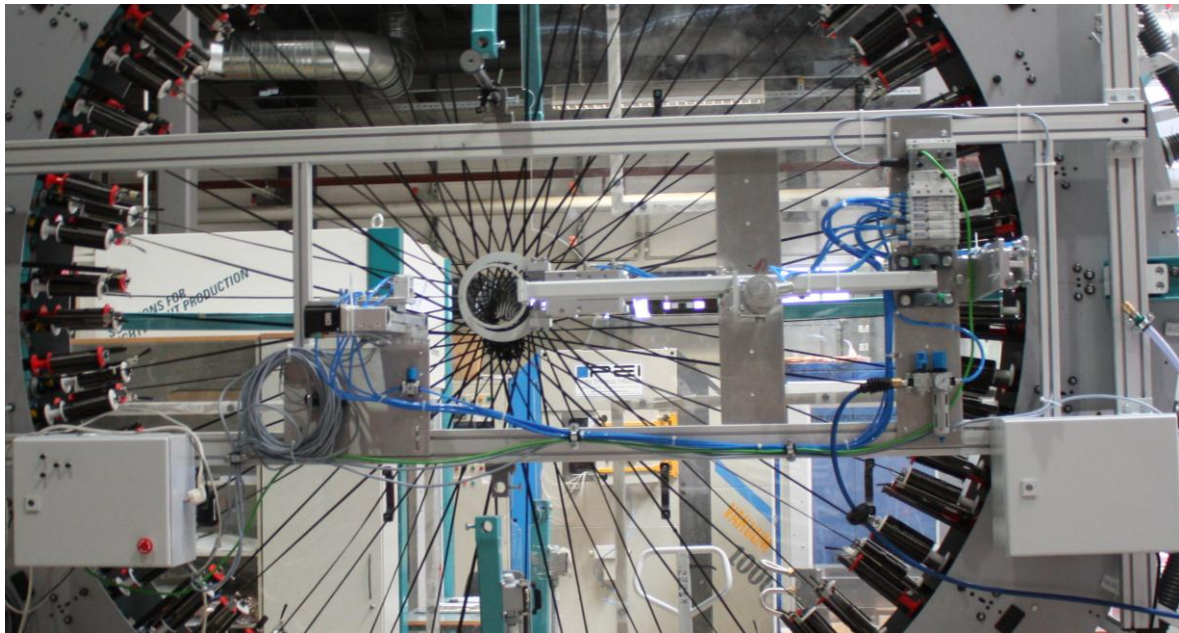


Abbildung 5.34: Prüfstand zur Fadenhandhabung an der Flechtanlage des LCC

Bedingt durch die Bauweise des Prüfstands werden die Fäden von den beiden Flügelrädern, welche sich in Abbildung 5.34 links, auf Höhe des Greifers befinden, entnommen.

Für die beiden Teilprozess *Fäden Entnehmen* und *Fäden Einbringen* findet getrennt der Funktionsnachweis statt, um anschließend das Geflecht im Bereich des Austritts bzw. Eintritts der Fäden zu bewerten. Ziel dieser Untersuchung ist es, die auftretenden Fehlstellen durch eine angepasste Prozessführung zu minimieren oder falls notwendig, eine Anpassung der Anlagenspezifikation vorzunehmen. Die Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Erstellung eines Gesamtanlagenkonzepts, welches den Anforderungen einer Serienproduktion gerecht wird.

Die Versuche werden mit den in Tabelle 5-10 zusammengefassten Parametern durchgeführt.

Tabelle 5-10: Versuchsparameter für die Versuche mit dem Prüfstand *Fadenhandhabung*

Parameter	Einstellung
Fasern	50k HT, 3200 tex
Klöppelfeder	350 g
Flechtwinkel	$\pm 45^\circ$
Kerndurchmesser	90 mm
Anlagenbesetzung	64 Flechtfäden

5.6.1. Prozessschritte am Prüfstand

Die beiden Teilprozesse werden hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen untersucht. Dabei geht es vorrangig um die Bewertung der Prozessstabilität.

5.6.1.1. Prozessschritte bei der Entnahme der Fäden

In Abbildung 5.35 sind die Schritte für die Entnahme der Fäden dargestellt. In **Bild 1** sind die zu entnehmenden Fäden, welche bereits am Klöppel abgetrennt wurden, in den Backen des Greifers fixiert. Bei einem vollautomatisierten Prozess entspricht dies der Position, die der Greifer nach der Schwenkbewegung einnimmt. Zu beachten ist, dass durch die Fixierung im Greifer keine Zugkraft auf die Fasern ausgeübt wird. Ab diesem Zeitpunkt wird der Flechtprozess gestartet. Infolge des geringen Abstands zwischen den beiden Flechtringen reicht der Platz für den Greifer nicht aus. Daher bewegt (**Bild 1 Pfeil**) sich dieser auf die Kernoberfläche (**Bild 2**). Im nächsten Schritt wird der äußere Flechtring geschlossen und anschließend in Richtung Flechtkegel bewegt (**Bild 3**). Gleichzeitig muss dabei der Greifer einen größeren Abstand zum Kern einnehmen, um dem inneren Flechtring ausreichend Raum für dessen axiale Bewegung zu bieten (**Bild 4 Pfeil**). In **Bild 5** ist die Austrittsstelle der entnommenen Fäden auf dem Kern abgelegt, sodass diese abgetrennt werden können. Wie bei dem Entwurf des Prüfstands beschrieben, geschieht dies per Hand.

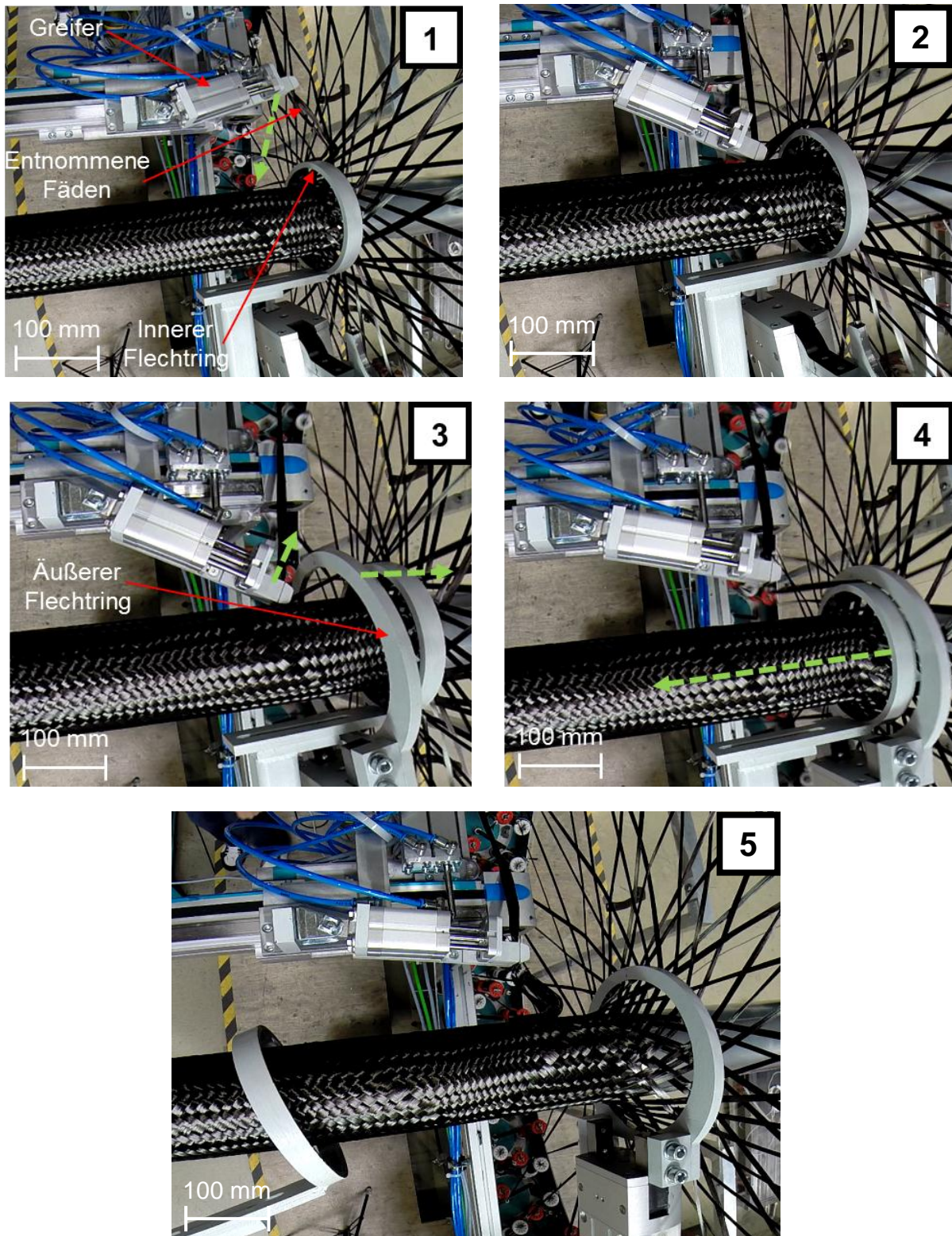


Abbildung 5.35: Prozessablauf bei der Entnahme von Fäden

Infolge des geringen Abstands zwischen den beiden Flechtringen kann der Greifer nicht in unmittelbarer Nähe des Flechtkegels bewegt werden. Somit wird der Anforderung nach einer Fixierung der Fäden direkt an der Stelle der letzten Abbindung nicht nachgekommen. Da die Fäden aber keiner Zugbelastung ausgesetzt sind, entstehen keine Lücken. Alle weiteren Anforderungen werden erfüllt. Während des gesamten Vorgangs sind die Fäden fest fixiert, ohne dass es zu einem Verrutschen kommt. Die Bewegung der Flechtringe und des Greifers schädigt weder die im Geflecht eingebundenen, noch die entnommenen Fäden.

Die Flechtanlage und die Steuerung des Greifers und der Flechtringe sind nicht gekoppelt, sodass je nach Auslösezeitpunkt für die Bewegung des Greifers und die der Flechtringe unterschiedlich stark ausgeprägte Fehlerbilder auftreten. Der Einfluss der Prozessführung auf die Materialqualität wird bei der Materialcharakterisierung untersucht.

5.6.1.2. Prozessschritte bei dem Einbringen der Fäden

Bei dem Einbringen der Fäden läuft der Prozess am Prüfstand gemäß der Schritte in Abbildung 5.36 ab. In **Bild 1** sind die Fäden, welche von den Klöppeln, deren Fäden zuvor aus dem Geflecht entnommen wurden, in dem Greifer fixiert. Sobald der Flechtprozess wieder gestartet ist, bringt der Greifer die Fäden in die Nähe des Flechtpunkts (**Bild 2**). Mit dieser Bewegung (**Bild 1 Pfeil**) wird sichergestellt, dass der äußere Flechtring, nach dem dieser geschlossen wurde, die einzubringenden Fäden mit umschließt (**Bild 3**). Anschließend findet in **Bild 4** der Wechsel der Flechtringe statt, welcher in **Bild 5** durch die Bewegung des inneren Flechtrings (**Bild 4 Pfeil**) in den hinteren Anschlag abgeschlossen wird. Während dieser Bewegung führt der Greifer die Fadenenden entlang des Flechtkegels zum Flechtpunkt. Nur wenn die Greiferbewegung auf den Flechtprozess abgestimmt ist, werden die Fäden an der Position ihrer ersten Abbindung fixiert und geführt. Die Bewegung des Greifers wird per Knopfdruck ausgelöst, sodass unterschiedliche Prozesseinstellungen untersucht werden können. In **Bild 6** bewegt sich der Greifer mit der Kernabzugsgeschwindigkeit, mit den eingebrachten Fäden im Eingriff. Dies geschieht solange, bis die Fäden durch die Reibung im Geflecht gehalten werden.

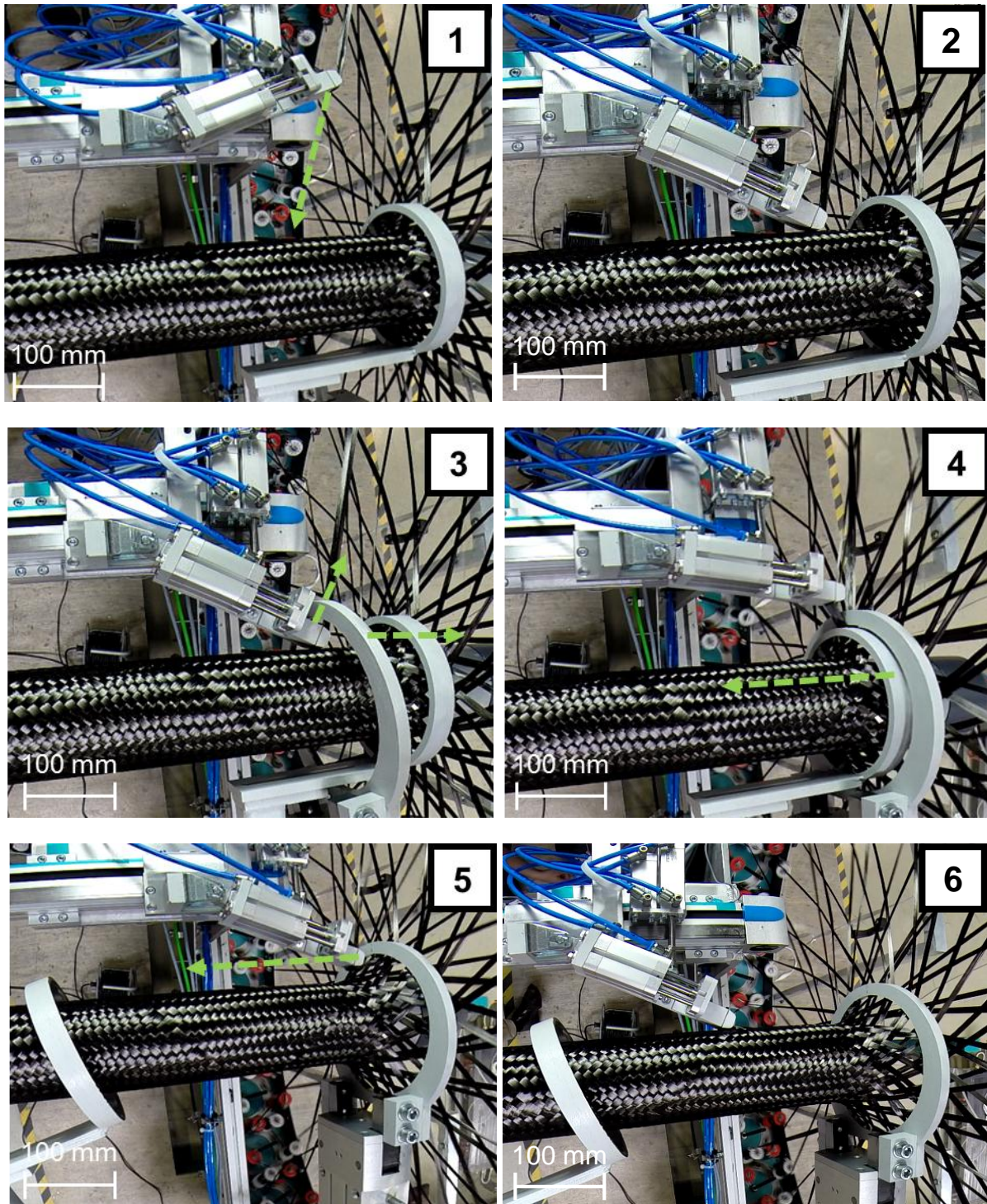


Abbildung 5.36: Prozessablauf bei dem Einbringen von Fäden

Mit den beschriebenen Schritten werden alle Anforderungen der Prozessentwicklung umgesetzt. Einzige Einschränkung ist die Bewegung des Greifers entlang des Flechtkegels. Auf Grund der für die Schließung des äußeren Flechtrings benötigten Positionierung des Greifers, kann der Greifer die Fadenenden erst nach dem der äußere Flechtring das Geflecht übernommen hat (in Abbildung 5.36 ab Bild 5), korrekt führen. In wie weit sich diese Einschränkung im Fehlerbild bemerkbar macht, ist im Rahmen der Materialcharakterisierung zu klären.

Der Endpunkt für den letzten Schritt, die Bewegung des Greifers mit dem Kern, ist durch die Position des inneren Flechtrings vorgegeben. Da dieser nur um 400 mm verfährt, muss der Greifer die Fadenenden rechtzeitig freigeben, sodass es zu keiner Kollision kommt. Die daraus resultierende Verfahrstrecke des Greifers von circa 300 mm reicht aus, um die Fäden ausreichend in das Geflecht einzubinden. Bevor der innere Flechtring erreicht ist, gibt der Greifer die Fadenenden frei. Diese werden anschließend mit einer Schere abgetrennt (Abbildung 5.37).

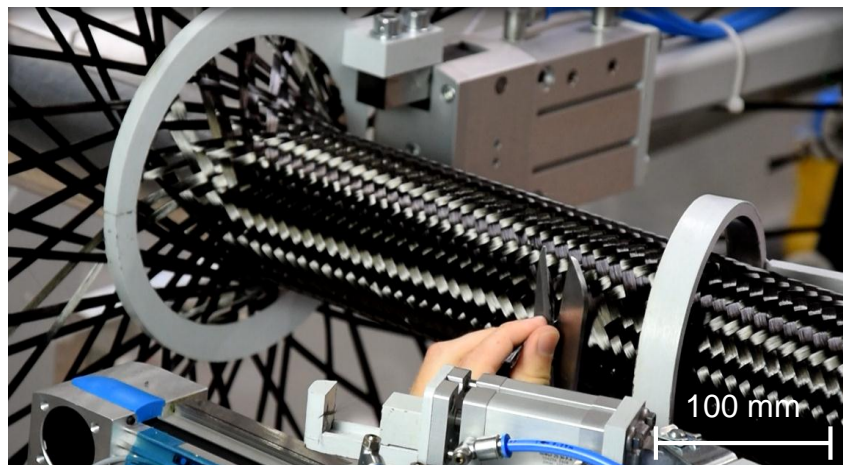


Abbildung 5.37: Abtrennen der überstehenden Fadenenden

Um die Fadenenden mit dem Kern mitzuführen, ist der Greifer unmittelbar an der Oberfläche des Geflechts platziert (Abbildung 5.36 Bild 6). Das daraus resultierende sehr geringe Platzangebot zum Schneiden der Fäden, macht die Integration der Beschnitteinheit in den Greifer unumgänglich.

Mit dem Prüfstand lässt sich der Funktionsnachweis für den entwickelten Prozess zur Fadenhandhabung erbringen. Es bleibt zu klären, welche lokalen Auswirkungen der Prozess auf die Faserarchitektur hat.

5.6.2. Charakterisierung und Bewertung der Fehlstellen

Die Versuche zur Untersuchung der Fehlstellen fanden an der Flechtanlage des LCC statt, deren Bauweise das Ab- und Zuschalten von Flügelrädern nicht erlaubt. Daher werden die fehlenden Fäden stets zwei Gassen im Geflecht hinterlassen, jeweils eine pro Flechtrichtung. Diese Anomalie im Geflecht darf der Fadenhandhabung nicht angelastet werden, da die Gassen nur durch eine entsprechende Anlagenbauweise (siehe Abschnitt 5.1.2.1) verhindert werden können. Die von der Fadenhandhabung verursachten Geflechtsanomalien, fortan als Fehlstellen bezeichnet, werden im nächsten Abschnitt kategorisiert und auf ihre Ursache hin untersucht. In dem darauffolgenden Abschnitt werden diese Ursachen durch eine angepasste Prozessführung weitestgehend eliminiert, sodass ein vorläufiges Optimum vorgestellt und diskutiert werden kann.

5.6.2.1. Ausprägungen der Fehlstellen und deren Ursachen

Grundsätzlich werden alle Fehlerbilder von einer falschen Bewegung des Greifers hervorgerufen. Die falsche Bewegung resultiert in einer ungünstigen Fixierung der gegriffenen Fäden. Bei den Versuchen bestätigte sich die Erkenntnis aus den Vorversuchen an der 3D-Flechtanlage: die Fixierung muss durch die Aufbringung einer Zugkraft erfolgen, welche in Richtung der Faserorientierung des Geflechts weist. Im Umkehrschluss bedeutet das für die Fehlstellen, dass diese entweder durch das Fehlen der Zugkraft oder die falsche Orientierung dieser Kraft verursacht werden.

Die falsche Orientierung der Zugkraft wird von einem Missverhältnis zwischen der Bewegung des Geflechts und der Bewegung des Greifers verursacht. Abbildung 5.38 oben zeigt die beiden möglichen Ausprägungen: entweder der Greifer ist schneller und somit in Abzugsrichtung versetzt oder er ist langsamer als das Geflecht. In beiden Fällen werden durch die Umlenkung der Fäden, angedeutet durch die roten Pfeile, die Lücken im Geflecht vergrößert. Des Weiteren kommt es zu einer Verzerrung des Geflechts entlang der entnommenen bzw. eingebrachten Fäden. Durch deren Umlenkung wird der Faserwinkel lokal verändert und es entsteht eine Gasse, welche sich erst nach einigen Abbindungen wieder schließt.

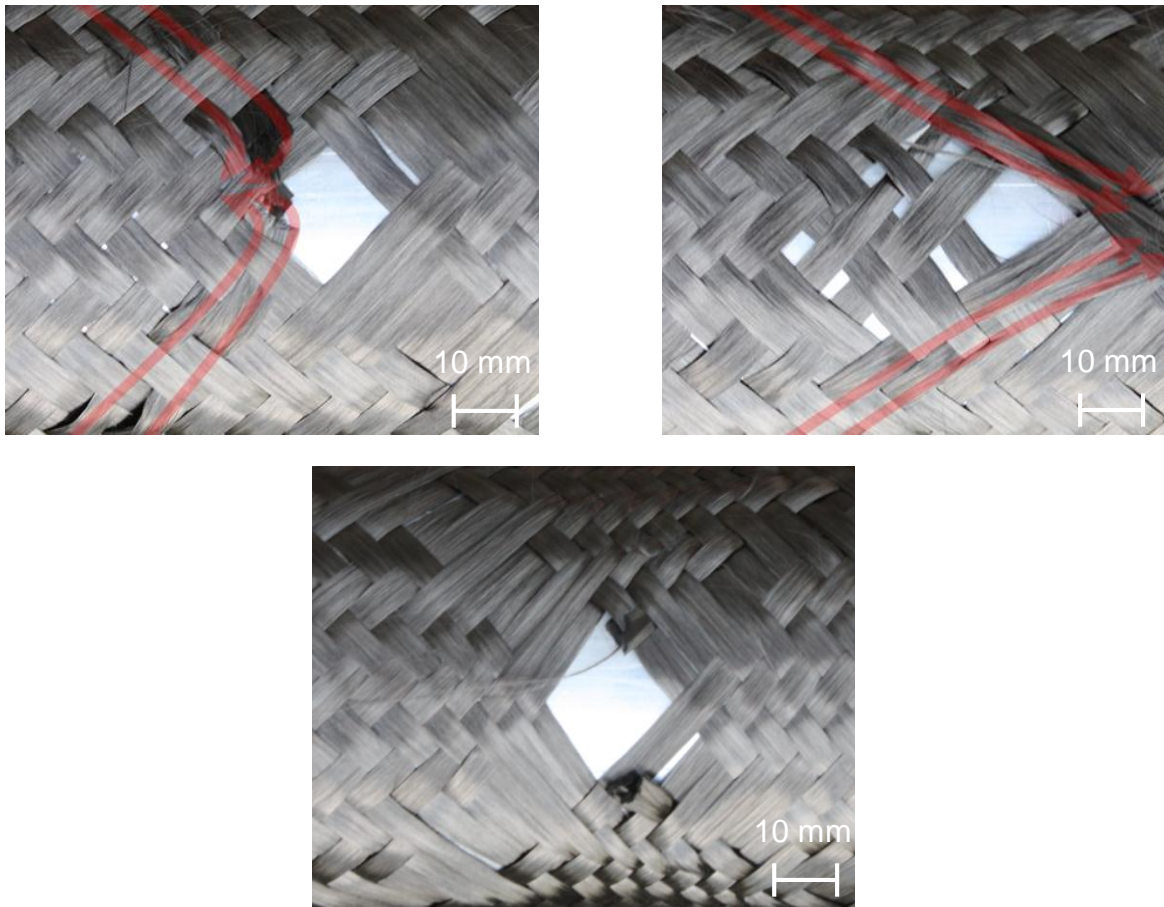


Abbildung 5.38: Ursachen für die Vergrößerung der Fehlstellen: falsche Orientierung der Fixierungskraft (oben; rote Pfeile stellen Kraftvektor der Fäden dar) und keine Fixierungskraft (unten)

Das untere Bild in Abbildung 5.38 zeigt das Fehlerbild, welches bei einer vollständigen Reduzierung der Fadenspannung vor dem Flechtpunkt eintritt. Dies kann nur bei der Entnahme der Fäden eintreten. Erfahren die Fäden nach der Fixierung im Greifer keine Ausrichtung durch eine Zugkraft, werden sie in den letzten Abbindungen im Geflecht durch die übrigen, unter Spannung stehenden Flechtfäden während des Flechtvorgangs verschoben. Es entstehen Gassen im Geflecht und die entnommenen Fäden bilden von der Kernoberfläche abstehende Schlaufen zwischen den letzten Abbindungen (in Abbildung 5.38 nur leicht ausgeprägt).

Um den Greifer relativ zum Geflecht immer richtig bewegen zu können, müssen die Fadenhandhabung und die Flechtanlage miteinander gekoppelt werden. Mit der Funktionsweise des Prüfstands, bei der die Bewegung des Greifers per Knopfdruck zum richtigen Zeitpunkt gestartet werden muss, kann ein leichter Versatz zwischen der Greiferposition und der letzten bzw. ersten Abbindung der Fäden nicht ausgeschlossen werden. Findet diese Kopplung jedoch statt, kann das Fehlerbild, welches durch die falsche Positionierung des Greifers hervorgerufen wird, reproduzierbar ausgeschlossen werden. (siehe Versuchsergebnisse in Kapitel 5.2)

Bei der Entnahme der Fäden muss der Greifer, wie ursprünglich vorgesehen, direkt an der Stelle der letzten Abbindung die Fixierung vornehmen. Dies muss mit einer veränderten Anlagenbauweise ermöglicht werden.

Somit lassen sich alle Fehlerbilder auf die, bezüglich des ursprünglichen Prozesses vorgenommenen Vereinfachungen des Prüfstands zurückführen. Werden die Anforderungen an die Greiferbewegung mittels einer komplexeren Anlagensteuerung und -konstruktion vollständig erfüllt, kann die Fehlstelle reproduzierbar minimiert werden.

5.6.2.2. Minimierung der Fehlstellen durch Prozessanpassungen

Bei dem Einbringen der Fäden muss die Bewegung des Greifers so ausgelöst werden, dass der Greifer entlang des Flechtkegels und des Kerns, direkt an der Stelle der ersten Abbindung stattfindet. Gelingt die Abstimmung des Greifers mit dem Flechtprozess, so tritt eine minimale Fehlstelle im Bereich des Eintritts der Fäden in das Geflecht auf (Abbildung 5.39). Die Lücke unterhalb der vier Fadenenden würde bei einer Flechtanlage mit zuschaltbaren Flügelrädern nicht existieren, da das Geflecht mit der geringeren Anzahl an Fäden die Gassen (Abbildung 5.39 rote Schattierung) und somit auch die Lücke schließen würde.

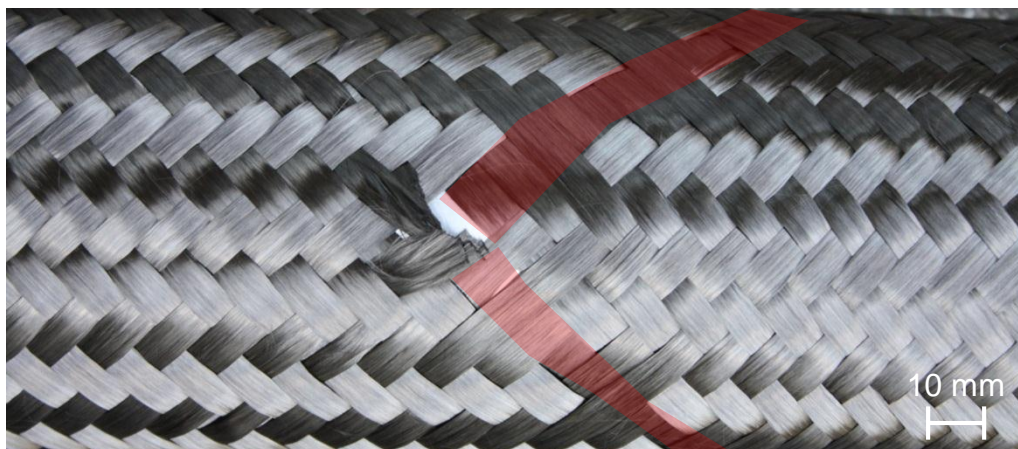


Abbildung 5.39: Einbringen von vier 50k Fäden und dabei verursachte Gassen (rote Schattierung); Abzugsrichtung nach rechts [67]

Bei der Entnahme der Fäden kann der Anforderung nach einer Fixierung an der Austrittsstelle der Fäden auf Grund der Anlagenbauweise nicht nachgekommen werden. Erst mit einer Neukonstruktion kann sichergestellt werden, dass sich der Greifer zur Fixierung der Fäden stets an der richtigen Position befindet und die Verzerrung des Geflechts verhindert wird (Abbildung 5.40 gelbe Schattierung). Des Weiteren lässt sich eine leichte Welligkeit der Fäden vor der Entnahme beobachten.

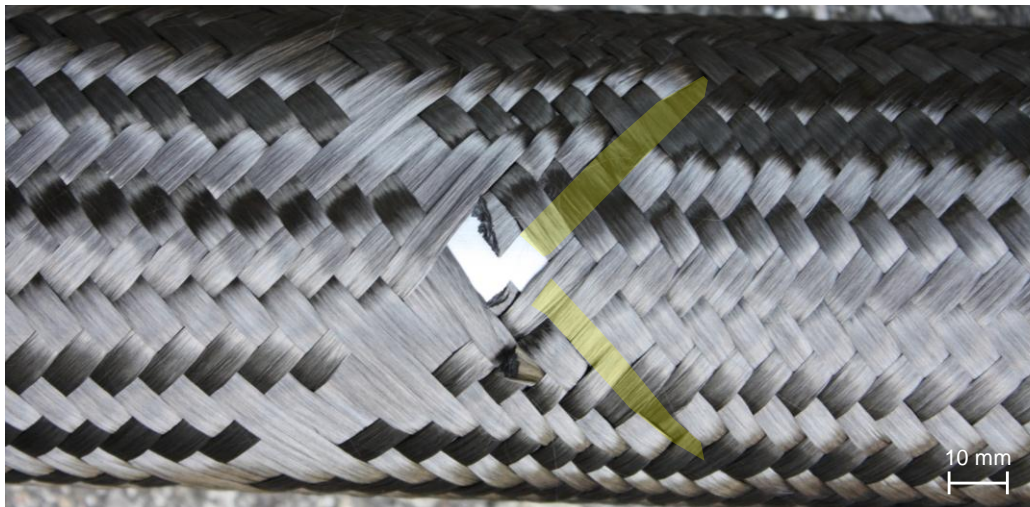


Abbildung 5.40: Entnahme von vier 50k Fäden mit Gassen neben den entnommenen Fäden (gelbe Schattierung); Abzugsrichtung nach rechts

Als **Fazit** der an dem Prüfstand durchgeführten Versuche ist festzuhalten, dass der entwickelte Fadenhandhabungsprozess funktioniert. Der Prozess kann während des Flechtens stattfinden, sodass keine Einschränkung der Produktivität erfolgt. Die nach der Prozessanpassung an den Ein- bzw. Austrittstellen der Fäden verbleibenden Gassen und Lücken sind auf die zu Beginn der Prüfstandkonzeptionierung aufgestellten Vereinfachungen zurückzuführen. Das Optimum bezüglich der Materialqualität kann erst mit der Bereitstellung der entsprechenden Flechtanlagentechnik erreicht werden. Des Weiteren muss eine Übertragung auf einen Prozess stattfinden, welcher mehrere Fadenpakete (bestehend aus mindestens vier Fäden) einbringen und entnehmen kann, um der ursprünglichen Aufgabenstellung zur Ermöglichung von großen Umfangsänderungen gerecht zu werden.

5.7. Ausblick: Entwurf einer Serienanlage

Mit dem Entwurf einer Anlage, welche die Fadenanzahlvariation bei der Serienherstellung von geflochtenen Bauteilen erlaubt, müssen ausgehend von dem Prüfstand weitere Schritte ausgestaltet werden:

1. Der Greifer muss wesentlich komplexere Bewegungen vollziehen, als es die Komponenten am Prüfstand erlauben. Der Greifer muss auch bei der Herstellung von gekrümmten Kernen in der Lage sein, dessen Geometrie zu folgen.
2. Bei der Verarbeitung von gekrümmten Kernen muss auch der innere Flechtring der Geometrie des Kerns folgen können.
3. Mehrere Entnahme- bzw. Einbringprozesse müssen schnell hintereinander durchführbar sein. Je kürzer die Dauer für einen Teilprozess, desto größer kann die Steigung bei einer Umfangsänderung ausfallen.

Grundlage für den Entwurf ist die Flechtanlage des LCC mit 32 Flügelrädern. Um mit der Anlage Bauteile herstellen zu können, deren Umfang sich um den Faktor zwei verändert, muss die Anlage mit 32 zusätzlichen, zuschaltbaren Flügelrädern erweitert werden. Somit ergeben sich 16 Flügelradpaare, welche zu- bzw. abgeschaltet werden können.

In Anbetracht des eingeschränkten Bauraums und einer kostengünstigen Konstruktion kann nicht jedes dieser 16 Flügelradpaare mit einer eigenen Fadenhandhabung ausgestattet werden. Daher sieht das Konzept einen Greifer vor, welcher die beiden Teilprozesse (Entnahme und Einbringung) vollzieht, sowie 16 statische Greifer, die lediglich zum Halten der Fäden, während diese nicht im Flechtprozess eingebunden sind, dienen (Abbildung 5.41). Der Greifer zur Fadenhandhabung und der innere Flechtring sind auf einem Roboter montiert, sodass gekrümmte Kerne ebenfalls verarbeitet werden können. Der auf dem Roboter montierte Greifer hält die Fäden nur während der Entnahme oder während des Einbringens. Sobald die Fäden entnommen sind, werden sie an den entsprechenden statischen Greifer übergeben. Durch die Umlenkung der Fäden um einen Ring, sind diese auch nach der Übergabe in den statischen Greifer gespannt. Der äußere Flechtring ähnelt in seiner Bauweise stark der Umsetzung am Prüfstand. Ein Winkelgreifer ermöglicht die Klappbewegung der beiden Flechtringhälften und die Lagerung auf einem Vierkantträger dient der Bewegung des geschlossenen Rings in Richtung des Flechtkegels.

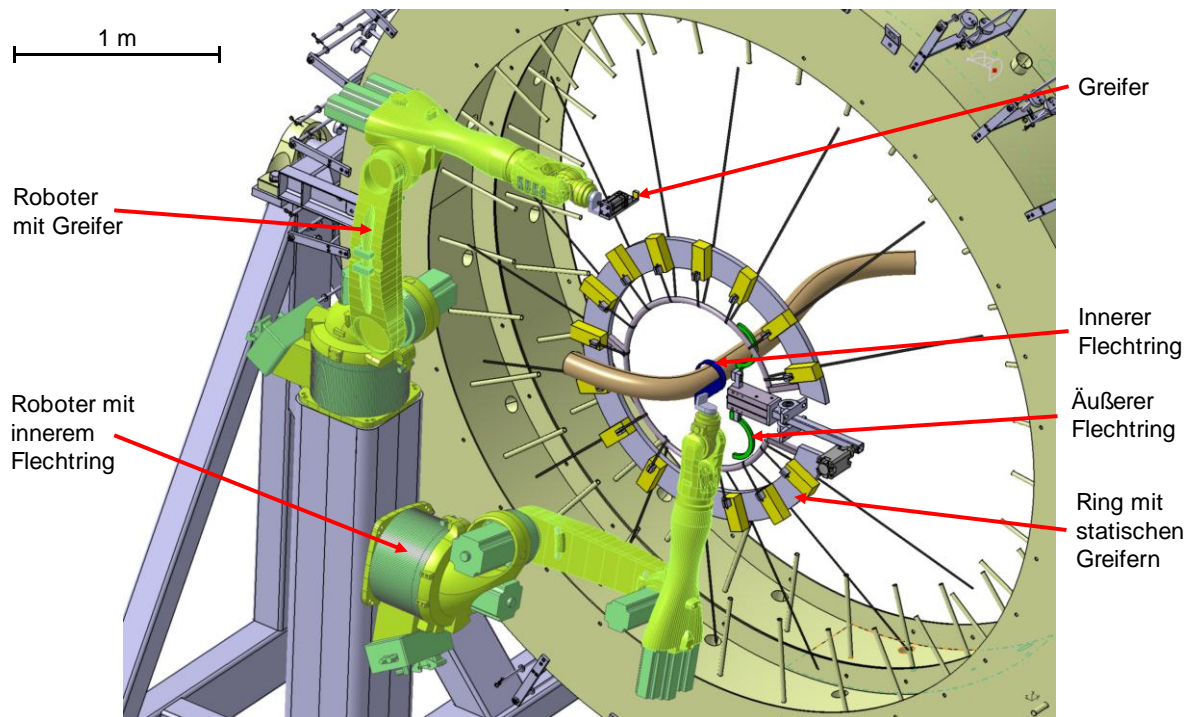


Abbildung 5.41: Entwurf einer Flechtanlage für die Serienproduktion

Um die Verdopplung oder Halbierung des Umfangs auch entlang eines kurzen Kernabschnitts zu erlauben, müssen die Teilprozesse schnell nacheinander ablaufen können. Je größer die Steigung, desto näher müssen die Entnahme- oder Einbringstellen aneinander liegen. Bei der Entnahme der Fäden können Entnahmepositionen in kurzer Abfolge stattfinden. Während die Fadenhandhabung vier Fäden entnimmt, kann bereits das nächste Flügelradpaar abgeschaltet werden, sodass der Handhabungsgreifer, unmittelbar nach der Abgabe der Fäden am statischen Haltegreifer, mit einer Schwenkbewegung die nächsten vier Fäden entnehmen kann. Mit dieser Vorgehensweise ist ein Abstand zwischen zwei Entnahmestellen von 10 mm denkbar. Somit kann der Umfang im betrachteten Beispiel (Abbildung 5.41) auf einer Kernlänge von 160 mm halbiert werden.

Bei dem Einbringen der vier Fäden kommt die Strecke, welche der Greifer bis zur Fixierung der Fadenenden durch das Geflecht mit dem Kern mitbewegt werden muss, hinzu. Je nach Fasermaterial und Abbindung werden 60 mm - 150 mm abgelegtes Geflecht benötigt. Der Abstand zwischen zwei Einbringstellen steigt dadurch erheblich. Um dennoch schnelle Umfangsänderungen zuzulassen, können unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden. So kann die Fadenhandhabung anstelle von nur vier Fäden acht einbringen. Eventuell entstehen durch die Einbringung von acht Fäden an einer Stelle zu stark ausgeprägte Fehlstellen, sodass stattdessen zusätzliche Anlagenkomponenten in Betracht gezogen werden müssen. Beispielsweise kann ein zweiter Roboter mit einem Greifer eingesetzt werden oder die Fixierung am Kern wird von einer zusätzlichen Klemmeinheit übernommen, sodass der Greifer

nach dem Erreichen des Flechtpunkts bereits die nächsten Fäden zum Einbringen greifen kann.

Mit der beschriebenen Anlage ließe sich ein Geflechtschlauch mit konstantem Flächengewicht und Flechtwinkel, welcher unterschiedliche Umfänge mit einem homogenen Geflecht bedeckt, herstellen. Nach der Umsetzung einer solchen Anlage, müssten Probekörper für Materialprüfungen hergestellt werden, um den Einfluss der lokalen Fehlstellen durch die Fadenenden zu bewerten.

6. Vergleichende Diskussion der vorgestellten Anlagenkonzepte

In den beiden vorangegangenen Kapiteln lag das Augenmerk auf der Entwicklung des jeweiligen Prozesses und der Bewertung der mit Hilfe der Prüfstände hergestellten Geflechtarchitekturen. Dabei wurde ausführlich auf die Vorgehensweise bei der Prozessentwicklung eingegangen und eine Bewertung mittels der Charakterisierung von Materialproben vorgenommen. In diesem Kapitel werden weitere Aspekte beleuchtet, die für eine vollständige Bewertung der neuen Anlagenkonzepte im Gesamtkontext *automatisierte Herstellung von Flechtbauteilen in der Großserie* nötig sind. Beide Anlagenkonzepte entspringen der gleichen Motivation, sodass bei der Diskussion der Prozesse stets mit einbezogen werden muss, ob eines der beiden zu bevorzugen oder aber eine Kombination sinnvoll ist.

Bei der Diskussion werden nicht die beiden Prüfstände miteinander verglichen, sondern die dahinterstehenden Prozesse, so wie sie vollautomatisiert in einer Serienanlage vorstellbar sind. Die Diskussion wird unter drei Gesichtspunkten geführt: Wirtschaftlichkeit, alternative Einsatzmöglichkeiten und Einschränkungen bei der Prozessführung und Bauteilgeometrie.

6.1. Kostenrechnung für die Lebenslaufkosten

Unter Lebenslaufkosten (auch Lebenszykluskosten oder Produktgesamtkosten [68]) versteht man alle Kosten die bei dem Nutzer bei der Verwendung eines Produkts anfallen. [69]. Nach Ehrlenspiel [70] setzen sich die Lebenslaufkosten wie in Abbildung 6.1 dargestellt zusammen. Die Kostenrechnung für die beiden Prozesse *Spreizen* und *Variation der Fadenanzahl* ist in Anlehnung an dieses Schema in zwei Abschnitte unterteilt. Zum einen der Vergleich der Investitionskosten und zum anderen die Berechnung der Betriebskosten. Die Instandhaltungskosten hängen von der konkreten Umsetzung der Anlagenkomponenten ab und können auf Grund der Erfahrung mit den Prüfständen - bei der geringen Anzahl an Betriebsstunden war keine Wartung nötig - nicht beurteilt werden. Die sonstigen Kosten werden als weitestgehend unabhängig von dem Anlagenkonzept angesehen.



Abbildung 6.1: Zusammensetzung der Lebenslaufkosten [70]

Für beide Prozesse wurden Prüfstände für die Durchführung von Versuchen im Labormaßstab entworfen und umgesetzt. Mit beiden Prüfständen wird der jeweilige Prozess mit einigen Vereinfachungen nur in einem Prototypenstadium abgebildet. Die Kosten der Prüfstände geben daher nur sehr begrenzt Aufschluss über die Kosten einer Serienanlage und können somit nicht für einen Vergleich herangezogen werden. Die in diesem Abschnitt angestellte Kostenrechnung darf daher nur als erste Abschätzung verstanden werden.

6.1.1. Investitionskosten

Die Investitionskosten werden für eine Anlage wie sie am LCC vorhanden ist aufgestellt. Die Berechnungen dienen lediglich dem Vergleich der beiden Anlagenkonzepte. Eine Aussage bezüglich der durch die zusätzliche Anlagentechnik entstehenden Mehrkosten pro Bauteil kann nicht abgeleitet werden, da dies stark von der Stückzahl abhängt. Ziel ist es vielmehr, einen Faktor abzuschätzen, um den sich die Anlagentechnik im Vergleich zu herkömmliche Flechtanlagen verteuert. Die Kosten beziehen nur die Flechtanlage selbst mit ein, Kernhandhabung und weitere Nebenprozesse wie Absaugung und Beschnitt werden nicht berücksichtigt, da sie nicht durch die Anlagenkonzepte beeinflusst werden.

In Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 sind die Investitionskosten, die *zusätzlich* zu einer konventionellen Flechtanlage entstehen, aufgelistet. Bei dem Anlagenkonzept Spreizen wird zwischen dem Antrieb, welcher die pulsierende Bewegung bewerkstelligt

und der Höheneinstellbarkeit der Düsen oder Walzen unterscheiden. Die Anpassung der Höhe der Düsen oder Walzen relativ zur Kernoberfläche ist notwendig, da mit größer werdendem Abstand die Spreizwirkung erheblich nachlässt.

Tabelle 6-1: Zusätzliche Investitionskosten für das Anlagenkonzept Spreizen

Anlagenkonzept Spreizen	
Antrieb	10.000,00 €
Einstellbarkeit Düsen/Walzen	10.000,00 €
Zubehör (Walzen/Düsen, Halterung)	5.000,00 €
Steuerung	5.000,00 €
Summe	30.000,00 €

Tabelle 6-2: Zusätzliche Investitionskosten für das Anlagenkonzept variable Fadenanzahl

Anlagenkonzept variable Fadenanzahl	
Zweiter Flechtrumpf	140.000,00 €
Steuerung	40.000,00 €
Greifersystem	20.000,00 €
Roboter (zwei)	120.000,00 €
Zubehör (Halterung, Anbauteile)	10.000,00 €
Summe	330.000,00 €

Die für das Anlagenkonzept variable Fadenanzahl aufgeführten Komponenten entsprechen denen der in Kapitel 5.7 vorgestellten Serienanlage. Der zweite Flechtrumpf beinhaltet die zuschaltbaren Flügelräder und Klöppel. Unter dem Punkt Steuerung werden auch die Kosten für die Entwicklung der Weichenschaltung berücksichtigt, also der Übertragung der 3D-Flechtanlagentechnik auf die Rundflechtanlage. Das Greifersystem besteht aus dem auf dem Roboter montierten Greifer und den statischen Greifern. Die beiden Roboter werden für die Führung des Greifers und des inneren Flechtrings benötigt.

Der Vergleich der beiden Kostenrechnungen zeigt, dass das Anlagenkonzept mit der Variation der Fadenanzahl eine deutlich höhere Investition erfordert. Bezogen auf die Investitionskosten einer herkömmlichen Flechtanlage (LCC Flechtanlage: ca. 140.000 €) fallen die zusätzlichen Kosten für ein Spreizaggregat nur geringfügig ins Gewicht, wohingegen eine Flechtanlage mit variabler Fadenanzahl mehr als das Dreifache einer konventionellen Anlage kostet.

Im direkten Vergleich schneidet das Anlagenkonzept variable Fadenanzahl deutlich schlechter ab, als das Spreizkonzept. Allerdings sind für einen wirtschaftlichen Einsatz die Mehrkosten pro Bauteil entscheidend. Wird berücksichtigt, dass eine Flecht-

anlage mehrere Jahre in Betrieb ist und täglich hunderte Bauteile herstellt und dass die Flechtanlage nur ein kleiner Teil der Gesamtinvestition für eine Fertigungsstraße zur Herstellung von Flechtbauteilen ist, relativieren sich die zusätzlichen Investitionskosten.

6.1.2. Betriebskosten

Die Betriebskosten im Sinne der Einteilung in Abbildung 6.1 (Energie, Betriebsstoffe usw.) sind für die Ansteuerung und Bewegung der zusätzlichen Komponenten der beiden Konzepte weitestgehend gleich. Die Verwendung der Düsen zum Spreizen führt jedoch zu einem deutlichen Mehrbedarf an Energie, welche für die Bereitstellung der Druckluft benötigt wird. Die Firma Festo gibt als Richtwert für die Herstellungskosten von einem Kubikmeter Druckluft 0,025 € an [71]. Mit diesem Wert können die Betriebskosten beispielhaft für die Herstellung der Probeplatten für die mechanische Charakterisierung in Kapitel 4.6 berechnet werden. Im Rahmen dieser Versuche wurde ein Kern mit einem Durchmesser von 130 mm beflochten und mit 12 Düsen vom Typ Windjet 727 nachbearbeitet. Jede Düse hat bei dem verwendeten Druck von 2 bar einen Druckluftverbrauch von 31 m³/h [72]. Somit ergibt sich für die Gesamtanlage ein Verbrauch von 6,2 m³/min. Bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,034 m/s entstehen Betriebskosten von 0,076 € pro einem Meter Geflecht. Ein Bauteil mit einem Durchmesser von 130 mm, einer Länge von 2 m und mit sechs Lagen kostet somit auf Grund des Druckluftverbrauchs 0,91 € mehr.

Der berechnete Wert für die zusätzlichen Betriebskosten versteht sich als Maximalwert, welcher durch verschiedene Maßnahmen unterschritten werden kann. Beispielsweise hat die Auswertung der Parameterstudie (siehe Abschnitt 4.4.4.1) ergeben, dass durch ein periodisches, hochfrequentes Abschalten der Druckluft keine negative Beeinflussung des Spreizergebnisses stattfindet. Mit dieser Maßnahme lässt sich der Druckluftbedarf halbieren. Des Weiteren können die Düsen in Bereichen mit einem kleineren Umfang, welche ohnehin über ein geschlossenes Geflecht verfügen, abgeschaltete werden. Nichtsdestotrotz können diese Kosten bei der Verwendung des Konzepts variable Fadenanzahl eingespart werden.

6.1.3. Fazit zur Kostenrechnung

Beide Anlagenkonzepte verursachen zusätzliche Lebenslaufkosten bei der Herstellung von Flechtbauteilen. In beiden Fällen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei Anwendungen, welche große Umfangsänderungen erfordern, der Nutzen die zusätzlichen Kosten rechtfertigt. Welche der beiden Anlagenkonzepte sinnvoller ist, lässt sich an Hand der Kostenrechnung schwer entscheiden. Auf Grund der ho-

hen Investitionskosten bleibt die Flechtanlage mit variabler Fadenanzahl allerdings größeren Stückzahlen vorbehalten.

6.2. Alternative Einsatzmöglichkeiten

Die beiden Anlagenkonzepte mit den dahinterstehenden Prozessen wurden mit der Zielsetzung entwickelt, das Prozessfenster für die Herstellung von Flechtbauteilen zu vergrößern. Allerdings bieten die beiden Prozesse weitere Einsatzmöglichkeiten, welche das Leichtbaupotenzial von geflochtenen Bauteilen vergrößern.

6.2.1. Anlagenkonzept Spreizen

Die Aufgabenstellung zu Beginn der Prozessentwicklung sieht vor, dass ein Bauteil, welches über ausgeprägte Umfangsänderungen verfügt, ohne Beeinträchtigung der mechanischen Leistungsfähigkeit hergestellt werden soll. Allerdings kann der Einsatz das prozessintegrierte Spreizen auch bei Bauteilen ohne Umfangsänderungen sinnvoll sein.

Durch die gespreizte Ablage der Fasern sinkt die Dicke der Einzellage und somit das Flächengewicht. Dies hat den Vorteil, dass eine von der Auslegung vorgegebene Zielwandstärke besser erreicht werden kann. Wird beispielsweise eine Wandstärke von 3,5 mm gefordert und die Einzellagedicke des verwendeten Geflechts beträgt 1 mm, muss das Bauteil mit vier Lagen versehen werden. Somit beträgt die Istwandstärke 4 mm, 0,5 mm mehr als erforderlich. Wird durch die gespreizte Faserablage das Flächengewicht um die Hälfte reduziert, kann die gewünschte Wandstärke mit sieben Lagen genau erreicht werden. Auf diese Weise werden die Herstellungskosten durch die Einsparung von Material reduziert und das Bauteilgewicht verringert.

Der direkte Zusammenhang zwischen Fadenanzahl, -breite und Bauteilumfang (siehe Formel (2.1)) erlaubt bei konstantem Umfang und steigender Fadenbreite die Reduzierung der Fadenanzahl. Als Beispiel: wird die Fadenbreite durch das Spreizen verdoppelt und es soll nach wie vor das gleiche Bauteil beflochten werden, kann die Anzahl der Fäden halbiert werden. Wird nur noch die Hälfte der Fäden benötigt, lässt sich die Größe der Flechtanlage entsprechend verringern. Obwohl das Flächengewicht durch diese Vorgehensweise halbiert wird, sinkt der Materialdurchsatz nicht. Der Zusammenhang zwischen Produktionsgeschwindigkeit (Abzugsgeschwindigkeit) und der Anlagengröße (Anzahl der Flügelräder) in Formel (6.1) zeigt, dass die Halbierung der Flügelradanzahl die Abzugsgeschwindigkeit verdoppelt.

$$v_{ab} = \frac{\pi \cdot d \cdot 2 \cdot N_{FR}}{\tan(\theta) \cdot n_{FR} \cdot 60} \quad (6.1)$$

v_{ab} Abzugsgeschwindigkeit [m/s]

d Kerndurchmesser

N_{FR} Flügelraddrehzahl

θ Flechtwinkel

n_{FR} Flügelradanzahl

Das heißt, in dem Maß wie das Flächengewicht und somit die Anlagengröße verringert wird, steigt gleichzeitig die Abzugsgeschwindigkeit. Das Spreizen hat also keinen Einfluss auf die Produktivität, ermöglicht aber die Verwendung von kleineren Anlagen. Somit können die Investitionskosten und der Platzbedarf der Anlage gesenkt werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Optimierung der mechanischen Eigenschaften. Die teilweise erhebliche Verbesserung der Festigkeit in Faserrichtung konnte im Rahmen der Untersuchungen in Kapitel 4.6 nachgewiesen werden. Des Weiteren stellt Tsai [73] bei der Untersuchung von Laminaten aus gespreizten Fasern eine Steigerung der Schadenstoleranz fest. Die homogenere Verteilung der Fasern verhindert ein frühzeitiges Entstehen von Mikrorissen und Delaminationen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Sihn [74], Amacher [75] und Arteiro [76]. Das prozessintegrierte Spreizen erlaubt somit die Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Geflechts, ohne dabei die Produktivität des Prozesses einzuschränken.

6.2.2. Anlagenkonzept variable Fadenanzahl

Der Greifermechanismus des Anlagenkonzepts zur Variation der Fadenanzahl kann neben der Handhabung der zusätzlichen Fäden auch für die Einbringung neuer Spulen, das heißt für das Rüsten der Anlage, verwendet werden. In der Patentschrift [77] wird ein vereinfachtes Fadenhandhabungssystem vorgestellt, bei dem eine komplette Anlagenbesetzung mit neuem Fasermaterial in die Flechtanlage eingesetzt wird. Mit der Anlagentechnik zur Variation der Fadenanzahl kann dieser Prozess während des laufenden Flechtbetriebs stattfinden. Ist das Fasermaterial auf einer Spule nahezu aufgebraucht, kann diese am Ende einer Lage über Weichen aus dem Prozess gefahren und eine neue Spule eingebracht werden. Die Fadenenden werden dabei von der Fadenhandhabung geführt. Somit liegt das Fadenende zwischen zwei Lagen, in einem Bereich, welcher nach der Besäumung entfällt. Mit dieser Vorgehensweise kann erreicht werden, dass der Flechtprozess zum Bestücken mit neuem Fasermaterial nicht angehalten werden muss. Die Spulen werden im laufenden Prozess, immer nach dem Abschluss einer Lage, schrittweise ausgetauscht. Für die Herstellung von

Bauteilen ohne Umfangsänderungen kann die Fadenhandhabung an die Anforderungen eines automatisierten Rüstprozesses angepasst und vereinfacht werden. Für diesen Anwendungsfall kann von dem in Kapitel 5.3 erarbeiteten Prozess abgewichen werden.

6.3. Neue Restriktionen

Mit den vorliegenden Anlagenkonzepten konnte die enge Begrenzung der maximalen Umfangsänderung in einem Flechtbauteil erheblich erweitert werden. Das Ergebnis ist ein vergrößertes Prozessfenster, was die gestalterischen Freiheiten bei der Bauteilauslegung erhöht. Die Implementierung der zusätzlichen Anlagentechnik und die damit einhergehende Komplexitätssteigerung können jedoch neue Restriktionen zur Folge haben.

Auf Grund der zusätzlichen Prozessschritte erscheint eine Einschränkung der Produktivität am wahrscheinlichsten. Die Entstehung dieser Einschränkung wurde jedoch bereits zu Beginn durch die Aufstellung einer entsprechenden Anforderung verhindert, da eine Produktivitätseinschränkung für einen Großserienprozess nicht hinnehmbar wäre. Mit Hilfe der beiden Prüfstände konnte der Nachweis geliefert werden, dass sowohl der Spreizprozess, als auch die Variation der Fadenanzahl während des laufenden Flechtprozesses stattfinden können.

Bei den Versuchen, welche mit den Prüfständen durchgeführt wurden, hatte der Platzbedarf der Prüfstandskomponenten die Positionierung der Kerneinspannung erschwert. Zu Beginn des Flechtprozesses muss die Abzugseinheit - am LCC ein Roboter – den Kern am Flecht Punkt aufnehmen. Besonders der in Produktionsrichtung ausgerichtete Prüfstand zum Spreizen schränkt jedoch den Zugang zum Flecht Punkt ein. Während des Flechtens muss der Kern so geführt werden, dass die Querschnittsfläche des am Flecht Punkt befindlichen Kernabschnitts parallel zur Anlagenebene steht. Folglich muss der Abzug eines gekrümmten Kerns einer gekrümmten Bahn folgen. Führt der Bahnverlauf zu einer Kollision zwischen Abzugseinheit und Spreizaggregat, kann die gewünschte Kerngeometrie nicht gefertigt werden. Hinzu kommt, dass stark gekrümmte Kerne einer Abstützung in der Nähe des Flecht Punkts bedürfen. Die Patentschrift [78] stellt eine solche Vorrichtung vor. Kann diese Vorrichtung auf Grund des Spreizaggregats nicht nah genug an dem Flecht Punkt positioniert werden, muss die Kernkrümmung ebenfalls eingeschränkt werden. Das Ausmaß der Einschränkung, beziehungsweise ob überhaupt eine Einschränkung zu Stande kommt, ergibt sich aus der konstruktiven Gestaltung der Anlage. Daher muss bei der Umsetzung der Anlagenkonzepte auf den Platzbedarf der Kernhandhabung geachtet werden. Wird die Bewegungsfreiheit der Handhabung eingeschränkt, kann dies Folgen für die Kerngeometrie haben.

6.4. Abschließende Bewertung

Bringt eine Bauteilgeometrie mit variierendem Umfang eindeutige konstruktive Vorteile, welche sich beispielsweise durch eine Gewichts- oder Kostenreduzierung bemerkbar machen, wiegt der Nutzen die entstehenden Kosten vermutlich in den meisten Fällen auf. Wesentlich entscheidender für die Umsetzung der Konzepte ist der Bauraumbedarf. Sowohl Kernhandhabung als auch Beschnittsysteme zum Abtrennen der Geflechtlagen sind in der Nähe des Flechtpunktes positioniert und schränken somit unweigerlich die Anbringung weiterer Anlagenkomponenten am Flechtpunkt ein. Die Umsetzung einer der beiden Anlagenkonzepte kann daher um einiges teurer sein, als in der Kostenrechnung dargestellt. Eventuell müssen Kernhandhabung und Beschnittsystem erheblich umkonstruiert werden, um ausreichend Platz bereitstellen zu können. Dies ist auch die Hauptherausforderung bei der Kombination der beiden Konzepte: mit der jetzigen Umsetzung lassen sich beide Ansätze auf Grund des Platzbedarfs nur schwer kombinieren.

Die Wahl zwischen den beiden Konzepten wird wahrscheinlich an Hand der Rahmenbedingungen getroffen, welche sich durch die Anlagentechnik des konkreten Fertigungsprozesses, in den das Konzept integriert werden soll, ergeben. In beiden Fällen muss unter Einbeziehung der in der vorliegenden Arbeit gewonnen Erkenntnisse eine konstruktive Anpassung der Anlagenkonzepte an das vorhandene Fertigungsumfeld stattfinden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Variation des Umfangs eines Flechtbauteils wird durch die Grenzen des Flechtprozessfensters eingeschränkt. Der Hintergrund ist der Einfluss des Kernumfangs auf die Geflechtarchitektur, das heißt auf die Geflechtmerkmale, welche die Leistungsfähigkeit des späteren Verbundwerkstoffs beeinflussen. Die übergeordnete Motivation für diese Arbeit liegt in der aus der Literatur entnommenen Feststellung, dass mit derzeitiger Anlagentechnik eine starke Umfangsänderung eine erhebliche Änderung der Geflechtarchitektur und somit eine Herabsetzung der mechanischen Kennwerte zur Folge hat.

Der erste Schritt bestand darin, den negativen Einfluss der Umfangsänderung auf die mechanische Leistungsfähigkeit zu quantifizieren. Dies geschah im Rahmen von Zug-, Druck- und Dreipunktbiege-Versuchen, welche, exemplarisch für einen Flechtwinkel ($\pm 45^\circ$), an vier verschiedenen Durchmessern durchgeführt wurden. Für alle drei Versuche wurde der Zusammenhang zwischen Festigkeit und Kerndurchmesser beziehungsweise -umfang hergestellt. Diese Untersuchung zeigte, dass die Festigkeit nur in einem kleinen Umfangsbereich ihr Maximum erreicht. Die Ursachensuche ergab, dass zwei Geflechtmerkmale die Abnahme der Festigkeit zur Folge hatten: zum einen die Kompaktierung des Geflechts auf kleiner werdenden Durchmessern und zum anderen die Lückenbildung auf größer werdenden Durchmessern. Aus dieser Erkenntnis wurde die Aufgabenstellung abgeleitet, dass der Flechtprozessablauf so zu modifizieren ist, dass die Entstehung dieser Geflechtmerkmale auch bei stark ausgeprägten Umfangsänderungen verhindert wird.

Das erste Konzept sieht die Anpassung der Garnbreite an den zu beflechtenden Umfang vor. Wird der Umfang eines Flechtbauteils kontinuierlich größer, so muss auch die Garnbreite kontinuierlich ansteigen, um die Entstehung von Lücken zu vermeiden. Für die Entwicklung eines *flechtprozessintegrierten Spreizprozesses* wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Spreizmechanismen, welche aus dem Einzelgarnspreizprozess bekannt sind, in den Verlauf eines Flechtfadens in der Flechtanlage zu integrieren. Die anfängliche Fülle an Lösungsprinzipien wurde durch eine versuchsbasierte Bewertung und Auswahl so weit eingeschränkt, dass ein Prozessablauf mit drei Spreizmechanismen ausgearbeitet werden konnte: das Geflecht wird über einen pulsierenden Flechtring [60] umgelenkt und nach der Ablage auf dem Kern mechanisch (mittels Walzen) und pneumatisch (mittels Düsen) gespreizt. Durch die pulsierende Bewegung des Flechtrings wird die Reibung während der Umlenkung verringert, sodass die Fäden weniger eingeschnürt und somit breiter abgelegt werden. Die anschließende Bearbeitung des Geflechts mit den Walzen und Düsen auf dem Kern steigert zusätzlich die Breite der Flechtfäden. Im Rahmen einer Parameterstudie fand eine Untersuchung der Stellgrößen am Prüfstand statt. Auf diese Weise ließ sich der Einfluss jeder Stellgröße auf das Spreizergebnis, auch unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit anderen Stellgrößen, darstellen. Mit diesen

Erkenntnissen wurde ein optimierter Prozessablauf aufgestellt, welcher für die Herstellung von Materialproben zur Charakterisierung der neuartigen Geflechtarchitekturen verwendet wurde. Der zu Beginn der Arbeit angestellte Vergleich zwischen den unterschiedlichen Geflechtarchitekturen in Abhängigkeit des Kerndurchmessers wurde nun durch die Geflechte mit den gespreizten Fäden ergänzt. Es ließ sich der Beweis erbringen, dass durch die Schließung der Lücken mittels der Spreizmechanismen die negative Beeinträchtigung der Festigkeit vermieden werden kann. Das anfänglich sehr enge Prozessfenster mit einem maximalen Verhältnis zwischen größtem und kleinstem Durchmesser von 1,33 konnte für das untersuchte Geflecht auf den Faktor 2,17 vergrößert werden. Der Kerndurchmesser bzw. -umfang lässt sich somit mehr als verdoppeln, ohne dass die Festigkeit abnimmt. Mehr noch, durch die Verringerung der Ondulation in dem gespreizten Geflecht, kann die Festigkeit sogar um bis zu 35 % gesteigert werden. Mit den Versuchen am Prüfstand konnte das flechtprozessintegrierte Spreizen sowohl als Prozess verstanden und optimiert werden als auch durch die Materialcharakterisierung einer Bewertung unterzogen und mit den Geflechtarchitekturen des herkömmlichen Flechtprozesses verglichen werden. Das entwickelte Verfahren wurde zur Patentierung eingereicht.

Der zweite Ansatz sieht eine weiterentwickelte Flechtanlagentechnik, die die Variation der Flechtfadenzahl erlaubt, vor. Durch das kontinuierliche Einbringen und Entnehmen von zusätzlichen Fäden, kann das Flächengewicht entlang einer Steigerung bzw. Verringerung des Kernumfangs konstant gehalten werden. Ein fadenanzahlvariabler Flechtprozess benötigt eine Flechtanlage mit zusätzlichen Flügelrädern, welche bei Bedarf zu- und abgeschaltet werden können und eine Fadenhandhabung, welche die Fadenenden während des Einbring- bzw. Entnahmeprozesses führt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fadenhandhabungsprozess entwickelt und patentiert, welcher es erlaubt Flechtfäden automatisiert und ohne Unterbrechung des Flechtvorgangs einzubringen und zu entnehmen. Durch den Einsatz von zwei Flechtlingen, welche den Flechtkegel aneinander übergeben können, kann die Fadenhandhabung die Fadenenden während des gesamten Prozesses führen. Mit der entwickelten Vorgehensweise kann die Fehlstelle, die auf Grund der Fadenenden im Geflecht entsteht, minimiert werden. Um den Funktionsnachweis liefern und die Geflechtarchitektur bewerten zu können, wurde der entwickelte Prozess mit einem Prüfstand abgebildet. An diesem konnte die Feinabstimmung der Parameter vorgenommen und das Geflecht charakterisiert werden. Die Materialcharakterisierung beschränkte sich auf die Untersuchung der lokalen Einbring- und Entnahmestellen, da das Geflecht global über eine konstante Geflechtarchitektur verfügt. Die Fehlstellen weisen bereits mit der im Rahmen des Prüfstands möglichen Prozessführung ein sehr geringes Ausmaß auf. Darüber hinaus konnten einige Maßnahmen abgeleitet werden, mit deren Berücksichtigung bei der Konzeptionierung einer Serienanlage die Fehlstellen auf ein für die mechanischen Kennwerte unbedenkliches Maß reduziert werden können. Um wie viele Fäden das Geflecht maximal erweitert werden kann, wird durch die Anzahl der zusätzlichen Flügelräder und der darauf positionierten

Klöppel vorgegeben. Somit gibt es für die maximal mögliche Umfangsvariation theoretisch keine Grenze, da eine Flechtanlage theoretisch um beliebig viele Flügelräder erweitert werden kann. Eine steigende Anzahl an zusätzlichen Flügelrädern führt jedoch zu einer zunehmenden, schlussendlich nicht mehr beherrschbaren Anlagenkomplexität. Praktisch wird daher für jeden Anwendungsfall zwischen Nutzen auf der einen und Anlagenkosten auf der anderen Seite abgewogen werden müssen. Die Variation der Fadenanzahl und somit des Durchmessers um den Faktor zwei stellt vermutlich einen guten Kompromiss zwischen diesen beiden Gegensätzen dar.

Beide Ansätze, also das *prozessintegrierte Spreizen* und die *Variation der Fadenanzahl*, verfolgen das gleiche Ziel und können daher alternativ oder ergänzend eingesetzt werden. Abbildung 7.1 zeigt die Bedeutung der beiden Anlagenkonzepte für das in Kapitel 3.1 diskutierte Prozessfenster nach Birkefeld [36]. Die von Birkefeld beschriebenen Grenzen können durch die vorgestellten Ansätze entlang der Pfeile verschoben und somit erweitert werden. Hieran zeigt sich das zentrale Ergebnis dieser Arbeit: das bei der Auslegung von Flechtbauteilen einschränkende Prozessfenster wird durch den Einsatz der neuen Anlagentechnik erheblich vergrößert.

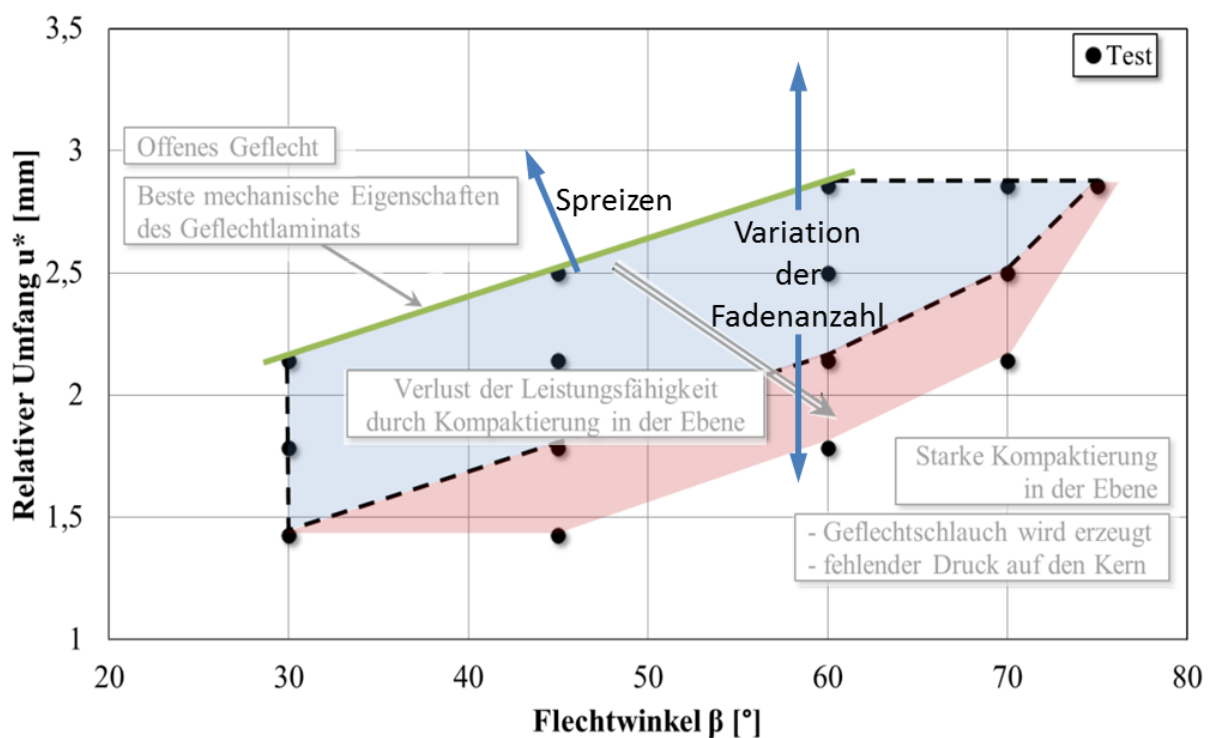


Abbildung 7.1: Erweiterung des Prozessfensters nach Birkefeld [36] durch die vorgestellten Anlagenkonzepte

Diese Arbeit schließt mit der vergleichenden Diskussion der beiden Konzepte. Dabei wurden die Lebenslaufkosten, alternative Einsatzmöglichkeiten der Prozesse und neuen Restriktionen, welche sich aus der Funktionsweise der zusätzlichen Anlagentechnik ergeben, beleuchtet. Die niedrigen Anschaffungskosten für ein Spreizaggregat lassen diesen Ansatz auch für kleine Stückzahlen rentabel erscheinen. Beide

Konzepte eignen sich auch für Anwendungen jenseits des Ermöglichens von großen Umfangsänderungen. Das Spreizen kann auch bei Bauteilen mit konstantem Durchmesser zur Flächengewichtsreduzierung der Geflechtlagen verwendet werden. Mit der Anlagentechnik zur Fadenanzahlvariation ließe sich auch ein Rüstkonzept für einen automatisierten Tausch leerer Klöppel umsetzen. Die Hauptrestriktion der beiden Konzepte ist der eingeschränkte Bauraum an der Flechtanlage. Beide Prüfstände befinden sich in der Nähe des Flechtpunktes, also dort, wo auch die Handhabung des Kerns stattfinden muss. Aufwendige Handhabungssysteme, welche die Herstellung von komplexen Geometrien erlauben, können je nach Ausführung den Bauraum für zusätzliche Anlagentechnik erheblich einschränken. Daher ist eine Kombination der beiden Verfahren ungünstig.

Die Übertragung der Prozesse von den für die Technikumsanlage des LCC entwickelten Prüfstände auf eine für die Serienproduktion geeignete Anlagentechnik stellt die verbleibende Herausforderung für die beiden Ansätze dar. Der Funktionsnachweis wurde jeweils erbracht und das Verbesserungspotential zum bestehenden Prozess nachgewiesen. Somit bleibt zu klären, wie sich die zusätzlichen Prozessschritte in die Fertigungsumgebung von Flechtvorformlingen einfügen lassen. Diese Frage muss für jede Anwendung neu geklärt werden und wird ein bestimmender Faktor bei der Entscheidung sein, ob und welches der beiden Konzepte Verwendung findet.

Anhang

A. Betreute Studienarbeiten

Bezeichnung	Autor	Titel der Arbeit
SA	Sebastian Herrmann	Anpassung des Bedeckungsgrades von umflochtenen Kernen mit variierendem Umfang
SA	Andre Scharnagl	Entwicklung von Konzepten zur Einbringung von lokalen Verstärkungslagen bei Flechtbauteilen
SA	Markus Klein (BMW Motorrad)	Entwicklung einer CFK Feder für die Hinterradführung eines Sportmotorrades
SA	Fabian Mautes	Analyse des Potenzials verschiedener Abbindungen im Flechtprozess
SA	Simon Lee	Analyse des Einflusses einer gespreizten Faserablage auf die mechanischen Kennwerte im Flechtprozess
SA	Daniel Neumann	Potenzialanalyse zur intrinsischen Steigerung der interlaminaeren Eigenschaften von Flechtbauteilen
BA	Quirin Havermann	Konstruktion und Erprobung eines pulsierenden Flechttrings
BA	Franziska Breuer	Untersuchungen und Automatisierungsansätze zur Variation der Fadenablagebreite im Flechtprozess
BA	Wolfgang Wölki	Untersuchungen und Automatisierungsansätze zur Variation der Fadenanzahl im Flechtprozess
BA	Michael Butzhammer	Parameterstudie an einer Spreizversuchsanlage
BA	Benedikt Klenk	Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstandes zur Herstellung von lokalen Verstärkungslagen im Flechtprozess
MA	Eva Krieger (BMW)	Untersuchung der Entfernbareit von Blasformkernen bei CFK Hohlprofilen
MA	Sebastian Herrmann (EADS IW)	Einflussuntersuchung des Ultraschall-Preform-Prozesses auf die mechanischen Eigenschaften von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen im Vergleich zu konventionellen Methoden

MA	Andreas Steinhauser	Entwicklung und Validierung eines Prozesses für das Flechten mit variabler Fadenanzahl
DA	Boris Werner (EADS IW)	Optimierung der Verarbeitbarkeit von vorkonfektionierten Trockenfaserbändchen als Substitut für Standardrovings

B. Versuchsplan zur Parameterstudie

Versuch	Walzen puls.	Luft	Düsen	Zylinder	Flechtring	Reihenfolge	Federn	Schäd
1	0	0	an	6	ja	Düsen 1.	350	1
2	0	0	aus	0	ja	Düsen 1.	350	0
3	24,2	5	an	6	ja	Düsen 1.	350	2
4	24,2	5	aus	0	ja	Düsen 1.	350	0
5	24,2	0	an	0	nein	Düsen 1.	350	2
6	24,2	0	aus	6	nein	Düsen 1.	350	0
7	0	5	an	0	nein	Düsen 1.	350	1
8	0	5	aus	6	nein	Düsen 1.	350	0
9	24,2	0	an	0	ja	Walzen 1.	350	2
10	24,2	0	aus	6	ja	Walzen 1.	350	0
11	0	5	an	0	ja	Walzen 1.	350	1
12	0	5	aus	6	ja	Walzen 1.	350	0
13	0	0	an	6	nein	Walzen 1.	350	2
14	0	0	aus	0	nein	Walzen 1.	350	2
15	24,2	5	an	6	nein	Walzen 1.	350	3
16	24,2	5	aus	0	nein	Walzen 1.	350	1
17	24,2	0	an	0	ja	Düsen 1.	600	1
18	24,2	0	aus	6	ja	Düsen 1.	600	1
19	0	5	an	0	ja	Düsen 1.	600	2
20	0	5	aus	6	ja	Düsen 1.	600	0
21	0	0	an	6	nein	Düsen 1.	600	3
22	0	0	aus	0	nein	Düsen 1.	600	0
23	24,2	5	an	6	nein	Düsen 1.	600	2
24	24,2	5	aus	0	nein	Düsen 1.	600	0
25	0	0	an	6	ja	Walzen 1.	600	2
26	0	0	aus	0	ja	Walzen 1.	600	0
27	24,2	5	an	6	ja	Walzen 1.	600	3
28	24,2	5	aus	0	ja	Walzen 1.	600	0
29	24,2	0	an	0	nein	Walzen 1.	600	2
30	24,2	0	aus	6	nein	Walzen 1.	600	0
31	0	5	an	0	nein	Walzen 1.	600	2
32	0	5	aus	6	nein	Walzen 1.	600	0

C. Faserdatenblatt 1



Certificate of Conformity

6 Orchard Court
 Binley Business Park
 Coventry, CV3 2TQ United Kingdom
 Phone No. +44 24 7644 7272
 Fax No. +44 24 7644 9565

Order No. 11819
Customer No. DEKUM1

Deliver To: SGL Kuempers GmbH & Co.
 Basillikastr. 22-30
 Attn Mr Ulrich Seegelken
 Rheine, DE 48429
 Germany

Certificate of Conformity: 15236
GI Reference: 11819
Certificate Date: 14/12/2009
Fibre Type: GRAFIL 34-700WD
 24,000 FILAMENTS
 CONTINUOUS TOW
Size: 1.4%A
Quantity in kg: 20.42

Customer Purchase Order		Item #	Specification			Salesperson	Customer Part #	
SS/IGB/US		347W2414A	CF-012 Rev. B			Grafil Europe		
Batch No.	Date of Manufacture	Quantity (kg)	Strength (GPa)	Modulus (GPa)	MUL (mg/m)	Fibre Density (g/cm3)	Size Content (% by Mass)	Elongation (%)
2631E	06/2007	20.42	5.01	233	1613	1.81	1.32	2.2

Shelf Life: 2 years from Date of Manufacture

Certified that the supplies/services detailed herein have been inspected and tested in accordance with the conditions and requirements of the contract or conform in all respects to the specification(s), drawings relevant thereto.

Signed: _____

For and on behalf of
 Grafil Inc.

D. Faserdatenblatt 2



MITSUBISHI RAYON CARBON FIBER & COMPOSITES

Carbon Fiber Division
6 Orchard Court
Binley Business Park
Coventry, CV3 2TQ United Kingdom
Phone No. +44 24 7644 7272
Fax No. +44 24 7644 9565

Deliver To: *Autosales*
Institute for Carbon Composites TU Munchen
Boltzmannstrasse 15
Garching Bie Munchen, 85748
GERMANY

Certificate of Conformity

Order No. 18982

Customer No. DEINS3

Certificate of Conformity: 20262

MRCFAC Reference: 18982

Certificate Date: 27/06/2014

Fibre Type: GRAFIL 34-700WD
24,000 FILAMENTS
CONTINUOUS TOW

Size: 1.4%A

Quantity in kg: 22.75

Customer Purchase Order		Item #	Specification			Salesperson	Customer Part #		
TMEEmail100614		347W2414A	CF-012Ver.1			MRCFAC			
Batch No.	Date of Manufacture	Quantity (kg)	Strength (GPa)	Modulus (GPa)	MUL (mg/m)	Fibre Density (g/cm3)	Size Content (% by Mass)	Elongation (%)	
3163F	04/2014	22.75	5.08	234	1616	1.79	1.33	2.2	

Shelf Life: 2 years from Date of Manufacture

Certified that the supplies/services detailed herein have been inspected and tested in accordance with the conditions and requirements of the contract or conform in all respects to the specification(s), drawings relevant thereto.

Signed: _____

For and on behalf of
Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.

Literaturverzeichnis

- [1] Kretzmann J. Zeit zum Abspecken! [December 22, 2014]; Available from: <http://www.autobild.de/artikel/fahrzeuggewicht-frueher-und-heute-1268731.html>.
- [2] Relligmann H. Unterrichtshilfen Textiltechnik Maschinengeflechte. Frankfurt Arbeitskreis Gesamttextil 1981.
- [3] Veit D, Wulfhorst B, Gries T. Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung. 2nd ed. München: Hanser, Carl; 2014.
- [4] Dauner M. Erarbeitung der Flechttechnologischen Grundlagen für eine Kreuzbandprothese. Dissertation. Aachen; 1999.
- [5] Douglass W. Braiding and Braiding Machinery. Eindhoven: Centrex Publishing Company; 1964.
- [6] Schneider M. Konstruktion von dreidimensionalen geflochtenen Verstärkungstextilien für Faserverbundwerkstoffe. Dissertation. Aachen; 2000.
- [7] Milwich M. Entwicklung eines neuen 3D-Flechtverfahrens zur Herstellung kraftflussoptimierter Faserverbundbauteile. Düsseldorf: VDI-Verlag; 1998.
- [8] Rosenbaum JU. Fertigung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen unter Einsatz der Flechttechnik. Köln: Verl. TÜV Rheinland; 1990 [erschienen] 1991.
- [9] Mitwalsky M. Entwicklung eine Umfaltmechanismus für geflochtene Spannen. Diplomarbeit. München; 2011.
- [10] Deutsches Institut für Normung. Textilien Grundbegriffe(60000). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1969.
- [11] Somboonsong W, Ko F, Harris H. Ductile Hybrid Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Bar for Concrete Structures: Design Methodology. ACI Materials Journal 1998(95):655–66.
- [12] Rapp F, Veihelmann B, Brand M. Braiding Towpreg to increase Production Efficiency. SEICO 2014-35th International Technical Conference & Forum 2014:214–21.
- [13] Hine P, Bonner M, Ward I, Swolfs Y, Mierzwa A. Hybrid Carbon Fibre/Nylon 12 Single Polymer Composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2014(65):19–26.
- [14] Laberge-Lebel L, Hoa S. Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites with Carbon/Nylon Commingled Fibers. Journal of Composite Materials 2007(Vol. 41):1101–21.

-
- [15] Hine P, Ward I, Swolfs Y, Verpoest I, Mitwalsky M. The HiVoComp Project: Carbon Fibre/PA12 Hybrid Single Polymer Composites. 19th International Conference on Composites Materials 2013.
- [16] von Reden T, Birkefeld K, Vigoureux A, Blanchard Y, Henkel F, Baumgart G. Development of an UD-Braided Longeron with Variable Cross Sections. SEICO 2012 - 33rd International Conference and Forum 2012:352–7.
- [17] Pak M. Implementation of a Matlab Program for Carbon and Glass Fibre Analysis. Semesterarbeit. München; 2014.
- [18] Filsinger J, Lorenz T, Stadler F, Utecht S. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mittels eines Injektionsverfahrens(WO 002001068353A1); 2001.
- [19] Schürmann H. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen. 2nd ed. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer; 2007.
- [20] Lee S. Analyse des Einflusses einer gespreizten Faserablage auf die mechanischen Kennwerte im Flechtprozess. Semesterarbeit. München; 2014.
- [21] Deutsches Institut für Normung. Bestimmung der Zugeigenschaften;83.120(DIN EN ISO 527-4). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1997.
- [22] Mautes F. Analyse des Potentials verschiedener Abbindungsarten im Flechtprozess. Semesterarbeit. München; 2013.
- [23] ASTM International. Standard Test Method for Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates(D 6641); 2001.
- [24] Deutsches Institut für Normung. Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken;83.120(14130). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1997. [June 26, 2014].
- [25] Verein Deutscher Ingenieure. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien;03.100.40(2222). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1997.
- [26] Verein Deutscher Ingenieure. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte(VDI 2221). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1993. [July 18, 2014].
- [27] Lindemann U. Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009.
- [28] Pahl G, Beitz W. Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung. 4th ed. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio: Springer; 1997.

-
- [29] Zwicky F. Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild: Mit Diagrammen. 2nd ed. Glarus: Baeschlin; 1989.
- [30] Verein Deutscher Ingenieure. Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; 03.100.40(2225). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1998.
- [31] Klein B. Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. 3rd ed. München: Oldenbourg; 2011.
- [32] Siebertz K, van Bebbber D, Hochkirchen T. Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE). Heidelberg [u.a.]: Springer; 2010.
- [33] Kleppmann W. Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 7th ed. München: Hanser; 2011.
- [34] Birkefeld K. Vom Werkstoff zum Materialkennwert - Mikro-/Makromodellierung von Composites; 2009.
- [35] Birkefeld K, Röder M, von Reden T, Bulat M, Drechsler K. Characterization of Biaxial and Triaxial Braids: Fiber Architecture and Mechanical Properties. *Appl Comp Mater* 2012(19):259–73.
- [36] Birkefeld. Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten. Dissertation. Stuttgart; 2013.
- [37] Cichosz J, Huber P, Hinterhölzl R. Off-axis testing of braided composites. *Composites week Texcomp* 2013.
- [38] Kilchert S, May M, Gnädiger F, Karcher M, Schöpfer J. Einfluss des Flechtwinkels auf die Werkstoffeigenschaften von triaxialen Geflechten. *Ta-gungsband Verbundwerkstoffe - 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde* 2013(2. Auflage):33–8.
- [39] Mitwalsky M, Lee S, Veihelmann B, Brand M, Ebel C, Drechsler K. Online Tow Spreading in the Braiding Process. *SEICO 2014-35th International Technical Conference & Forum* 2014.
- [40] Lomov S, Verpoest I, Peeters T, Roose D, Zako M. Nesting in Textile Laminates: Geometrical Modelling of the Laminate. *Compos. Sci. Technol.* 2003;Band 63(Nr. 7):993–1007.
- [41] Chen B, Chou T. Compactation of Woven-Fabric Preforms: nesting, multi-layer deformation. *Compos. Sci. Technol.* 2000;Band 60:2223–31.
- [42] Osada T, Nakai A, Hamada H. Initial fracture behavior of satin woven fabric composites. *Composite Structures* 2003;61(4):333–9.
- [43] Tsai SW. *Theory of composites design*. Dayton, Ohio: Think Composites; ©1992.

-
- [44] Knops M. Analysis of failure in fiber polymer laminates: The theory of Alfred Puck. Berlin, New York: Springer; 2008.
- [45] Lemaître J, Desmorat R. Engineering damage mechanics: Ductile, creep, fatigue and brittle failures. Berlin, New York: Springer; ©2005.
- [46] Nishikawa Y, Okubo K, Fujii T, Kawabe K. Fatigue Crack Constraint in Plain-Woven CFRP using Newley-Developed Spread Tows. *International Journal of Fatigue* 2006(28):1248–53.
- [47] Ehrenstein GW. Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. 2nd ed. München [u.a.]: Hanser; 2006.
- [48] Adams D, Hyer M. Effects of Layer Waviness on the Static Compression Strength of Thermoplastic Composite Laminates. *Journal of Reinforced Plastics Composites* 1993;12:414–29.
- [49] Adams D, Bell S. Compression Strength Reductions in Composites Laminates due to Multiple-Layer Waviness. *Composites Science and Technology* 1995;53:207–12.
- [50] Ogale A. Investigations of sewn preform characteristics and quality aspects for the manufacturing of fiber reinforced polymer composites. Dissertation. Kaiserslautern; 2006.
- [51] Meyer O. Kurzfaser-Preform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen. Dissertation. Stuttgart; 2008.
- [52] Steinhauser A. Entwicklung eines variablen Moduls zur Untersuchung der Einflussgrößen beim Aufspreizen von Kohlenstofffaserrovings mit Hilfe des Venturi-Effekts. Bachelorarbeit. München; 2012.
- [53] Miller J. Entwicklung eines variablen Moduls zur Untersuchung der Einflussgrößen beim pneumatischen Aufspreizen von Kohlenstofffaser Rovings. Semesterarbeit. München; 2012.
- [54] Kawabe K, Tomoda S. Multi-Filament Split-Yarn Sheet and Method and Device for the Manufacture thereof(US 6032342). [July 10, 2014].
- [55] Newell J, Puzianowski A. Development of a Pneumatic Spreading System for Kevlar-Based SiC-Precursor Carbon Fibre Tows. *High Performance Materials* 11 1999;1999:197–203.
- [56] Morii T, Shimaba M, Mogi M. Development of Fiber Tow Spreading System and its Application for Thin Fiber Reinforced Materials. *Proceedings 19th International Conference on Composite Materials* 2013:6069–76.
- [57] Kawabe K, Tomoda S, Matsuo T. A Pneumatic Process for Spreading Reinforcing Fiber Tow. *42nd International SAMPE Symposium*;1997:65–76.

-
- [58] Metzner C, Gessler A, Weimer C, Beier U, Middendorf P. Performance assessment on unidirectional braided CFRP. SAMPE Europe 2014;35th International Technical Conference & Forum:74–82.
- [59] Herrmann S. Anpassung des Bedeckungsgrades von umflochtenen Kernen mit variierendem Umfang. Semesterarbeit. München; 2012.
- [60] Geßler A. Flechtmaschine - Braiding machine has concentric inner and outer rings with axially-regulated oscillating action(DE10115953A1); 2001. [July 15, 2014].
- [61] Butzhammer M. Parameterstudie an einer Spreizversuchsanlage. Bachelorarbeit. München; 2014.
- [62] Bhote KR, Bhote AK. World class quality: Using design of experiments to make it happen. 2nd ed. New York: American Management Association; 2000.
- [63] Ingle S. In search of perfection: How to create/maintain/improve quality. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall; ©1985.
- [64] Erber A, Weng A, Drechsler K. Effect of Designed Yarn Damages on the Out-of-Plane Properties of Braided Composite Parts. Recent Advances in Textile Composites. TEXCOMP 10, DEStech Publications 2010:490–7.
- [65] Cherif C. Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Faserstoffe, Halbzeuge und Preforms: Technologie und Eigenschaften. 1st ed. Berlin: Springer Berlin; 2011.
- [66] Institut für Textiltechnik Aachen, RWTH Aachen. Bild 3d-Flechtanlage. [November 27, 2014]; Available from: http://www.ita.rwth-aachen.de/andere_sprachen/englisch/3-01-textilemachines.htm.
- [67] Steinhauser A. Entwicklung und Validierung eines Prozesses für das Flechten mit variabler Fadenanzahl. Masterarbeit. München; 2014.
- [68] Verein Deutscher Ingenieure. Wirtschaftliche Entscheidungen beim konstruieren - Methoden und Hilfsmittel(VDI 2235). Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH; 1982.
- [69] Verein Deutscher Ingenieure. Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur(VDI 2234). Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH; 1990.
- [70] Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U. Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung ; mit 143 Tabellen. 6th ed. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer; 2007.
- [71] Firma Festo. Luft in der Pneumatik. [January 20, 2015]; Available from: http://www.festo.com/wiki/de/Luft_in_der_Pneumatik.

-
- [72] Firma Baas Düsen. Windjet 727 Flachstrahldüsen. [January 20, 2015]; Available from: <http://www.baas-duesen.de/luft/inhalt/Faecherblasduesen.pdf>.
- [73] Tsai S, Sihm S, Kim R. Thin Ply Composites. Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2005;46th.
- [74] Sihm S, Kim R, Kawabe K, Tsai S. Experimental Studies of Thin-Ply Laminated Composites. Composites Science and Technology 2007;67:996–1008.
- [75] Amacher R, Cugnoni J, Botsis J. Thin Ply Composites: Experimental Characterization and Modeling. Proceedings 19th International Conference on Composite Materials 2013:4364–76.
- [76] Arteiro A, Catalanotti G, Xavier J, Camanho P. Notched Response of Non-Crimp Fabric Thin-Ply Laminates. Proceedings 19th International Conference on Composite Materials 2013:2281–9.
- [77] Filsinger J, Geßler A, Maidl F. Verfahren und Vorrichtung zum Ersetzen einer Spule durch eine Ersatzspule sowie entsprechende Flechtvorrichtung(DE102008052667B3); 2010. [January 20, 2015].
- [78] Geßler A, Mittmann S, Strachauer F. Flechtvorrichtung und Flechtverfahren zum Beflechten eines Flechtkerns(DE102008052670A1); 2010. [January 21, 2015].