

Technische Universität München
Lehrstuhl für Carbon Composites

**Erweiterung der Systemgrenzen der Flechttechnik
durch elektronisch gesteuerte Klöppel**

Tjark von Reden

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. Manfred Hajek

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Chokri Cherif,

Die Dissertation wurde am 12.03.2015 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 15.07.2015 angenommen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN 978-3-8439-2374-3

© Verlag Dr. Hut, München 2015
Sternstr. 18, 80538 München
Tel.: 089/66060798
www.dr.hut-verlag.de

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Autoren und ggf. Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucke, der Vervielfältigung und Verbreitung in besonderen Verfahren wie fotomechanischer Nachdruck, Fotokopie, Mikrokopie, elektronische Datenaufzeichnung einschließlich Speicherung und Übertragung auf weitere Datenträger sowie Übersetzung in andere Sprachen, behält sich der Autor vor.

1. Auflage 2015

Danksagung

Das Schreiben dieser Arbeit wurde mir durch verschiedene Menschen ermöglicht, denen ich gerne danken möchte. Zuerst gilt mein Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meiner Frau, die mich unterstützt haben und in einigen Urlauben, sowie vielen Wochenenden meine Schreibtätigkeit akzeptiert haben.

Auch Herrn Prof. Drechsler möchte ich danken, dass er mir die Arbeit ermöglicht hat, sowie Prof. Cherif für die Bewertung und Korrektur der Arbeit.

Mein Dank gilt natürlich auch den vielen Kollegen vom IFB der Universität Stuttgart, mit denen ich immer gerne zusammengearbeitet und viele spannende Diskussionen geführt habe. Nennen möchte ich insbesondere Patrick Böhler, Holger Ahlborn, Karin Birkefeld und Heike Ringwald.

Der Firma August Herzog Maschinenfabrik und besonders Herrn Schneider danke ich für die vielen offenen Gespräche und die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Übersicht

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Herstellung von Preform, insbesondere aus Kohlenstofffasern, mittels der Flechttechnik. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Umflechttechnik mittels Flügelradflechtern gelegt. Es wird eine umfassende Analyse der aktuell vorhandenen Maschinenteknik durchgeführt, um die Entwicklungen der letzten Jahre zu analysieren und Themen für eine Weiterentwicklung der Technik zu identifizieren. Einzelne Maßnahmen werden aufgegriffen und im Labormaßstab weiterentwickelt, um die Potenziale der Ideen bewerten zu können. Dies umfasst neben der Maschinenteknik auch Berechnungsmethoden für die Simulation des Flechtprozesses.

Nach einer Darstellung verschiedener Geflechtarten und Maschinentekniken zur Herstellung dieser, wird kurz auf die mechanischen Eigenschaften von Geflechten eingegangen. Schon hier wird die Bandbreite von Geflechten sichtbar und damit auch, dass eine differenzierte Bewertung je nach Geflecht und Anwendungsfall notwendig ist.

Umfangreicher wird auf die Randbedingungen des Flechtens eingegangen. Dies betrifft zum einen die mathematischen Zusammenhänge zwischen Geflecht, Flechtmaschine, Faser und Kern, aus denen globale Randbedingungen wie beispielsweise Faserwinkel oder Flächengewicht abgeleitet werden können. Daneben wird auch durch verschiedene Versuche ein Prozessfenster ermittelt, welches in erster Linie Faserwinkel, Ablagebreiten der Fasern, Ondulation insbesondere der Stehfäden und Kompaktierungsdruck bei der Herstellung betrifft.

Die Untersuchungen führen zu dem Ergebnis, dass ein elektronisch gesteuerter Klöppel ein hohes Entwicklungspotenzial für die Flechttechnik aufweist. In dieser Arbeit wurde analysiert, welche Eigenschaften ein solches System haben muss und wie eine Integration in die Maschine möglich ist. Anhand eines Prototyps wird die prinzipielle Umsetzung und Funktionsfähigkeit eines elektronisch gesteuerten Klöppels gezeigt.

Es wird deutlich, dass das volle Potenzial dieses Systems nur durch eine Prozesssimulation mit entsprechender Prozessoptimierung genutzt werden kann. Durch eine Analyse der vorhandenen Simulationsansätze wird deutlich, dass die aktuell genutzten Methoden und Verfahren noch nicht geeignet sind, um eine ausreichend genaue Simulation durchzuführen. FEM-Simulationen zeigen aber das Potenzial, auch wenn hier noch keine wirtschaftliche Lösung erreicht ist. Einige Ansätze zur Verbesserung der Prozesssimulation werden entwickelt und getestet.

Abstract

This work is concerned with the production of preforms, especially from carbon fibers, using the braiding technique. Emphasis is placed on the braiding technique by horn gear braidings. A comprehensive analysis of currently existing machine technology is carried out in order to analyse the developments of recent years and to identify issues for further development of the technology. Individual measures are taken up and developed further on a laboratory scale for the purpose of evaluating the potential of ideas. In addition to the mechanical engineering, this also includes calculation methods for the simulation of braiding processes.

After describing various types of braiding machines and techniques for the production of braids, the mechanical properties of braids will be outlined. This highlights the bandwidth of braids and hence the necessity of a differentiated evaluation depending on braid type and application.

The constraints of braiding are discussed in greater detail. This relates to the mathematical relationships between braid, braiding, and fiber core, from which global constraints - such as fiber angle or weight per unit area - can be derived. In addition, a process window is determined by various tests, which in particular relates to the fiber angle, the storage width of the fibers, the undulation especially of standing threads, and to the compaction pressure during production.

The studies lead to the conclusion that an electronically controlled carrier has high development potential for braiding. Both required properties of such a system and opportunities to integrate it into the machine have been analysed in this work. Using a prototype, the general implementation and functioning of an electronically controlled carrier is shown.

It has been demonstrated that the full potential of this system can only be exploited by means of a process simulation combined with an appropriate process optimisation. Through an analysis of existing simulation approaches, it is shown that currently used methods and procedures are not yet adequately developed to conduct a sufficiently accurate simulation. However, some FEM approaches show corresponding potential, although an economic solution has not been achieved yet. Furthermore, several approaches for the improvement of process simulation are being developed and tested.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Faserverstärkte Kunststoffe	3
2.1. Verbundwerkstoffe und deren Einsatzbereiche	3
2.2. Ausgangsstoffe von faserverstärkten Kunststoffen	5
2.2.1. Kohlenstofffaser	5
2.2.2. Glasfaser	6
2.2.3. Aramidfaser	6
2.2.4. Matrices	6
2.2.5. Eigenschaften in der Übersicht	7
2.3. Herstellungsverfahren	9
2.3.1. Handlaminieren	9
2.3.2. Prepreg	9
2.3.3. Infiltrations- und Injektionsverfahren	10
2.3.4. Legetechnik	11
2.3.5. Textiltechniken für faserverstärkte Kunststoffe	11
3. Geflechte und Flechtmaschinen	19
3.1. Bindungsarten	19
3.1.1. Leinwandbindung	19
3.1.2. Körperbindung	20
3.2. Geflechtarten	21
3.2.1. Biaxiales Geflecht	23
3.2.2. Triaxiales Geflecht	23
3.2.3. UD-Geflecht	24
3.2.4. 0°-Geflecht	25
3.2.5. 3D-Geflechte	25
3.3. Funktionsprinzipien von Flechtmaschinen	27
3.3.1. Der Klöppel	30
3.3.2. Maschinenrumpfprinzipien	35
3.3.3. Fadenverlauf in der Maschine	41
3.3.4. Effekte am Flechtring	45
3.3.5. Abzug von Geflechten	47
3.3.6. Integration der Flechtmaschine im Produktionsprozess	48
3.4. Geflochtene Faserverbundbauteile	48

3.5. Beurteilung der Techniken	49
3.6. Material-Kennwerte	51
3.6.1. Zug- und Druck-Eigenschaften	54
3.6.2. ILSS-Eigenschaften	56
3.6.3. CAI-Eigenschaften	57
3.6.4. Theoretische Vorhersage	58
4. Randbedingungen und Grenzen der Flechttechnik	61
4.1. Mathematische Zusammenhänge	61
4.1.1. Faserwinkel-Kernumfang-Ablagebreite	61
4.1.2. Maschinengeschwindigkeiten	63
4.1.3. Ablagemenge pro Klöppel	65
4.1.4. Faseranteile	66
4.1.5. Flächengewichte	67
4.1.6. Lagendicken	69
4.2. Kerngeometrien	71
4.2.1. Kernmaterial	71
4.2.2. Einfluss der Querschnittsprofile auf den Flechtprozess und die Faserorientierung	72
4.2.3. Längsquerschnitt	75
4.3. Maschinenbedingte Randbedingungen	78
4.3.1. Maschinendurchmesser	78
4.3.2. Besetzungsdauer	80
4.3.3. Besetzungsregeln	80
4.3.4. Spulenvolumen	82
4.3.5. Fadenzugkraft und Federn im Klöppel	83
4.4. Prozessfenster	83
4.4.1. Messreihen zur Ermittlung des Prozessfensters	83
4.4.2. Ondulation der Stehfäden	86
4.4.3. Anpressdruck des Geflechts an den Kern	89
4.4.4. Einfluss der Flechtfadenzugkraft	95
4.4.5. Ablagebreite der Flechtfäden und Lücken im Geflecht	97
4.4.6. Faserwinkel	101
4.4.7. Zusammenfassung	106
4.5. Grenzen der Flechttechnik	107
4.5.1. Systembedingte Grenzen	107
4.5.2. Maschinenbedingte Einschränkungen	109
4.5.3. Faserbedingte Einschränkungen	112
4.6. Zusammenfassung	112

5. Der elektronisch gesteuerte Klöppel	115
5.1. Ziele und Randbedingungen	115
5.1.1. Bevorratung des Flechtfadens	115
5.1.2. Abwickeln des Fadens	116
5.1.3. Einstellbare Fadenzugkräfte	117
5.1.4. Rückzug des Fadens	117
5.1.5. Begrenzung des Bauraums	118
5.1.6. Integration in eine bestehende Maschine	118
5.1.7. Variation und Überwachung der Fadenzugkraft	118
5.1.8. Verarbeitung von Bändchen	119
5.1.9. Vermeidung der Faserschädigung	119
5.2. Mechanischer Aufbau	120
5.3. Energieversorgung	126
5.4. Sensorik und Steuerung	131
5.4.1. Datentransfer	132
5.4.2. Sensoren	133
5.4.3. Steuerung	133
5.5. Erzeugte Fadenzugkraft des elektronisch gesteuerten Klöppels	134
5.5.1. Testaufbau zur Messung der Fadenzugkraft	134
5.5.2. Gemessene Zugkräfte beim mechanischen und dem elektronisch gesteuerten Klöppel	134
5.6. Integration in das Gesamtsystem	137
5.7. Mögliche Weiterentwicklung des elektronisch gesteuerten Klöppels	138
6. Simulation des Flechtprozesses	141
6.1. Veröffentlichte Ansätze zur Prozesssimulation	142
6.2. Aufbau der durchgeführten Simulation	148
6.3. Validierung des Simulationsansatzes	151
6.3.1. Simulationsaufbau	151
6.3.2. Ergebnisse	153
6.4. Erweiterung des aktuellen FE-Modells	159
6.4.1. Schalenelemente	159
6.4.2. Faserbündel	160
6.4.3. Kontaktbedingungen	161
6.5. Simulation von komplexen Geometrien mit und ohne variabler Fadenzugkraft	165
6.6. Zusammenfassung der Untersuchungen zur Geflechtprozesssimulation ..	169
7. Zusammenfassung und Ausblick	171
7.1. Zusammenfassung	171

7.2. Ausblick	172
A Formelherleitung	175
B Vergleichsdiagramme Versuch und Simulation	179
C Einfluss der Gravitation in der Simulation	191
D Literaturverzeichnis	193

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

CAI	Compression after Impact
CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DMS	Dehnmessstreifen
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Element-Methode
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
FVW	Faserverbundwerkstoffe
G_{1c}	Kennwert der Bruchzähigkeit
G_{2c}	Kennwert der Bruchzähigkeit
ILSS	Interlaminar Shear Strength
MAG	Multiaxialgelege
QS	Qualitätssicherung
RTM	Resin Transfer Moulding Process
UD	Unidirektional; alle Fasern sind parallel ausgerichtet
VARI	Vacuum Assited Resin injektion
VRML	Virtual Reality Modelling Language

Lateinische Buchstaben

A	mm^2	Querschnittsfläche
a	mm	allg. Länge
b	mm	Breite einer Komponente oder eines Fadens
D	mm	Durchmesser einer Komponente oder Maschine
F	N	Kraft
h	mm	Höhe einer Komponente oder Maschine; Wandstärke ode Dicke
l	mm	Länge; z. B. die Länge eines Fadens
M	g	Masse

N	-	Anzahl an Elementen
n	Hz	Drehzahl einer Komponente
P	W	Leistung
r	mm	Radius
Tt	tex	Garnfeinheit der Verwendeten Fasern
t	sec	Zeit
U	mm	Umfang einer Komponente oder Bauteils
v	mm/s	Geschwindigkeit einer Komponente

Griechische Buchstaben

α	$^{\circ}$	Flechtwinkel; Winkel zwischen Faserverlauf und Abzugsrichtung des Geflechts
β	$^{\circ}$	Ondulationswinkel der Flechtfäden
Γ	-	Gewichtsbezogener Anteil der Stehfäden bzw. Flechtfäden an der Gesamtfasermasse
γ	$^{\circ}$	allg. Winkel
ζ	$\frac{g}{m^2}$	Flächengewicht
P	-	Verhältnis von Radien
ϱ	$\frac{g}{cm^3}$	Dichte
Ψ	-	Volumenbezogener Anteil

Einheiten

cm	$10^{-2} m$	Zentimeter
g	$10^{-3} kg$	Gramm
GPa	$10^9 \frac{N}{m^2}$	Gigapascal
MPa	$10^6 \frac{N}{m^2}$	Megapascal
μm	$10^{-6} m$	Mikrometer
tex	$\frac{g}{10^3 m}$	Garnfeinheit

W	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^3}$	Watt
N	$\frac{m \cdot kg}{s^2}$	Kraft

Hoch- und tiefgestellte Zeichen

(:) _f	Kennzeichnung für Fasern
(:) _{ff}	Kennzeichnung für einen Flechtfadens
(:) _{ff-u}	Maß eines Flechtfadens in Richtung des Umfangs
(:) _{FM}	Kennzeichnung für eine Flechtmaschine
(:) _{FM-H}	Kennzeichnung für eine Horizontalflechtmaschine
(:) _{FM-R}	Kennzeichnung für eine Radialflechtmaschine
(:) _{Fp}	Kennzeichnung für den Flechtpunkt
(:) _{fr}	Kennzeichnung für ein Flügelrad
(:) _K	Kennzeichnung für einen Klöppel
(:) _k	Kennzeichnung für einen Kern
(:) _{MS}	Kennzeichnung des Motors für die Spindel
(:) _{TK}	Kennzeichnung freier Klöppel; Klöppel die nicht mit Spulen besetzt sind.
(:) _p	Kennzeichnung für ein Maß einer Preform
(:) _{S-fr}	Schritte eines Klöppels auf einem Flügelrad
(:) _{sf}	Kennzeichnung für Stehfäden
(:) _{Sp}	Kennzeichnung einer Spule
(:) _{St}	Kennzeichnung für den Stich einer Flechtmaschine
(:) _{el}	Kennzeichnung für eine Lage (Einzellage)
(:) _v	Kennzeichnung für die Verzahnung von Geflechtlagen
(:) _{Verl-Sp}	Kennzeichnung der Verlegung auf einer Spule

1. Einleitung

Das Streben nach Fortschritt und Weiterentwicklung, sowie ein immer weiterreichendes Verständnis von physikalischen und chemischen Zusammenhängen, treibt Ingenieure an, Konstruktionen und Maschinen zu verbessern oder ganz neu zu erfinden. Zumeist geht es nicht darum, die Verfahren oder Maschinen vollständig neu zu erfinden, sondern um Detailverbesserungen bestehender Prinzipien. Als Beispiel sei hier das Automobil angeführt. Auch heutige Fahrzeuge entsprechen von der Grundkonstruktion den ersten Fahrzeugen, dessen ungeachtet muss man nicht Experte sein, um die Weiterentwicklung in allen Bereichen zu erkennen.

Neben der Weiterentwicklung von Konstruktionsprinzipien ist jene der verwendeten Materialien zentral für die Verbesserung von Konstruktionen und Bauteilen. Häufig können auch sehr alte Ideen erst mit modernen Materialien realisiert werden. Insbesondere durch die Entwicklungen bei den metallischen Werkstoffen wurden viele Konstruktionen ermöglicht, die lange nicht realisierbar waren. Die meisten Stähle sind heute äußerst weit entwickelt, sodass größere Entwicklungsschritte schwieriger und seltener werden.

Demgegenüber wurde Anfang des 20. Jahrhunderts eine neue Werkstoffklasse entwickelt, die faserverstärkten Kunststoffe (FVK), welche nach Jahren der Pionierarbeit in wenigen Spezialbereichen gerade dabei sind, den Massenmarkt zu durchdringen. Insbesondere den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) wird ein deutliches Wachstum von 14 % bis 17 % in den nächsten Jahren vorausgesagt [1,2]. Ein Grund besteht vor allem in den z. T. sehr guten mechanischen Eigenschaften, die neue Konstruktionen zulassen sowie neue konstruktive Freiheiten im Bereich des Designs. Diese Kombination kann sogar in der Produktion zu Kostenreduktionen führen trotz der teureren Materialien.

Die aktuell intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beschränken sich allerdings nicht nur auf die Materialien selbst, sondern umfassen in großem Maße auch die Herstellungsverfahren, da sich diese deutlich von Produktionsprozessen für metallische Komponenten unterscheiden. Der Fokus liegt nicht nur auf neuen Verfahren, sondern auch auf etablierten aus anderen Industriezweigen. Dieser Ansatz von Innovationsentwicklung verspricht schnelle Fortschritte bei der Entwicklung, da viele Themen bereits untersucht wurden, jedoch zumeist unter anderen Gesichtspunkten.

Ein Industriebereich der nun auch für die FVK genutzt werden soll, ist die Textiltechnik. Einige Verfahren werden bereits eingesetzt, andere gerade auf ihre Eignung hin untersucht. Zu den textiltechnischen Verfahren, denen ein Potenzial für FVK

zugeschrieben wird, gehört die Flechttechnik. Erste Untersuchungen dazu gab es bereits Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts. Zu dieser Zeit wurden bereits die Potenziale aufgezeigt, allerdings waren weder die Maschinenteknik noch der Werkstoff selber schon weit genug entwickelt, um einen nennenswerten Marktdurchbruch zu erlangen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Entwicklungen in der Flechttechnik für FVK der letzten Jahre zu untersuchen und ihre aktuelle Eignung für den Einsatz in der Industrie aufzuzeigen. Dies inkludiert einerseits die Maschinenteknik, andererseits auch die Prozesssimulation, ohne welche weder in der Produktion noch in der Auslegung sämtliche Potenziale der Technik und des Werkstoffs genutzt werden können. Neben diesen Untersuchungen wird auch die grundlegende Neuentwicklung eines der zentralen Elemente der Flechtmaschine, des Klöppels, dargestellt und anhand eines Prototypen mit den aktuellen Lösungen verglichen.

2. Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverbundwerkstoffe (FVW) sind keine Erfindung heutiger Zeit, sondern werden von der Menschheit schon seit langem eingesetzt. Ein vollständiges Verständnis dieser Werkstoffe ist allerdings auch heute noch nicht vorhanden. Das liegt unter anderem an dem sehr großen Spektrum der FVW, von denen die faserverstärkten Kunststoffe nur einen Teil darstellen.

Im Folgenden soll ein Überblick über die verschiedenen Materialien für FVK, die Herstellungstechniken sowie die Einsatzspektren und Einschränkungen vermittelt werden.

2.1. Verbundwerkstoffe und deren Einsatzbereiche

Gemäß Brockhaus sind Verbundwerkstoffe: „Werkstoffe mit einer gezielt aufgebauten Struktur aus mindestens zwei verschiedenartigen, fest miteinander verbundenen Materialien (Composites). In Verbundwerkstoffen werden wesentliche Eigenschaften der einzelnen Komponenten vorteilhaft miteinander kombiniert und dem jeweiligen Verwendungszweck angepasst. Die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen ergeben sich additiv aus denen der Einzelwerkstoffe (Summeneigenschaften). Durch die Variation von Form, Größe und räumlicher Verteilung einer der Komponenten können Verbundwerkstoffe aber auch Eigenschaften aufweisen, die denen der einzelnen Werkstoffe überlegen sind (Struktureigenschaften).“ Bei faserverstärkten Werkstoffen ist ein Bestandteil immer eine Faser, die von mindestens einem weiteren Werkstoff umgeben wird. Dabei übernimmt die Faser häufig die Aufgabe, Kräfte zu übertragen. Daneben kann sie als Transportmedium von Stoffen oder Informationen dienen. Für beide Aufgaben sind Fasern besonders gut geeignet. Für den Transport ist es offensichtlich, da dieser meistens zielgerichtet zu einem Punkt erfolgen soll. Aber auch für das Übertragen von Kräften sind Fasern optimal geeignet, da diese „fester als Folien- oder Volumenwerkstoffe“ [3] sind. „Dies liegt an der hohen Orientierung der Moleküle in den Fasern und an der deutlichen Reduzierung von Werkstofffehlern“ [3]. Fasern können allerdings lediglich Zugkräfte in Längsrichtung aufnehmen. Aufgrund ihres sehr hohen Schlankheitsgrads (Verhältnis von Längsausdehnung zur Querausdehnung) sind sie ungeeignet Biegekräfte zu tragen. Dies führt dazu, dass Druckkräfte praktisch nicht übertragen werden, da die Fasern sofort verbiegen. Um Druckkräfte übertragen zu können, muss die Faser gestützt werden. Dies geschieht durch die Matrix, dem zweiten Material, welches sich um die Faser herum legt und diese mit anderen Fasern verbindet sowie stützt. Damit der

FVV Lasten übertragen kann, müssen sich Faser und Matrix fest miteinander verbinden. So kann die Matrix die Schubkräfte zwischen den Fasern übertragen.

Dem liegt der Gedanke zugrunde, dass für verschiedene Aufgaben das jeweils optimale Material verwendet wird. Dieses Prinzip ist in der Pflanzenwelt standard. Dort kommen faserverstärkte Werkstoffe vor allem in Bezug auf den Faserverlauf häufig in hoch optimierter Art und Weise vor [4]. Als Fasermaterial wird von vielen Pflanzen Cellulose (ein Glucosepolymer) eingesetzt. Die Fasern, welche dem Menschen als Basismaterial – z. B. für viele Garne oder Papier – dienen, sind in eine Matrix aus Lignin (eine räumlich vernetzte aromatische Verbindung), Pectin und Hemicellulose eingebunden [5]. Die Anteile differieren je nach Pflanzenart und Anforderung.

Auch der Mensch setzt schon lange faserverstärkte Werkstoffe ein. Als Beispiel sei der Lehmbau genannt. Lehm selber ist ein Verbundwerkstoff – bestehend aus Ton, Sand und Schluff [6], lässt sich zum einen sehr gut verarbeiten [7] und hat gute raumklimatische Eigenschaften. Um die strukturmechanischen und trocknungstechnischen Nachteile auszugleichen, wurde schon sehr früh dem Lehm Stroh oder Gras beigemischt [8]. Auf diese Weise wurde eine Rißbildung verhindert und der Lehm stabiler.

Bei diesem Verbund liegen die Fasern mehr oder weniger wirr in der Matrix. Eine derartige Wirrfaserverstärkung wird auch heute noch in anderen Verbunden eingesetzt. Die Ausnutzung der Faser ist hier aber eher gering, da je nach Belastung ein Großteil der Fasern nicht in Lastrichtung liegt und damit nicht ausgenutzt wird. Aktuell werden Wirrfasern häufig in Spritzgussmassen verwendet, direkt aufgesprüht oder als Vlies verarbeitet.

Optimal genutzt werden die Fasern im Verbund allerdings erst, wenn sie entlang der Krafrichtung orientiert sind [4] und eine ausreichende Länge erreichen, eine sog. Langfaserverstärkung. In Pflanzen erfolgt dies automatisch durch das Wachstum, welches stark beanspruchte Stellen weiter verstärkt. Dadurch werden häufig, wie schon erwähnt, optimale Faserarchitekturen erreicht. Der Mensch hat sich diese zunutze gemacht, indem er die natürlich entstandenen Faserverbundstrukturen in seine Konstruktionen eingebunden hat [9].

Ein gerichteter Einsatz von künstlichen Fasern erfolgte früh im Segelflugzeugbau. Hier kamen bereits in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts Glasfasern mit Epoxid Matrix zum Einsatz [10]. 1957 (Erstflug) wurde mit dem Phönix das erste Segelflugzeug entwickelt, welches vollständig aus FVK gebaut war [11]. Seitdem haben sich die FVK zuerst im Flugzeug- und Hubschrauberbau etabliert und finden inzwischen nicht nur als Wirrfaser auch im Automobil-, Zug-, Schifffahrts- und Maschinenbau ihren Einsatz. Grund hierfür sind die z. T. sehr guten mechanischen Eigenschaften der Fasern im Vergleich zu vielen isotropen Werkstoffen.

2.2. Ausgangsstoffe von faserverstärkten Kunststoffen

Aktuell werden für FVK insbesondere drei Faserarten eingesetzt: Kohlenstoff- (Carbon-), Glas- und Aramidfasern. Daneben gibt es noch verschiedene Naturfasern [12], die vor allem aufgrund Ihrer guten CO₂-Bilanz und Umweltverträglichkeit eingesetzt werden. Sie weisen allerdings zum einen nicht derartig gute Kennwerte wie die künstlichen Hochleistungsfasern auf, zum anderen schwanken die Eigenschaften relativ stark. Allerdings sind Naturfasern speziell in Bereichen, in denen keine Spitzenkennwerte benötigt werden, stark vertreten.

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die Vor- und Nachteile der Fasern gegeben werden. In Tabelle 1 sind die wichtigsten mechanischen Kennwerte aggregiert.

Faserart	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
Glasfaser Typ E	2,52 – 2,6	72 – 77	3400 – 3700	3,3 – 4,8
Glasfaser Typ R	2,5 – 2,53	83 – 87	4400 – 4750	4,1 – 5,4
Kohlenstofffaser IM	1,73 – 1,8	250 – 400	3400 – 5900	1,1 – 1,93
Kohlenstofffaser HTS	1,78 – 1,83	230 – 270	3900 – 7000	1,7 – 2,4
Aramidfaser Typ N	1,39 – 1,44	58 – 80	2760 – 3000	3,3 – 4,4
Aramidfaser Typ HM	1,45 – 1,47	120 – 135	2800 – 3620	1,9 – 2,9

Tabelle 1: Übersicht der mechanischen Eigenschaften von verschiedenen, häufig verwendeten Faserarten für FVK (nach [13])

2.2.1. Kohlenstofffaser

Kohlenstofffasern werden heute primär durch die Carbonisierung von Polyacrylnitril-Fasern (ein Kunststoff auf Rohölbasis) hergestellt. Das einzelne Filament hat typischerweise einen Durchmesser von 7 µm. Die Kohlenstofffaser zeigt eine sehr hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte. Ihre Festigkeit ist zumeist gut, bei einigen speziellen Fasern sehr gut. Überdies ist die Faser relativ unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen. Diese Eigenschaften sind dafür verantwortlich, dass die Kohlenstofffasern ein hohes Potenzial für den Leichtbau bieten. Nachteilig sind allerdings vor allem die Empfindlichkeit bei der Verarbeitung und der z. T. sehr hohe Preis. Kohlenstofffasern sind elektrisch leitend und weisen hier, wie auch bei allen anderen Kennwerten deutlich unterschiedliche Eigenschaften längs bzw. quer zur Faserrichtung auf. Von Relevanz ist zudem, dass es nicht die Kohlenstofffaser gibt, sondern eine Vielzahl mit z. T. deutlich unterschiedlichen Eigenschaften [13,14].

2.2.2. Glasfaser

Bei Glasfasern handelt es sich um Filamente geschmolzenen Glases mit einem Durchmesser von 10 μm bis 20 μm , je nach Glasart und Anwendung.

Auch Glasfasern gibt es in verschiedenen Arten mit z. T. unterschiedlichen Eigenschaften. Generell weisen Glasfasern eine gute Festigkeit auf, sind chemisch sehr stabil und damit auch unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen. Sie haben eine mittlere Dichte und sind preislich deutlich günstiger als andere Hochleistungsfasern. Aus den genannten Gründen werden Glasfasern oftmals verwendet und haben mit 95 % (gewichtsbezogen) [15] den größten Marktanteil bei den Fasern für FVK, obwohl ihre mechanischen Eigenschaften etwas schlechter sind als die von Kohlenstofffasern. Nachteilig sind ihre Empfindlichkeit bei der Verarbeitung und die zu meist nur mittleren mechanischen Eigenschaften [13,14].

2.2.3. Aramidfaser

Hierbei handelt es sich um aromatische Polyamide, langkettige Kunststofffasern mit einer geringen Dichte. Aramide weisen stark anisotrope mechanische Eigenschaften auf und werden in unterschiedlichen Typen hergestellt. Generell stehen hohen Zugfestigkeiten und -steifigkeiten deutlich geringere Druckkennwerte gegenüber. Im Gegensatz zu Kohlenstoff- und Glasfasern sind Aramide nicht spröde, sondern weisen ein duktileres Verhalten auf, sodass sie ein hohes Energieaufnahmevermögen haben und Lamine aus ihnen als schlagunempfindlich gelten. Verglichen mit Kohlenstofffasern kriechen Aramidfasern deutlich stärker und haben auch ein höheres Wasseraufnahmevermögen, was allerdings die Kennwerte kaum beeinflusst. Empfindlich sind die Fasern gegenüber UV-Strahlung, vor welcher sie in jedem Fall zu schützen sind [13,14].

2.2.4. Matrices

Neben der Faser spielt auch die Matrix eine wichtige Rolle. Es kommen sowohl duroplastische als auch thermoplastische Matrices zum Einsatz. Vor allem im Flugzeugbau überwiegen die duroplastischen Matrices aus Epoxid- oder Phenolharzen aufgrund ihrer besseren mechanischen Eigenschaften, der geringen Wasseraufnahme und dem besseren Brandverhalten. Daneben können die Systeme sehr niederviskos sein, was für Infiltrationsprozesse von Belang ist. Die genauen Eigenschaften des Harzsystems können von den Herstellern eingestellt werden. Dementsprechend sind sehr viele verschiedene Harze mit teilweise deutlich unterschiedlichen Eigenschaften existent (s. Tabelle 2).

Der Automobilbau setzt dagegen stärker auf thermoplastische Matrixsysteme. Der Grund sind die schnelleren Taktzeiten, die mit diesen Systemen erreicht werden können. Daneben sind Thermoplaste schweißbar und immer wieder lösbar. Problematisch ist allerdings das Wasseraufnahmevermögen der Thermoplaste und die Neigung zum Kriechen, also die langsame Verformung unter anhaltender Last.

Durch die fast beliebige Kombinationsmöglichkeiten von Fasern und Matrices zeigt sich allein hier schon die große Vielfalt der Verbundwerkstoffe. Es ist deshalb nicht möglich, von einem einheitlichen CFK-Kennwert zu sprechen.

Matrix	Dichte [g/cm³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
RTM 6	1,14	2,89	75	3,4
RIM 235	1,1 – 1,2	3,0 – 3,2	70 – 80	8 – 12
Biresin CR 120	1,15	3,4	76 – 77	3,8 – 4,0
PA 6.6	1,14	1,1 – 3,0	36 – 72	26 – 75
PEEK	1,3	3,8	80 – 90	16 – 80

Tabelle 2: Übersicht der mechanischen Eigenschaften von verschiedenen Matrixsystemen (Quellen: [13, 16 - 18])

2.2.5. Eigenschaften in der Übersicht

Die Tabellen 1 und 2 zeigen die Eigenschaften von Materialien, die für FVK eingesetzt werden. Im Verbund ergeben sich jedoch neue Eigenschaften, deren Vorhersage äußerst komplex ist. Im einfachsten Fall – die Fasern liegen in einzelnen Schichten vor, in den Schichten weisen die Fasern keine Welligkeiten (Ondulationen) auf und sind parallel orientiert – kann die einfache Laminattheorie verwendet werden. Diese liefert für den genannten Fall gute Ergebnisse. Im Fall komplexerer Faserarchitekturen steigt auch die Komplexität der Vorhersage von Steifigkeit und Festigkeit deutlich an. Hierzu gibt es ein breites Spektrum an Literatur. Die Vielfältigkeit der Verbundwerkstoffe lässt eine allgemeine Lösung nicht zu. Da sich sowohl die Herstellungsprozesse als auch die Simulationsansätze noch in der Entwicklung befinden, ist eine zufriedenstellende und durchgängige Simulation für FVW derzeit nur in Ansätzen verfügbar.

Trotzdem kann unter bestimmten Randbedingungen ein Vergleich von verschiedenen Materialien erfolgen. Bei eindeutigen Lastverläufen, am besten eindimensionalen Spannungszuständen, können unidirektionale (alle Fasern sind parallel zuein-

ander orientiert) FVK eingesetzt werden. Hier werden die Fasern optimal ausgenutzt. Für diesen Fall können Steifigkeit und Festigkeit von unterschiedlichen Materialien in einem x-y-Diagramm aufgetragen werden. Abb. 2.1 zeigt diese Werte für verschiedene Materialien volumenbezogen, in Abb. 2.2 sind die Werte gewichtsspezifisch dargestellt.

Anhand der Diagramme wird deutlich, dass FVW ein hohes Potenzial für den Leichtbau bieten. Aufgrund ihrer Eigenschaften können Strukturen deutlich leichter konstruiert und gebaut werden, als mit den aktuell verwendeten isotropen Werkstoffen. Diese Potenziale lassen sich allerdings nur dann vollständig ausnutzen, wenn es keine Bauraumbeschränkungen gibt, die in die Konstruktion eingreifen. Eine starke Bauraumbeschränkung oder gar die Vorgabe, möglichst kompakt zu bauen, sprechen häufig gegen FVW. Daneben gibt es für die Konstruktion mit FVW noch eine Reihe weiterer Randbedingungen, welche beachtet werden sollten [20]. An dieser Stelle sei nur ein weiterer Aspekt genannt. Beim klassischen Aufbau von Laminaten liegen die Fasern in einzelnen Schichten vor. Die Schichten werden nur über die Matrix miteinander verbunden. Dies führt dazu, dass sich die Schichten unter Schlagbelastungen leicht voneinander lösen können, eine Delamination, die schnell zu einem

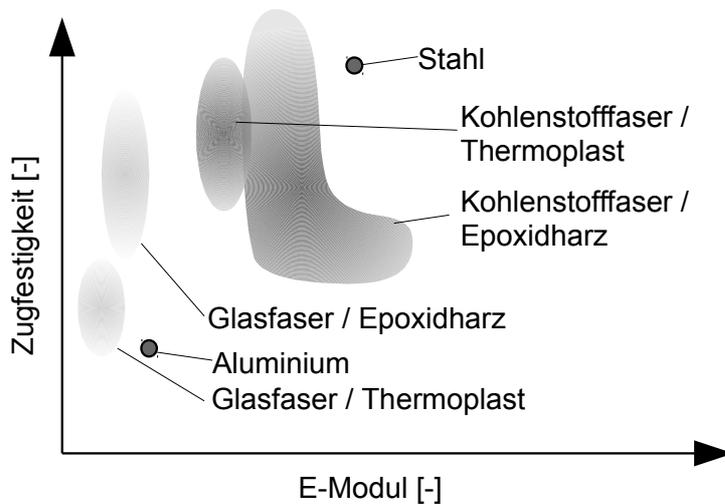


Abbildung 2.1: Steifigkeit und Festigkeit verschiedener Materialien (nach [19]). Bei den FVW wird ein unidirektionaler Aufbau angenommen. Die Werte sind normiert.

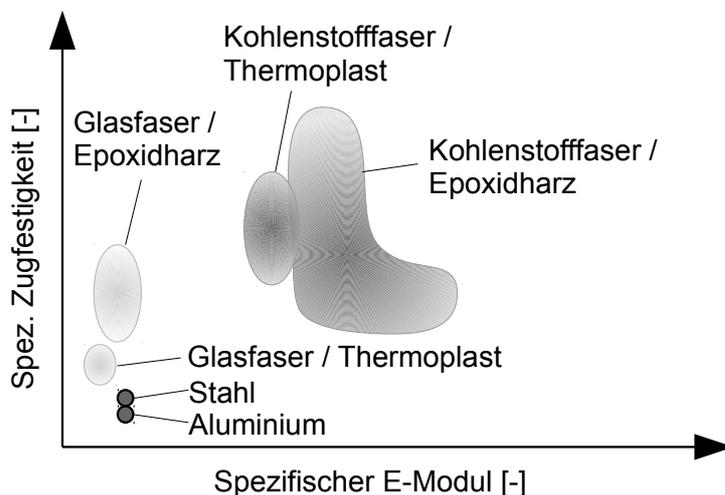


Abbildung 2.2: Gewichtsspezifische Steifigkeit und Festigkeit für verschiedene Werkstoffe (nach [19]). Bei den FVW wird ein unidirektionaler Aufbau angenommen. Die Werte sind normiert.

Versagen des Bauteils führen kann. Deshalb ist häufig nicht allein die statische Festigkeit eines Verbundmaterials wichtig, sondern auch die Schadenstoleranz. Wie später noch gezeigt wird, weisen Geflechte hier vergleichsweise gute Eigenschaften auf, während die statischen Eigenschaften von anderen Fertigungsverfahren übertroffen werden.

2.3. Herstellungsverfahren

Bei der Herstellung von FVW liegen die Fasern und die Matrix stets als separate Halbzeuge vor. Insofern muss die Matrix mit den Fasern verbunden werden. Ob dies vor oder nach der Positionierung der Fasern geschieht, hängt vom Verfahren und den Werkstoffen ab.

Bei Duromeren befindet sich die Matrix in einem noch nicht endgültig vernetzten Zustand. Diese chemische Reaktion erfolgt erst, wenn das Harz die Fasern umschlossen hat und diese in der gewünschten Orientierung platziert sind. Thermoplastische Matrices werden dagegen zumeist aufgeschmolzen und mit den Fasern verbunden.

Im Folgenden werden einige Verfahren mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben, um die Textilverfahren, zu denen auch das Flechten gehört, einordnen zu können.

2.3.1. Handlaminieren

Das Handlaminieren ist die ursprüngliche Art, FVK herzustellen. Hierbei werden die Fasern zumeist in Form von Geweben mittels einer Form positioniert, um dann mit einem Harz getränkt zu werden z. B. durch Aufstreichen mit dem Pinsel. Meistens geschieht dies schichtweise, wobei jede Faserlage einzeln getränkt wird. Um Luft einschließen und zu hohe Harzmengen zu vermeiden, bedarf das Handlaminieren einiger Erfahrung. Im industriellen Umfeld wird das Handlaminieren kaum noch eingesetzt.

Beim Handlaminieren werden die Fasern häufig erst in einem textilen Prozess zu einem Vorprodukt verarbeitet. Dieses wird in die gewünschte Form gebracht und erst in einem letzten Schritt mit dem Harz ummantelt.

2.3.2. Prepreg

Beim Einsatz von Prepreg ist der Weg umgekehrt. Hier werden die einzelnen Fasern oder auch Gewebhalbzeuge zuerst mit einem Harz getränkt. Um den Aushärtprozess zu verlangsamen, werden diese Halbzeuge im Allgemeinen eingefroren gelagert. Die Verarbeitung erfolgt dann entweder von Hand oder mittels Roboter in entsprechende Formen und einer anschließenden Aushärtung unter erhöhtem Druck und Temperatur. Die Vorteile des Prepregsystems sind eine sehr genaue Dosierung

des Harzanteils und die Möglichkeit des Einsatzes von Harzen mit sehr guten mechanischen Eigenschaften, welche oft sehr zähflüssig sind, weshalb sie bei anderen Verfahren keine ausreichende Tränkung der Fasern garantieren. So werden mit Prepregsystemen aktuell immer noch die besten mechanischen Kennwerte erreicht. Allerdings ist das Verfahren relativ zeit- und kostenintensiv [21]. Auch können verfahrensbedingt keine hoch reaktiven Harze verwendet werden, welche die Prozesszeiten deutlich verkürzen würden.

2.3.3. Infiltrations- und Injektionsverfahren

Zu Infiltrations- und Injektionsverfahren gehörten Prozesse wie VARI (vacuum assisted resin Injection) mit seinen Variationen [22], sowie der RTM-Prozess (Resin Transfer Moulding Process) [23], ebenfalls mit einigen Variationen. All diesen Prozessen ist gemein, dass zuerst das Bauteil allein aus den Fasern aufgebaut wird. Es entsteht eine Faserstruktur, die sogenannte Preform, in der alle Fasern bereits so angeordnet und orientiert sind, wie im späteren Bauteil. Erst wenn dieser Aufbau vollendet ist, wird die Matrix zugeführt.

Die vakuumbasierten Verfahren arbeiten dabei meist mit einer einseitigen Form, welche die Preform geometrisch fixiert, und einer Folie, welche die Preform luftdicht abschließt. Über ein Vakuum wird die Preform kompaktiert und die Matrix in die Preform gesaugt. Anschließend wird über das Vakuum der Faservolumengehalt eingestellt. Hierbei kann mit max. 1 bar Differenzdruck gearbeitet werden.

Die RTM-Prozesse arbeiten dagegen mit mindestens zwei Formhälften, welche die Preform vollständig einschließen und kompaktieren. Die Matrix wird anschließend mit Überdruck in die Preform gedrückt. Die Differenzdrücke können hier deutlich höher sein, wodurch höhere Fließgeschwindigkeiten erreicht und die Prozesszeiten verringert werden.

Ein Vorteil der Infiltrations- und Injektionsverfahren besteht darin, dass Prozesse der Faserablage und der Matrixeinbringung getrennt ablaufen und in eine sinnvolle Reihenfolge gebracht werden. Bei den Prepreg-Verfahren steht die Matrixeinbringung am Anfang. Der Prozess der Aushärtung des Harzes wird für die Faserverarbeitung mittels Tiefkühlen gestoppt und am Ende der Herstellung im Autoklaven beendet. Die Trennung dieser Prozesse erweitert die Möglichkeiten der Faserverarbeitung. So können die trockenen Fasern mit verschiedenen textiltechnischen Prozessen verarbeitet werden (siehe folgender Abschnitt). Die Nachteile bestehen hingegen in der Beschränkung auf niederviskose Matrixsysteme und die Gefahr, dass es Bereiche gibt, die nicht mit Harz getränkt werden.

2.3.4. Legetechnik

Es gibt automatisierte Legeverfahren für verschiedene Halbzeuge, wie Prepreg, Rovings mit Binder oder Roving mit einer thermoplastischen Matrix. Im Folgenden soll nur auf Verfahren für letztere eingegangen werden. Der Prozessablauf ist ähnlich dem des Prepregverfahrens. Die Faser wird in einem ersten Schritt mit der Matrix, in diesem Fall dem Thermoplast versetzt. Diese, als Bändchen bezeichneten, Halbzeuge werden von Legeköpfen, geführt von Roboteranlagen, auf oder in eine Form gelegt. Dazu wird die Matrix kurz aufgeschmolzen und so mit dem Untergrund bzw. bereits abgelegter Schichten verklebt. Je nach Prozess erfolgt nach der Ablage aller Fasern noch eine endgültige Konsolidierung.

Während bei Prepreg die vorgezogene Benetzung der Fasern mit der Matrix einige Nachteile aufweist, treten diese bei Thermoplasten nicht auf, da der Erstarungsprozess reversibel ist. Bei den meisten Thermoplasten ist eine Benetzung der einzelnen Rovings sogar zwingend notwendig, da eine Infusion aufgrund der hohen Viskosität nicht und eine Injektion nur bedingt möglich ist.

Die zuvor genannten Verfahren, welche nicht sämtliche Möglichkeiten zur Herstellung von FVK wiedergeben, zeigen, wie unterschiedlich die Prozesse und Wege sein können. Für einen Einsatz in der Industrie sind vor allem die Herstellungskosten, die Produktionszeiten und die Reproduzierbarkeit von signifikanter Bedeutung. Dies führt zu automatisierten und hoch produktiven Prozessen, wie bspw. einige Textiltechniken.

2.3.5. Textiltechniken für faserverstärkte Kunststoffe

Die Textiltechnik gehört zu den ältesten Technikbereichen der Menschheit [24]. Seit jeher beschäftigte sich die Textilindustrie nicht nur mit der Herstellung von z. B. Stoffen, Kordeln oder Spitzen für die Bekleidung und dem Schmücken von Personen oder Einrichtungsgegenständen, sondern auch mit technischen Textilien, welche dem Arbeitseinsatz dienen. Das einfachste Beispiel hierfür sind Seile, die entweder direkt eingesetzt oder bspw. zu Netzen weiter verarbeitet wurden.

Auch heute stellt die Textilindustrie global, aber auch in Deutschland einen wichtigen Markt dar [3]. Deutschland ist mit einem Marktanteil von 35 % beim Textilmaschinenbau weltweit führend.

Aufgrund der einerseits sehr langen Geschichte und andererseits großen gesellschaftlichen Bedeutung ist die Textiltechnik heute weit entwickelt und gilt als hochproduktiv, bei gleichzeitig weitgehender Automatisierung. Diese beiden Aspekte und die Tatsache, dass bei FVK wie auch in der Textiltechnik Fasern verarbeitet werden, führen dazu, dass textiltechnischen Prozessen ein hohes Potenzial für die FVK zugesprochen wird [25]. Einige Prozesse konnten sich äußerst schnell etablieren, andere konnten sich dagegen nicht oder noch nicht durchsetzen.

Im Folgenden werden kurz Textiltechniken vorgestellt, die Halbzeuge oder direkt eine Preform produzieren. Prozesse zur Garnherstellung werden nicht weiter betrachtet. Die Zusammenstellung beschränkt sich auf Prozesse, die aktuell verwendet werden. Während einige Verfahren sich gegenseitig Konkurrenz machen, ergänzen sich die meisten dagegen bzw. zielen auf ganz unterschiedliche Produkte ab.

Gewebe

Gewebe stellen im Bereich der Textiltechnik das Produkt mit dem größten Marktanteil dar. Auch im Bereich der Faserverbundtechnik sind Gewebe zusammen mit den Gelegen das meist verwendete Halbzeug. Gewebe bestehen aus zwei senkrecht zueinander orientierten Fasersystemen, die miteinander verkreuzt werden. Je nach Aufbau unterscheidet man drei grundlegende Bindungsarten: Leinwand-, Köper- und Atlasbindung (s. auch Abschnitt 3.1). Eine Leinwandbindung, bei der jeder Faden immer abwechselnd über und unter den quer verlaufenden Fäden geführt wird, ist die in sich stabilste Gewebeform. Ein Verschieben der Fasern ist kaum möglich, wodurch die Handhabung äußert unproblematisch ist. Allerdings sind die mechanischen Eigenschaften schlechter als bei den anderen Bindungsarten. Bei einer Atlasbindung weisen die Fäden deutlich weniger Bindungspunkte auf. Die Ondulation der einzelnen Fäden ist dadurch reduziert. Dies führt zu besseren mechanischen Eigenschaften. Auch weist diese Bindungsart ein deutlich besseres Drapierverhalten auf, da sich die Fasern leichter gegeneinander verschieben lassen. Dies erfordert aber auch einen erheblich vorsichtigeren Umgang, um ungewollte Verschiebungen zu vermeiden.

Da Gewebe flächige Halbzeuge sind, werden aus ihnen primär flächige Strukturen aufgebaut. Zu beachten ist dabei, dass das Gewebe in seiner Standardform immer zwei Faserrichtungen liefert, die senkrecht zueinander stehen und das demnach ein rechteckiges Halbzeug ist. Dies kann je nach Bauteil zu einer hohen Verschnittquote führen, die gerade bei den teuren Kohlenstofffasern unerwünscht ist. Im Sichtbereich wird gerne ein Gewebe aus 1k oder 3k Fasern verwendet, da dies die typische Carbonoptik ergibt.

Neben den klassischen Geweben gibt es noch weitere Gewebearten, wie 3D-Gewebe und Spiralgewebe. Beide Arten werden auch für FVW verwendet, spielen aber eine untergeordnete Rolle.

Gelege

Bei Gelegen werden bis zu sieben Lagen von parallel verlaufenden Fasern übereinandergelegt und miteinander verwirkt. Dabei lassen sich verschiedene Faserorientierungen einstellen. Neben 0° und 90° sind beliebige Winkel zwischen etwa 25° und etwa 65° möglich. Damit bilden Gelege ebenso wie Gewebe ein flächiges Halbzeug

und stehen in direkter Konkurrenz zu diesen. Sie weisen eine Reihe von Vorteilen gegenüber Geweben auf. Durch die fehlende Ondulation der einzelnen Fasern können ihre Eigenschaften besser genutzt werden und es werden bessere mechanische Kennwerte erreicht. Daneben lassen sich verschiedene Faserorientierungen einstellen, wodurch die Gelege besser an die Bedürfnisse des Bauteils angepasst werden können. Über die Wirkart können zudem die Drapiereigenschaften beeinflusst werden. Ein Nachteil ist allerdings der Wirkfaden, welcher im Bauteil einen Fremdkörper darstellt. Er kann leichte Ondulationen verursachen und beim Einbringen können die Verstärkungsfasern durch die Nadeln verletzt werden. Daneben ist die optische Wirkung von Gelegen nicht so gut wie bei Geweben, weshalb sie in Breitensportartikeln selten eingesetzt werden.

Maschenwaren

Zu den Maschenwaren gehören z. B. Gewirke und Gesticke. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass die Fäden mittels Maschen miteinander verbunden werden. Durch die Maschen entsteht ein flächiges Gebilde, welches je nach Setup ganz verschiedene Formen annehmen kann. Durch die Maschenbildung haben Maschenwaren ganz andere Eigenschaften als z. B. Gelege oder Gewebe. Die einzelnen Fäden liegen nicht gestreckt vor, sondern in gewundenen Bahnen. Auf diese Weise wird eine hohe Elastizität des Halbzeugs erreicht, ohne dass der Faden eine hohe Elastizität aufweisen muss.

Für FVK kann dies von Nutzen sein, wenn zur Herstellung von Halbzeug sehr hohe Umformgrade gefordert werden. In den meisten Fällen wird allerdings eine hohe Steifigkeit bzw. Festigkeit erwartet, wofür eine gestreckte Faser benötigt wird. Aus diesem Grund haben sich Maschenwaren, abgesehen von speziellen Anwendungen, bis jetzt nicht durchgesetzt.

Gesticke

Beim Sticken wird ein Faden mittels eines Führungselements auf einen Untergrund, z. B. einen Stoff oder eine Folie abgelegt und auf dem Untergrund durch einen Zickzack-Stich, der jeweils rechts und links neben dem Faden einsticht, festgenäht. Für den Einsatz für Faserverbundstrukturen wird der entsprechende Verstärkungsfaden durch ein deutlich dünneres Garn fixiert.

Der Produktionsprozess ist weitestgehend automatisiert. Da allerdings immer nur ein Verstärkungsfaden verarbeitet wird, ist die Produktivität relativ gering. Um dies auszugleichen, werden sog. Multikopfmaschinen eingesetzt, die an einer Vielzahl von Stellen das gleiche Produkt erzeugen. Hierdurch steigt die Produktivität, für größere Bauteile ist sie aber immer noch zu gering.

Der größte Vorteil der Technik ist die frei einstellbare Faserorientierung. Hierdurch können optimale Faserarchitekturen erstellt werden. Das Potenzial wurde in einigen Untersuchungen und an einigen Bauteilen gezeigt. Daneben gibt es sehr wenig Faserverschnitt, da nur die notwendige Menge Faden abgelegt wird. Es ist allerdings immer zu beachten, dass eine ebene Preform erzeugt wird, die bei Bedarf in einem separaten Schritt in eine 3D-Form gebracht werden muss. Für kleine Bauteile oder auch lokale Verstärkungen hat sich die Technik etabliert.

Nähverfahren

Bei den verschiedenen Nähverfahren handelt es sich nicht um ein Halbzeug oder Preform erzeugendes Verfahren, sondern um eine Textiltechnik, die diese weiter verarbeitet oder verändert. Es muss prinzipiell zwischen dem konfektionellen und strukturellen Nähen unterschieden werden.

Beim konfektionellen Nähen werden Halbzeuge oder Subpreformen zusammengenäht, um beim Weiterverarbeiten ein Verschieben zu verhindern. So werden z. B. mehrere Gelege oder Gewebelagen mit geringer Überlappung vernäht, um eine insgesamt breitere Bahn zu erhalten. In diesen Fällen hat das Nähen nur eine Funktion im Produktionsprozess. Im Bauteil spielt die Naht jedoch keine Rolle. Der Faden ist, wie bei Gelegen oder Gesticken, ein überflüssiger Fremdkörper.

Beim strukturellen Nähen dagegen wird als Nähfaden ein Verstärkungsfaden verwendet, welcher im Bauteil Lasten tragen soll. Hier wird ausgenutzt, dass beim Nähen Fasern senkrecht zum zu vernähenden Gut eingebracht werden. Bei allen flächigen Halbzeugen liegen die Fasern in einer Ebene. Diese kann zwar dreidimensional gekrümmt sein, aber wenn mehrere Lagen eines flächigen Halbzeugs übereinandergelegt werden, sind keine Fasern vorhanden, die von einer Ebene in die andere laufen. Der Nähfaden erzeugt genau diese Fasern, die z. B. wichtig sind, um Delaminationen zu verhindern. Für strukturelle Nähte kommt häufig das Tufting-Verfahren zum Einsatz, bei dem ein Faden einfach durch die Preform gestochen wird und auf der Rückseite eine Schlaufe bildet, die erst durch die Matrix fixiert wird, und dann Lasten tragen kann.

Für FVW werden neben dem Tufting verschiedene weitere Nähverfahren eingesetzt, die vom klassischen Verfahren abweichen. Hier sind insbesondere die Einseitnähverfahren zu nennen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass ein Nähkopf verwendet wird, der eine Zugänglichkeit von nur einer Seite benötigt. Bei einigen Verfahren (zwei Nadelsysteme) muss auf der Rückseite allerdings ein Luftspalt sein. Beim Bogennadelverfahren muss die Nadel nicht vollständig das Nähgut durchdringen, so dass auf der Rückseite auch eine feste Form oder Unterlage vorliegen kann.

Die verschiedenen Nähverfahren werden aktuell nur vereinzelt eingesetzt.

Wickeln

Eine weitere Technik, die hier erwähnt werden soll, obwohl es sich nicht um ein textiltechnisches Verfahren handelt, ist das Wickeln. Das Wickeln steht zum einen in Konkurrenz zum Flechten zum anderen in Ergänzung zu den zuvor aufgeführten Produktionsverfahren. Beim Wickeln wird eine als Kern oder Dorn bezeichnete rotationssymmetrische Form um ihre Längsachse gedreht. Dabei werden ein oder mehrere Verstärkungsfasern auf den Kern gewickelt. Durch eine Bewegung der Fasern entlang des Kerns wird die Orientierung der Fasern eingestellt. Im Allgemeinen werden die Verstärkungsfasern vorher durch ein Harzbad gezogen und so die Matrix eingebracht. Beim Wickeln mit thermoplastischer Matrix werden die Fasern kurz vor dem Ablegen auf den Kern bis zum Schmelzpunkt der Matrix erhitzt.

Die Faserorientierung kann relativ frei eingestellt werden. Mithilfe von Pins an den Enden des Kerns können auch Fasern parallel zur Längsachse abgelegt werden. Prinzipiell verläuft ein Faden immer auf der geodätischen Linie. Er kann nur soweit von dieser abweichen, wie es die Reibung zwischen Faden und Untergrund zulässt.

Während die Faserorientierung frei einstellbar ist, gibt es bei den Kernen relativ starke Einschränkungen. Abweichungen von der Rotationssymmetrie sind nur bedingt möglich, konkave Oberflächen können nicht abgebildet werden. Wenn der Kern nicht im Bauteil verbleiben soll oder darf, muss er herausziehbar sein, darf also keine Hinterschnidungen aufweisen. Gekrümmte Mittellinien sind nicht möglich.

Aufgrund des Verfahrens steht das Wickeln kaum in Konkurrenz zu den oben genannten Verfahren, da es eine andere geometrische Bauteilklasse anspricht.

Das Wickeln wurde bereits in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt und weist insofern heute einen hohen Entwicklungsstand auf. Wickelmaschinen laufen größtenteils voll automatisiert mit einer großen Zuverlässigkeit. Durch die Einschränkungen bezüglich der Kerngeometrien kommt die Technik jedoch lediglich für bestimmte Anwendungen in Frage, für die sie aber meistens eine sehr gute Lösung darstellt.

Flechten

Das Flechten ist vermutlich die älteste Textiltechnik [24] und gehört so zu den ältesten Produktionstechniken, welche von der Menschheit entwickelt wurden. Geflechte waren schon vor den Webtechniken, bereits vor mehr als 6.000 Jahren etabliert, allerdings nicht im Sinne der Seilflechtereie, sondern für das Verflechten von dünnen Hölzern zu Schutzzäunen, Körben und vielem mehr. Die Verarbeitung von flexiblen Ästen und Fasern, wie Weiden, Bambus oder Rattan zu Körben und anderen Gebrauchsgegenständen wird auch heute noch als Korbflechtereie durchgeführt, meist in Handarbeit.

Bezüglich der Faserstruktur entsprechen diese Geflechte eher Geweben, da hier die Orientierung der verflochtenen Materialien 0° und 90° aufweist. Dass trotzdem von Geflechtem gesprochen wird, ist historisch bedingt. Ursprünglich wurden die Verfahren nicht aufgrund der Faserarchitektur klassifiziert, sondern aufgrund des Herstellungsprozesses. Gewebe zeichneten sich dabei dadurch aus, dass auch bei der händischen Herstellung viele oder alle Fäden eines Systems gleichzeitig bewegt wurden. Beim Flechten erfolgte dagegen nur das Verflechten eines Fadens mit einem anderen. Spätestens mit der Automatisierung der Prozesse ist diese Differenzierung nicht mehr möglich und so wird heute primär nach der Faserstruktur klassifiziert, aber trotzdem noch vom Korbflechten gesprochen.

Neben der Verarbeitung von dünnen Zweigen oder Wurzeln wurden auch schon früh Fasern aus Baumrinden verflochten. Diese Art der Flechterei wurde weiter entwickelt und führte mit der Verwendung von längeren und weicheren Fasern zur Weberei.

Daneben hat sich auch die Flechterei im Sinne der Seil- und Litzengeflechte entwickelt. Dabei handelte es sich zuerst um reine Handgeflechte, d. h. es wurden keine weiteren Hilfsmittel verwendet als die Hände, um die Fäden zu verarbeiten. In dieser Form ist die Flechterei allerdings sehr eingeschränkt. Im asiatischen Raum wurden deshalb Hilfsmittel entwickelt, die komplexere und längere Geflechte erlauben. Diese Flechttechnik wurde Ende des 19. Jahrhunderts automatisiert und dient auch heute noch der Seil- und Litzenflechterei (s. Abs. 3.3).

Es werden Seile vom Millimeterbereich, wie Angelsehnen, bis hin zu Tauen die viele Zentimeter stark sind, wie Seile die Ölplattformen am Meeresgrund fixieren, geflochten. Daneben gibt es den Bereich der Litzenflechterei, der sowohl technische Produkte als auch Verzierungen von Kleidungsstücken umfasst [26].

Die Produktivität und die weitgehende Automatisierung des Flechtprozesses führte dazu, dass diese Textiltechnik auch für den Einsatz im Faserverbundbereich untersucht wurde. Hier sind vor allem die Arbeiten an der RWTH Aachen zu nennen [27]. Die Flechttechnik eignet sich, wie auch die Wickeltechnik, für profilförmige Strukturen. Die Einschränkungen bezüglich der Kerngeometrien sind allerdings deutlich geringer. So können gekrümmte Profile produziert werden, die nicht rotationssymmetrisch sein müssen. Daneben wird beim Flechten eine sehr große Anzahl an Fäden gleichzeitig verarbeitet, wodurch die Produktivität gesteigert wird.

Von Nachteil im Flechtprozess sind die systembedingten Reibungspunkte zwischen den Fasern, die zu einer merklichen Faserschädigung führen. Neben dieser Faserschädigung weisen Geflechte aufgrund der Ondulation der Fäden, reduzierte mechanische Eigenschaften auf. Konkave Oberflächen lassen sich nicht ohne Weiteres herstellen. Die genannten Vor- und Nachteile der Flechttechnik werden im folgenden Kapitel vertieft.

Der Einsatz von Geflechtem ist aktuell noch auf geringem Niveau. Neben Geflechtschläuchen die als Halbzeug gekauft werden können, gibt es ebenfalls als Halbzeug 3D-geflechtene Zwickelfüller. Nachfolgend werden einige Beispiele für geflechtene Faserverbundbauteile aufgeführt:

- Rotorblätter für Propellerflugzeuge: Diese werden nicht ausschließlich geflochten, sondern es werden auch UD-Materialien und MAG verarbeitet.
- BMW Stoßfängerträger (Abb. 2.3): In dem BMW M5 wurden von 2007 bis 2013 die Stoßfängerträger als geflechtene Struktur eingesetzt.
- Verstärkung Dachrahmen (Abb. 2.3): Im i3 von BMW wird eine geflechtene Verstärkung im Dachrahmen eingesetzt.
- Fahrradrahmen (Abb. 2.4): Mucic Composite sowie der Schweizer Fahrradhersteller BMC stellen den Fahrradrahmen aus geflochtenen Streben her [28].
- Handhabungsgerät (Abb. 2.5): Die Firma ZascheSitec verkauft einen Knickausleger bestehend aus geflochtenen Auslegern [29].

Die Liste zeigt einige Produkte aus verschiedenen Branchen. In allen Fällen handelt es sich um kleine Serien. Der Einsatz in einer Großserie ist noch nicht erfolgt. Dementsprechend ist auch die Anzahl der Flechtanlagen für CFK überschaubar. Abb. 2.6 illustriert die Anzahl der verkauften Radialflechtmaschinen der letzten zehn Jahre. Wenn auch auf niedrigem Niveau, so zeigt die Grafik doch, dass der Bedarf in den letzten Jahren gestiegen ist. Dies spricht dafür, dass die Technik ausgereift genug ist, um die Entwicklungsphase zu verlassen und den industriellen Einstieg zu schaffen.



Abbildung 2.3: Geflochtener Stoßfängerträger eines BMW M3 (Quelle: BMW¹)



Abbildung 2.3: BMW i3 mit geflochtenen Strukturelementen zur Verstärkung des Dachrahmens (Quelle: BMW¹)

¹ Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft; München



Abbildung 2.4: Fahrrad mit geflochtener Rahmenstruktur der Firma Munich Composites¹



Abbildung 2.5: Handhabungshilfe der Firma ZASCHESitec²

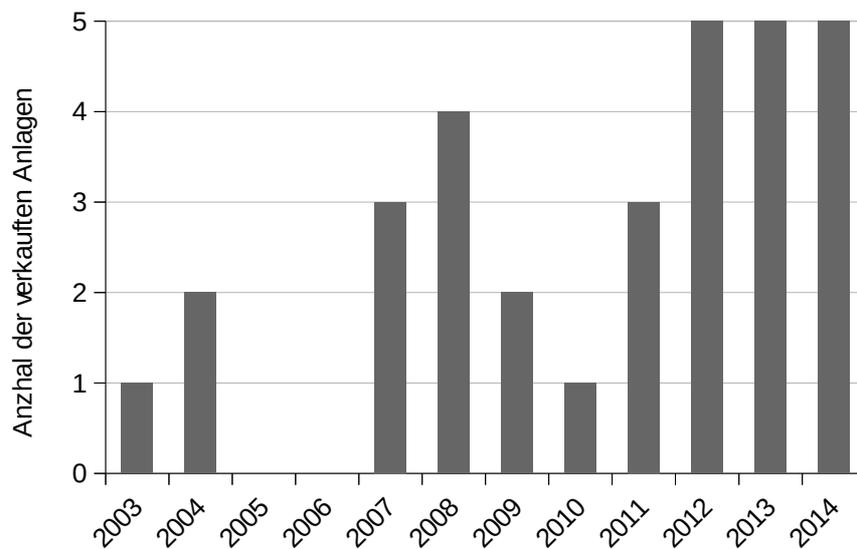


Abbildung 2.6:
Zahl der verkauften Radialflechtmaschinen der Firma Herzog (Quelle : Herzog³)

¹ Munich Composites GmbH; München

² ZASCHESitec handling GmbH; Nördlingen

³ August Herzog Maschinenfabrik GmbH & Co. KG; Oldenburg

3. Geflechte und Flechtmaschinen

Obwohl es sich um eine sehr alte Technologie handelt, existiert kaum Literatur zur Maschinenteknik für Geflechte. Sie findet entweder in der Textiltechnik Erwähnung – dort jedoch nur am Rande, wenn ein Geflecht als Textil beleuchtet wird, oder in Publikationen von Spezialindustrien, die ebenfalls Geflechte verwenden und deshalb auf die für die spezielle Anwendung verwendete Technik eingehen.

Das Wissen über die Maschinenteknik liegt dadurch fast ausschließlich bei den Herstellern von Flechtmaschinen bzw. bei den Flechtereien, welche die Maschinen an individuelle Bedürfnisse anpassen. Auch im Bereich der Preformherstellung für FVB wird die Maschinenteknik nicht ausführlich beleuchtet, sondern auf die bestehende Technik zurückgegriffen.

Im folgenden Kapitel werden insofern die verschiedenen Geflechtarten und ihre Herstellungsweise vorgestellt. Es werden differente Maschinentypen mit ihren Gemeinsamkeiten und Unterschieden dargestellt, um ein grundlegendes Verständnis der Maschinenteknik zu erzeugen.

3.1. Bindungsarten

Bevor speziell auf die verschiedenen Geflechte eingegangen wird, soll noch kurz ein Überblick über verschiedene Bindungsarten gegeben werden. Die Bezeichnung der Bindungen und die verschiedenen Arten kommen ursprünglich aus der Webtechnik, gelten aber auch für Geflechte. Eine Bindung gibt an, wie die einzelnen Fäden zueinander verlaufen. Bei einem klassischen Gewebe gibt es zwei Fadensysteme, welche orthogonal zueinander angeordnet sind und nach einem bestimmtem System, der Bindung, über- bzw. untereinander verlaufen. Durch dieses Überkreuzen halten die Fäden zusammen und ergeben ein Textil.

Es werden drei Grundbindungen unterschieden: Die Leinwand-, Köper- und Atlasbindung. Diese Grundbindungen lassen sich erweitern, außerdem gibt es abgeleitete Bindungen [30, 31]. Da die Atlasbindung für Geflechte keine Rolle spielt, wird sie hier nicht weiter betrachtet.

3.1.1. Leinwandbindung

Die Leinwandbindung ist die Bindung mit den maximal möglichen Überkreuzungen der einzelnen Fäden miteinander. Ein Faden verläuft immer abwechselnd über und unter den quer verlaufenden Fäden hindurch. Der nächste Faden in gleicher Richtung verläuft ebenso, nur um einen Quersfaden versetzt. In Abbildung 3.1 ist ein sol-

ches Gewebe dargestellt. Durch die Art des Fadenverlaufs entsteht ein schachbrettartiges Muster.

Die hohe Anzahl an Überkreuzungen der Fäden verursacht eine sehr gute Fixierung der Fäden im Gewebe, aber gleichzeitig auch eine starke Ondulation der Fäden.

Die alte Bindungsformel für Leinwandgewebe lautet: $L \frac{1}{1}$.

Der Buchstabe gibt an, um welche Bindungsart es sich handelt; die Zahlen, über wie viele Quersfäden der Faden verläuft (obere Zahl) und dann unter wie vielen er verläuft (untere Zahl). Diese Art der Bindungsformel wird bei Geweben nicht mehr verwendet, ist allerdings leicht verständlich und für Geflechte eine vollkommen ausreichende Darstellung. Aus diesem Grund soll sie hier zum Einsatz kommen.

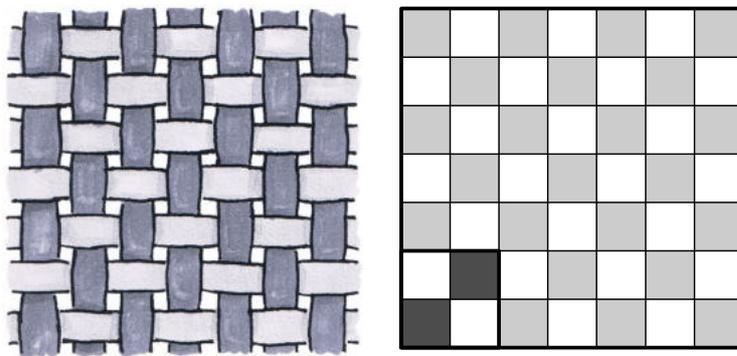


Abbildung 3.1: Darstellung und Patrone einer Leinwandbindung

3.1.2. Körperbindung

Bei dem einfachsten Körper verläuft ein Faden unter einen Quersfaden und dann über zwei Quersfäden, bevor er wieder unter einem hindurchgeht. Der zweite Faden hat den gleichen Verlauf, aber um einen Quersfaden versetzt. Der dritte Faden ist wiederum um einen zum zweiten Faden versetzt und läuft damit über zwei Quersfäden, taucht unter einen hindurch, bevor er wieder über zwei verläuft.

Durch den Versatz um einen Faden und das Überbrücken von zwei Fäden entsteht der für die Körperbindung typische schräge Grad. Dieser ist auch in Abbildung 3.2 sichtbar. Hier ist allerdings nicht der oben beschriebene Grundkörper dargestellt, sondern eine erweiterte Körperbindung, bei welcher jeder Faden jeweils unter zwei und dann über zwei Quersfäden verläuft. Dies stellt eine einfache Erweiterung der Körperbindung dar und wird als Breitgradkörper bezeichnet.

Aufgrund der geringeren Anzahl an Bindungspunkten nimmt die Ondulation der Fäden im Vergleich zur Leinwandbindung ab. Dadurch wird die Fixierung im Verbund verringert, was aber bei den oben beschriebenen Körperbindungen kaum bemerkbar ist.

Die alte Bindungsformel für einen einfachen Körper lautet: $K = \frac{1}{2}$.

Die Bindungsformel für den in Abbildung 3.2 dargestellten Breitgradkörper lautet:

$$K = \frac{2}{2}$$

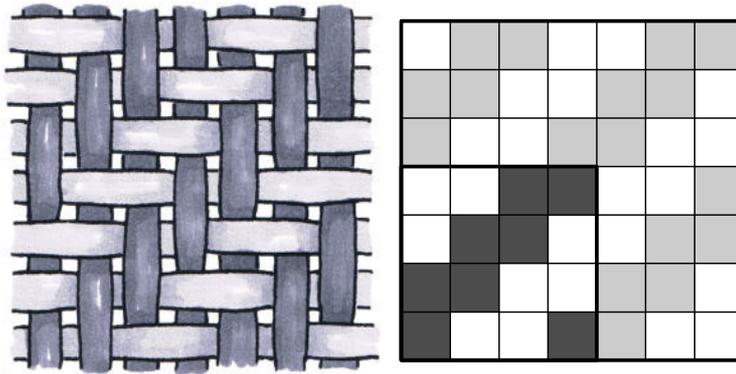


Abbildung 3.2: Darstellung und Patrone einer Körperbindung

Generell lassen sich sehr koymplexe Bindungsarten erzeugen, die aber für das Flechten von FVB keine Bedeutung haben.

3.2. Geflechtarten

Flecht- und Webmaschinen arbeiten prinzipiell unterschiedlich. Dessen ungeachtet werden die Produkte Geflecht und Gewebe häufig von Laien verwechselt, solange ein Geflecht nicht als Seil vorliegt. Der Grund ist, dass der prinzipielle Fadenverlauf in einem Geflecht und einem Gewebe gleich ist. Beide Textilien entstehen dadurch, dass Fäden in mindestens zwei unterschiedlichen Richtungen verlaufen und dabei abwechselnd über und unter den Fäden der anderen Richtung geführt werden – gemäß der vorgegebenen Bindung. Betrachtet man nur einen kleinen Ausschnitt eines Gewebes oder eines Geflechts, ist es möglich, dass beide Textilien nicht zu unterscheiden sind. Wenn allerdings der Rand bzw. die Produktionsrichtung des Textils bekannt ist, ist eindeutig, um welche Art es sich handelt. Die DIN 60000 definiert Geflechte wie folgt:

„Flächen- oder Körpergebilde mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flecht- (Klöppel-)Fäden sich in schräger Richtung zu den Warenkanten verkreuzen.“

Der Hauptunterschied wird hier deutlich. Bei Geweben verlaufen die Fasern zur Produktionsrichtung in 0°- und 90°-Richtung. Bei Geflechtern können alle möglichen Richtungen vorliegen, außer 0° und 90°.

Geflechte lassen sich auf verschiedene Arten klassifizieren. Eine Möglichkeit ist ihre räumliche Struktur:

- Flachgeflechte,
- Rundgeflechte,
- 3D-Geflechte.

Flachgeflechte stellen ein ebenes Halbzeug dar. In diesem Halbzeug verlaufen die Fäden von einem Rand zum anderen. Am Rand ändern die Fäden jeweils ihre Laufrichtung und laufen wieder zum anderen Rand (s. Abb. 3.3). Bei Rundgeflechtem entsteht ein Schlauch. Die Fäden verlaufen hier immer in eine Richtung spiralförmig im Mantel des Schlauchs. 3D-Geflechte weisen hingegen einen komplexen Verlauf der Fäden im Raum auf. Sie bilden nicht, wie ein Schlauch, nur eine Schale (Schale im Sinne der technischen Mechanik), sondern einen wirklichen Volumenkörper.

Eine weitere Form der Klassifizierung der Geflechte ist ihre Faserstruktur.

Mit Flechtmaschinen im ursprünglichen Sinne lassen sich zwei prinzipielle Faseraufbauten erzeugen: biaxiale und triaxiale Geflechte. Aus diesen beiden Typen lassen sich weitere Geflechte ableiten: UD-Geflechte (unidirektionale Geflechte) und 0° -Geflechte. Neben diesen Geflechtem existieren auch noch 3D-Geflechte. Während die 3D-Geflechte bezüglich der Faserstruktur auch den 3D-Geflechtem bezüglich der räumlichen Struktur entsprechen, lassen sich biaxiale, triaxiale und 0° -Geflechte sowohl als Flachgeflechte, als auch als Rundgeflechte herstellen. UD-Geflechte lassen sich nur theoretisch auch als Flachgeflecht herstellen. Aufgrund ihrer Struktur sind sie danach nicht mehr handhabbar.

Die oben genannten Geflechte werden im Folgenden erläutert. Auf die 3D-Geflechte wird lediglich kurz eingegangen, da sie nicht im Fokus dieser Arbeit stehen. Auch Flachgeflechte finden für den Bau von FVB kaum Einsatz und sollen deshalb nur kurz erwähnt werden.

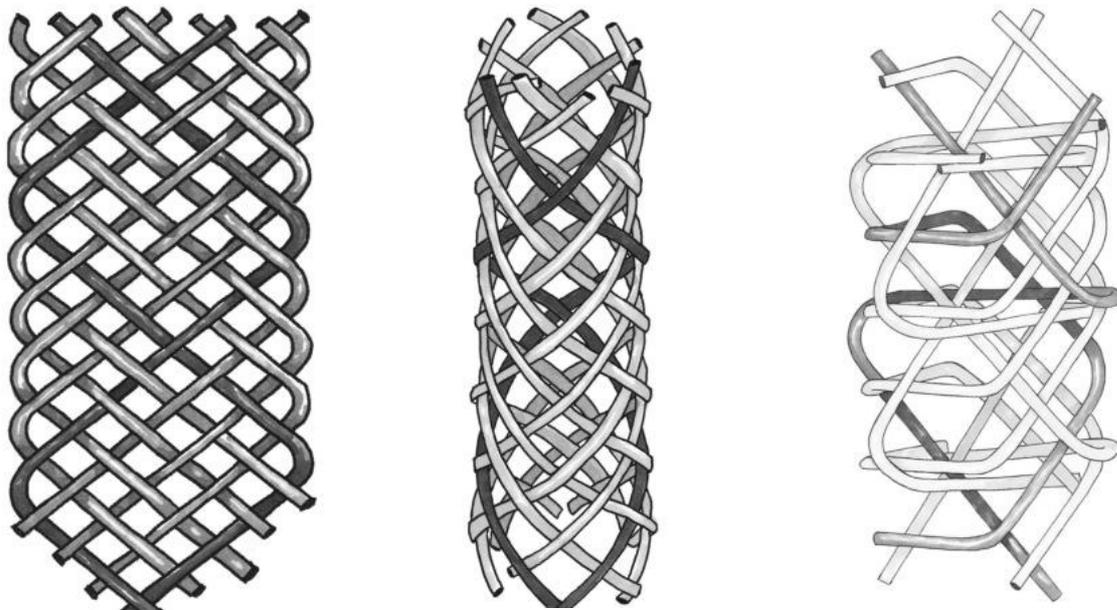


Abbildung 3.3: Darstellung verschiedener Geflechtarten; links: Flachgeflecht; mitte: Rundgeflecht; rechts: 3D-Geflecht

3.2.1. Biaxiales Geflecht

Das biaxiale Geflecht (s. Abb. 3.4) besteht aus zwei Fadensystemen, die in einem bestimmten Winkel zueinander angeordnet sind. In einem Fadensystem verlaufen dabei alle Fäden parallel zueinander. Der Winkel zwischen dem jeweiligen Fadensystem und der Abzugsrichtung kann zwischen $\pm 20^\circ$ und $\pm 80^\circ$ liegen. Die einzelnen Fasern der beiden Systeme sind dabei gemäß der eingestellten Bindung miteinander verkreuzt. Üblich ist bei Flechtmaschinen eine Körperbindung $\kappa = \frac{2}{2}$. Daneben sind auch Leinwand- oder andere symmetrische Körperbindungen möglich. Prinzipiell können auch unsymmetrische Bindungen erzeugt werden, dies hat aber für FVB keine größere Bedeutung.

Das biaxiale Geflecht entspricht damit am ehesten einem Gewebe, auch wenn hier eine Variation der Faserwinkel möglich ist. Schläuche, die so erzeugt wurden, lassen sich durch ein Stauchen in Längsrichtung deutlich verkürzen, bei gleichzeitiger Aufweitung des Durchmessers. Zusätzlich ändert sich dabei auch der Winkel der Fasern zueinander. Da die Fasern durch die Verkreuzungen relativ gut gegeneinander abgestützt sind, lassen sich solche biaxialen Geflechtschläuche gut zum Drapieren verwenden.

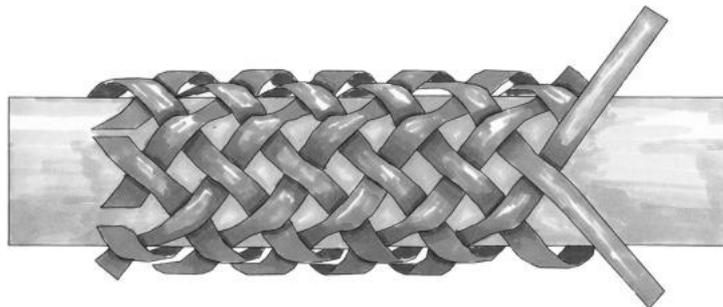


Abbildung 3.4: Biaxiales Rundgeflecht mit zwei miteinander verkreuzten Fadensystemen

3.2.2. Triaxiales Geflecht

Bei einem triaxialen Geflecht gibt es neben den beiden Fasersystemen des biaxialen Geflechts ein weiteres System. Dieses verläuft parallel zur Abzugsrichtung (s. Abb. 3.5) und ist in das biaxiale Geflecht eingeschlossen. Die Fasern der beiden anderen Systeme umschließen also die Fasern des dritten Systems und fixieren es auf diese Weise. Durch die Fasern des dritten Systems, die als Stehfäden bezeichnet werden, werden bei triaxialen Geflechten auch Fasern in 0° -Richtung abgelegt. Dies ist für viele Bauteile von Relevanz, da oft Lasten auftreten, die Fasern in Längsrichtung erfordern. Aufgrund der zusätzlichen Fasern ist es aber nicht mehr möglich, den Geflechtschlauch zu stauchen und so aufzuweiten. Das hat wiederum zur Folge, dass das Geflecht in sich relativ stabil ist. Ein Verzug bei der Handhabung ist nicht so leicht möglich. Allerdings nimmt auch die Ondulation der biaxialen Fäden zu, da diese nun zusätzlich um den Stehfaden geführt werden.



Abbildung 3.5: Triaxiales Rundgeflecht mit den zwei schräg verlaufenden Flechtfadensystemen und den Stehfäden

3.2.3. UD-Geflecht

Das UD-Geflecht leitet sich aus dem biaxialen Geflecht ab. Hierbei werden die Fasern des einem Fadensystems durch sehr dünne Stützgarne ersetzt, die im späteren Bauteil keine lasttragende Funktion erfüllen, sondern nur für den Flechtprozess notwendig sind. Ohne diese gegenläufigen Fasern würde die Ablage der Verstärkungsfasern nicht ausreichend geordnet und auch mit einer geringeren Ablagebreite erfolgen. So entsteht ein in Abbildung 3.6 dargestelltes Halbzeug, welches nur Verstärkungsfasern in einer Richtung aufweist. Wenn nur die Verstärkungsfasern betrachtet werden, handelt es sich nicht um ein Geflecht, sondern um eine gewickelte Struktur. Diese wird aber mittels Flechtmaschinen hergestellt und weist deshalb den Vorteil der hohen Produktivität auf. Daneben zeichnen sich UD-Geflechte dadurch aus, dass die Fasern praktisch ondulationsfrei abgelegt werden. Das führt zu sehr guten Materialkennwerten, allerdings verliert das Geflecht seine hohe Impact-Toleranz (s. Abschnitt 3.6). Die meisten grundlegenden Untersuchungen zu UD-Geflechten wurden von der EADS-Forschung in Ottobrunn durchgeführt [32-34].

Um in einem UD-Geflecht differente Faserorientierungen zu erzeugen, bedarf es verschiedener Lagen. Diese müssen entweder durch unterschiedliche Maschinen erzeugt werden oder das Geflecht wird abwechselnd in divergente Richtungen abgezogen. Häufig werden für UD-Geflechte die Maschinen ungleichmäßig mit Klöppeln besetzt. Das heißt, es laufen mehr Klöppel in eine Richtung als in die andere. So lassen sich Geflechte erzeugen, wie in Abbildung 3.6 dargestellt, bei denen drei Viertel der Fäden als Verstärkungsfasern in einer Richtung verlaufen und nur ein Viertel als Stützgarn in die andere.

Für das Stützgarn wird im Allgemeinen ein Thermoplastgarn verwendet, welches nach dem Flechten aufgeschmolzen werden kann. Durch das Aufschmelzen der Stützfäden kann das Geflecht für eventuelle Drapierprozesse leicht stabilisiert wer-



Abbildung 3.6: UD-Geflecht. Verstärkungsfasern verlaufen nur in einer Richtung

den. Insgesamt ist ein UD-Geflecht allerdings ungeeignet, um drapiert zu werden, da es aufgrund der sehr geringen Anzahl an Verkreuzungen kaum Eigenstabilität aufweist.

3.2.4. 0°-Geflecht

0°-Geflechte leiten sich von triaxialen Geflechten ab. Bei diesen Geflechten werden als biaxiale Fäden sehr dünne Garne verwendet und nur die Stehfäden bestehen aus den eigentlichen Verstärkungsfasern. So entsteht ein Geflecht, welches in Produktionsrichtung (0°) verstärkend wirkt. Die biaxialen Fäden dienen lediglich der Fixierung der Stehfäden. In Abbildung 3.7 ist ein derartiges Geflecht dargestellt. Für die biaxialen Fäden können neben sehr dünnen Verstärkungsfasern auch Thermoplastgarne verwendet werden. Diese lassen sich aufschmelzen und beeinflussen die Stehfäden kaum.

Der Vorteil dieser geflochtenen UD-Lagen, im Gegensatz zu zugeführten UD-Bändern, besteht in der Anpassungsfähigkeit an komplexe Strukturen. Durch eine Variation der Ablagebreite der einzelnen Fäden können Querschnittsänderungen bis zu einem bestimmten Grad gut abgebildet werden. Gerade beim Einsatz von sehr dicken Verstärkungsfasern (z. B. 50k Rovings) muss aber beachtet werden, dass die Lage der einzelnen Fäden zueinander verschoben sind – wie in Abb. 4.7 dargestellt. Anderenfalls besteht die Gefahr, dass sich Reinharzgebiete bilden.

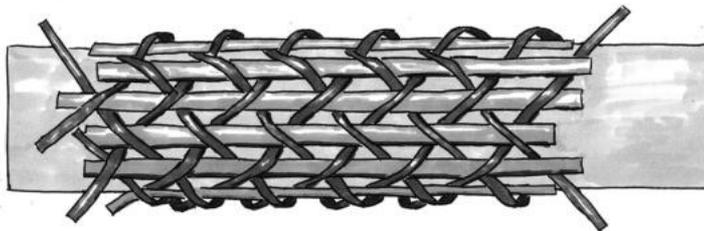


Abbildung 3.7: 0°-Geflecht.
Die Flechtfäden dienen nur zur Fixierung der Stehfäden

3.2.5. 3D-Geflechte

Zu den 3D-Geflechten gehören alle Geflechte, bei denen die einzelnen Fäden so im Raum verlaufen, dass sie keine Schale mehr bilden. Dabei bildet das Geflecht nicht nur eine im Raum gekrümmte Fläche mit einer definierten Dicke, die verglichen mit dem Gesamtquerschnitt sehr gering ist, sondern einen dreidimensionalen Körper. Auf 3D-Flechtmaschinen können dabei vielfältige Querschnittsformen erzeugt werden, wie bspw. I-Profil oder Dreiecksprofil. Daneben gibt es Flechtmaschinen, die gleich mehrere Lagen biaxiales oder triaxiales Geflecht in einem Schritt herstellen [35]. Dabei werden die einzelnen Lagen so miteinander verbunden, dass einzelne Fäden zwischen den verschiedenen Lagen wechseln und dadurch die Lagen miteinander verbinden. Hierbei handelt es sich um eine Übergangsform, die sowohl deutli-

che Erkennungsmerkmale von biaxialen/triaxialen Geflechtem als auch von 3D-Geflechtem aufweist.

Aufgrund der sehr großen Variationsmöglichkeiten von 3D-Geflechtem, kann kein typischer Fadenverlauf definiert werden. Neben den Geflechtem, die auf 3D-Flechtmaschinen hergestellt werden (s. Abs. 3.3.2), sind auch Packungsgeflechte 3D-Geflechte, auch wenn diese häufig nicht dazu gezählt werden. Bei Packungsgeflechtem handelt es sich um Geflechte mit einem rechteckigen Querschnitt, der vollständig mit den Flechtfäden gefüllt ist. Die Flechtfäden laufen dabei auf einem definierten Pfad quer durch das Geflecht. Übliche Packungsgeflechte haben zwischen 8 und 52 Flechtfäden. Es werden dabei Geflechte mit zwei, drei und vier Bahnen unterschieden (s. Abb. 3.8)[36-38].

Das größte Potenzial von 3D-Geflechtem wird neben der Möglichkeit, Volumenkörper herzustellen, in der sehr hohen Schadenstoleranz gesehen [35]. Diese wird durch die Verknüpfung der einzelnen Lagen erreicht bzw. dadurch, dass keine einzelnen Lagen definierbar sind. Gleichzeitig kommt es aber auch zu einer sehr großen Ondulation der einzelnen Fäden. Dies hat zur Folge, dass vor allem die Steifigkeitskennwerte deutlich reduziert sind.

Jedes der oben beschriebenen Geflechte bietet Vor- und Nachteile. Es ist je nach Belastungsfall zu entscheiden, ob und welches Geflecht geeignet ist. Dabei sollten zudem Produktivität und Prozesssicherheit berücksichtigt werden. Letztere ist primär von der Maschinenteknik abhängig und für die einzelnen Geflechte z. T. sehr unterschiedlich.

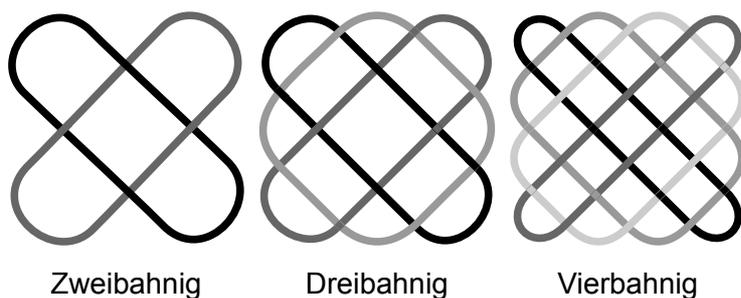


Abbildung 3.8: Vereinfachte Darstellung der Bahnen der Klöppel von Packungsgeflechtern

3.3. Funktionsprinzipien von Flechtmaschinen

Das einfachste und auch allgemein bekannte Geflecht besteht aus drei einzelnen Fasersträngen: ein Zopf. Ein Zopf kann gut per Hand geflochten werden, indem abwechselnd der jeweils äußere Strang über den gerade mittleren gelegt wird. Auf diese manuelle Weise lassen sich auch noch vier bis maximal fünf Faserstränge verarbeiten, aber schon das bedarf einiger Übung. Auch treten Probleme auf, wenn die Faserstränge sehr lang werden, da das jeweils freie Ende immer komplett über die anderen Fäden geführt werden muss, sonst verknoten sich die freien Enden. Aus diesem Grund wurden bereits im ersten Jahrtausend nach Christi in Asien erste Flechthilfen entwickelt. Diese bestanden aus einer runden Scheibe mit einem Loch in der Mitte und Spulen. Eine solche Flechthilfe ist in Abbildung 3.9 schematisch dargestellt. Die Fäden wurden auf die Spulen aufgewickelt. So ist es möglich, auch verhältnismäßig lange Fäden zu verarbeiten. Die Enden der einzelnen Fäden wurden zusammengeknotet und mit einem Gewicht durch das Loch in der Mitte der Scheibe geführt. Die Scheibe wurde waagrecht fixiert und die einzelnen Fäden gleichmäßig entlang des Umfangs verteilt. Nun konnten die einzelnen Fäden manuell jeweils gemäß der Bindung über die benachbarten Fäden gelegt werden. So wandert ein Teil der Fäden im Laufe des Flechtens rechtsherum entlang der Scheibe, der andere Teil linksherum. Sobald eine Spule die Holzscheibe erreichte, wurde der Faden weiter abgewickelt. Die Spulen werden dabei Klöppel genannt.

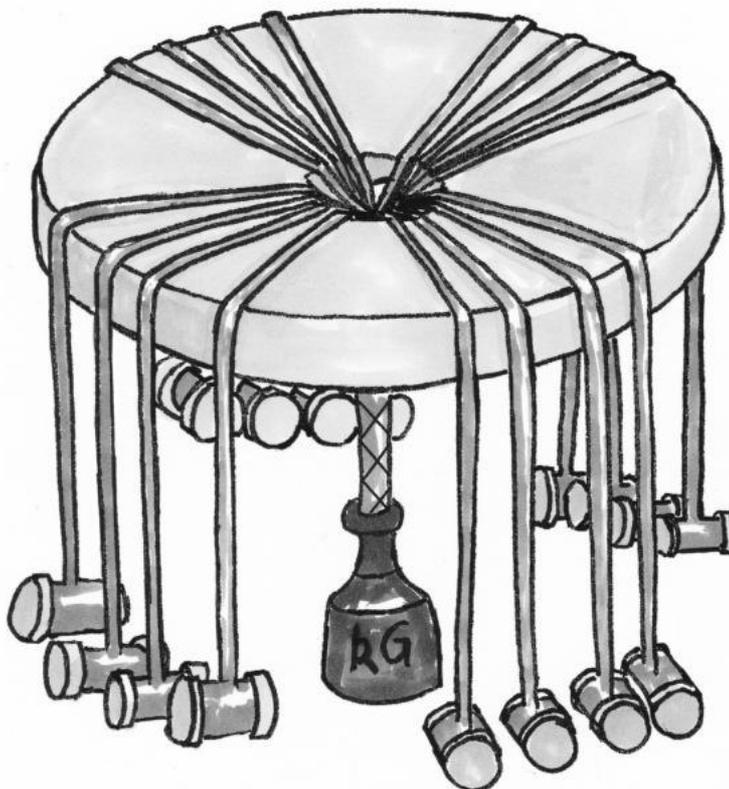


Abbildung 3.9: Flechtscheibe, eine der ersten Flechthilfen, um Geflechte aus mehr als drei bis vier Fäden herzustellen

Im Zuge der industriellen Revolution wurde dieser Prozess automatisiert, das Prinzip aber beibehalten. Erste Patente stammen aus dem 18. Jahrhundert [38]. Ein Patent von 1861 [39] zeigt bereits den prinzipiellen Aufbau heutiger Flechtmaschinen (Figurenflechter). In den Maschinen ist der Faden weiter auf Spulen aufgewickelt. Diese Spulen werden in den rein mechanisch geregelten Klöppel gesetzt. Das genaue Funktionsprinzip eines Klöppels wird in Abschnitt 3.3.1 erklärt. Der Klöppel sorgt im Flechtprozess für eine definierte Fadenzugkraft und dass immer soviel Faden von der Spule abgewickelt wird, wie benötigt. Dabei arbeitet jeder Klöppel autonom für sich und bedarf keines weiteren Antriebs.

Die Klöppel müssen in der Flechtmaschine abwechselnd rechts und links aneinander vorbeigeführt werden, sodass sich die Fäden gemäß der Bindung überkreuzen. Dies geschieht über runde, rotierende Scheiben. Die Scheiben sind wie in Abb. 3.10 dargestellt so angeordnet, dass sie sich gerade nicht berühren und eine Kette bilden. Ihre Rotationsrichtung ist alternierend, sodass an den Berührungspunkten keine Relativbewegungen zwischen den Scheiben auftreten. Die Scheiben werden als Flügelrad bezeichnet. Jedes Flügelrad hat verschiedene Punkte, an denen die Klöppel geführt werden können (in Abb. 3.10 sind es vier Punkte pro Flügelrad). Bei einer Rotation der Flügelräder werden die Klöppel auf einer Kreisbahn bewegt. An den Berührungspunkten der Flügelräder untereinander werden die Klöppel jeweils an das benachbarte Flügelrad übergeben. So bewegt sich der Klöppel auf einer sinusförmigen Bahn entlang der Flügelräder – die eine Hälfte der Klöppel in die eine Richtung, die andere in die entgegengesetzte. Durch den sinusförmigen Weg und eine Phasenverschiebung von 180° werden die Klöppel dabei abwechselnd aneinander vorbeigeführt. Dieses Prinzip mittels Flügelrädern getragener Klöppel liegt den meisten Flechtmaschinen zugrunde. Es gibt auch andere Prinzipien, von denen zwei später noch kurz erläutert werden (Abs. 3.3.2, Seite 35 ff.). Aber nur ein weiteres Prinzip hat sich für eine spezielle Anwendung etablieren können.

Die Mitnahmepunkte der Flügelräder sind radiale Einschnitte in den Flügelrädern, welche ein abgerundetes Ende aufweisen. Die Tiefe entspricht dabei häufig der Breite. Durch die Nuten wird das Flügelrad in Segmente aufgeteilt, die ursprünglich an Flügel erinnerten. So entstand ihre Bezeichnung.

Der Klöppel hat einen speziellen Fuß, mit einer Einschnürung, die genau in den Einschnitt des Flügelrads passt. Durch die Form des Klöppelfußes wird dieser vom Flügelrad getragen und gleitet nicht auf dem Maschinenbett. Bei den ersten Flechtmaschinen und z. T. auch bei 3-D Flechtern ist dies nicht der Fall. Dies führt zu einem deutlich höheren Verschleiß der Klöppelfüße, also einer kürzeren Standzeit und damit einem deutlich höheren Wartungsaufwand.

Das Flügelrad gibt damit auch den Abstand der Klöppel zueinander vor, sowie den Abstand der Kreuzungspunkte der Klöppel. Dieser wird als Stich bezeichnet. Bei konventionellen Maschinen entspricht der Stich dem Flügelraddurchmesser.

Durch den beschriebenen Aufbau von Klöppelfuß und Flügelrad wird der Klöppel normal zum Flügelrad und tangential zur Bewegung gehalten. Nur in radialer Richtung zum Flügelrad kann sich der Klöppel noch aus diesem herausbewegen. Dies wird durch Metallelemente auf der Unterseite des Klöppelfußes, den Schiffchen, verhindert. Die Schiffchen sind längliche, federartige Metallteile, die drehbar im Klöppelfuß gelagert sind (s. Abb. 3.10). Die Schiffchen ragen in eine Nut, welche unter dem Flügelrad entlang des Klöppelwegs in der Platte verlaufen, in der die Flügelräder gelagert sind. In Abbildung 3.10 ist die Nut sichtbar. Die Nut ist ebenfalls dafür verantwortlich, dass der Klöppel von einem Flügelrad auf das nächste übergeben wird und nicht auf einer Kreisbahn auf einem Flügelrad verharret. An den Berührungspunkten der Flügelräder kreuzen sich die Nuten der beiden Laufrichtun-

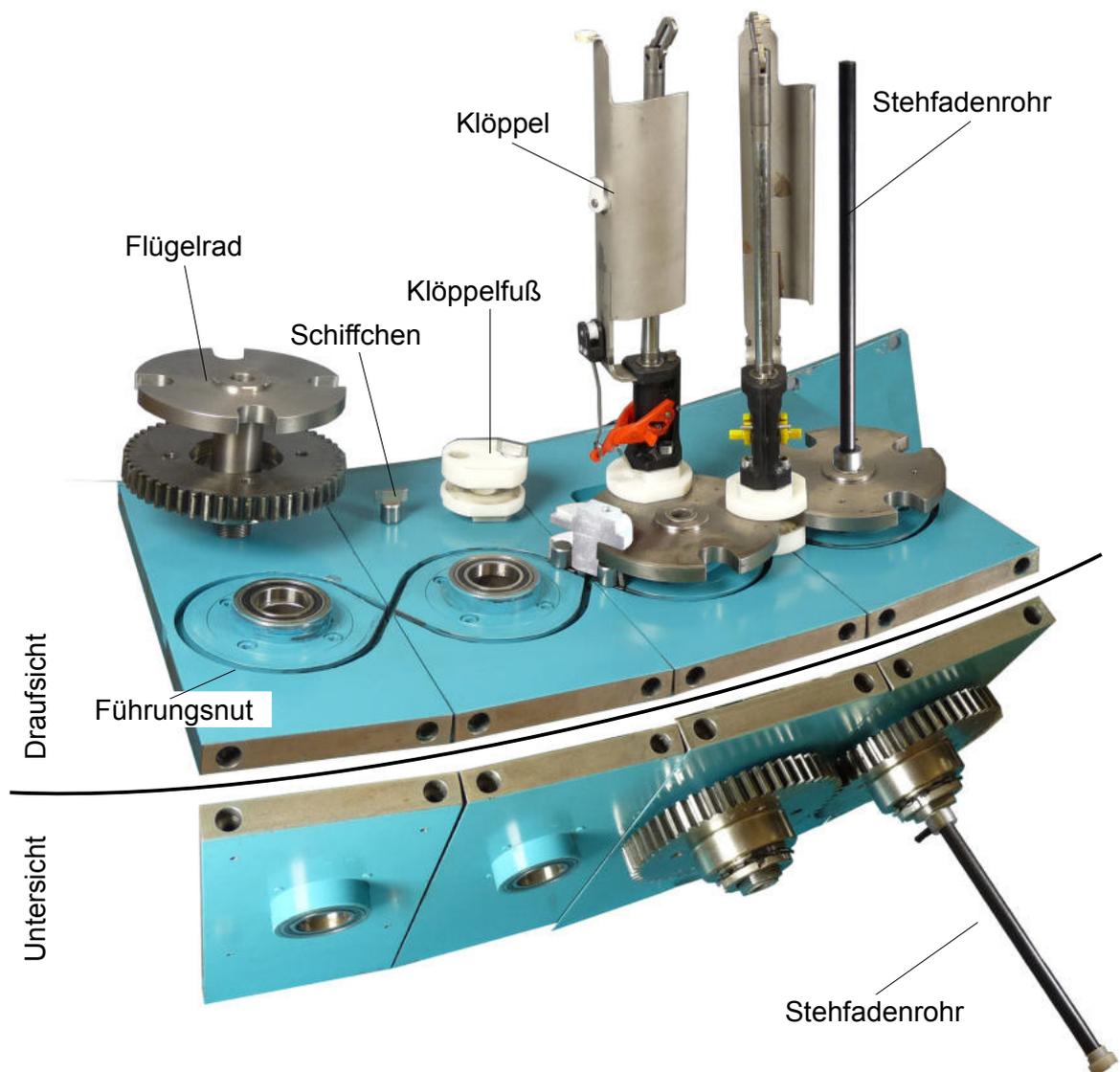


Abbildung 3.10: Aufbau von Figurenflechtern mit Flügelrädern, welche die Klöppel tragen und mittels Zahnrädern auf der Unterseite gekoppelt sind. Die Seitenelemente der Maschine sind entfernt.

gen. Da die Nut nicht genau einer Sinusbahn entspricht, sondern die Bahnen sich in einem Winkel von etwa 60° kreuzen, hat jede Bahn einen eindeutigen Weg. Durch die längliche Form der Schiffchen können diese die Nut nicht an den Kreuzungspunkten verlassen. Die meisten heute verwendeten Flechtmaschinen funktionieren nach diesem Prinzip. Es unterscheiden sich lediglich die Anordnung der Flügelräder zueinander (s. Abs. 3.10).

Mit den durch die Flügelräder bewegten Klöppeln können die beiden Fadensysteme zu einem biaxiales Geflecht verflochten werden. Für ein triaxiales Geflecht müssen zusätzlich Fäden eingebracht werden, die sich nicht bewegen und parallel zur Abzugsrichtung des Geflechts geführt werden. Das geschieht entlang der Rotationsachsen der Flügelräder, durch deren Zentrum. Die Flechtfäden bewegen sich so um den Stehfaden herum und binden diesen in das Geflecht ein. Technisch umgesetzt wird es durch hohle Rotationsachsen, in denen ein stehendes Rohr steckt, durch welches der Faden zugeführt wird.

3.3.1. Der Klöppel

Der Klöppel ist das zentrale Element einer Flechtmaschine. Er dient nicht nur als Spulenträger, sondern steuert auch den Fadenabzug und regelt die Fadenzugkraft. Der Klöppel muss für eine hohe Produktivität zwei Anforderungen erfüllen, er muss ein großes Spulenvolumen ermöglichen und eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Für die Qualität des Geflechts ist eine gleichmäßige Fadenzugkraft wesentlich. Wie sich im Folgenden zeigen wird, widersprechen sich diese Anforderungen partiell mit den zur Verfügung stehenden Systemen.

Ein Klöppel kann in zwei Teile aufgeteilt werden, den Klöppelfuß, der für die Kopplung mit dem Maschinenrumpf zuständig ist und dem Klöppeloberteil, welches das Handling der Fasern übernimmt. Bei dem Klöppeloberteil gibt es eine Reihe verschiedener Bauweisen:

- Hebelklöppel
- Schieberklöppel
 - mit stehender Spule
 - mit liegender Spule
- Spezialklöppel
- Klöppel für Rotationsflechter

Im Folgenden werden die Funktionsweisen der Hebelklöppel und Schieberklöppel genauer vorgestellt. Spezialklöppel sind entweder für ganz spezielle Maschinen oder Anwendungen entwickelt worden und werden deshalb auch nur bei diesen eingesetzt oder es handelt sich um Vorschläge bzw. Prototypen, die sich nicht durchsetzen konnten. In der Arbeit von Rosenbaum [27] werden einige dieser Klöppel vorgestellt. Klöppel für Rotationsflechter sind mit den anderen Klöppeln aufgrund des

abweichenden Maschinenkonzepts nicht zu vergleichen. Auf Rotationsflechter wird kurz in Abschnitt 3.3.2 eingegangen. Da diese für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern aber aktuell keine Bedeutung haben, wird der Klöppel nicht weiter beschrieben.

Hebelklöppel

Das Prinzip des Hebelklöppels leitet sich von den ersten entwickelten Klöppeln ab. Dieser Klöppel gilt als sehr robust und zuverlässig [26]. Sein Aufbau ist in Abb. 3.11 und 3.13 dargestellt.

In der Mitte des Klöppels befindet sich der Klöppelschaft, auf welchem die Spule mit dem Garn gesteckt wird. Damit die Spule nicht herunterfallen kann, wird sie am oberen Ende des Schafts fixiert. Hierfür gibt es verschiedene Systeme. Im unteren Bereich der Spule sitzt sie auf der Mechanik des Klöppels. Die Spule hat an ihrem unteren Ende Nuten, Zähne oder ähnliches. Ein Pin des Klöppels greift in diese Nuten und verhindert so ein Rotieren der Spule und damit ein Abwickeln des Fadens von der Spule. Der Pin ist dergestalt gelagert, dass er zurückgezogen werden kann und damit die Spule zur Rotation freigibt. Eine Feder hält ihn aber in der Grundstellung so, dass die Spule blockiert ist.

Der Faden läuft, von der Spule kommend, durch die mittlere Fadenöse, die sich ungefähr in der Mitte der Spule befindet. Hier wird der Faden so umgelenkt, dass er senkrecht nach unten zur unteren beweglichen Öse verläuft. An dieser Öse wird der Faden um 180° umgelenkt und läuft nach oben zur oberen Fadenöse, von welcher aus er zum Geflecht läuft. Die untere Öse ist über die Hubstange mit dem Hebel des Klöppels verbunden.

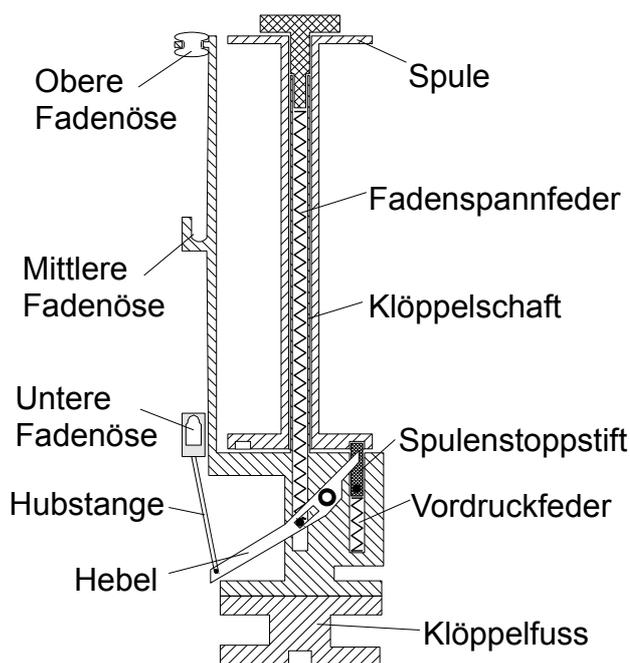


Abbildung 3.11: Prinzipieller Aufbau eines Hebelklöppels mit Klöppelfuß und Spule

Der Hebel des Klöppels ist so gelagert, dass er hoch und runter klappen kann. Auf den Hebel wirkt eine Feder, die sich im Klöppelschaft befindet. Diese Feder drückt das Ende des Hebels, an welchem die bewegliche Öse befestigt ist, nach unten. Das andere Ende des Hebels drückt auf den Pin, welcher die Spule fixiert. Wenn die bewegliche Öse nach oben gezogen wird, wird damit auch der Hebel bewegt und drückt so den Pin nach unten, der dann die Spule frei gibt.

Ist der Klöppel in Betrieb, geschieht das Folgende: Der Faden wird in Richtung Zentrum der Flechtmaschine gezogen. Da die Spule sich nicht drehen kann, wird die untere Öse nach oben gezogen. Die Öse wird über den Hebel und die Hubstange von der Klöppelfeder nach unten gedrückt und so wird in dem Faden eine Zugkraft erzeugt. Der Hebel wirkt am Anfang noch nicht auf den Pin, sodass der Faden ein Stück gezogen werden kann, während sich der Hebel hebt. Erst wenn sich die Öse um einige Zentimeter gehoben hat, drückt der Hebel den Pin nach unten. Die Spule wird freigegeben und kann sich drehen. Aufgrund der Zugkraft im Faden wird dieser von der Spule abgewickelt. Die bewegliche Öse wird so erneut nach unten gezogen und der Pin fixiert die Spule wieder. Die bewegliche Öse gleitet dabei nicht ganz nach unten, sondern nur ein kleines Stück. Dieser Prozess wiederholt sich, solange der Faden in die Flechtmaschine gezogen wird und die Spule noch nicht leer ist.

Falls die Spannung im Faden nachlässt oder zu viel Faden in der Flechtmaschine vorhanden ist, bewegt sich die bewegliche Öse ebenfalls nach unten, zieht den Faden zurück und hält den Faden so weiter gespannt. Dieser Fadenrückzug wird im Flechtprozess benötigt und fällt je nach Maschinenkonzept unterschiedlich groß aus (s. Abs. 3.3.2). Falls der in diesem Konzept erreichte Fadenrückzug nicht reicht, existieren Systeme, bei denen der Faden, bevor er zur oberen Ösegeführt wird, zu einer festen Öse läuft, hier um 180° umgelenkt wird und erneut zur beweglichen Öse geführt wird. Durch diesen Flaschenzug wird die Fadenreserve verdoppelt.

Gemäß dem oben beschriebenen Prinzip arbeiten alle Hebelklöppel, auch wenn sich die genaue Gestaltung unterscheiden kann. Die Mechanik des Klöppels befindet sich unter der Spule und benötigt aufgrund des Hebels eine bestimmte Höhe. Dadurch wird das Volumen der Spule, bei einer definierten Gesamthöhe des Klöppels, verringert.

Schieberklöppel

Die prinzipielle Funktionsweise eines Schieberklöppels entspricht der des Hebelklöppels. Die verwendete Mechanik ist jedoch deutlich anders, sodass sich Möglichkeiten ergeben, die ein Hebelklöppel nicht bietet.

Schematisch ist ein Schieberklöppel in Abb. 3.12 dargestellt. Auch dieser Klöppel hat in seiner Mitte einen Schaft, auf dem die Spule aufgesetzt wird. Die Spule sitzt

hier aber auf einer drehbaren Basisscheibe, welche über einen Sperrzapfen oder -zahn blockiert ist. Der Schieberklöppel hat Führungsbahnen, auf denen der Schieber sitzt. Hierbei handelt es sich um ein Element, welches durch Federn nach unten gehalten wird, dass aber in der Führungsbahn nach oben gleiten kann. Kurz bevor der Schieber seinen oberen Anschlag erreicht, löst er einen Mechanismus aus, der die Spule entriegelt, sodass sich diese drehen kann. An dem Schieber ist bei diesem Klöppelkonzept die bewegliche Öse befestigt. Daneben gibt es wieder zwei feste Ösen, ungefähr in der Mitte der Spule und am oberen Rand des Klöppels.

Der Faden verläuft, von der Spule kommend, über die mittlere Öse zur beweglichen Öse und von dort zur oberen. Wenn am Faden gezogen wird, hebt sich der Schieber und baut damit solange eine Kraft auf, bis die Spule freigegeben und Faden abgewickelt wird.

Bei dieser Bauweise wird der größte Teil der Mechanik des Klöppels neben die Spule gelegt. Dadurch kann die Spule bei gleicher Gesamthöhe des Klöppels länger werden. Der Umfang der Spule wird dagegen nicht beeinflusst, da der Klöppel in der Maschine radial zum Flügelrad stärker beschränkt ist als tangential und die Mechanik in tangentialer Richtung angeordnet werden kann. So erhöht sich das Gesamtvolumen der Spule und damit auch die Produktivität der gesamten Maschine.

Sowohl beim Hebelklöppel als auch beim Schieberklöppel ist die Spule stehend gelagert und das erste Fadenauge befindet sich in Längsrichtung ungefähr in der Mitte der Spule, radial gesehen direkt am Rand der Spule. Wenn sich die Fadenwicklungen am Rand der Spule befinden, kommt es zu einem sehr schrägen Abzug des Fadens. Dies führt bei bestimmten Fäden bzw. Anwendungen zu Problemen. Aus diesem Grund wurden Schieberklöppel mit zur Bewegungsrichtung liegender Spule entwi-

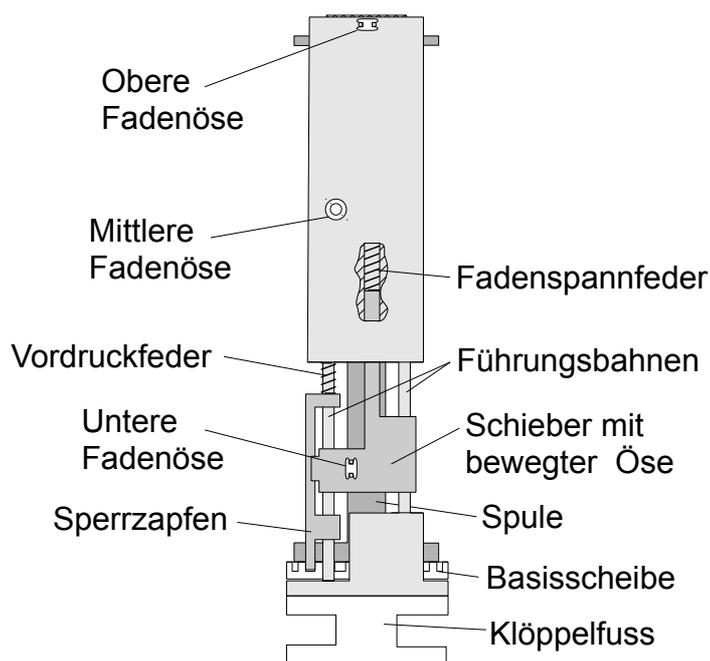


Abbildung 3.12: Prinzipdarstellung eines Schieberklöppels mit einfacher Fadenreserve

ckelt (Abb. 3.13). Dadurch kann die erste feste Fadenöse mit deutlichem Abstand zur Spule positioniert werden. So wird der schräge Abzug erheblich verringert. Allerdings wird auch das Spulenvolumen deutlich kleiner. Aus diesem Grund werden Klöppel mit liegenden Spulen primär für sehr dünne Fäden verwendet, bei denen sich das Spulenvolumen nicht so stark in der Produktivität bemerkbar macht, z. B. bei Drahtgeflechten.

Für Klöppel mit sehr großen Spulen und sehr hohem Gewicht (der aktuell größte Klöppel hat eine Spule mit 1,5 m Höhe und 1 m Durchmesser und ein max. Gewicht von 2.200 kg) werden keine Rasten mehr benutzt, welche die Spule blockieren. Stattdessen kommen Bremssysteme zum Einsatz, die ähnlich den Backenbremsen beim Auto funktionieren. Sowohl das Lösen als auch das Bremsen der Spule erfolgen dadurch weniger ruckartig als mit Pins oder Rasten. Das sorgt zum einen für eine gleichmäßigere Spannung im Faden, zum anderen ist die Materialbelastung des Klöppels durch die Kräfte, welche durch die Massenträgheit beim Stoppen der schweren Spule auftreten, beim langsameren Bremsen deutlich geringer. Bei kleineren Volumen hat sich das System allerdings nicht durchgesetzt, da es von der Mechanik deutlich komplexer und damit auch teurer ist. Daneben sind die Bremssysteme empfindlicher gegenüber Verschmutzung.



Abbildung 3.13: Darstellung von verschiedenen Klöppeltypen; links: Hebelklöppel; mitte: Schieberklöppel; rechts: Klöppel mit liegender Spule

3.3.2. Maschinenrumpfprinzipien

Neben dem prinzipiellen Aufbau von Klöppel und Klöppelantrieb (z. B. über Flügelräder), spielt auch die Anordnung der Flügelräder zueinander und der dadurch bedingte Fadenverlauf vom Klöppel zum Flechtpunkt, dem Punkt an welchem alle Fäden zusammenlaufen und das Geflecht entsteht, eine erhebliche Rolle für die Qualität des Geflechts und die Produktivität der Maschine. Es gibt verschiedene Systeme, die für verschiedene Anwendungen geeignet bzw. erforderlich sind.

Aufgrund Ihrer Bauweise lassen sich folgende Flechtmaschinentypen definieren:

- Flachbettmaschinen
 - für Flach- und Rundgeflechte
 - für Packungsgeflechte
 - für 3D-Geflechte
- Tunnelflechter für Flach- und Rundgeflechte
- Radialflechter für Flach- und Rundgeflechte
- Rotationsflechter für Rundgeflechte

Radialflechter, Tunnelflechter und die meisten Flachbettmaschinen arbeiten mit mittels Flügelräder getragenen Klöppeln. Mit diesen Maschinen lassen sich sowohl Flachgeflechte als auch Rundgeflechte herstellen, da dazu nur eine Anpassung bei zwei Flügelrädern notwendig ist. Lediglich Rotationsflechter haben einen prinzipiell anderen Aufbau und sind nur für Rundgeflechte geeignet.

Bei einem Rundgeflecht verlaufen die Fäden spiralförmig entlang des Mantels eines Schlauchs, wie Abb. 3.4 verdeutlicht. Entlang der Achse des Schlauchs beschreiben die Fäden eine Kreisbahn. Diese Bewegung müssen ebenfalls die Klöppel in der Maschine durchführen, d. h. die Flügelräder sind kreisförmig angeordnet. So kann ein Klöppel immer an das nächste übergeben werden und kommt irgendwann zu seinem Startpunkt zurück. Dabei bewegt sich im Allgemeinen die eine Hälfte der Fäden in die eine Richtung, die andere Hälfte in die andere. In Abb. 3.14 ist ein Rundgeflecht mit entsprechender Anordnung der Flügelräder dargestellt. Der großen Kreisbahn ist eine sinusförmige Bahn überlagert, sodass sich das Geflecht ausbilden kann. Die Fäden verlaufen vom Klöppel zum Flechtpunkt. Der Flechtpunkt liegt auf der Achse, welche mittig durch den Kreis der Flügelräder läuft und orthogonal zur der Kreisebene steht. Dadurch ist der Abstand von jedem Klöppel zum Flechtpunkt immer ähnlich.

Bei einem Flachgeflecht (Litze) verlaufen die Fäden von einem Rand des Geflechts zum anderen, ändern hier die Laufrichtung und kehren zum ersten Rand zurück. Die Klöppel müssen in der Flechtmaschine genau den gleichen Weg beschreiben. Das heißt die Klöppel bewegen sich auf ihrer Sinusbahn in eine Richtung und bilden dabei mit den entgegenkommenden Klöppeln das Geflecht. Am Ende der Bahn werden die Klöppel dergestalt umgelenkt, dass sie in die gegenläufige Bahn kommen

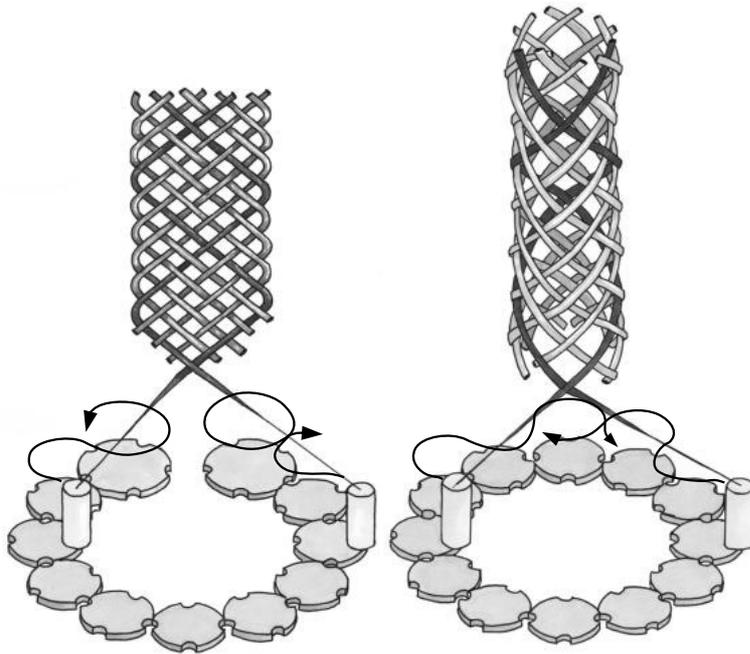


Abbildung 3.14: Klöppelweg bei Flachgeflechtem (links) und Rundgeflechtem (rechts)

und nun zum anderen Ende der Bahn laufen. Das Umlenken erfolgt über ein spezielles Flügelrad, das häufig etwas größer ist und so eine Position mehr aufweist als die anderen Flügelräder. Dadurch wird gewährleistet, dass es zu keiner Kollision der Klöppel kommt. In Abbildung 3.14 ist ein Flachgeflecht mit dem angedeuteten Weg eines Klöppels gezeigt. Obwohl das Geflecht flach ist, werden die Flügelräder im Allgemeinen nicht in einer Reihe angeordnet, sondern ebenfalls kreisförmig. Hintergrund ist der möglichst gleichbleibende Abstand vom Klöppel zum Flechtputz. Bei einer geraden Anordnung der Flügelräder würde die Länge stark variieren. Da sich die Klöppel deutlich schneller bewegen, als das Geflecht aus der Maschine gezogen wird, müssten die Klöppel, welche sich vom Rand der Flügelradreihe zur Mitte bewegen, relativ viel Faden wieder aufnehmen. Dies ist mit oben vorgestellten Klöppelbauweisen nicht in einem ausreichenden Maße möglich.

Flachbettmaschinen

Bei Flachbettmaschinen sind die Flügelräder und damit auch die Klöppel in einer Ebene angeordnet. Die Ebene ist im Allgemeinen waagrecht angeordnet. Der Maschinenrumpf bildet also ein flaches Bett. Die Klöppel sind sämtlich parallel zueinander und meistens orthogonal zum Maschinenbett. Bei einer waagerechten Ausrichtung des Maschinenkörpers können die mit den Flügelrädern verbundenen Zahnräder in einem Ölbad laufen. Dies erlaubt einen ruhigen und gleichzeitig schnellen Lauf bei geringem Verschleiß. Die meisten Maschinen sind nach diesem Rumpfprinzip aufgebaut. Dies gilt sowohl für Litzenflechter, Maschinen für Rundgeflechte als auch für 3-D-Flechtmaschinen.

Die Anordnung der Flügelräder für Rund- und Flachgeflechte ist im Allgemeinen kreisförmig. Der Maschinenkörper weist oft innerhalb der Flügelräder einen Durchbruch auf. Durch diese Öffnung kann zusätzlich Material zugeführt werden, z. B. die sogenannte Seele bei Seilen. Die Klöppel sind oberhalb des Maschinenbettes angeordnet und auch der Abzug des Geflechts erfolgt noch oben hin.

Packungsflechter haben dagegen, wie in Abschnitt 3.2.5 beschrieben, einen anderen Fadenverlauf und damit auch eine andere Anordnung der Flügelräder. Die Flügelräder sind quadratisch – ähnlich einem Schachbrettmuster – angeordnet. Die einzelnen Klöppel bewegen sich in der durch die Flügelräder aufgespannten Ebene, je nach Maschine, auf zwei, drei oder vier verschiedenen Bahnen. Dabei können die Klöppel nicht zwischen den unterschiedlichen Bahnen wechseln. Man spricht auch von einem two-step-Braiding-Verfahren [40], da zwei Schritte notwendig sind, bis sich an der Ursprungsposition wieder ein Klöppel befindet. Aufgrund der definierten Wege können auch diese Maschinen sehr schnell laufen. Bei Packungsflechtern sind die Klöppel häufig hängend unterhalb des Maschinenbetts angeordnet. Der Abzug erfolgt auch nach unten. Ein Grund besteht in der gleichzeitigen Imprägnierung des Geflechts, welches durch einen Trichter mit dem Imprägniermittel gezogen wird.

Auch 3D-Flechtmaschinen sind als Flachbettmaschinen aufgebaut. Bei diesen Maschinen sind die Flügelräder auch auf einer Ebene schachbrettartig angeordnet. Die Anzahl der Flügelräder ist zumeist deutlich höher als bei den Packungsflechtern. An den Berührungspunkten der Flügelräder befinden sich im Maschinenbett Weichen, mit denen der Weg des Klöppels beeinflusst werden kann. Das heißt, die in Abbildung 3.10 sichtbare Nut, welche den Weg des Klöppels vorgibt, ist hier nicht mehr fix in die Maschine eingearbeitet, sondern mittels der Weichen manipulierbar. Dadurch wird eine sehr große Flexibilität der Maschine erreicht. Allerdings ist die Klöppeldichte im Allgemeinen deutlich geringer, um Kollisionen zu vermeiden.

Neben den hier beschriebenen Rumpfpinzipien für 3D-Flechtmaschinen gibt es auch Maschinen, die mit einem Schieber-System arbeiten. Auch hierbei handelt es sich um Flachbettmaschinen. Die Klöppel befinden sich in einem ebenen kartesischen und äquidistanten System (analog zu einem Schachbrettmuster). In den einzelnen Zellen können sich Klöppel befinden. Für die Bewegung der Klöppel werden immer ganze Zeilen oder Reihen verschoben. Im Allgemeinen werden immer alternierend alle Zeilen bzw. Reihen bewegt. Dabei werden benachbarte Reihen bzw. Zeilen in die entgegengesetzte Richtung verschoben. Die Verschiebung kann um eine Zelle, aber auch um mehrere auf einmal erfolgen. Die einzelnen Klöppel sind dabei Gruppen zugeordnet. Die Klöppel jeder Gruppe folgen einen definierten Weg in der Maschine. Damit entspricht jede Gruppe einem Fadensystem. In Abb. 3.15 ist der Bewegungsablauf der Klöppel in einer Schieber-Flechtmaschine schematisch dargestellt. Weiterführende Informationen finden sich in der Arbeit von Schneider [40] sowie den Veröffentlichungen von Kostar et al. [41,42].

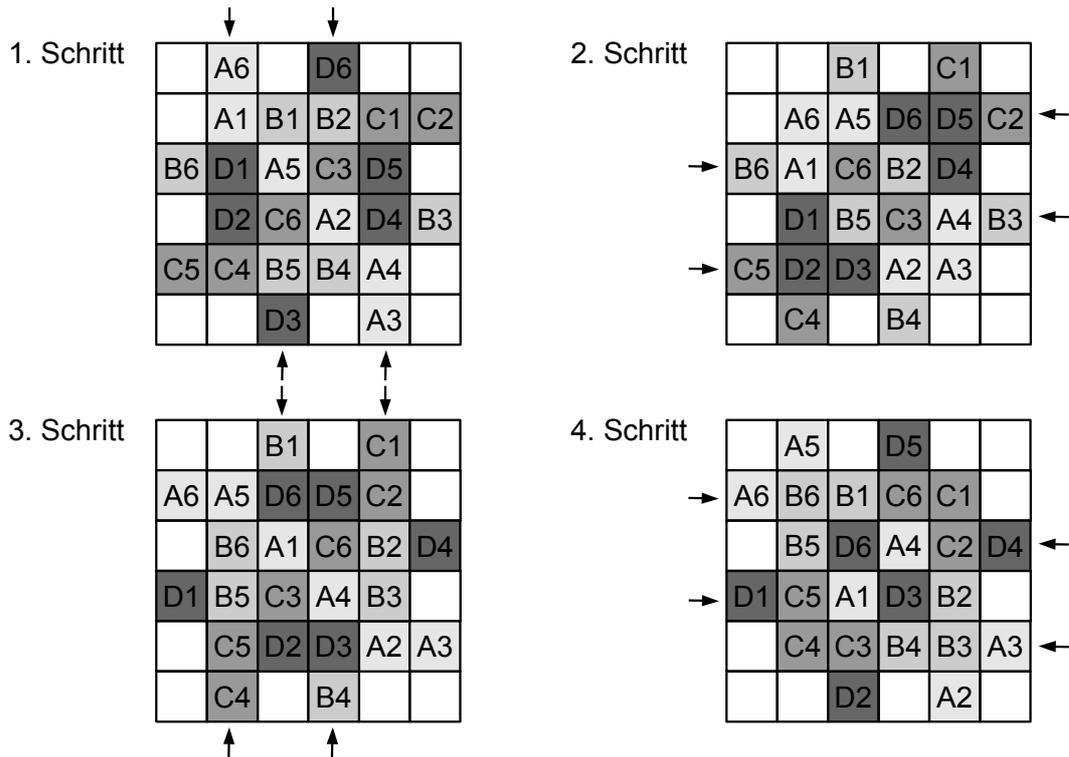


Abbildung 3.15: Funktionsweise und Weg der Klöppel in einer Schieber Flechtmaschine. Alle Klöppel mit einem Buchstaben gehören zu einem Fadensystem. 4 Schritte entsprechen einem Maschinenzyklus.

Tunnelflechter

Tunnelflechter entsprechen im Prinzip Flachbettmaschinen für Rund- und Flachgeflechte. Die Anzahl der Klöppel ist jedoch deutlich größer und die Maschinenebene ist nicht horizontal angeordnet, sondern vertikal. Das Maschinenbett bildet hier eine Art Ring, auf welchem die Klöppel laufen. Durch die vertikale Ausrichtung ist es nicht mehr möglich, dass die Zahnräder der Flügelräder in einem Ölbad laufen, unter anderem aus diesem Grund ist die Laufgeschwindigkeit eben dieser Maschinen geringer.

Radialflechter

Radialflechter weisen eine prinzipiell andere Anordnung der Flügelräder zueinander auf. Jene sind bei diesen Maschinen nicht mehr auf einer Ebene, sondern auf einem Zylindermantel angeordnet. Die Rotationsachsen der Flügelräder zeigen dabei alle auf den Mittelpunkt des Kreises. Diese Anordnung besitzt eine Reihe von Vorteilen bezüglich der Fadenführung in der Maschine (s. Abs. 3.3.3), aber auch einige Nachteile.

Die radiale Anordnung der Rotationsachsen der Flügelräder hat zur Folge, dass die Oberflächen der Flügelräder nicht mehr in einer Ebene liegen, sondern jeweils einen bestimmten Winkel zueinander aufweisen. Der Winkel ist abhängig von der Anzahl der Flügelräder. Beim Einsatz von ebenen Flügelrädern würde dies nach sich ziehen, dass ein Klöppelfuß bei der Übergabe von einem Flügelrad zum andern diese entweder verklemmen würde oder so viel Spiel aufweisen müsste, dass der gesamte Klöppel nicht mehr ausreichend geführt wird. Um dies zu verhindern, sind die Flügelräder nicht mehr eben, sondern sphärisch ausgeführt. Die Klöppel bewegen sich also nicht mehr – wie bei den Flachbettmaschinen – auf einer Ebene, sondern auf einer Kugeloberfläche.

Die radiale Anordnung bedingt ebenfalls, dass der Maschinenrumpf die Flügelräder umschließt und auf der Außenseite des Rumpfes die Spulen für die Stehfäden positioniert werden müssen. Dadurch weisen Radialflechter einen sehr großen Rumpfdurchmesser auf.

Radialflechter laufen aktuell noch nicht so schnell wie konventionelle Flechtmaschinen. Die Flügelraddrehzahl konnte zwar in den letzten Jahren deutlich gesteigert werden, sie ist aber immer noch lediglich halb so hoch wie bei konventionellen Maschinen.

Das Prinzip der Radialflechter wurde erstmals von der Firma Muratec aus Japan patentiert. Konsequenterweise umgesetzt und weiterentwickelt wurde es von der Firma Herzog, die zur Zeit als einziger Hersteller Maschinen in dieser Bauweise verkauft.

Rotationsflechter

Rotationsflechter weisen einen prinzipiell anderen Aufbau auf. Bei diesen Flechtmaschinen gibt es keine Flügelräder und auch der Klöppel ist vollkommen anders aufgebaut. Rotationsflechter werden aktuell nicht für die Verarbeitung von Glas- oder Kohlenstofffasern eingesetzt. Deshalb wird an dieser Stelle lediglich das Prinzip erklärt, aber nicht genauer auf die Maschinen eingegangen. Versuche am Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC) der Technischen Universität München (TUM) haben gezeigt, dass die Verarbeitung von Glas- oder Kohlenstofffasern auf Rotationsflechtern möglich ist. Derzeit verwendet werden Rotationsflechter vor allem in der Kabelindustrie.

Auch bei diesen Maschinen bewegen sich die Klöppel und damit die Spulen mit den Fäden auf Kreisbahnen. Die beiden Fadensysteme haben aber jeweils eine eigene Bahn mit einem anderen Durchmesser. Der jeweiligen Kreisbahn ist keine Sinusbewegung der Klöppel überlagert. Die Fäden der Klöppel des inneren Ringes laufen gerade vom Klöppel zum Flechtpunkt. Um die Verflechtung der Fäden des äußeren Systems mit dem inneren zu erzeugen, werden die Fäden des äußeren Systems mithilfe eines Hebels gemäß der Bindung über bzw. unter den Klöppeln des inneren Systems geführt. Damit dies möglich ist, bedarf es einer speziellen Führung der in-

neren Klöppel, da die Fäden des äußeren Klöppelsystems oberhalb, unterhalb und zwischen den Klöppeln entlanggeführt werden müssen. Die inneren Klöppel sitzen – beweglich gelagert – auf einem Ring, der mit dem Ring der äußeren Klöppel verbunden ist. Dieser Ring bewegt sich demnach in gleicher Richtung und gleicher Geschwindigkeit wie die äußeren Klöppel. Die inneren Klöppel sind nicht miteinander verbunden, sodass die Fäden des äußeren Klöppelsystems zwischen den Klöppeln hindurch können. Der Ring, auf dem die inneren Klöppel gelagert sind, weist an den Stellen, an denen die Fäden des äußeren Systems hindurchgeführt werden, senkrechte Nuten auf, durch welche die Fäden geführt werden. Die Nuten sind so schmal, dass sie die Lagerung der inneren Klöppel nicht stören. Die inneren Klöppel werden über eine Zahnradmechanik entgegen der äußeren Drehrichtung bewegt. Dadurch bewegen sich beide Klöppelsysteme immer gleich schnell in unterschiedliche Richtungen. Die Fäden des äußeren Systems werden regelmäßig zwischen den Klöppeln des inneren Systems in die Nut des Trägerringes des inneren Systems geleitet und in dieser Nut unter den Klöppeln entlang geführt, bis sie wieder zwischen zwei Klöppeln nach oben geführt werden. So entsteht im Flechtpunkt ein Geflecht. Dieses System bietet verschiedene Vor- und Nachteile. Dadurch, dass die Klöppel auf zwei separaten Ringen geführt werden, kann das Spulenvolumen größer ausfallen. Das höhere Gewicht der größeren Spulen stellt kein Problem dar, weil die Klöppel deutlich besser gelagert werden können. Auch können liegende Spulen verwendet werden, was für bestimmte Materialien von Vorteil ist. Da keine Sinusbewegung der eigentlichen Kreisbahn überlagert ist, werden die Klöppel nicht immer wieder in unterschiedlichen Richtungen neu beschleunigt. So werden starke Trägheitskräfte, die auf die Lagerung der Klöppel wirken, vermieden. Starke Beschleunigungen erfahren nur die Hebel, welche die Fäden des äußeren Systems führen und die Fäden selber. Dies führt dazu, dass Rotationsflechter etwa $1/3$ schneller laufen können als die oben beschriebenen Flechtmaschinen.

Diesen Vorteilen stehen folgende Nachteile gegenüber. Die Fäden der beiden Systeme werden durch unterschiedliche Klöppel geführt. Zudem werden nicht beide Fadensysteme miteinander verflochten, sondern das eine mit dem anderen. Dementsprechend wird ein Fadensystem gerade zugeführt und das andere wird um dieses System herum geflochten. Durch diese systembedingten Eigenschaften ist das entstehende Geflecht nicht so homogen bzw. gleichmäßig wie bei Flechtmaschinen mit Flügelrädern. Das spielt für einige Anwendungen keine Rolle, bei anderen ist dies von Relevanz. Des Weiteren können keine Stehfäden zugeführt werden, es sind also nur Biaxiale und UD-Geflechte möglich. Gerade für UD-Geflechte könnten die Maschinen jedoch sehr interessant sein, da hier bei den verschiedenartigen Fadensystemen auch differente Fasern verwendet werden und eine unterschiedliche Ablage deshalb keine Rolle spielt.

3.3.3. Fadenverlauf in der Maschine

Vereinfacht dargestellt, verlaufen die Fäden vom Klöppel zum Flechtpunkt. Der Flechtpunkt beschreibt den Punkt im Fadenverlauf, ab dem es keine Relativbewegungen zwischen dem betrachteten Faden und den anderen Flechtfäden gibt. Dieser Punkt liegt damit in dem Geflecht und stellt so keinen Punkt im eigentlichen Sinne dar, sondern bei Flachgeflechtem eine Linie, bei Rundgeflechtem einen Kreis und bei 3D-Geflechtem eine Fläche. Im Folgenden wird jedoch weiterhin vom Flechtpunkt gesprochen, da dieser Begriff etabliert ist. Die Lage des Flechtpunkts zur Maschinenbasis hängt zum einen vom Maschinentyp und zum anderen vom Flechtwinkel ab. Bei einem stabilen Flechtprozess, also wenn Parameter, wie insbesondere der Flechtwinkel, nicht verändert werden, ist der Flechtpunkt fest im Raum fixiert.

Bei Flachbettmaschinen und Tunnelflechtern sind die Klöppel alle parallel ausgerichtet. Der durch den Klöppel vorgegebene Fadenabzug wäre demnach ebenfalls parallel zueinander. Da die Fäden jedoch zusammengeführt werden müssen, ist dies nicht möglich. Deshalb erfolgt ein schräger Abzug aus dem Klöppel gemäß Abbildung 3.16 zum Flechtpunkt hin. Der Winkel, mit dem die Fäden aus dem Klöppel gezogen werden, und damit auch die Lage des Flechtpunkts über der Maschinenbasis hängen vom Flechtwinkel bzw. der Geschwindigkeit ab, mit welcher die Fäden aus den Klöppeln gezogen werden. Der Zusammenhang zwischen Flechtwinkel und Abzugsgeschwindigkeit ist in Abschnitt 4.1 beschrieben. Je kleiner der Flechtwinkel und je höher damit die Abzugsgeschwindigkeit ist, desto weiter wandert der Flechtpunkt von der Flügelradenebene weg. Damit wird auch der Winkel, mit dem der Faden aus dem Klöppel gezogen wird, kleiner. Idealerweise wird der Flechtpunkt verwendet, welcher sich natürlich einstellt. Insbesondere bei sehr kleinen oder großen Flechtwinkeln ist dieser aber entweder zu dicht an der Maschine oder zu weit weg. In diesen Fällen wird der Flechtpunkt künstlich mittels einer Flechtscholle leicht gehoben oder gesenkt. Eine Flechtscholle ist im einfachsten Fall ein Ring, durch den das Geflecht gezogen wird, bzw. ein Kegel, über den das Geflecht gezogen wird. Hierzu finden sich in [26] und [43] weitere Informationen. Die Flechtschollen sollen den Fadenweg allerdings nur geringfügig verändern.

Es gibt Fälle, in denen ein Abzug entgegen der Ausrichtung der Klöppel notwendig oder erwünscht ist, also durch das Maschinenbett hindurch. Hierfür ist ein Ring notwendig, der im Folgenden als Flechtring bezeichnet wird. In der klassischen Flechterei wird auch von einer Ringscholle gesprochen. Der Flechtring befindet sich idealerweise im Bereich des Flechtpunkts und ist vom Durchmesser wenig größer als das erzeugte Flechtprodukt. Die Fasern laufen zum Flechtring und werden an diesem soweit umgelenkt, bis der Flechtschlauch durch die Maschinenebene hindurchgezogen werden kann.

Der schräge Abzug aus dem Klöppel hat einen weiteren Effekt zur Folge, der ganz entscheidend für den Aufbau und die Funktion des Klöppels ist. Der Klöppel bewegt sich durch die Flügelräder auf einer kreisförmigen Sinusbahn um die Mittelachse der Maschine. Dementsprechend verändert sich der radiale Abstand vom Klöppel zur Mittelachse ständig. Die Schwankungsbreite entspricht etwa dem Flügelraddurchmesser. Gemäß Abbildung 3.16 ändert sich damit ebenfalls die Fadenslänge vom Klöppel zum Flechtpunkt. Die Längeänderung Δl_{ff} kann wie folgt bestimmt werden.

$$\Delta l_{ff} = \sqrt{\frac{(D_{FM} + D_{St})^2}{4} + (h_{Fp} - h_K)^2} - \sqrt{\frac{(D_{FM} - D_{St})^2}{4} + (h_{Fp} - h_K)^2} \quad (1)$$

Dabei ist h_{Fp} die Höhe des Flechtpunkts über der Flügelradenebene, h_K die Höhe eines Klöppels, D_{fm} der Durchmesser des Flügelradrings und D_{st} der Stich.

Die Längenänderung der Flechtfäden erfolgt deutlich schneller als der Abzug des Fadens aus dem Klöppel. Um trotzdem eine gleichbleibende Fadenspannung zu gewährleisten, muss der Faden in den Klöppel zurückgezogen werden. Dies muss verhältnismäßig schnell geschehen – auch muss direkt danach wieder mindestens die gleiche Fadenmenge zur Verfügung gestellt werden. Hierfür wird die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene Fadenreserve, die zumeist über einen Hebelmechanismus realisiert wird, verwendet. So wird eine ständige starke Beschleunigung der Spule vermieden, die gerade bei großen Spulen aufgrund der Massenträgheit problematisch wäre.

Bei einem niedrigen Flechtpunkt und einem großen Stich wird der benötigte Fadenrückzug relativ groß und geht in den Bereich von mehreren Zentimetern.

Bei 3D-Flechtmaschinen ist dieser Effekt noch größer, da hier die Klöppel von einer Ecke der Flügelradenebene über das Zentrum hin zur gegenüberliegenden Ecke

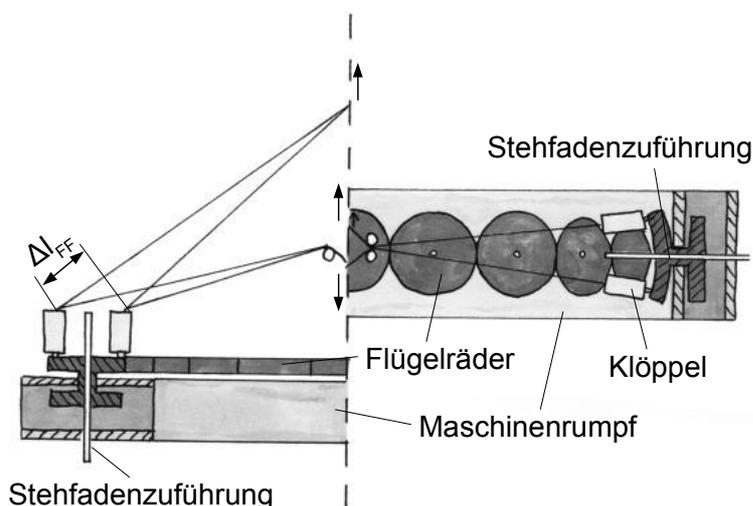


Abbildung 3.16: Aufbau verschiedener Maschinenkonzepte; links: Flachbettmaschine; rechts: Radialflechter

laufen können. Dabei kommt es zu einer erheblichen Verkürzung der Fadenlänge, die vom Klöppel aufgenommen werden muss.

Radialflechter weisen hingegen einen deutlich anderen Fadenverlauf in der Maschine auf. Die Klöppel sind hier radial ausgerichtet und zeigen auf das Zentrum der Maschine. Der Abzug der Fäden erfolgt in genau diese Richtung, sodass die Fäden nicht schräg aus dem Klöppel herausgezogen werden müssen. Der Flechtpunkt liegt allerdings nicht im Zentrum der Maschine, sondern, wie bei den Flachbettmaschinen, außerhalb der Flügelradenebene. Der Abstand vom Flechtpunkt zum Maschinenmittelpunkt ist ebenfalls wie bei den Flachbettmaschinen, abhängig vom Flechtwinkel. Um zu gewährleisten, dass die Fäden zuerst in Richtung Maschinenmittelpunkt laufen und erst später in Richtung Flechtpunkt, wird ein Flechtring verwendet. In Abbildung 3.16 ist der so entstehende Faserweg dargestellt. Die Fasern verlaufen vom Klöppel zum Flechtring, werden hier umgelenkt und laufen dann zum Flechtpunkt. Durch diesen Aufbau der Maschine und den so erzeugten Fadenweg, ist ein Rückzug des Fadens in den Klöppel theoretisch nicht notwendig. Wenn sich die Klöppel auf einer Zylinderfläche bewegen würden und nicht auf einer Kugelfläche, wäre ein sehr geringer Rückzug notwendig.

Bei dieser Betrachtung des Faserwegs wird allerdings die Interaktion der Fäden untereinander vernachlässigt. Hierdurch wird der Fadenweg ebenfalls erheblich beeinflusst. Wie in Abbildung 3.17 dargestellt, ist der Weg vom Klöppel zum Flechtring weder in der Draufsicht auf die Maschinenebene, noch in einem Schnitt senkrecht zur Maschinenebene gerade. Die Flechtfäden werden – vom Klöppel kommend – nicht erst am Flechtring auf die Mittelebene der Flechtmaschine gezogen, sondern schon deutlich früher durch die Überkreuzungen mit den anderen Flechtfäden. Von diesem Punkt aus verlaufen die Fäden dann in der Mittelebene zum Flechtring. Aufgrund dessen ist ein geringer Fadenrückzug notwendig. Dieser ist allerdings deutlich geringer als bei Flachbettmaschinen.

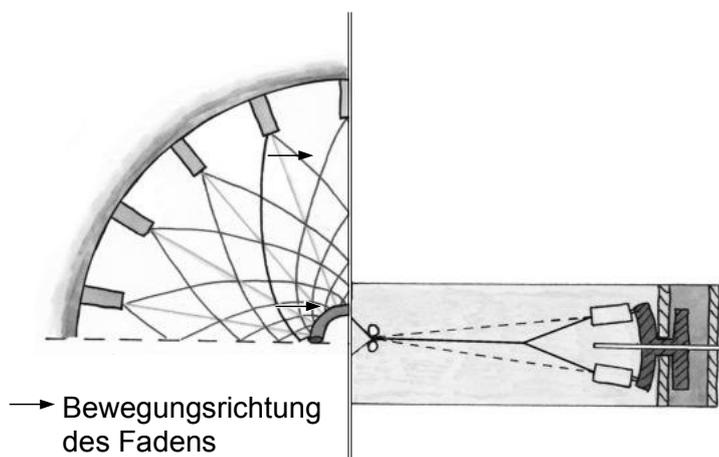


Abbildung 3.17: Durch Kontakt und Reibung mit den anderen Flechtfäden auftretender Fadenverlauf in einer Radialflechtmaschine

In der Maschinenebene werden die Fasern durch die gegenseitige Reibung auf eine gebogene Bahn gezwungen. Dies führt auch dazu, dass die Relativbewegungen zu den Stehfäden in Klöppelnähe noch quer zum Stehfaden sind, in Nähe des Flechtringes aber einen hohen Anteil in Längsrichtung des Stehfadens aufweisen.

Der Fadenweg vom Flechtring zum -punkt ist durch von Reden [44] genauer untersucht und beschrieben worden, deshalb soll an dieser Stelle nicht genauer darauf eingegangen werden.

Der Weg der Stehfäden ist dagegen einfach, auf geradem Weg von der Zuführposition zum Flechtunkt. Nur bei einer unsymmetrischen Besetzung der Flechtfäden kann es zu Abweichungen kommen. Da die Stehfäden von den Flechtfäden eingeschlossen werden, verlaufen die Stehfäden in einer gemeinsamen Fläche mit den Flechtfäden. Bei Radialflechtmaschinen werden die Stehfäden ebenfalls am Flechtring umgelenkt.

Bei der Herstellung von Seilen werden häufig weitere Fäden zugeführt, welche von den Flechtfäden umschlossen, aber nicht eingeflochten werden. Diese Fäden werden als Seele bezeichnet und von außerhalb direkt zum Flechtunkt geführt.

Auch bei der Herstellung von Bauteilen aus FVW werden neben den Flecht- und Stehfäden teilweise weitere Fasern durch die Flechtmaschine ergänzende Komponenten zugeführt.

UD-Bänder

Viele Bauteile erfordern einen sehr hohen Anteil an Material in 0° -Richtung. Dies kann durch den Einsatz von 0° -Geflechten erreicht werden. Wenn aber sehr gute Kennwerte benötigt werden und gleichzeitig die Gefahr eines Impacts gering ist, bietet sich auch der Einsatz von zugeführten Bändern an. Die Bänder werden direkt vor dem Flechtunkt zugeführt und dann vom Geflecht umschlossen. Um ein Verutschen zu vermeiden, werden die Bänder auf dem Kern oder den unteren Lagen (s. folgender Abschnitt) leicht fixiert. Von der Airbus Group Innovations wurde eine Anlage mit entsprechenden Zusatzeinrichtungen aufgebaut und erfolgreich getestet [34].

90° -Wickler

Es ist nicht möglich, Fasern senkrecht (90°) zur Produktionsrichtung abzulegen. Dies wird aber teilweise benötigt. Um die 90° dennoch zu realisieren, werden sog. 90° -Wickler eingesetzt. Hierbei handelt es sich um Zusatzgeräte, die meistens hinter dem Flechtunkt das Flechtprodukt mit einem oder zwei Fäden umwickeln. Dadurch werden zwar nicht exakt 90° erreicht, die Abweichungen sind jedoch sehr gering.

Mithilfe eines derartigen Wicklers lassen sich auch weitere Effekte für Preforms erreichen. Die Wicklung kann mit einer hohen Fadenzugkraft aufgebracht werden. Dadurch werden die bereits auf dem Kern vorhandenen Flechtlagen kompaktiert. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn ein Bauteil aus vielen Lagen aufgebaut ist. Zudem ist es möglich, lokale Einschnürungen zu erzeugen. Auch das Konzept des 90°-Wicklers wurde beispielhaft von der EADS-IW umgesetzt [34].

3.3.4. Effekte am Flechtring

Bei einer Radialflechtmaschine werden die Fasern am Flechtring umgelenkt. Dort laufen die Fasern aller Fasersysteme, also die beiden Flechtfadensysteme und die Fasern der Stehfäden über den Flechtring. Aufgrund der Bewegung der Klöppel gleiten die Flechtfäden dabei in Umfangsrichtung über den Ring, während sie gleichzeitig quer dazu abgezogen werden. Durch die unterschiedliche Laufrichtung der Klöppel bewegen sich die Fäden in Umfangsrichtung in entgegengesetzter Richtung (s. Abb. 3.18). Dementsprechend stoßen die Flechtfäden aufeinander und müssen über- bzw. untereinander hinweggleiten. Aufgrund der Fadenspannung geschieht dies verzögert, d. h. die Fasern bleiben erst aneinander hängen, bis aufgrund der Weiterbewegung der Klöppel die Querkraft groß genug ist, um die Fäden aneinander vorbeizuziehen. Es kommt nun zu einer kurzen ruckartigen Bewegung bis zum nächsten entgegenkommenden Faden. Neben einer sehr ungleichmäßigen Bewegung der Fäden am Flechtring kommt es zu einer teilweise starken Schädigung. Diese Effekte lassen sich durch zwei Maßnahmen deutlich reduzieren.

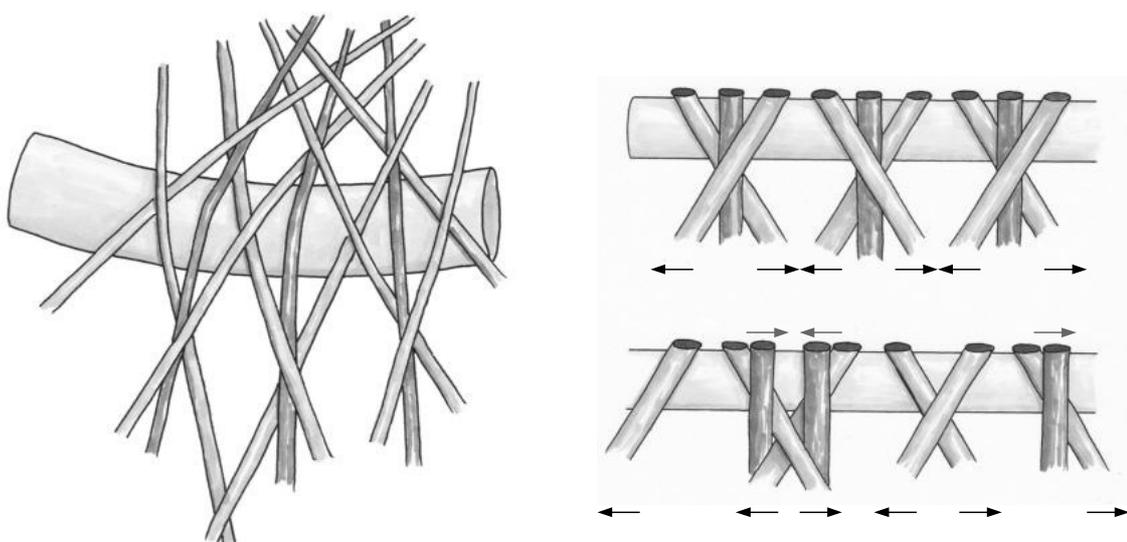


Abbildung 3.18: Verschiebung der Stehfäden am Flechtring; links: Geflecht am Flechtring; rechts oben: gleichmäßig verteilte Stehfäden entlang des Flechtrings; rechts unten: verschobene Stehfäden aufgrund der Mitnahme durch die Flechtfäden

Vibration

Der Flechtring kann in Vibrationen versetzt werden. Diese sollten in Richtung der Symmetrieachse des Flechtrings erfolgen. Durch die Vibrationen gleiten die Fasern erheblich leichter und schneller übereinander. Der Bewegungsablauf am Flechtring verläuft deutlich gleichmäßiger.

Flechtringgröße

Der Flechtring sollte nur wenig größer sein als das Endprodukt (im Durchmesser 1 cm bis 2 cm). Das Geflecht hat sich in diesem Bereich bereits fast vollständig zusammengezogen. Die Faserbewegungen sind dementsprechend gering. Durch das schon sehr enge Geflechtbild liegen die Fasern bereits größtenteils übereinander, so dass die Fasern nicht mehr aneinander hängenbleiben können.

Neben den Flechtfasern werden auch die Stehfäden über den Flechtring geleitet. Diese weisen allerdings keine Bewegung in Umfangsrichtung auf, sondern nur quer dazu. Es treten jedoch die gleichen Effekte auf. Die Fadenzugkraft in den Stehfäden kann deutlich von den Kräften in den Flechtfäden abweichen. Wenn das Verhältnis nicht stimmt, kann die Kraft zwischen Stehfäden und Flechtring so groß werden, dass die Flechtfäden nicht zwischen Stehfäden und Flechtring hindurchgezogen werden. Dementsprechend wird die Geflechtentstehung so gravierend behindert, dass der Prozess beendet werden muss.

Bei deutlich schmalere Steh- als Flechtfäden, einem offenen Geflecht oder einem sehr großen Flechtwinkel füllen die Stehfäden den Raum zwischen den Kreuzungspunkten der Flechtfäden nicht zur Gänze aus. In diesem Fall kommt es zu einem weiteren Effekt, welcher durch die Umlenkung am Flechtring hervorgerufen wird. Die Stehfäden positionieren sich nicht mittig zwischen den Kreuzungspunkten der Flechtfäden, sondern bilden Pärchen und rutschen zu einem bestimmten Kreuzungspunkt hin (s. Abb. 3.18). Verursacht wird dies durch die Flechtfäden, welche am Flechtring unter dem Stehfaden hindurchgezogen werden. Diese Fäden ziehen den Stehfaden bis zum Kreuzungspunkt heran. Die Flechtfäden eines Systems verlaufen stets abwechselnd unter und über den Stehfäden. Bei zwei benachbarten Stehfäden laufen insofern jeweils Flechtfäden unterschiedlicher Richtungen unter den Stehfäden hindurch. Dadurch werden stets zwei Stehfäden zusammengezogen.

3.3.5. Abzug von Geflechten

Das in der Maschine produzierte Geflecht muss abgezogen und gespeichert werden. Hierbei treten je nach Zielstellung signifikante Unterschiede auf. Für die Produktion von Meterware, wie z. B. Seile oder Schläuche, muss ein gleichbleibendes Produkt gleichmäßig abgezogen werden. Wenn die Flechttechnik eingesetzt wird, um Vorformlinge herzustellen, bedarf es einer hohen Flexibilität des Abzugs.

Für den Abzug von Meterware werden im Allgemeinen Walzensysteme verwendet. Um oder zwischen den Walzen verläuft das Geflecht und wird mit einer konstanten Geschwindigkeit aus der Flechtmaschine herausgezogen. Der genaue Aufbau und die Anordnung der Walzen hängen von dem gefertigten Produkt ab. Hierzu finden sich in den bereits mehrfach genannten Publikationen von Prof. Engels [43, 26] einige Beispiele. Der Antrieb des Abzugs ist oft mit dem Antrieb der Flechtmaschine mechanisch gekoppelt, sodass die Produktionsgeschwindigkeit mit der Abzugsgeschwindigkeit übereinstimmt. Eine Veränderung des Verhältnisses erfolgt über Getriebe.

Für die direkte Produktion von Vorformlingen bedarf es einer komplexeren Technik. Hier muss das Geflecht direkt bei der Herstellung in die gewünschte Geometrie gebracht werden. Für Rundgeflechte erfolgt dies über Körper, sog. Kerne, deren Oberflächengeometrie der Geometrie des Bauteils entspricht, welches hergestellt werden soll. Diese Kerne werden durch den Flecht punkt geführt, während das Geflecht entsteht. Das Geflecht legt sich dabei, sofern möglich, auf der Oberfläche ab und bildet eine Art Haut. Auf diese Weise wird die Oberfläche kopiert und das Geflecht nimmt die Form an, die das Bauteil haben soll. Je nach Komplexität des Kerns und damit auch des Vorformlings, der hergestellt werden soll, ist dabei die Bewegung des Kerns in Richtung und Geschwindigkeit variabel. Direkt im Flecht punkt sollte der Abzug dabei stets in Richtung der Symmetrieachse der Flechtmaschine erfolgen. Der Kern kann dabei auf unterschiedliche Art bewegt werden. Häufig werden Industrieroboter verwendet. Für simplere Geometrien sind aber auch Linearsysteme möglich. Vereinzelt gibt es auch Anlagen, bei denen der Kern feststeht und die ganze Flechtmaschine bewegt wird.

Dreidimensionale Geflechte bilden schon einen Volumenkörper und werden im Allgemeinen als Meterware abgezogen. Auch Flachgeflechte werden meistens in Meterware produziert. Es gibt aber Untersuchungen, bei denen Flachgeflechte mittels einer Kulisserie direkt am Flecht punkt oder kurz danach in eine bestimmte Form gebracht werden.

3.3.6. Integration der Flechtmaschine im Produktionsprozess

Die zuvor genannten Zusatzmodule, aber auch der Abzug zeigen, dass die Flechtmaschine insbesondere für Faserverbundbauteile nur eine Komponente einer größeren Produktionsanlage ist. Neben der Verknüpfung mit verschiedenen Zusatzmodulen werden häufig gerade für komplexere Strukturen einer oder mehrere Industrieroboter eingesetzt. Alle Komponenten einer derartigen Anlage müssen steuerungstechnisch miteinander verknüpft werden. Das führt dazu, dass für die Produktion einer geflochtenen Preform der Aufbau einer umfangreichen Anlage notwendig ist, in welcher die Flechtmaschine eine Komponente bildet. Für die Produktion von Spanten wurde durch die Airbus Group Innovations eine derartige Anlage aufgebaut (s. Abb. 3.19).

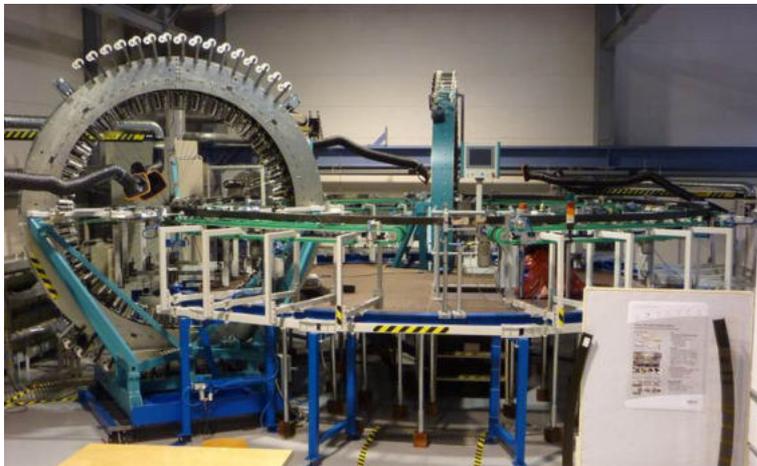


Abbildung 3.19: Produktionsanlage für Spante mit zwei Flechtmaschinen sowie einer UD-Zuführung und einer 90°-Wickeleinheit (Quelle: Airbus Group Innovations¹)

3.4. Geflochtene Faserverbundbauteile

Die Verarbeitung von Verstärkungsfasern erfolgt sowohl als Meterware, als auch direkt zu Vorformlingen. Flachgeflechte, Rundgeflechte und z. T. 3D-Geflechte bilden bei der Verarbeitung als Meterware ein Halbzeug, welches in einem weiteren Schritt auf die notwendige Länge geschnitten und so umgeformt (drapiert) wird, so dass sich die gewünschte Preform ergibt. Diese Produkte können auch mit anderen Halbzeugen, wie MAG oder Gesticken kombiniert werden. Dies entspricht der klassischen Herstellungsweise von Faserverbundbauteilen. Daneben existiert die endkonturnahe Fertigung. Hier wird die Preform mittels des zuvor beschriebenen Kerns direkt im Flechtprozess hergestellt. Diese Methode wird fast ausschließlich mit Rundgeflechten durchgeführt. 3D-Geflechte können ebenfalls, auch wenn Sie als Meterware abgezogen werden, direkt der Endkontur entsprechen. Daneben ist es

¹ Airbus Defence and Space GmbH; München

bei 3D-Flechtmaschinen möglich, aufgrund der Flexibilität der Maschinen eine Art Meterware zu produzieren, die eine Veränderung in der Geometrie aufweist.

Ob direkt oder mittels eines Halbzeugs hergestellt, ist das Ergebnis eine Preform, die noch mit Harz versetzt werden muss. Dazu bedarf es immer einer Form, die die Geometriegenauigkeit gewährleistet. Bei der direkten Herstellung kann der Kern als Form oder Teil der Form dienen. Dieser muss dann so ausgelegt sein, dass er nicht nur den Ansprüchen als Flechkern genügt, sondern auch denen als Injektions- oder Infiltrationsform. Ebenso ist zu bedenken, wie der Kern wieder aus dem dann harten Bauteil entfernt werden kann, falls dies notwendig ist.

Die Art des Kernsystems hat somit einen erheblichen Einfluss auf die gesamte Prozesskette und auch auf Produktkosten. Dabei werden ganz unterschiedliche Systeme verwendet. Von metallischen, über schmelzbaren bzw. wasserlöslichen bis zu sehr leichten Holz- oder Schaumkernen. Außerdem gibt es auch gebaute Kerne, die bestimmte zusätzliche Funktionen erfüllen [45-47].

3.5. Beurteilung der Techniken

Es wurden eine Reihe verschiedener Systeme vorgestellt. Alle Systeme verfügen über ihnen immanente Vor- und Nachteile. Im Folgenden soll kurz beleuchtet werden, wie die Systeme in Hinblick auf die Herstellung von Prefoms für Faserverbundbauteile zu beurteilen sind. Für die Beurteilung wurden keine umfassenden Versuchsreihen durchgeführt. Die Beurteilung beruht auf eigenen Erfahrungen, die im Laufe der Zeit gesammelt wurden. Es ist auch festzustellen, dass sich durch die Weiterentwicklung der Maschinenteknik und der Fasern die Anwendungsbereiche verschieben können. Des Weiteren ist natürlich jeder Herstellungsprozess am Ende separat zu bewerten, da jeder Prozess spezielle Anforderungen aufweist. Dessen ungeachtet ist eine verallgemeinerte Aussage möglich, die erste Hinweise bezüglich der Eignung der Maschinen ermöglicht.

Herstellungsweg

Mengenmäßig werden aktuell die meisten verflochtenen Glas- und Kohlenstofffasern zu Halbzeugen verarbeitet. Dies hat zwei Gründe. Für die Flechtereien ist dies der etablierte Weg. Sie stellen einen Schlauch oder ein Flachgeflecht her, welches aufgewickelt werden kann und so verkauft wird. Auch der Industrie, die Faserverbundbauteile herstellt, ist der Weg bekannt, ein trockenes Halbzeug zu kaufen und dieses in die gewünschte Form zu bringen und weiterzuverarbeiten. Für eine größere Serienfertigung mit hohen Qualitätsansprüchen und akzeptablen Preisen ist dieser Weg der Verarbeitung nicht zielführend. Er weist eine Reihe von Nachteilen auf:

- Es sind viele Einzelschritte notwendig. Der Vorteil einer direkten Verarbeitung von der Faser zur Preform wurde bereits beschrieben.
- Das trockene Halbzeug garantiert keine feste Fixierung der Fasern. Es ist bei der Verarbeitung mit Faserverzug zu rechnen. Um dies zu vermeiden, bedarf es einer hohen Sorgfalt bei der Verarbeitung.
- Die vielen Verarbeitungsschritte führen immer wieder zu Schädigungen der Fasern. Dadurch sinken die erreichbaren Kennwerte.
- Es ist praktisch keine in dem Prozess integrierte Qualitätskontrolle möglich. Diese muss nachträglich am fertigen Produkt stattfinden, als separater Prozessschritt erfolgen oder ganz wegfallen. Eine nachträgliche Kontrolle ist in Großserien mit Produktionsraten im Minutentakt nicht möglich, eine ausbleibende Qualitätskontrolle für alle sicherheitsrelevanten Bauteile nicht tolerabel und eine separate Prüfung mit hohen Kosten verbunden.
- Eine Automatisierung des Prozessablaufs ist nur bedingt möglich.
- Es fällt zusätzlicher Verschnitt an. Speziell bei der Verarbeitung der teuren Kohlenstofffasern schlägt sich dies in den Produktkosten nieder.

Die oben genannten Punkte treten nicht oder in deutlich geringerem Maß bei einer direkten Herstellung der Preform durch die Umflechttechnik auf. Außerdem erlaubt diese Technik einen größeren Designfreiraum bezüglich der Geometrien des Bauteils, solange es sich um Hohlkörper handelt. Die Verarbeitung von triaxialen Geflechtes und UD-Geflechtes ist sogar praktisch nur mittels der Umflechttechnik möglich.

Aus den zuvor genannten Gründen sollte die Herstellung von Preforms mittels der Flechttechnik im Allgemeinen mittels der Umflechttechnik erfolgen. Dies gilt nicht für 3D-Geflechtes. Diese bilden keinen Hohlkörper und sind deshalb nicht in besagter Technik herstellbar.

Maschinentypen

Auch bei den Maschinentypen sind Unterschiede feststellbar. Für die Umflechttechnik ist aktuell der Radialflechter der am besten geeignete Typ. Aufgrund seiner Bauweise ergibt sich eine geringere Faserschädigung. Es ist zwar partiell eine zusätzliche Umlenkung der Fasern notwendig, diese erfolgt aber erst am Flechtring nahe des Flechtpunkts. Hier stützen und schützen sich die Fasern gegenseitig bereits sehr gut. Beim Verlassen des Klöppels wird der Faden kaum oder gar nicht umgelenkt. Mit Radialflechtern ist überdies ein Flechten in zwei Richtungen möglich, ohne dass sich die Randbedingungen ändern. Die Maschinen laufen allerdings aktuell noch langsamer als vergleichbare Flechbettmaschinen.

Rotationsflechtmaschinen, welche eine prinzipiell andere Funktionsweise aufweisen, offenbaren theoretisch zwei entscheidende Nachteile. Durch die unterschiedlichen

Klöppel ist die Faserablage nicht gleichmäßig. Das ist vor allem für Faserverbundbauteile wichtig. Weiterhin kommt es an dem Klöppel mit dem Schwinghebel zu sehr starken Gleitbewegungen der Rovinge über die Führungselemente. Dadurch ist eine starke Schädigung der Fasern zu erwarten. Hierbei handelt es sich aber um theoretische Überlegungen, da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Versuche mit Rotationsflechtmaschinen unternommen worden sind. Aufgrund ihrer Funktionsweise lassen sich keine Stehfäden in das Geflecht integrieren. Als eindeutiger Vorteil kann die höhere Produktionsgeschwindigkeit angeführt werden. Für UD-Geflechte können Rotationsflechter dagegen sehr interessant sein, da hier die Stützgarne mittels des äußeren Klöppelssystems verarbeitet werden können.

3D-Flechtmaschinen haben die größte Flexibilität bezüglich der Klöppelbewegung. Das macht sie vor allem für Forschungseinrichtungen interessant. Allerdings ist die Prozessgeschwindigkeit sehr langsam, weshalb sie für industrielle Anwendungen zur Zeit lediglich von begrenztem Interesse sind. Einzig für die Herstellung von bestimmten Voll-Profilen (z. B. Dreiecksprofile als Zwickelfüller) existiert ein Markt, der mit diesen Maschinen abgedeckt wird.

3.6. Material-Kennwerte

Als Materialeigenschaften werden im Folgenden die Festigkeit und Steifigkeit betrachtet, da diese wesentliche Eigenschaften für Bauteile sind. Dafür werden sowohl eigene Untersuchungen als auch Daten aus der Literatur herangezogen. Bei FVK ist es notwendig, zwischen Zug- und Druckkennwerten zu unterscheiden, da diese häufig deutlich voneinander abweichen. Aufgrund der Anisotropie von FVK ist es überdies vonnöten, differente Belastungsrichtungen zu betrachten [20]. Neben den typischen Zug- bzw. Druckkennwerten gibt es noch eine Reihe weiterer Kennwerte, welche bestimmt werden können. Dazu zählen Open Hole Tension (OHT), Open Hole Compression (OHC), Inplane Shear Strength (IPSS), Interlaminar Shear Strength (ILSS), G_{1C} und G_{2C} . Bei der Bestimmung von IPSS treten gerade bei Geflechten häufig Probleme auf [48, 49], sodass eine Messung nur bedingt möglich ist. Dies liegt an den häufig sehr guten Schubkennwerten von Geflechten. Es kommt nicht zu dem gewünschten Versagen der Probekörper, sondern zu einem Versagen im Einspannungsbereich. Insbesondere für Geflechte bieten sich runde Probekörper an, diese sind einfach herzustellen und sollten auch zuverlässige Ergebnisse liefern. In dem Bericht von Pierre J. Minguet et al. [50] konnten diese Probekörper allerdings nicht überzeugen. Die ermittelten Kennwerte waren niedriger als bei den Vergleichskörpern und wiesen beim E-Modul eine hohe Streuung auf. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um eine geeignete Testmethode zu entwickeln.

Die meisten Bauteile aus FVK sind aus einzelnen Lagen von Faserhalbzeugen aufgebaut. Dies führt dazu, dass Kennwerte wichtig sind, die eine Aussage über die

Festigkeit der einzelnen Lagen untereinander beschreiben. Dazu dienen der Zwischen-Lagen-Bruch (ILSS), G_{1C} und G_{2C} , sowie die Bestimmung der Festigkeit nach einer Schlagbeanspruchung (Compression after Impact, CAI).

Bei FVK muss die Anisotropie beachtet werden. Diese ist stark von der Faserorientierung abhängig. Deshalb ist es notwendig, für jede Lage mit ihrer jeweiligen Faserarchitektur, -kombination und -orientierung separate Kennwerte zu ermitteln. Aus diesen ergibt sich ein hoher Qualifizierungsaufwand für FVK, solange es noch keine ausreichend zuverlässigen Simulationenmethoden gibt (s. Abs. 6) und keine Bauteilqualifikation erfolgen soll.

Für die Ermittlung von Kennwerten werden häufig Dehnmessstreifen (DMS) eingesetzt. Dabei müssen die verhältnismäßig großen Einheitszellen von Geflechtern beachtet werden. Es gibt verschiedene Arbeiten, in denen das Verhältnis von DMS zu Einheitszelle untersucht wurde. Aus der Arbeit von Pierre J. Minguet et al. [50] stammt Abb. 3.20. Anhand dieser ist deutlich zu erkennen, dass die Streuung erheblich zunimmt, wenn der DMS kleiner als eine Einheitszelle wird, wodurch eine erheblich höhere Anzahl von Proben notwendig ist. Der Grund besteht darin, dass die Dehnung lokal innerhalb einer Einheitszelle gemessen wird, welche deutlich von der über der Einheitszelle gemittelten Dehnung abweichen kann. Eric J. Lang et al. [51] empfehlen sogar, ein ganzes Vielfaches einer Einheitszelle als Länge für einen DMS zu definieren, was aber schwer zu realisieren ist, da es DMS nur in definierten Längen gibt.

Neben der Frage der Länge der DMS stellt sich auch die Frage nach der Breite der Probekörper im Verhältnis zur Einheitszelle. Untersuchungen von Pierre J. Minguet et al. zeigen, dass es keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse gibt.

Die Materialeigenschaften werden nicht nur von den Fasern und der Faserarchitektur beeinflusst, sondern auch signifikant vom Harzsystem, in welches sie ein-

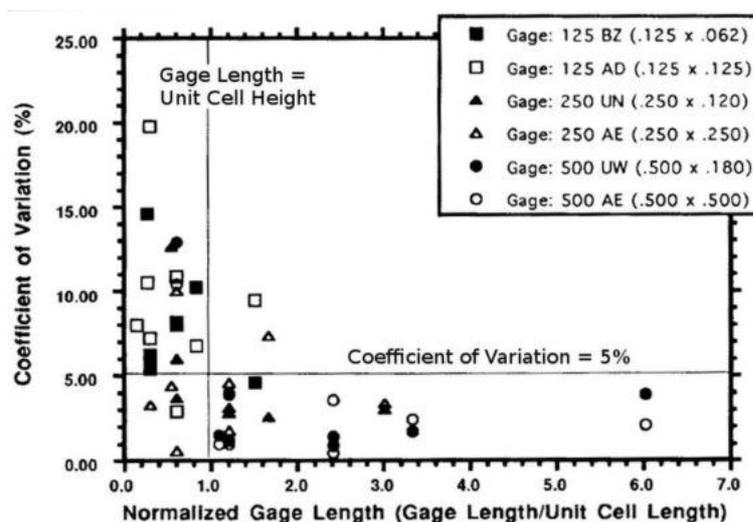


Abbildung 3.20: Streuung von Messergebnissen in Abhängigkeit von der DMS-Länge zur Größe der Einheitszelle; aus [50] Abb. 4.1

gebettet sind. Folgende Kennwerte sind eindeutig vom Harz beeinflusst: ILSS, G_{1C} oder G_{2C} . Auch bei Druckkennwerten spielt das Harz eine wichtige Rolle, da es die Fasern stützen muss. Hingegen ist bei Zugkennwerten entlang der Fasern zu erwarten, dass das Harzsystem von untergeordneter Rolle ist. Allerdings haben Versuche am IFB gezeigt, dass das Harzsystem auch hier einen erheblichen Einfluss hat, womit die Ergebnisse von Justin D. Littell [49] bestätigt werden. In Abb. 3.21 ist die Zug- und Druckfestigkeit von Geflechtem mit unterschiedlichen Harzsystemen dargestellt – bezogen auf den jeweils schlechteren Wert. Es ist zu erkennen, dass allein das Harzsystem den Kennwert um bis zu 40 % beeinflussen kann.

In der Arbeit von Justin D. Littell werden die Ursachen für den starken Einfluss des Harzes untersucht. Demnach treten bei der Belastung der Proben Mikrorisse zwischen Faser und Matrix entlang der Fasern auf. Die Mikrorisse entstehen aufgrund einer schlechten Faser-Matrix-Haftung und führen zu einem verfrühten Versagen. Für die Faser-Matrix-Haftung ist allerdings nicht nur das Harzsystem verantwortlich, sondern auch die verwendete Schlichte der Faser. Es ist wichtig, zu beachten, dass dieser Effekt nur die Festigkeit und nicht die Steifigkeit beeinflusst, solange die Belastungen unterhalb der Grenze des Auftretens der ersten Schäden bleibt.

Im Folgenden soll nicht ausführlich auf einzelnen Prüfverfahren, deren Vor- und Nachteile oder auf die mikro- und makroskopischen Ursachen für die erreichten Material-Eigenschaften eingegangen werden, es soll nur ein Überblick über Kennwerte von Geflechtem aufgestellt werden. Damit soll die Möglichkeit gegeben werden, die Potenziale von Geflechtem besser einordnen zu können.

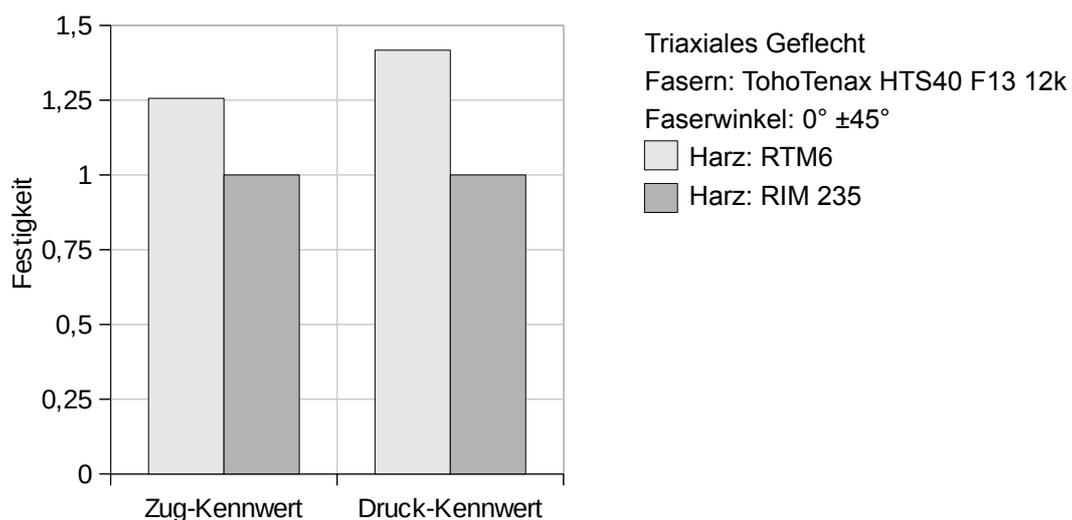


Abbildung 3.21: Vergleich von verschiedenen Harzsystemen bei ansonsten gleichen Faserhalbzeugen (Messungen des IFB an triaxialen Geflechtem). Die Werte sind auf den jeweils schlechteren bezogen.

3.6.1. Zug- und Druck-Eigenschaften

FVK bieten die meisten Potenziale bei Zugbelastungen in Faserrichtung, da dann die Fasern optimal belastet werden. Die Voraussetzung besteht darin, dass die Fasern in Krafrichtung orientiert sind. Deshalb werden gerne Kennwerte aus reinen UD-Proben in Faserlängsrichtung angegeben. Bei den meisten Bauteilen treten allerdings komplexere Lastfälle auf, sodass die Fasern in verschiedenen Richtungen orientiert sein müssen.

Bei Geflechtem muss neben der Geflechtart insbesondere auch die Prüfrichtung beachtet werden, da diese nicht immer intuitiv eindeutig ist. Triaxiale Geflechte und 0° -Geflechte geben mit der Richtung der Stehfäden zumeist auch die erste Prüfrichtung vor. Dadurch wird zwar nicht immer in einer der Richtungen mit dem höchsten Faseranteil gemessen, aber aus Symmetrie-Gründen ist die Prüfrichtung trotzdem sinnvoll. Biaxiale Geflechte und UD-Geflechte werfen dagegen die Frage auf, ob in Produktionsrichtung oder Faserrichtung geprüft werden soll. Die Prüfung in Faserrichtung ist insbesondere bei $\pm 45^\circ$ Geflechtem sinnvoll, da hier dann die Fasern zur Prüfrichtung in 0° und 90° orientiert sind. Bei anderen Faserwinkeln wird aus Symmetriegründen dagegen häufig in Produktionsrichtung geprüft, wodurch allerdings keine Fasern in Prüfrichtung liegen

Abb. 3.22 zeigt einige Kennwerte von verschiedenen Geflechtem. In Tabelle 3 sind die Proben genauer spezifiziert. Das UD-Geflecht und das 0° -Geflecht weisen die höchsten Zugfestigkeiten auf. Es ist jedoch zu beachten, dass das UD-Geflecht aufgrund seiner biaxialen Faserstruktur auch quer zur Prüfrichtung die gleichen Kennwerte aufweist, das 0° -Geflecht dagegen deutlich geringere.

Das biaxiale Geflecht hat aufgrund der Ondulation der Fasern eine etwas schlechtere Zugfestigkeit. Die Druckfestigkeit vom biaxialen Geflecht und UD-Geflecht sind dagegen in etwa gleich, wohingegen das 0° -Geflecht hier eine deutlich schlechtere Festigkeit aufweist.

Die triaxialen Geflechte haben deutlich geringere Festigkeiten als die anderen Geflechte. Dies liegt an dem geringeren Faseranteil in Prüfrichtung. Dieser liegt zwischen 30 % (Triax mit $0^\circ/\pm 30^\circ$) und 20 % (Triax mit $0^\circ/\pm 55^\circ$), während der bei den vorher genannten Geflechtem bei etwa 50 % gelegen hat. Dementsprechend fällt auch die Druckfestigkeit schlechter aus.

Geflecht	Fasertyp	Faserorientierung bei der Produktion	Prüfrichtung bzgl. Produktionsrichtung	Harz	Quelle / Literatur
Biax 45°	1	±45°	45°	RTM6	[52]
Triax 45°	1	0°/±45°	0°	RTM6	IFB
Triax 30°	1	0°/±30°	0°	RTM6	[53]
Triax 55	1	0°/±55°	0°	RTM6	[53]
0°-Geflecht	1 / 2	0°/±45°	0°	RTM6	[54]
UD-Geflecht	1	±45°	45°	RTM6	[32]

Fasertyp 1: Tenax HTS 40 F13 12k bzw. Vorgängerfaser Tenax HTS 5631

Fasertyp 2: 2x: SG EC9 136 Z28

Tabelle 3: Übersicht der in Abb. 3.22 dargestellten Geflechte mit der Angabe weiterführender Literatur

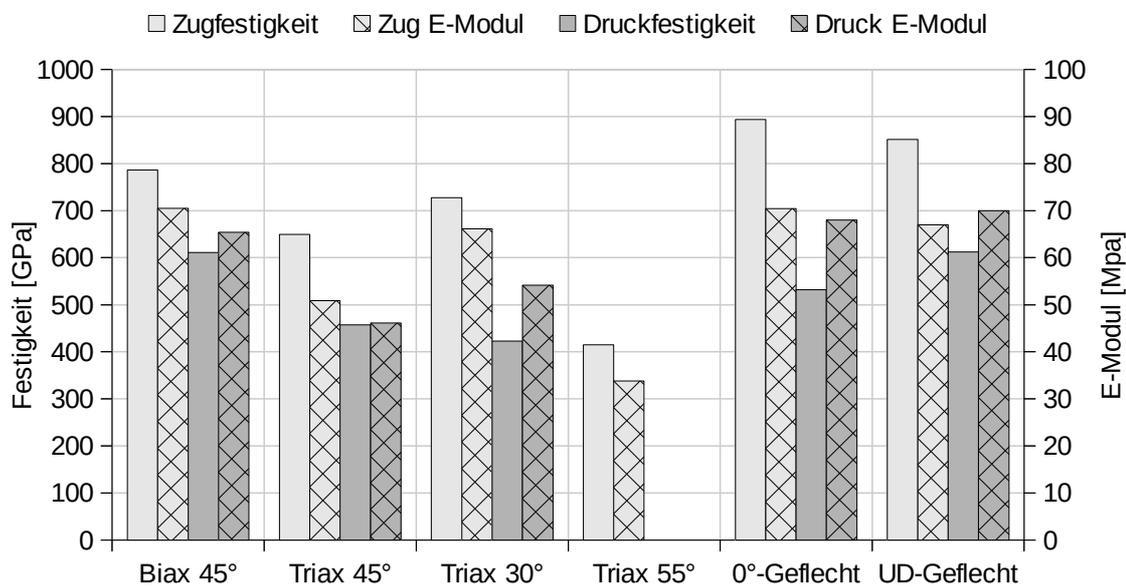


Abbildung 3.22: Zug- und Druckfestigkeiten sowie die entsprechenden E-Moduli von verschiedenen Geflechten; eine Spezifikation der Geflechte findet sich in Tabelle 3. Alle Prüfungen fanden bei RT und an nicht konditionierten Proben statt.

3.6.2. ILSS-Eigenschaften

Für die Bestimmung von ILSS-Kennwerten existieren verschiedene Prüfverfahren, die sich nicht alle für Geflechte eignen [56]. Einige Prüfverfahren sind nicht speziell für FVK entwickelt worden, sondern allgemein für Lamine, wie bspw. Holzlaminate. Häufig wird zur Bestimmung der ILSS eine 3-Punkt-Biegung eingesetzt (DIN EN 2377). Dieses Verfahren liefert allerdings bei Geflechtem selten gültige Ergebnisse. Ursache ist vermutlich, dass es, aufgrund welliger Oberfläche der einzelnen Lagen neben der rein Stoffschlüssigen auch zu einer formschlüssigen Kraftübertragung kommt.

Kurztitel	Fasertyp	Faserorientierung bei der Produktion	Prüfrichtung bzgl. Produktionsrichtung	Harz	Quelle/Literatur
Triax 35°	2 / 1	0°/±35°	0° und 90°	CR80	[55]
Triax 48°	2 / 1	0°/±48°	0° und 90°	CR80	[55]
Triax 60°	2 / 1	0°/±60°	0° und 90°	CR80	[55]

Fasertyp 1: Tenax HTS 40 F13 12k

Fasertyp 2: Tenax HTS 40 F13 24k

Tabelle 4: Übersicht der in Abb. 3.23 dargestellten Geflechte mit der Angabe von weiterführender Literatur

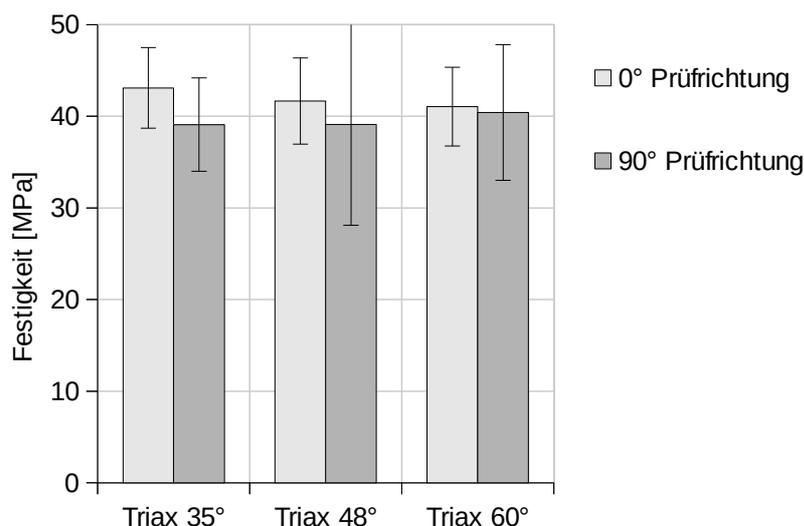


Abbildung 3.23: ILSS Festigkeiten für triaxiale Geflechte mit unterschiedlichen Winkeln sowie einer Prüfung längs und quer zur Produktionsrichtung

Zu aussagekräftigen Ergebnissen bei triaxialen und biaxialen Geflechtes führen bspw. der Schneid-Scher-Versuch [56] oder Prüfungen nach DIN 65148. Bei dem letzteren Verfahren ist die Probenherstellung allerdings deutlich aufwendiger.

Der Schneid-Scher-Versuch führt zu etwas besseren Ergebnissen, als die anderen Versuche. Dies ist vermutlich auf die seitliche Stützung zurückzuführen, die auftretende, orthogonal zur Prüfrichtung wirkende Kräfte aufnimmt und so die Klebschichten entlastet. Eine genaue Untersuchung hierzu fand allerdings im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht statt.

Die in Abb. 3.23 dargestellten ILSS-Werte zeigen zum einen, dass der Wert wenig abhängig von dem Faserwinkel und der Prüfrichtung ist. Zum anderen ist die große Standardabweichung auffällig, insbesondere bei den quer getesteten Proben. Bei dem Triax 48° und dem Triax 60° ist mit vier bzw. fünf die Anzahl der quer getesteten Proben allerdings auch sehr gering.

3.6.3. CAI-Eigenschaften

Mit den CAI-Kennwerten kann die Schlagempfindlichkeit von Materialien ermittelt werden. Diese spielt für Metalle häufig eine untergeordnete Rolle, für FVK ist sie jedoch zumeist entscheidend. FVK reagieren sehr empfindlich auf Schlagbeanspruchungen. Hierbei trennen sich die einzelnen Lagen voneinander, wodurch die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften erheblich herabgesetzt werden. Entscheidend für die Schlagunempfindlichkeit ist in erster Linie das Harzsystem. Aber auch die Faserarchitektur beeinflusst die CAI-Eigenschaften.

Erste Schäden durch einen Schlag treten bei FVK schon bei verhältnismäßig geringen Energien auf. Aus diesem Grund ist oft der mögliche Impact der kritische Auslegungsfall. So können schlagunempfindliche Halbzeuge mit eigentlich schlechteren Kennwerten trotzdem leichter bauen, da die Degradation nach einem Schlag geringer ist und damit weniger Sicherheit für einen Schlag berücksichtigt werden muss, um auf dieselbe Gesamtsicherheit zu kommen.

Biaxiale und vor allem triaxiale Geflechte weisen hier verhältnismäßig gute Eigenschaften auf. In Abbildung 3.24 ist die Druckfestigkeit nach verschiedenen starken Schlagbeanspruchungen für zwei Geflechte aufgetragen. Diese nimmt bei einem Impact von 60 J um maximal 65 % ab. Für UD-Geflechte wurden in der Arbeit von Selinger [57] Untersuchungen zur Schadenstoleranz durchgeführt. Bei den CAI-Tests wurde allerdings auf die abschließende Druckprüfung verzichtet.

Die Schlagtoleranz – insbesondere von triaxialen Geflechtes – ist auf die Faserarchitektur zurückzuführen. Durch die gegenseitige Umschlingung der Fasern können sich diese nicht voneinander lösen, ohne auch die Fasern zu zerstören. Das heißt, es spielt hier nicht mehr nur die reine Matrixeigenschaft eine Rolle, sondern auch die Fasern, die deutlich mehr Energie aufnehmen können. Trotzdem sind auch Bauteile aus Geflechtes aus Lagen aufgebaut. Hier konnten Untersuchungen von Weng [58]

Kurztitel	Faser- typ	Faserorientierung bei der Produktion	Prüfrichtung bzgl. Produktionsrichtung	Harz	Quelle/ Literatur
Triax 45°	1	0°/±45°	0°	CR80	[55]
0°-Geflecht	1 / 2	0°/±45°	0°	RTM6	[54]

Fasertyp 1: Tenax HTS 40 F13 12k bzw. Vorgängerfaser Tenax HTS 5631

Fasertyp 2: 2x: SG EC9 136 Z28

Tabelle 5: Übersicht der in Abb. 3.24 dargestellten Geflechte mit der Angabe von weiterführender Literatur

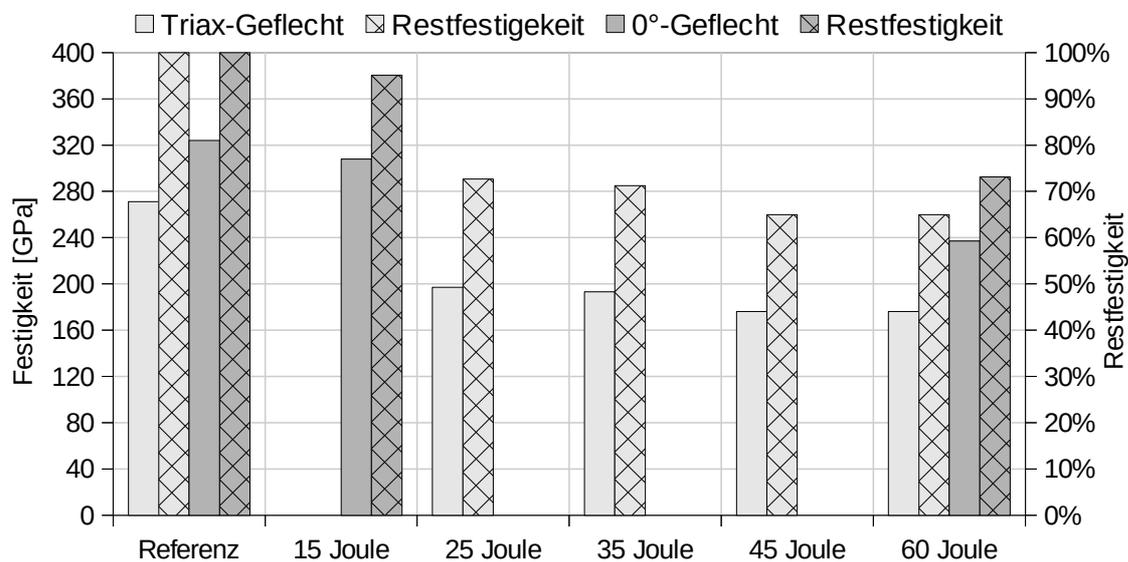


Abbildung 3.24: Abnahme der Druckfestigkeit nach verschieden starken Schlagbeanspruchungen für zwei Geflechtarten (spez. s. Tabelle 5)

belegen, dass sich in diesem Fall eine Faserschädigung während der Produktion positiv auswirkt. Die abstehenden Filamente sorgen für eine Verknüpfung der einzelnen Lagen untereinander.

3.6.4. Theoretische Vorhersage

Wie aus den gezeigten Kennwerten ersichtlich, sind die Material-Eigenschaften signifikant von der Faserorientierung abhängig. Das führt zu dem Problem, dass für jede neue Faserorientierung auch neue Kennwerte ermittelt werden müssen. Für die Zulassungen – insbesondere im Bereich des Flugzeugbaus – sind damit erhebliche

Kosten verbunden. Deshalb ist es notwendig, Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften durch Simulationen bestimmen zu können. Hierfür gibt es aktuell keine zuverlässigen Methoden. Dies ist im Aufbau von Geflechten begründet. Die Ondulation und die z. T. sehr unterschiedlichen Ablagegeometrien der Fasern machen eine Vorhersage schwer.

Es bestehen verschiedene Ansätze, um eine derartige Vorhersage durchzuführen. Ein Weg geht von dem theoretischen Winkel und einer angenommenen Ablagegeometrie aus und berechnet daraus Steifigkeitseigenschaften. Hier ist bspw. die an der Uni Loewen entwickelte Software WiseTex [59] hervorzuheben. Etwas genauer ist es, die Faserwinkel und Ablagebreite zu messen und daraus die Steifigkeitseigenschaften zu berechnen. Birkefeld [60] zeigt Möglichkeiten hierzu auf. Auch in diesem Fall wurde mit der Software Wisetex gearbeitet. Die Querschnittsgeometrie wird aus der Ablagebreite hergeleitet. Mit der Breite und dem Gesamtvolumen der Faser kann recht genau auf den Querschnitt geschlossen werden.

Mit WiseTex kann allerdings nur auf die Steifigkeit der einzelnen Lage geschlossen werden. Auf die Festigkeit erhält man keine Rückschlüsse. Hier greift ein anderer Weg, welcher den gesamten Flechtprozess simuliert. Auf diese Prozesssimulation wird in Abschnitt 6 noch genauer eingegangen. Die Simulation ergibt eine dreidimensionale Faserarchitektur. Diese wird herangezogen, um Aussagen über die Steifigkeiten, aber auch die Festigkeiten zu treffen. In der Arbeit von Birkefeld [60] wird das Vorgehen mit den aktuellen Möglichkeiten und Einschränkungen genauer beschrieben. Prinzipiell ist diese Methode sicher genauer und besser, da nur hier wirklich in jedem Bereich eines Bauteils der korrekte Faserverlauf berechnet wird. Allerdings sind dafür auch erhebliche Rechenleistungen notwendig.

4. Randbedingungen und Grenzen der Flechttechnik

Wie alle technischen Herstellungsverfahren, weist auch die Flechttechnik Randbedingungen und Kenngrößen auf. Diese geben z. B. die Produktivität an oder bestimmen Grenzen, jenseits derer eine Produktion nicht mehr möglich ist. Diese sind zu meist keine festen Werte, sondern Bereiche, in denen z. B. die Qualität des Geflechts immer schlechter wird. Ob die dann erreichte Qualität des Geflechts genügt, hängt vom Anwendungsfall ab.

4.1. Mathematische Zusammenhänge

Die mathematischen Zusammenhänge geben die Abhängigkeiten zwischen geometrischen (wie Kerndurchmesser oder Fadenbreite) und physikalischen Größen (wie Geschwindigkeiten oder Gewichte) wieder. Im Allgemeinen werden globale Werte bestimmt, sodass es lokal zu Abweichungen kommen kann. Als Beispiel sei der Faserwinkel aufgeführt. Wenn dieser theoretisch bei 45° liegt, kann er in manchen Bereichen bei 40° , in anderen bei 50° liegen. Im Mittel müssen 45° erreicht werden. Ursache für diese Schwankungen ist zum einen die Flexibilität des Textils, die solche Variationen erlaubt, zum anderen die häufige Vereinfachung bzw. globale Betrachtung der Zusammenhänge.

4.1.1. Faserwinkel-Kernumfang-Ablagebreite

Es besteht ein einfacher, aber zwingender Zusammenhang zwischen dem Faserwinkel in der Preform, dem Umfang der Preform an entsprechender Stelle und der Fadenbreite an gleicher Stelle. Ferner ist noch die Anzahl der parallel in einer Richtung laufenden Fasern relevant. Diese ist allerdings im Allgemeinen fest vorgegeben und kann bei heutigen Maschinen auch im Prozess nicht variiert werden. Deshalb wird die Fadenzahl als Konstante in der Gleichung betrachtet.

In Gleichung 2 ist der Zusammenhang zwischen der Fadenbreite senkrecht zur Fadenlängsachse (b_{ff}) und der Breite in Umfangsrichtung (b_{ff-u}) angegeben. Abb. 4.1 veranschaulicht die Gleichung.

$$b_{ff-u} = \frac{b_{ff}}{\cos(\alpha)} \quad (2)$$

Dabei ist α der Faserwinkel zur Preformlängsachse.

Mit Gleichung 3 lässt sich leicht der Zusammenhang zum Umfang herstellen:

$$U_P = N_{ff} \cdot \frac{b_{ff}}{\cos(\alpha)} \quad (3)$$

In dieser Gleichung ist U_P der Umfang der Preform und N_{ff} die Anzahl der parallel verlaufenden Fäden. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass alle Fäden die gleiche Ablagebreite haben und den Umfang vollständig bedecken.

Diese Gleichung kann für zwei Zwecke verwendet werden. Für die Bestimmung der Maschinengröße wird sie nach N_{ff} aufgelöst, bei gegebenem Bauteil und Faserorientierung. Bei gegebener Maschine kann überprüft werden, wie sich der Winkel bzw. die Ablagebreite verhalten müssen, wenn sich der Umfang der Preform ändert.

Im Allgemeinen wird gewünscht, bei sehr unterschiedlichen Umfängen einen konstanten Winkel zu erreichen und eine möglichst große Spreizung der Fäden. Gleichung 3 zeigt, dass dieses nicht möglich ist. Sobald eine Variable geändert wird, muss zwangsweise mindestens eine weitere ebenfalls geändert werden. Sobald eine Flechtmaschine definiert wurde, ist die Anzahl der Fäden konstant. Das bedeutet, dass sich bei einer Änderung des Umfangs die Ablagebreite der Fäden ändert, solange der Winkel konstant gehalten wird. Wenn dies nicht mehr möglich ist, weil die Fäden sich nicht weiter spreizen oder zusammendrücken lassen, muss der Winkel variiert werden.

Der Bereich, in welchem die Fäden ihre Breite anpassen können, ist begrenzt. Für Tenax HTS 12k Fasern liegt er zwischen ca. 2 mm und 3,5 mm. Das entspricht einer Umfangszunahme von 75 % bzw. einer Abnahme von 57 %. Diese Werte erscheinen zwar groß, sind aber für viele Bauteile nicht ausreichend, da eine Änderung des Umfangs nicht gleichzusetzen ist mit bspw. der Änderung der Bauteilhöhe.

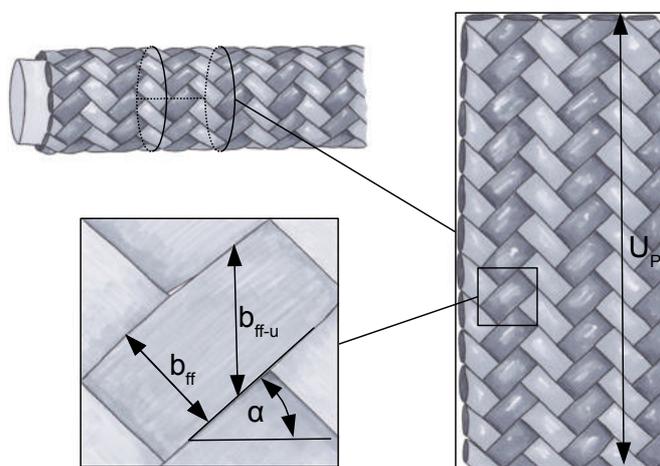


Abbildung 4.1: Vom Kern abgewickeltes Geflecht mit wichtigen geometrischen Kenngrößen

Wie sich eine Änderung des Flechtwinkels auswirkt, hängt dagegen vom Bereich ab, in welchem gearbeitet wird. Oberhalb von 60° wirkt sich eine Änderung signifikant aus, unterhalb dagegen eher gering. Der realistische Arbeitsbereich der Faserwinkel liegt zwischen 30° und 80°. In Abb. 4.2 ist die Änderung des Umfangs bei gleichbleibender Fadenbreite über den Faserwinkel aufgetragen. Eine Winkelvariation in sehr großen Bereichen ist nur selten sinnvoll, da die Fasern entlang des Kraftflusses liegen sollen, der sich nicht ändern muss, wenn sich der Umfang ändert.

Aus den genannten Gründen werden in der Praxis zumeist sämtliche Parameter leicht angepasst. Es sollte bereits in der Konstruktion darauf geachtet werden, keine zu großen Umfangsänderungen vorzusehen, wenn ein Bauteil geflochten werden soll.

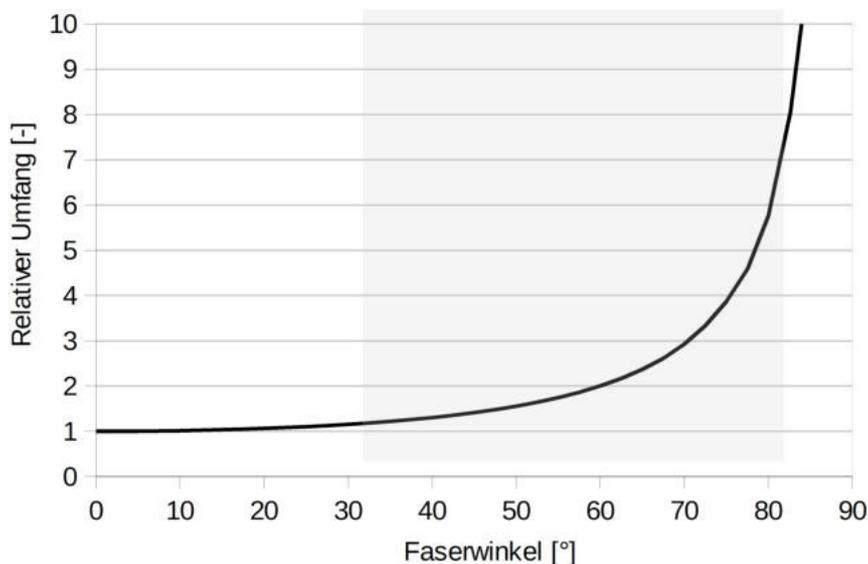


Abbildung 4.2: Abhängigkeit des Umfangs vom Faserwinkel bei gleichbleibender Faserbreite und Bedeckungsgrad. Der Umfang ist dabei auf den Wert bei 0° bezogen.

4.1.2. Maschinengeschwindigkeiten

Für die Programmierung der Flechtanlage muss aus dem gewünschten Winkel die notwendige Abzugsgeschwindigkeit des Kerns bestimmt werden. Das Verhältnis von Kernumfang, Rotationsgeschwindigkeit der Flügelräder, Anzahl der Flügelräder und Abzugsgeschwindigkeit bestimmt den Ablagewinkel der Fasern auf dem Kern. Gleichung 4 gibt den Zusammenhang dieser Parameter wieder.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2 \cdot U_k \cdot n_{fr}}{v_k \cdot N_{fr}}\right) \quad (4)$$

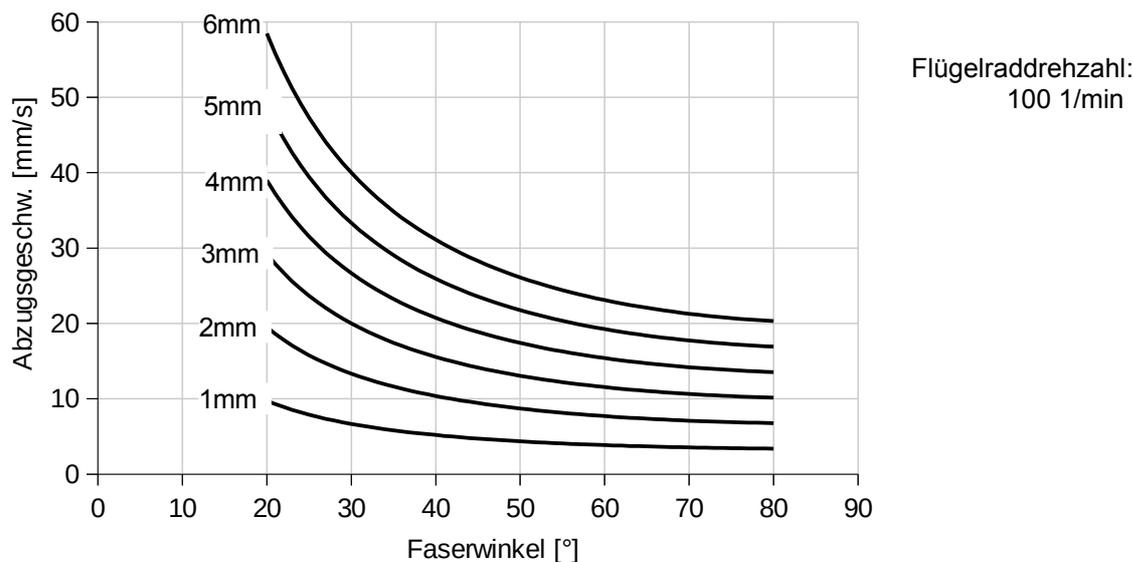


Abbildung 4.3: Abzugsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Faserwinkels für verschiedene Ablagebreiten

In Gleichung 4 ist α der Faserwinkel, U_k der Umfang des Kerns, n_{fr} die Drehzahl der Flügelräder, v_k die Abzugsgeschwindigkeit des Kerns und N_{fr} die Anzahl der Flügelräder in der Maschine. Bei der Herleitung ist zu beachten, dass sich jeder Klöppel immer nur für eine halbe Umdrehung auf einem Flügelrad befindet und dann an das nächste übergeben wird.

In Abb. 4.3 sind Abzugsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Flechtwinkel und der Ablagebreite der Fäden dargestellt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein geschlossenes Geflecht erreicht wird. Dadurch ist die Darstellung unabhängig von der Flechtmaschinengröße. Es wird deutlich, dass mit steigendem Winkel die Abzugsgeschwindigkeit deutlich abnehmen muss. Gleichzeitig erhöht die Ablagebreite die Abzugsgeschwindigkeit. Das bedeutet, bei gleicher Flechtmaschine muss ein Kern mit einem größeren Umfang schneller bewegt werden, als ein Kern mit geringerem Umfang bei konstantem Winkel.

Im Flechtprozess muss beachtet werden, dass sich bei Änderung der Geschwindigkeiten nicht sofort der entsprechende Faserwinkel einstellt. In [44] wurde gezeigt, dass der Flechtwinkel erst stimmt, wenn der entsprechende Flechtkegel erreicht ist. Bei einer Geschwindigkeitsänderung bedeutet dies, dass es sinnvoll sein kann, kurzzeitig die Geschwindigkeit deutlich stärker zu erhöhen bzw. zu verlangsamen als rechnerisch notwendig, um schnell den neuen Flechtkegel einzustellen.

4.1.3. Ablagemenge pro Klöppel

Um die Produktivität einer Maschine zu bestimmen, wird im Faserverbundbereich oft die Ablagemasse pro Minute oder Stunde bestimmt. Dieser Wert ist nur z. T. aussagekräftig, gibt aber einen groben Überblick. Problematisch bei dieser Kennziffer ist, dass der Verbrauch an Material bewertet wird, aber nicht die Zeit zur Produktion einer Preform. So können Prozesse eine große Menge an Material verarbeiten, aber nur ein weiteres Halbzeug erzeugen, bspw. Gewebe oder Gelege. Über die Produktivität entscheidet dann aber die Weiterverarbeitung. Gleiches gilt auch für den Flechtprozess. Wenn bei dem Flechten direkt die fertige Preform erzeugt wird (was das Ziel sein sollte), dann gibt die Kennziffer tatsächlich die Produktivität wieder. Wenn nach dem Flechten weitere Arbeitsschritte folgen, bis die endgültige Preform erzeugt wird, müssen diese zu der Verarbeitungszeit addiert werden.

Daneben wird bei der Betrachtung der Ablagemenge nicht der Verschnitt berücksichtigt. Ein Prozess, bei dem die Hälfte an Material als Verschnitt entsorgt wird, ist genauso produktiv wie ein Prozess, welcher nur halb so viel in der gleichen Zeit ablegt, aber keinen Verschnitt hat.

Für die Bestimmung der Ablagemenge einer Flechtmaschine müssen die Größe der Maschine und die verarbeiteten Fasern berücksichtigt werden. Obwohl eine Maschine mit einer zweifachen Anzahl an Klöppeln doppelt so viel ablegt, ist es nicht sinnvoll, für jedes Bauteil eine Maschine mit möglichst vielen Klöppeln zu verwenden. Gleiches gilt für die Feinheit der Fasern. Um diese Aspekte zu berücksichtigen ist in Abb. 4.4 nicht die absolute Ablagemenge einer Maschine angegeben, sondern nur eines Klöppels. Um auf den Wert für eine Maschine zu kommen, muss die ermittelte Ablagemenge mit der Anzahl der Klöppel multipliziert werden. Außerdem ist eine fiktive Garnfeinheit von $1000 \frac{\text{g}}{\text{km}}$ angenommen. Auch hier muss mit der verwendeten Feinheit multipliziert werden, um auf die Ablagemenge der Maschine zu gelangen.

Das Diagramm beruht auf folgender Formel:

$$M_f = \frac{2 \cdot T_{t_{ff}} \cdot b_{ff} \cdot N_{ff} \cdot n_{ff}}{N_{ff} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \quad (5)$$

Neben den bereits zuvor eingeführten Größen ist $T_{t_{ff}}$ die Feinheit der Flechtfäden. Die Herleitung der Formel wird im Anhang A Seite 175 erläutert. Bei einer voll besetzten Maschine kürzen sich N_{ff} und N_{ff} heraus.

Aus Abb. 4.4 wird deutlich, dass mit steigender Ablagebreite die abgelegte Masse zunimmt. Flechtmaschinen arbeiten bei dem häufig verwendeten Winkel von 45° dagegen am unwirtschaftlichsten. Trotzdem ergibt sich eine nicht geringe Ablagerate für Flechtmaschinen: Für einen Faden mit 800 tex und einer Ablagebreite von 3 mm

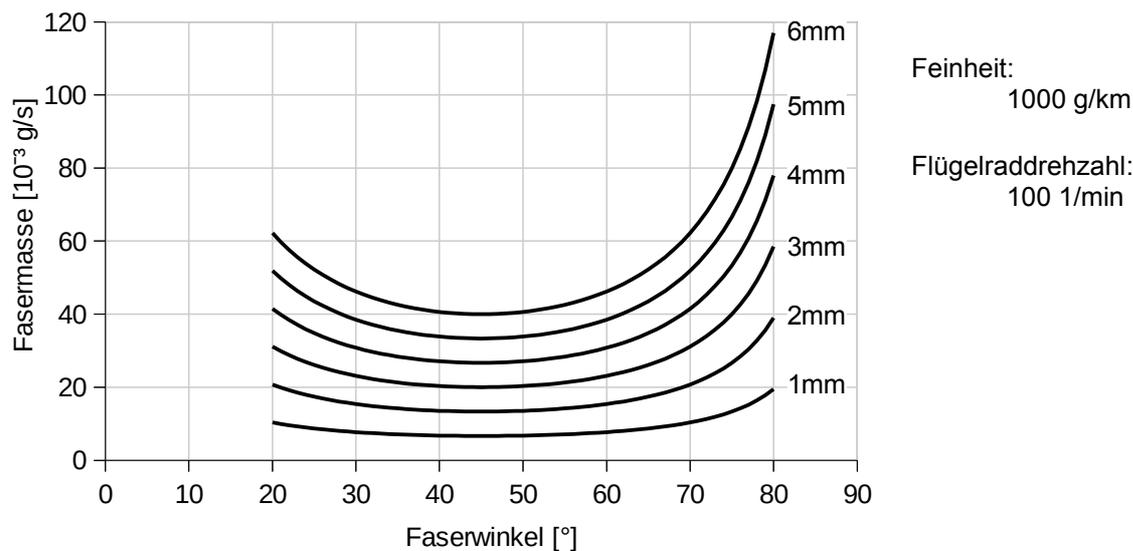


Abbildung 4.4: Abgelegte Fasermenge eines Klöppels in Abhängigkeit des Flechtwinkels und der Ablagebreite

verarbeitet eine Maschine mit 176 Klöppeln bei 45° eine Fasermasse von 12,76 kg/Std. Das Beispiel bezieht sich auf ein Biax-Geflecht. Für ein Triax Geflecht erhöht sich die Masse entsprechend des Anteils des Stehfadens.

4.1.4. Faseranteile

Ebenfalls häufig von Interesse ist der Anteil der Stehfäden im Geflecht. Dieser kann durch den Flechtwinkel und das Verhältnis der Garnfeinheit von Flecht- zu Stehfäden beeinflusst werden. Bestimmt wird der gewichtsbezogene Anteil nach folgender Formel:

$$\Psi_{sf} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot N_{ff} \cdot T_{t_{ff}}}{N_{sf} \cdot \text{tex}_{sf} \cdot \cos(\alpha)}} \quad (6)$$

In der Formel sind die mit dem Index sf gekennzeichneten Größen jeweils die Parameter der Stehfäden. Für den Fall einer vollbesetzten Maschine kürzen sich die Anzahl der Stehfäden und der Flechtfäden heraus, sodass nur noch die Garnfeinheit und der Flechtwinkel eingehen.

In Abbildung 4.5 sind die Anteile der Stehfäden für unterschiedliche Garnfeinheitsverhältnisse von Steh- zu Flechtfäden über den Winkel dargestellt. Dabei wird von einer vollen Besetzung ausgegangen, also doppelt so vielen Flecht- wie Stehfäden.

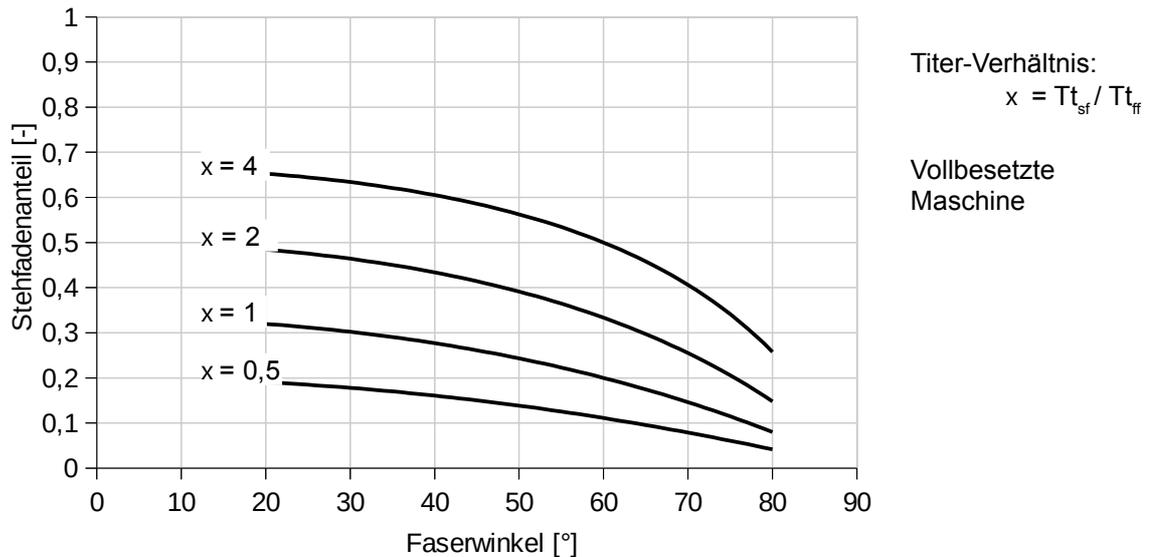


Abbildung 4.5: Stehfadenanteil für unterschiedliche Verhältnisse der Feinheit von Stehfäden zu Flechtfäden über dem Flechtwinkel

Es wird deutlich, dass unter normalen Voraussetzungen lediglich ein Stehfadenanteil von 25 % erreicht wird. Bei doppelt so „dicken“ Stehfäden wie Flechtfäden wird bei einem Faserwinkel von 60° ein Stehfadenanteil von einem Drittel erreicht. Mit dieser Kombination ergibt sich ein quasiisotropes Material. Um ein Geflecht mit einem primären Anteil an 0°-Fasern zu erzeugen, müssen Flechtfäden mit einem möglichst kleinen Feinheitswert (tex) mit Stehfäden mit einem hohen Feinheitswert gemischt werden. Diese Geflechte sind dann aber nicht mehr geschlossen, die Flechtfäden haben zueinander also deutliche Abstände. Durch die geschickte Positionierung der Stehfäden kann dennoch eine Preform erzeugt werden, die nur geringe oder keine Reinharzgebiete aufweist (s. Abschnitt 4.1.6).

4.1.5. Flächengewichte

Das Flächengewicht einer Flechtlage bezieht sich immer auf die gesamte Lage mit allen Fadensystemen und nicht auf die einzelnen Faserorientierungen. Das Flächengewicht lässt sich gemäß Gleichung 7 bestimmen.

$$Z = \frac{Tt_{sf} \cdot N_{sf} + \frac{2 \cdot N_{ff} \cdot Tt_{ff}}{\cos(\alpha)}}{U_p} \quad (7)$$

Die Herleitung wird in Anhang A auf Seite 175 beschrieben. In dieser Formel wird die Ondulation der Flechtfäden vernachlässigt. Trotzdem haben sich die Ergebnisse als sehr genau herausgestellt. Unter der Annahme, dass eine vollbesetzte Maschine verwendet wird, also N_{ff} und N_{sf} gleich groß sind und ein geschlossenes Geflecht erzeugt wird, vereinfacht sich die Formel wie folgt:

$$Z = \frac{T_{sf} \cdot \cos(\alpha) + 2 \cdot T_{ff}}{b_{ff}} \quad (8)$$

In Abhängigkeit von der Ablagebreite und damit auch vom Kerndurchmesser bei einem geschlossenen Geflecht, lassen sich für das Flächengewicht die in Abb. 4.6 dargestellten Kurven bestimmen. Die Abbildung gilt für triaxiale Geflechte bei einer Feinheit von 1 g/m (1000 tex).

Mit zunehmender Ablagebreite nimmt das Flächengewicht ab. Ebenso nimmt es mit steigendem Flechtwinkel ab. Ursache dafür ist der abnehmende Anteil an Stehfäden pro Flächeneinheit. Bei einem Flechtwinkel von 0° würden theoretisch 3 Fäden übereinander und die Stehfäden direkt nebeneinander liegen. Bei 90° dagegen geht der Abstand der Stehfäden gegen unendlich, ihr Flächengewichtsanteil also gegen 0. Die Flächengewichte für biaxiale Geflechte sind unabhängig vom Flechtwinkel und entsprechen in Abb. 4.6 dem Wert bei 90° .

Typische Flächengewichte sind bei 12k Fasern und einer Ablagebreite von 3 mm für ein Triax Geflecht: 741 g/m^2 bei einem Flechtwinkel von 30° , 715 g/m^2 bei 45° und 659 g/m^2 bei 60° . Für ein Biax Geflecht ergibt sich ein Flächengewicht von 533 g/m^2 .

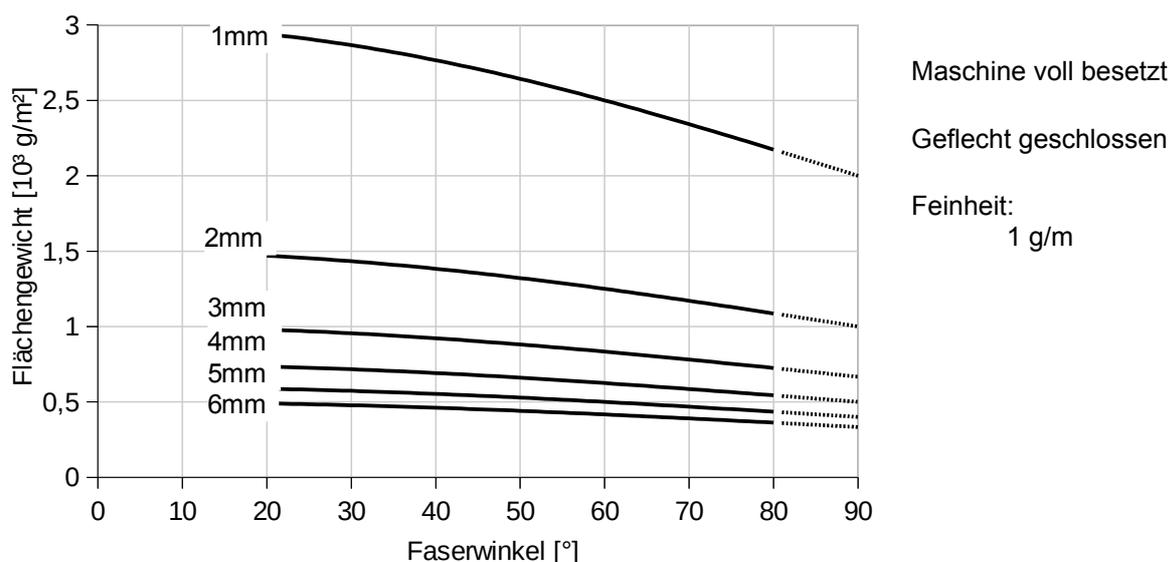


Abbildung 4.6: Flächengewicht von triaxialen Geflechten bei einer vollbesetzten Maschine in Abhängigkeit von Flechtwinkel und Ablagebreite

4.1.6. Lagendicken

Die Lagendicke stellt oft eine der zentralen Fragen bei der Auslegung von Bauteilen aus Geflechtem dar. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Zusammenhängen ist die Berechnung der Lagendicke allerdings nicht exakt möglich. Da Fasern weiche Gebilde sind, die ihre Form ändern, können die Fadenstärken nicht einfach addiert werden, um eine bestimmte Dicke zu bestimmen. Bei der Lagendicke spielen vielmehr folgende Faktoren eine Rolle: Art des Geflechts (Biax/Triax), Art der Fasern, Ablagebreite der Fasern, Flechtwinkel, Kerengeometrie und die Anordnung der Lagen zueinander. Letzteres ist vor allem bei Geflechtem mit sehr dicken Stehfäden von Bedeutung. Diese lassen sich wie in Abbildung 4.7 gezeigt, auf zwei verschiedenen Weisen zueinander anordnen. Bei Lage 1 und 2 liegen die Stehfäden direkt aufeinander, Lage 2 und 3 sind so angeordnet, dass die Stehfäden der einen Lage jeweils im Zwischenraum der Stehfäden der anderen Lage liegen. Diese Verzahnung der einzelnen Lagen (auch Nesting genannt) spielt auch bei der Modellierung von Textilien für die Steifigkeits- und Festigkeitsvorhersage eine wichtige Rolle und wurde deshalb vielfach untersucht sowie beschrieben [60 - 62]. Die Verzahnung führt dazu, dass die Wandstärke eines Bauteils nicht die Summe der Dicke der einzelnen Lagen ist. Dies ist in Abb. 4.7 zu erkennen. Durch die Verzahnung werden die Lagen um h_v zusammengeschoben, wobei sich die Einzellagendicke um genau diesen Betrag verringert. Bei den Randlagen ist es $h_v/2$. Der Nesting-Faktor gibt das Verhältnis von tatsächlicher Wandstärke zu der Summe der Einzellagendicken wieder. Nach Birkefeld et al. [63] ist dieser Faktor für biaxiale Geflechte nahe 1, für triaxiale Geflechte jedoch deutlich über eins und damit zu berücksichtigen. Der Nesting-Faktor kann aktuell nicht theoretisch bestimmt werden. Ist er nicht bekannt, muss er mittels Versuchen bestimmt werden.

Sofern der Nesting-Faktor bekannt ist, muss noch die Dicke der einzelnen Lagen bestimmt werden. Diese ist stark abhängig von der Ablagebreite der Fäden und deren Querschnitt. Hinsichtlich der Querschnittsform gibt es verschiedene Ansätze. Stark vereinfacht werden die Fäden als rund angenommen, was aber wenig realis-

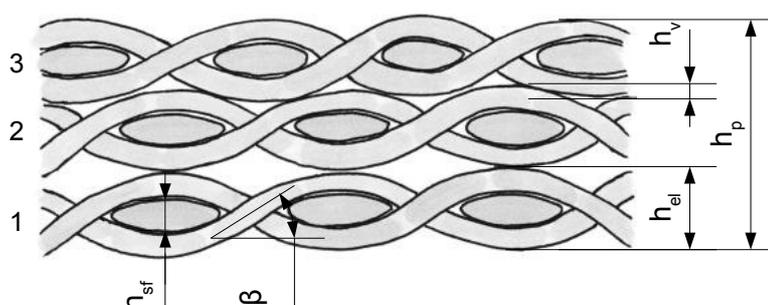


Abbildung 4.7: Mögliche Positionierungen von Lagen übereinander. Bei der oberen und mittleren Lage liegen die Stehfäden auf Lücke. Bei der mittleren und unteren Lage liegen die Stehfäden übereinander.

tisch ist. Ebenfalls vereinfacht, aber deutlich realitätsnäher ist die Annahme von elliptischen Querschnitten [64]. Wenn der Querschnitt als elliptisch angenommen wird und bekannt ist, lässt sich die Höhe des Rovings (h_{ff}) wie folgt bestimmen:

$$h_{ff} = \frac{4 \cdot A_{ff}}{\pi \cdot b_{ff}} \quad (9)$$

A_{ff} ist die Querschnittsfläche des Flechtfadens. Bei einem biaxialen Geflecht muss zur Bestimmung der Einzellagenhöhe (h_{el}) diese Größe verdoppelt werden.

$$h_{el} = 2 \cdot t_{ff} \quad (10)$$

Für triaxiale Geflechte ist die Bestimmung der Einzellagenhöhe etwas komplexer. Um die Höhe der Stehfäden zu bestimmen, muss in einem ersten Schritt überprüft werden, ob der zwischen den Kreuzungspunkten der Flechtfäden zur Verfügung stehende Platz die Ablagebreite der Stehfäden beeinflusst. Wenn genügend Platz für die Stehfäden zur Verfügung steht, kann die für den jeweiligen Faden typische Ablagehöhe verwendet werden und diese zu der Höhe eines biaxialen Geflechts addiert werden. Falls das nicht der Fall ist, kann die Höhe gemäß folgender Formel bestimmt werden:

$$h_{sf} = \frac{A_{sf}}{\frac{N_{ff} \cdot \pi \cdot b_{ff}}{4 \cdot N_{sf} \cdot \cos(\alpha)} - \frac{A_{ff}}{b_{ff} \cdot \sin(\beta)}} \quad (11)$$

In Gleichung 11 werden neben den bekannten Parametern folgende verwendet: A_{sf} für die Querschnittsfläche der Stehfäden und β ist der Ondulationswinkel der Flechtfäden (s. Abb. 4.7). Der Ondulationswinkel ist im Allgemeinen unbekannt bzw. abhängig von der Höhe der Stehfäden, womit die Gleichung nicht ohne Weiteres zu lösen ist. Hier ist ein iterativer Prozess notwendig. Bei dieser Methode ist zu beachten, dass eventuelle Poren zwischen den Fasern nicht berücksichtigt werden.

Das Abschätzen der Wandstärke einer Preform kann neben der zuvor vorgestellten Methode ebenfalls über das Volumen der Preform erfolgen. Wenn die Ablagemenge der Faser und der Faservolumengehalt (Ψ) im Bauteil bekannt ist, kann mittels des Umfangs auch die Wandstärke (h_p) bestimmt werden.

$$h_p = N_L \cdot \frac{N_{sf} \cdot Tt_{sf} + \frac{2 \cdot N_{ff} \cdot Tt_{ff}}{\cos(\alpha)}}{\Psi \cdot U_p \cdot \rho_f} \quad (12)$$

ρ_f ist die Dichte der Kohlenstofffasern und N_{cl} die Anzahl der Lagen. Der Faserwinkel in den einzelnen Lagen sowie die Dichte der Flecht- und Stehfäden wird als gleich groß angenommen. Die Formel ist leicht vereinfacht, da das Volumen mittels $H \cdot B \cdot T$ berechnet wird. Bei Bauteilen mit einem relevanten Krümmungsradius ist die Gleichung entsprechend anzupassen. Die Herleitung befindet sich in Anhang A. Wenn mit einer vollbesetzten Maschine ein geschlossenes Geflecht erzeugt wird, kann Gl. 12 wie folgt vereinfacht werden:

$$t_{el} = N_L \cdot \frac{Tt_{sf} \cdot \cos(\alpha) + 2 \cdot Tt_{ff}}{\Psi \cdot b_{ff} \cdot \rho_C} \quad (13)$$

Der Vorteil dieser Art der Berechnung besteht darin, dass alle benötigten Faktoren sehr früh in der Auslegung feststehen und es keiner Versuche bzw. Erfahrungswerte bedarf. Auch eventuell auftretende Poren werden automatisch berücksichtigt, solange der Faservolumengehalt im gesamten Bauteil stimmt. Jedoch ist ebendieser Faservolumengehalt der unsicherste Faktor. Ob der angestrebte Wert tatsächlich erreicht werden kann, ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. In der Praxis haben sich Werte zwischen 55 % bis 60 % als realistisch herausgestellt.

4.2. Kerngeometrien

Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, empfiehlt es sich, direkt auf einen Kern zu flechten, welcher die Innenkontur des Bauteils möglichst genau wieder gibt. Nur so lässt sich eine endkonturnahe bis endkonturidentische Preform erzeugen, die weitere Arbeitsschritte im Preforming überflüssig macht.

4.2.1. Kernmaterial

Für das Flechten werden an den Kern vor allem mechanische Anforderungen gestellt. Im Abschnitt 4.4.3 wird auf die auftretende Flächenpressung eingegangen. Die auftretenden Werte zeigen, dass selbst sehr leichte Schäume ausreichen, um die auftretenden Drücke aufzunehmen. Es können jedoch erhebliche axiale Zug- und Drucklasten entstehen. Insbesondere Momente werden schnell so groß, dass diese zum Materialversagen führen. Die auftretenden Lasten hängen signifikant von der Geometrie und Einspannung der Kerne ab. Da es hierfür ganz verschiedene Ansätze und Lösungen gibt, muss im Einzelfall überprüft werden, welche Lasten tatsächlich auftreten und ob das Kernmaterial diese ertragen kann.

Zu beachten sind neben dem Flechtprozess jedoch auch die folgenden Prozesse, vor allem die Infiltration, wenn diese auf dem Kern erfolgen soll. Für die Infiltration muss der Kern den dabei auftretenden Drücken standhalten und darf sich nur wenig verformen. Auch muss für eine spätere Endformung (also das Herausziehen des

Kerns) die Oberfläche so geschaffen sein, das dies möglich ist. Für mehrmaliges Entkernen haben sich Aluminiumkerne als ungeeignet erwiesen, da sie jedes mal neu poliert werden sollten und selbst dann noch zum Fressen neigen, was zu erheblichen Schäden oder gar der nicht Endformbarkeit führen kann. Aluminium bietet jedoch den Vorteil des günstigen Preises und einer einfachen Bearbeitbarkeit. Sehr gut geeignet für mehrfaches Entformen ist dagegen Messing.

Neben den metallischen Werkstoffen können auch Kunststoffe und Gießharze verwendet werden. Wenn der Kern auch als Form für die später folgende Infiltration dienen soll, muss er entsprechend temperaturbeständig sein und es müssen die häufig großen Temperatúrausdehnungskoeffizienten der Kunststoffe berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Bau des Kerns aus FVW. Die Vorteile hierbei sind gute gewichtsbezogene mechanische Kennwerte und ein zum Bauteil ähnliches thermisches Verhalten. Ein Nachteil ist vor allem der höhere Herstellungsaufwand.

4.2.2. Einfluss der Querschnittsprofile auf den Flechtprozess und die Faserorientierung

Beim Flechten werden die Fasern um den Kern herumgewickelt. Das heißt, sie würden sich auf der geodätischen Linie ablegen, solange sie nicht von den anderen Fäden beeinflusst werden. Dies hat zur Folge, dass beim Umflechten von konkaven Profilen die Fasern nicht in die Kavität hineingelegt werden, sondern diese überspannen. Da die Fasern sich praktisch nicht dehnen, können sie auch nicht nachträglich hineingedrückt werden. Die Querschnittsprofile des Bauteils sollten deshalb im Flechtprozess immer eine konvexe Oberfläche aufweisen.

Wenn das nicht gegeben ist, ist es möglich, direkt beim Flechten das Geflecht in die Kavität zu drücken. Das führt aber häufig zu einem Verzug der Fasern. Auch müssen die Fasern gleich fixiert werden, da sie sonst nicht mehr um den Kern gespannt sind.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Kern so zu ergänzen, dass die konkave Oberfläche in eine konvexe umgewandelt wird, welche die gleiche Oberflächenlänge hat. Der ergänzte Kern lässt sich umflechten. Nach dem Flechten wird die Ergänzung entfernt und das Geflecht in die so konkave Fläche gedrückt. Damit es hier zu einem möglichst geringen Faserverzug kommt, sollte der Teil des Geflechts, welcher nicht drapiert wird, fixiert werden. In Abb. 4.8 ist der Prozess grafisch dargestellt. Diese Art der Preform-Herstellung hat aber folgende Nachteile: Es sind zusätzliche Arbeitsschritte notwendig, die eventuell nur mit großen Aufwand automatisierbar sind; beim Drapierprozess besteht die Gefahr des Faserverzugs; die Preform fixiert sich nicht mehr automatisch auf dem Kern.

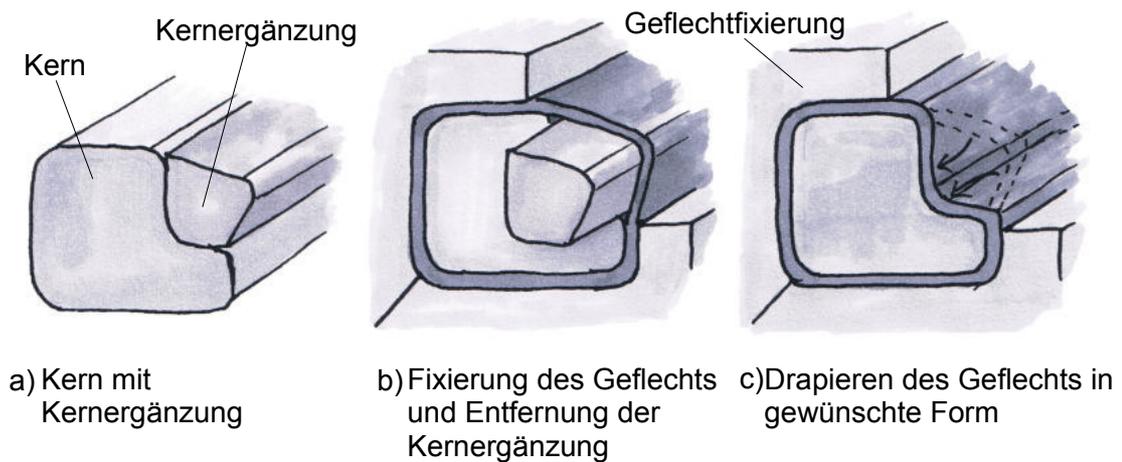


Abbildung 4.8 a-c: Methode zur Produktion geflochtener Preformen mit konkavem Querschnitt

Auch wenn nur konvexe Profile umflochten werden, hat die Form einen Einfluss auf die Faserablage. In Gl. 4 ist der Zusammenhang dargestellt, auf welche Art der Faserwinkel von dem Umfang der Preform und verschiedenen Maschinenparametern abhängt. Wenn ein Kreisquerschnitt umflochten wird, entspricht der Winkel an jedem Punkt der Preform auch diesem Wert. Bei allen Querschnittsprofilen, die vom Kreis abweichen, weicht auch der Winkel lokal von dem theoretischen Wert ab. Im Mittel muss der Winkel aber übereinstimmen. Wie stark diese Abweichungen sind, hängt vom Profil und dem Flechtwinkel ab.

Anhand eines rechteckigen Querschnitts mit deutlich unterschiedlich langen Seiten soll im Folgenden die Ursache für die lokalen Winkelabweichungen erläutert werden. An einem derartigen Profil lassen sich zwei auftretende Effekte erläutern. Eine genaue Winkelanalyse bei unterschiedlichen Geometrien erfolgt in Abschnitt 6.3.

Der Faserwinkel ergibt sich durch den Weg, den der Kern in der Zeit Δt weiter bewegt wird und den Weg, um den sich der Anlegepunkt des Fadens in der gleichen Zeit auf den Kern in Umfangsrichtung bewegt hat. Um den lokalen Winkel zu bestimmen, ist eine lokale Betrachtung notwendig. Bei einem eckigen Kern mit geraden Flächen legt sich der Faden erst dann an einer Seite an, wenn er die folgende Ecke erreicht.

Zunächst soll nur ein Faden betrachtet werden. Der Winkel ergibt sich auf jeder Seite des Rechtecks durch das Verhältnis von Seitenlänge zu zurückgelegtem Weg des Kerns Δl . Δl hängt von der Zeit Δt ab, welche der Klöppel benötigt, um sich so weit zu bewegen, dass der Faden die nächste Ecke erreicht, sowie der Geschwindigkeit des Kerns. Bei gleichbleibender Flügelraddrehzahl ist Δt wiederum direkt abhängig von dem Winkel, um den sich der Klöppel in der Maschine bewegen muss. Gemäß Abb. 4.9 kann dieser Winkel wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned}\Delta \gamma_1 &= 90^\circ + a \sin\left(\frac{a_1/2}{r}\right) - a \sin\left(\frac{a_2/2}{r}\right) \\ \Delta \gamma_2 &= 90^\circ + a \sin\left(\frac{a_2/2}{r}\right) - a \sin\left(\frac{a_1/2}{r}\right)\end{aligned}\quad (14)$$

a_1 und a_2 sind dabei die Längen der Seiten des Rechtecks und r der Radius der Klöppelbahn. Wenn r deutlich größer ist als a_1 und a_2 geht $\Delta \gamma$ gegen 90° – unabhängig von dem Verhältnis zwischen a_1 und a_2 . Das bedeutet Δt ist für beide Seiten ungefähr gleich groß und damit auch Δl . Wenn a_1 und a_2 unterschiedlich sind, Δl aber gleich, dann muss auch der Faserwinkel auf den Seiten unterschiedlich sein. In Abb. 4.10 ist dies durch die graue Linie dargestellt. Für einen rechteckigen Kern bedeutet das, dass der Faserwinkel auf den schmalen Seiten kleiner ist als auf den langen Seiten. Bei einem quadratischen Kern ist der Winkel dagegen auf allen Seiten gleich.

Ein weiterer Effekt führt zu einer zusätzlichen Veränderung der Ablagewinkel. Die Fasern beeinflussen sich gegenseitig und verhindern auf so eine gerade Ablage auf den Seiten eines Rechtecks. Dies führt zu dem in Abb. 4.10 dargestellten S-Schlag der Fasern (durchgängige schwarze Linie). Folgende Mechanismen treten auf.

Wenn der Faden die erste Kante (K_1) einer Seite erreicht hat, steht der Klöppel senkrecht über dieser Kante. Der Faden ist damit zu diesem Zeitpunkt parallel zu der Kante ausgerichtet, was einem Faserwinkel von 0° entsprechen würde. Während sich Klöppel und Kern weiter bewegen, wandert der senkrecht auf die Oberfläche des Kerns projizierte Punkt des Klöppels und damit auch die projizierte Linie des Fadens über die Fläche des Kerns. Der projizierte Faserwinkel wird größer. Wenn der Klöppel in Verlängerung der betrachteten Oberfläche des Kerns steht, legt sich der Faden auf die projizierte Linie ab und hat die nächste Kante (K_2) erreicht. Die Bewegung des Fadens wird aber durch die entgegenlaufenden Flechtfäden beeinflusst. Im Bereich der ersten Ecke (K_1) haben sich die gegenläufigen Fäden schon um diese Kante gelegt, sind also auf der Seite fixiert. Die Reibung zwischen den Fäden verhindert, dass der Winkel des noch nicht abgelegten Fadens weiter vergrößert und verursacht so eine lokale Winkeländerung.

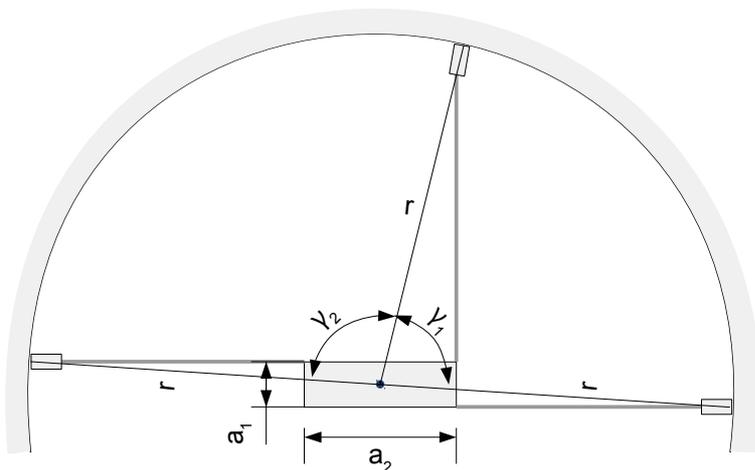
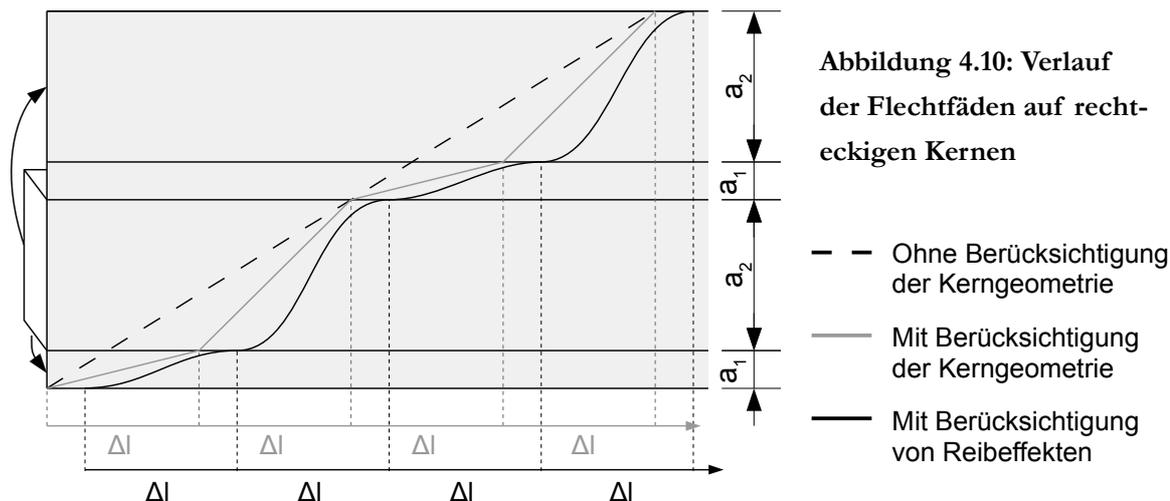


Abbildung 4.9: Winkelpositionen der Klöppel beim Anlegen der Fasern an die Längsseiten eines rechteckigen Kerns. Der Kern ist dabei im Verhältnis zu groß dargestellt.



Im Bereich der zweiten Ecke (K_2) wird die Ablage durch die gegenläufigen Fasern verhindert. Diese halten den Faden kurz vor der Ecke noch leicht nach oben, während der Faden sich schon um die Ecke gelegt hat. Erst wenn die gegenläufigen Fasern sich der Fläche annähern, wird der Faden endgültig abgelegt. Dadurch wird die Ablage verzögert, während der Kern sich weiter bewegt und so der Faserwinkel verkleinert wird. Es entsteht der in Abb. 4.10 dargestellte S-Schlag.

Beim Umflechten von nicht runden Querschnitten sollte also beachtet werden, dass der lokale Faserwinkel vom globalen leicht abweicht. Dieser Effekt ist umso stärker, je stärker das Querschnittsprofil von einem runden abweicht. Durch diese Veränderung der Ablagewinkel kommt es auch zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Stehfäden. Im Bereich des kleineren Faserwinkels nimmt die Stehfadendichte zu.

4.2.3. Längsquerschnitt

Die Möglichkeit variabler Querschnittsgeometrien kann zu Hinterschnitten führen, welche ein zerstörungsfreies Entfernen des Kerns verhindern. Aus diesem Grund sind oft spezielle Kernkonzepte vorzusehen, die vom jeweiligen Bauteil abhängen. Im Abschnitt 4.2.1 wird auf verschiedene Arten eingegangen, wie ein Kern aufgebaut sein kann.

Abb. 4.2 zeigt, dass die Variation des Faserwinkels eine Änderung des Umfangs um den Faktor fünf erlaubt. Dieses Potenzial wird in der Praxis allerdings nur selten genutzt, um differente Umfänge zu realisieren. Im Allgemeinen sind Faserwinkel und Umfang vorgegeben und es muss über die Ablagebreite der Fasern eine Variation erreicht werden. Aus Gleichung 3 geht hervor, dass der Zusammenhang zwischen Umfang und Faserbreite linear ist. In Tabelle 6 sind beispielhaft Erfahrungswerte für mögliche Ablagebreiten von zwei Fasertypen gegeben. Die Breiten sind grobe Richtwerte für triaxiale Geflechte, die unter bestimmten Bedingungen auch unter- bzw. überschritten werden können.

Faser	Ablagebreite [mm]	
	minimal	maximal
Tenax HTS40 F13 12k	2	3,5
Tenax HTS40 F13 24k	2,5	4

Tabelle 6: Mögliche Ablagebreiten von Fasern (Erfahrungswerte)

Aus den Werten wird deutlich, dass aufgrund der Variation der Faserbreite der Umfang bei gleichem Winkel maximal verdoppelt werden kann bei gleichbleibender Bedeckung. Aus diesem Grund muss bei deutlicher Veränderung des Umfangs häufig sowohl die Ablagebreite als auch der Faserwinkel verändert werden. In diesem Fall lassen sich deutliche Variationen realisieren.

Neben der Variation des Umfangs in Längsrichtung kann auch die Mittellinie des Kerns eine geschwungene Form im Raum darstellen. Dabei darf der Kern nicht wieder in die Flechtebene eindringen. Ein U-förmiger Kern mit langen Schenkeln ist z. B. nur unter bestimmten Bedingungen möglich. 90° Winkel dagegen können gut umflochten werden. Allerdings ergeben sich beim Umflechten von gebogenen Kernen auf der Innen- und Außenseite unterschiedliche Faserwinkel und Ablagebreiten. Diese sind bedingt durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die sich auf der Innen- bzw. Außenseite beim Abzug einstellen. Der Geschwindigkeitsunterschied kann wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta v_K = \pm \frac{1}{2} \cdot P_p \cdot v_K \quad (15)$$

P_p ist das Verhältnis von Kerndurchmesser zu mittlerem Krümmungsradius. Der positive Wert gilt auf der Außenseite, der negative auf der Innenseite.

Mit dem Geschwindigkeitsunterschied und der Gleichung 3 kann die theoretische Abweichung vom mittleren Winkel bestimmt werden. In Abbildung 4.11 ist der Faserwinkel über P_p für verschiedene Sollwinkel aufgetragen. Bei $P_p = 2$ entspricht der Kernradius genau dem Krümmungsradius, damit geht die Geschwindigkeit auf der Innenseite gegen Null und der Faserwinkel gegen 90°.

Durch die Veränderung des Winkels ändert sich gemäß Gleichung 2 auch die Ablagebreite. Das führt dazu, dass je nach Faser ab einem bestimmten Wert für P_p das Geflecht auf der Außenseite des gekrümmten Kerns Lücken aufweist, sich auf der Innenseite hingegen nicht mehr soweit zusammenzieht, dass es sich an den Kern anlegt. Um die theoretischen Annahmen zu überprüfen, wurden Kerne mit unterschiedlichen Krümmungsradien umflochten. Der Faserwinkel und die Ablagebreite wurde anhand von Fotografien ermittelt. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse für die

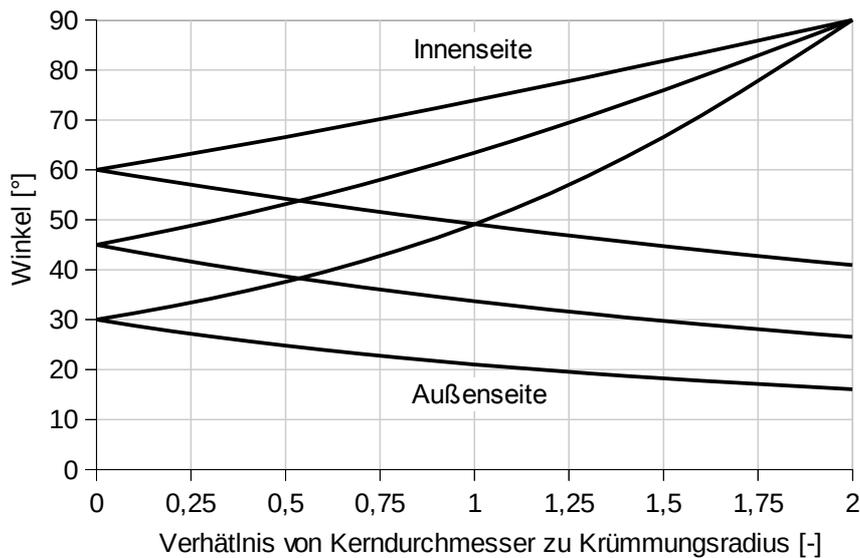


Abbildung 4.11: Winkeländerung bei längs gekrümmten Kernen auf der Innen- und Außenseite der Krümmung in Abhängigkeit von P_p für verschiedene Sollwinkel

Ablagebreite und dem Faserwinkel zusammengefasst. Es wird deutlich, dass die theoretische Bestimmung des Ablagewinkels und der Faserbreite mit dem hier gezeigten analytischen Ansatz nur Tendenzen aufzeigt, aber nicht geeignet ist, um exakte Werte zu bestimmen. Ursache ist, dass im Zusammenhang zwischen Abzugsgeschwindigkeit, Kernumfang, Ablagebreite sowie Ablagewinkel die Ablagebreite und der Ablagewinkel zwei Parameter sind, die zumindest lokal in Abhängigkeit voneinander variieren können. Gemäß der theoretischen Betrachtung müssten die Winkel innen und außen signifikant variieren, also die Fäden auch auf der Kernoberfläche stark gekrümmte Bahnen aufweisen. Dies geschieht nicht, da die Fadenzugkraft die einzelnen Fäden leicht gerade zieht und damit für einen Ausgleich der Winkel sorgt. Zum anderen wurde in [44] gezeigt, dass sich der Flechtwinkel nicht sofort neuen Parametern wie der Abzugsgeschwindigkeit anpasst, sondern ein Übergang erfolgt. Für längs gekrümmte Bauteile bedeutet dies, dass eine analytische Vorhersage erst möglich ist, wenn sich der Prozess wieder stabilisiert hat, was häufig nicht innerhalb der kurzen Bögen passiert.

In der Dissertation von Rosenbaum [27] wurde gezeigt, dass eine exzentrische Kernführung ebenfalls zu einer Änderung des Flechtwinkels führt. Bei ausreichend großem Flechtring oder einem beweglichem Flechtring ließe sich so der Effekt von unterschiedlichen Ablageeigenschaften bei einer Krümmung theoretisch wieder ausgleichen. In der Praxis werden die Winkelabweichungen aber häufig hingenommen, da P_p meistens klein, und damit die Abweichungen ebenfalls gering ist.

Krümmungsradius [mm]	Theo. Fadenbreite [mm]			Gem. Fadenbreite [mm]			Differenz [mm]	
	Innen	Mitte	Außen	Innen	Mitte	Außen	Innen	Außen
55	2,35	3,47	4,04	2,37		4,4	0,2	0,36
100	2,95	3,47	3,83	2,63		4,02	-0,32	0,19
150	3,14	3,47	3,73	2,82	3,5	4,1	-0,32	0,37
200	3,23	3,47	3,67	3,03	3,3	3,91	-0,2	0,24
250	3,28	3,47	3,63	3,16	3,6	4	-0,12	0,37

	Theo. Winkel [°]			Gem. Winkel [°]			Differenz [°]	
	Innen	Mitte	Außen	Innen	Mitte	Außen	Innen	Außen
55	61,4	45	34,5	54,2		43,9	-7,2	9,4
100	53,1	45	58,7	51,2		45,5	-1,9	6,8
150	50,2	45	40,6	50	45,5	45,3	-0,2	4,7
200	48,8	45	41,6	47,8	44,6	45,5	-1	3,8
250	48	45	42,3	47	45	45,3	-1	3

Tabelle 7: Vergleich von theoretischer und gemessener Ablagebreite bei gekrümmten Ker-
nen. Der Kerndurchmesser betrug jeweils 50 mm.

4.3. Maschinenbedingte Randbedingungen

4.3.1. Maschinendurchmesser

Für den Flechtprozess selber von geringem Interesse, für die Handhabung allerdings entscheidend ist die Größe einer Flechtmaschine. Hier treten je nach Bauart deutliche Unterschiede auf. Genauer betrachtet werden im Folgenden nur zwei Maschinentypen, die Radial- und Horizontalflechter, da diese Flechter sich am Markt durchgesetzt haben und zur Verarbeitung von Glas- oder Kohlenstofffasern am besten geeignet sind.

Entscheidend für die Größe der Maschine ist zum einen der Stich und zum anderen die Anzahl der Flügelräder. Der Stich gibt den Abstand der Rotationsachsen der Flügelräder zueinander an. Mit dem Stich und der Anzahl der Flügelräder lässt sich wie folgt eine grobe Abschätzung des Maschinendurchmessers einer Horizontalflechtmaschine (D_{FM-F}) bestimmen.

$$D_{FM-F} = \frac{N_{fr} \cdot D_{St}}{\pi} + D_{Fr} + D_K + 200 \text{ mm} \quad (16)$$

Dabei ist D_{St} der Stich der Maschine, D_{Fr} der Durchmesser der Flügelräder und D_K der Durchmesser der Klöppel. Bei einer Horizontalflechtmaschine sind D_{St} und D_{Fr} gleich.

Bei einem Radialflechter ist der Stich nicht ohne eine weitere Definition bestimmbar, da die Flügelräder nicht parallel orientiert sind. Infolgedessen muss definiert werden, wo bei einem Radialflechter der Stich gemessen wird. Bei der Firma Herzog geschieht dies an der Spitze des Klöppels. Um bei einem Radialflechter den Durchmesser des Flechtmaschinenrumpfs abzuschätzen, ist auch die Höhe der Klöppel (h_K) notwendig. Mit dieser Größe lässt sich der Durchmesser wie folgt abschätzen:

$$D_{FM-R} = \frac{N_{fr} \cdot D_{St}}{\pi} + 2 \cdot h_K + 800 \text{ mm} \quad (17)$$

Dabei sind noch keine Systeme für die Stehfadenzuführungen berücksichtigt. Gleichung 16 und 17 geben nur einen groben Wert der Maschinendurchmesser an, genaue Maße ergeben sich bei der Konstruktion der Maschine. Dennoch wird deutlich, welche Dimensionen Maschinen annehmen können. In Abbildung 4.12 sind die mit oben genannten Formeln abgeschätzten Durchmesser der Flechtmaschinen über den gewünschten Bauteilumfang für verschiedene Flechtwinkel aufgetragen. Es wurde dabei mit einer Ablagebreite der Fäden von 3 mm und einer Körper-2x2-Bindung gerechnet.

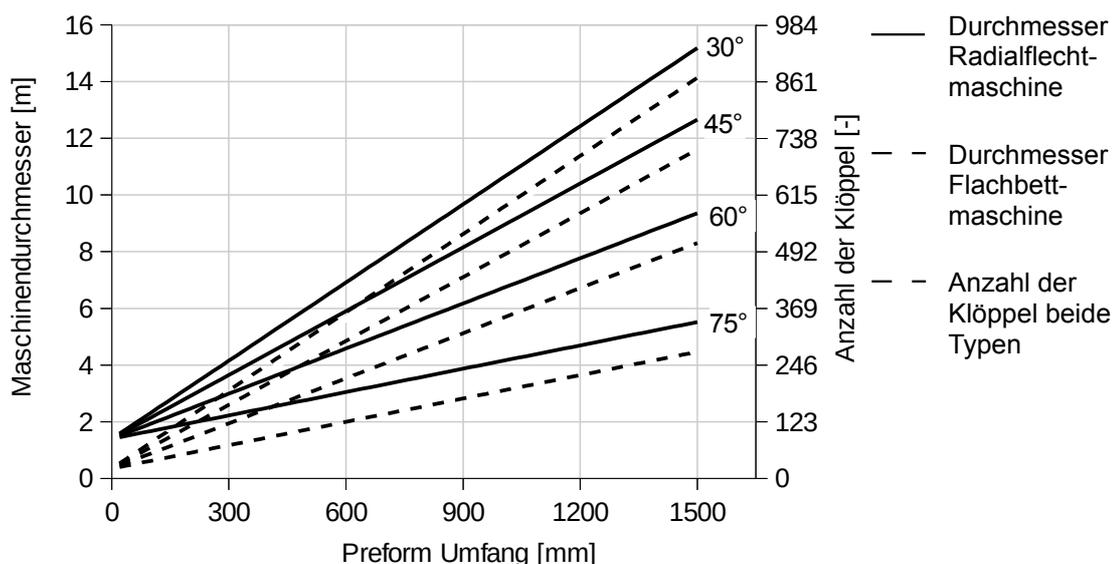


Abbildung 4.12: Flechtmaschinenumfänge in Abhängigkeit von Umfang und Flechtwinkel bei einer Ablagebreite von 3 mm und einem Stich von 100 mm

4.3.2. Besetzungsdauer

Für die Bewertung der Effektivität einer Maschine spielt die Besetzungsdauer eine erhebliche Rolle. Derzeit werden sämtliche Maschinen noch manuell bestückt. Die Dauer hängt damit wesentlich vom Personal ab. In der Arbeit von Barley und Dingeldein [65] wurde die Besetzungsdauer untersucht. Ergebnis ist eine exponentielle Zunahme der Rüstzeit mit Zunahme der Klöppel. Dies führt dazu, dass Maschinen mit sehr vielen Klöppeln (ab 200 bis 300 Stück) deutlich an Wirtschaftlichkeit verlieren. Wie in Abbildung 4.12 an der Sekundärachse ersichtlich, steigt die Zahl der Klöppel schnell auf Werte über 200 Stück. Für diese Fälle ist im Gesamtproduktionsprozess zu überprüfen, ob die notwendige Rüstzeit toleriert werden kann.

Um die Rüstzeiten zu minimieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Einen automatischen Klöppelwechsel in der Form, dass es einen zusätzlichen Satz an Klöppeln mit Klöppelfüßen gibt, der außerhalb der Maschine mit den Spulen bestückt werden kann. Beim Spulenwechsel werden die leeren Klöppel automatisch über eine Weiche aus dem Flechter herausgefahren und die vollen Klöppel hinein. Dadurch wird die Stillstandszeit der Maschine erheblich reduziert. Außerdem können die Klöppel in der für das Besetzen optimalen Positionen stehen, sodass auch diese Arbeit schneller erfolgen kann.
- Klöppelwechsel bei dem nur das Klöppeloberteil mit Spule getauscht wird. Der Klöppelfuß verbleibt in der Maschine. Der Tausch geht deutlich schneller als der Spulenwechsel, muss aber weiterhin manuell durchgeführt werden.
- Tausch des gesamten Rumpfs mit allen Klöppeln in der Maschine. Dies ist dann von Interesse, wenn neben dem Flechtmaschinenrumpf noch viele weitere komplexe und teure Maschinen benötigt werden zur Preformherstellung. Durch den Tausch des gesamten Rumpfs lässt sich die Stillstandszeit minimieren, da nicht nur die Spulen außerhalb der Produktionslinie gewechselt werden können, sondern der erste Meter Geflecht abgezogen werden kann. Dies ist ein notwendiger Prozess in der Textiltechnik. Daneben lassen sich auch Wartungsarbeiten parallel zur Produktion durchführen.

In der Seilflechtereie werden z. T. Fäden von leeren Spulen durch Anspießen eines neuen Fadens einer vollen Spule verlängert. Dadurch können deutlich längere Seile hergestellt werden, als das Fassungsvermögen der Spulen theoretisch ermöglicht. In der Verarbeitung von Kohlenstoff- oder Glasfasern ist dies aber nicht zweckmäßig, da das Spießen ein sehr aufwendiger und langwieriger Prozess ist. Hier werden üblicherweise alle Spulen gewechselt sobald die erste leer ist.

4.3.3. Besetzungsregeln

In einer Flechtmaschine müssen weder alle Klöppel einer Maschine mit Spulen besetzt werden, noch muss die maximal mögliche Anzahl an Klöppeln eingebaut wer-

den. Die Produktivität der Maschine nimmt allerdings um den Wert ihrer Teilbesetzung ab. Eine halb besetzte Maschine ist nur noch halb so produktiv. Ursache dafür ist, dass die Maschine weiterhin genauso schnell arbeitet, aber nur halb so viel Material ablegt. Deshalb sollte eine Teilbesetzung nur für Versuche oder in Ausnahmen erfolgen. Bei einer Teilbesetzung ändert sich nicht nur die Produktivität, sondern auch die Art des Geflechts. Es ist weiterhin möglich, eine Maschine so zu besetzen, dass kein Geflecht entsteht. In diesem Fall würden zwei Fadenscharen abgelegt, die aber nicht miteinander verflochten werden. Dies kann wie folgt überprüft werden.

$$\frac{0,5 \cdot N_{fkl}}{N_{SFr}} \neq \text{gerade Zahl} \quad (18)$$

Dabei ist N_{fkl} die Anzahl der freien Klöppel + 1 zwischen zwei besetzten Klöppeln einer Laufrichtung und N_{SFr} die Anzahl der Schritte, die ein Klöppel auf einem Flügelrad macht. Ein Schritt ist dabei immer die Bewegung eines Klöppels bis zur nächsten Klöppelposition. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass nur ganze und halbe Schritte möglich sind. Das heißt, der Klöppel bewegt sich digital durch die Flechtmaschine und kann sich immer nur an den Öffnungsstellen des Flügelrads befinden. Da in einer Laufrichtung immer nur jede zweite Öffnung eines Flügelrads mit einem Klöppel besetzt ist, gibt es auch halbe Schritte.

Wenn Gleichung 18 erfüllt ist, entsteht ein Geflecht, andernfalls nicht. Beispielsweise darf bei einem Flechter mit Flügelrädern mit jeweils zwei Klöppeln nicht jeder vierte Klöppel besetzt werden, wie in Abb. 4.13 dargestellt.

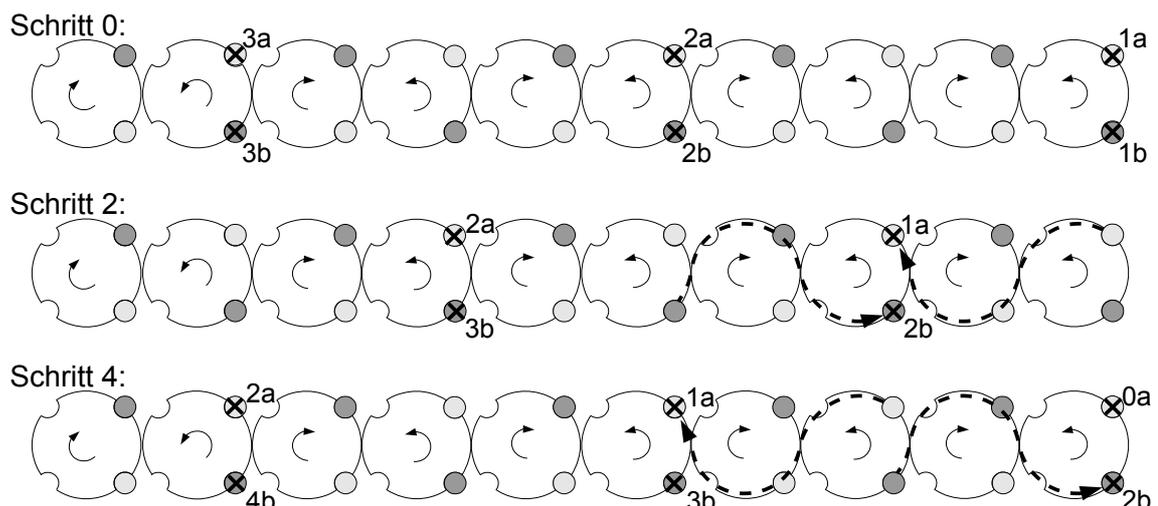


Abbildung 4.13: Bewegung der Klöppel in einer Flechtmaschine, bei der nur jeder vierte Klöppel besetzt ist. Bei Schritt 2 begegnen sich die Klöppel der gegenläufigen Systeme wieder. Die b-Klöppel laufen wieder unter den a-Klöppeln durch. Beim Schritt 4 entspricht die Stellung der Klöppel der von Schritt 0. D. h., die b-Klöppel bewegen sich immer unter den a-Klöppeln hindurch und es entsteht kein Geflecht.

Neben der lokalen Besetzung der Maschine ist ebenfalls zu überprüfen, ob die Besetzung zur Gesamtklöppelzahl passt. Ferner muss beachtet werden, dass sich die Bindungsart ändern kann. So führt eine halbe Besetzung bei einer Flechtmaschine mit einer Köper-2x2-Bindung zu einer Leinwandbindung, bei einer Drittelbesetzung dagegen bleibt der Köper 2x2 erhalten. Es können auch unregelmäßige Bindungen entstehen. Falls eine Besetzung nicht möglich scheint, wie z. B. die Viertel-Besetzung bei Flügelrädern mit vier Öffnungen (s. Abb. 4.13), kann ein ungleicher Abstand der freien Klöppel verwendet werden, um trotzdem die gewünschte Fadenzahl zu erreichen. Bei der Viertel-Besetzung bspw. werden im Wechsel ein Klöppel besetzt und fünf Klöppel frei gelassen. Damit ist in der Summe nur jeder vierte Klöppel besetzt und es entsteht trotzdem ein Geflecht.

4.3.4. Spulenvolumen

Das Spulenvolumen nimmt Einfluss auf die Produktivität der Maschine. Umso größer die Spulen umso mehr Material kann aufgespult werden und umso seltener muss die Maschine neu besetzt werden. Bei sehr dünnen Fäden spielt dies häufig eine untergeordnete Rolle, da hier auch auf kleine Spulen ausreichend Material aufgespult werden kann. Bei der Verarbeitung von Kohlenstoff- und Glasfasern wird jedoch häufig versucht, Fasern mit möglichst vielen Filamenten zu verwenden, um durch die größere Ablagebreite möglichst große Umfänge mit möglichst kleinen Maschinen abdecken zu können. Zudem sind Fasern mit vielen Filamenten im Verhältnis billiger als die Fasern mit geringerer Anzahl. In beiden Fällen wird die Wirtschaftlichkeit des Flechtprozesses erhöht. Bei den aktuell für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern verwendeten Flechtmaschinen ist das Spulenvolumen dergestalt, dass bei 50 k Rovings z. T. nur 50 m auf eine Spule passen. Dies ist für eine Serienproduktion viel zu wenig.

Das Spulenvolumen wird durch zwei Parameter definiert, den Spulendurchmesser und die Spulenhöhe. Der Spulendurchmesser ist begrenzt durch den Stich der Flechtmaschine bzw. hängt direkt mit diesem zusammen. Wenn der Durchmesser der Spule vergrößert wird, wird damit auch der Durchmesser der gesamten Flechtmaschine deutlich größer. Die Spulenhöhe beeinflusst dagegen bei Horizontalflechtmaschinen nicht den Gesamtdurchmesser der Maschine. Bei Radialflechtmaschinen nimmt der Durchmesser entsprechend der Spulenhöhe zu. Die Spulenhöhe ist aus zwei weiteren Gründen beschränkt. Zum einen muss der Fadenabzug von der Spule beachtet werden. Umso höher die Spule ist, umso stärker wird der Faden geschädigt (eine genaue Beschreibung der Zusammenhänge findet sich in Abschnitt 5.1.2). Zum anderen nimmt die Belastung des Klöppelfußes deutlich zu, wenn die Spule höher wird, da der Hebelarm und damit das Moment am Fuß zunimmt. Dies kann dazu führen, dass die Geschwindigkeit der Maschine herabgesetzt werden muss, wodurch die Produktivität sinkt.

4.3.5. Fadenzugkraft und Federn im Klöppel

In Abschnitt 3.3.1 wurde dargestellt, dass über eine Feder im Klöppel die Fadenzugkraft eingestellt werden. Die Fadenzugkraft hat verschiedene Einflüsse auf den Flechtprozess. Bei einer zu hohen Spannung werden die Fasern geschädigt bzw. können auch ganz reißen. Umso geringer die Spannung ist, umso weniger stark zieht sich das Geflecht zusammen, wodurch sich das Prozessfenster einer Maschine verkleinert. Überdies wird eine mehrlagige Preform weniger stark kompaktiert. Dies kann zu erheblichen Problemen bei der Infiltration führen. Aus den genannten Gründen muss für jede Preform in Abhängigkeit der Fasern und der Geometrie eine entsprechende Fadenzugkraft gewählt werden. Diese sollte zum einen so niedrig wie möglich sein, damit die Faserschädigung gering bleibt, zum anderen so hoch, dass die Preform hergestellt werden kann und ausreichend kompaktiert wird.

Auf die Schädigung der Fasern durch eine zu hohe Fadenzugkraft wird in Abschnitt 5.1.2 genauer eingegangen. Wie das Prozessfenster durch die Fadenzugkraft beeinflusst wird, ist im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

4.4. Prozessfenster

Die im Abschnitt 4.1 dargestellten Formeln geben den Zusammenhang zwischen Umfang, Fadenanzahl, Faserwinkel und Ablagebreite für ein geschlossenes Geflecht wieder. Ob bestimmte Faserbreiten oder Winkel auch praktisch erreicht werden, ist damit nicht bekannt. Um dies zu untersuchen und um festzustellen, in welchen Bereichen ein Geflecht erzeugt werden kann, wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt und auf diese Weise wird ein Prozessfenster bestimmt.

4.4.1. Messreihen zur Ermittlung des Prozessfensters

Für alle Flechtversuche wurde eine Flechtmaschine RF176-100 der Firma Herzog verwendet. Es handelt sich dabei um einen Radialflechter mit 176 Klöppeln. Bestückt war die Maschine mit dem von Herzog entwickelten Klöppel für Kohlenstofffasern (IFDA100). Die Stehfädenspannung wurde mittels einer Umschlingungsbremse erzeugt. Die Manipulation des Kerns erfolgte mit einem KUKA-Sechachsroboter. Es wurden 1,5 m lange runde Querschnitte umflochten.

Die Versuche sollten den Einfluss einzelner Maschinenparameter auf den Flechtprozess zeigen. Daher wurde lediglich ein einziges Fasermaterial verwendet: Toho-Tenax HTS40 F13 12k 800tex. Mit anderen Fasern würden die Ergebnisse leicht variieren. Generell verhalten sich die verschiedenen Kohlenstofffasern allerdings ähnlich. Verändert wurden folgende Parameter:

- Art des Geflechts: Es wurden für jeden der folgenden Parameter sowohl biaxiale als auch triaxiale Geflechte erzeugt. Die Maschine war dabei immer voll besetzt, sodass eine Körper-2x2-Bindung erzeugt wurde.
- Flechtwinkel: Es wurde jeweils versucht, Geflechte mit 30°, 45°, 60° und 70° bzw. 75° zu erzeugen. Gerade die größeren Winkel ließen sich nicht bei allen Parameterkombinationen erzeugen.
- Flechtfadenzugkraft: Alle Geflechte wurden mit 350 g und 900 g Federn in dem Klöppeln erzeugt. Bei 900 g war die obere Grenze der Fadenzugkraft für die verwendeten Fasern erreicht. Eine merklich höhere Spannung hätte die Fasern so stark geschädigt, dass ein Flechten nicht mehr möglich gewesen wäre. Mit 350 g wurde eine geringe Schädigung der Fasern erreicht – bei gleichzeitig ausreichender Kompaktierung des Geflechts.
- Kerndurchmesser: Es wurden, sofern möglich, die verschiedenen Geflechte auf Kernen mit den Durchmessern 80 mm, 100 mm, 120 mm, 140 mm und 160 mm erzeugt. Dadurch konnten unterschiedliche Ablagebreiten bei gleichem Flechtwinkel überprüft werden.
- Stehfadenzugkraft: Bei jedem triaxialen Geflecht wurde jeweils die Stehfadenzugkraft variiert. Es wurden, sofern möglich, folgende Zugkräfte eingestellt: 0,2 N, 0,7 N, 1 N, 1,8 N und 2,8 N.

Tabelle 8 stellt einen Überblick über die durchgeführten Versuche auf und zeigt, bei welchen Kombinationen ein Geflecht erzeugt werden konnte.

Für alle Versuche wurden Kerne mit konstantem Durchmesser verwendet, um im Geflecht einen quasi statischen Zustand zu erhalten und so den Einfluss der Prozessparameter bestimmen zu können. Bei einer Änderung der Parameter, wie Kerndurchmesser, Abzugsgeschwindigkeit oder Fadenspannung, reagiert das Geflecht relativ träge. Das heißt, es passt sich nicht sofort den neuen Bedingungen an, sondern es besteht ein Übergangsbereich. Bei einer stetigen Änderung der genannten Parameter, also bspw. einen konischen Kern, wird zwar theoretisch jede mögliche Parametereinstellung zwischen den gemessenen Minimal- und Maximalwerten berücksichtigt, aber die gemessenen Werte können nicht auf die zu dem Messzeitpunkt herrschenden Einstellungen bezogen werden, da sich das Geflecht noch nicht endgültig eingestellt hat. Es wären deshalb auch Untersuchungen interessant, wie lange ein Geflecht benötigt, um sich auf veränderte Prozessparameter einzustellen. Diese wurden aber nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt. Gemessen und ausgewertet wurden folgende Punkte:

- Anpressdruck auf dem Kern,
- Ablagebreite und Lücken der Flechtfäden,
- Flechtwinkel,
- Ondulation der Stehfäden.

Klöppelfeder: 350g							Klöppelfeder: 900g							
Ø	Stf Zug-Kraft [N]	Faserwinkel					Ø	Stf Zug-Kraft [N]	Faserwinkel					
		30°	45°	60°	70°	75°			30°	45°	60°	70°	75°	
80	0		A					0			A			
	0,2	wS-A	vS-A					0,2	G					
	0,7							0,7		vS	A			
	1							1						
	1,8							1,8			A			
	2,8							2,8			A			
100	0			A				0						
	0,2		vS					0,2						
	0,7		wS					0,7		vS				
	1							1		wS				
	1,8			A				1,8				A		
	2,8	H						2,8						
120	0							0						
	0,2		wS	vS				0,2	wS					
	0,7			vS-A				0,7		wS				
	1					A		1			vS			
	1,8				A			1,8				wS		
	2,8	H	H					2,8						
140	0							0						
	0,2		wS	vS				0,2		wS				
	0,7			vS				0,7			vS			
	1					A		1			vS			
	1,8				A			1,8			wS	vS		
	2,8		H					2,8					wS	
160	0							0						
	0,2		wS	vS				0,2		vS				
	0,7			vS				0,7			vS			
	1					A		1			vS			
	1,8					A		1,8			wS	vS		
	2,8		H					2,8						

wS Stehfäden bilden wenige Schlaufen
vS Stehfäden bilden viele Schlaufen
uA Geflecht liegt unten nicht an

A Geflecht liegt nicht an
H Stehfadenzugkraft zu hoch
G Stehfadenzugkraft zu gering

Tabelle 8: Übersicht der durchgeführten Flechtversuche zur Bestimmung eines Prozessfensters. Grau markiert sind die Felder, für die ein Versuch durchgeführt wurde. Dunkelgrau sind die Versuche markiert, bei denen es keine Auffälligkeiten gab.

Durch diese Analysen kann ein komplexes Prozessfenster bestimmt werden, welches nicht nur Auskunft über die reine Umsetzbarkeit eines Geflechts gibt, sondern auch Aussagen über die Qualität des Geflechts zulässt. Die Anforderungen an ein Geflecht können sich je nach Verwendungszweck und in Abhängigkeit des gesamten Prozesses unterscheiden. Eine starke Kompaktierung ist bspw. bei nur wenigen Lagen oder Blasformkernen weniger wichtig. Dadurch ist keine generelle Definition einer optimalen Parameterkombination möglich.

4.4.2. Ondulation der Stehfäden

Versuchssystematik

Zur Bestimmung der Ondulation der Stehfäden wurde ein Meter des jeweiligen Geflechts abgeschnitten. Aus diesem Geflechtstück wurden zwei Stehfäden entnommen, um die Länge des Fadens im gestrecktem Zustand separat zu messen. Je nach Stärke der Ondulation weicht die Länge der Stehfäden stärker oder weniger stark von 1 m ab. Der Unterschied wird im Weiteren als Fadenüberlänge bezeichnet. Die Messung erfolgte mittels eines Maßbands. Auf diese Weise waren nur Abstufungen im 0,5 mm Bereich möglich. Da die Überlängen ebenfalls im Millimeterbereich lagen und jeweils nur zwei Messungen durchgeführt wurden, konnten aus den Daten nur Tendenzen bestimmt werden. Bei den Versuchen wurde eine Vielzahl an Parametern variiert, die sämtlich einen Einfluss auf die Ondulation der Stehfäden hatten, deshalb sind keine einfachen Zusammenhänge darstellbar.

Versuchsergebnisse

Der Einfluss der Flechtfadenzugkraft auf die Ondulation der Stehfäden ist in Abb. 4.14a dargestellt. In dem Diagramm ist das Verhältnis der Fadenüberlängen beim Einsatz von 900 g Federn zum Einsatz von 350 g Federn aufgetragen. Dargestellt sind die Versuche mit einer Stehfadenzugkraft von 1 N bei verschiedenen Kerndurchmessern und Faserwinkeln. Drei Zusammenhänge sind zu erkennen. Die Ondulation der Stehfäden ist größer oder mindestens gleich groß bei einer höheren Flechtfadenzugkraft. Mit steigendem Kerndurchmesser nimmt der Einfluss der Fadenzugkraft auf die Ondulation ab. Bei einem Flechtwinkel von 45° ist der Effekt stärker als bei einem Flechtwinkel von 30° . Dies führt dazu, dass bei einem Kern mit 100 mm Durchmesser bei einem Faserwinkel von 45° beim Einsatz von 950 g die Fadenüberlängen um den Faktor 11 größer ist als beim Einsatz von 350 g Federn. Bei einem Kerndurchmesser von 160 mm ist dagegen kein Unterschied mehr feststellbar.

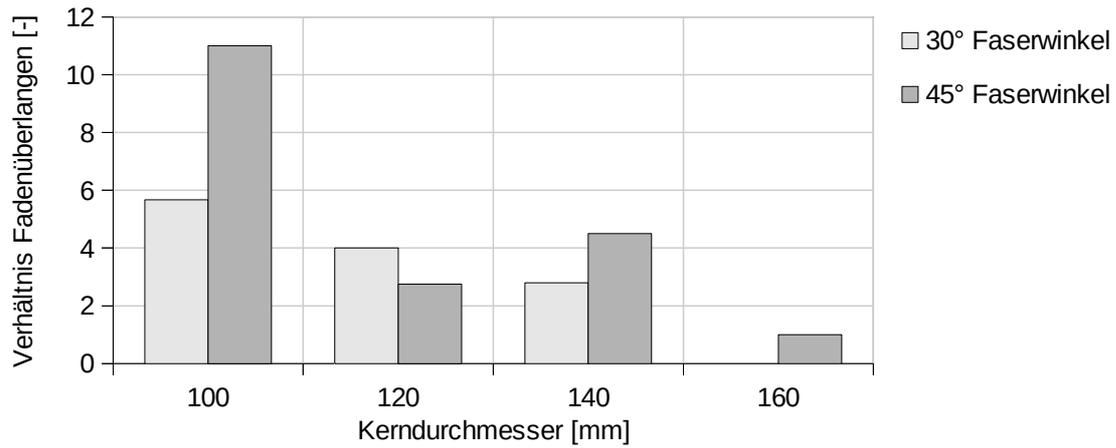
Der Einfluss der Flechtfadenzugkraft ist damit zu erklären, dass die Flechtfäden abwechselnd über und unter dem Stehfadenverlaufen. Bei zunehmender Spannung in den Flechtfäden und gleichbleibender Spannung in den Stehfäden werden diese zu einer stärkeren Ondulation gezwungen. Der Einfluss des Kerndurchmessers ist auf die größere Ablegebreite mit steigendem Umfang zurückzuführen. Dadurch nimmt auch die Roving- und Lagendicke ab und somit auch die Ondulation der Fäden.

In Abb. 4.14b ist der Einfluss der Kerndurchmesser dargestellt. Es sind die Überlängen in Promille für verschiedene Kerndurchmesser und Faserwinkel aufgetragen. Im Klöppel wurden 900 g Federn verwendet und die Stehfadenzugkraft betrug 1,8 N.

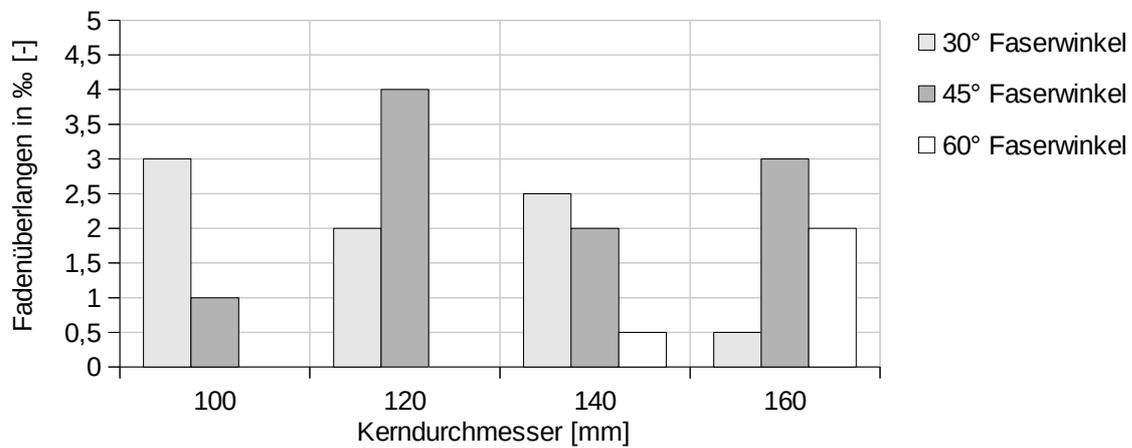
Wie in Abb. 4.14a ist die Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmendem Kerndurchmesser die Überlänge abnimmt. Eindeutig ist dies bei einem Faserwinkel von 60° . Nicht in die Systematik passen die Ergebnisse bei einem Faserwinkel von 30° . Hier nimmt die Überlänge erst zu und erreicht ein Maximum bei einem Kerndurchmesser von 120 mm. Bei anderen Stehfadenzugkräften konnte dieser Effekt bei einem Faserwinkel von 30° nicht beobachtet werden, weshalb er auf Messungenauigkeiten und die geringe Anzahl an Messungen zurückgeführt wird.

Der Einfluss der Stehfadenzugkraft wird in Abb. 4.14c deutlich. Hier sind Versuche mit einer 350 g Feder im Klöppel und einem Faserwinkel von 45° aufgeführt. Es ist sichtbar, dass mit zunehmender Stehfadenzugkraft die Fadenüberlänge abnimmt. Dieser Effekt ist zu erwarten.

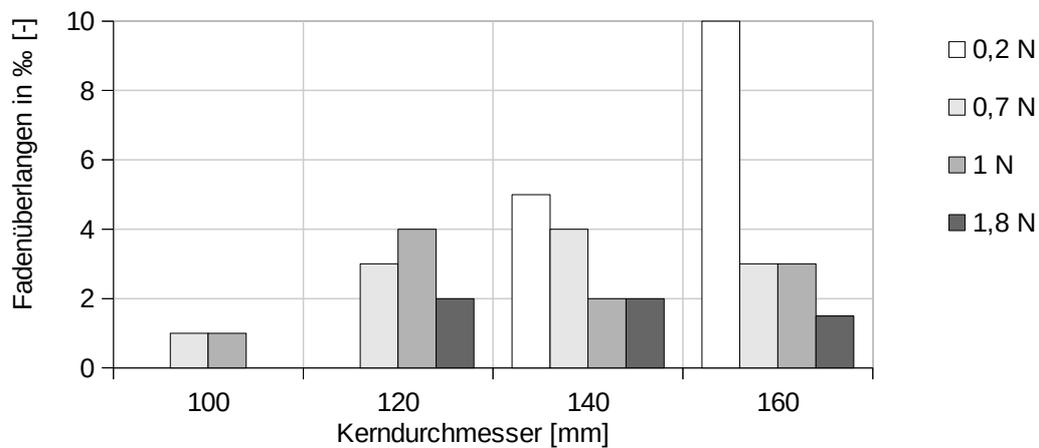
Bei einer zu geringen Stehfadenspannung geht die Ondulation in eine Schlaufenbildung über. In Abb. 4.15 ist ein derartiges Geflecht zu sehen. Es ist möglich, dass diese Schlaufen lediglich sehr vereinzelt auftreten. In Tabelle 8 sind diese Fälle mit dem Kürzel wS gekennzeichnet. Die Schlaufen können aber auch – wie in Abb. 4.15 dargestellt, sehr regelmäßig auftreten. In Tabelle 8 sind solche Geflechte mit dem Kürzel vS markiert. In jedem Fall ist ein solches Geflecht ungeeignet für faserverstärkte Strukturbauteile. Grund für die Schlaufenbildung ist die Verdichtung des Geflechts, bei welcher die parallel laufenden Flechtfäden zusammenrücken. In Abb. 3.17 ist dieses Verhalten schematisch dargestellt. Durch die Kreisbewegung der Klöppel werden die Flechtfäden im Bereich der Klöppel orthogonal an den radial verlaufenden Stehfäden vorbeigeführt, nahe beim Flechtpunkt ist die Bewegung der Flechtfäden allerdings zunehmend axial zu den Stehfäden. Dies führt dazu, dass die Flechtfäden aufgrund der Reibung versuchen, den Stehfaden in die Flechtmaschine hineinzuziehen. Wenn die Zugkraft in den Stehfäden zu gering wird, geschieht ebendies und der Stehfaden bildet eine Schlaufe.



a) Einfluss der Flechtfadenzugkraft (Kraft bei 950 g Feder zu Kraft bei 350 g Feder)



b) Einfluss des Kerndurchmessers auf die Ondulation der Stehfäden



c) Einfluss der Stehfadenzugkraft auf die Ondulation bei verschiedenen Kerndurchmessern

Abbildung 4.14 a-c: Einfluss verschiedener Parameter auf die Ondulation der Stehfäden

Die Gefahr der Schlaufenbildung nimmt zu, wenn die Flechtfadenzugkraft und der Faserwinkel steigen, da dann der axiale Bewegungsanteil der Flechtfäden zu den Stehfäden zunimmt. Dieser Effekt ist ebenfalls in Tabelle 8 zu sehen. Mit zunehmendem Flechtwinkel kommt es erst zur Bildung weniger Schlaufen und dann zu sehr vielen Schlaufen. Der Flechtwinkel, bei welchem es zu einer ersten Schlaufenbildung kommt, wird größer, wenn die Stehfadenzugkraft zunimmt.

Neben der Schlaufenbildung kann eine zu geringe Stehfadenspannungen auch dazu führen, dass der Flechtprozess gar nicht möglich ist. In diesem Fall verknoten sich die Stehfäden in der Flechtebene mit den Flechtfäden (s. Abb. 4.16).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es in jedem Fall zu einer Ondulation der Stehfäden kommt, dass jedoch die dadurch entstehenden Überlängen normalerweise unter 1 % liegen. Bei einer zu geringen Stehfadenzugkraft kommt es zu einer Schlaufenbildung der Stehfäden, welche in jedem Fall zu vermeiden ist. Es kann keine bestimmte Zugkraft bestimmt werden, bei der ein optimales Geflecht produziert wird, vielmehr muss die Stehfadenzugkraft der jeweiligen Flechtfadenzugkraft dem Flechtwinkel und dem Kernumfang angepasst werden.



Abbildung 4.15: Schlaufen im Geflecht aufgrund zu geringer Stehfadenzugkraft



Abbildung 4.16: Stehfäden verknoten sich mit den Flechtfäden aufgrund viel zu geringer Stehfadenzugkraft

4.4.3. Anpressdruck des Geflechts an den Kern

Für den Kern selbst spielt der Anpressdruck eine untergeordnete Rolle, da die Drücke sehr gering sind. Er ist aber vor allem für die Kompaktierung des Geflechts entscheidend. Hat eine Preform viele Lagen, führt eine geringe Kompaktierung bei der Produktion dieser Preform zu sehr hohen Setzwegen bei der Kompaktierung während der Infiltration. Diese Setzwege können zu einer Faltenbildung führen, die zu vermeiden ist. Auch bei der Verwendung von Blasformkernen kann diese Faltenbildung lediglich unter bestimmten Randbedingungen vermieden bzw. reduziert werden [66]. Aus den genannten Gründen ist ein möglichst hoher Anpressdruck des Geflechts anzustreben.

Versuchssystematik

Um zu bestimmen wie der Anpressdruck des Geflechts durch verschiedene Maschinenparameter beeinflusst wird, wurde der Druck bei allen in Tabelle 8 aufgeführten Versuchen gemessen. Dies geschah mithilfe eines flächigen Druckmesssystem der Firma Tekscan. Das System arbeitet mit Folien, die an diskreten Punkten mittels einer drucksensiblen Flüssigkeit den Druck bestimmen können. Es ist dabei möglich, eine definierte Abtastrate einzustellen und damit auch einen zeitlichen Verlauf des Drucks aufzuzeichnen.

Für die Versuche wurde der Sensor Type 5101 verwendet. Dieser Sensor hat ein Messfeld von 110 x 110 mm und eine Auflösung von 2,5 x 2,5 mm. Um ein ausreichend großes Messfeld zu erreichen, wurden zwei bzw. drei Folien kombiniert. Die Leitungen der Sensoren werden teilweise seitlich aus der Folie herausgeführt. Dadurch wird die Folie um einen nicht sensitiven Bereich erweitert. Diese Bereiche ragen bei nebeneinander angeordneten Sensoren in den Sensorbereich des jeweils anderen Sensors hinein. Die Sensoren sind jeweils am Ende des entsprechenden Flechtkerns fixiert. Dabei hat das Messfeld der Sensoren mindestens den halben Umfang des Kerns abgedeckt, beginnend an der Oberseite. Mit der Annahme, dass sich das Geflecht zur Vertikalen symmetrisch verhält, kann so für den gesamten Umfang der Anpressdruck des Geflechts bestimmt werden. In Abb. 4.17 ist ein fixierter Sensor dargestellt.

Beim Flechten ist der gesamte Sensor überflichteten worden. Circa fünf bis zehn Zentimeter hinter dem Sensor ist der Flechtprozess gestoppt worden. Die Messung ist stets erst nach dem Flechtprozess beendet worden und hat mit einer Abtastrate von 10 Hz gearbeitet. In Abb. 4.18 ist das Ergebnis einer Messung in einem 3D-Plot zu sehen. Der Sensor ist hier halb überflichteten. Es ist zu erkennen, dass der Druck im vorderen Bereich noch niedrig ist, da noch kein Geflecht auf dem Sensor liegt. Im hinteren Bereich dagegen steigt der Druck deutlich an. Hier ist der Sensor mit dem Geflecht bedeckt. Es wird jedoch ebenfalls deutlich, dass der Druck nicht an allen Messpunkten gleich hoch ist. Die Schwankungen werden dadurch verursacht, dass das Geflecht lediglich an bestimmten Punkten anliegt und an anderen nicht.

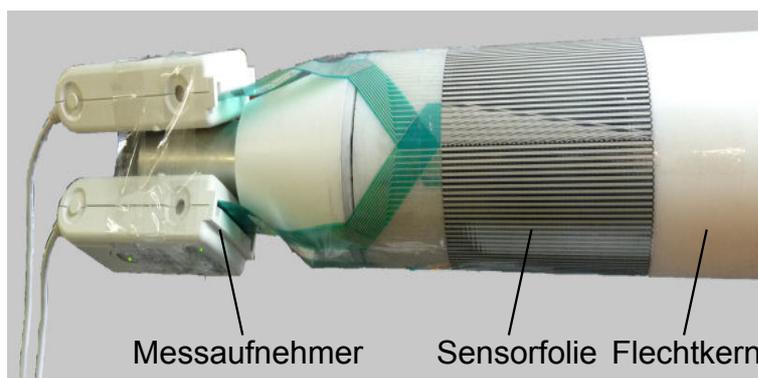


Abbildung 4.17: Folien-sensor mit Messaufnehmer auf einem Flecht-kern positioniert

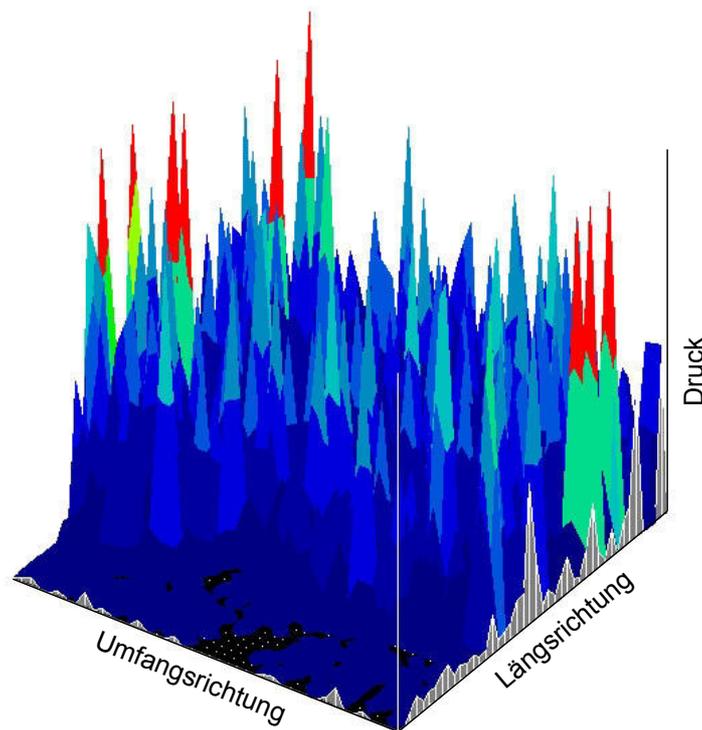


Abbildung 4.18: Druckverteilung auf dem Kern mit größtenteils überflochtenem Sensor. Es sind deutliche Druckunterschiede sichtbar, die durch die lokale Auflage der Geflechte verursacht wird.

Ursache hierfür ist die Oberflächenstruktur des Geflechts mit der Ondulation der Flechtfäden.

Auch beim Betrachten des zeitlichen Verlaufs zeigt sich, dass der Druck schwankt. Ursache ist der schwingende Flechtring. Zudem sinkt der Anpressdruck, sobald der Flechtprozess gestoppt wird. Dies bedeutet, der Druck welcher beim Überflechten erreicht wird, muss nicht dem Druck entsprechen, mit welchem später die einzelnen Lagen der Preform zusammengedrückt werden.

Für die Auswertung wurden drei Zeitpunkte betrachtet: bevor das Geflecht den Sensor berührte (Messfeld 1), sobald das Geflecht den Sensor vollständig bedeckte (Messfeld 2) und nachdem der Flechtprozess beendet wurde (Messfeld 3). Um sowohl lokale als auch zeitliche Schwankungen auszugleichen und keine zu hohen oder zu niedrigen Werte zu erhalten, erfolgte bei der Auswertung sowohl eine Mittlung über die Zeit als auch im Raum. Im ersten Messbereich (bevor das Geflecht den Sensor berührt) wurden alle Messwerte vom Beginn der Messung bis eine Sekunde, bevor der erste Kontakt sichtbar war, zeitlich gemittelt. Für die zeitliche Mittlung direkt nach dem Überflechten wurden zwei Sekunden (20 Messungen) verwendet – beginnend mit der ersten Messung, bei welcher der Sensor vollständig mit dem Geflecht bedeckt ist. Um den Druck, nachdem der Flechtprozess beendet war, zu bestimmen, wurden ebenfalls Messungen über 2 Sekunden (20 Messungen) gemittelt. Hier ist die erste Messung jene, nachdem der Rüttler, welcher den Flechtring zum Schwingen bringt, abgeschaltet wurde. Durch die zeitliche Mittlung wurden drei Messfelder bestimmt. Das erste wurde zur Eichung verwendet. Die Sensoren sollten

hier keinen Druck messen. Aufgrund der Krümmung der Folie wurden allerdings leichte Drücke gemessen. Messfeld 1 wurde vom Messfeld 2 und Messfeld 3 abgezogen.

Aus den beiden so erzeugten räumlichen Druckverteilungen wurden die Werte in Längsrichtung des Kerns gemittelt. So entstand eine Druckverteilung entlang des Kernumfangs.

Trotz der zweifachen Mittlung weist diese Verteilung immer noch starke Schwankungen zwischen benachbarten Punkten auf, wie in Abb. 4.19 gezeigt. Dessen ungeachtet ist eine klare Mittellinie erkennbar. Um diese besser darzustellen, wurde jeder Punkt auf der Kurve aus 3 benachbarten Punkten gemittelt (s. Abb. 4.19). Die dergestalt erzeugten Kurven zeigen, ob sich das Geflecht gleichmäßig um den Kern schließt und welche Drücke im Mittel entlang des Umfangs wirken. Wenn sich das Geflecht nicht mehr ausreichend zusammenziehen kann, sollte dies durch einen Druckabfall an der Unterseite sichtbar werden. In den Kurven sind auch die Stehfäden sichtbar (s. Abb. 4.20). Diese zeichnen sich durch lokale Druckerhöhungen ab. Abb. 4.7 verdeutlicht, wie es zu diesem Effekt kommt. Im Bereich der Stehfäden ist das Geflecht am dicksten. Der Druck wird hier dementsprechend am stärksten übertragen.

Bei den folgenden Analysen werden nicht die gezeigten Kurven weiterverwendet, sondern der über alle Punkte gemittelte Wert. Die Kurven weisen in fast allen Fällen ein einheitliches Niveau auf, sodass der Wert entlang des Umfangs gemittelt werden kann.

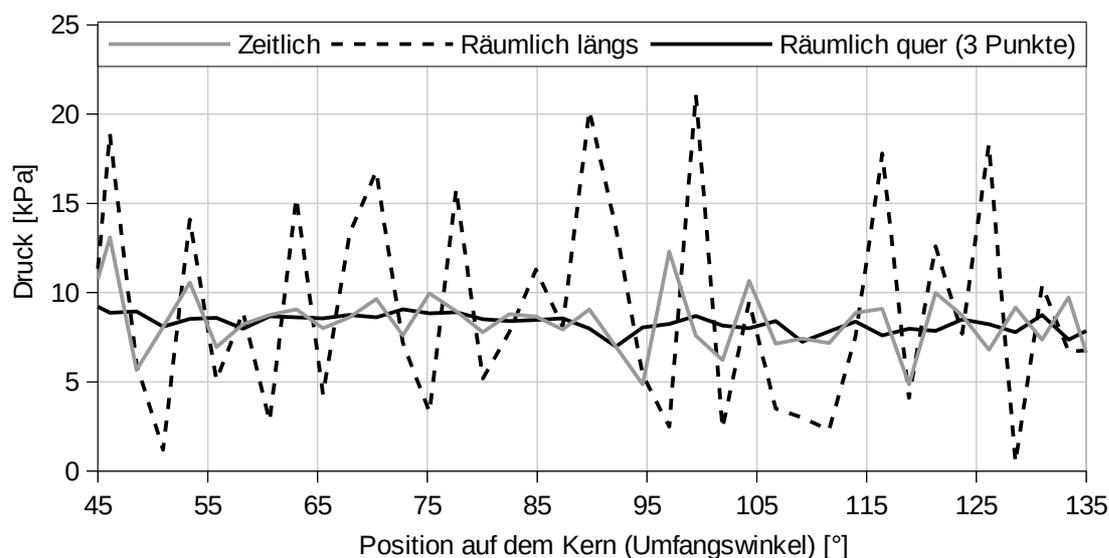


Abbildung 4.19: Effekt der Mittlung der Messwerte bei der Druckmessung mit einer Sensorfolie auf dem Flecht kern.

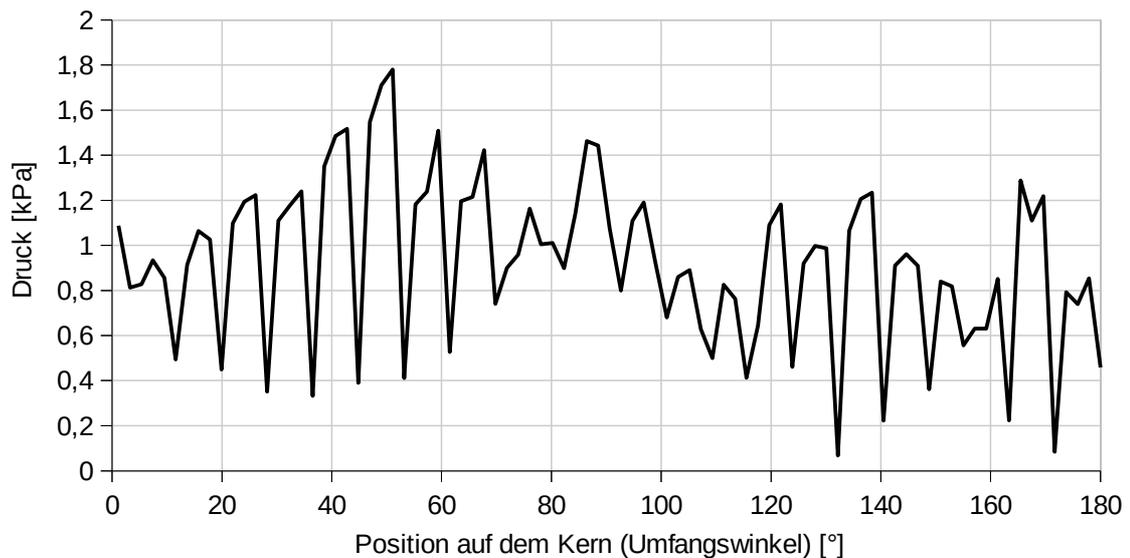


Abbildung 4.20: Sichtbarkeit der Stehfäden bei der Druckmessung. Zwischen den Stehfäden fällt der Druck deutlich ab, da hier das Geflecht nicht auf die Folie drückt

Einfluss des Faserwinkels

In Abbildung 4.21 ist der Druck durch das Geflecht in Abhängigkeit vom Faserwinkel dargestellt. Für biaxiale Geflechte wird deutlich, dass mit zunehmendem Flechtwinkel auch der Druck auf den Kern zunimmt. Dieser Effekt ist unabhängig vom Kerndurchmesser. Der Effekt lässt sich wie folgt erklären. Je kleiner der Flechtwinkel ist, desto stärker wirkt die Kraft in den einzelnen Fäden parallel zum Kern. Damit wird der Anteil der Kraft, der senkrecht zur Oberfläche des Kerns wirkt, kleiner und so auch die Kraft, die auf den Kern wirkt. Diese nimmt mit dem Flechtwinkel zu. Das Maximum müsste bei einem Flechtwinkel von 90° erreicht werden. Dieser Winkel ist allerdings nicht möglich. Aus Tabelle 8 (Seite 85) wird deutlich, dass abhängig vom Kerndurchmesser z. T. nicht einmal 45° erreicht werden. Die Flechtfäden lassen sich dann nicht weiter zusammenschieben, das Geflecht blockiert sich selbst und zieht sich nicht mehr zusammen. Es wird also kein Druck mehr auf die Oberfläche des Kerns aufgebracht. Interessant ist, dass der Blockademechanismus ein sehr enges Wirkungsfenster zeigt. Sobald der Mechanismus wirkt, wird das weitere Zusammenziehen nicht nur erschwert, sondern vollständig verhindert. Das heißt, der Mechanismus setzt nicht langsam ein und verstärkt sich dann. Dies müsste in den Messungen ab einem bestimmten Winkel zu einem langsam abnehmenden Druck führen.

Bei triaxialen Geflechten verringert sich der Druck insgesamt deutlich. Dieser Effekt tritt mit zunehmendem Faserwinkel stärker hervor. Die Stehfäden ziehen aufgrund ihres Verlaufs in der Flechtmaschine das Geflecht auf. Je stärker der Winkel

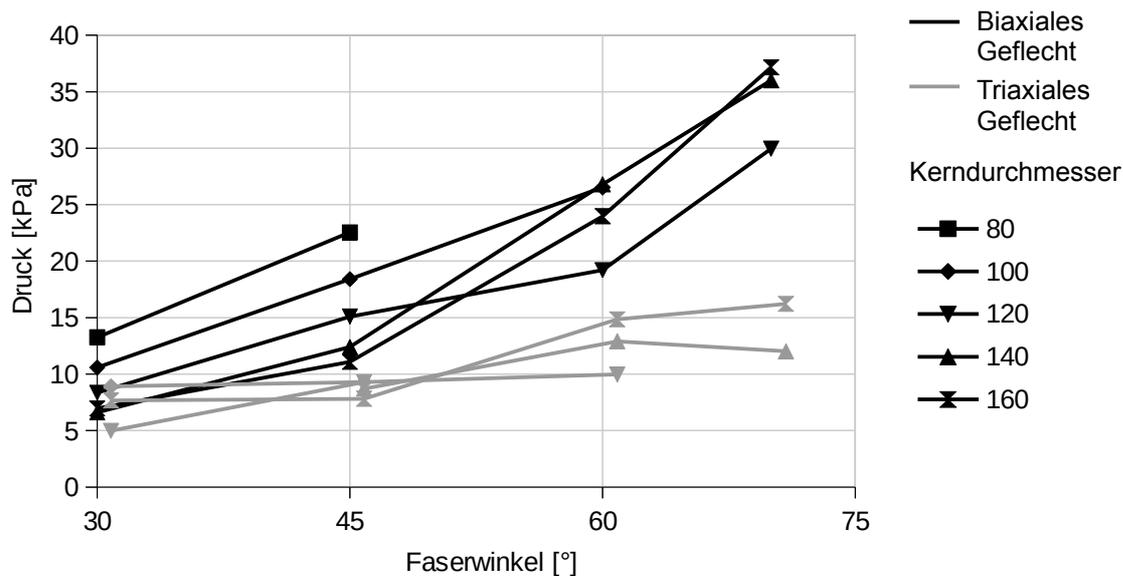


Abbildung 4.21: Druck durch das Geflecht auf den Kern in Abhängigkeit vom Flechtwinkel für verschiedene Kerndurchmesser. Verwendete Federn: 900 g

zwischen Stehfäden und Flechtfäden, desto stärker wirken die Stehfäden den Flechtfäden entgegen. Dies wird auch aus Abbildung 4.22 deutlich.

Diese Abbildung zeigt ferner, dass mit zunehmender Zugkraft in den Stehfäden der Druck des Geflechts auf den Kern abnimmt. Dies ist zu erwarten, da mit zunehmender Zugkraft in den Stehfäden die Geflecht aufhaltende Wirkung zunimmt. Auffällig ist dagegen, dass bei dem in Abbildung 4.22 dargestellten Winkel von 45° praktisch kein Einfluss des Kerndurchmessers auf den Druck zu erkennen ist. Ein leichter Einfluss kann dagegen in Abb. 4.21 bei 60° erkannt werden. Generell ist festzustellen, dass der Kerndurchmesser bei triaxialen Geflechten einen geringen Einfluss auf den vom Geflecht auf die Oberfläche aufgetragenen Druck hat. Dieser hängt vielmehr von der Stehfadenzugkraft und dem Flechtwinkel ab.

Bei biaxialen Geflechten ist dagegen in Abb. 4.22 ein deutlicher Einfluss des Kerndurchmessers auf den Druck des Geflechts auf die Kernoberfläche sichtbar. Grund hierfür ist die Vergrößerung der Oberfläche bei gleichbleibender Zugkraft der Fäden. Die Kraft durch das Geflecht verteilt sich auf eine größere Oberfläche, wodurch der Druck sinkt. Wenn die Druckwerte mit der entsprechenden Fläche multipliziert werden, wird eine nahezu konstante Kraft erreicht. Dies bestätigt die Analyse, dass eine geringere Ablagebreite und das damit bedingte Zusammenschieben der Fäden solange keinen Effekt auf den vom Geflecht auf die Kernoberfläche übertragenen Druck aufweist, bis sich das Geflecht selbst sperrt. Das Zusammenschieben der Fäden scheint demnach keine zusätzlichen Reibkräfte zu verursachen.

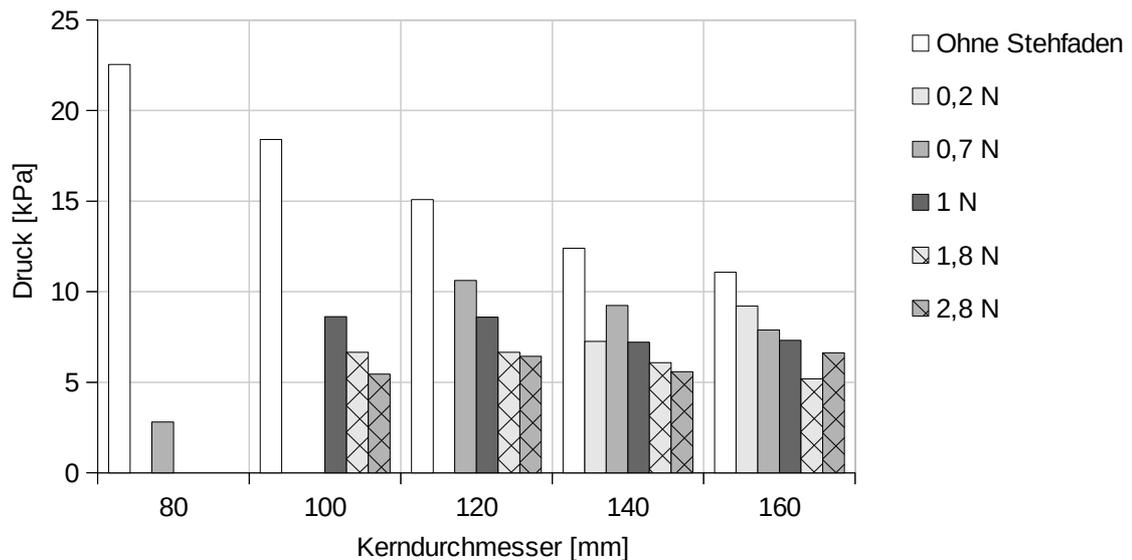


Abbildung 4.22: Druck des Geflechts auf den Kern für verschiedene Kerndurchmesser und Stehfadenzugkräfte. Flechtwinkel: 45°; verwendete Federn: 900 g

4.4.4. Einfluss der Flechtfadenzugkraft

In Abbildung 4.23 wird der Einfluss der Flechtfadenzugkraft sichtbar. Bei dem Einsatz von 350 g Federn reduziert sich der Druck signifikant – allerdings nicht im gleichen Maße, wie sich die Fadenzugkraft verringert. Durch die größeren Fadenzugkräfte nehmen die Reibkräfte zwischen den Fäden zu, wodurch ein Teil der zusätzlichen Fadenzugkräfte verloren geht.

Zu beachten ist die Druckentwicklung für triaxiale Geflechte bei 350 g Federn und steigendem Kerndurchmesser. Hier nimmt der Druck mit dem Kerndurchmesser zu. Dies steht im Gegensatz zu den Beobachtungen bei biaxialen Geflechten und deckt sich ebenfalls nicht mit den Effekten bei dem Einsatz von 900 g Federn. Bei diesen bleibt die Spannung etwa auf einem Niveau. Als Ursache werden interne Reibungs- und Setzungsprozesse vermutet. Die Stehfäden behindern das Zusammenziehen des Geflechts deutlich, sobald der Abstand zwischen den Kreuzungspunkten die Stehfadenbreite erreicht. Es kommt zu komplexen Verschiebungsprozessen und einem Stauchen der Fasern. Diese Effekte behindern das Zusammenziehen des Geflechts und verringern so den Druck, den das Geflecht auf den Kern ausüben kann. Je größer der Abstand zwischen den Stehfäden ist, also je größer der Kerndurchmesser, umso geringer ist dieser Effekt und umso größer wird der Druck, welchen das Geflecht ausüben kann. Bei einer höheren Fadenzugkraft, können die Fäden die internen Kräfte besser überwinden und so kommt die Größe der Fläche wieder stärker zum Tragen. Bei den Versuchen mit den 900 g Federn gleichen sich beide Effekte nahezu aus, sodass hier kein eindeutiger Trend zu erkennen ist.

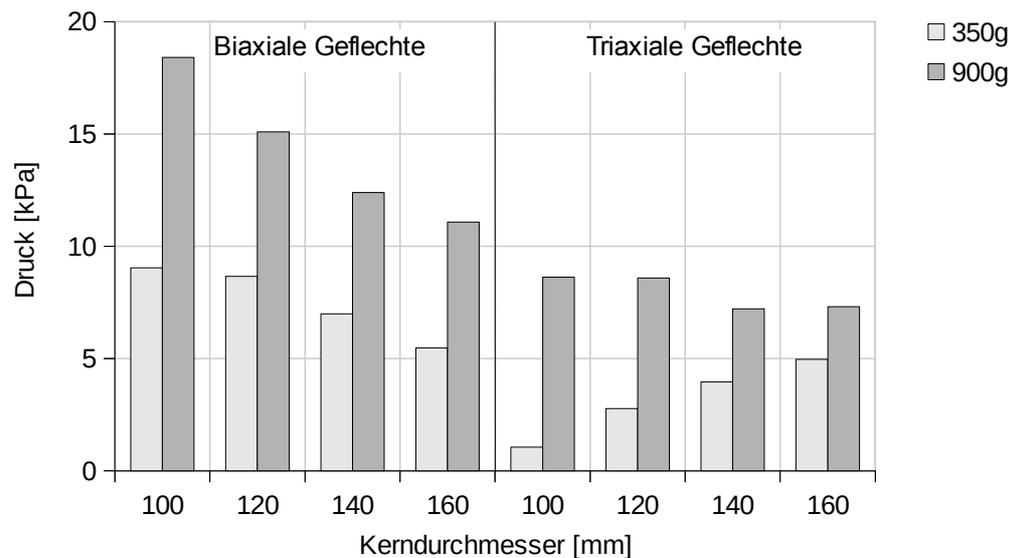


Abbildung 4.23: Einfluss der Federn auf den Oberflächendruck von Geflechtem auf den Kern; Flechtwinkel: 45°

Aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich nun ein Prozessfenster ableiten, welches zum einen den überhaupt flechtbaren Bereich eingrenzt und zum anderen Hinweise über die Eigenschaften des Geflechts in Bezug auf den Druck auf die Oberfläche aufzeigt. In Abbildung 4.24a und 4.24b ist der Druck, den ein biaxiales Geflecht auf die Kernoberfläche aufbringt in Abhängigkeit vom Kerndurchmesser und dem Flechtwinkel aufgetragen. Der Abbruch der Fläche bedeutet, dass ein anliegendes Geflecht nicht mehr erzeugt werden konnte. Innerhalb der Fläche ist zu erkennen, wie sich der Druck ändert. Wenn nur Flechtwinkel oder Kerndurchmesser vorgegeben sind, sollte für den vorgegebenen Wert der maximale Druck gewählt werden. Wenn beide Werte vorgegeben sind, kann lediglich überprüft werden, ob ein Geflecht noch möglich ist. Aus Abbildung 4.24 wird ebenfalls deutlich, dass stärkere Federn zu einem höheren Druck führen. Der Unterschied verringert sich mit abnehmendem Winkel, bleibt aber erhalten. Dies würde für möglichst hohe Fadenzugkräfte sprechen. Diese sind aber immer in Relation zur Faserschädigung und zur Ablagebreite zu sehen, welche mit der Fadenzugkraft ebenfalls zunimmt.

Für triaxiale Geflechte ist der Druckverlauf über Kerndurchmesser und Flechtwinkel in Abbildung 4.24c und 4.24d dargestellt. Die Aussagen für biaxiale Geflechte gelten analog. Bei den gezeigten Flächen wird deutlich, dass ein maximaler Winkel nicht zu einem maximalen Druck führt.

Die durchgeführten Versuche vermitteln einen Einblick in die Effekte, die beim Flechten auftreten und die dabei auftretenden Drücke. Es wird aber nur die Herstellbarkeit und der Geflechtendruck dargestellt, über die Qualität des Geflechts werden keine Aussagen getroffen. Aussagen zur Qualität liefern die Ondulation und die Ablagebreite der Fäden sowie die Toleranzen in der Faserorientierung.

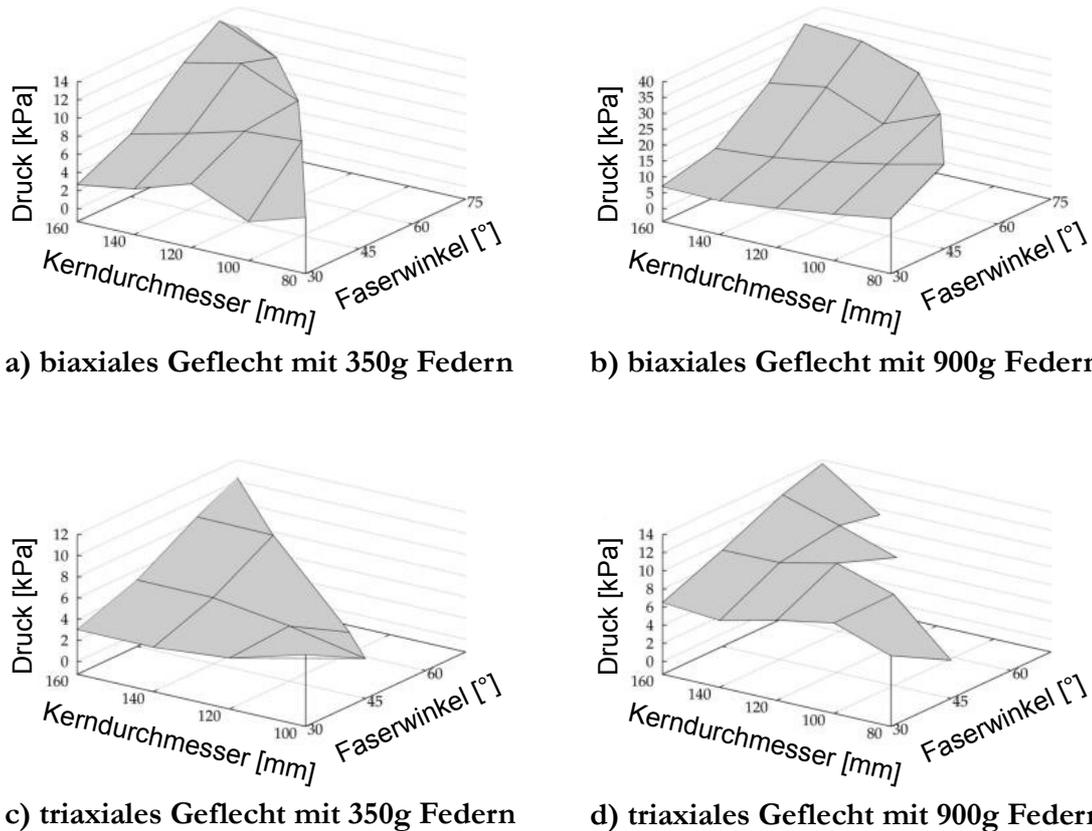


Abbildung 4.24 a-d: Druck von biaxialen bzw. triaxialen Geflechten auf einen runden Kern in Abhängigkeit von Kerndurchmesser und Flechtwinkel

4.4.5. Ablagebreite der Flechtfäden und Lücken im Geflecht

Versuchsaufbau

Für die Bestimmung der Ablagebreite wurde aus jedem Geflecht eine Probe entnommen, welche den gesamten Umfang abdeckte und in Abzugsrichtung eine Länge von 200 mm hatte. Dazu wurde das Geflecht längs des Flechtkerns aufgeschnitten, eben abgelegt und die Probe entnommen. Um die Probe zu stabilisieren, wurde sie auf einen Papierstreifen aufgeklebt. Ein Verzug oder ein Verschieben der Fasern beim späteren Handling wurde auf diese Weise vermieden. Als Maßstab war jede Probe zusätzlich mit einem Millimeterpapier am Rand versehen.

Für die nachfolgend beschriebene optische Analyse wurden die Proben mit einem Flachbettscanner bei einer Auflösung von 1200 dpi eingescannt. Die Aufnahmen erfolgten als Graustufenbilder und wurden in einem verlustfreien Format (png) gespeichert. Der Einsatz eines Scanners bietet Vor- und Nachteile. Die Vorteile beste-

hen in der einfachen Handhabung und dem Fehlen ungewollter Reflektionen bei gleichzeitig hoher Auflösung. Nachteil ist die geringe Tiefenschärfe und die Beschränkung auf ebene Proben.

Die Analyse der Fadenbreite erfolgte mit dem in der Software GIMP 2.6 [67] enthaltenen Werkzeug „Maßband“. Zur Bestimmung der mittleren Fadenbreite wurden jeweils zehn benachbarte Fäden einzeln vermessen. Dadurch ist zwar der relative Messfehler bei jeder Messung größer, aber bei der Messung über 10 Fäden hinweg werden eventuelle Lücken zwischen den Fäden mitgemessen, sodass es zu Ungenauigkeiten führen kann.

Um zu überprüfen, ob die Fadenbreite an jeder Position des Kerns identisch ist, wurde sie zunächst an drei unterschiedlichen Positionen bestimmt: im oberen Bereich des Kerns, an der Seite und unten. Ein Vergleich der Messergebnisse zeigte, dass die Unterschiede der Messungen in fast allen Fällen unter 0,1 mm (3%) lagen und damit als gering einzustufen sind. Auch gab es bei diesen kleinen Abweichungen keine Tendenzen, dass die Fäden sich an bestimmten Stellen breiter ablegen. Es kann also festgestellt werden, dass die Fadenbreite bei einem runden Querschnitt nicht von der Position entlang des Querschnitts abhängig ist. Aus diesem Grund erfolgten die weiteren Messungen und auch die Auswertungen mit jeweils einem Datensatz von zehn Messungen gemäß der zuvor beschriebenen Methode an einer beliebigen Stelle im Geflecht.

Ergebnisse

Ebenfalls keinen Einfluss auf die Ablagebreite übt in weiten Bereichen die Stehfadenzugkraft aus. In Abbildung 4.25 sind für verschiedene Geflechte bei unterschiedlichen Stehfadenzugkräften die ermittelten Flechtfadenbreiten aufgetragen. In jedem Bereich ist zudem – als waagerechte Linie – der Mittelwert der Ablagebreite eingezeichnet. Es wird deutlich, dass sich unabhängig von der Stehfadenzugkraft die Ablagebreite der Flechtfäden um den Mittelwert herum bewegt. In dem Geflecht auf einem Kerndurchmesser von 100 mm bei 30° und dem Einsatz von 900 g Federn sowie dem Geflecht auf dem Kern mit 140 mm Durchmesser bei 45° und 350 g Federn ist eine Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmender Stehfadenspannung ebenfalls die Ablagebreite zunimmt. Insbesondere bei dem ersten der beiden genannten Geflechte ist zu berücksichtigen, dass sich bei dem Geflecht mit einer Stehfadenzugkraft von 0,7 N vereinzelt Schlaufen gebildet haben und dieser Wert insofern nur bedingt aussagekräftig ist. Bei den beiden genannten Fälle wird die sichtbare Tendenz deshalb als zufällig gewertet. Generell ist bei der Auswertung aufgefallen, dass bei sehr geringen Stehfadenzugkräften die Standardabweichung deutlich zunimmt. Dies spricht dafür, dass hier die Stehfäden die Ablagebreite der Flechtfäden beeinflussen, aber nicht gleichmäßig sondern vereinzelt Fäden. Die

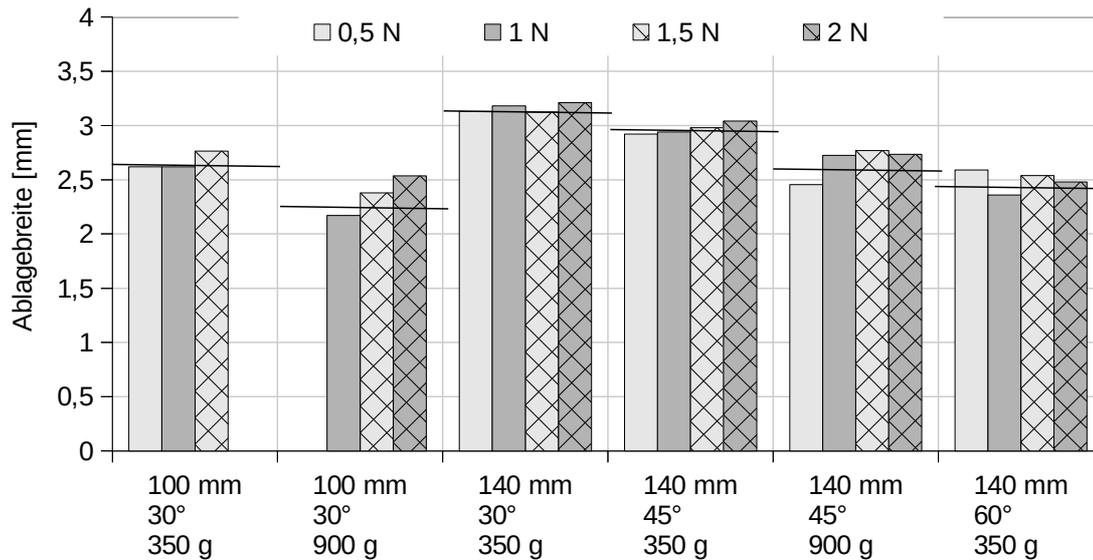
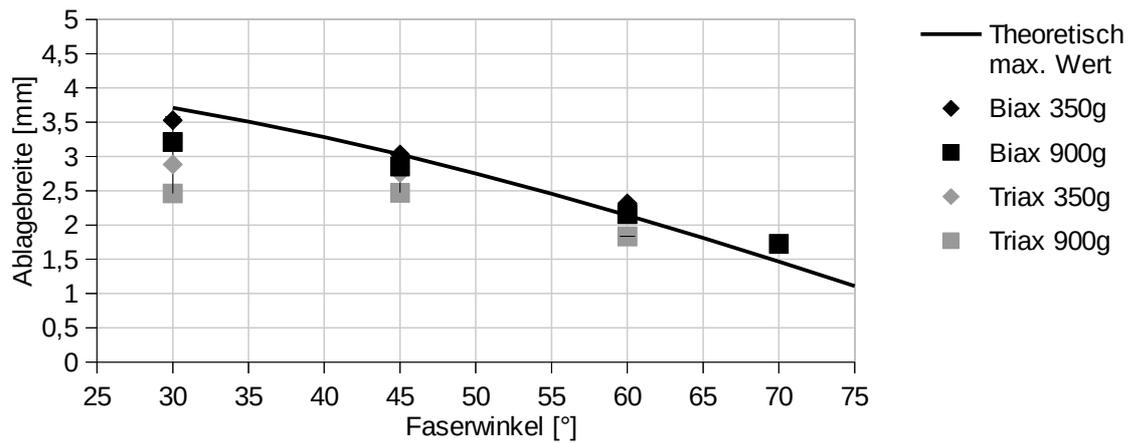


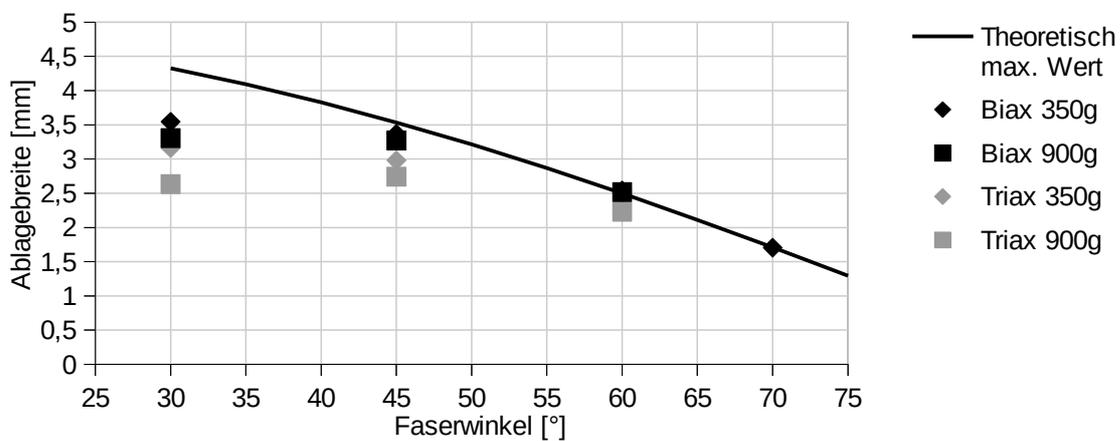
Abbildung 4.25: Ablagebreite der Flechtfäden für verschiedene triaxiale Geflechte bei unterschiedlichen Stehfadenzugkräften

vermutliche Ursache wird die stärkere Ondulation der Stehfäden sein. Dadurch behindern diese teilweise die Ablage der Flechtfäden.

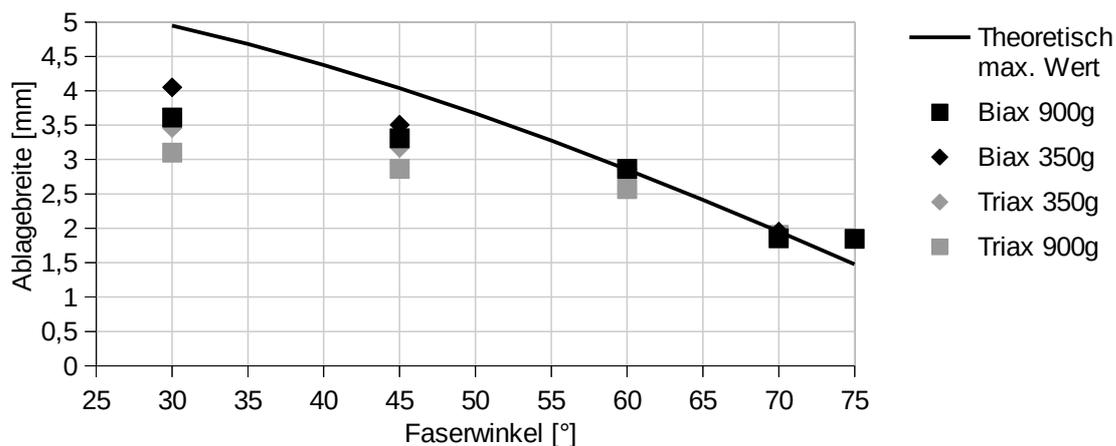
Welche Ablagebreiten möglich sind, wird aus Abbildung 4.26 deutlich. In dieser Abbildung sind für verschiedene Kerndurchmesser die Ablagebreiten über den Flechtwinkel aufgetragen. Die verschiedenen Punkte entsprechen Messwerten, die jeweils durchgezogene Linie dem theoretisch maximal möglichen Wert für den entsprechenden Faserwinkel, also der Breite, bei welcher der Kern vollständig bedeckt ist. Aus den Diagrammen wird die maximale und minimale Faserbreite sichtbar. Die Fasern legen sich nicht breiter als etwa 3,5 mm ab. Falls eine größere Ablagebreite möglich wäre, was die durchgezogenen Linie zeigt, entstehen Lücken zwischen den Fasern. Wenn diese Lücken ebenfalls berücksichtigt werden, ergibt sich die theoretisch mögliche Breite. Die minimale Fadenbreite beträgt etwa 1,7 mm. Schmäler lassen sich die verwendeten Fasern nicht zusammendrücken. Falls eine schmalere Ablagebreite benötigt würde, läge sich das Geflecht nicht mehr an. In einem kleinen Bereich ist es möglich, dass die Fäden über die theoretische Ablagebreite hinausgehen. Das scheint der Theorie zu widersprechen, ist allerdings dadurch zu erklären, dass die Fäden aufgrund der Verflechtung lediglich an den Kreuzungspunkten direkt nebeneinander liegen. Hier werden die Fäden auf das minimale Maß von etwa 1,5 mm zusammengedrückt. In den Bereichen dazwischen können sich die Fasern leicht ausdehnen und erreichen auf diese Weise eine leicht größere Breite. In diesem Bereich werden die Breiten gemessen. Dadurch erscheint die Ablagebreite der Fasern breiter, als sie gemäß der Theorie sein kann.



a) Ablagebreite auf einem Kern mit 120 mm Durchmesser



b) Ablagebreite auf einem Kern mit 140 mm Durchmesser



c) Ablagebreite auf einem Kern mit 160 mm Durchmesser

Abbildung 4.26: Ablagebreiten der Flechtäden in Abhängigkeit von Kerndurchmesser und Flechtwinkel für Toho Tenax HTS40 F13 12k 800tex-Fasern

Geflechtart und Flechtfadenspannung zeigen auch einen Einfluss auf die Ablagebreite. In einem triaxialen Geflecht legen sich die Fasern schmäler ab als in einem biaxialen Geflecht. Zudem verringert sich die Ablagebreite mit zunehmender Fadenzugkraft. Beide Effekte werden in Abbildungen 4.26 deutlich. Die Überlagerung führt dazu, dass die Ablagebreite der Flechtfäden bei einem biaxialen Geflecht mit hoher Fadenzugkraft fast gleich groß ist wie die Ablagebreite der Flechtfäden bei einem triaxialen Geflecht mit geringerer Fadenzugkraft. Die Effekte werden am deutlichsten, wenn sich die Fasern frei ablegen können, was bei kleinen Faserwinkeln und großen Umfängen der Fall ist. Bei einem Faserwinkel von $\pm 30^\circ$ ist die Ablagebreite der Flechtfäden bei triaxialen Geflechten im Mittel um 16 % geringer als bei biaxialen Geflechten. Bei einem Faserwinkel von $\pm 45^\circ$ verringert sich dieser Unterschied auf etwa 10 %. Bei unterschiedlichen Fadenzugkräften (350 g zu 900 g Federn) ist der Effekt nicht ganz so groß. Hier liegt die Abweichung bei biaxialen Geflechten bei etwa 5 %, unabhängig vom Faserwinkel. Bei triaxialen Geflechten steigt der Wert auf etwa 10 %. Dort tritt jedoch eine starke Streuung auf. Sobald die Ablagebreite durch den Kernumfang begrenzt ist, verringert sich der Effekt.

Da sich beide Effekte überlagern, kann die Ablagebreite deutlich verringert werden. Während sich bspw. die Fäden bei einem biaxialen Geflecht mit 350 g Federn etwa 3,5 mm breit ablegen, verringert sich dieser Wert bei einem triaxialen Geflecht mit 900 g Federn auf etwa 2,7 mm.

Die hier angegebenen Werte können allerdings nicht als generelle Kennzahlen betrachtet werden. Zum einen überlagern sich verschiedene Parameter, die wiederum von weiteren Parametern abhängen, zum anderen sind speziell diese Effekte sehr stark von der verwendeten Faser und der Maschinengröße abhängig. Aus diesem Grund können lediglich Tendenzen aufgezeigt werden. Um Vorhersagen der maximal möglichen Fadenbreiten zu treffen, müssten umfangreiche Versuche mit einer Reihe verschiedener Fasertypen durchgeführt werden.

4.4.6. Faserwinkel

Für faserverstärkte Strukturbauteile ist die Einhaltung eines definierten Faserverlaufs entscheidend. Alle Herstellungsverfahren müssen eine ausreichende Genauigkeit gewährleisten. Insbesondere von automatisierten Verfahren verspricht man sich eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit. Um dies für die Flechttechnik zu überprüfen, wurden die erzeugten Proben auf ihre Faserorientierung hin überprüft.

Versuchsaufbau

Die Messungen erfolgten an den gescannten Geflechten mit einer vom Fibre Bremen entwickelten Software [68 - 69]. Diese Software ermöglicht es, in Bildbereichen mit mindestens 250x250 Pixel eine oder zwei vorherrschende Faserorientierung zu bestimmen. Dies geschieht an den Kanten der einzelnen Filamente. Aufgrund der hohen Auflösung beim Einscannen der Geflechtproben ist es so möglich, für jede Einheitszelle des Geflechts die Faserorientierung zu bestimmen. In Abbildung 4.27 ist ein Geflecht dargestellt, welches in die einzelnen Messbereiche aufgeteilt wurde und in dem für jeden Messbereich beide in diesem Messbereich vorherrschenden Faserorientierungen durch eine Linie eingetragen sind. Neben diesen Bildern werden von der Software auch Tabellen erzeugt, in denen für jeden Messbereich die Ergebnisse ausgegeben werden. Diese Ergebnisse werden im Folgenden weiter untersucht.

Bei der Analyse wurden bei jedem Geflecht jeweils die Einheitszellen des Geflechts betrachtet. In Umfangsrichtung des Kerns wurde wieder der halbe Umfang abgedeckt, also 180° . Bei der verwendeten Flechtmaschine mit 88 Flügelrädern ergeben sich 22 Einheitszellen in Umfangsrichtung. In Produktionsrichtung – also quer zum Umfang – wurden 11 Einheitszellen berücksichtigt. Damit ergeben sich 242 Einzelwerte je Probe. Die Werte in Produktionsrichtung wurden gemittelt. Es wurde davon ausgegangen, dass die beiden Flechtfadensysteme zur Abzugsrichtung im Mittel den gleichen Winkel einnehmen. Dies sollte durch die mechanischen Randbedingungen in der Flechtmaschine gegeben sein, solange der Kern nicht um seine Längsachse gedreht wird. Die gemessenen Werte wurden diesbezüglich analysiert. Abweichungen wurden auf schief eingescannte Proben zurückgeführt und entsprechend korrigiert. Insgesamt lagen die Abweichungen in fast allen Fällen jedoch deutlich unter einem Grad.

Die sich nach der Mittlung ergebenden Werte können entlang des Umfangswinkels aufgetragen werden. So wird ersichtlich, ob es Einflüsse entlang des Umfangs gibt.

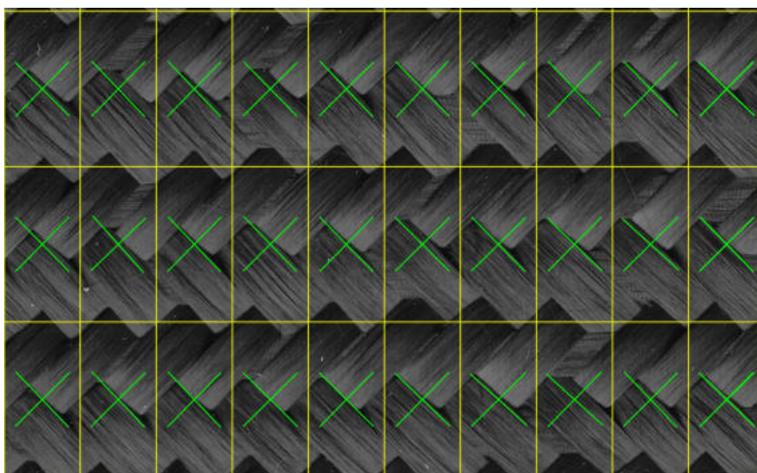


Abbildung 4.27: Winkelanalyse bei einem biaxialen Geflecht. Jede Einheitszelle wird bezüglich der beiden Faserwinkel analysiert

Ein systematischer wiederkehrender Einfluss konnte nicht gefunden werden. Trotzdem gab es zwei prinzipielle Arten von Proben, welche in Abb. 4.28 dargestellt sind. Die Kurven bei einem Faserwinkel von 30° (Probe auf einem Kerndurchmesser von 140 mm) entsprechen den üblichen Verläufen. Zwischen den beiden Faserrichtungen gibt es fast keinen Unterschied, dementsprechend stimmen sie ebenfalls mit dem Mittelwert sehr gut überein. Auch entlang des Umfangs weichen die Kurven wenig vom Sollwinkel ab.

Die Kurven bei 45° zeigen dagegen eine deutlich und gegenläufige Abweichung vom Sollwert. Dieser Effekt war bei wenigen Proben sichtbar und die Ursache konnte nicht geklärt werden.

Insgesamt ist die Winkelabweichung entlang des Umfangs äußerst gering – mit wenigen Ausnahmen deutlich unter 1° . Deshalb wird im Folgenden nicht mehr der Verlauf betrachtet, sondern der mittlere Winkel aller Messungen für eine Probe. Zusätzlich wird jeweils die maximal auftretende Abweichung von diesem Mittelwert angegeben (nicht die Standardabweichung). Dadurch wird ersichtlich, welcher maximale Wert auftreten kann.

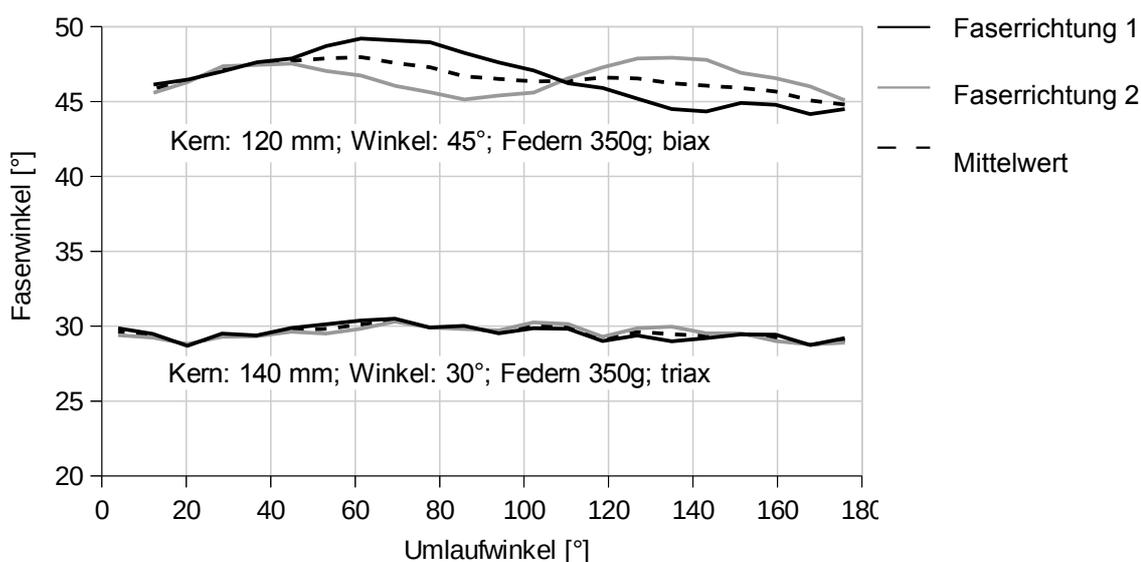


Abbildung 4.28: Faserwinkelverlauf an zwei Beispielen; die unteren Kurven bei 30° stellen den üblichen Verlauf dar, mit einer sehr guten Übereinstimmung der beiden Faserrichtungen. In wenigen Fällen kam es zu den oben sichtbaren Effekten, mit gegenläufigen Winkelabweichung der einzelnen Faserrichtungen.

Ergebnisse

In Abb. 4.29 sind die Sollwinkel für differente biaxiale Geflechte als durchgehende Linie eingetragen, als Balken der gemessene Winkel und als Fehlerbalken die max. Abweichung von diesem Wert. In den meisten Fällen ist der gemessene Wert leicht größer als der vorgegebene. Dafür kann es zwei Gründe geben. Zum einen wurden die Maschinenparameter an den Kerndurchmesser angepasst, also der Innendurchmesser des Geflechts. Wenn der Außendurchmesser des Geflechts betrachtet wird, stellt sich ein um $0,3^\circ$ größerer Winkel ein. Zum anderen können die Maschinen nicht ausreichend genau arbeiten.

Mit Ausnahme der Proben auf einem Kerndurchmesser von 80 mm und dem Einsatz von 900 g Federn bewegen sich alle Proben in einem Toleranzfeld von $\pm 2^\circ$. Am

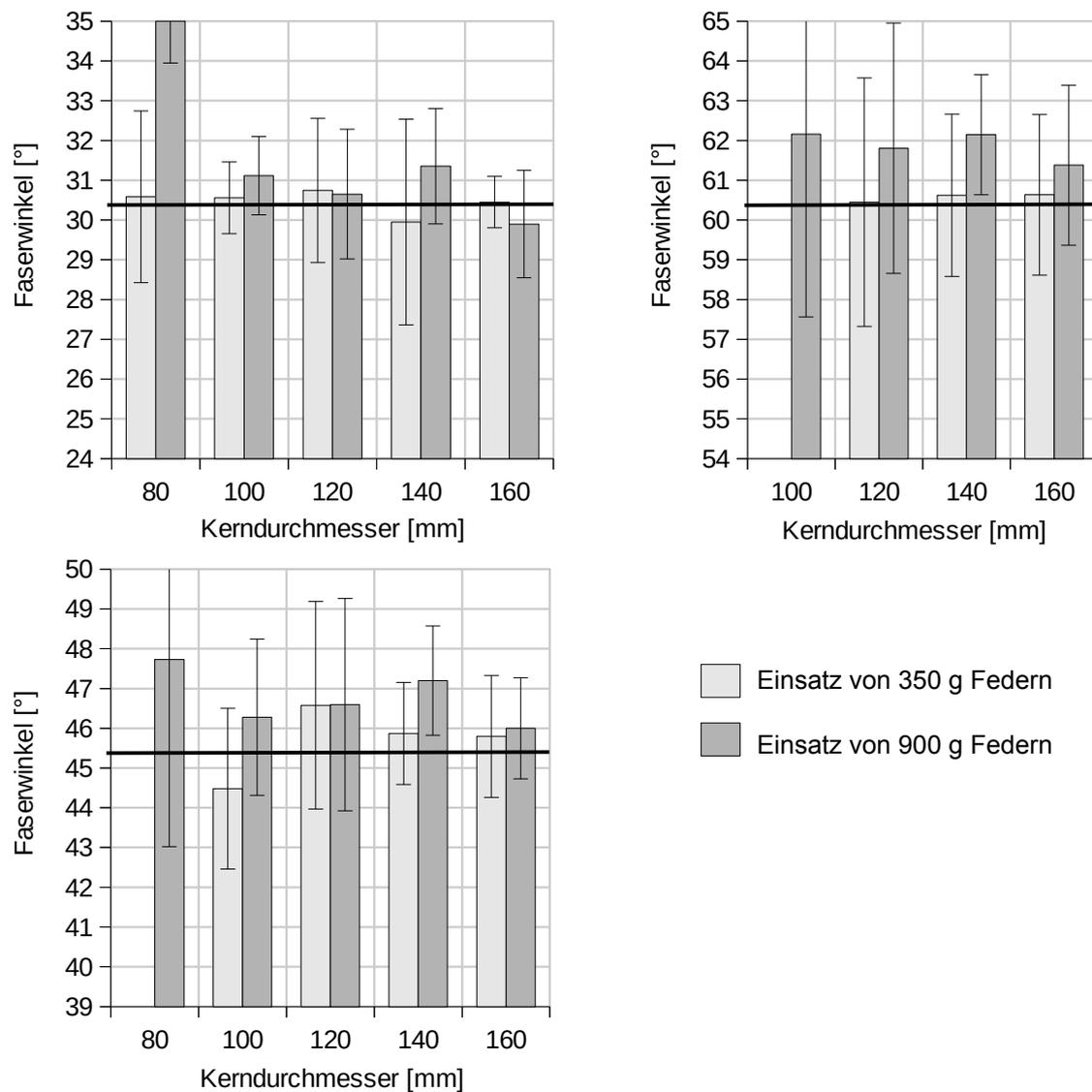


Abbildung 4.29: Gemessene Faserwinkel für biaxiale Geflechte mit der jeweils maximalen Abweichung

besten erreichen den Sollwinkel dabei die Proben mit einem Sollwinkel von 30° . Hier liegen selbst die größten lokalen Abweichungen noch in einem Toleranzfeld von $\pm 3^\circ$. Bei den Sollwinkeln von 45° und 60° ist das Toleranzfeld etwas größer und kann mit $\pm 5^\circ$ angegeben werden.

Für triaxiale Geflechte sind die gleichen Untersuchungen in Abb. 4.30 dargestellt. Für den Sollwinkel von 30° ist auffällig, dass die Ergebnisse im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen und auch im Gegensatz zu den anderen triaxialen Geflech-ten z. T. deutlich kleiner sind als erwartet. Die Ursache ist nicht bekannt und wird in den Maschinenparametern vermutet. Die Versuche mit einem Sollwinkel von 45° und 60° zeigen hingegen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Sollwinkel und gemessenem Winkel. Hier liegt das Toleranzfeld deutlich unter $\pm 1^\circ$. Die maximalen Abweichungen können bis zu 3° betragen.

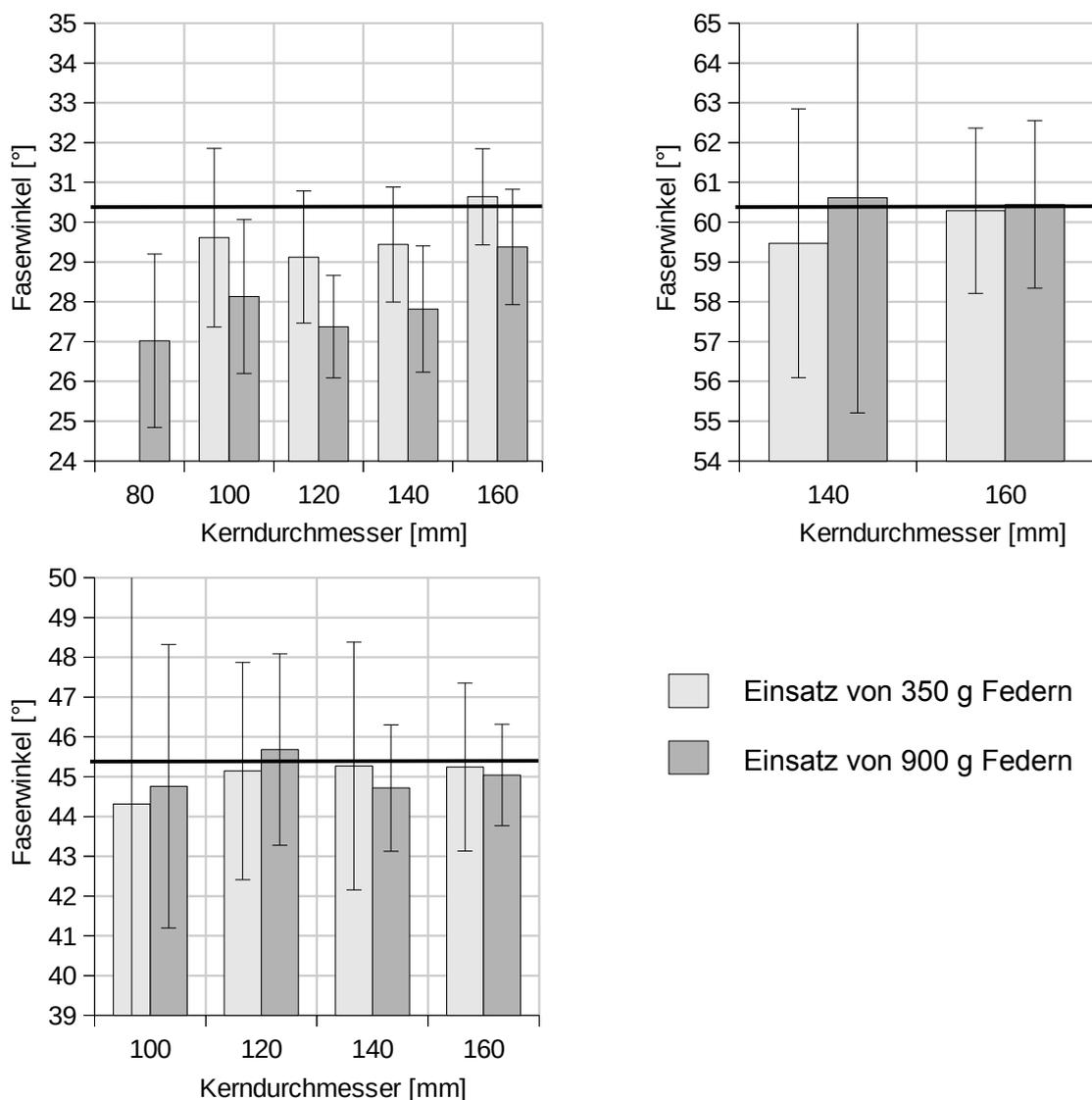


Abbildung 4.30: Gemessene Faserwinkel für triaxiale Geflechte mit der jeweils maximalen Abweichung

4.4.7. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Prozessfenster zeigen deutlich, dass keine einfachen Angaben zu den optimalen Prozessparametern aufgestellt werden können. Sie hängen stark von der Geometrie und den spezifischen Anforderungen an das Bauteil ab. Auch gibt es keine scharfen Grenzen, ab denen eine Herstellung nicht mehr möglich ist. Dennoch sollen im Folgenden Punkte aufgeführt werden, welche bei der Festlegung der Geflechtparameter helfen können:

- **Anpressdruck:** Um einen hohen Anpressdruck zu erreichen, sollten möglichst hohe Flechtfadenzugkräfte eingestellt werden, bei gleichzeitig geringen Stehfadenzugkräften, sofern ein triaxiales Geflecht verwendet wird. Dies steht im Widerspruch zu den Punkten Ablagebreite, Ondulation und Faserschädigung. Es ist insofern zu prüfen, welcher Anpressdruck gebraucht wird. Bei Geflechten mit bis zu 3 Lagen kann der Druck recht gering sein. Ab 5 Lagen sollte eine ausreichende Kompaktierung durch das Geflecht erfolgen. Bei 10 oder mehr Lagen ist im Allgemeinen eine zusätzliche Kompaktierung notwendig.
- **Ablagebreite:** Die Ablagebreite wird sowohl von der Fadenzugkraft als auch von der Geflechtart beeinflusst. Um eine maximale Ablagebreite zu erlangen, sollten biaxiale Geflechte mit möglichst geringen Fadenzugkräften erzeugt werden. Mit den in den Versuchen verwendeten Fasern (TohoTenax HTS40 F13 12k 800tex) konnte eine maximale Ablagebreite von etwa 3,5 mm erreicht werden. Die minimale Breite liegt bei etwa 1,8 mm.
- **Faserwinkel:** Die durchgeführten Versuche zeigten eine insgesamt hohe Reproduzierbarkeit des Faserwinkels. Generell sind Faserwinkel zwischen 30° und 80° gut realisierbar. Bei gekrümmten Kernen, Änderungen des Umfangs oder Abweichungen vom runden Querschnitt kommt es allerdings zu Verschiebungen im Winkel. Diese sind in jedem Einzelfall zu bewerten.
- **Faserschädigung:** Diese ist wie die Ablagebreite von der Fadenzugkraft und der Geflechtart abhängig. Dabei nimmt mit zunehmender Fadenzugkraft die Schädigung zu, wobei die Schädigung bei triaxialen Geflechten insgesamt größer ist.
- **Ondulation:** Die Ondulation der Flechtfäden wird primär durch die Geflechtart beeinflusst. Bei triaxialen Geflechten wird die Ondulation der Flechtfäden durch den Querschnitt und die Ablagebreite der Stehfäden bestimmt. Hier sollte vermieden werden, dass sich die Stehfäden aufzwirnen, z. B. durch den Einsatz von Führungschläuchen. Die Ondulation der Stehfäden selbst ist wiederum primär von der Fadenzugkraft der Stehfäden abhängig. Umso größer sie ist, desto geringer wird die Ondulation. Die Fadenspannung steht damit im Widerspruch zu dem Anpressdruck. Bei einer zu hohen Stehfadenzugkraft wird das gesamte Geflecht aufgezogen. Bei einer zu geringen Zugkraft entstehen dagegen Schlaufen in den Stehfäden. Für jeden Fall muss ein Kompromiss gefunden werden.

4.5. Grenzen der Flechttechnik

In den vorangehenden Kapiteln wurden die Funktionsweisen und die Randbedingungen für Flechtmaschinen beschrieben. So ergibt sich ein Bild der Möglichkeiten, welche die Flechttechnik für die Herstellung von FVB bietet. Es wird aber ebenfalls deutlich, dass die Flechttechnik in der aktuellen Art und Weise nicht für alle Bauteile eine Lösung darstellt. Die Einschränkungen haben verschiedene Ursachen. Es existieren systembedingte, an diesen lässt sich nichts ändern, es sei denn das Prinzip Flechten wird geändert. Daneben sind maschinenbedingte vorhanden. Diese können durch eine bessere Maschinenteknik behoben werden. Die maschinenbedingten Grenzen sind eng verbunden mit den Grenzen, die durch die Fasern bedingt sind.

Im Folgenden soll auf die verschiedenen Einschränkungen eingegangen werden und diskutiert werden, inwieweit diese beeinflusst bzw. aufgehoben werden können. So wird zum einen deutlich, was mit der Flechttechnik definitiv nicht möglich ist, zum anderen aber auch, an welchen Stellen eine Weiterentwicklung sinnvoll und notwendig ist.

4.5.1. Systembedingte Grenzen

Bei den systembedingten Grenzen bedarf es einer prinzipiellen Änderung an der Maschine, dem Grundsystem, um diese Grenzen aufzuheben. Zum Teil sind diese Änderungen theoretisch und praktisch möglich und werden in bestimmten Forschungsanlagen auch schon getestet, z. T. würde dadurch das Prinzip des Flechtens verlassen werden. Folgende Grenzen sind zu nennen:

- Faserarchitekturen sind eingeschränkt
- Variation der Anzahl der Fäden ist nur mit einem hohen manuellen Aufwand möglich
- Mögliche Bauteilgeometrien sind begrenzt
- Systembedingt kommt es zum Aufzwirnen der Stehfäden
- Ondulation der Flechtfäden lässt sich nur bei UD-Geflechten vermeiden

Ursprung der meisten systembedingten Grenzen ist die Verflechtung der Fasern über die Bewegung der Klöppel. Die Anzahl der Flügelräder und auch der Klöppel in einer Maschine ist fest und kann im Prozess nicht geändert werden. Einzelne Flügelräder herauszunehmen, ist bei Standardflecht- oder Radialflechtmaschinen nicht möglich, da dies eine Änderung des ganzen Maschinenrumpfs zur Folge hätte. Bei Variations- oder 3D-Flechtmaschinen können einzelne Flügelräder nicht mehr im Klöppelweg berücksichtigt werden, dies würde einer Herausnahme entsprechen.

Der Klöppel kann bei allen Maschinen aktuell nur manuell entfernt werden. Für Flachbett- bzw. Radialflechtmaschinen ist die Möglichkeit denkbar, bei den Flügelrädern Weichen zu integrieren, wie sie auch bei den 3D-Flechtmaschinen verwendet

werden, um so einen Teil der Klöppel in Parkpositionen zu fahren. Aus diesen Positionen könnten die Klöppel jederzeit wieder in den Flechtprozess integriert werden. Dadurch würde sich zwar nicht die Anzahl der Flügelräder reduzieren lassen, aber die Anzahl der im Prozess verwendeten Klöppel. Dies hätte allerdings auch die Änderung der Bindungsart zur Folge. Bei einer Variations- bzw. 3D-Flechtmaschine ist es ebenfalls möglich, einen Klöppel in eine Art Parkposition zu fahren – mit den gleichen Folgen für das Geflecht.

In jedem Fall bleibt der Faden des herausgenommenen Klöppels mit dem Geflecht verbunden und legt sich dann über oder unter das Geflecht. Manuell kann der Faden abgeschnitten werden. Bei einer größeren Zahl an Klöppeln ist damit allerdings ein erheblicher Zeitaufwand verbunden. Gleiches gilt für das erneute Einfädeln, falls die Klöppel wieder in das System integriert werden sollen. Eine automatisierte Lösung für dieses Problem ist theoretisch denkbar, aktuell aber noch nicht umgesetzt.

Die feste Anzahl an Klöppeln und damit der Fäden ist ein Grund für die Begrenzung der Variabilität der möglichen Geometrien. Mögliche Querschnittänderungen könnten deutlich größer ausfallen, wenn einzelne Fäden aus dem System genommen werden könnten. Daneben wäre auch eine Änderung der Fadenzugkraft im Flechtprozess hilfreich, da auf diese Weise das Geflecht auf kleine Querschnitte zusammengezogen werden kann. Sprungartige Änderungen des Querschnitts sind dagegen ohne eine variable Zugkraft in den Fäden kaum möglich.

Bei den Kerngeometrien bestehen neben den Querschnittsänderungen auch Einschränkungen hinsichtlich der Biegeradien, die nicht zu klein sein dürfen. Auch sind keine Geometrien möglich, bei denen der Kern die Flechtebene zweimal schneidet, es sei denn der Abstand zwischen den beiden Schnitten ist größer als der Radius der Flechtmaschine. Daneben ist die Herstellung von stark konkaven Querschnitten nicht direkt möglich. Auch Abzweigungen sind lediglich möglich, wenn mindestens ein Schenkel sehr kurz ist und der Winkel keine Hinterschnitte erzeugt. Hinterschnitte sind prinzipiell nicht direkt umsetzbar.

Das Prinzip der Flechtmaschinen verursacht zwei weitere Einschränkungen. Zum einen in Bezug auf die Faserorientierung, zum anderen bezüglich der Ondulation. Die Stehfäden sind immer parallel zur Abzugsrichtung orientiert. Ein permanentes Drehen des Kerns um dessen Achse ließe hier eine Variation zu. Der Winkel der Flechtfäden kann dagegen zwischen 30° und 75° problemlos variiert werden. Faserorientierungen zwischen 20° und 30° sind mit Einschränkungen möglich. Bei Faserwinkeln über 75° muss der Kernumfang erheblich zunehmen, damit die Fasern sich noch ablegen können.

Die Bewegung der Klöppel hat einen ungewollten Effekt auf die Stehfäden. Diese werden größtenteils durch die Flechtfäden aufgezwirnt. Abb. 4.31 zeigt ein Geflecht mit sowohl aufgezwirnten Stehfäden als auch unveränderten Stehfäden, wie sie von der Spule kommen. Eine breite Ablage ist mit aufgezwirnten Fäden nicht mehr

möglich. Das Aufzwirnen erfolgt durch die Flechtfäden und ist in Abb. 4.32 dargestellt. Die Flechtfäden der einen Richtung laufen immer auf derselben Seite des Stehfadens in dieselbe Richtung. Der Flechtfaden selber gleitet dabei quer zum Stehfaden über diesen hinweg. Die Fäden der anderen Richtung verlaufen auf der anderen Seite in die andere Richtung und gleiten ebenfalls über den Stehfaden hinweg. Durch die Reibungskräfte zwischen den Fäden wird ein Torsionsmoment auf den Stehfaden ausgeübt, welches dann zum Aufzwirnen führt. Verhindern lässt sich das Aufzwirnen durch Schläuche, in welchen die Stehfäden geführt werden [70].

Die bereits genannte Ondulation ist ein weiterer Punkt, der häufig nicht gewünscht ist, sich aber systembedingt nicht vermeiden lässt. Die in Abschnitt 3.2.3 dargestellten UD-Geflechte stellen hier einen Lösungsansatz dar.

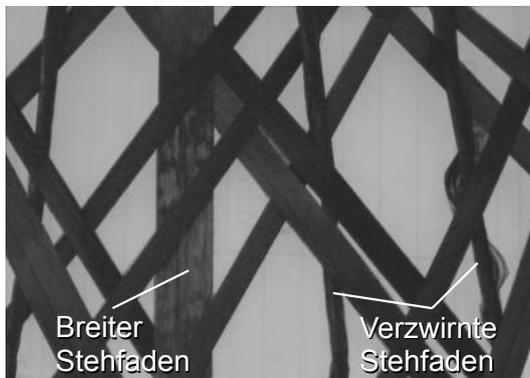


Abbildung 4.31: Aufgezwirnte bzw. nicht gezwirnte Stehfäden in der Flechtmaschine

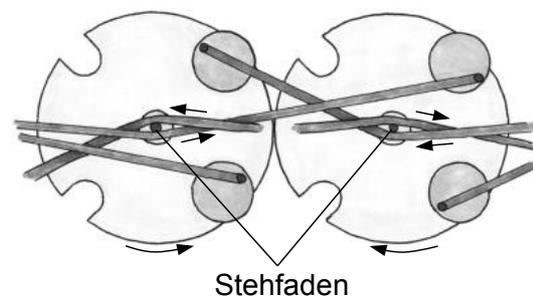


Abbildung 4.32: Ursache für das Verzwirnen der Stehfäden; die Flechtfäden gleiten über die Stehfäden und verursachen ein Torsionsmoment

4.5.2. Maschinenbedingte Einschränkungen

Bei den maschinenbedingten Einschränkungen spielt vor allem der Klöppel eine entscheidende Rolle. Es können folgende Einschränkungen genannt werden:

- Folgen durch die Gravitation
- Eingeschränkte Möglichkeiten von Querschnittsvariationen und Querschnittsübergängen
- Unzureichende Online-QA
- Faserschädigung im Prozess
- Fehlende Faserspreizung
- Keine Verarbeitung von Bändchen

In Abhängigkeit vom Aufbau der Maschine wirkt sich die Gravitation stärker oder weniger stark auf den Flechtprozess und die Ablage der Fasern aus. Bei einem hori-

zontalen Abzug des Geflechts verlaufen die Fasern speziell bei einer Radialflechtmaschine in einer vertikalen Ebene. Das bedeutet, ein Teil der Fasern verläuft von der Spule kommend entgegen der Wirkrichtung der Gravitation, ein anderer Teil in Wirkrichtung zum Flechtpunkt. Bei von „unten“ kommenden Fäden erhöht sich die Kraft am Flechtpunkt, bei von „oben“ kommenden wird sie verringert. Dieser Effekt ist umso größer, je größer die Feinheit der Fasern, umso länger der Weg vom Klöppel zum Flechtpunkt und umso kleiner die Fadenzugkraft in den Flechtfäden ist. Dies betrifft sowohl die umlaufenden Flechtfäden als auch die Stehfäden. Der Einfluss auf die Stehfäden kann dafür sorgen, dass das Geflecht im unteren Bereich nicht so stark an den Kern gedrückt wird wie im oberen Bereich. Bei einer insgesamt geringen Fadenzugkraft der Stehfäden kann die Ondulation der Stehfäden im oberen Bereich größer sein als im unteren Bereich. Bei den Versuchen zum Druck auf den Kern (s. Abschnitt 4.4.3) wurde kein Einfluss der Gravitation festgestellt. Bei Versuchen mit Stehfäden mit einer Feinheit von 3300tex konnten allerdings Einflüsse beobachtet werden.

Neben dem direkten Einfluss auf die Stehfäden kommt es bei Radialflechtmaschinen auch zu einer Beeinflussung der Funktion des Klöppels. Die Lagerung der Spule im Klöppel verändert sich während eines Umlaufs. Im unteren Bereich der Maschine steht die Spule auf dem Klöppelrumpf, im oberen Bereich der Maschine wird die Spule durch das Kopfstück der Achse gehalten. Da die Spule im Klöppel ein leichtes axiales Spiel aufweist, ändert sich der Abstand zwischen Spule und Klöppelrumpf, wodurch der Auslösepunkt des Klöppels beeinflusst wird. Dies kann zu einer Änderung der Fadenspannung führen.

Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.4.4 haben gezeigt, dass die Fadenzugkraft zum einen die Ablagebreite der Fasern beeinflusst, zum anderen die möglichen Bauteilquerschnitte. Eine hohe Fadenzugkraft ermöglicht deutlich kleinere Querschnitte, reduziert aber selbst bei großen Umfängen die Ablagebreite der Fasern. Die Festlegung auf eine Fadenzugkraft zu Beginn des Flechtprozesses stellt damit eine deutliche Einschränkung dar, insbesondere wenn komplexe Strukturen umflochten werden sollen. Sprunghafte Querschnittsänderungen sind aktuell ohne Hilfsmittel kaum und selbst mit zusätzlichen Hilfsmitteln nur bedingt mit großem manuellen Aufwand möglich. Auch hier wäre eine Variation der Fadenzugkraft notwendig.

Große Radien können ebenfalls problematisch sein. Wie in Abschnitt 4.2.3 gezeigt, entsteht auf der Innenseite des Bogens ein dichteres Geflecht. Gerade bei triaxialen Geflechten kann dies leicht dazu führen, dass das Geflecht nicht mehr am Kern anliegt.

Für die Serienfertigung sowohl im Automobil- als auch im Luftfahrtbereich sind die vorhandenen Qualitätssicherungsmethoden vollkommen unzureichend. In der Flechtmaschine werden aktuell nur die Drehzahl der Flügelräder und der Fadenriss überwacht. Beides sagt jedoch nichts über den abgelegten Faserwinkel und die Qua-

lität des Geflechts aus. Im Flugzeugbau erfolgen an jedem fertigen Bauteil aufwendige Qualitätskontrollen. Im Automobilbereich muss die Qualitätsüberwachung aufgrund der Stückzahlen und Taktzeiten im Prozess stattfinden. Dies ist aktuell nicht möglich und erfordert die Weiterentwicklung der Flechttechnik, da diese in Bezug auf die Produktivität für größere Serien geeignet ist.

Die heute verwendeten Klöppel führen aufgrund der vielen Umlenkungen zu einer Schädigung der Fasern, welche dann in der Flechtebene durch das Reiben der Fasern aneinander deutlich verstärkt wird. Dadurch ist der Einsatz der Fasern beschränkt. HM-Fasern lassen sich in den aktuellen Klöppeln nicht oder nur sehr eingeschränkt verarbeiten. IMS-Fasern können ebenfalls Probleme verursachen. Die Schädigung der Faser führt nicht nur zu einer Reduktion der mechanischen Kennwerte der geflochtenen Produkte, sie kann den gesamten Herstellungsprozess gefährden. Beim Durchlauf des Rovings durch den Klöppel werden die leicht aneinander haftenden einzelnen Filamente voneinander getrennt. Gleichzeitig werden einige Filamente gebrochen und stehen aus diesem Bündel heraus, wodurch die mechanischen Kennwerte reduziert werden. In der Flechtebene, wenn die Fasern aneinander vorbeigleiten, kann ein Teil der Filamente von dem vorbeigleitenden Faden mitgenommen werden und so aus seinem Faden herausgezogen werden. Diese Filamente bleiben häufig an einem Ende mit dem ursprünglichen Faden verbunden und werden in der Flechtebene hinter dem Faden hergezogen. Je weiter der Faden abgezogen wird, umso länger werden diese Faserbündel. Ab einer bestimmten Länge verknoten sie sich mit den anderen Fäden in der Flechtmaschine und es kommt zu Fadenrissen bzw. massiven Fehlstellen im Geflecht.

Die Faserschädigung wirkt sich damit nicht nur auf die mechanischen Kennwerte sondern auch auf die Prozesssicherheit aus. Sie ist somit eine Einschränkung in Bezug auf die Serientauglichkeit der Flechttechnik.

Die Anzahl und Art der Umlenkungen verhindern die Verarbeitung von Bändchen. Für Faserverbundbauteile wird hier meist von thermoplastischen Faserbändern ausgegangen, die abgelegt und durch Aufschmelzen des Thermoplasten miteinander verbunden werden. Diese Bändchen lassen sich mit den aktuellen Klöppeln nicht verarbeiten. Bändchen haben allerdings den Nachteil beim Flechten, dass sie eine Variation des Querschnittes deutlich einschränken. Trotzdem ist ihr Einsatz für einige Anwendungen interessant.

Resümierend kann festgestellt werden, dass die an dieser Stelle genannten maschinenbedingten Einschränkungen stark mit dem Zusammenspiel Faser und Klöppel zusammenhängen. Es handelt sich weniger um Einschränkungen, die den Einsatz der Flechttechnik unmöglich machen, als um Einschränkung in Bezug auf die Produktivität und die Qualität.

4.5.3. Faserbedingte Einschränkungen

Schon im vorangehenden Abschnitt wurde deutlich, dass die maschinenbedingten Einschränkungen teilweise eng mit den Fasern zusammenhängen. Bezogen auf die Fasern können folgende Einschränkungen genannt werden:

- Empfindlichkeit von HM-Fasern
- Klebrigkeit von Prepreg
- Einfluss der Schlichte
- Gleiteigenschaften zwischen den Fasern

Die Empfindlichkeit von HM-Fasern wurde bereits angesprochen. Problematisch dabei ist der Klöppel, allerdings ist parallel zu prüfen, inwieweit die Faser selbst robuster gestaltet werden kann. Die Empfindlichkeit hängt primär mit dem gewünschten, sehr hohen E-Modul zusammen. Verformungen sind lediglich in sehr geringem Maße zulässig, bevor die Faser versagt. Diese Eigenschaft lässt sich insofern nicht ändern. Über optimierte Schichten ließen sich die negativen Folgen vermutlich eingrenzen.

Prepreg lässt sich auf den Maschinen im Allgemeinen nicht verarbeiten, da das Harzsystem nicht entsprechend eingestellt ist. Entweder es ist derartig klebrig, dass ein Abzug über stehende Flächen nicht möglich ist bzw. das Harz den Klöppel verklebt – oder das Harzsystem ist so weit ausgehärtet, dass eine Verarbeitung ebenfalls nicht möglich ist. Es existiert lediglich ein schmales Fenster, in dem sich Prepreg verarbeiten lässt, welches meistens nicht getroffen wird.

Aufgrund der genannten Einschränkungen werden sowohl HM-Fasern als auch Prepreg aktuell nicht auf Flechtmaschinen verarbeitet. Bei den aktuell eingesetzten Fasern, wie bspw. die HTS- oder HTA-Fasern von TohoTenax bzw. die T700-Faser von Torray, könnten die Eigenschaften ebenfalls so modifiziert werden, dass eine bessere Verarbeitung möglich wäre. Entscheidend ist die Robustheit der Fasern, also wie stark die Fasern durch Reibung untereinander und an anderen Gegenständen geschädigt werden. Bei diesen Reibprozessen dürfen keine Filamente gelöst und aus dem Roving gezogen werden. Zum Teil werden deshalb Rovings mit einem leichten Zwirn eingesetzt. Diese sind in der Verarbeitung stabiler, allerdings reduzieren sich die Ablagebreiten und mechanischen Kennwerte.

4.6. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Flechttechnik neben den zuvor genannten Vorteilen auch Grenzen und Einschränkungen aufweist, die Potenziale zur Weiterentwicklung bieten. Dieses Potenzial wird insbesondere in der Funktionalität des Klöppels gesehen. Eine Erweiterung der Funktionalität würde das Bauteilspektrum der Technik erweitern und es zulassen, Geometrien zu erzeugen, welche aktu-

ell nicht oder nur mit hohem manuellen Aufwand möglich sind. Verbesserungen im Zusammenspiel zwischen Fasern und Klöppel würden außerdem die Qualität der geflochtenen Preformen erhöhen und könnten so auch die mechanischen Kennwerte verbessern. Dies würde auch den Ausschuss während der Produktion reduzieren und so die Produktivität der Technik steigern.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Flechttechnik neben den zuvor genannten Vorteilen auch Grenzen und Einschränkungen aufweist, die Potenziale zur Weiterentwicklung bieten. Dieses Potenzial wird insbesondere in der Funktionalität des Klöppels gesehen. Eine Erweiterung der Funktionalität würde das Bauteilspektrum der Technik erweitern und es zulassen, Geometrien zu erzeugen, welche aktuell nicht oder nur mit hohem manuellen Aufwand möglich sind. Verbesserungen im Zusammenspiel zwischen Fasern und Klöppel würden außerdem die Qualität der geflochtenen Preformen erhöhen und könnten so auch die mechanischen Kennwerte verbessern. Dies würde auch den Ausschuss während der Produktion reduzieren und so die Produktivität der Technik steigern.

5. Der elektronisch gesteuerte Klöppel

Wie im vorhergehenden Kapitel deutlich wurde, können bestimmte Einschränkungen der Flechttechnik durch gezielte Weiterentwicklung der Technik aufgehoben oder zumindest verschoben werden. Ein zentraler Baustein ist dabei die Entwicklung eines verbesserten Klöppelkonzepts. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Klöppel entworfen, gebaut und getestet, der nach einem prinzipiell anderem Funktionsprinzip arbeitet und so viele Beschränkungen aktueller Systeme nicht aufweist. Das neue Klöppelkonzept sieht eine elektronische Steuerung, einen Antrieb sowie eine Sensorik des Klöppels vor.

5.1. Ziele und Randbedingungen

Der elektronische Klöppel soll einige entscheidende Schwächen der mechanischen Variante beseitigen, muss aber auch folgende grundlegende Funktionen erfüllen, die der mechanische Klöppel ebenfalls erfüllt:

- Bevorratung des Flechtfadens
- Abwickeln des Fadens
- Einstellen einer Fadenzugkraft
- Rückzug des Fadens
- Begrenzung auf bestimmten Bauraum
- Integration in die Maschine über dem Klöppelfuß

Folgende weitere Funktionen sollen erfüllt werden:

- Variation der Fadenzugkraft im laufenden Betrieb
- Überwachung der Fadenzugkraft, um frühzeitig Fehler zu erkennen
- Schonenderer Umgang mit dem Faden
- Verarbeitung von Bändchen
- Verarbeitung von Prepreg

Wie und unter welchen Bedingungen dies umgesetzt werden kann, soll im Folgenden erläutert werden. Die Konzeption des Klöppels erfolgte für eine Radialflechtmaschine mit einem 100ter Stich.

5.1.1. Bevorratung des Flechtfadens

Der Klöppel muss weiterhin den Faden aufnehmen, der in der Maschine verarbeitet werden soll. Hier wird häufig ein bestimmtes Spulenvolumen vorgegeben, das je

nach Art des Fadens und des Produkts stark variieren kann. Für den hier entwickelten Klöppel wird das Volumen mit dem Referenz-System, dem Klöppel IFDA 100 der Firma Herzog gleichgesetzt, sodass die gleichen Spulen mit einem Volumen von 265 cm^3 verwendet werden können.

5.1.2. Abwickeln des Fadens

Der auf der Spule bevorratete Faden muss von dieser durch den Klöppel kontrolliert, d. h. unter einer definierten Zugkraft abgegeben werden. Dabei sind unterschiedliche Abzugsgeschwindigkeiten möglich, welche von der Flügelradzahl, also der Laufgeschwindigkeit der Flechtmaschine, dem gewünschten Winkel und dem Umfang des Kerns abhängig sind. Gemäß folgender Formel kann die Abzugsgeschwindigkeit des Fadens bestimmt werden:

$$v_{FF} = \frac{2 \cdot \Pi \cdot n_{fr} \cdot D_P}{N_{fr} \cdot \sin(\alpha)} \quad (19)$$

mit der Flügelradzahl n_{fr} , dem Kerndurchmesser D_P , der Anzahl der Flügelräder N_{fr} und dem Faserwinkel auf dem Kern α . Für eine Maschine mit 176 Klöppeln sind die Fadenabzugsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Kerndurchmesser und Flechtwinkel in Abbildung 5.1 dargestellt.

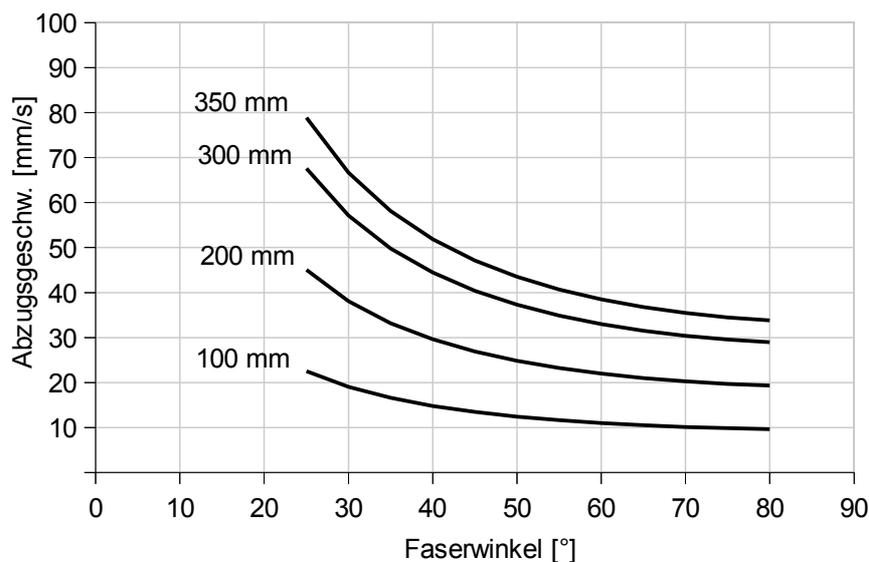


Abbildung 5.1: Abzugsgeschwindigkeit eines Fadens aus dem Klöppel über dem Faserwinkel für verschiedene Kerndurchmesser; die Berechnungen gelten für eine Flechtmaschine mit 88 Flügelrädern, bei einer Rotationsgeschwindigkeit der Flügelräder von 80 U/min

Das Spektrum der Geschwindigkeiten geht von etwa 10 mm/s bis knapp 80 mm/s. Im Normalfall bewegen sich die Geschwindigkeiten zwischen 15 mm/s und 30 mm/s, allerdings müssen auch die hohen Geschwindigkeiten möglich sein.

5.1.3. Einstellbare Fadenzugkräfte

Für das Verflechten von Kohlenstofffasern werden oft Fasern mit einem Titer von 800 tex oder 1600 tex und Federn zwischen 300 g bis 900 g verwendet. Mit diesen Federn werden Fadenzugkräfte von etwa 3 N bis 9 N erreicht. Vor allem für dünnere Fäden sind auch kleinere Zugkräfte interessant. Deshalb wird hier als Rahmen für den neuen Klöppel ein Bereich von 1 N bis 10 N angesetzt. Diese Zugkräfte sollen stufenlos im laufenden Prozess einstellbar sein.

5.1.4. Rückzug des Fadens

Die Notwendigkeit des Fadenrückzugs wird in Abschnitt 3.3 beschrieben. In Abhängigkeit des Maschinensystems kann dieser Rückzug unterschiedlich groß ausfallen. Beim elektronisch gesteuerten Klöppel wird eine Radialflechtmaschine vorausgesetzt. Hier ist der benötigte Rückzug sehr gering, aber noch vorhanden.

Abbildung 5.2 zeigt die Abzugsgeschwindigkeit für eine Flechtmaschine mit 4 m Durchmesser, was etwa einer Radialflechtmaschine mit 176 Klöppeln entspricht. Als Flügelraddurchmesser sind 125 mm angenommen. Bei einer Flügelradrehzahl von 80 U/min ergeben sich nur durch die Bewegung des Klöppels der grau dargestellte

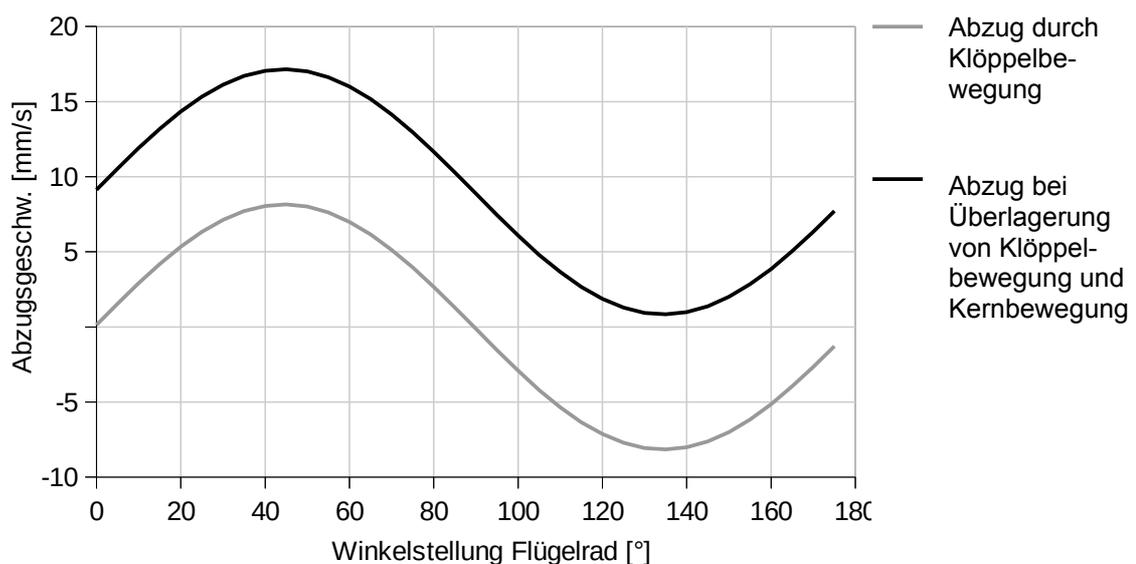


Abbildung 5.2: Abzugsgeschwindigkeit des Fadens über Flügelradstellung unter Berücksichtigung der Klöppelbewegung

Fadenabzug. Dabei ist die 0°-Stellung des Flügelrads die Position, in welcher der betrachtete Klöppel gerade von einem Flügelrad zum nächsten übergeben wird. Nur durch die Bewegung des Klöppels entlang des Flügelrads kommt es demnach zu Abzugsgeschwindigkeiten von bis zu ± 8 mm/s. Diese ist allerdings, wenn nicht auf der Stelle geflochten wird, überlagert durch die Abzugsgeschwindigkeit, welche aus dem Abzug des Kerns resultiert. Gemäß Abb. 5.1 können die Geschwindigkeiten sehr unterschiedlich sein. Wenn allerdings schon der minimale Wert von 9 mm/s angenommen wird, kommt es faktisch zu keinem Rückzug mehr, sondern die Abzugsgeschwindigkeit wird lediglich variiert. In Abb. 5.2 ist dies durch die schwarze Linie dargestellt. Dadurch ändern sich nicht die benötigten Beschleunigungen, aber es ist kein Richtungswechsel der Bewegung notwendig. Trotzdem muss dieser möglich sein, um das Flechten bei stehendem Kern zu ermöglichen.

5.1.5. Begrenzung des Bauraums

Der Bauraum stellt eine wesentliche Bedingung für jeden Klöppel da. Der Bauraum ist deutlich beschränkt und soll deshalb primär mit der Spule gefüllt werden. Um einen fairen Vergleich mit einem mechanischen Klöppel zu gewährleisten und um eine Einbaukompatibilität zu erreichen, wird für den elektronisch gesteuerten Klöppel der gleiche Bauraum angenommen wie für den Klöppel IFDA 100.

5.1.6. Integration in eine bestehende Maschine

Für die mögliche Integration des neuen Klöppels in eine bestehende Maschine ist neben der Bauraumdefinition auch die Schnittstelle zur Maschine, der Klöppelfuß, entscheidend. Die aktuell verwendeten Klöppelfüße sollen eingesetzt werden.

5.1.7. Variation und Überwachung der Fadenzugkraft

Hierbei handelt es sich um zwei wesentliche neue Funktionen, die sowohl den Einsatzbereich als auch die Zuverlässigkeit der Maschine deutlich erhöhen. Eine Variation der Fadenzugkraft im Betrieb würde das Umflechten deutlich komplexerer Kerne mit größeren Querschnittänderungen und kleineren Radien (in Längsrichtung) ermöglichen. Auch das Flechten von Stufen (Flanschen) wird auf diese Weise deutlich erleichtert. Daneben sind vermutlich viele weitere Möglichkeiten gegeben, die erst der Einsatz der Technik aufzeigen wird. Für Maschinen mit einem sehr großen Durchmesser kann z. B. der Ausgleich der Gravitation eine wichtige Funktion sein. Die Überwachung der Fadenzugkraft wird je nach Bauweise leicht zu integrieren sein. Sie ermöglicht eine deutliche Reduktion der Ausschussquote beim Flechten und damit eine Senkung der Kosten. Der mechanische Klöppel detektiert einen fehlerhaften Abzug erst beim Fadenriß und sobald der Klöppel einen entsprechenden

Sensor erreicht hat. In diesem Moment kann die Maschine zwar gestoppt werden, allerdings ist das Bauteil oder zumindest die aktuell geflochtene Lage damit Ausschuss. Es gibt auch die Möglichkeit, mittels optischer Systeme Fehler im Geflecht, die meistens auf Probleme am Klöppel hindeuten, zu erkennen. Die Erkennung findet im Allgemeinen auf dem Bauteil oder direkt vor dem Bauteil statt. Dementsprechend erfolgt eine Fehlerdetektierung zu spät, um eine fehlerhafte Lage zu vermeiden.

Durch die Überwachung direkt am Klöppel, also an der Quelle der möglichen Fehler, wird es möglich sein, Fehlfunktionen so früh zu erkennen, dass diese behoben werden können, bevor es einen Fehler in der Ablage auf dem Bauteil gibt.

5.1.8. Verarbeitung von Bändchen

In den aktuell verwendeten mechanischen Klöppeln werden die Fäden durch die vielen Umlenkungen, meistens mittels Ösen, auf mehr oder weniger runde Querschnitte verformt. Eine Verarbeitung von breiten Bändern ist so nicht oder nur eingeschränkt möglich.

Deshalb soll ein neuer Klöppel den Roving nicht verformen oder sogar noch weiter spreizen. Daneben soll der neue Klöppel möglichst auch in sich relativ steife Bändchen, wie bspw. Thermoplastbänder, verarbeiten können, wodurch das Spektrum der Flechttechnik erweitert würde.

5.1.9. Vermeidung der Faserschädigung

Die vielen Umlenkungen im Klöppel führen nicht nur zu einer Veränderung des Querschnitts der Fäden, sie verursachen auch Schädigungen an der Faser. Diese sind zwar nicht so schwer, dass es zu deutlich messbaren Einbußen in den mechanischen Eigenschaften kommt [71]. Allerdings können sich leichte Schäden im weiteren Prozess deutlich verstärken und neben den mechanischen Eigenschaften insbesondere auch die Prozesssicherheit negativ beeinflussen.

In den mechanischen Klöppeln kommt es zudem zu einem schrägen Abzug der Fasern von der Spule, wie in Abbildung 5.3 sichtbar. Dies kann zu dem dargestellten Aufspießen der Fasern führen. Zusätzlich wird der Faden schräg über die unteren Fäden gezogen. Beides führt zu einer Schädigung, die sich einerseits im weiteren Verlauf verstärken kann, die sich aber partiell auch direkt auf der Spule auswirkt. Es können einzelne Filamente aus den Rovings gezogen werden und auf der Spule bleiben. Diese bilden dann einen Ring, der mit jedem weiteren Filament dicker wird. Dies kann soweit gehen, dass der Ring ähnlich viele Filamente enthält wie der Roving und sich so eng um die Spule legt, dass der Faden nicht mehr abgewickelt werden kann (s. Abb. 5.3). Dann ist die Spule blockiert und es kommt zum Fadenriß.



Abbildung 5.3: Faserschädigung durch schrägen Abzug der Fasern von der Spule; links: Aufspießen der Faser; rechts: Faserring auf der Spule

Aus diesem Gründen ist die Vermeidung der Faserschädigung und eines schrägen Fadenabzugs ein wichtiges Ziel jeder Klöppelentwicklung für Kohlenstoff- oder Glasrovings.

Die Entwicklung des elektronisch gesteuerten Klöppels ist unter den oben genannten Randbedingungen mit dem Ziel erfolgt, die aufgeführten zusätzlichen Funktionen zu integrieren. Die größten Herausforderungen in diesem Kontext sind der Bauraum und damit der generelle mechanische Aufbau, die Energieübertragung sowie die Sensorik und Steuerung gewesen. Demzufolge wird auf genau diese Bereiche im Folgenden eingegangen.

5.2. Mechanischer Aufbau

Ein prinzipieller Überblick des Aufbaus und der Energieversorgung des Klöppels wurde bereits auf der SETEC 2010 vorgestellt [72]. Ein ähnliches Konzept wurde 2012 auf der AUTEX Konferenz von Fabich et al. präsentiert [73]. Im Folgenden soll detaillierter auf die einzelnen Punkte des mechanischen Aufbaus eingegangen werden, ohne in die Detailkonstruktion zu gehen, da hier verschiedene Lösungen möglich sind, die zu gleichen oder ganz ähnlichen Ergebnissen führen und deshalb nicht von grundlegendem Interesse sind.

Wie schon mehrfach erwähnt, soll der Klöppel eine möglichst große Fadenmenge aufnehmen, wofür das Spulenvolumen möglichst groß ausgelegt sein sollte. Das Minimum entspricht dem Volumen der aktuell verwendeten Spulen. Im ersten Schritt muss die Spulenanordnung definiert werden. Es können zwei Varianten unterschieden werden: eine stehende und eine liegende Spule (s. auch Abschnitt 3.3.1). Bei der liegenden Spule kann die Ausrichtung in Bewegungsrichtung oder quer dazu unter-

schieden werden, was für den prinzipiellen Aufbau des Klöppels allerdings eine untergeordnete Rolle spielt. Die liegende Spule bietet den deutlichen Vorteil einer besseren Fadenführung, wie in Abbildung 5.4 dargestellt. Der Faden kann direkt ohne größere Umlenkungen zum Flechtpunkt geführt werden. Es ist also zum einen ein schonender Umgang mit dem Faden möglich, zum anderen ist die Verarbeitung von Bändern hier auch kein Problem, insbesondere wenn die Rotationsachse der Spule in Bewegungsrichtung des Klöppels zeigt. Die liegende Spule weist aber den entscheidenden Nachteil auf, dass das Volumen bei gleichem Maschinenstich deutlich kleiner ist, als bei einer stehenden Spule.

Mit stehenden Spulen lassen sich hingegen deutlich größere Spulenvolumen umsetzen bei gleichem Klöppelbauraum. Die Faser muss allerdings mindestens einmal umgelenkt werden. Auch liegt der Schwerpunkt dieser Klöppel weiter entfernt vom Klöppelfuß, was zu einer höheren Belastung dieser führt.

Für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Klöppel wird eine stehende Spule verwendet, da nur so das geforderte Spulenvolumen erreicht wird. Die im Vergleich zur liegenden Spule komplexere Fadenführung und die dadurch zu erwartende zusätzliche Schädigung der Fasern werden als technisch handhabbar betrachtet. Zusätzlich wird die Randbedingung erfüllt, dass die für den Klöppel IFDA 100 verwendeten Spulen eingesetzt werden können. Diese weisen ein Kabinett auf, also einen Bereich, der nicht mit Garn gefüllt wird. Bei einer verbesserten Garnführung kann dieser Bereich trotzdem genutzt werden, wodurch das Spulenvolumen vergrößert wird, ohne eine größere Spule einsetzen zu müssen.

Nach der Definition der Ausrichtung der Spule kann auch der Weg des Fadens im Klöppel betrachtet werden. Um der Anforderung gerecht zu werden, den Faden wenig zu schädigen und Bänder verarbeiten zu können, dürfen Umlenkungen nicht als Öse ausgeführt werden, sondern als breite flache Umlenkungen. Bei jeder notwendigen Umlenkung ist der Umlenkwinkel möglichst klein zu halten und der Radius möglichst groß.

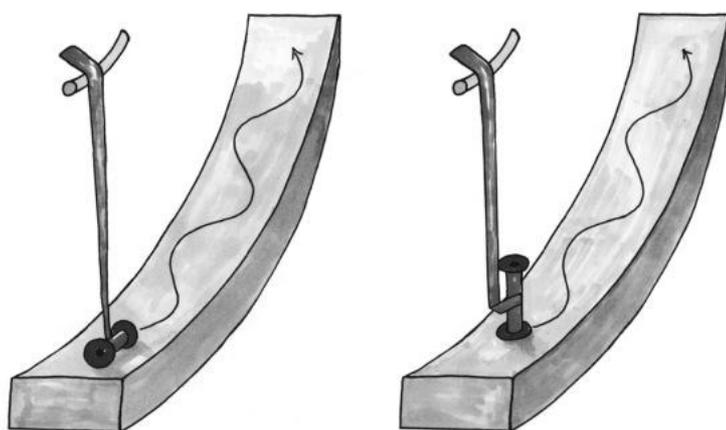


Abbildung 5.4: Mögliche Orientierungen der Faser- spule in der Flechtmaschine mit dem sich daraus ergebenden Fadenweg; links: liegende Spule; rechts: stehende Spule

Durch die stehende Spule ist eine Umlenkung des Fadens zwingend notwendig. Weitere Umlenkungen sind in dem Klöppel nicht vorgesehen. So ist auch die Verarbeitung von Bändchen problemlos möglich. Wie aus Abbildung 5.3 deutlich wird, muss für eine geringe Schädigung der Fasern nicht nur die Anzahl der Umlenkungen reduziert werden, sondern auch der Abzug von der Spule selber so gestaltet werden, dass dieser nach Möglichkeit immer gerade von dieser abgezogen wird. Dies ist bei einer Spule, die eine Fadenverlegung aufweist, nur möglich, wenn entweder die Spule entlang ihrer Drehachse bewegt wird, der Umlenkpunkt entlang der Spule bewegt wird oder der Abstand zwischen Spule und Umlenkpunkt im Vergleich zur Spulenbreite sehr groß ist (hier ist der Abzug nicht wirklich senkrecht, aber die Abweichung ist gering). In einem Klöppel lässt sich nur der zweite Ansatz realisieren und wird demnach in dem Klöppelkonzept umgesetzt. Durch diesen Ansatz ergeben sich eine Reihe weiterer mechanischer Bedingungen, wie bspw. die Stabilität des Klöppels, Resonanzen im Gesamtsystem oder die Sensibilität gegenüber Verschmutzung.

Der Fadenweg im Klöppel ist bei dem umgesetzten Prinzip auf das Minimum reduziert, wie aus Abbildung 5.5 deutlich wird. Ein Fadenspeicher neben der Spule, der kurzfristig überflüssigen Faden wieder aufnehmen kann, um die Fadenzugkraft aufrecht zu halten, ist nicht vorgesehen. Der Rückzug des Fadens muss deshalb durch erneutes Aufspulen erfolgen.

Die Bewegung der Umlenkung kann über eine entsprechende Spindel, die mit der Bewegung der Spule mechanisch gekoppelt ist, gelöst werden. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Verlegung auf der Spule immer der Steigung der Spindel entsprechen muss. Dies könnte eine Lösung für Flechtmaschinen sein, welche nur für die Herstellung eines einzigen Produkts gebaut werden und damit auch nur eine Art von Fasern verarbeiten. Für einen Einsatz in der Produktion von faserverstärkten Bauteilen wird diese Lösung aktuell eher eine Ausnahme darstellen. Deshalb wird

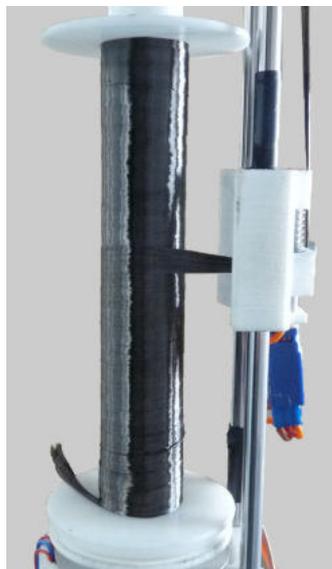


Abbildung 5.5: Abzug des Fadens im elektronisch gesteuerten Klöppel. Die einzige Fadenumlenkung wird entlang der Spule bewegt, sodass immer ein senkrechter Abzug erfolgt.

ein Konzept verfolgt, dass eine Bewegung der Fadenumlenkung unabhängig von der Spindel ermöglicht. Dies erfordert einen separaten Antrieb für die Fadenumlenkung. Die benötigte Leistung (P_{MS}) dieses Antriebs ergibt sich aus dem Produkt der maximalen Kraft im Faden (F_{ff}) und der maximalen Geschwindigkeit der Umlenkung. Die maximale Kraft im Faden ist mit 10 N definiert. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus der Verlegung auf der Spule ($a_{vert-sp}$) und der Rotationsgeschwindigkeit der Spule, die sich wiederum aus der Abzugsgeschwindigkeit (v_{ff}) und dem minimalen Spulenradius (r_{sp}) ergibt. Die Leistung lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$P_{MS} = \frac{a_{vert-sp} \cdot v_{ff} \cdot F_{ff}}{2 \cdot \pi \cdot r_{sp}} \quad (20)$$

Die Abzugsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 5.1 dargestellt, der minimale Spulendurchmesser beträgt 20 mm. Die Verlegung hängt stark von dem Faden ab. Mit der Annahme von 20 mm ergibt sich ein Leistungsbedarf von etwa 0,3 W. Hierbei sind noch keine Verluste, z. B. durch Reibung, berücksichtigt.

Die Fadenreserve muss über ein erneutes Aufspulen des Fadens erreicht werden. Hierfür ist ein passives System, z. B. über eine Feder oder ein aktives System möglich. Ein Klöppel mit einer Spiralfeder wird bspw. für 3D-Flechtmaschinen verwendet und ist schon in der Arbeit von Dissertationsschrift von Rosenbaum [27] skizziert. Ein aktives System ist noch nicht bekannt. Die Art des Rückzugs ist auch mit der Art der Erzeugung der Fadenzugkraft gekoppelt. Auch hier sind verschiedene Systeme möglich:

- Die Spule ist blockiert, die Fadenzugkraft wird durch eine zusätzliche Mechanik direkt am Faden erzeugt. Diese Variante wird bei den meisten mechanischen Klöppeln verwendet, kann hier allerdings aufgrund des direkten Fadenwegs nicht eingesetzt werden.
- Die Spule wird gebremst. Die Spule kann sich ab einer bestimmten Zugkraft am Faden gegen eine Bremse drehen. Dadurch wird die Zugkraft im Faden nie die Bremskraft übersteigen. Allerdings wird die Kraft erst durch einen Zug aufgebaut. Der Klöppel selber kann keine Zugkraft aufbauen.
- Die Spule wird aktiv angetrieben. Ein Motor treibt die Spule aktiv an und stellt so die Zugkraft im Faden ein.

Wenn die Arten der Zugkraftherzeugung mit den Ansätzen für die Fadenreserve kombiniert werden, ergeben sich eine Reihe von Varianten, die alle einzeln bewertet werden können. Zwei sollen beispielhaft genauer beleuchtet werden.

Eine Variante lautet, die Fadenreserve mit einer Spiralfeder und die Fadenzugkraft mittels einer gebremsten Spule zu erzeugen. Die Kombination ist simpel sowie robust und daher relativ vielversprechend. Es treten allerdings folgende Nachteile auf:

- Fadenzugkraft entsteht erst, wenn der Faden in die Maschine gezogen wird. Bei einer Spiralfeder können hier relativ lange Strecken notwendig sein. Dies ist allerdings nur einmal zu Beginn des Flechtens notwendig, also ein eher geringer Nachteil.
- Spiralfedern sind in Bezug auf die aktuell im mechanischen Klöppel verwendeten Schraubenfedern relativ teuer.
- Für eine Variation der Fadenzugkraft muss die Bremskraft verändert werden. Neben der konstruktiven Herausforderung, dies in dem Bauraum zu realisieren, ist auch zu beachten, dass eine Erhöhung der Zugkraft erst wirksam wird, wenn der Faden entsprechend weit abgezogen wurde.
- Ein Backenbremssystem ist auf der Größe schwer zu realisieren. Scheibenbremsen wurden bis jetzt noch nicht für Klöppel eingesetzt. Auf jeden Fall ist eine Verschmutzung des Bremssystems zu verhindern.

Eine andere Variante wäre eine aktiv angetriebene Spule. Dieses System überzeugt durch seinen simplen Aufbau und durch Flexibilität. Ein Motor kann direkt mit der Spule verbunden werden. Die Fadenzugkraft lässt sich sofort aufbauen und jederzeit beliebig ändern. Die Fadenreserve ist praktisch unbegrenzt. Aber auch hier ergeben sich Nachteile:

- Es ist eine entsprechend schnelle Steuerung des Motors notwendig.
- Die Fadenzugkraft muss mittels Sensoren gemessen werden.
- Der Motor muss eine ausreichende Agilität aufweisen.

Dies sind die beiden vielversprechendsten Konzepte. Das Konzept des direkten Antriebs der Spule wird aufgrund der größeren Möglichkeiten, dem höheren Innovationsgehalt bei wenig gravierenden Nachteilen in dieser Arbeit weiter verfolgt.

Für den Antrieb der Spule können Gleichstrom, Drehstrom oder Schrittmotoren eingesetzt werden. Drehstrommotoren scheiden aufgrund ihrer Größe und der notwendigen Stromversorgung aus. Schrittmotoren gibt es in entsprechenden Größen und sie sind am besten zu steuern. Die Steuerung ist allerdings recht komplex und verbraucht relativ viel Platz. Gleichstrommotoren sind von der Steuerung nicht ganz so flexibel, aber sehr simpel. Aus diesem Grund werden für den Klöppel Gleichstrommotoren eingesetzt – sowohl für den Antrieb der Spule als auch für die Bewegung der Fadenumlenkung. Die Spule wird dabei von einem modifizierten Servo aus dem Modellbaubereich angetrieben, die Fadenumlenkung von einem bürstenlosen Motor mit Planetengetriebe.

Auch für den Antrieb der Spule kann die benötigte Leistung bestimmt werden. Diese ergibt sich direkt aus der Abzugsgeschwindigkeit (v_{ff}) und der Fadenzugkraft (F_{ff}), zu maximal 0,8 Watt. Auch hier sind wieder keine Verluste berücksichtigt.

Sowohl für die Steuerung des Motors als auch für die Forderung einer Überwachung der Fadenzugkraft ist eine Sensorik notwendig. Da der Fadenweg im Klöppel relativ

kurz ist, gibt es nur zwei Positionen an denen der Sensor angreifen kann. Entweder im Bereich der Umlenkung, wobei der Sensor dann mit dieser mitbewegt werden muss, oder am oberen Ende des Klöppels an dem der Faden diesen verlässt. Auf die Sensorik und Steuerung wird im Abschnitt 5.4 genauer eingegangen. Hier soll sie nur erwähnt werden, um einen Überblick über alle benötigten Komponenten des Klöppels zu geben.

Als letzte benötigte Komponente ist die Energieversorgung zu nennen, auf die im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird. Wie sich zeigen wird, stellt die Energieversorgung eines der komplexeren Anforderungen für den elektronisch gesteuerten Klöppel dar.

Mit den genannten Komponenten ergibt sich der in Abb. 5.6 schematisch dargestellte Aufbau des Klöppels. Die konstruktive Aufgabe besteht darin, alle Komponenten in den kleinen Bauraum unterzubringen. Abb. 5.7 zeigt zwei Schnitte durch die Modelle der gefertigten Funktionsmuster. Unterhalb der Spule ist ausreichend Platz, um die Motoren und den größten Teil der Elektronik unterzubringen.

Der Umlenker mit der integrierten Zugkraftmessung ist dagegen vom Bauraum stark begrenzt, aber auch hier lassen sich alle Komponenten integrieren. Die Kraftmessung erfolgt über einen Linearpotentiometer. Das den Faden umlenkende Element ist federnd gegenüber dem Potentiometer gelagert. Diese Art der Kraftmessung setzt voraus, dass der Faden in genau definierten Winkeln um das den Faden umlenkende Element läuft, da sich sonst die Kräfte im Faden in unbekannter Weise überlagern, wodurch eine genaue Messung nicht mehr möglich ist.

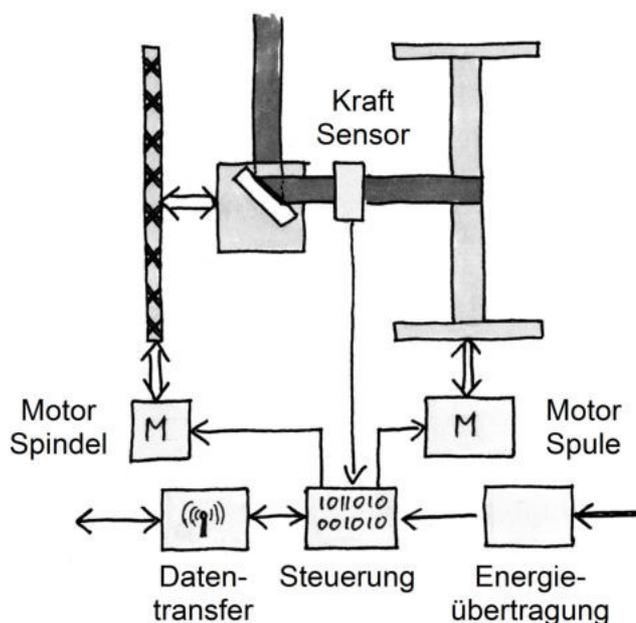


Abbildung 5.6: Elemente eines elektronisch gesteuerten Klöppels und deren Verknüpfung

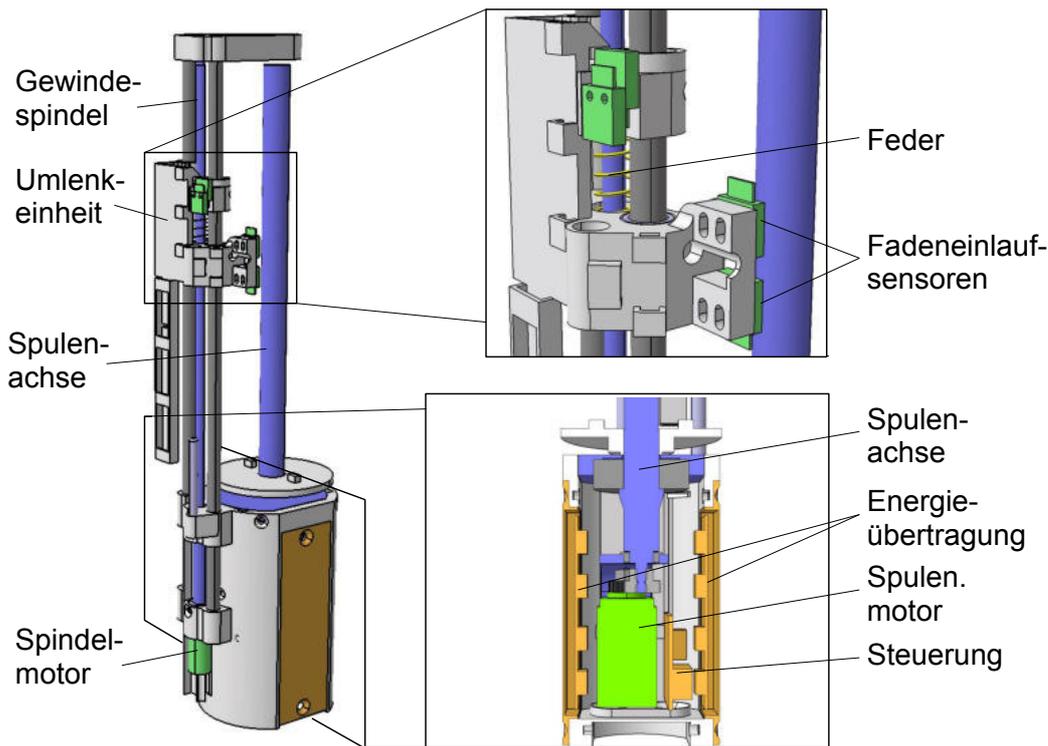


Abbildung 5.7: Aufbau des elektronisch gesteuerten Klöppels; links: Gesamtansicht mit Klöppelbasis, Fadenumlenkeinheit und Spulenachse; rechts oben: Fadenumlenkeinheit mit Fadenzugkraft-Sensor und Fadeneinlauf-Sensor; rechts unten: Schnitt durch den Klöppelfuß mit Spulenmotor, Energieübertragung und Steuereinheit

5.3. Energieversorgung

Der Energiebedarf setzt sich aus dem Bedarf der Motoren, der Steuerung und der Sensorik zusammen. Der Anteil der Steuerung und Sensorik ist der deutlich geringere. Für die Motoren ist bereits zuvor die max. Leistung genannt worden. Es ergeben sich 1,2 Watt, ohne dass Verluste berücksichtigt werden. Aktuelle DC-Motoren weisen max. Wirkungsgrade zwischen 0,8 bis 0,9 auf [74]. Auch die benötigten Getriebe weisen Verluste auf und insbesondere der Spindeltrieb wird zusätzliche Leistung des Motors erfordern. Als eine erste grobe Schätzung wurde für den Klöppel ein Energiebedarf von 5 Watt angenommen. Diese müssen jederzeit zur Verfügung stehen. Bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 20 mm/s (s. Abb. 5.1) und einer Fadlänge von 200 m ergibt sich für den Klöppel eine Laufzeit bis zum Spulenwechsel von etwa 3 Stunden. Damit beträgt der Energiebedarf circa 15 Wh.

Die verwendeten Motoren sowie die eingesetzte Sensorik und Elektronik arbeiten mit Gleichstrom. Die meisten kleineren DC Motoren arbeiten in einem Spannungsbereich um 5 V. Die Elektronik der Steuerung und Sensorik benötigt dagegen eine relativ konstante Spannung. Aus diesem Grund wird für den elektronisch gesteuerten Klöppel eine Nennspannung von 5 V definiert.

Es gibt prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten, den elektronisch gesteuerten Klöppel mit Energie zu versorgen. Die Energie kann von außen zugeführt, im Klöppel erzeugt oder dem Klöppel mittels Speichermedien zugeführt werden. Es ist auch eine Kombination der Verfahren möglich. Es sind dabei folgende Randbedingungen zu beachten:

- Der Klöppel führt eine nicht lineare Bewegung durch. Die Bewegungsbahnen der verschiedenen Klöppel einer Maschine kreuzen sich dabei.
- Die Funktionalität ist für mindestens eine Spulenfüllung zu gewährleisten, erst mit dem Wechsel der Spule könnte auch ein Energiespeicher gewechselt werden.
- Die Energieversorgung muss ein nach außen gekapseltes System darstellen, da beim Flechten Kohlenstofffaserflusen entstehen können, die elektrisch leitend sind und Kurzschlüsse verursachen können.
- Der Platzbedarf ist möglichst klein zu halten und darf mit den anderen Komponenten auf keinen Fall die oben genannten Grenzen überschreiten

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen können die zuvor genannten Versorgungsansätze genauer analysiert werden.

Die Erzeugung der Energie direkt im Klöppel bedarf im Allgemeinen eines Generators, welcher wiederum Platz verbraucht. Daneben ist zumindest ein Energiepuffer notwendig. Folgende Ansätze wurden betrachtet:

- Generator, der über die Bewegung des Klöppels angetrieben wird. Bewertung: Zusätzlicher Platzbedarf nicht nur für den Generator, sondern auch für eine Mechanik für den Antrieb. Keine Energieversorgung beim Stillstand der Maschine
- Solarzellen. Bewertung: Geringer Platzbedarf, es ist aber fraglich, ob ausreichend geeignete Fläche vorhanden ist. Die Verschmutzung, z. B. durch Faserflusen, reduziert deutlich den Stromertrag.

Speichermedien können die Energie entweder direkt in elektrischer Form speichern oder mittels eines anderen Mediums, aus welchem dann mittels eines Generators der Strom gewonnen wird. Die Ansätze werden wie folgt bewertet:

- Akkumulatoren: Moderne Lithium-Akkumulatoren können den Energiebedarf in einer akzeptablen Größe decken. Die Energie stünde permanent zur Verfügung. Allerdings müssen die Akkumulatoren bei jedem Spulenwechsel getauscht werden, was die Stillstandszeit der Maschine erhöht.
- Energiespeichermedium mit Generator: Das Gesamtsystem, bestehend aus Speicher und Generator ist von der voluminösen Energiedichte im Allgemeinen deutlich größer als ein guter Akkumulator und erfüllt nicht die Anforderungen. Daneben ist auch hier ein regelmäßiger Wechsel der Energiespeicher notwendig.

Die direkte Energieversorgung scheint auf den ersten Blick am einfachsten umzusetzen zu sein. Durch die Bewegung der Klöppel ist allerdings eine Versorgung durch ein Kabel nicht möglich. Es bleiben dann folgende Möglichkeiten:

- Übertragung mittels Schleifkontakten: sehr geringer Platzbedarf, aber je nach Anordnung sind erhebliche Änderungen im Maschinenaufbau notwendig. Durch die Faserflusen können Kurzschlüsse entstehen. Überdies tritt ein Verschleiß der Kontaktflächen auf.
- Übertragung mittels Kontaktpins: sehr geringer Platzbedarf. Es können Kurzschlüsse durch Faserflusen auftreten.
- Berührungslose Energieübertragung: geringer Platzbedarf. Die Systeme sind wartungsfrei. Es sind allerdings Erweiterungen im Maschinensystem notwendig.

Die Bewertungen der verschiedenen Systeme wurde auf Basis einfacher Recherchen und grundlegender Konstruktionsmöglichkeiten durchgeführt, da nicht jedes System bis in alle Einzelheiten entwickelt werden konnte. Trotzdem lassen sich schon aufgrund der einfachen Analysen die meisten Systeme ausschließen, da die oben genannten Randbedingungen nicht ausreichend erfüllt werden können oder prinzipielle Nachteile auftreten. Für die Energieversorgung stehen Akkumulatoren oder eine berührungslose Energieübertragung zur Verfügung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die berührungslose Energieübertragung weiter verfolgt. Der Konstruktions- und Entwicklungsaufwand ist zwar etwas höher, das System bietet allerdings den Vorteil, dass die Stillstandszeit durch den Batteriewechsel nicht verlängert wird.

Die berührungslose Energieübertragung wurde in verschiedenen Arbeiten untersucht [75,76] und wird heute vielfach im Maschinenbau eingesetzt. Die Übertragung kann prinzipiell induktiv oder kapazitiv erfolgen. Wie Eßer [75] gezeigt hat, ist bei induktiven Verfahren das spezifische Luftspaltvolumen geringer. Es wird also bei gleichem Abstand eine kleinere Fläche benötigt. Aus diesem Grund wird ein induktives Verfahren eingesetzt.

Die Übertragung zum Klöppel ist über zwei Wege möglich. Entweder direkt vom Maschinenrumpf zum Klöppel oder vom Flügelrad zum Klöppel. Beide Varianten sind in Abb. 5.8 schematisch dargestellt. Bei der zweiten Variante muss die Energie allerdings erst auf das Flügelrad transferiert werden. Der Vorteil besteht darin, dass es nur zu einer Relativbewegung zwischen dem Energiesender und dem -empfänger kommt, wenn ein Klöppel von einem Flügelrad zum nächsten wechselt. Dadurch können sich beide berühren, d. h., der Abstand kann minimiert werden, wodurch der Wirkungsgrad maximal wird. Dafür muss die Energie in einem ersten Schritt auf das sich ebenfalls bewegende Flügelrad transferiert werden. Dies kann im Maschinenrumpf geschehen, entweder ebenfalls berührungslos oder mittels Schleifkontakten, da der Rumpf geschlossen ist und keine Faserflusen eindringen.

Übertragung von Flügelrad zum Klöppel

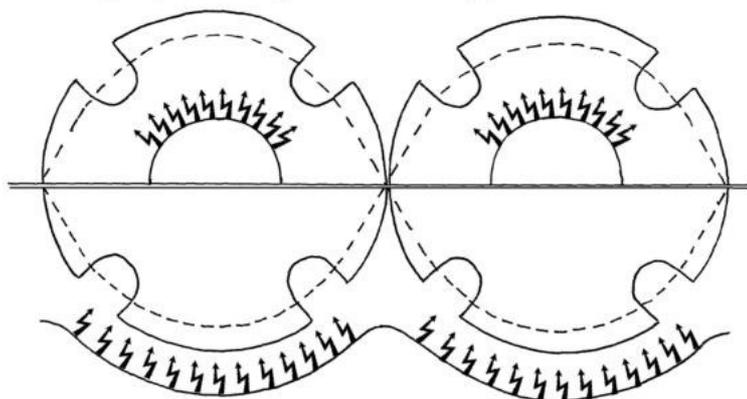


Abbildung 5.8:
Bereiche der
möglichen Ener-
gieübertragung
zum Klöppel

Übertragung von Maschinenrumpf zum Klöppel

Bei einer Energieübertragung direkt vom Maschinenrumpf zum Klöppel steht der Energiesender und der -empfänger bewegt sich. Deshalb muss zwischen beiden ein kleiner Luftspalt vorhanden sein, wodurch der Wirkungsgrad reduziert wird.

Wie Abb. 5.8 verdeutlicht, bricht bei beiden Übertragungswegen der Kontakt zwischen Energiesender und -empfänger bei der Übergabe der Klöppel zwischen den Flügelrädern kurzzeitig ab. Für diesen Bereich muss die benötigte Energie zwischengespeichert werden. In dem umgesetzten Klöppel erfolgt dies mittels Kondensatoren, wie später noch gezeigt werden wird.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Übertragung vom Flügelrad zum Klöppel umgesetzt. Dazu sind in der Basis des Klöppels die Energieempfänger und Zwischenspeicher integriert. Da beim Klöppel abwechselnd die linke bzw. rechte Seite zur Flügelradmitte zeigen, müssen zwei Energieempfänger integriert werden, wobei immer nur einer im Einsatz ist. Gleichzeitig muss auf dem Flügelrad der Energiesender fixiert werden. Dieser muss vier Sendeeinheiten aufweisen, von denen immer zwei gleichzeitig mit den Klöppeln in Kontakt stehen. In Abb. 5.9 ist das System dargestellt.

Das vorgestellte System wurde in seiner ersten Version ausführlich getestet und analysiert. Es wurde insbesondere überprüft, wie viel Leistung zur Verfügung steht und ob die Lücken in der Energieübertragung beim Übergang eines Klöppels von einem Flügelrad zum nächsten überbrückt werden können. Für die Messungen wurde ein Teststand mit zwei Flügelrädern verwendet, indem der Klöppel eine Acht durchfährt.

Die Übertragung der Energie findet mittels einer hochfrequenten Wechselspannung statt. Die Spannung vor der Glättung und Umspannung ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Aufgetragen ist die Spannung beim Empfänger über den Rotationswinkel des Flügelrads bzw. die Zeit, wobei 0° der Übergabeposition zwischen den Flügelrädern

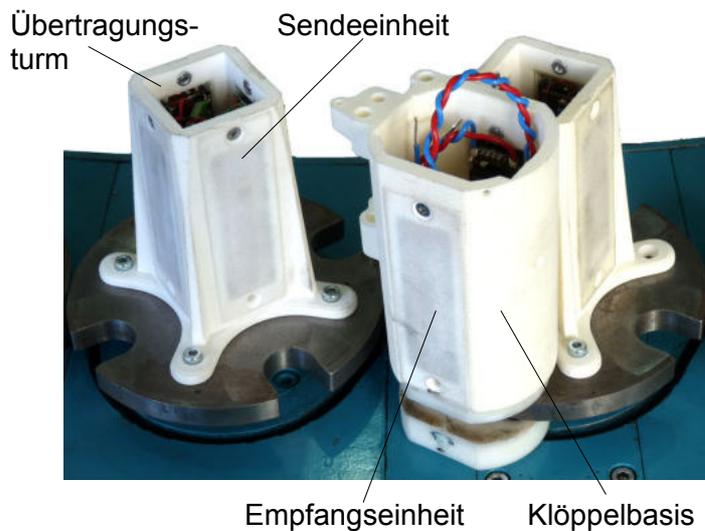


Abbildung 5.9: Energieübertragung von den Flügelrädern zur Klöppelbasis. Jeder Übertragungsturm hat vier Sendeeinheiten. In der Klöppelbasis sind zwei Empfangseinheiten

entspricht. Insbesondere zwei Aspekte werden deutlich. Zum einen sind Spannungsspitzen bis 40 V sichtbar. Weitere Messungen haben gezeigt, dass es tatsächlich zu Spannungen deutlich über 60 V kommt. Diese Spannungen sind für viele elektronische Komponenten kritisch und können diese zerstören.

Der zweite wichtige Punkt ist der Abfall der Spannung auf 0 V am Anfang und am Ende, also bei der Übergabe des Klöppels zwischen den Flügelrädern. Für einen Rotationswinkel von etwa 30° findet keine Energieübertragung statt. In einer Flechtmaschine befindet sich der Klöppel für einen Rotationswinkel von 180° auf einem Flügelrad. Das heißt, nur während zwei Dritteln der Zeit, die ein Klöppel auf ein Flügelrad verbringt, wird Energie übertragen, für die Zeit während der Übergabe muss die Energie zwischengespeichert werden.

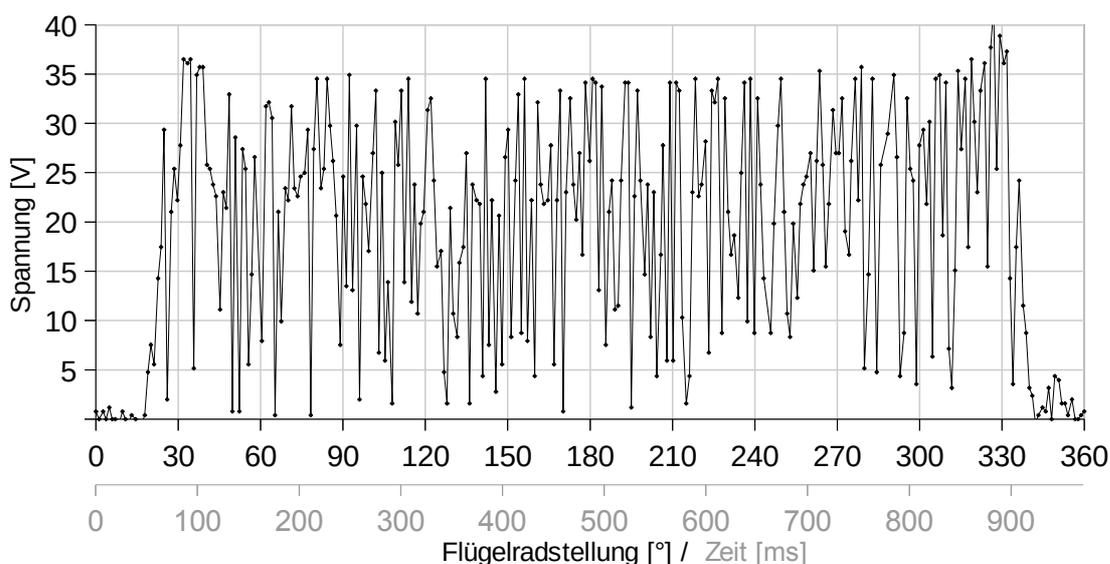


Abbildung 5.10: Zum Klöppel übertragene Spannung mittels berührungsloser Energieübertragung vor der Gleichrichtung

Nach der Glättung und Transformation der Spannung stellen sich die in Abb. 5.11 dargestellten Kurven ein. Die Kurve ohne Speicherung mittels Kondensatoren zeigt zwei Spannungsspitzen bei einer Winkelstellung von etwa 30° und 330° . Hier nähern sich Energiesender und -empfänger gerade an. Die Spannungsspitze bedeutet, dass bei diesem Abstand mehr Energie übertragen wird als während der eigentlichen Kontaktzeit. Das zeigt, dass Sender und Empfänger nicht richtig auf den auftretenden Abstand abgestimmt sind. Bei einer passenden Einstellung könnte deutlich mehr Energie übertragen werden.

Nach der Transformation auf 5 V und einer Speicherung mittels Kondensatoren bricht die Spannung nicht vollständig zusammen, auch wenn keine Energie übertragen wird. Mit dem untersuchten System wird in diesem Bereich jedoch nicht die geforderte Spannung erreicht. Auch die Leistung sinkt unter den maximal möglichen Wert.

Die Überarbeitung des Systems hat es möglich gemacht, die Leistung deutlich zu steigern, dieses System wurde allerdings nicht umfangreich analysiert.

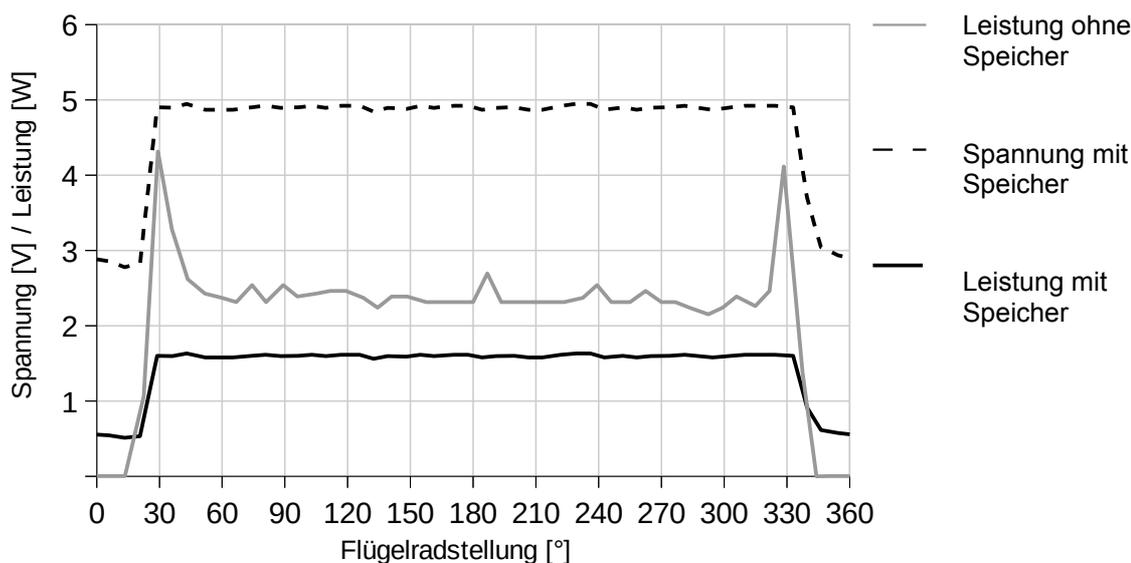


Abbildung 5.11: Spannung und Leistung nach Transformation und teilweise mit Kondensator als Speicher

5.4. Sensorik und Steuerung

Die Sensorik des Klöppels muss vor allem die Zugkraft des Fadens messen. Darüber hinaus werden automatisch weitere Informationen gesammelt. Eine leere Spule oder ein gerissener Faden werden detektiert, wenn die Fadenzugkraft auf null sinkt und auch durch ein Aufspulen nicht erhöht werden kann. Ein Faserring auf der Spule, welcher das Abwickeln verhindert, kann erkannt werden, wenn die Fadenzugkraft über den Sollwert steigt und durch ein Abspulen nicht reduziert werden kann.

Neben der Faserzugkraft muss auch noch die Abzugsposition auf der Spule bestimmt werden. Anhand dieser Information kann der Fadenumlenker so positioniert werden, dass der Faden immer senkrecht von der Spule abgezogen wird. Dies dient der geringeren Faserschädigung und ist, wie noch auszuführen ist, wichtig für die Bestimmung der Fadenzugkraft.

Eine weitere Messgröße, der Füllgrad der Spule, ist für eine Serienproduktion interessant, wird hier aber vorerst nicht berücksichtigt. Mit der Information des Materials und der Umspuleinstellung kann die Restmenge des Fadens bestimmt werden.

Mit den Daten der Sensorik muss die Regelung der beiden Motoren gesteuert werden. Da beide Motoren unabhängig voneinander arbeiten, können auch ihre Steuerungen unabhängig arbeiten. Die Regelung des Fadenumlenkers ist dabei ein in sich geschlossenes System. Der Regelung der Fadenzugkraft muss dagegen ein Sollwert gegeben werden. Da die Möglichkeit bestehen soll, den Sollwert im laufenden Prozess zu ändern, muss der Verlauf entweder im Klöppel gespeichert werden oder zum Klöppel übertragen werden. Aufgrund der bereits erwähnten Qualitätssicherung bietet die Übertragung deutliche Vorteile. Die Übertragung kann entweder mit der Energieübertragung gekoppelt werden oder separat mittels Funktechnik erfolgen. Beide Systeme sind heute Stand der Technik und weisen Vor- und Nachteile auf. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Funktechnik verwendet, da diese unabhängig von der Energieübertragung ist und so auch eine Änderung der Energieversorgung ermöglicht.

5.4.1. Datentransfer

Es gibt eine Vielzahl von Funksystemen. Die aktuell bekanntesten dürften Bluetooth und WLAN sein, da diese im täglichen Gebrauch sind. Daneben gibt es einige weitere standardisierte Verfahren und eine Vielzahl von speziellen Lösungen. Einen guten Überblick gibt das Buch „Eingebettete Funksysteme“ von Gessler und Krause [77], in welchem verschiedene Systeme auf ihre Eignung für unterschiedliche Aufgaben beleuchtet werden.

Gemäß Gessler und Krause erfüllt der Standard ZigBee am besten die Anforderungen an den Klöppel. Es hat eine ausreichende Reichweite, kann genug Teilnehmer verwalten und ist so angelegt, dass die einzelnen Modulkosten gering sind. Für den Klöppel wird deshalb der ZigBee-Standard für den Datentransfer verwendet.

Zum Einsatz kommt das ZEBRA Modul der Firma senTec¹. Dieses beinhaltet neben der Funkeinrichtung einen Mikroprozessor, welcher die Regelung des Klöppels übernehmen kann.

¹ senTec Elektronik GmbH; Illmenau

5.4.2. Sensoren

Wie bereits beschrieben, muss zum einen die Abzugsrichtung des Fadens ermittelt werden. Dies geschieht direkt im Umlenker zwischen Spule und der eigentlichen Fadenumlenkung (s. Abb. 5.7). Der Faden muss in einem bestimmten Winkel auf den Fadenumlenker zulaufen. Dieser Winkel kann über Messung der Fadenposition vor dem eigentlichen Umlenker ermittelt werden. Die Messung erfolgt vorzugsweise berührungslos. Alle betrachteten berührungslosen Systeme werden allerdings durch Faserstaub, welcher sich ansammeln kann, stark gestört, sodass eine Messung nicht mehr zuverlässig möglich ist. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit auf ein mechanisches System zurückgegriffen. Zwei Kontaktschalter ermitteln eine Abweichung des Fadenverlaufs von mehr als $\pm 3^\circ$. Sobald ein Kontaktschalter anspringt, kann der Umlenker nachgestellt werden. Eine lernfähige Steuerung kann so innerhalb weniger Spulenumdrehungen die Fadenverlegung ermitteln und bei einer Messung der Rotation der Spule die Bewegung des Umlenkers mit der Rotation synchronisieren.

Daneben muss die Fadenzugkraft bestimmt werden. Zur Messung der Fadenzugkraft ist der Fadenverlauf sehr wichtig, da nur auf diese Weise die Kraft exakt bestimmt werden kann. Deshalb arbeiten die meisten Sensoren mit drei Rollen, um die der Faden umgelenkt wird und durch die der Fadenweg genau vorgegeben ist. Im Klöppel können solche Systeme aus Platzgründen nicht eingesetzt werden. Beim Umlenker ist der Fadenverlauf bekannt und damit so definiert, dass an dieser Stelle die Fadenzugkraft ermittelt werden kann.

Dies kann bspw. mittels der Bestimmung der Verformung eines elastischen Elements erfolgen. In dem hier vorgestellten Klöppel wird ein anderes Konzept eingesetzt. Der Umlenker ist mittels einer Feder beweglich gelagert. Die Verformung der Feder wird über ein Linearpotentiometer bestimmt. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die im Servo integrierte Motorsteuerung verwendet werden kann. Das in den Servomotoren integrierte Potentiometer muss dazu lediglich ausgebaut und stattdessen das Linearpotentiometer angeschlossen werden.

Durch die Verwendung der Feder im System wird außerdem eine weiche Stelle eingebaut. Das heißt, es gibt ein Element, das kurzzeitige Zugkraftspitzen abfedern kann, ohne dass es zu einer Beschädigung des Klöppels oder des Fadens kommt.

5.4.3. Steuerung

Die Steuerung des Klöppels erfolgt durch einen im Funkmodul integrierten Mikroprozessor. Dazu erhält der Klöppel einen bestimmten Wert für die Zugkraft. Der Mikroprozessor erstellt daraus ein pwm-Signal (Pulsweitenmodulation), welches dem Servomotor eine Sollstellung des Potentiometers vorgibt. Der Servomotor erzeugt im Faden dann die Kraft, welche die Feder soweit zusammendrückt, dass das

Potentiometer den geforderten Widerstand aufweist. Dieses Gleichgewicht zwischen Fadenzugkraft und Motorstellung funktioniert sowohl für einen stehenden Motor als auch für einen gleichmäßigen Abzug, also eine gleichmäßige Rotation des Motors. Bei einer Änderung der Abzugsgeschwindigkeit ändert sich auch die Federstellung und damit die Einstellung des Potentiometers. Der Servomotor gleicht diese Abweichung durch eine angepasste Rotationsgeschwindigkeit wieder aus.

Die Steuerung versucht, solange die vorgegebene Fadenzugkraft einzustellen, bis ein neuer Wert vorgegeben wird. Wenn der Sollwert nicht erreicht wird, sendet die Steuerung eine Fehlermeldung an den zentralen Rechner, der die gesamte Anlage stoppen kann.

Neben der Steuerung des Motors für die Spule wird auch der Motor für die Bewegung der Fadenumlenkung geregelt. Die Regelung für sich ist sehr simpel. Sobald der Faden einen Sensor erreicht, muss der Motor eingeschaltet werden und die Fadenumlenkung in die entsprechende Richtung bewegen. Dabei ist auf einen langsamen Anlauf zu achten. Bei einer plötzlichen Bewegung der Fadenumlenkung ändert sich auch die Fadenzugkraft im Faden. Um diese Schwankungen zu vermeiden, ist ein langsamer Anlauf notwendig.

5.5. Erzeugte Fadenzugkraft des elektronisch gesteuerten Klöppels

5.5.1. Testaufbau zur Messung der Fadenzugkraft

Für alle Tests wurde ein Messstand verwendet, indem der Klöppel fixiert und von einer stehenden Position (Klöppelfuß unten bei vertikal ausgerichteter Längsachse) bis zu einer hängenden Position (Klöppelfuß oben bei vertikal ausgerichteter Längsachse) ausgerichtet werden kann. Der Faden wird – sofern notwendig – über eine kugelgelagerte Rolle in die Horizontale umgelenkt und durchläuft ein Fadenzugkraft-Messgerät. Bei den Versuchen wurden die Messaufnehmer TSB1-1000 und TSB1-5000 von Schmidt controlinstruments verwendet. Der Abzug des Fadens erfolgte über einen Raupenabzug mit frei programmierbarer Abzugsgeschwindigkeit.

5.5.2. Gemessene Zugkräfte beim mechanischen und dem elektronisch gesteuerten Klöppel

Als Vergleichswerte wurden die mechanischen Klöppel IFDA 100 der Firma Herzog ebenfalls getestet. Da die Spule leichtes Spiel auf der Achse hat und Erfahrun-

gen beim Flechten vermuten lassen, dass der Klöppel sich je nach Ausrichtung (stehend oder hängend) unterschiedlich verhält, wurden alle Versuche sowohl stehend als auch hängend durchgeführt. Daneben ist nicht bekannt, ob die Abzugsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die erzeugte Fadenkraft hat.

In Abb. 5.12 sind die Messergebnisse für unterschiedliche Abzugsgeschwindigkeit bei dem Klöppel mit einer 350 g Feder dargestellt. Die Abzugsgeschwindigkeit hat demnach keinen Einfluss auf die erzeugte Zugkraft im Faden. Lediglich bei der geringsten Abzugsgeschwindigkeit (10 mm/s) ist der Mittelwert etwas geringer. Weitere Messungen haben ebenfalls keinen Einfluss der Geschwindigkeit gezeigt, auch nicht bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/s. Deshalb werden bei weiteren Messungen nur noch die Ergebnisse einer Geschwindigkeit verglichen.

Daneben sind in Abb. 5.12 große Schwankungen im Kraftbereich bei allen Messungen sichtbar. Die Schwankungen der Kraft sind auf den Auslösemechanismus des Klöppels zurückzuführen und in Abb. 5.13 deutlicher zu erkennen. In dieser Abbildung sind Kurven gezeigt, bei denen der Faden bei Abzugsbeginn kraftfrei ist. Es ist gut zu erkennen, wie innerhalb 10 mm eine Fadenzugkraft erreicht wird, die in etwa für die nächsten 80 mm erhalten bleibt. Dann ist die Fadenreserve des Klöppels aufgebraucht und der Sperrpin wird zurückgezogen. Dadurch erhöht sich die Kraft kurzzeitig weiter, bevor die Kraft schlagartig nachlässt, sobald die Spule nicht mehr blockiert ist. Wenn die Spule durch den Pin wieder blockiert wird, erhöht sich die Kraft im Faden wieder. Dadurch kommt es zu deutlichen Schwankungen in der Zugkraft. Bei 350 g Federn schwankt die Kraft um 1 N, bei dem Einsatz von 900 g Federn sogar um 3 N bis 4 N. Hinzu kommt, dass sich die Zugkraft bei einem stehenden und hängenden Klöppel unterscheidet, wie aus Abb. 5.14 deutlich wird.

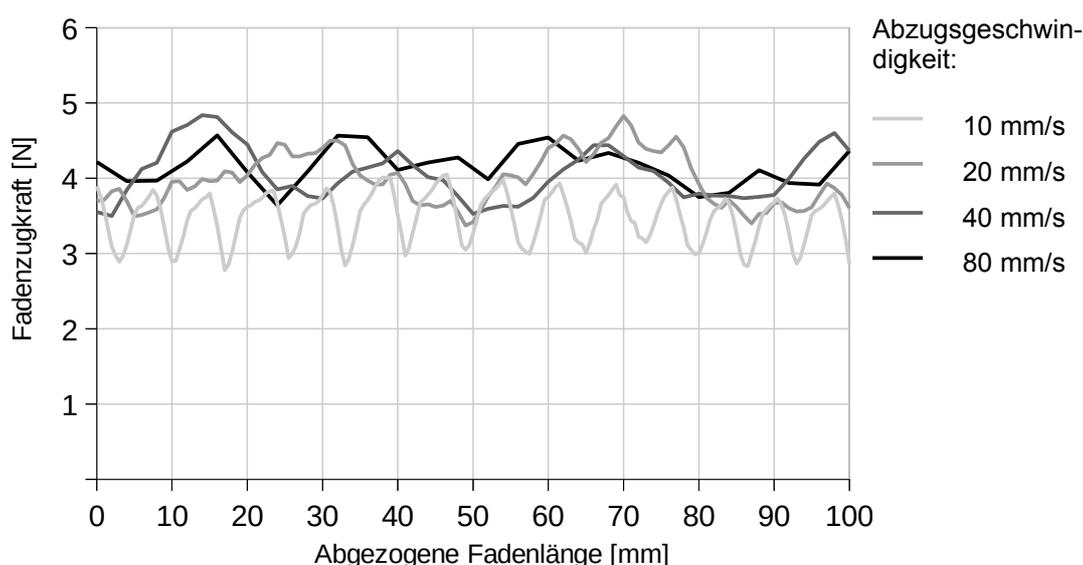


Abbildung 5.12: Fadenzugkraft bei dem mechanischen Klöppel IFDA 100 mit einer 350 g Feder bei unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten

Wenn beide Effekte zusammengenommen werden, schwankt bei dem mechanischen Klöppel die Zugkraft im Faden um 4 N.

Auch beim elektronisch gesteuerten Klöppel kommt es zu Schwankungen der Fadenzugkraft, welche durch das Anfahren der Fadenumlenkung verursacht werden. Die Schwankungen sind jedoch – wie Abb. 5.14 zeigt – mit 0,5 N deutlich geringer als beim mechanischen Klöppel.

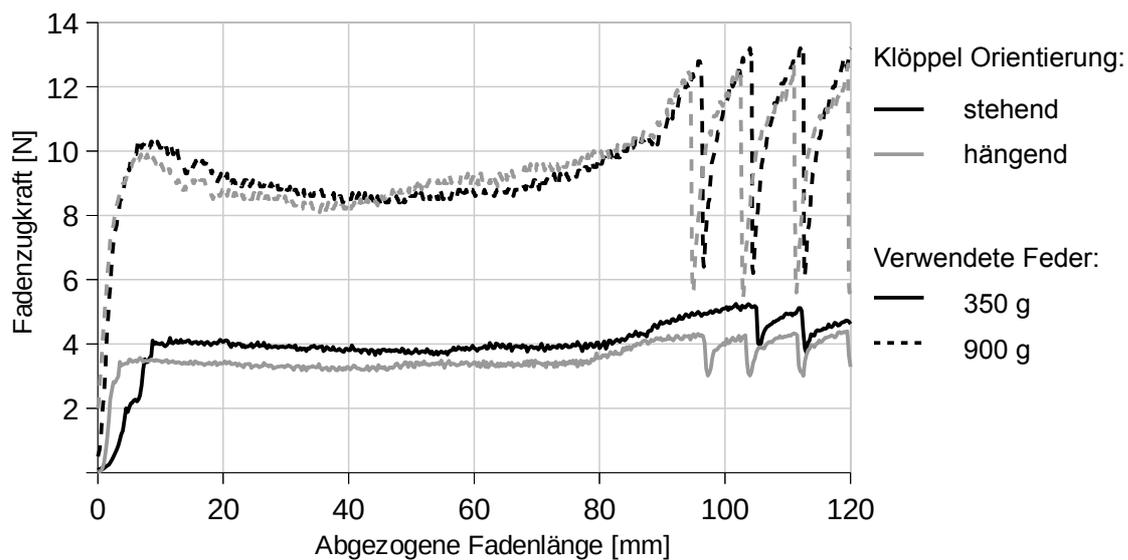


Abbildung 5.13: Aufbau der Zugkraft im Faden sowie die ersten Auslösezyklen bei vollständiger Fadenreserve

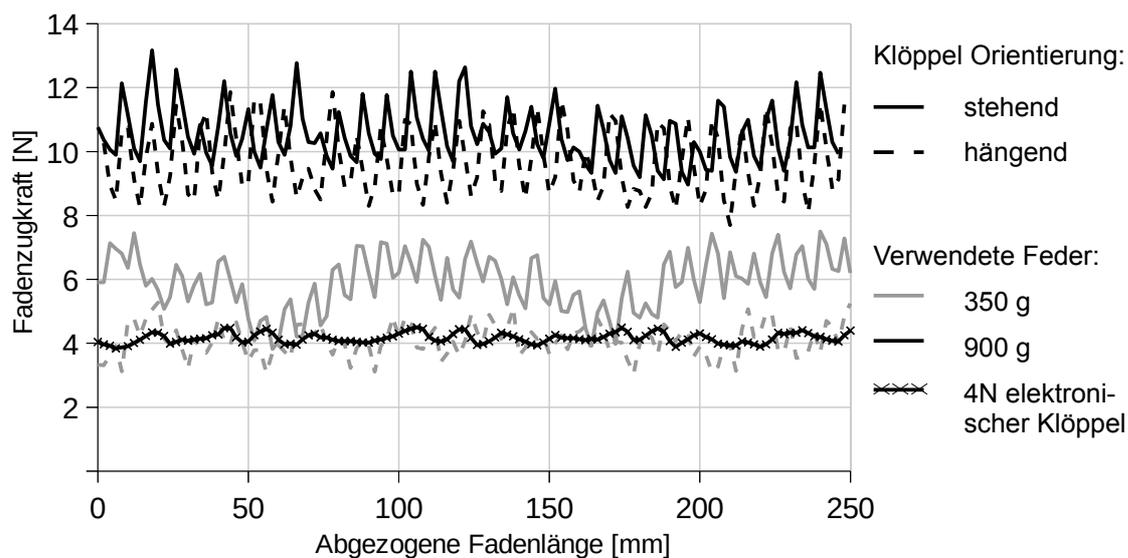


Abbildung 5.14: Fadenzugkraft erzeugt durch einen mechanischen Klöppel mit 350 g und 900 g Federn, sowie dem elektronisch gesteuerten Klöppel

5.6. Integration in das Gesamtsystem

Die Flechtmaschine ist für die Produktion von FVB meist in ein übergeordnetes Steuerungskonzept eingebunden (s. Abs. 3.3.6). Bei Maschinen mit einem rein mechanischen Klöppel ist es ausreichend, der Maschine eine bestimmte Flügelraddrehzahl vorzugeben. Für einen elektronisch gesteuerten Klöppel ist dies nicht mehr ausreichend. Es müssen auch die jeweiligen Fadenspannungen übertragen werden. Dies kann im einfachsten Fall global für sämtliche Klöppel gleich und über den gesamten Prozess einheitlich erfolgen oder im komplexesten Fall bis hin zu einer zeitlich variablen Steuerung eines jeden einzelnen Klöppels.

Das volle Potenzial der elektronisch gesteuerten Klöppel wird nur ausgenutzt, wenn diese mindestens über den Flechtprozess hin variabel gesteuert werden, am besten auch individuell. Dies erfordert eine deutlich umfangreichere Steuerung. An jedem Zeitpunkt muss die Position des umflochtenen Kerns sowie eines jeden Klöppels bekannt sein oder eine Verknüpfung der Steuerbefehle erfolgen.

Mit der Komplexität der Steuerung steigt auch die Komplexität der Programmierung. Eine rein manuelle Programmierung ist praktisch nur noch für ganz einfache Fälle möglich. Im Allgemeinen wird eine computergestützte Unterstützung notwendig sein. Diese muss zwei Bereiche umfassen:

- Die Vorhersage der Auswirkung bestimmter Maschinenparameter auf das fertige Produkt.
- Das Erstellen der Datensätze für jeden einzelnen Klöppel sowie die Verknüpfung mit der Robotersteuerung.

Der erste Punkt macht eine Simulation des Prozesses notwendig, bei welcher die Flechtfäden mit entsprechenden Zugkräften und die Interaktion untereinander berücksichtigt wird. Wie im folgenden Kapitel gezeigt wird, ist eine derartige Simulation noch nicht Stand der Technik und bedingt insbesondere bei einer größeren Anzahl an Fäden eine hohe bis sehr hohe Rechenleistung. Eine Optimierung des Flechtprozesses und aller Parameter für ein komplexeres Produkt bei einer variablen Fadenzugkraft wird wirtschaftlich nur mittels einer Simulation möglich sein. Eine Analyse der aktuellen Simulationsmöglichkeiten erfolgt in Kapitel 6.

Das Erzeugen der Steuerdatensätze für die Klöppel erfolgt im einfachsten Fall direkt aus der Simulation. Hierfür sind sowohl bei der Simulationsumgebung als auch bei der Klöppelsteuerung offene Datenformate notwendig, zumindest entsprechende Import- und Exportfunktionen.

Zusätzlich ist eine grafische Oberfläche sinnvoll, in der zum einen die Kraftverläufe der einzelnen Klöppel entlang der Zeit bzw. der Kernbewegung dargestellt werden, zum anderen auch eine direkte Einstellmöglichkeit gegeben ist. So können einzelne oder auch alle Kraftverläufe manuell angepasst werden.

Während ein elektronisch gesteuerter Klöppel bei der Programmierung und im Betrieb einen höheren Regelungs- und Rechenaufwand erfordert, ermöglicht er dem Benutzer ebenfalls einen höheren Komfort bei der Nutzung, neben den bereits genannten technischen Vorteilen. Über eine grafische Oberfläche kann dem Maschinenbediener jederzeit angezeigt werden, in welchem Zustand sich ein Klöppel befindet. Insbesondere ein untypisches Verhalten kann so aufgezeigt werden. Bei einem Fehler an einem Klöppel (z. B. ein Faserring) kann der Klöppel benannt und dessen Position grafisch dargestellt werden. Dies hebt nicht nur den Bedienkomfort, sondern vermindert vor allem auch die Stillstandszeiten der Maschine und erhöht so die Produktivität.

5.7. Mögliche Weiterentwicklung des elektronisch gesteuerten Klöppels

Aus den Erfahrungen mit dem gebauten und getesteten Klöppel lassen sich Empfehlungen für eine Weiterentwicklung ableiten. Einige Punkte und Ideen werden im Folgenden dargestellt:

- Die berührungslose Energieübertragung stellt eine funktionierende Möglichkeit dar und ist deshalb nicht prinzipiell zu ändern. Die Kosten für ein solches System sind allerdings relativ hoch. Daneben hat sich die Leistungsfähigkeit von Akkumulatoren in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt, während ihre Preise gesunken sind. Bei dem zuvor dargestellten Energiebedarf und einer Fadenlänge von 200 m haben Akkumulatoren, wie sie bspw. in Mobilfunkgeräten verbaut werden, eine ausreichende Leistungsdichte, um einen Klöppel für das Abspulen der Spule mit Energie zu versorgen. Das heißt, Akkumulator und Spule können gleichzeitig gewechselt werden.
Ob ein Akkumulator oder die berührungslose Energieversorgung eingesetzt werden, hängt vom Gesamtkonzept der Anlage ab. Akkumulatoren sollten aber nicht ausgeschlossen werden, da die Kosten für die gesamte Anlage durch die Verwendung von Akkumulatoren vermutlich deutlich geringer sind.
- Die Messung der Fadenzugkraft erfolgt im entwickelten Klöppel mittels eines Linearpotentiometers. Hintergrund ist die einfache Integration in das gesamte Konzept. Üblicherweise erfolgen Kraftmessungen mit Dehnmessstreifen (DMS) an Körpern deren Spannungs-Dehnungs-Verlauf bekannt ist. Im Vergleich zu dem hier eingesetzten System ist dabei die Genauigkeit deutlich höher. Die erforderliche Messelektronik ist allerdings im Allgemeinen deutlich zu groß um in einen Klöppel integriert zu werden. Es ist deshalb zu prüfen, ob eine ausreichend kleine Elektronik möglich ist. In diesem Fall ist der Einsatz von DMS in Verbindung mit dem folgenden Punkt sinnvoll.

-
- Das vorgestellte Konzept des Klöppels beinhaltet praktisch keine Fadenreserve. Lediglich die eingebaute Feder bietet etwa 10 mm Fadenweg. Ein Ausfall der Steuerung bzw. plötzlicher sehr schneller Fadenabzug führen praktisch sofort zu einer Überlastung des Systems. Als Alternative wäre der Einsatz einer Spiralfeder oder einer auf Torsion belasteten Schraubenfeder möglich. Die Feder würde im Betrieb gespannt werden und eine deutlich größere Fadenreserve darstellen. Ein ähnliches Konzept wurde am IFB in einem mechanischen Klöppel getestet und hat sich bewährt. Die so entstehende Fadenreserve ist vor allem wichtig, wenn die im vorherigen Punkt genannte Kraftmessung mittels eines DMS erfolgt, da hier sonst keine Weichheit mehr im System ist.
Daneben könnte die Spulenchse mit einer Rutschkupplung ausgestattet werden, sodass diese bei einer Überlast der Kupplung eine Beschädigung des Klöppels verhindern würde.
 - Eine Funktionserweiterung würde die Messung der Spulenfüllung darstellen. Mit den Zusatzinformationen über das aufgespulte Material und der Fadenzugkraft beim Umspulen lässt sich die noch vorhandene Restmenge des Fadens bestimmen. Dadurch kann nicht nur rechtzeitig die Maschine gestoppt werden, sondern auch jederzeit festgestellt werden, ob die Fadenmenge reicht, um einen Bauteil noch vollständig zu produzieren, bzw. ob eine Lage noch vollständig geflochten werden kann. Daneben stellt es die Möglichkeit einer weiteren QS-Maßnahme dar. Wenn vor und nach dem Flechten eines Bauteils für jede Spule die Spulenfüllung bestimmt wird, kann festgestellt werden, ob in dem Bauteil die gewünschte Menge an Fasern verarbeitet wurde.

6. Simulation des Flechtprozesses

Der Flechtprozess ist ein komplexes System, welches nicht einfach theoretisch vorbestimmt werden kann, sofern nicht bestimmte Randbedingungen bzw. Vereinfachungen gesetzt werden.

Die Möglichkeit einer im Flechtprozess veränderbaren Fadenzugkraft bringt eine weitere Variable in das System und erhöht damit die Komplexität. Das Potenzial eines elektronisch gesteuerten Klöppels kann lediglich mit einer entsprechenden Prozesssimulation vollständig genutzt werden. Diese Simulation sollte die Möglichkeit von Optimierungsprozessen aufweisen, um eine optimale Lösung zu finden. Außerdem würde eine funktionierende Prozesssimulation die Auslegung der Bauteile deutlich vereinfachen und auch verbessern, da die genauen Faserverläufe bekannt wären. Solange dies nicht vorhanden ist, ist man auf eine Vielzahl an Versuchen angewiesen, sowohl für den Herstellungsprozess, als auch für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften.

Eine Flechtprozess-Simulation sollte alle Parameter berücksichtigen, die das entstehende Produkt beeinflussen und zudem für komplexe Kerngeometrien sowie Prozessabläufe realitätsnahe Ergebnisse liefern. Dabei sollten keine Korrelationsfaktoren notwendig sein, welche erst nach einem Versuch bestimmt werden. Die zuvor bereits eingeführten Zusammenhänge zwischen Faserablage, Maschinenparametern und Kerngeometrie sind hier bei weitem nicht ausreichend, da diese nur für bestimmte Geometrien gelten und lokale Effekte vernachlässigen. Es liegen Untersuchungen und Ansätze vor, die weit über diese sehr einfachen Ansätze hinausgehen und das Potenzial zeigen, den geforderten Ansprüchen gerecht zu werden.

Insgesamt gibt es nur wenige Arbeiten, die sich mit der Prozesssimulation des Flechtens beschäftigen. Zumeist wird die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Geflechtes untersucht. Hierzu gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen. Hervorzuheben sind die Dissertationen von Little [49] sowie Birkelfeld [60].

Fast allen Arbeiten zu diesem Thema liegt eine Einheitszelle mit einer definierten Geflechtstruktur zugrunde. Diese ist partiell mit Parametern versehen, lässt sich also an verschiedene Geflechte anpassen. Es wird allerdings nicht untersucht, welches Geflecht überhaupt erreicht wird, bzw. welchen Aufbau und welche Struktur das Geflecht in der Preform bzw. dem Bauteil an welcher Stelle hat. In der Arbeit von Birkelfeld werden Prozessgrenzen definiert. Anhand dieser kann für ein Bauteil das optimale und auch erreichbare Geflecht gefunden werden.

Für die strukturmechanische Auslegung von Bauteilen wird somit zumeist eine bestimmte Faserarchitektur angenommen. Eine vorgeschaltete Prozesssimulation, die untersucht, welche Faserarchitektur tatsächlich erzeugt wird, würde die Struktursimulation deutlich verbessern.

6.1. Veröffentlichte Ansätze zur Prozesssimulation

Bevor die Ergebnisse der bisherigen Forschung dargestellt werden, muss noch kurz auf verschiedene Simulationsansätze eingegangen werden, da diese für eine Eingruppierung der bisherigen Ansätze notwendig sind.

Die numerische Behandlung von Vorgängen ist im Allgemeinen deshalb notwendig, da es bei der mathematischen Beschreibung der Vorgänge zu Differenzialgleichungen kommt, die häufig nicht exakt, also analytisch lösbar sind. Zur Lösung dieser Gleichungen gibt es verschiedene Ansätze, die z. B. von Munz und Westermann [78] beschrieben werden. Zwei Ansätze sollen hier kurz genannt werden. Zum einen die Differenzenverfahren, bei denen die Differenzenquotienten angenähert werden, das System als solches aber als Ganzes beschrieben wird.

Ein prinzipiell anderer Ansatz ist die Finite-Element-Methode (FEM), die häufig relativ rechenintensiv ist. Bei dieser wird der Vorgang in derartig kleine Einheiten aufgeteilt, dass diese einfach zu lösen sind. Im Folgenden wird sich zeigen, dass beide Ansätze für die Simulation des Flechtprozesses Anwendung finden.

Da die Flechttechnik eine sehr alte Technik ist, gibt es dementsprechend auch schon seit langem Ansätze, um Geflechte vor dem eigentlichen Produktionsprozess theoretisch zu untersuchen und auszulegen. Sehr frühe Untersuchungen dazu, welche sich auf die Umflechttechnik beziehen, also nicht die Herstellung von Seilen oder Litzen, sind die Veröffentlichungen von Brunnschweiler [79, 80]. Bei diesen sehr frühen Untersuchungen spielte die Computertechnik, wenn überhaupt, keine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund sind die meisten Formeln analytischer Natur und die Lösung der Fragestellungen erfolgt mit Tabellen und Diagrammen. Es kann also nicht von einer Simulation gesprochen werden, weder lassen sich komplexe Formen berechnen, noch werden alle möglichen Parameter berücksichtigt. Trotzdem stellen die schon dort aufgeführten grundlegenden Formeln die Basis für einige in letzter Zeit entwickelten Simulationstools.

Erst ab Ende der 1980er Jahre gab es größere Weiterentwicklungen im Bereich der Berechnung und Simulation vom Flechtprozess. Mit die ersten Arbeiten, welche hier zu nennen sind, sind die Veröffentlichungen von Rosenbaum et al., insbesondere die Dissertationen von Rosenbaum [27]. Auch hier wird zwar keine Simulationssoftware im eigentlichen Sinne entwickelt und vorgestellt, aber es werden viele wichtige mathematische Zusammenhänge aufgeführt und grundlegende Untersuchungen durchgeführt, auf die sich später bezogen wird. Rosenbaum betrachtet die Kerngeometrie sehr allgemein und stellt entsprechende Formeln dazu auf. Auch problematisiert er

schon das Gleiten der Fasern auf dem Kern. Er untersucht, welche Parameter diesen Effekt beeinflussen und ab wann er auftritt. Die Auslegung der Maschinensteuerung sollte dann so erfolgen, dass es zu keinen Gleiteffekten der Fasern kommt. In den meisten folgenden Arbeiten ist dagegen ein Gleiten der Fasern per Definition ausgeschlossen. Da es aber gerade bei komplexen Geometrien zu Gleiteffekten kommt, führt diese Randbedingung der Simulation automatisch dazu, dass die Simulation nur bedingt geeignet ist. Daneben wird im Allgemeinen auch die Reibung zwischen den Fäden vernachlässigt. Dies führt dazu, dass der Fadenverlauf zwischen Flechtring und Kern als Gerade angenommen werden kann – so in der Arbeit von Du und Popper [81]. Hier wird außerdem noch vorausgesetzt, dass die Kerne immer Kreisquerschnitte aufweisen und der Prozess achssymmetrisch ist, sodass nur ein Faden betrachtet werden muss. Es wird mit einem schrittweisen Differenzenverfahren gearbeitet, mit dem in Abhängigkeit von Kerngeometrie, Abzugsgeschwindigkeit, Umlaufgeschwindigkeit der Klöppel sowie einigen weiteren Parametern die Fadenablage bestimmt wird. Zudem wird berücksichtigt, ob sich das Geflecht sperrt, also ob der Faserwinkel überhaupt erreicht werden kann. Generell ist dieser Ansatz allerdings nicht ausreichend, da er zu viele Beschränkungen aufweist, wie zum Beispiel die Forderung nach runden Kernen.

Mit rechteckigen Kernen hat sich dagegen die Arbeit von Long [82] beschäftigt. Hier wird der Kern in seine einzelnen Seitenflächen aufgeteilt. Für jede Fläche wird der Fadenverlauf separat bestimmt. Runden Flächen, wie z. B. abgerundete Ecken, wird sich durch ein Vieleck angenähert. Der Fadenverlauf wird auf allen Flächen analytisch durch den Weg bestimmt, den der Kern zurück gelegt hat, bis der Faden die andere Seite der Fläche erreicht, und der Seitenbreite. Um die Zeit und damit den Weg des Kerns zu bestimmen, wird für die entsprechende Fläche der Winkelanteil eines ganzen Klöppel-Umflaufs bestimmt. Mittels der Köppelumlaufzeit und der Kerngeschwindigkeit kann so der Weg des Kerns bestimmt werden. Diese Methode ist recht simpel, liefert aber akzeptable Ergebnisse in erster Näherung. Eine genaue Bestimmung des Fadenverlaufs ist auf diese Weise aber nicht möglich, da zu viele Effekte vernachlässigt werden. Neben der Vernachlässigung vieler Flechtparameter beschränkt sich auch dieser Ansatz auf ganz spezielle Kerngeometrien und ist schon deshalb nicht als universelles Simulationstool geeignet.

Die Faserorientierung auf verschiedenen Kerngeometrien kann mit dem von Rawal [83] vorgestellten Verfahren bestimmt werden. Die Grundlage ist ein Ansatz gemäß Gleichung 3. Mit diesem können runde zylindrische Körper bestimmt werden. Für konische Körper wird der Ansatz angepasst. In beiden Fällen existiert eine analytische Lösung. Auch elliptische zylindrische Querschnitte werden berücksichtigt. Für diese wird eine Fourier-Reihe als Lösungsansatz verwendet, die dann ebenfalls zu einer angenäherten analytischen Lösung führt. Lediglich rechteckige Querschnitte werden durch eine segmentweise Berechnung bestimmt, bei welcher der Fadenver-

lauf auf jeder Seite als Gerade angenommen wird. Auch wenn eine Reihe von differentiellen Kerneometrien berücksichtigt sind, wird doch eine bestimmte Vorauswahl getroffen, sodass nicht von einem universellen Ansatz gesprochen werden kann. Fast alle weiteren Parameter des Flechtens bleiben unberücksichtigt, und der Fadenverlauf wird stark vereinfacht, insbesondere bei rechteckigen Querschnitten.

Die Arbeit von Nishimoto et al. [84] ist für runde und eckige zylindrische Querschnitte geeignet. Der mathematische Ansatz entspricht auch hier Gleichung 3. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Simulationen kann bei dem Ansatz von Nishimoto et al. eine Änderung der Abzugsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Es wird ein Übergangsbereich ermittelt, in dem sich der Winkel anpasst. Dies entspricht durchaus der Realität, da sich bei einer plötzlichen Änderung der Geschwindigkeit der Winkel nur langsam ändert. Der grundlegende Ansatz ist allerdings sehr einfach und vernachlässigt viele Parameter. Auch werden nur zylindrische Kerne berücksichtigt.

Ein Ansatz für universelle Kerneometrien wurde von Kessels und Akkerman [85] vorgestellt. Auch dieses ist ein Differenzenverfahren, das den Kern schrittweise abarbeitet. Dabei wird von einem bestimmten Punkt aus der folgende erst grob und dann immer genauer angenähert bis der Fehler einen bestimmten Wert unterschreitet. Der Kern muss dabei mathematisch beschrieben sein und es gelten wie bei den bereits genannten Verfahren die Bedingungen, dass der Faden auf dem Kern nicht mehr rutscht und der Faden gerade vom Anlegepunkt zum Flechtring verläuft. Zudem ist von Relevanz, dass der Fadenverlauf kontinuierlich und differenzierbar ist, sowie immer auf dem Kern verläuft. Das Verfahren stellt damit einen recht umfassenden Ansatz dar, der auch relativ gute Ergebnisse liefert. Das Verfahren gelangt an seine Grenzen, wenn der Kern sehr starke und plötzliche Umfangsänderungen aufweist. Generell berücksichtigt allerdings auch dieses Verfahren keine Reibung zwischen den Fasern sowie zwischen Faser und Kern. Daneben bleiben eine Reihe weiterer Parameter unberücksichtigt.

Akkermann und Villa Rodriguez arbeiten mit dem prinzipiell gleichen Ansatz, aber mit einem auf Dreiecksflächen diskreditierten Kern. Die präsentierten Ergebnisse auf einem komplexen Kern erscheinen gut. Bei den Versuchen hat sich allerdings gezeigt, dass es doch zu Verschiebungen der Fasern auf dem Kern kommt, die ansonsten zumeist unerwähnt bleiben und so zu Ungenauigkeiten in der Vorhersage des Fadenverlaufs. Überdies wurde festgestellt, dass die Berechnung umso besser ist, je kleiner der Abstand zwischen Flechtring und Kern ist. Dies ist sicher auf den schon beschriebenen Effekt zurückzuführen, dass die Faserablage generell besser ist bei kleinen Abständen zwischen Flechtring und Kern (s. Abschnitt 3.3.4). Grund sind die Reibung zwischen den Fasern und Effekte am Flechtring, welche bei der Simulation nicht berücksichtigt werden.

Einen anderen Schwerpunkt fokussiert die Arbeit von Polturi et al. [86]. In dieser Arbeit wurde mit VRML (Virtual Reality Modelling Language) [87] gearbeitet. Dies ist eine offene Sprache für die Beschreibung von dreidimensionalen Szenen, welche dann von einem entsprechenden Interpreter dargestellt werden können. Gezeigt worden ist ein Verfahren, das den Fadenverlauf relativ realistisch als dreidimensionale Struktur darstellt. Diese Möglichkeit wird heute als sehr wichtig erachtet, da man sich so auch von komplexen Konstruktionen ein Bild machen kann. Gerade bei Faserverläufen, die im Raum mehrfach gekrümmt sind, ist dies die einzige Möglichkeit, schnell eine erste Einschätzung abzugeben, ob das Ergebnis den Wünschen entspricht. Die mathematische Grundlage von Polturi et al. ist allerdings sehr elementar und entspricht Gleichung 3. Damit wird der Fadenverlauf stark vereinfacht dargestellt und bezieht sich nur auf runde Querschnitte.

Neben den vorgestellten Ansätzen für Umflechttechnik gibt es auch einige Untersuchungen für die 3D-Flechttechnik. Erste Untersuchungen sind davon motiviert, überhaupt ein Bild von dem Fadenverlauf darzustellen. Insbesondere bei den modernen 3D-Flechtmaschinen, bei denen der Klöppelweg frei programmierbar ist, ist nur über eine vorher laufende Simulation sicherzustellen, dass es zu keinen Kollisionen der Klöppel kommt. Daneben kann anhand der Simulation bestimmt werden, ob die bestimmten Klöppelwege auch das gewünschte Geflecht erzeugen. Bei diesen Simulationen kann der Ansatz gemäß Gleichung 3 nicht mehr verwendet werden. Auch die anderen zuvor beschriebenen Ansätze reichen nicht aus, da alle von einem gleichförmigen kreisrunden Verlauf des Klöppels ausgehen, der immer das eine Fadenende bildet. So kommt es zu prinzipiell anderen Ansätzen.

Eine Arbeit, die eine Verknüpfung zwischen den der Umflechttechnik und dem 3D-Flechten darstellt, ist in der Veröffentlichung von Bigaud et al. [35] zusammengefasst. Hier wird eine Simulation für einen Interlock-Flechter mit 5 Flechtebenen präsentiert. Das Ziel besteht nicht darin, den Prozess zu simulieren, vielmehr steht die Bestimmung von mechanischen Kennwerten im Vordergrund. Aufgrund des etwas komplexeren Fadenverlaufs muss dieser allerdings zuerst bestimmt werden. Die Berechnung erfolgt analytisch anhand des definierten Fadenwegs. Den Fasern wird dabei ein runder Querschnitt zugeordnet. In einem folgenden Schritt wird dieser Querschnitt umgeformt und das endgültige Geflecht erzeugt. Eine wirkliche Vorhersage des Geflechts ist mit dieser Methode nicht möglich. Bei der Umformung der Querschnitte muss die Wandstärke des Bauteils bekannt sein, sobald diese erreicht ist, wird der Umformprozess beendet.

Einen anderen Ansatz verfolgen Kim et al. in ihrer Arbeit [88]. Auch hier wird der Fadenweg - vermutlich für eine Interlock-Flechtmaschine - analytisch bestimmt. Aus diesen Daten wird mittels ABAQUS [89] ein Modell für die mechanischen Kennwerte generiert und die Steifigkeit von Bauteilen vorherbestimmt.

Die Arbeit von Kostar und Chou [41] ist eine der ersten, die sich mit der Prozesssimulation von 3D-Geflechten beschäftigt. Notwendig macht die Simulation eine für die Zeit neue Multi-Schritt-Flechtmaschine. Die Simulation ist aus heutiger Sicht relativ einfach. Die Bewegungsschritte der Klöppel werden verfolgt und für jeden Schritt der Maschine wird die Klöppelposition in einer Matrix gespeichert. Diese Fixpunkte werden in äquidistanten Abständen übereinander aufgetragen und die Punkte eines Klöppels jeweils mit einer Geraden verbunden. So werden zum einen Kollisionen der Klöppel erkannt, zum anderen wird der prinzipielle Fadenverlauf bestimmt.

Ein ganz ähnlicher Ansatz wird von Tolosana et al. verfolgt [90]. In der Veröffentlichung wird nicht präzise beschrieben, wie die einzelnen Stützpunkte bestimmt werden, aber es ist davon auszugehen, dass dies analog der Arbeit von Kostar und Chou erfolgt. Die Stützpunkte werden hier allerdings nicht mit geraden Linien verbunden, sondern mit NURBSs (Non-Uniform Rational B-Spline). Dadurch und durch die Verwendung eines definierten Querschnitts kann das Geflecht anschaulich dargestellt werden. Da der Faden allerdings bei der Bestimmung der Stützpunkte nicht berücksichtigt, sondern erst nachträglich erzeugt wird, kommt es zur Durchdringungen der Fäden untereinander. Schon dies zeigt, dass die Simulation die Realität nur bedingt wiedergibt.

Ein prinzipiell anderer Ansatz zur Simulation wurde an der RWTH Aachen verfolgt. Hier wurden mittels FEM die Fäden nachgebildet und jeweils ein Fadenende entsprechend der Klöppelbewegung bewegt, die jeweils anderen Fadenenden zueinander fixiert und entlang des Abzugs bewegt. Es erfolgte also eine FE-Simulation des Gesamtprozesses. Hierzu sind einige Veröffentlichungen erfolgt, deren Ergebnisse sämtlich in der Dissertation von Schneider [40] aggregiert worden sind. Die FEM-Simulation setzt den Einsatz von verschiedenen Modulen voraus. Neben einem Löser ist auch ein Preprozessor zur Modellerstellung wichtig. Für die Simulation des Flechtprozesses gilt dies vor allem bzgl. der Wege der Klöppel. Hierfür wird ein Preprozessor verwendet, der die einzelnen Wege erzeugt. In Aachen wurden sämtliche entsprechenden Module für die 3D-Flechtmaschinen entwickelt. Für die eigentliche FEM-Simulation wurde ein PAM-Solver [91] verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Crash-Simulationssoftware.

In der Arbeit von Schneider wurden die Fäden selber entweder aus Stab- oder aus Schalenelementen aufgebaut. Außerdem werden alle Parameter des Flechtprozesses, sofern möglich, berücksichtigt. Die Ergebnisse für die Simulationen mit den Schalenelementen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität, allerdings war der Rechenaufwand sehr hoch, sodass die Simulationen nur für sehr kurze Geflechte durchgeführt wurden. Bei der Verwendung von Stabelementen sank der Rechenaufwand erheblich. Es konnten längere Geflechte erzeugt werden, allerdings

wurden die Fasern nicht ganz realistisch wiedergeben, sodass die erzeugten Geflechte leichte Abweichungen von den entsprechenden Proben aufwiesen.

Aus den zuvor vorgestellten Arbeiten geht hervor, dass bisher primär versucht wurde, mittels analytischer Verfahren oder Differenzenverfahren die Geflechtablage vorherzubestimmen. Im Allgemeinen bestand das Ziel nicht darin, den Prozess möglichst genau abzubilden, sondern eine möglichst gute Vorhersage der Faserorientierungen auf dem Kern zu erlangen. Alle Verfahren weisen Einschränkungen auf. Die meisten bereits bei der Freiheit der Kerngeometrien. Zum Teil sind nur sehr simple Geometrien abbildbar. Parameter, wie die Fadenspannung oder -reibung, werden nicht berücksichtigt. Deshalb wird bei diesen Ansätzen der Fadenverlauf vom Anlegepunkt zum Klöppel gar nicht berücksichtigt oder stark vereinfacht. Wenn überhaupt wird lediglich ein Faden betrachtet, sodass Reibeffekte zwischen den Fäden vernachlässigt werden. Der große Vorteil der analytischen Verfahren und der Quotientenverfahren ist ihre Geschwindigkeit. Sie können ausnahmslos auf normalen Rechnern durchgeführt werden und liefern innerhalb von Sekunden oder wenigen Minuten ein Ergebnis. Für Optimierungsprozesse, welche viele verschiedene Varianten durchrechnen müssen, ist dies ein relevanter Faktor. Dennoch sind alle vorgestellten analytischen Verfahren und Quotientenverfahren für eine Prozesssimulation ungeeignet, da viele Prozessparameter unberücksichtigt bleiben.

Die vorgestellte FE-Methode, die diesem Anspruch (am ehesten) gerecht wird, hat dagegen einen sehr hohen Rechenaufwand. Dies liegt zum einen in der Methode begründet, zum anderen daran, dass hier nicht nur ein Faden betrachtet wird, sondern alle. Dies führt schnell zu einer sehr hohen Anzahl an Elementen und damit zu einem hohen Rechenaufwand. Grund für den Einsatz der FE-Methode war die Simulation von 3D-Geflechten. Bei diesen kann der Fadenverlauf so komplex und frei einstellbar sein, dass eine analytische Beschreibung nicht mehr möglich ist. Deshalb wird hier tatsächlich der Prozessablauf simuliert, mit der Bewegung aller Fäden und auch der Interaktion der Fäden untereinander. Insofern eignet sich der FEM-Ansatz sehr gut, um den Prozess zu simulieren. „Die vielen, gleichzeitig zu beachtenden Randbedingungen und das nicht-lineare Materialverhalten schließen eine analytisch geschlossene Lösung aus. Generell bietet sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) für alle Aufgabenstellungen der Kontinuumsmechanik an, insbesondere bei hochgradig statisch unbestimmten Aufgabenstellungen in Kombination mit nichtlinearen Materialeigenschaften“ ([40], Seite 104). Es wurde gezeigt, dass mit diesem Ansatz der Flechtprozess und auch das entstehende Geflecht sehr gut simuliert werden kann.

Am Institut für Flugzeugbau und ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird deshalb der Ansatz der Flechtsimulation mit der FEM weiter verfolgt. Nur diese Methode bietet die Möglichkeit, den Prozessablauf wiederzugeben. Die Problematik der hohen Rechenzeiten besteht weiterhin. Aufgrund der stetig steigenden Rechen-

leistung ist allerdings davon auszugehen, dass auch FE-Simulationen in Zukunft in einer akzeptablen Zeit durchlaufen werden und so auch Optimierungen durchgeführt werden können.

6.2. Aufbau der durchgeführten Simulation

Die mathematischen Grundlagen der FE-Simulation im Allgemeinen und den mit den Softwaretools PAM-Solid bzw. PAM-Crash [91] im Speziellen sind bspw. in den Arbeiten von Schneider [40] oder Picket et al. [92] beschrieben und sollen hier nicht wiederholt werden. Wie bereits zuvor beschrieben, beziehen sich die Arbeiten, die an der RWTH Aachen durchgeführt wurden, auf 3D-Geflechte. Insofern konnten die dort entwickelten Preprozessoren nicht verwendet werden und mussten neu entwickelt werden. Die meisten FE-Softwaretools bieten Programme an, um die Modelle aufzubauen. Für Geflechte, die aus sehr vielen einzelnen Elementen bestehen (jeder Faden einzeln) und zugleich eine komplexe Bewegung durchführen, ist es effektiver, ein Programm zu schreiben, welches das Model erstellt (den Preprozessor). Bei dem Aufbau des Preprozessors sind einige Punkte zu beachten. Ziel sollte es sein, das Programm möglichst universell aufzubauen, sodass Modelle für unterschiedliche Konfigurationen und Maschinen erstellt werden können. Es ist allerdings zu beachten, dass insbesondere bei Geflechten und bei Flechtmaschinen nicht alle Konfigurationen, Klöppelanzahlen und Besetzungen zu einem Geflecht führen. Insofern sollte das Programm auf praktisch relevante Kombinationen beschränkt sein. Für die Simulation des Prozessablaufs sollte die freie Fadenlänge in etwa der in der Maschine entsprechen. Ansonsten können Schwingungseffekte auftreten, die es in der Realität nicht gibt und die das Geflecht beeinflussen. Neben der Fadenanzahl und -länge spielt auch der Weg der Klöppel eine wichtige Rolle. Dargestellt wird der Weg durch definierte Punkte, welche mit geraden Linien verbunden werden, entlang derer sich der Faden bewegt. Der Weg kann mehr oder weniger genau angenähert werden. Zwei Möglichkeiten sind in Abb. 6.1 dargestellt. Bei einer gröberen Auflösung des Wegs durch einen Zick-Zack-Weg kommt es zu Kollisionen der Klöppel, da sich die Klöppel der gegenläufigen Fadensysteme jeweils an einem Eckpunkt zur selben Zeit in Bewegung setzen und so an den Kreuzungspunkt treffen. Dies hat zwei Effekte zur Folge: Erstens werden Schwingungen in den Fäden erzeugt. Zweitens ist nicht eindeutig definiert, wie die beiden Fäden aneinander vorbeigleiten, also welcher Faden über dem anderen liegt. Beides könnte vermieden werden, wenn die beiden Zick-Zack-Linien zueinander verschoben werden. Allerdings wird an den Eckpunkten die Bewegungsrichtung der Fäden so ruckartig geändert, dass auch hier wieder Schwingungen in die Fäden eingeleitet werden. Der Weg entlang eines Sechsecks hat sich dagegen bewährt. Schneider empfiehlt in seiner Arbeit eine Winkelauflösung von 30° . Eine deutlich feinere Auflösung des Wegs erhöht den Rechenaufwand dagegen unnötig. Der Weg der Fäden sollte auch bei einer halben oder ei-

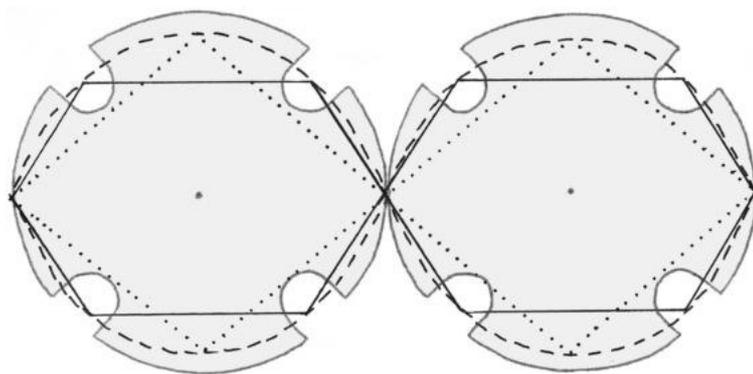


Abbildung 6.1: Weg des Klöppels in der Maschine und mögliche Annäherungen dieses Wegs in der Simulation

- Klöppelweg in der Simulation (Sechs-Eck-Weg)
- - - Klöppelweg in der Maschine
- · · · Vereinfachter Weg (Zick-Zack-Weg)

ner Viertel-Besetzung entlang der Flügelräder erfolgen. Wenn hier die nicht besetzten Flügelräder weggelassen werden, ergibt sich eine falsche Bindungsart.

Der Faden kann, wie beschrieben, entweder durch Balkenelemente oder durch Schalelemente dargestellt werden. Bei Balkenelementen muss jeweils der Anfang und das Ende des Balkens durch einen Knoten definiert werden. Die Knoten geben damit auch die Länge des Balkens an. Der Balken selber wird in der Simulation nicht verformt. Um die Flexibilität des Fadens wiederzugeben, muss der Faden deshalb aus vielen einzelnen Balkenelementen aufgelöst werden. Als sinnvoll hat sich dabei der in der Arbeit von Schneider gewählte Ansatz erwiesen, nahe des Flechtpunkts den Faden feiner aufzulösen und weiter außen, in Richtung Klöppel, die Balkenelemente länger zu lassen [40]. Dadurch wird zum einen in dem Bereich, in welchem die Fäden eng miteinander verflochten werden, eine ausreichend feine Auflösung erreicht, zum anderen die Anzahl der Elemente reduziert und damit der Rechenaufwand verringert.

Das Balkenelement für sich hat zunächst keinen Durchmesser. Dieser kann mittels einer Kontaktbedingung als Mindestabstand des Balkenelements zu anderen definiert werden, wobei es sich immer um einen Radius handelt. Das heißt, das Balkenelement weist einen runden Querschnitt auf.

In der Simulation wird der Klöppel durch ein Federelement vereinfacht dargestellt. Auch dieses Element ist, wie die Balkenelemente, durch zwei Knotenpunkte begrenzt. Das elastische Verhalten wird über Federkennlinien definiert. Um das Verhalten des Klöppels wiederzugeben, wird in Längsrichtung des Elements eine vom Weg praktisch unabhängige Kraft eingestellt. Auf diese Weise erzeugt das Federelement immer einen gleichbleibenden Zug im Faden und entspricht damit in etwa dem Klöppel. In der Simulation der 3D-Flechtmaschinen wurde die Spannung variiert. Dies hängt mit den starken Schwankungen in der Fadenzugkraft bei den verwendeten Klöppeln zusammen. Wie in Abschnitt 5.5 gezeigt, gibt es auch bei den Klöppeln für die Radialflechter Schwankungen in der Fadenzugkraft, diese sind aber nicht so stark, dass sie zwingend in der Simulation abgebildet werden müssen.

Das eine Ende des Federelements wird mit dem einen Ende des Fadens verbunden. Das andere Ende wird entlang des vorgegebenen Wegs in der Simulation bewegt. Überdies werden noch die translatorischen Eigenschaften des Federelements eingeschränkt, sodass es immer radial zu dem fiktiven Mittelpunkt der Flechtmaschine zeigt. Durch diese Maßnahmen kann das Federelement den Klöppel ausreichend simulieren.

Es bleibt festzuhalten, dass bei diesem Ansatz die Fadenlänge stark beschränkt ist. Je nach Voreinstellung ist nur ein Teil des Fadens durch kurze Balkenelemente aufgelöst. Lediglich dieser Bereich sollte eng mit den anderen Fäden verflochten werden. Sollte eine Simulation durchgeführt werden, in der ein deutlich längerer Faden benötigt wird, muss die Simulation regelmäßig unterbrochen werden und die langen Balkenelemente müssen durch kurze ersetzt werden. Daneben muss das Federelement wieder verkürzt und z. T. durch Balkenelemente ersetzt werden. Im gleichen Zuge kann ein Teil des bereits erzeugten Geflechts fixiert werden, sodass dieses bei der weiteren Simulation als Starrkörper betrachtet wird. Auf diese Weise wird der Rechenaufwand deutlich reduziert, da nicht in jedem Schritt für alle Knoten die Kräftegleichgewichte bestimmt werden müssen. Der Starrkörper darf allerdings nicht zu groß gewählt werden, damit noch Gleiteffekte nahe dem Flechtzentrum auf dem Kern möglich sind.

Die Knotenpunkte der Fäden, die an dem Ende liegen, welches nicht mit dem Federelement verbunden ist, werden nahe dem Flechtzentrum als Starrkörper miteinander verbunden. In der Simulation wird dieser Starrkörper entsprechend der Abzugsgeschwindigkeit bewegt.

Der Kern kann aus Schalenelementen aufgebaut und je nach Auflösung mehr oder weniger genau dargestellt werden. Gleiches gilt für den Flechtring. Die Balkenelemente durchdringen bei entsprechender Kontaktbedingung die Schalenelemente nicht und gleiten über diese hinweg oder bleiben auf diesen liegen. Auf diese Weise lassen sich alle notwendigen Elemente in der Simulation darstellen.

Ein wichtiger Effekt, der bei den analytischen- bzw. Differenzenverfahren nicht berücksichtigt wird, ist die Reibung. In der FE-Simulation lässt sich für jeden Elementtyp ein Reibkoeffizient einstellen. Dadurch können Reibeffekte berücksichtigt werden. Nicht alle Löser von PAM-Crash berücksichtigen allerdings die Reibung zwischen zwei Stabelementen. Erst mit den Softwareversionen 2012 konnte in dieser Arbeit auch diese Reibung berücksichtigt werden. Zwischen Faden und Kern bzw. Faden und Flechtring wird die Reibung in jedem Fall berücksichtigt.

Neben der Reibung kann auch die Gravitation berücksichtigt werden. Allen Elementen lässt sich eine Masse zuordnen. Diese Masse ist zum einen für Trägheitseffekte verantwortlich und kann zum anderen durch ein entsprechendes Schwerfeld für die Simulation der Gravitation benutzt werden. Dieses kann aktiviert oder deaktiviert werden. Speziell bei Flechtmaschinen mit großem Durchmesser und bei Fäden mit

einem hohen Titer kann die Gravitation einen Effekt bedingen und sollte deshalb berücksichtigt werden.

Die Flechtfäden können auch durch Schalenelemente dargestellt werden. Die Vorteile wurden schon von Schneider erläutert [40]. Hierzu wurde am Institut für Flugzeugbau eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt und z. B. in der Veröffentlichung von Böhler et al. [93] dargestellt. Es hat sich bestätigt, dass die Simulation mit Schalenelementen die Realität besser darstellt, aber auch einen deutlich höheren Rechenaufwand bedeutet. Inzwischen sind diese Simulationen für eine begrenzte Anzahl an Fäden gut möglich. In dieser Arbeit werden allerdings primär Simulationen mit 64 oder 176 Flechtfäden durchgeführt, wofür dieser Ansatz zur Zeit nicht geeignet ist.

6.3. Validierung des Simulationsansatzes

Die oben beschriebene FE-Simulation wurde anhand von verschiedenen Geometrien und unterschiedlichen Flechtparametern validiert, sofern diese berücksichtigt werden können. Dabei wurde überprüft, inwieweit die Simulation den tatsächlichen Fadenverlauf wiedergibt oder von diesem abweicht. Nur wenn eine ausreichend genaue Wiedergabe möglich ist, bzw. die Fehler erklärt und durch mögliche Erweiterungen ausreichend reduziert werden können, kann die Simulation für die Flechttechnik umfassend verwendet werden.

6.3.1. Simulationsaufbau

Für die Versuche wurden zylindrische Kerne mit unterschiedlichen Querschnitten verwendet, deren Abmaße in Abb. 6.2 dargestellt sind. Sie weisen einheitlich einen Umfang von 377 mm auf. Es handelt sich um grundlegende Geometrien, aus denen viele andere abgeleitet werden können und an denen verschiedene Effekte sichtbar werden sollten. Der Kreisquerschnitt stellt die Referenz da. Der quadratische Querschnitt kommt dem Kreis relativ nahe, hat aber große ebene Flächen. Der dreieckige Querschnitt weist eine sehr große Faserumlenkung von 120° an den Ecken auf. Der rechteckige Querschnitt hat deutlich unterschiedliche Kantenlängen.

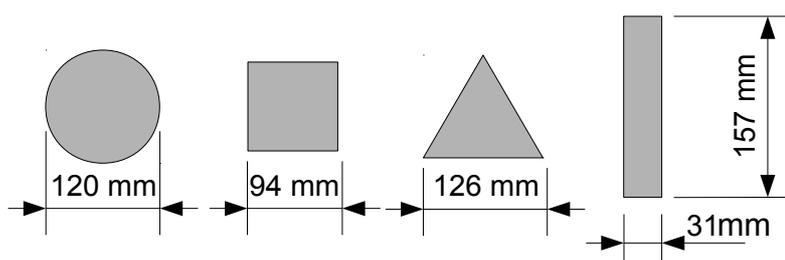


Abbildung 6.2: Kernquerschnitte, die für die Simulation und die entsprechenden Flechtversuche verwendet wurden

Jeder Kern hatte eine Länge von 1.000 mm und wurde vollständig mit einer Lage umflochten. Als Flechtmaschine wurde ein Radialflechtmaschine RF 176-100 der Firma Herzog verwendet. Diese Flechtmaschine hat 176 Flechtfäden und kann zusätzlich mit 88 Stehfäden bestückt werden. Neben den Querschnitten des Kerns wurden folgende weitere Parameter variiert: Die Fasern zwischen TohoTenax HTS 12k und 24k und die Fadenzugspannungen zwischen 350 g, 600 g und 900 g Federn. Außerdem wurden biaxiale und triaxiale Geflechte hergestellt. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche. Bei den Geflechten mit 12k Fasern sollte ein Winkel von 45° erreicht werden. Die Versuche mit 24k Fasern konnten nur mit höheren Fadenspannungen und einem Flechtwinkel von 30° durchgeführt werden.

Für die Analyse der Proben wurden bei den rechteckigen und dreieckigen Kernen jeweils die einzelnen Seiten eingescannt und der Faserwinkel mittels der in Abschnitt 4.4.6 beschriebenen Software ausgewertet. Die Geflechte wurden dazu auf dem Kern belassen, um einen Verzug zu vermeiden. Für die runden Kerne wurde eine spezielle Vorrichtung verwendet, die den Kern so über einen Flachbettscanner abrollt, dass dieser beim Scannvorgang ein ebenes Bild erzeugt. Die Auswertung erfolgte analog zu der in Abschnitt 4.4.6 beschriebenen. Für den Vergleich mit der Simulation wird der Faserwinkelverlauf entlang des Umfanges ausgewertet, wobei jede Position entlang des Umfangs durch den Winkel (Φ) zwischen einem senkrecht vom Mittelpunkt des Querschnitts nach oben verlaufenden Strahl und einem ebenfalls vom Mittelpunkt zum jeweiligen Punkt auf der Querschnitt verlaufenden Strahl bestimmt wird.

Die zuvor beschriebenen Kerne wurden als Modell erstellt und in der Simulation umflochten. Die Fäden wurden in der Simulation durch Balkenelemente dargestellt, mit einer Länge von 2 mm im inneren Bereich. Die Federelemente wurden gemäß den beim Flechten eingesetzten Federn eingestellt. Als Sollwinkel wurde 45° angenommen. Es wurden Simulationen mit und ohne Gravitationsfeld durchgeführt. Dabei ist anzumerken, dass die eingestellte Gravitation um 10 % niedriger war, als die tatsächlich auftretende. Dies wurde erst nach den Berechnungen festgestellt. Da die Rechnungen sehr zeitintensiv waren, wurden sie nicht wiederholt.

Faser	GeflechtartBiax			Triax		
	350 g	600 g	900 g	350 g	600 g	900 g
TohoTenax HTS 12k	45°	45°	45°	45°	45°	45°
TohoTenax HTS 24k	-	30°	30°	-	-	-

Tabelle 9: Übersicht über die erstellten Geflechtproben; in der Tabelle eingetragen sind die eingestellten Flechtwinkel.

Für die Auswertung müssen die Winkel der Fäden bestimmt werden. Hierfür wurden einzelne Fäden separiert und die Knotenpunkte herausgeschrieben. Die Knotenpunkte wurden für die Ermittlung der Faserwinkel herangezogen. Abb. 6.3 zeigt einen Ausschnitt aus einem simulierten Geflecht. Balkenelemente und Knotenpunkte sind deutlich zu erkennen. Es wird ebenfalls sichtbar, dass die einzelnen Balkenelemente eines Fadens sehr unterschiedliche Winkel aufweisen, da sie von anderen Elementen verschoben werden. Dessen ungeachtet ist für den Faden, der durch die Elemente dargestellt wird, ein eindeutiger Winkel erkennbar. Um die lokalen Effekte nicht zu berücksichtigen, wurde der Winkel nicht mittels zwei benachbarter Knoten bestimmt, sondern für jeden Knoten wurde der jeweils achte folgende verwendet. Bei einem deutlich geringeren Abstand der Knoten sind bei der Auswertung starke lokale Schwankungen sichtbar. Größere Abstände zwischen den Knoten würden lokale Effekte im Geflecht überdecken.

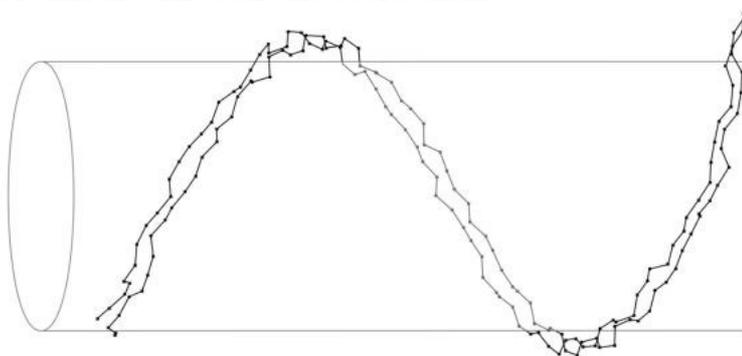


Abbildung 6.3: Zwei benachbarte Fäden nach der Simulation des Umflechtens eines runden Kerns

6.3.2. Ergebnisse

Einfluss der Gravitation in der Simulation

Zuerst soll der Einfluss der Gravitation in der Simulation untersucht werden. In Abb. 6.4 und Abb. 6.5 ist der Verlauf der Faserwinkel für einen Kreisquerschnitt bzw. einen dreieckigen Querschnitt dargestellt. Es ist jeweils der Verlauf für eine Simulation mit und eine ohne Gravitation dargestellt; zusätzlich dazu der mittlere Winkel. Beim Kreisquerschnitt schwankt der Winkel um $\pm 1^\circ$ um den Mittelwert, wenn die Gravitation nicht berücksichtigt wird – bei Berücksichtigung um $\pm 0,5^\circ$. Die Mittelwerte unterscheiden sich allerdings um $0,8^\circ$. Ohne Berücksichtigung der Gravitation wird mit $44,9^\circ$ der vorgegebene Winkel von 45° sehr genau getroffen. Bei der Berücksichtigung der Gravitation wird ein mittlerer Winkel von $44,15^\circ$ erreicht. Der deutliche Unterschied zwischen den Mittelwerten konnte nicht erklärt werden und ist auch bei den anderen Geometrien nicht zu sehen (s. bspw. Abb. 6.5). Es wird insofern nicht davon ausgegangen, dass er durch die Gravitation hervorgerufen wird. Auch bei der Simulation mit einem dreieckigen Kernquerschnitt (s. Abb.

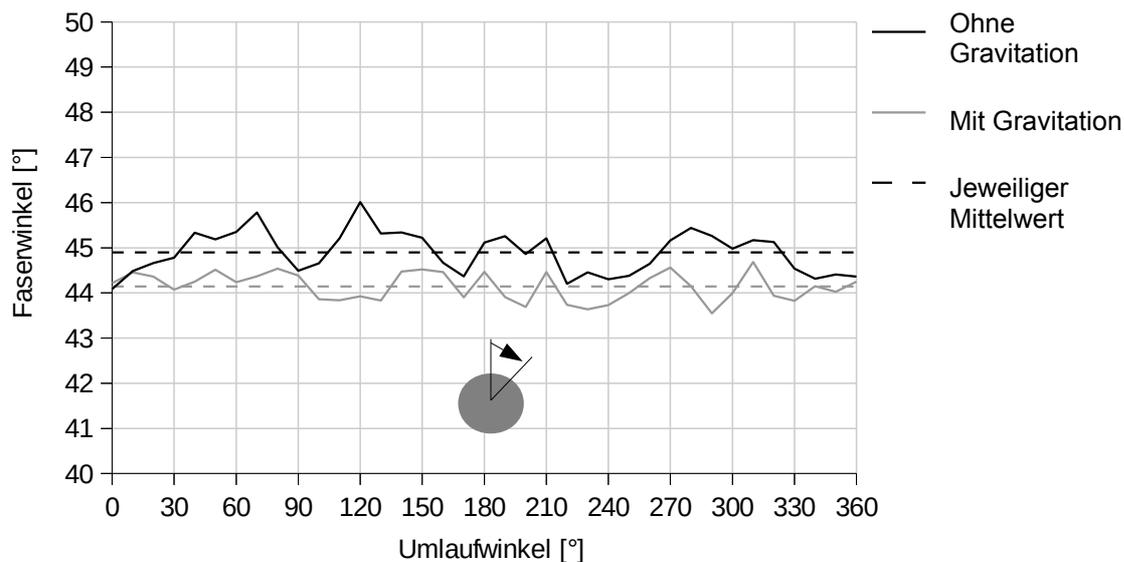


Abbildung 6.4: Simulierter Verlauf des Faserwinkels entlang eines Kreisquerschnitts mit und ohne Berücksichtigung der Gravitation; gestrichelt ist jeweils der globale Mittelwert eingezeichnet.

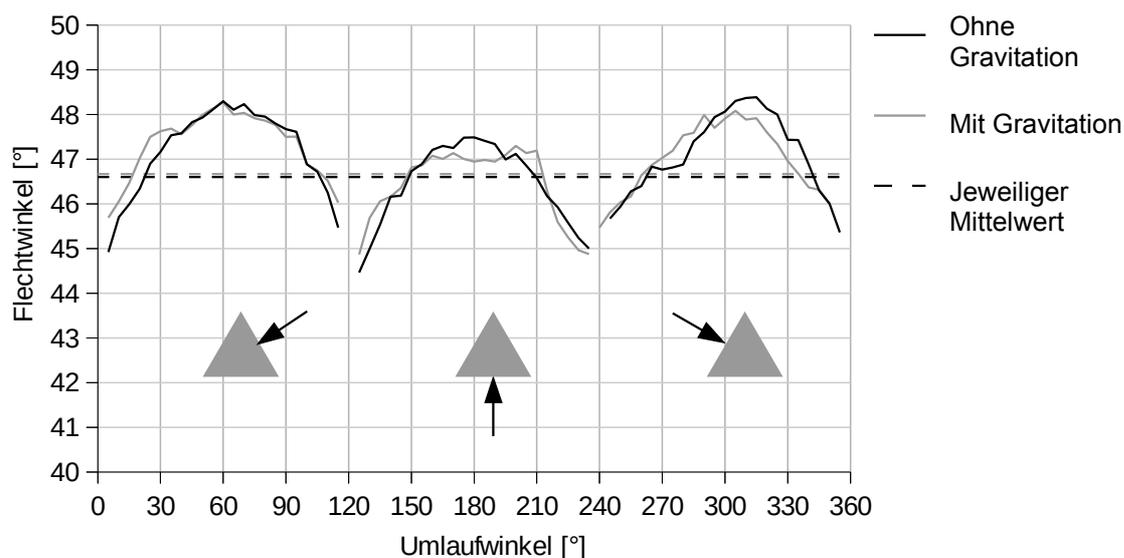


Abbildung 6.5: Simulierter Verlauf des Faserwinkels entlang eines Dreiecksquerschnitts mit und ohne Berücksichtigung der Gravitation; gestrichelt ist jeweils der globale Mittelwert eingezeichnet.

6.5) ist kein Einfluss der Gravitation sichtbar. Der mittlere Winkel weicht allerdings mit $46,7^\circ$ in beiden Fällen stark von dem Soll-Winkel ab.

Die Winkelverläufe bei den rechteckigen und quadratischen Querschnitten sind in Anhang C dargestellt und bestätigen die hier gezeigten Ergebnisse. Da die Berücksichtigung der Gravitation die Ergebnisse der Simulation nicht nennenswert beeinflussen, werden im Folgenden nur noch Simulationsergebnisse verwendet und dargestellt, die keine Gravitation berücksichtigen.

Unterschiedliche Fadensysteme bei den Versuchen

In Abschnitt 4.4.6 wurde gezeigt, dass die beiden Flechtfadensysteme bei runden Kernquerschnitten keinen prinzipiell unterschiedlichen Winkelverlauf aufweisen. Lokal können die Winkel von dem global mittleren Winkel allerdings um bis zu 5° abweichen. Diese Abweichung kann bei beiden Faserrichtungen auftreten und ist nicht auf eine bestimmte Position am Querschnitt gebunden. Es handelt sich demzufolge um zufällige Abweichungen.

Bis auf eine etwas höhere lokale Abweichung vom global mittleren Winkel verhalten sich die triaxialen und biaxialen Geflechte auf runden Querschnitten gleich. Auch in der Simulation konnte bei runden Querschnitten kein Unterschied zwischen den Fadensystemen erkannt werden.

Bei dem dreieckigen und rechteckigen Querschnitt gab es dagegen vereinzelt Messungen bei denen der Winkelverlauf der beiden Fadensysteme prinzipiell unterschiedlich ist. Abb. 6.6 zeigt einen derartigen Fall. Die Ursache konnte nicht geklärt werden. Der aus beiden Flechtfadensystemen gemittelte Winkelverlauf entspricht dagegen den Erwartungen und auch vom prinzipiellen Verlauf her den der anderen Messungen. Aus diesen Gründen wird im Weiteren auch bei diesen Messungen immer der aus beiden Faserrichtungen gemittelte Winkel verwendet.

Die Auswertung aller Messungen sind in Anhang B dargestellt.

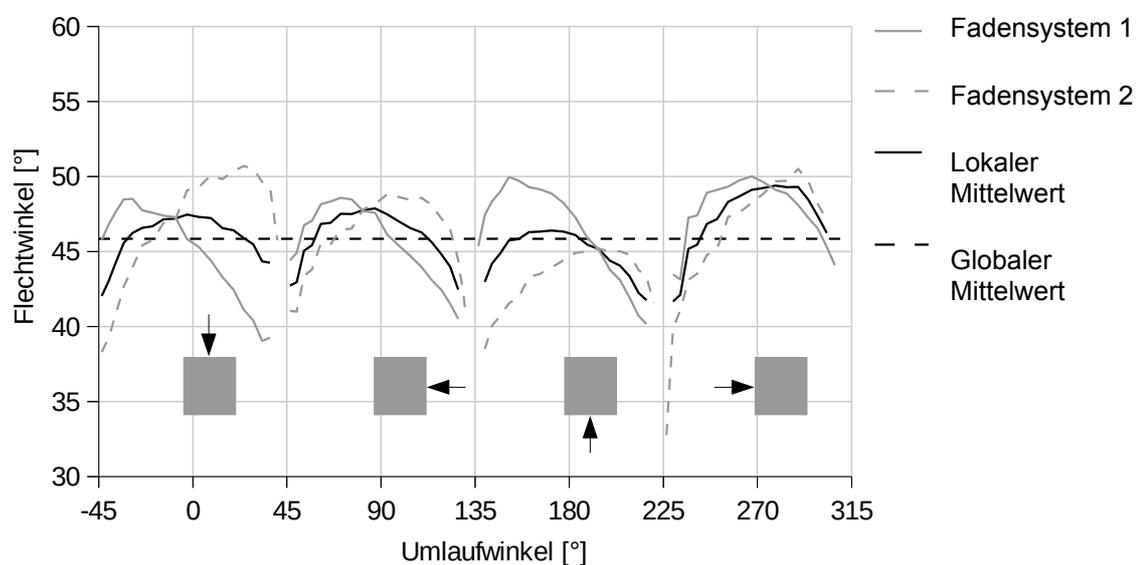


Abbildung 6.6: Vergleich der Winkelverläufe in den beiden Flechtfadensystemen. Hier ein Fall in dem die Verläufe deutlich von einander abweichen.

Vergleich der gemessenen und simulierten Faserwinkel

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse und der Messungen werden jeweils die Mittelwertkurven der Messungen, die Simulationsergebnisse ohne Gravitation sowie die jeweiligen globalen Mittelwerte in einem Diagramm dargestellt.

In Abb. 6.7 sind die Ergebnisse für einen runden Querschnitt mit einem biaxialen Geflecht dargestellt. Die Simulation trifft den Soll-Winkel im globalen Mittelwert sehr genau. Auch die lokalen Winkel weichen lediglich um maximal 1° ab. Im Versuch liegt der globale Mittelwert dagegen mit $46,5^\circ$ um $1,5^\circ$ oberhalb des Soll-Winkels. Die lokalen Abweichungen sind mit max. $4,5^\circ$ ebenfalls deutlich höher. Ursache für die geringen Abweichungen bei der Simulation könnte die Auswertung der Simulationsergebnisse sein, die über mehrere Kontenpunkte erfolgt und durch welche schon ein gewisser Ausgleich der Ergebnisse stattfindet. Winkelabweichungen, wie zwischen 30° und 60° des Umfangswinkels bei den Messungen, würden allerdings nicht ausgeglichen werden.

Der prinzipielle Verlauf des Faserwinkels wird von der Simulation bei runden Kernquerschnitten gut wiedergeben. Der globale Mittelwert wich bei keiner der vermessenen Proben um mehr als $1,9^\circ$ vom Soll-Winkel ab. Damit werden auch die Ergebnisse aus Abschnitt 4.4.6 bestätigt.

Für einen quadratischen Querschnitt ist ein beispielhafter Vergleich in Abb. 6.8 dargestellt. Die globalen Mittelwerte sind mit $44,8^\circ$ bei der Simulation und $45,9^\circ$ bei den Versuchen sehr nah an dem Soll-Winkel von 45° . Der Winkelverlauf weicht bei den Simulationen von dem globalen Mittelwert um max. $1,2^\circ$ ab. Bei den Messungen ist die Abweichung wie beim runden Querschnitt mit max. $3,2^\circ$ deutlich größer. Interessant ist bei diesen Proben der Verlauf des Winkels entlang einer Seitenfläche

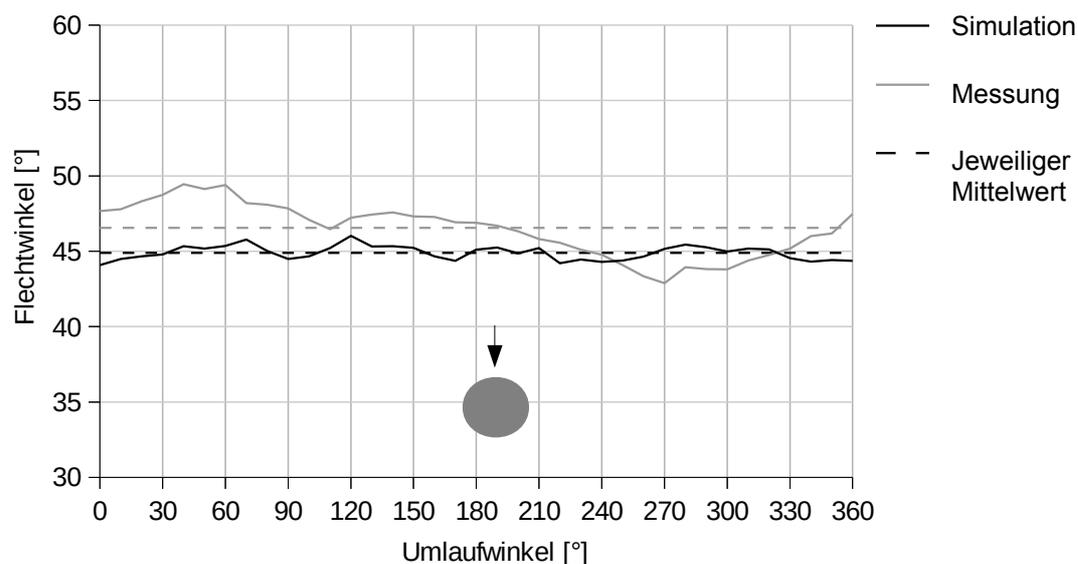


Abbildung 6.7: Messergebnisse und Simulation für einen runden Kernquerschnitt, der mit einem biaxialen Geflecht umflochten wurde

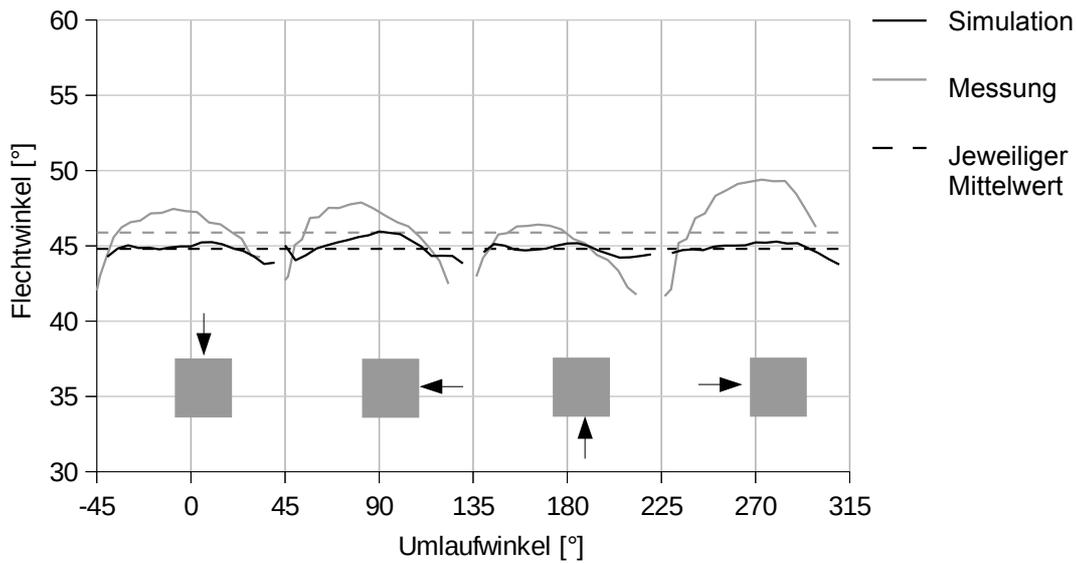


Abbildung 6.8: Messergebnisse und Simulation für einen quadratischen Querschnitt, der mit einem biaxialen Geflecht umflochten wurde

des Quadrats. Es bildet sich deutlich der in Abschnitt 4.2.2 erläuterte S-Schlag ab. Der Winkel nimmt zur Kante hin signifikant ab. Dieser Effekt wird auch von der Simulation wiedergegeben, allerdings in einem merklich geringeren Ausmaß.

Bei einem dreieckigen Querschnitt tritt dieser Effekt noch deutlicher hervor, wie in Abb. 6.9 dargestellt. Der lokale Winkel liegt hier an den Ecken um etwa 10° unter dem globalen Mittel. In der Mitte einer Seite liegt der Winkel dagegen deutlich über dem globalen Mittel. Die Simulation gibt dieses Verhalten lediglich in Ansätzen wie-

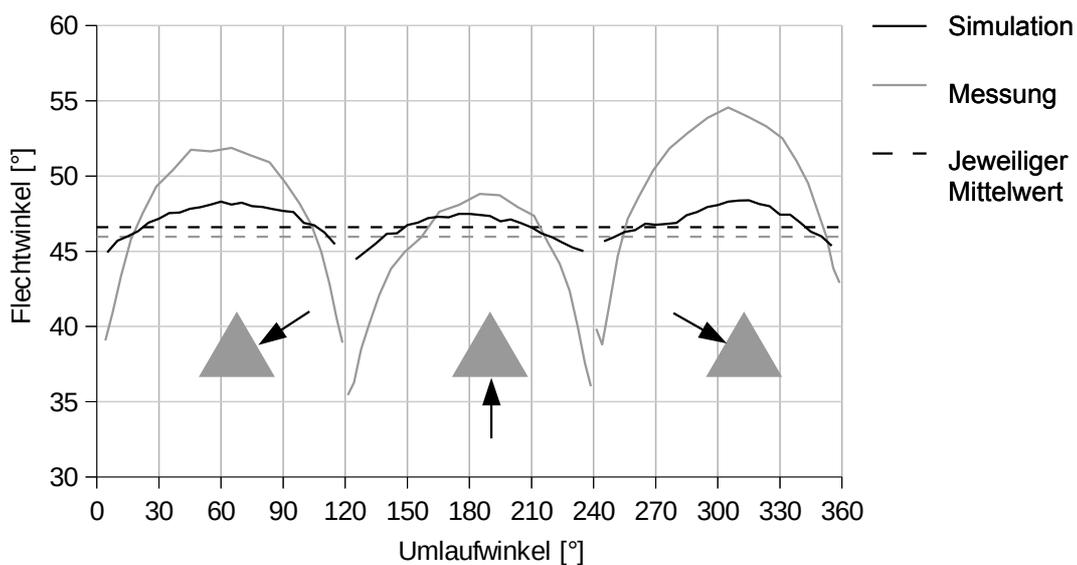


Abbildung 6.9: Messergebnisse und Simulation für einen dreieckigen Querschnitt, der mit einem biaxialen Geflecht umflochten wurde

der. Die Winkel weichen um max. $2,1^\circ$ von dem globalen Mittel ab. Die globalen Mittelwerte liegen auch hier wieder mit $46,6^\circ$ bei der Simulation und 46° bei den Versuchen dicht bei dem Soll-Winkel.

Die Versuche für einen rechteckigen Querschnitt, die in Abb. 6.10 dargestellt sind, weisen einen weiteren Effekt auf. Der gemessene Winkelverlauf fällt auch hier zu den Kanten hin stark ab. Auf den langen Seiten stellt sich dann allerdings ein relativ konstanter Winkel ein. Dieser liegt mit etwa 55° über dem Soll-Winkel. Auf den kurzen Seiten des Querschnitts liegt der Winkel dagegen mit etwa 35° deutlich unterhalb des Soll-Winkels. Auch dieser Effekt, welcher durch die unterschiedlichen Seitenlängen verursacht wird, wurde in Abschnitt 4.2.2 erläutert und zeigt sich hier deutlich. Die Simulation stellt auch in diesem Fall den Verlauf der Winkel prinzipiell richtig dar, allerdings erneut in einem viel zu geringen Ausmaß. In den Simulationen weicht der Winkel um max. 5° von dem globalen Mittelwert ab – auf den langen Seiten nur um etwa 3° anstatt 10° . Die globalen Mittelwerte liegen um 46° und damit wieder dicht beim Soll-Winkel.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen Simulation und Versuch bzgl. des Winkelverlaufs lassen sich damit wie folgt zusammen fassen. Die FE-Simulation des Flechtprozesses gibt den prinzipiellen Fadenverlauf auch bei unterschiedlichen Kerngeometrien richtig wieder. Allerdings werden Effekte, die bei einer vom Kreisquerschnitt abweichenden Querschnittsgeometrie auftreten, deutlich zu gering dargestellt. Ursache hierfür ist die fehlende Reibung zwischen den einzelnen Fasern, die teilweise Ursache für die Effekte ist bzw. diese deutlich verstärkt.

Insbesondere bezogen auf die Abweichungen von dem Mittelwert bei dem gemessenen Winkelverlauf ist noch folgendes zu beachten. An jeder Probe wurden zwar

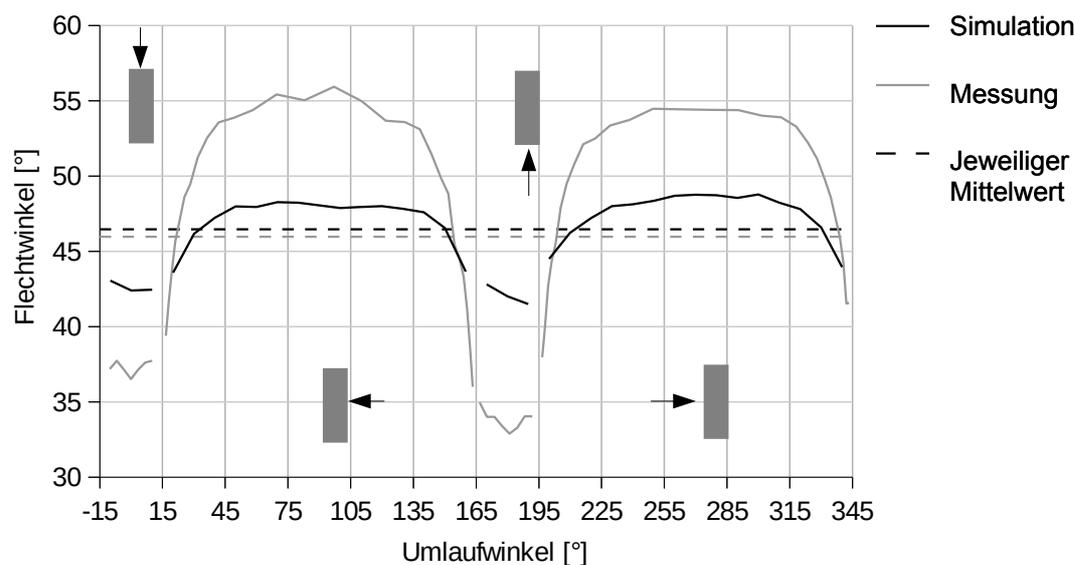


Abbildung 6.10: Messergebnisse und Simulation für einen rechteckigen Querschnitt, der mit einem biaxialen Geflecht umflochten wurde

viele Werte gemessen, sodass der Winkelverlauf der gemessenen Probe als statistisch abgesichert gelten kann. Allerdings kann aus dem Wert nicht beurteilt werden, wie die Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Proben bei gleichen Randbedingungen ist. Dieser Wert ist vermutlich deutlich kleiner, als die lokalen Abweichungen, wie aus den globalen Mittelwerten hervorgeht, die bei allen Messungen lediglich gering von dem Soll-Winkel abweichen.

6.4. Erweiterung des aktuellen FE-Modells

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der FE-Ansatz für die Prozesssimulation erfolgversprechend ist, aber noch in bestimmten Aspekten erweitert bzw. verbessert werden muss. Hierzu zählen zum einen die Reibung, welche in den aktuellen Modellen nur partiell berücksichtigt wird. Daneben ist die Modellierung der Fäden als Stabelement lediglich bedingt geeignet, da hier ein runder Querschnitt angenommen wird, welcher wie beschrieben, nicht dem Querschnitt des Fadens entspricht.

In der Arbeit von Schneider [40] und der Arbeit von Vohrer, von Reden und Böhler [94] wurden folgende Ansätze zur Erweiterung bzw. Verbesserung des Modells vorgeschlagen und untersucht:

- Verwendung von Schalenelementen für die Darstellung der Fäden in dem Flechtprozess.
- Verwendung von Faserbündeln für die Darstellung eines Fadens.
- Anpassung der Kontaktbedingungen der Stabelemente, die den Faden darstellen.

Auf die einzelnen Ansätze wird im Folgenden kurz eingegangen und, sofern sie im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, werden ebenfalls ihre Ergebnisse dargestellt.

6.4.1. Schalenelemente

Dieser Ansatz wurde bereits von Schneider vorgeschlagen und wird aktuell z. B. durch die Arbeiten von Böhler [93] weiter verfolgt. Die Vorteile sind eine deutlich bessere Darstellung der Fadenbreite und des Verhaltens des Fadens. Auch kann die Reibung zwischen den Fäden berücksichtigt werden. Dadurch wird eine deutlich bessere Wiedergabe der Prozesse beim Flechten erreicht. Von entscheidendem Nachteil ist der sehr hohe Rechenaufwand dieses Prozesses. Es ist zwar davon auszugehen, dass mit steigender Rechenleistung in einigen Jahren Simulationen mit Schalenelementen problemlos möglich sind, aktuell gilt dies jedoch nur für kleinere Modelle oder auf Hochleistungsrechnern bei entsprechender Zeit.

6.4.2. Faserbündel

Bei diesem Ansatz werden die Fäden weiterhin durch Barelemente dargestellt, allerdings nicht ein Faden durch ein Strang von Barelementen, sondern durch eine ganze Reihe von parallel verlaufenden Strängen. Dies entspricht im Prinzip dem tatsächlichen Faden, welcher aus vielen einzelnen Filamenten aufgebaut ist. Die beim Flechten häufig verwendeten Fasern bestehen aus mindestens 12.000 einzelnen Filamenten. Dies würde für eine Maschine mit 176 Fäden zu über 2 Mio. Strängen aus Barelementen führen. Die dadurch entstehende Anzahl an Knoten und vor allem die dadurch entstehende Anzahl an Kontaktanfragen ist heute kaum umsetzbar. Deshalb werden die Fäden durch eine einstellige Anzahl an Strängen dargestellt.

Der Ansatz ist nicht prinzipiell neu, sondern wurde z. B. bereits in der Simulation von Drapierprozessen verwendet. Für Geflechte wurde dieser Ansatz allerdings noch nicht umgesetzt.

In der hier vorgestellten Simulation wurde jeder Faden aus vier Strängen dargestellt. Die Enden der Stränge werden über Starrkörper miteinander verbunden. Am einen Ende sind sie mit der Feder verknüpft, am anderen sind alle Enden als Starrkörper zusammengefasst. Die Versuche wurden für einen Flechter mit 64 Flechtfäden auf einem runden Kern mit 30 mm Durchmesser durchgeführt. In allen anderen Punkten entspricht die Simulation den zuvor beschriebenen Simulationen. In der Simulation wurde der Faserwinkel kontinuierlich erhöht, indem die Abzugsgeschwindigkeit reduziert wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich die einzelnen Stränge eines Fadens im Bereich mit einem kleineren Flechtwinkel nebeneinander legen. Sie bilden hier einen breiten Faden mit einer geringen Fadenhöhe. Mit steigendem Flechtwinkel schieben sich die einzelnen Stränge stärker zusammen und schließlich übereinander. Die Ablagebreite nimmt ab, während die Lagendicke zunimmt.

Damit erfüllt diese Methode die Anforderungen in der Prozesssimulation, die Querschnittsverformungen der Fäden zu berücksichtigen. So können Informationen über Fadenbreite und Lagendicke ermittelt werden. Die Reibung konnte allerdings zu dem Zeitpunkt, an welchem die Simulationen durchgeführt wurden, nicht berücksichtigt werden.

Es muss auch bei dieser Methode der Rechenaufwand betrachtet werden. Es wurde bereits erwähnt, dass die Modelle schnell eine nicht mehr oder nur auf Großrechnern handhabbare Anzahl an Elementen und damit an Kontakten erreichen können. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Methode nur sinnvoll einsetzbar ist, wenn die Fäden durch wenige Stränge dargestellt werden.

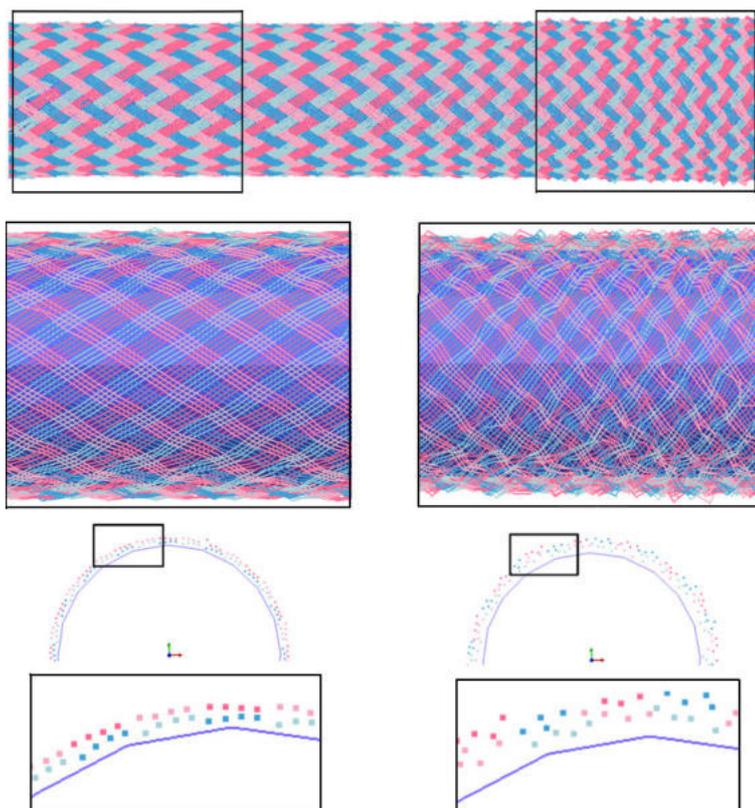


Abbildung 6.11: Simulation, bei der ein Faden durch ein Bündel aus vier Stabelementketten dargestellt wird; oben: umflochtener Kern mit unterschiedlichen Flechtwinkeln; Mitte: Ausschnitte mit niedrigem und hohem Flechtwinkel; unten: Querschnitt bei niedrigem und hohem Flechtwinkel

6.4.3. Kontaktbedingungen

Bei einem Stabelement können verschiedene Kontaktbedingungen zu anderen Elementen definiert werden. Aktuell wird ein Radius definiert, bis zu dem sich andere Elemente nähern können, danach wirkt eine Kontaktbedingung und ein weiteres Annähern an den Stab ist nicht mehr möglich. Der Stab stellt damit einen Zylinder dar, also nicht die Form des Fadens. Bei der Simulation können die Kontakte eines Elementes zu anderen Elementen unterschiedlich definiert werden. Das heißt, ein Stabelement weist zu jeweils anderen Stabelementen unterschiedliche Kontaktabstände auf.

Die Fäden eines Fadensystems liegen immer parallel nebeneinander. Die Fäden werden sich nie kreuzen, also übereinander liegen. Die Fäden unterschiedlicher Fadensysteme dagegen kreuzen sich regelmäßig und werden nie nebeneinander liegen. Dies kann genutzt werden, um dem Stabelement eine andere Breiten- als Höhenausdehnung zu geben. Zu allen Elementen des gleichen Fadensystems gibt es eine Kontaktbedingung, zu allen Elementen des anderen Fadensystems oder der anderen Fadensysteme eine andere Kontaktbedingung. Auf diese Weise kann ein elliptischer Querschnitt der Faser simuliert werden, wie Abb. 6.12 verdeutlicht.

Simulationen mit einem solchen Setup haben gezeigt, dass dieses Verfahren funktioniert. Die Anzahl der Kontakte wird allerdings erhöht, wodurch auch der Rechenaufwand steigt. Daneben ist zu beachten, dass zwar auf diese Weise der Querschnitt

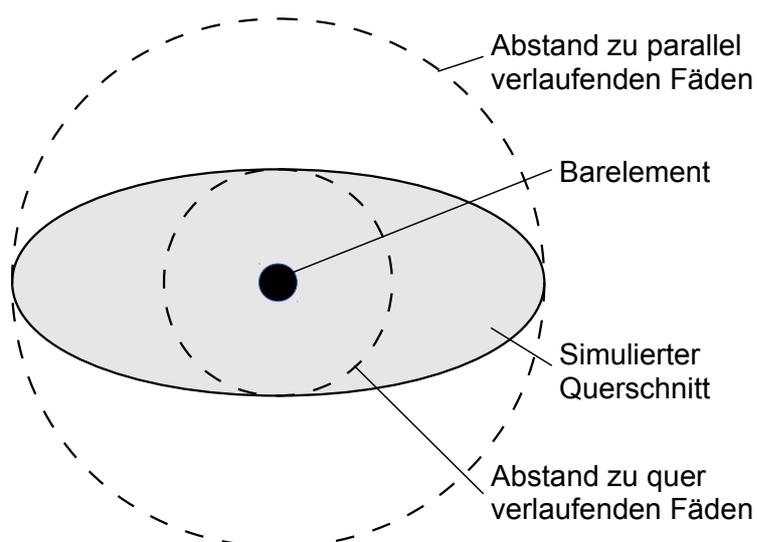


Abbildung 6.12: Simulierter Querschnitt durch den Einsatz von zwei verschiedenen Abstandsdefinitionen zwischen den Bar-elementen

des Fadens besser wiedergegeben wird, der Querschnitt allerdings weiterhin fix ist. Es kann keine Querschnittsänderung der Fäden simuliert werden, die insbesondere bei komplexen Geometrien auftreten. Um diese Dynamik in der Simulation zu berücksichtigen, bedarf es lokaler Kontaktbedingungen, die sich an die Randbedingungen anpassen.

Hierbei wird folgendes Prinzip verfolgt. Jedes Stabelement weist verschiedene Kontaktdefinitionen auf, sowohl für die Breite, also zu anderen Stabelementen aus dem gleichen Fadensystem, als auch für die Höhe, also zu Stabelementen aus anderen Fadensystemen. Tatsächlich wirksam ist am Anfang einer Simulation immer der Breitenkontakt mit der max. Breite und der Höhenkontakt mit der minimalen Höhe. Sobald der Breitenkontakt in Kontakt mit einem anderen Stabelement tritt, wird der Kontakt deaktiviert und der nächst kleinere Breitenkontakt wird aktiviert. Gleichzeitig wird auch der nächstgrößere Höhenkontakt aktiviert. Diese Prozedur wird bei weiterem Annähern der Elemente fortgesetzt, bis der kleinste Breitenkontakt und

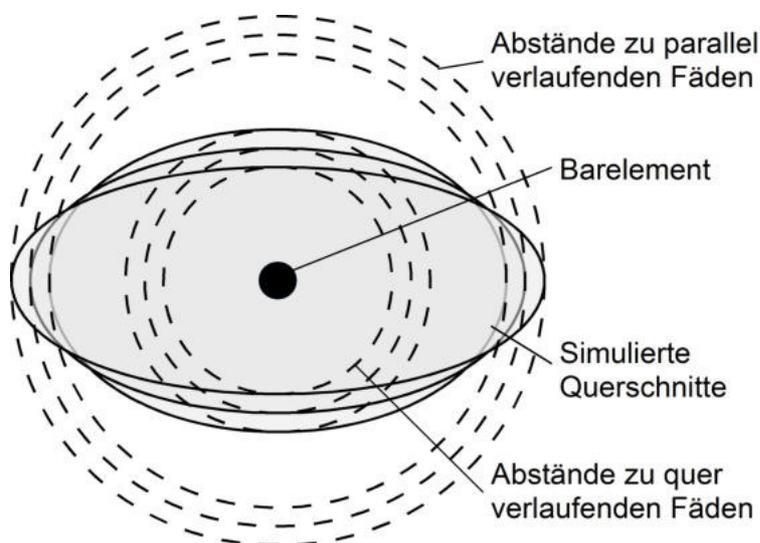


Abbildung 6.13: Simulierter Querschnitt durch den Einsatz von verschiedenen Abstandsdefinitionen zwischen den Barelementen

der größte Höhenkontakt erreicht sind. In Abbildung 6.13 sind die Kontakte mit den Radien und den sich daraus ergebenden Fadenquerschnitten dargestellt.

Auf diese Weise lässt sich die Verformung des Rovings simulieren. Der Aufbau dieses Systems ist allerdings komplexer, als zuerst angenommen. Hier soll darauf nicht näher eingegangen werden, sondern auf die Arbeit von Vohrer, von Reden und Böhler verwiesen werden [94].

Daneben wird die Anzahl der Kontakte erheblich heraufgesetzt. Schon bei einem einfachen Geflecht von 15 cm mit einer Elementlänge von 2 mm wird bei der Verwendung von lokalen Kontakten die Rechenzeit um den Faktor 45 vergrößert, auch wenn nur jeweils ein Kontaktpaar pro Element betrachtet wird. Es wird deutlich, dass man auch hier schnell an die Grenzen der aktuellen Rechenleistung stößt, sofern nicht auf Hochleistungsrechner zurückgegriffen wird.

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden zwei Maßnahmen ergriffen. Zum einen werden nur bei bestimmten Elementen die Kontakte aktiv geschaltet, zum anderen können auch Effekte durch einen symmetrischen Kern genutzt werden. Beide Ansätze werden im Folgenden kurz beschrieben und führen dazu, dass eine Durchführung einer Simulation möglich ist.

Lokale Aktivierung

Um den enormen Rechenbedarf durch die Abfrage der Kontaktbedingungen zu reduzieren, ist es sinnvoll, nur jene Kontakte zu berücksichtigen, die gerade benötigt werden. Solange die Fäden keinen oder nur vereinzelt Kontakt haben, reichen globale Kontaktbedingungen. Wenn das Geflecht vollständig entstanden ist und keine weiteren Bewegungen der Fäden gegeneinander stattfinden, bedarf es keiner weiteren Berücksichtigung der Kontakte, es muss lediglich sichergestellt werden, dass die Fäden nicht verrutschen. Die lokalen Kontakte werden damit nur in der Zone benötigt, in welcher sich das Geflecht verdichtet und auf dem Kern ablegt. Für die lokale Aktivierung der Kontaktelemente wurde deshalb folgendes Vorgehen umgesetzt.

Zu Beginn einer Simulation werden im inneren Bereich der Fäden die lokalen Kontakte aktiviert. Im äußeren Bereich werden globale Kontaktbedingungen gesetzt. Wie lang der Bereich des Fadens mit den lokalen Kontakten ist, muss vorher abgeschätzt werden und hängt vor allem vom Flechtwinkel ab. Zusätzlich wird eine Ebene definiert, welche normal zur Abzugsrichtung steht und von wo aus keine Veränderungen im Geflecht mehr erwartet werden. Sobald in der Simulation ein Element der Fäden die Ebene erreicht, wird es, bezogen auf den Kern, fixiert und alle Kontakte werden deaktiviert. Gleichzeitig werden an dem Faden bei dem Element die lokalen Kontakte aktiviert, das sich dem letzten Element mit lokalen Kontakten anschließt. So bleibt die Anzahl an Elementen mit lokalen Kontakten stets konstant. Dadurch kann die Anzahl der aktiven Kontakte deutlich reduziert werden, allerdings ergibt sich immer noch ein sehr hoher Rechenaufwand.

Achssymmetrischer Kern

Zur weiteren Reduktion des Rechenaufwands wurde für die testweise durchgeführten Simulationen die Symmetrie der runden Kerne ausgenutzt. Wie bereits durch verschiedene Simulationen und auch durch viele Versuche gezeigt wurde, verhalten sich die Fasern bei einem runden Querschnitt an jedem Querschnitt entlang des gesamten Umfangs gleich. Dies bedeutet für die Simulation, dass die Kontaktdefinitionen nicht mehr global für die einzelnen Fäden definiert werden müssen, sondern nur lokal für die Querschnitte. Dieser Ansatz ist lediglich bei runden Querschnitten möglich und stellt damit keine generelle Lösung dar.

Simulationsergebnisse

Mit den zuvor dargestellten Vereinfachungen wurde der Flechtprozess für eine Maschine mit 64 Flechtfäden und einem runden Kern simuliert. Dabei wurden die Abzugsgeschwindigkeit und damit der Flechtwinkel variiert. Das Ergebnis ist in Abb. 6.14 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, wie sich der Flechtwinkel ändert. Gleichzeitig nimmt mit geringerer Ablagebreite die Ablagehöhe der Fäden zu, wodurch die Flechtlage insgesamt dicker wird.

Damit konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz ebenfalls eine Möglichkeit darstellt, die Querschnittänderungen der Fäden im Flechtprozess zu berücksichtigen. Allerdings steigt auch in diesem Fall der Rechenaufwand erheblich.

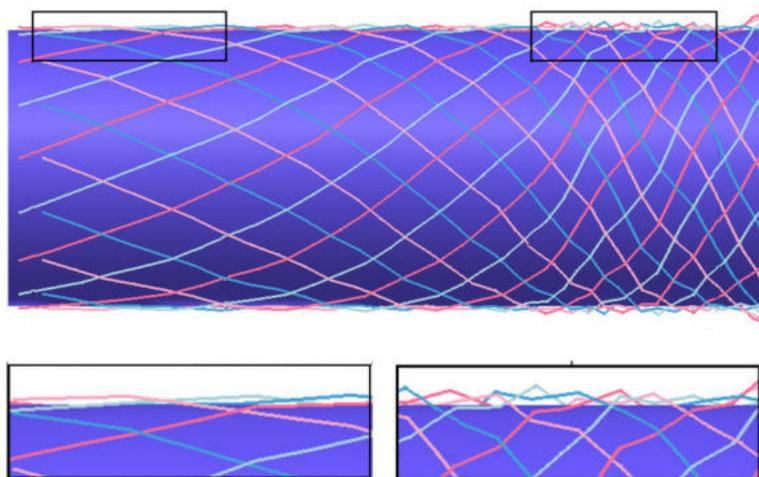


Abbildung 6.14: Simulation, in welcher der Querschnitt der Stabelemente angepasst wird

6.5. Simulation von komplexen Geometrien mit und ohne variabler Fadenzugkraft

Die grundlegenden Untersuchungen der Simulation erfolgten immer an einfachen Kerngeometrien, welche neben einfachen Querschnitten vor allem keine Querschnittsänderungen aufwiesen. Im Folgenden soll anhand einer komplexeren Geometrie das Potenzial der Simulation untersucht werden. Dabei konnte die Softwareversion 2012 von PamCrash eingesetzt werden – mit dem 64bit Solver 2012.0. Dieser erlaubt ebenfalls Reibung zwischen Barelementen.

Die umflochtene Geometrie ist in Abb. 6.15 dargestellt. Es ist stets vom kleineren Durchmesser hin zum größeren geflochten worden. Dabei ist ein triaxiales Geflecht mit $\pm 45^\circ$ Faserwinkel auf einer Flechtmaschine mit 64 Klöppeln simuliert worden. Sobald der Flansch sich auf Höhe des Flechtrings befunden hat, ist der Kernvorschub unterbrochen worden. Das Geflecht kann sich dann bis zum Flansch schließen und diesen ebenfalls bedecken. Erst wenn das Geflecht bis zum oberen Rand des Flanschs geschlossen ist, wird der Kern weiterbewegt.

In der Simulation ist jeder Faden durch eine Balkenelementkette dargestellt worden. Dabei haben die einzelnen Elemente eine Länge von 2 mm. Der Kontaktabstand (thickness) zu Fäden des gleichen Systems hat 3 mm, zu Fäden eines anderen Systems 1 mm betragen. Die Federelemente an den Enden der Fäden haben eine Kraft von 3,5 N ausgeübt.

In einem ersten Versuch ist die Simulation ohne Reibung zwischen den einzelnen Elementen durchgeführt worden. Dies hat dazugeführt, dass sich beim Stopp der Kernbewegung die Flechtfäden entlang des gesamten Kerns zusammenschieben und so den Flechtwinkel ändern (s. Abb. 6.16). Dies entspricht in keiner Weise dem Verhalten in der Realität. Es zeigt sich deutlich, dass auf die Reibung nur solange verzichtet werden kann, wie die Fäden sich auf den geodätischen Linien ablegen. Dies ist der Fall, wenn zylindrische konvexe Kerne mit einer konstanten Abzugsgeschwindigkeit simuliert werden.

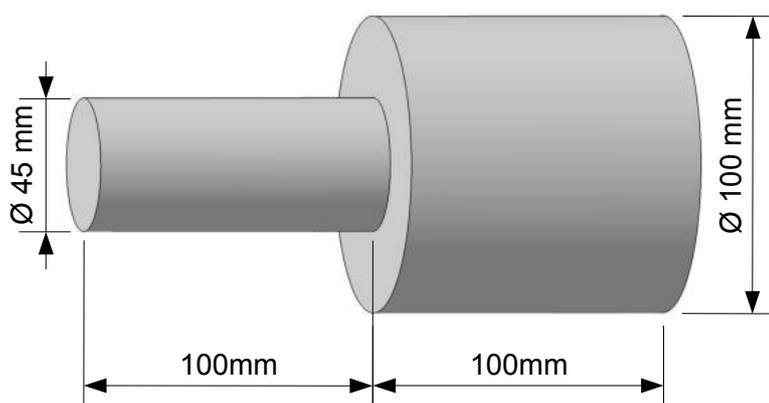


Abbildung 6.15: Geometrie des Kerns für die Simulationsversuche mit komplexerer Geometrie

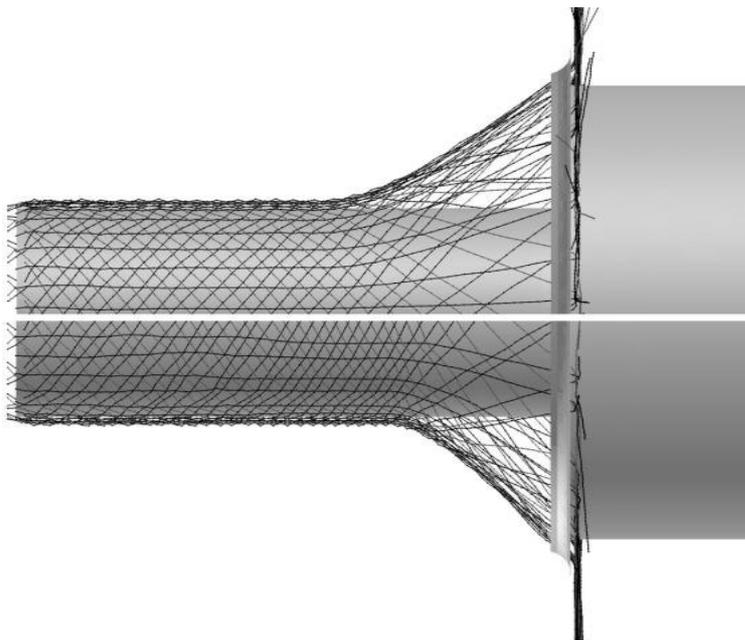


Abbildung 6.16: Geflecht, welches sich auf den Kern auf schiebt und so den Flechtwinkel ändert; oben: Geflecht kurz vor Stopp der Kernbewegung; unten: Geflecht kurz bevor der Kern weiter bewegt wird

In einem zweiten Fall wird die Reibung zwischen den Fäden sowie zwischen den Fäden und dem Kern berücksichtigt. Es wird mit einem Reibkoeffizienten von 0,2 gerechnet. Außerdem ist der Kontaktradius der Fäden im Bereich des Flanschs von 3 mm auf 1,5 mm reduziert worden, da sich die Flechtstränge im Bereich des Flanschs zusammenschieben, sodass hier eine geringere Ablagebreite auftritt.

Durch die geänderten Parameter schließt sich das Geflecht bis zum Flansch hin und fängt an, diesen zu bedecken. Wie in Abb. 6.17a sichtbar, ist das Geflecht im oberen Bereich des Flanschs allerdings noch offen. Abb. 6.17b zeigt die Simulation einige Zeitschritte später (in der oberen Hälfte sind nur die Stehfäden dargestellt). Das Geflecht ist hier am Flansch umgeschlagen und bildet eine Falte. Dies entspricht sehr gut der Realität, hier kommt es zu dem gleichen Effekt, wie Abb. 6.18 zeigt. Grund sind die Flechtstränge, welche, durch die Kreisbewegung der Klöppel in der Flechtmaschine, ab einem bestimmten Zeitpunkt das Geflecht am Flansch nach unten ziehen. Damit zeigt die Simulation das sehr realitätsnahe Verhalten, dass sich nur sehr niedrige Absätze geschlossen beflechten lassen. Bei höheren Absätzen weist das Geflecht im oberen Bereich große Lücken auf und droht umzuschlagen.

In einer weiteren Simulation soll der Effekt der Schlaufenbildung der Stehfäden bei zu geringen Zugkräften untersucht werden. Dazu wird in der oben beschriebenen Simulation die Zugkraft der Stehfäden herabgesetzt. In Abb. 6.19 ist das Ergebnis der Simulation zu sehen. Es ist gut zu erkennen, wie auch in der Simulation die Stehfäden Schlaufen bilden – ein Effekt, welcher auch in der Realität auftritt und in Abb. 4.15 sichtbar ist. Auch in diesem Fall weist die Simulation bei Berücksichtigung der Reibung zwischen den Fäden eine gute Übereinstimmung mit der Realität auf.

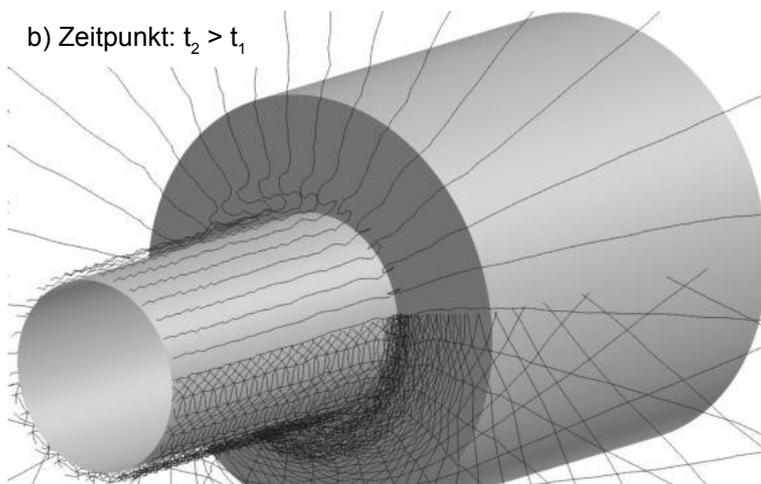
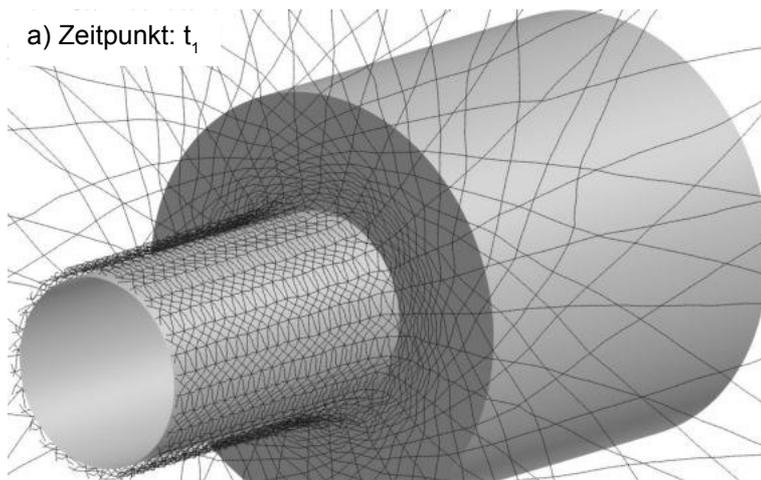


Abbildung 6.17 a-b:

a) Das Geflecht umschließt den Kern bis zum Flansch hin und bedeckt diesen. Im äußeren Bereich des Flansches gibt es noch Lücken.

b) Geflecht ist umgeschlagen und bildet am Flansch eine Falte. In der oberen Bildhälfte sind nur die Stehfäden dargestellt.



Abbildung 6.18: Überflochtener Flansch gemäß den durchgeführten Simulationen; das Geflecht schlägt am unterem Bereich des Flansches um, bedeckt diesen im oberen Bereich aber noch nicht vollständig.

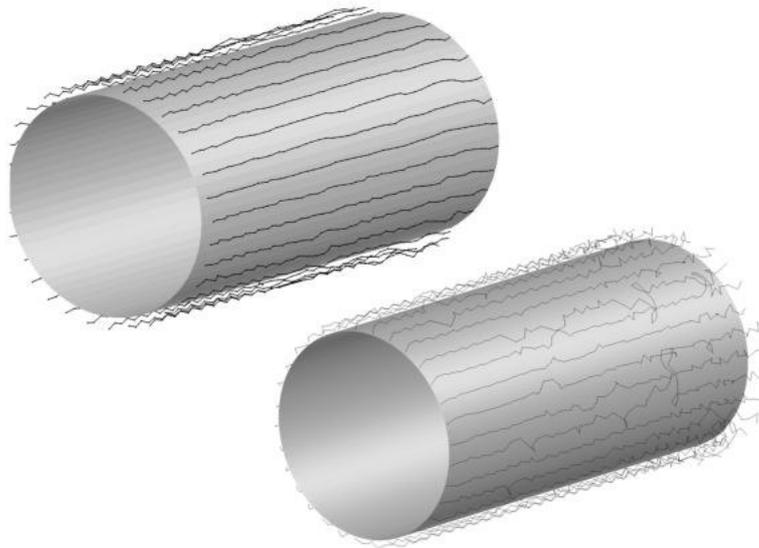


Abbildung 6.19: Darstellung der Stehfäden auf einem Kern (die Flechtfäden sind ausgeblendet); links: ausreichend hohe Stehfadenspannung. Rechts: deutlich reduzierte Stehfadenspannung, mit der Folge einer Schlaufenbildung

Da die Simulationen für das dargestellte Modell eine gute Übereinstimmung mit der Realität aufweisen, soll anhand dieses Modells untersucht werden, wie eine variable Fadenzugkraft zu einer Verbesserung des Flechtprozesses beitragen kann. Dazu wird bei zuvor benanntem Modell die Fadenzugkraft der Fäden verändert, sobald das Geflecht den Flansch erreicht hat. Bei den Stehfäden wird die Kraft deutlich erhöht. Das Ergebnis ist in Abb. 6.20 dargestellt. Es zeigt sich, dass es hier nicht mehr zum Umklappen des Geflechts am Flansch kommt. Dieser kann soweit beflochten werden, bis das Geflecht geschlossen ist. Dann kann der Kern auf dem größeren Durchmesser weiter beflochten werden. Hier zeigt sich, dass eine variable Fadenzugkraft das Spektrum der beflochtenen Geometrien deutlich erweitert.

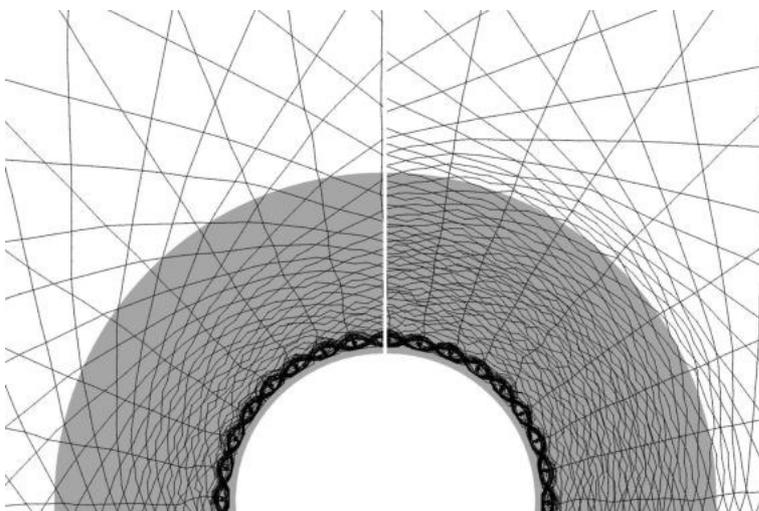


Abbildung 6.20: Bedeckungsgrad des Flanschs durch die Flechtfäden; links bei konstanter Fadenzugkraft, kurz bevor das Geflecht umschlägt; rechts bei variabler Fadenzugkraft, bis eine gleichmäßige Bedeckung erreicht ist

6.6. Zusammenfassung der Untersuchungen zur Geflechtprozesssimulation

Insgesamt gibt es wenig Arbeiten auf dem Gebiet der Prozesssimulation für das Flechten. Meistens werden Ansätze mit Differenzenverfahren verwendet, die keine ausreichende Genauigkeit liefern, wenn komplexe Körper umflochten werden sollen. Nur ein Ansatz mit der FE-Methode scheint zielführend zu sein, wie er für 3D-Geflechte erprobt wurde. Es sind aber lediglich Arbeiten aus Aachen dazu gefunden worden.

Am IFB wurde deshalb eine FE-Prozess-Simulation für Radialflechtmaschinen entwickelt und in Rahmen dieser Arbeit validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Simulation prinzipiell den Fadenverlauf auch auf komplexeren Kerngeometrien gut wiedergibt, zwei Punkte aber lediglich unzureichend oder gar nicht berücksichtigt – zum einen die Reibung zwischen den Fäden: Diese lässt sich erst mit der aktuellen Solver-Version berücksichtigen, ist aber entscheidend für realitätsnahe Ergebnisse und zum anderen die Veränderung des Garnquerschnitts je nach Randbedingung.

Für die lokalen Verformungen der Garne wurden hier zwei Ansätze vorgestellt. Zum einen die Verwendung von Faserbündeln für einen Flechtfaden, zum anderen lokal variable Kontaktbedingungen für jeden Flechtfaden. Beide Methoden passen die Lagendicke gemäß der Ablagebreite der Fäden an. Allerdings sind beide Ansätze aktuell so rechenintensiv, dass der Einsatz mit heutigen Rechnern nur bedingt sinnvoll ist.

Daneben kann durch die Verwendung von Schalenelementen sowohl Reibung als auch die Verformung der Garnquerschnitte berücksichtigt werden, wie in den Arbeiten von Böhler [94] genauer untersucht.

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

Die Flechttechnik für Herstellung von FVB zu verwenden, ist eine Idee, die seit mindestens 20 Jahren verfolgt wird. Allerdings konnte sich die Technik weder großflächig etablieren, noch wurde die Entwicklung ganz aufgegeben. Ursache ist einerseits das immer wieder gezeigte Potenzial der Flechttechnik vor allem für komplexere Hohlstrukturen. Andererseits zeigen sich aber auch immer wieder eine hohe Komplexität bei der Umsetzung von Produktionsprozessen und deutliche Beschränkungen durch die Maschinenteknik, welche für deutlich robustere Fasern entwickelt wurde.

Durch zahlreiche Versuche konnten die Randbedingungen und aktuellen Grenzen der Flechttechnik aufgezeigt werden. Solange annähernd runde Querschnitte verwendet werden, wird mit der Flechttechnik eine sehr gute Faserwinkelgenauigkeit bei gleichzeitig großem Winkelbereich erreicht. So lassen sich auch gekrümmte Strukturen und variable Querschnitte sicher herstellen. Es wird jedoch auch deutlich, dass mit zunehmender Abweichung von der Idealform die Qualität des Geflechts abnimmt. So können zwar noch in einem weitem Bereich faserverstärkte Prefroms hergestellt werden, optimale Kennwerte werden aber nicht mehr erreicht. Eine zentrale Rolle in diesem Zusammenhang spielen die Klöppel der Flechtmaschine. Dieses Element ist auch heute noch eine rein mechanisch aufgebaute Komponente. Daraus resultiert eine große Robustheit und Zuverlässigkeit, aber es fehlt auch jede Regel- und Steuerbarkeit. Zusätzlich werden durch den Klöppel die Fasern stark beansprucht, was Faserschädigungen hervorruft und zum einen die mechanischen Kennwerte des produzierten Faserverbundes reduziert, zum anderen die Prozesssicherheit einschränkt.

Für einen elektronisch gesteuerten Klöppel wurden die System- und Randbedingungen analysiert und definiert. Anhand eines Prototypen konnte die Funktionsweise nachgewiesen werden. Durch den geänderten Aufbau wird das Spektrum der verarbeitbaren Materialien erweitert und gleichzeitig die Fäden weniger geschädigt. Dies wird erreicht durch einen geraden Abzug von der Spule und nur einer 90° Fadenumlenkung im Klöppel.

Daneben wird eine deutlich konstantere Fadenzugkraft erreicht, die im Prozess verändert werden kann. Auch ist ein endloser Fadenrückzug möglich, was für spezielle Bauteile und vor allem für 3D-Flechtmaschinen von Interesse ist.

Um das gesamte Potenzial eines elektronisch gesteuerten Klöppels zu nutzen ist neben einer entsprechenden Steuerung auch eine Simulation des Flechtprozesses mit geeigneten Optimierungsprozessen notwendig. Eine Analyse der bestehenden Arbeiten im Bereich der Prozesssimulation zeigt den geringen Entwicklungsumfang. Die meisten Arbeiten beruhen auf Differenzenverfahren oder analytischen Lösungsansätzen, welche ungeeignet sind für eine realistische Simulation des Flechtprozesses. Es sind wenige Arbeiten vorhanden, die mittels FEM den Prozess abbilden. Diese weisen aber vielversprechende Ergebnisse auf.

In dieser Arbeit wurde ein FEM-Ansatz bezüglich seiner Realitätstreue genauer analysiert. Für einfache Querschnittsgeometrien gibt es sehr gute Übereinstimmungen. Bei komplexeren Querschnitten wird allerdings deutlich, dass bestimmte Parameter, wie bspw. Reibung oder Faserquerschnitte, noch nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Es konnte dargelegt werden, dass die Verformung der Faserquerschnitte sowohl über die Darstellung einer Faser mittels mehrerer Einzelstränge als auch über die Definition unterschiedlicher voneinander abhängiger Kontaktradien möglich ist. Beide Ansätze lassen aber den generell schon hohen Rechenaufwand exponentiell steigen, sodass dies aktuell eher akademische Lösungen sind.

Trotzdem konnte mittels der Simulation auch der Effekt einer variablen Fadenzugkraft im Flechtprozess überprüft werden. Es wurde gezeigt, dass eine Flanschstruktur, die mit konstanter Fadenzugkraft nicht befriedigend geflochten werden konnte, mit einer variablen Fadenzugkraft hergestellt werden kann.

7.2. Ausblick

Es konnte an einem Prototypen die Funktionsweise und -fähigkeit eines elektronisch gesteuerten Klöppels gezeigt werden. In Simulationen konnte zudem gezeigt werden, dass durch die Variation der Fadenzugkräfte das Prozessfenster des Flechtens erweitert werden kann. Dieses bedarf nun noch einer Beweisführung in der Realität.

Dazu sollte das Klöppelkonzept entsprechend der genannten Vorschläge ergänzt bzw. angepasst werden und auf einer Maschine integriert werden. Durch den Einsatz in einer Flechtmaschine können zudem Erfahrungen zur Handhabung, Robustheit und Ausfallsicherheit gesammelt werden. Für den Einsatz in einer Produktionsumgebung sind dies wichtige Faktoren. Bei der Integration in eine laufende Flechtmaschine werden sich zudem weitere Anwendungspotenziale zeigen, die aktuell noch nicht bedacht worden sind.

Für die effektive Nutzung der elektronisch gesteuerten Klöppel ist ebenfalls eine entsprechende Steuer- und Regelungsumgebung notwendig, die auch die Flechtmaschinensteuerung und Kernmanipulation einschließt. Eine solche Steuerung muss

jeden Klöppel einzeln ansprechen können und auch Fehlermeldungen auswerten sowie anzeigen können. Auch muss eine Programmier Ebene enthalten sein, die es ermöglicht, auf effektive Weise die Fadenzugkräfte für die einzelnen Klöppel zu verschiedenen Zeitpunkten zu programmieren.

Prinzipiell kann diese Programmierung auch aus entsprechenden Simulationen heraus automatisch erzeugt werden. Dazu ist es allerdings notwendig Simulationsumgebungen und Preprozessoren weiter zu entwickeln. Die untersuchten FEM-Ansätze zeigen das Potenzial für eine ausreichend genaue Simulation des Flechtprozesses. Insbesondere die Querschnittsgeometrien der Fasern und Reibeffekte zwischen den Fasern werden allerdings aktuell noch nicht ausreichend berücksichtigt. Auch Optimierungsroutinen für den Flechtprozess selber fehlen derzeit noch vollständig und müssen entwickelt werden. Diese sind auch für die heute verwendeten mechanischen Klöppel von Interesse, da heutzutage der Prozess durch die Erfahrung des Maschinenanwenders und zahlreiche Versuche optimiert und eingestellt wird.

A Formelherleitung

Im Folgenden werden die in Abschnitt 4.1 dargestellten Formeln hergeleitet, sofern notwendig.

A.1 Ablagemenge

Um die Ablagemenge zu bestimmen wird zuerst die Länge des abgelegten Fadens bei einem Umlauf des Klöppels in der Maschine bestimmt. Die Zeit (t_u) die der Klöppel dafür braucht, lässt sich gemäß folgender Formel bestimmen:

$$t_u = \frac{1}{n_{fr}} \cdot \frac{1}{2} \cdot N_{fr} \quad (21)$$

Dabei ist n_{fr} die Flügelraddrehzahl und N_{fr} die Anzahl der Flügelräder. Der Faktor 0,5 ist notwendig, da der Klöppel immer nur für eine halbe Umdrehung auf einem Flügelrad sitzt und dann zum nächsten weitergegeben wird.

Zur Bestimmung der Fadenlänge wird von einem konstanten Querschnitt des Kerns ausgegangen. Nach Abbildung 4.1 gilt dann:

$$l_{ff} = \frac{U_P}{\sin(\alpha)} \quad (22)$$

Mit Gleichung 3 (Seite 62) die den Zusammenhang zwischen Umfang und Ablagebreite herstellt lässt sich Gleichung 22 wie folgt umschreiben:

$$l_{ff} = \frac{N_{ff} \cdot b_{ff}}{\cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \quad (23)$$

Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein geschlossenes Geflecht erzeugt wird.

Mit dem Titer der Fasern (tex_{ff}) kann auf die Masse geschlossen werden.

$$m_{ff} = tex_{ff} \cdot l_{ff} = \frac{tex_{ff} \cdot N_{ff} \cdot b_{ff}}{\cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \quad (24)$$

Damit wurde die Menge bestimmt, die von Klöppel bei einem Umlauf in der Maschine ablegt. Mit Gl. 21 kann diese noch auf die Zeit bezogen werden.

$$\frac{m_{ff}}{t_u} = \frac{2 \cdot \text{tex}_{ff} \cdot N_{ff} \cdot b_{ff} \cdot n_{ff}}{N_{ff} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \quad (25)$$

A.2 Faseranteile

Die Masse an abgelegten Fasern auf der Kernlänge l lassen sich für die Stehfäden (Index sf) bzw. Flechtfäden (Index ff) nach folgenden Formeln berechnen:

$$m_{sf-l} = N_{sf} \cdot \text{tex}_{sf} \cdot l \quad (26)$$

$$m_{ff-l} = 2 \cdot N_{ff} \cdot \text{tex}_{ff} \cdot \frac{l}{\cos(\alpha)} \quad (27)$$

Der Anteil der Stehfäden an der Gesamtmasse lässt sich dann wie folgt bestimmen:

$$\frac{m_{sf-l}}{m_{sf-l} + m_{ff-l}} = \frac{\text{tex}_{sf} \cdot N_{sf} \cdot l}{\text{tex}_{sf} \cdot N_{sf} \cdot l + \text{tex}_{ff} \cdot N_{ff} \cdot \frac{l}{\cos(\alpha)}} \quad (28)$$

$$\psi_{sf} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot N_{ff} \cdot \text{tex}_{ff}}{N_{sf} \cdot \text{tex}_{sf} \cdot \cos(\alpha)}}$$

A.3 Flächengewicht

Um das Flächengewicht zu bestimmen, müssen die Massen aus Gleichung 26 und Gleichung 27 auf die Fläche bezogen werden.

$$Z = \frac{N_{sf} \cdot \text{tex}_{sf} \cdot l + 2 \cdot N_{ff} \cdot \text{tex}_{ff} \cdot \frac{l}{\cos(\alpha)}}{U_p \cdot l} \quad (29)$$

Mit Gleichung 3 auf Seite 62 lässt sich der Umfang durch die Ablagebreite ersetzen.

A.4 Bestimmung der Fadenhöhe

A.4.1 Methode 1

Zur Bestimmung der Fadenhöhe muss neben der Fläche auch die Breite bekannt sein. In Abb. 4.7 ist der Querschnitt eines Geflechts dargestellt. Es wird deutlich, dass sowohl die Stehfäden als auch die Flechtfäden in Umfangsrichtung Platz verbrauchen. Die Summe aller Stehfadenbreiten und die Summe der Flechtfadenbreiten

in Umfangsrichtung müssen dem Umfang entsprechen. Es lässt sich dann folgende Formel aufstellen:

$$U_P = b_{sf} \cdot N_{sf} + N_{sf} \cdot \frac{t_{ff}}{\sin(\beta)} \quad (30)$$

Mit Gleichung 3 auf Seite 62 und Gleichung 9 auf Seite 70 lässt sich Gleichung 30 wie folgt umformen:

$$N_{ff} \cdot \frac{b_{ff}}{\cos(\alpha)} = b_{sf} \cdot N_{sf} + \frac{N_{sf}}{\sin(\beta)} \cdot \frac{4 \cdot A_{ff}}{\pi \cdot b_{ff}} \quad (31)$$

Für die Fläche des Stehfadens gilt (unter der Annahme einer elliptischen Querschnittsfläche):

$$A_{sf} = \frac{\pi}{4} \cdot b_{sf} \cdot t_{sf} \quad (32)$$

Gleichung 32 nach b_{sf} aufgelöst und in Gleichung 31 ergibt:

$$N_{ff} \cdot \frac{b_{ff}}{\cos(\alpha)} = N_{sf} \cdot \frac{4 \cdot A_{sf}}{\pi \cdot t_{sf}} + \frac{N_{sf}}{\sin(\beta)} \cdot \frac{4 \cdot A_{ff}}{\pi \cdot b_{ff}} \quad (33)$$

Gleichung 33 nach t_{sf} aufgelöst ergibt Gleichung 11 auf Seite 70.

A.4.2 Methode 2

Unter der Annahme eines konstanten Umfanges lässt sich das Volumen des Bauteils wie folgt bestimmen:

$$V_{eff} = \frac{V_C}{FVG} = U_P \cdot l \cdot t_P \quad (34)$$

Dieses Volumen kann mittels des Faservolumengehalts (FVG) auch in das Volumen der Kohlenstofffasern (V_C) umgerechnet werden. Die Annahme eines konstanten Querschnittes stellt keine Einschränkung der Formel da, da sich die Länge später wieder heraus kürzt und damit die Formel nur abhängig vom Umfang ist. Die Vereinfachung, dass das Volumen mittels Höhe x Breite x Tiefe berechnet wird, ist für die meisten dünnwandigen Bauteile zulässig. Falls dieses in besonderen Fällen nicht der Fall sein sollte, kann die Formel leicht gepasst werden.

Das Volumen der Kohlenstofffasern kann mittels der Dichte (ρ_c) auch wie folgt bestimmt werden:

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} \quad (35)$$

Mit Gleichung 26 und Gleichung 27 für die Massen der Fäden und der Anzahl der Lagen ergibt sich:

$$V_c = N_L \cdot \frac{N_{sf} \cdot \text{tex}_{sf} \cdot l + 2 \cdot N_{ff} \cdot \text{tex}_{ff} \cdot \frac{l}{\cos(\alpha)}}{\rho_c} \quad (36)$$

Gleichung 36 in Gleichung 34 eingesetzt ergibt:

$$N_L \cdot \frac{N_{sf} \cdot \text{tex}_{sf} \cdot l + 2 \cdot N_{ff} \cdot \text{tex}_{ff} \cdot \frac{l}{\cos(\alpha)}}{\rho_c \cdot FVG} = U_P \cdot l \cdot t_P \quad (37)$$

Diese Gleichung nach t_P aufgelöst ergibt Gleichung 12 auf Seite 70.

A.5 Besetzungsregel

Gleichung 18 kann wie folgt hergeleitet werden:

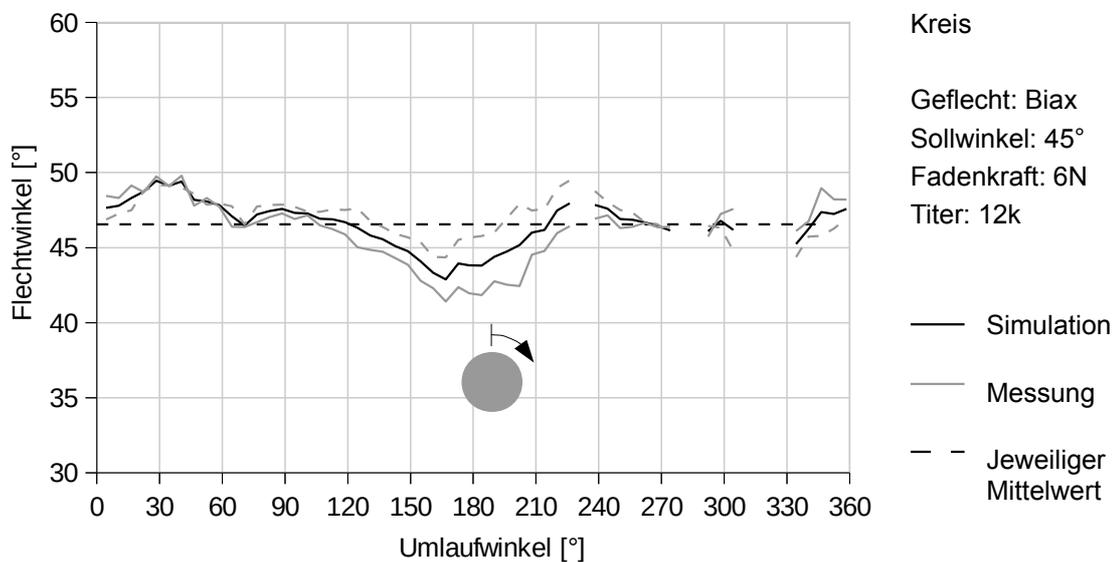
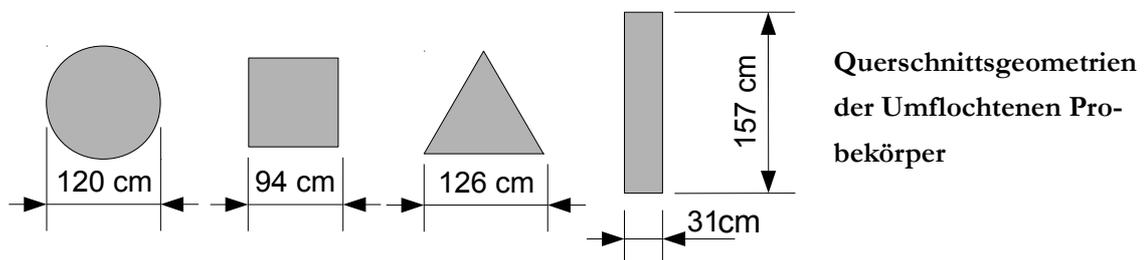
Damit ein Geflecht entsteht, muss ein Faden in regelmäßigen Abständen mal über, mal unter den gegenläufigen Fäden geführt werden. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, geschieht das dadurch, dass die Klöppel auf den Flügelrädern abwechselnd rechts und links herum bewegt werden. Wenn ein Klöppel wie in Abb. 4.13 der Klöppel ganz rechts, unterhalb eines entgegenkommenden geführt wird, ist entscheidend, ob er bei der nächsten Begegnung mit einem entgegenkommenden Klöppel wieder unterhalb geführt wird und die Gesamtstellung der Klöppel in der Maschine die Gleiche ist wie bei der ersten Überkreuzung. Wenn dies der Fall ist, wird der Klöppel auch bei allen folgenden Begegnungen mit entgegenkommenden Klöppeln unterhalb dieser durchgeführt und es entsteht kein Geflecht. Bei Flechtmaschinen ist die Klöppelführung auf jedem zweiten Flügelrad gleich. Das bedeutet die Begegnung mit den nächsten Klöppel darf nicht auf dem zweiten, vierten, sechsten, usw. Flügelrad der Ausgangsposition stattfinden. Deshalb darf Gleichung 4.13 keine gerade Zahl ergeben, da in der Gleichung bestimmt wird, auf welchem Flügelrad die nächste Begegnung mit einem Klöppel stattfindet. Dazu wird die Zahl der Schritte bis zur nächsten Begegnung bestimmt: $0,5 \cdot N_{JKL}$. Diese Zahl wird durch die Zahl der Schritte die ein Klöppel auf einem Flügelrad macht geteilt.

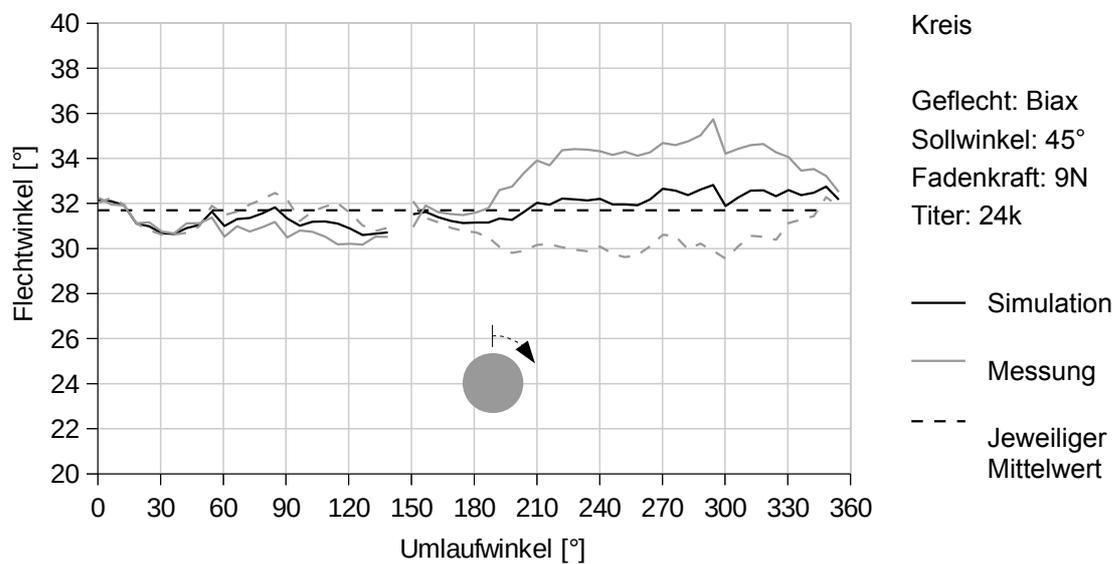
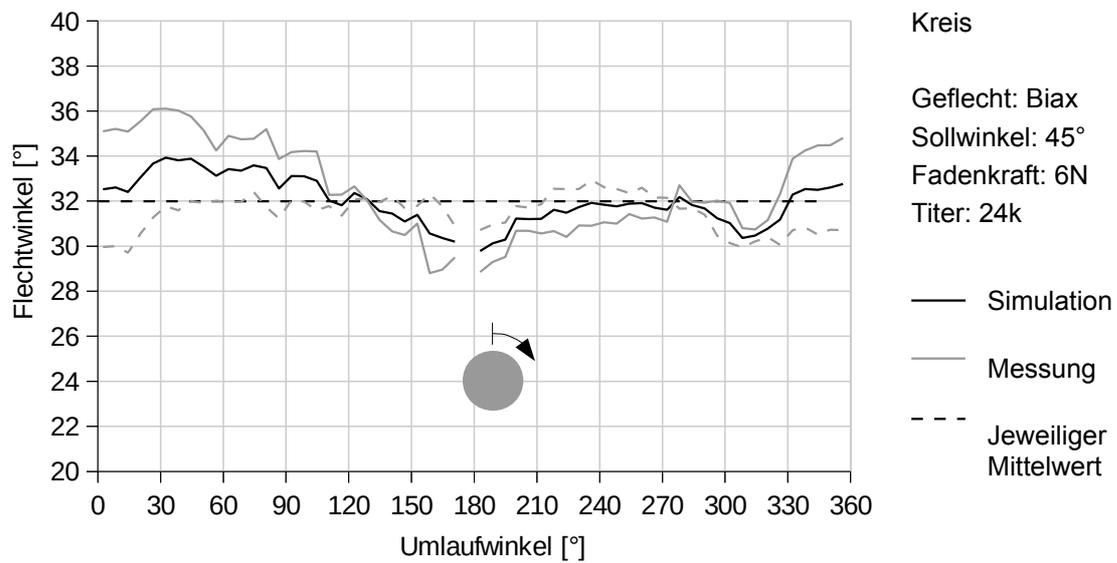
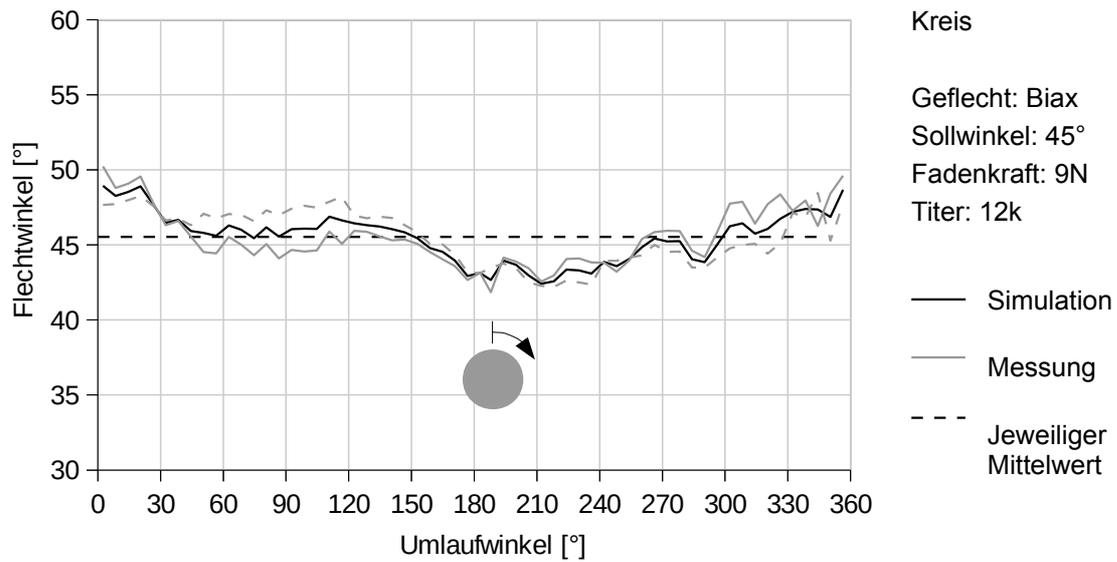
B Vergleichsdiagramme Versuch und Simulation

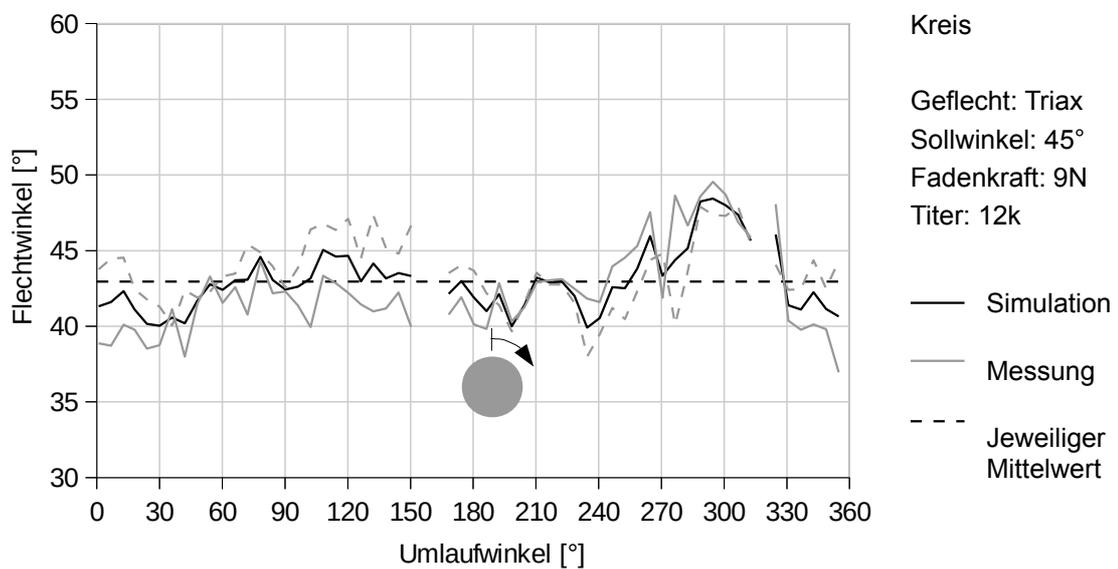
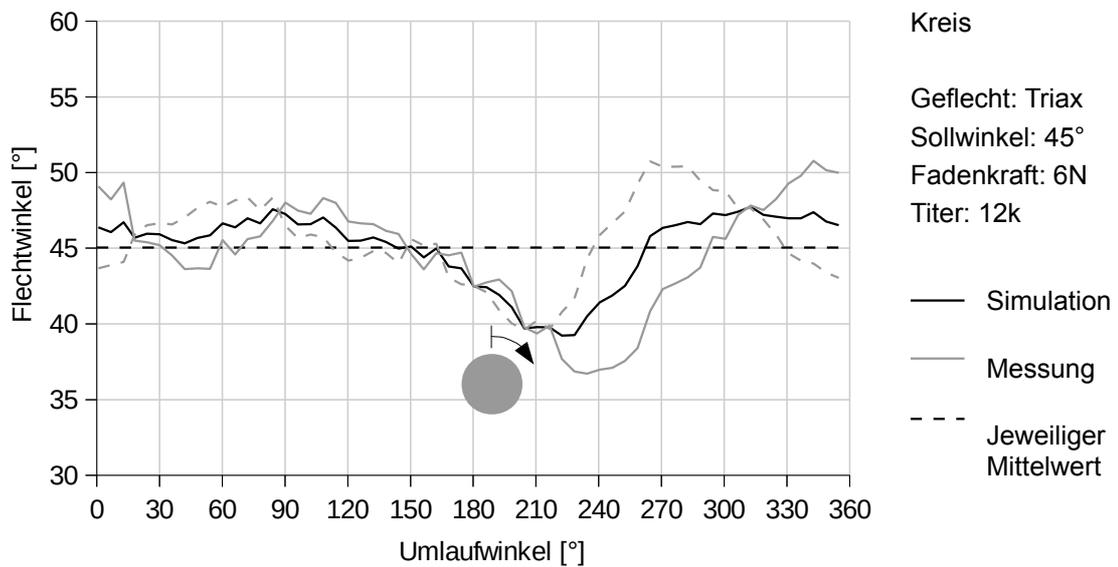
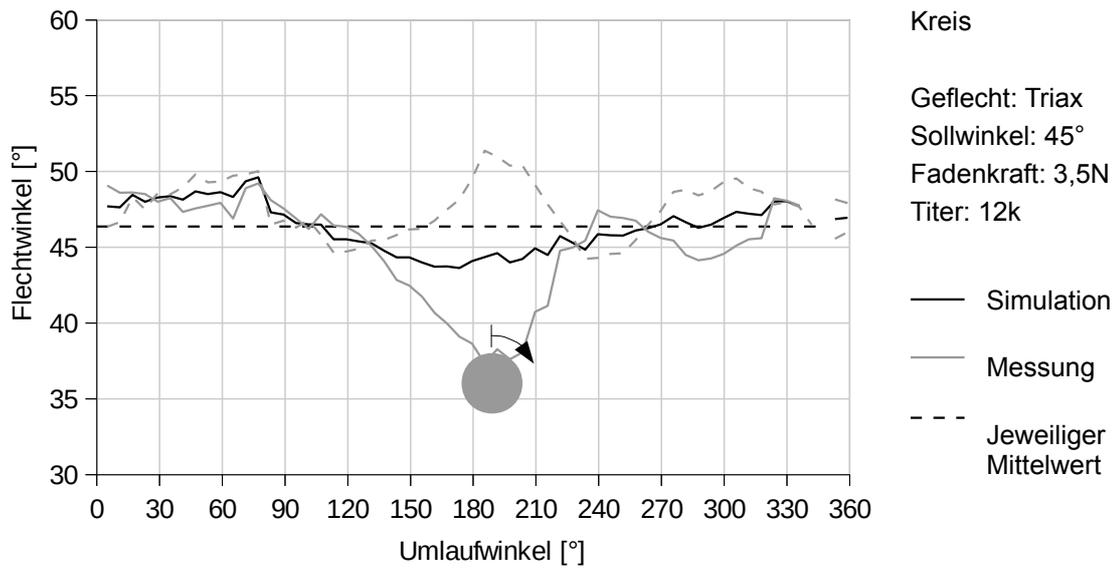
Im Folgenden sind alle Faserwinkelanalysen der umflochtenen Probekörper (s. Abschnitt 6.3 Seite 151) dargestellt. Die Darstellung der Querschnitte in Abbildung 6.2 und die Tabelle 9 der durchgeführten Versuche sind zur besseren Übersicht den Diagrammen vorangestellt.

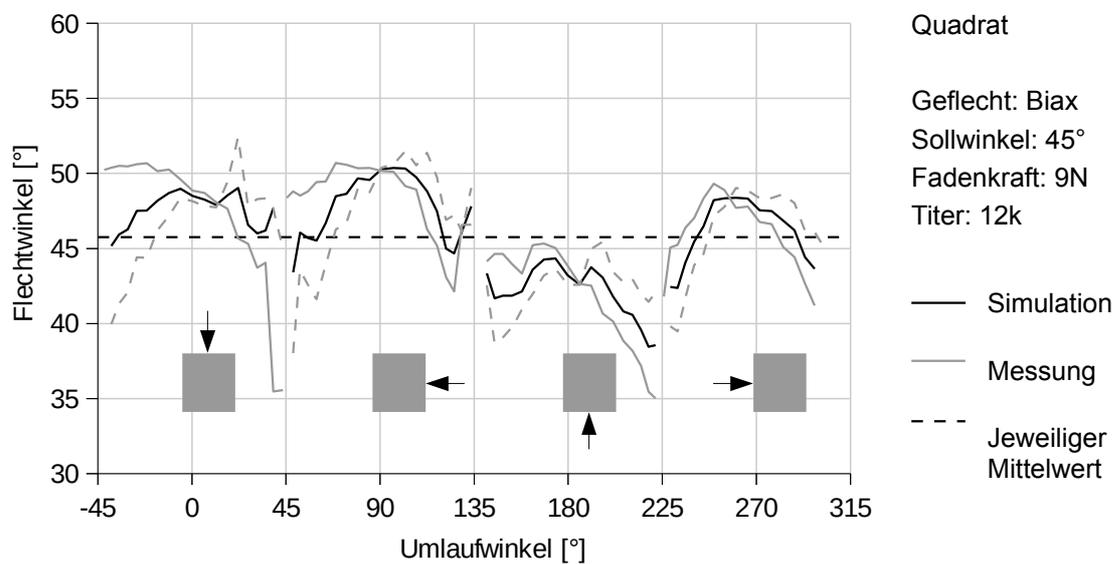
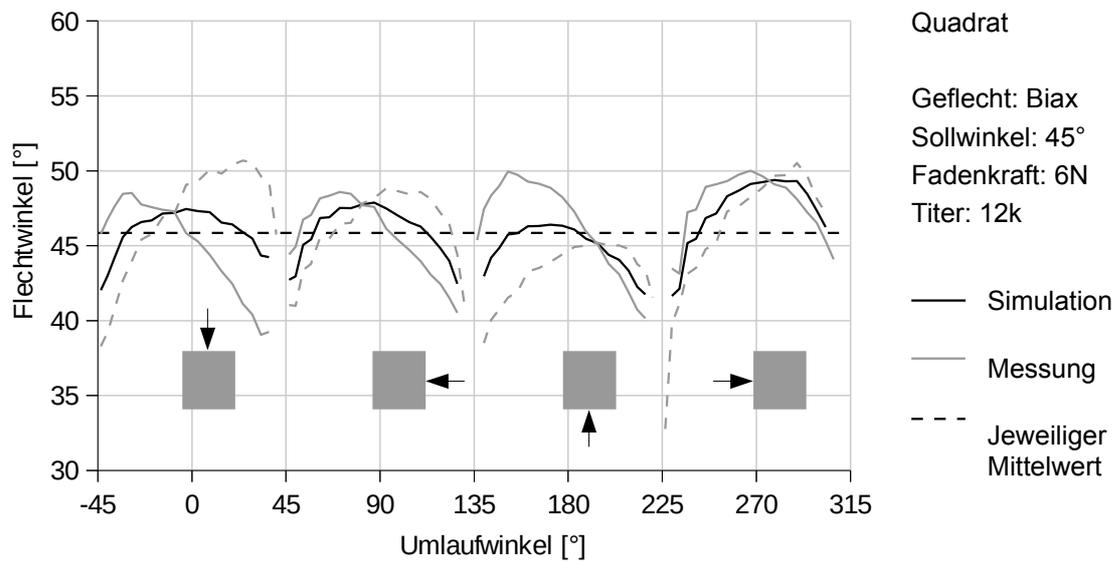
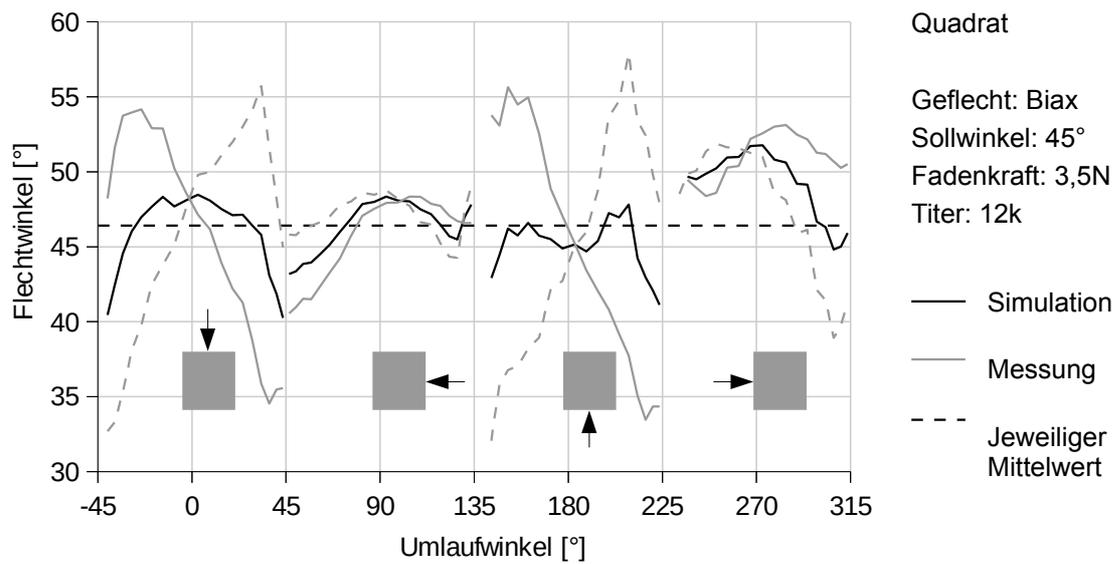
Faser	Geflechtart		Biax			Triax	
	350g	600g	600g	900g	350g	600g	900g
TohoTenax HTS 12k	45°	45°	45°	45°	45°	45°	45°
TohoTenax HTS 24k	-	30°	30°	-	-	-	-

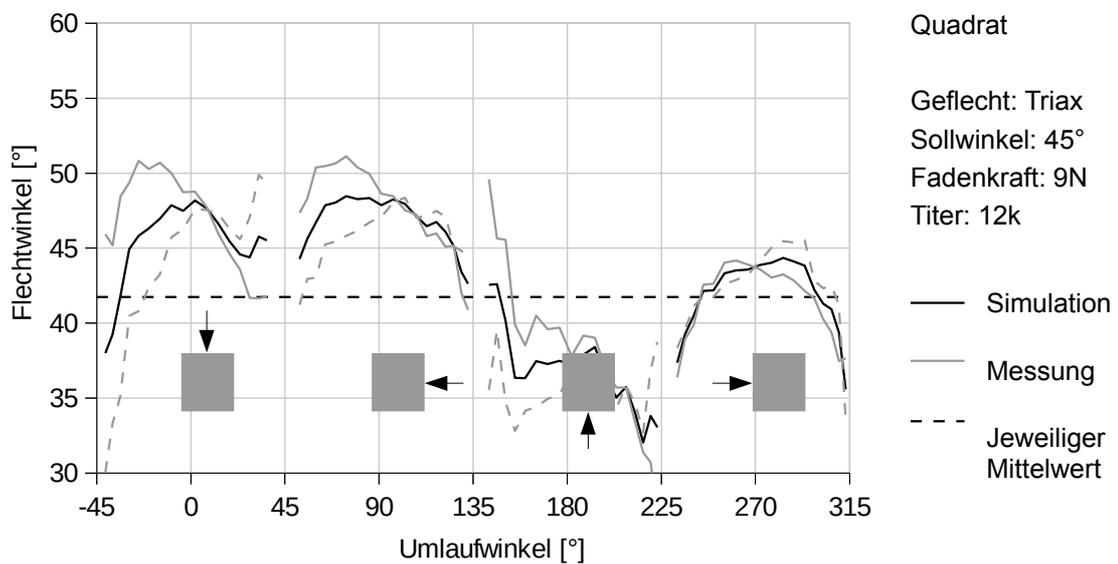
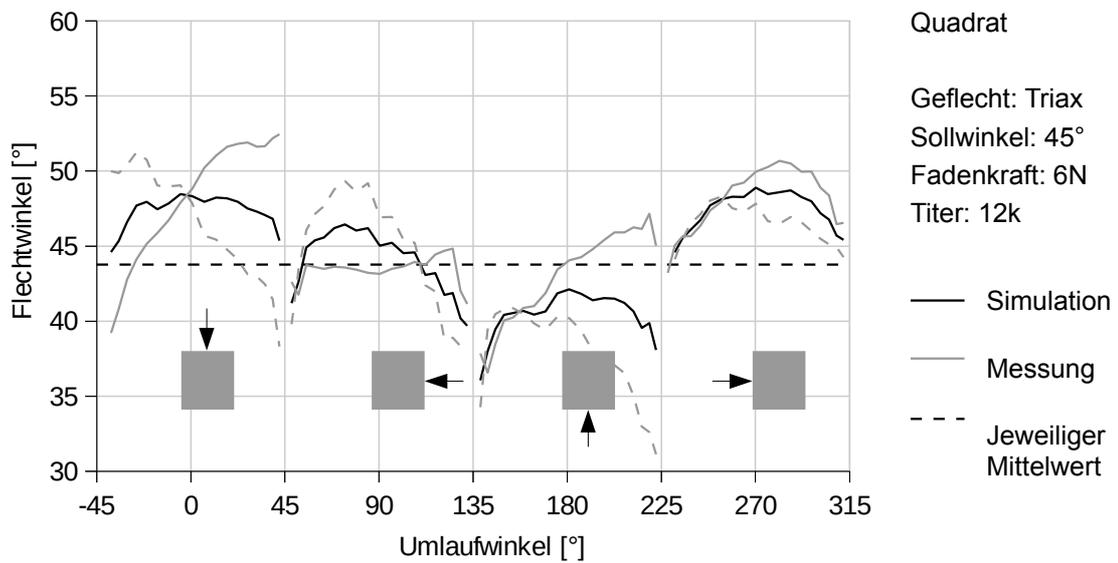
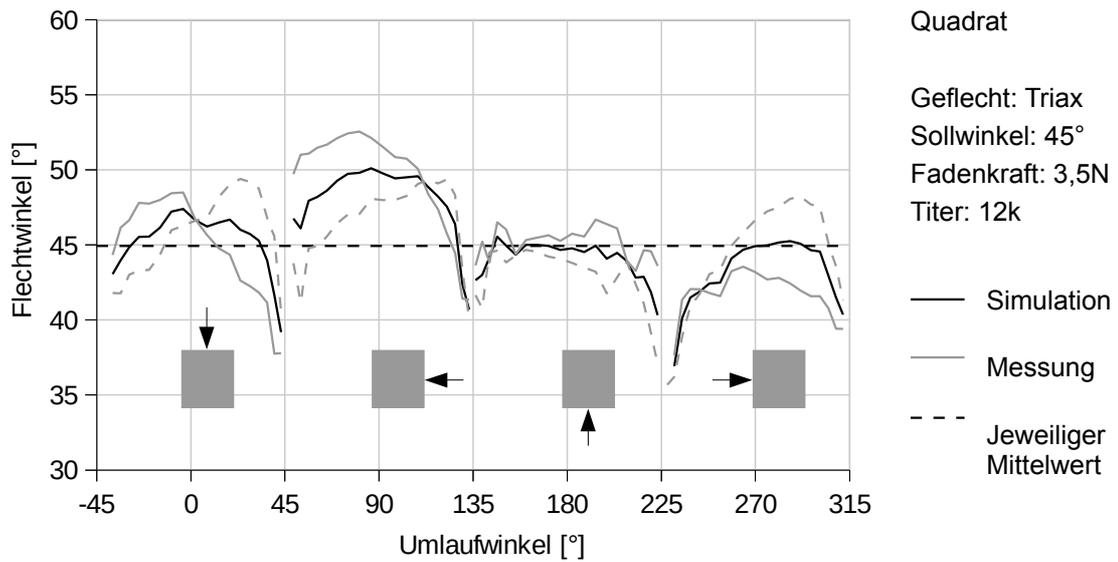
Übersicht der Randbedingungen der durchgeführten Messungen

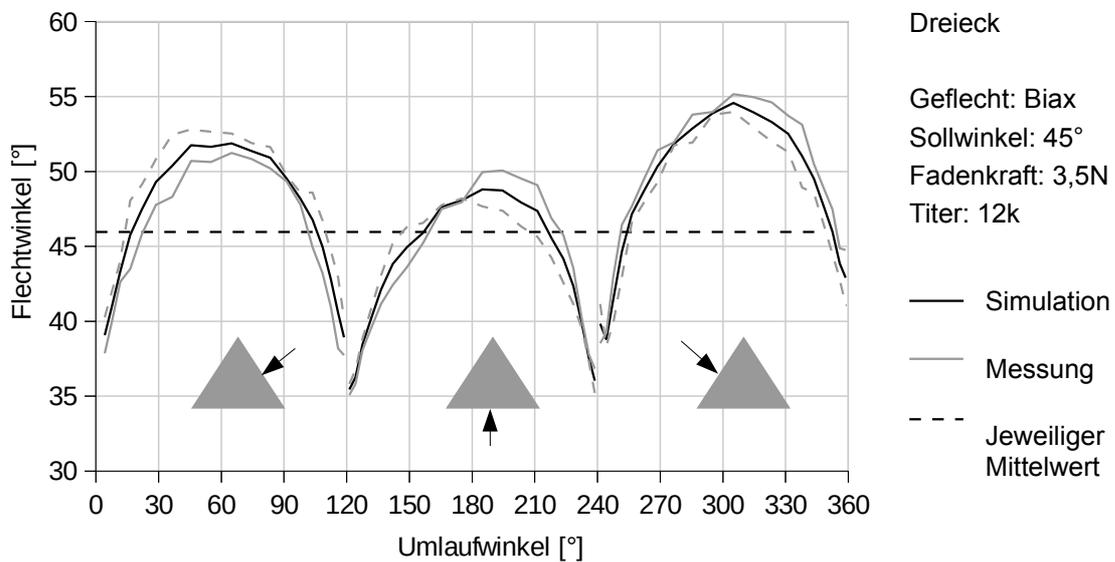
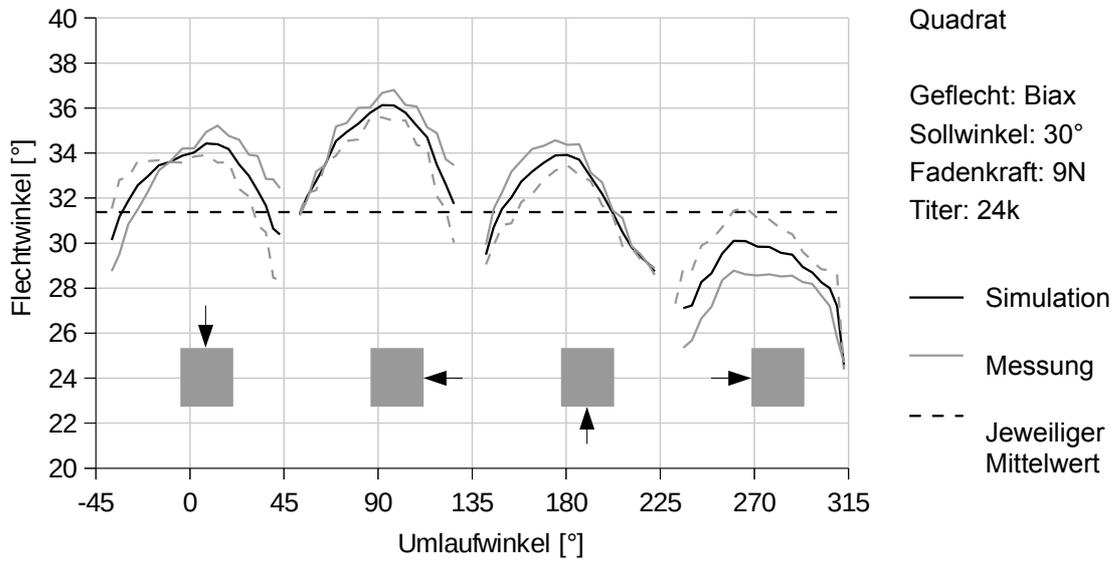
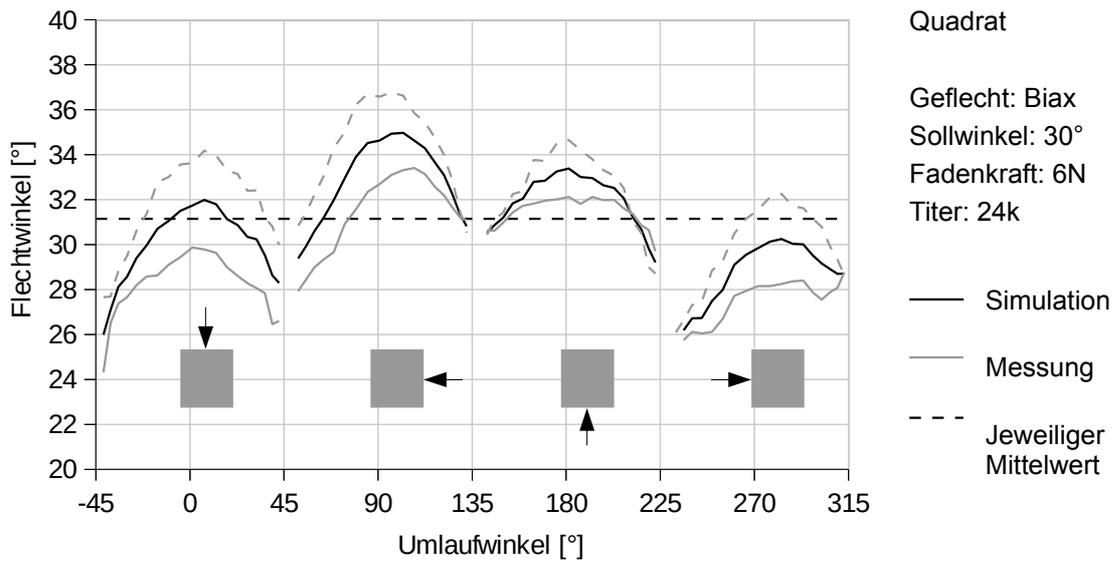


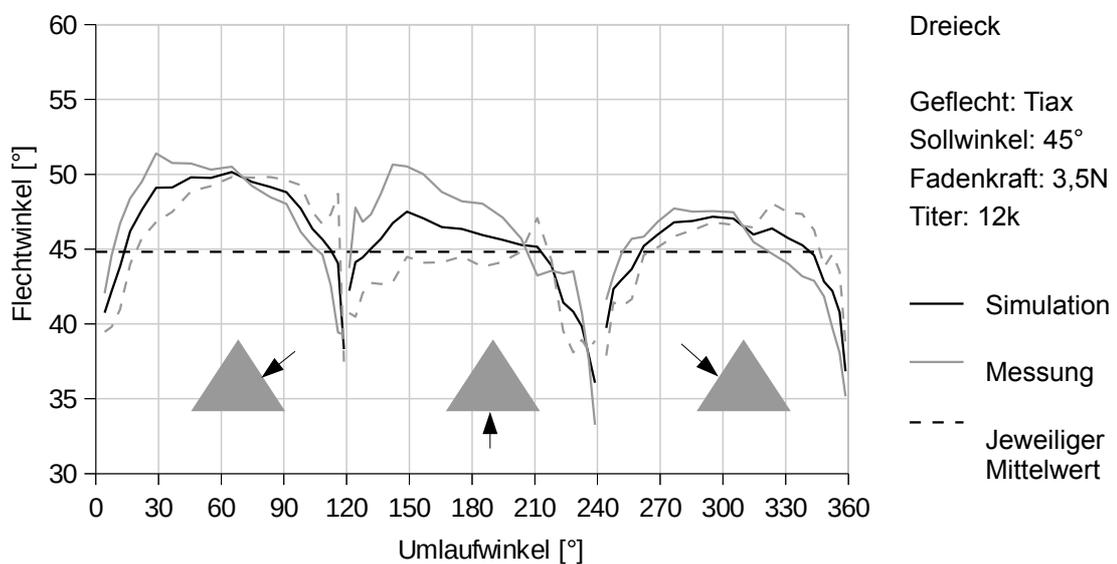
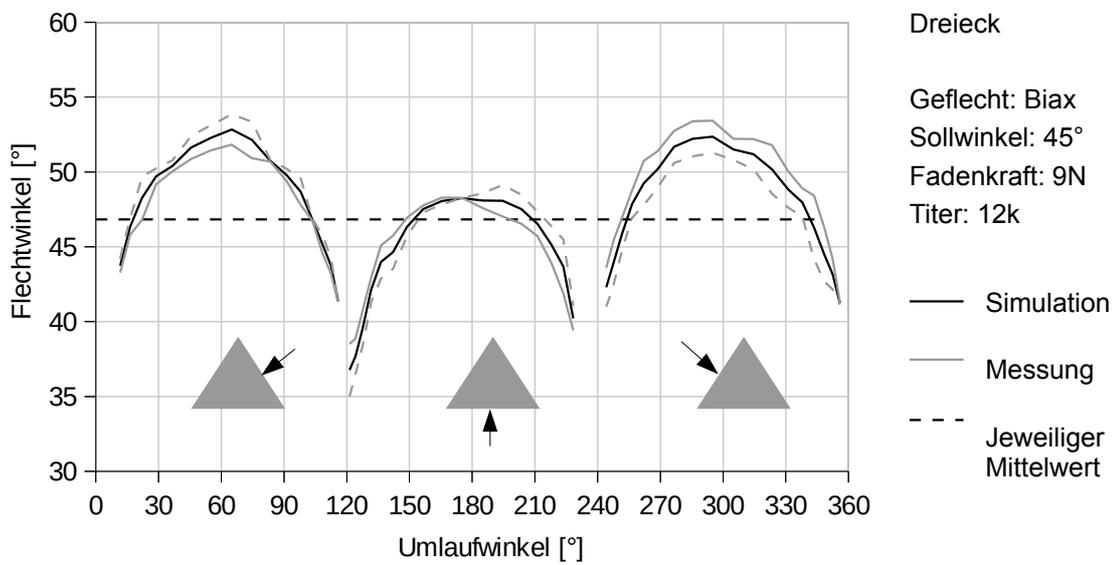
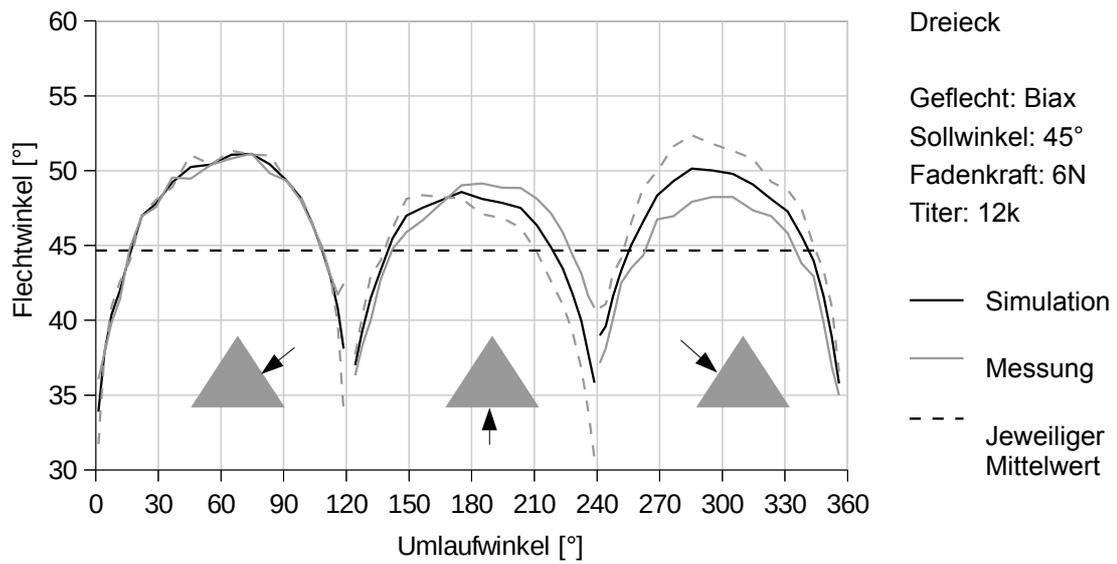


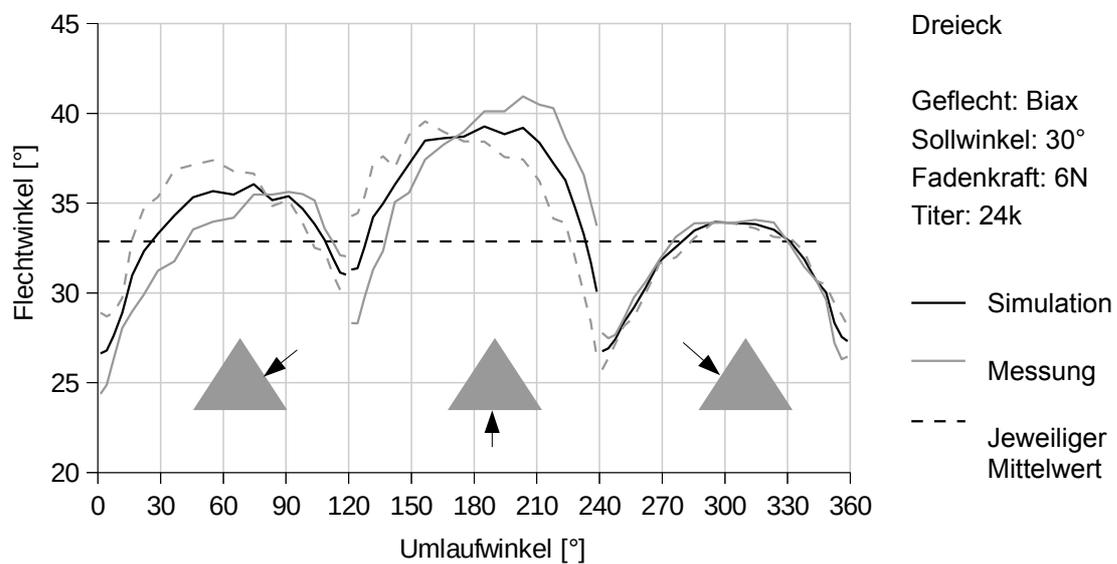
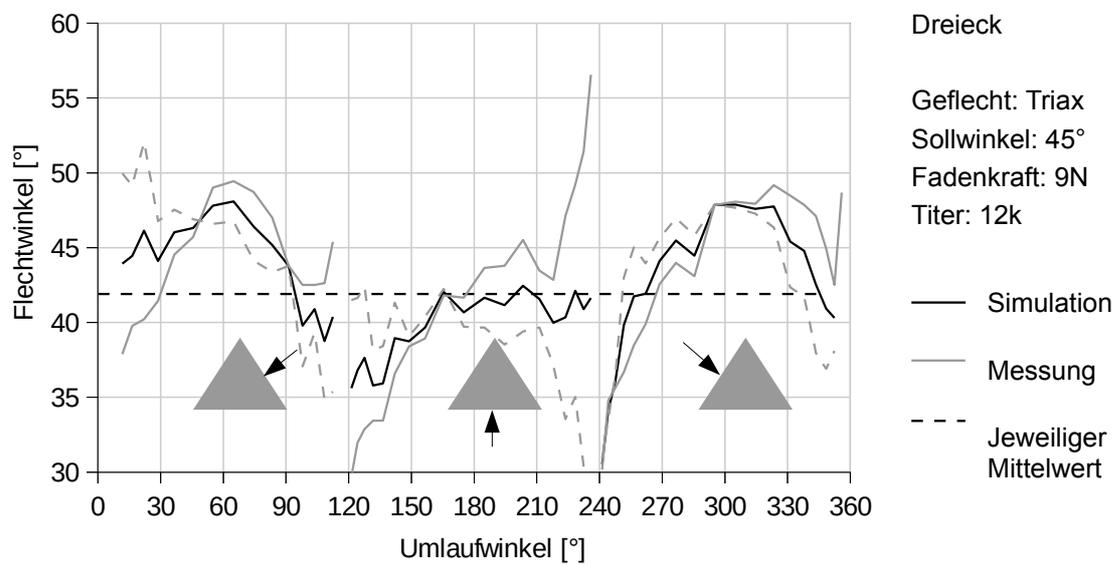
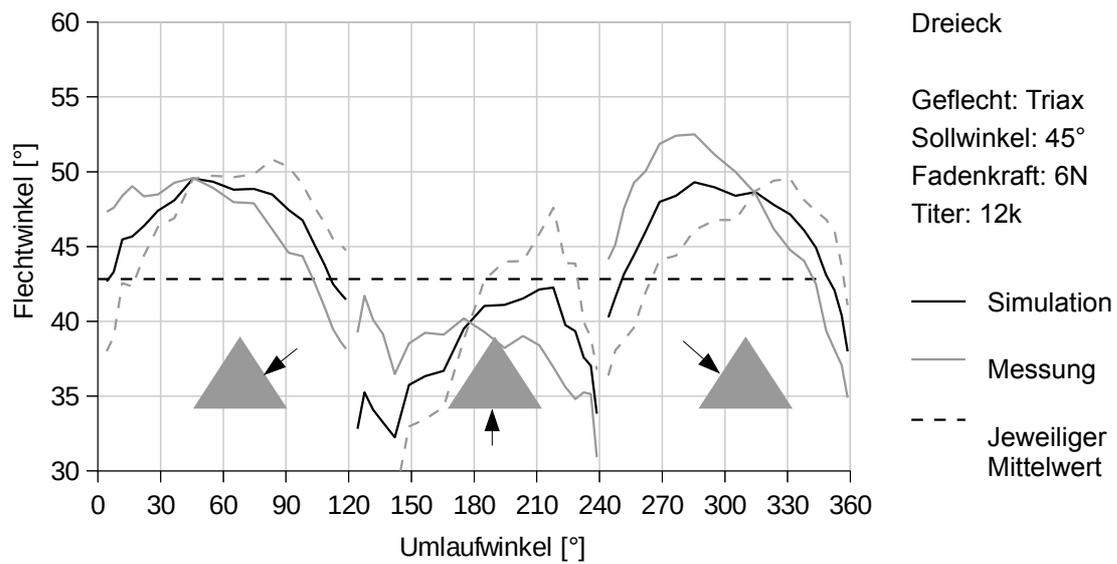


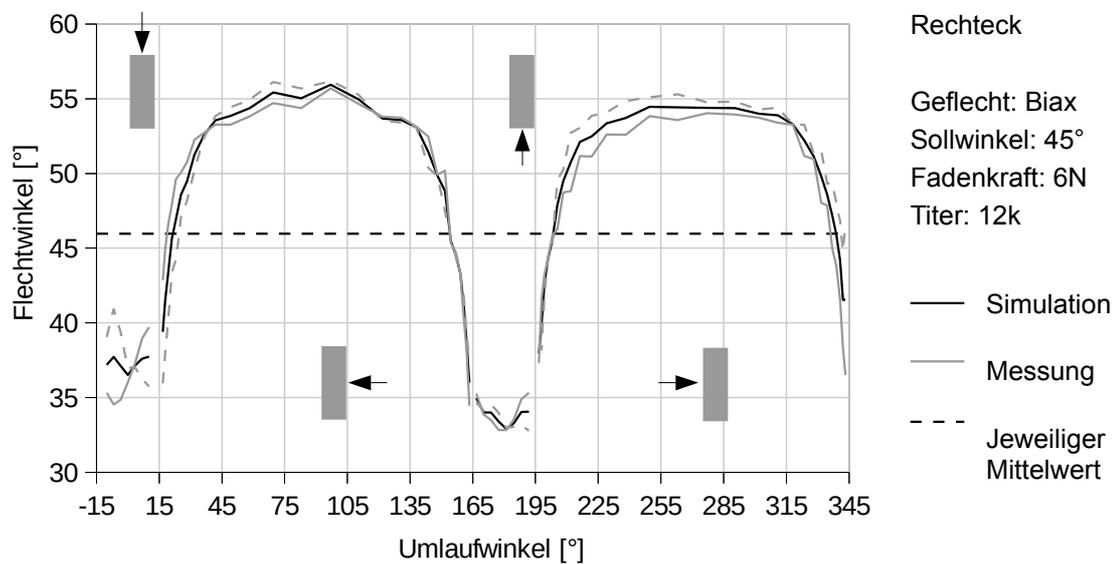
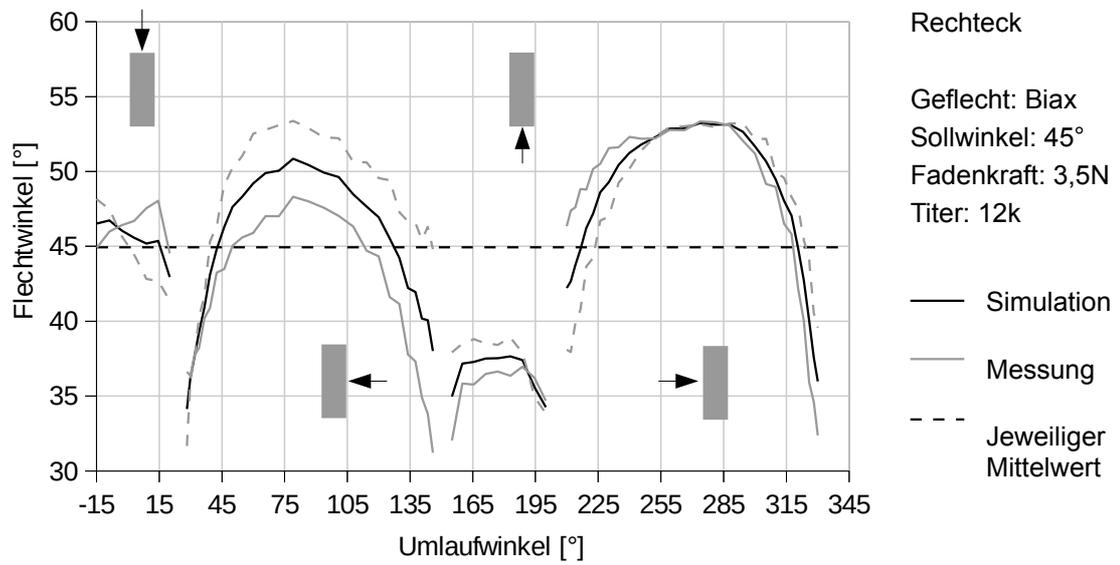
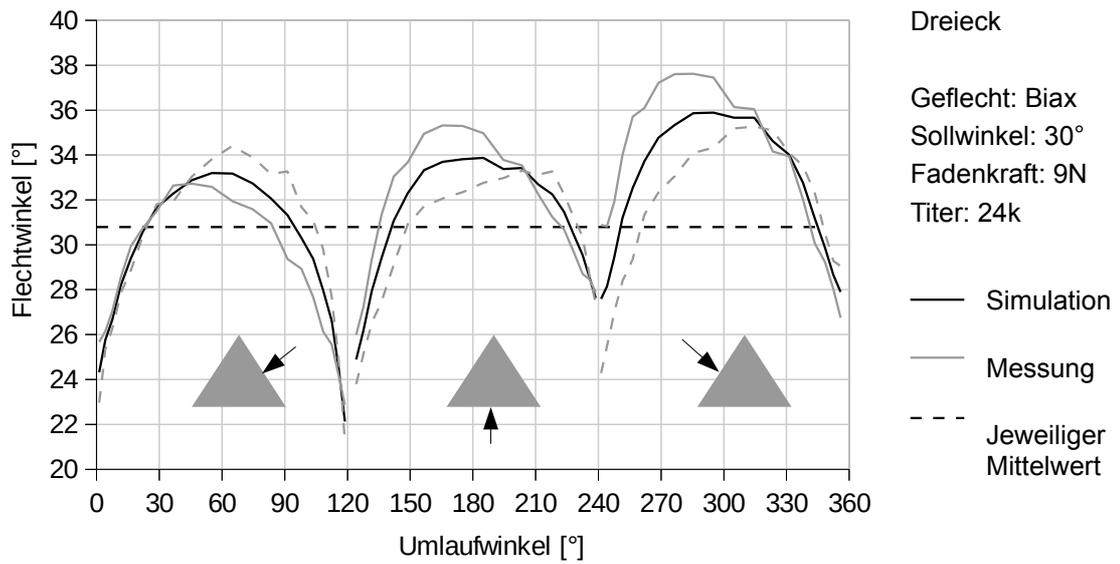


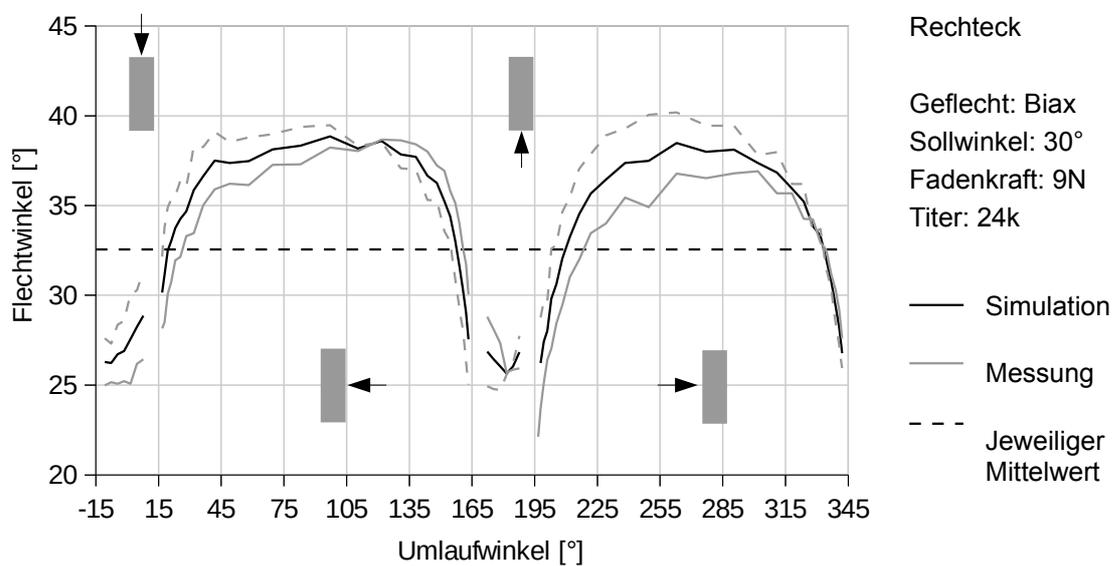
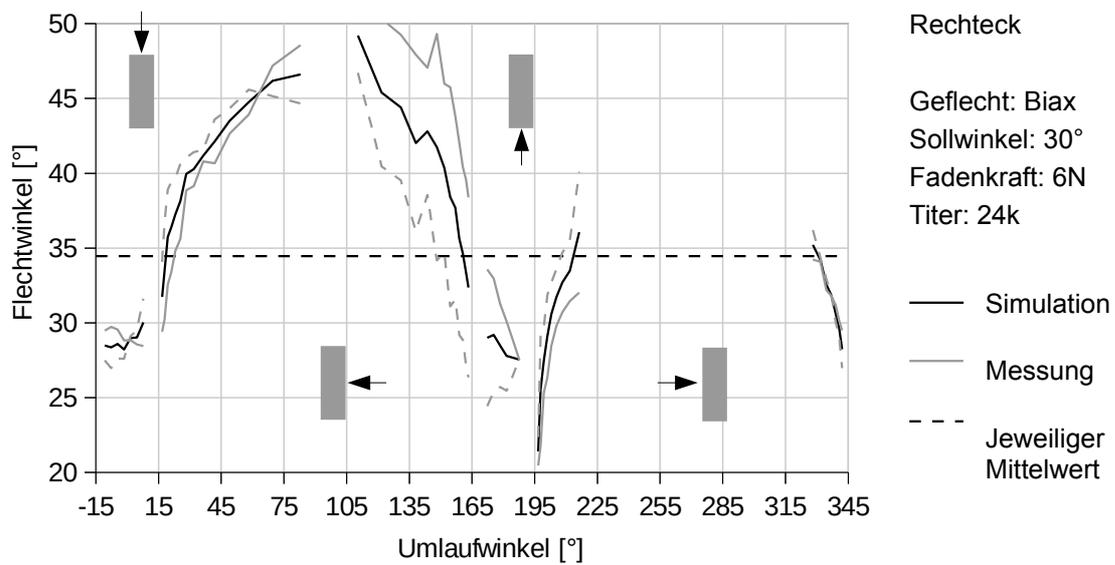
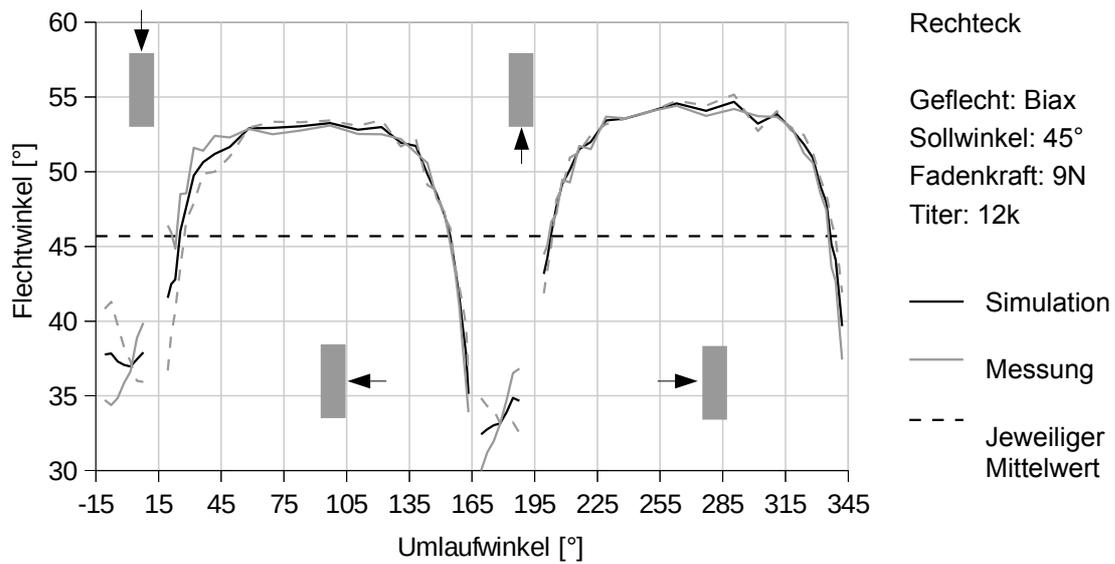


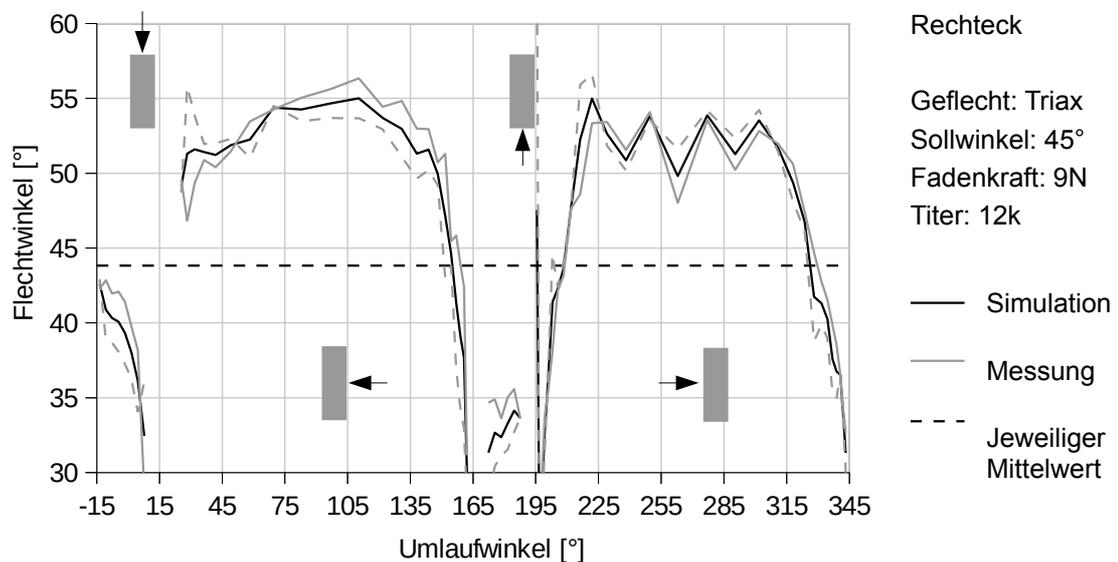
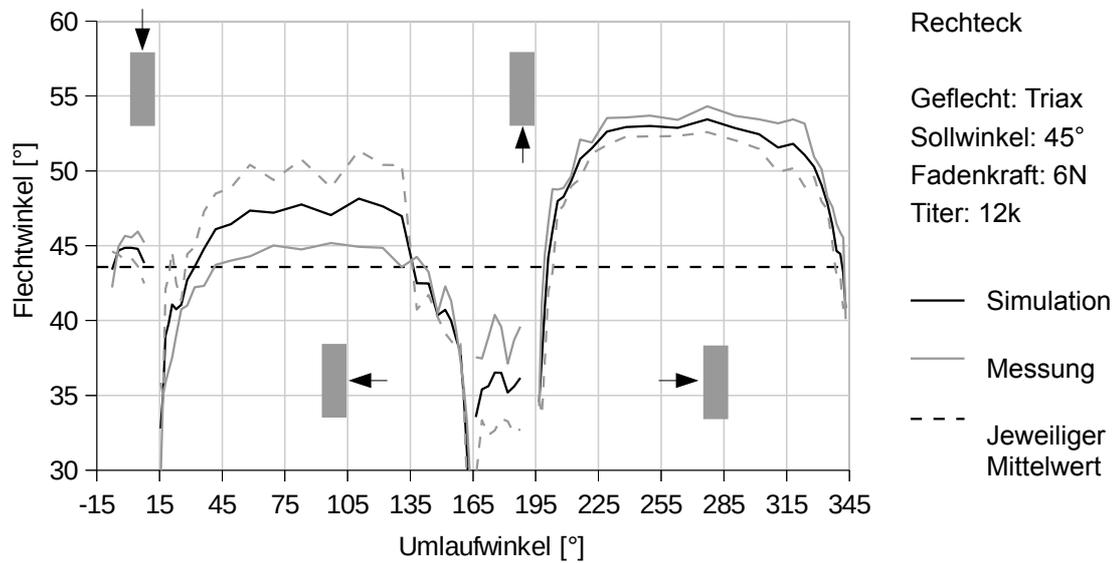
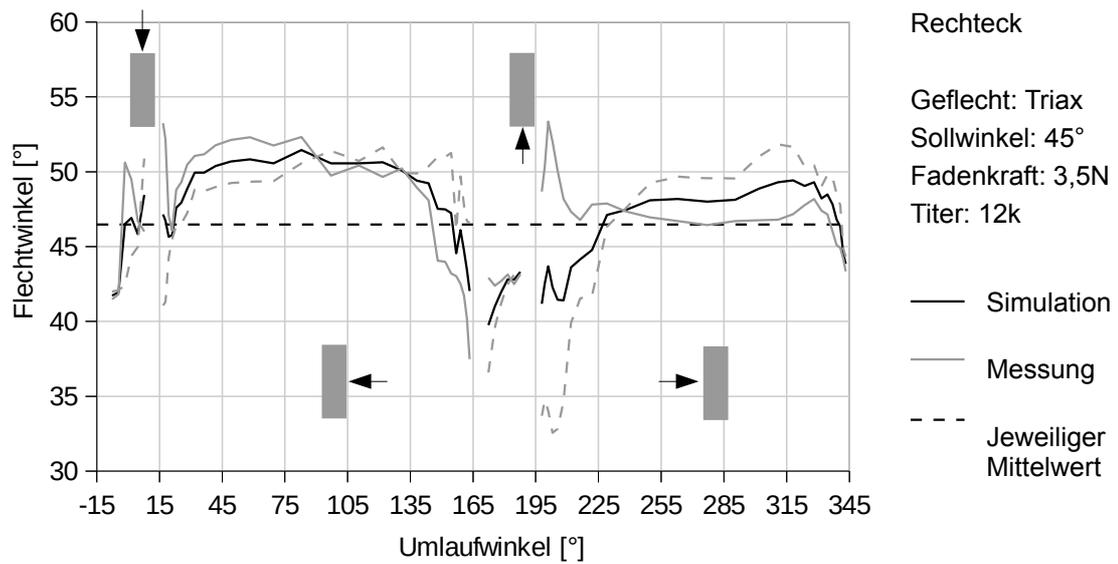






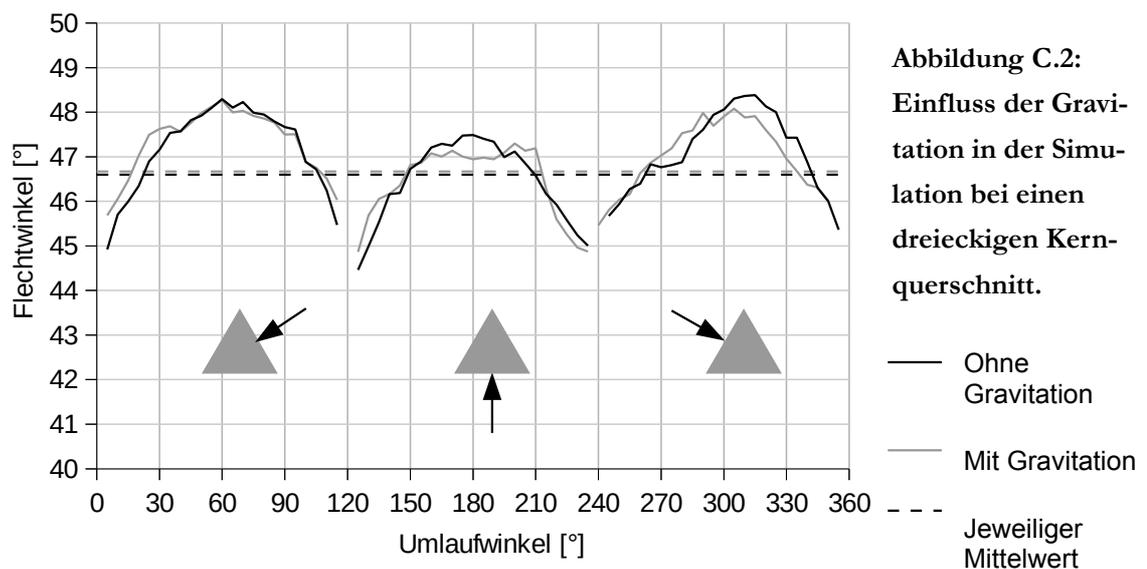
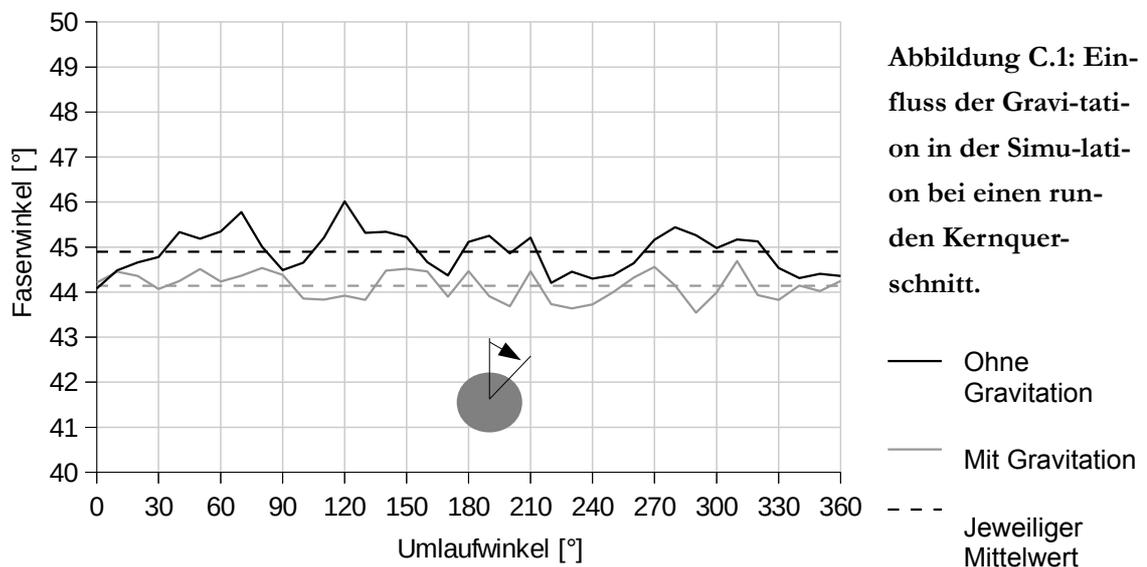


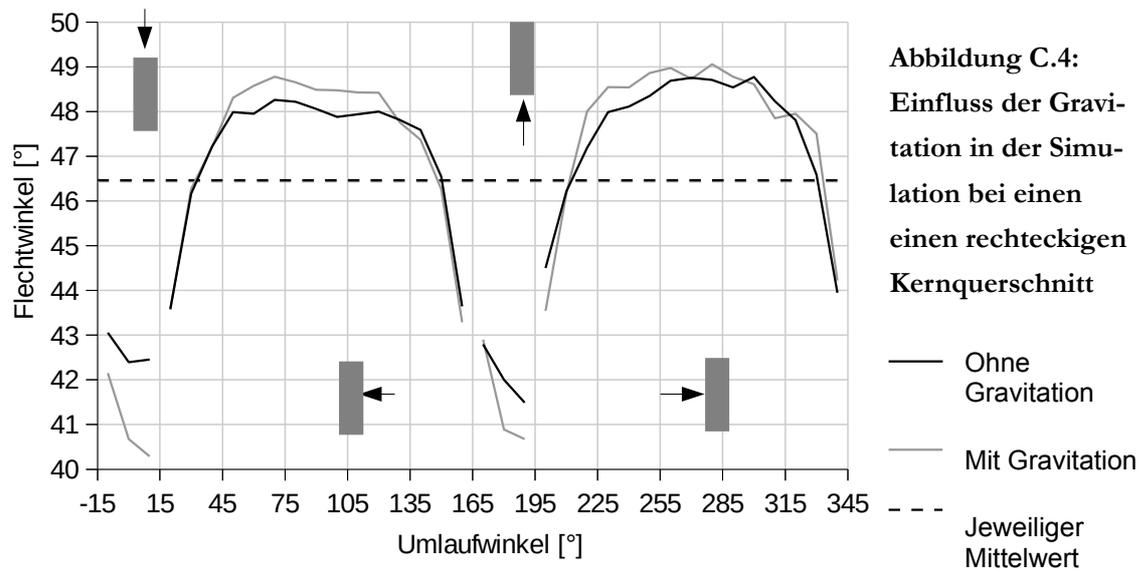
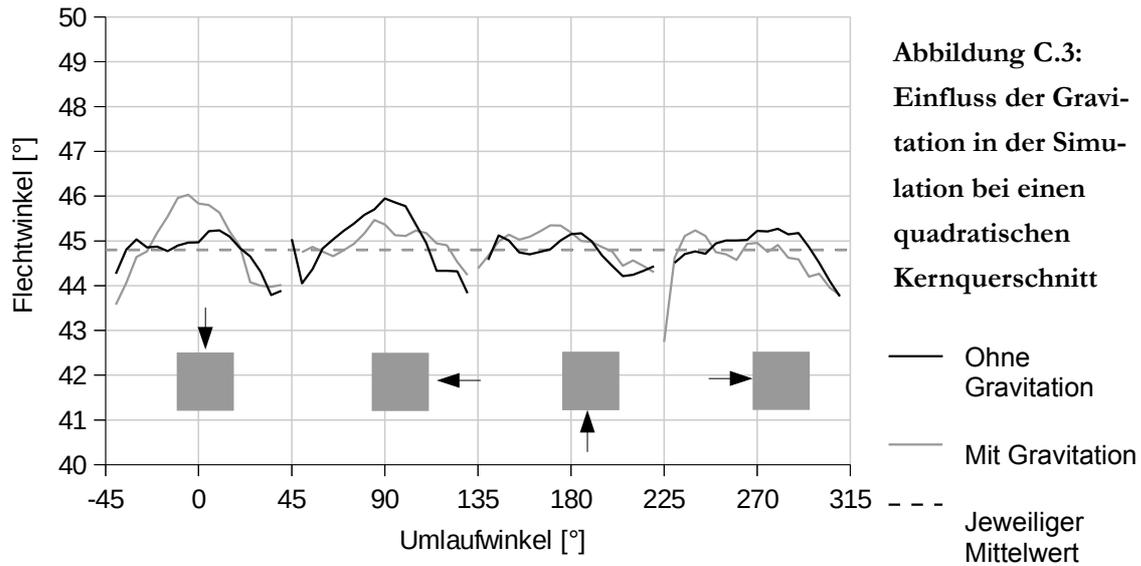




C Einfluss der Gravitation in der Simulation

Im Folgenden sind alle Auswertungen des Vergleiches von Simulationen mit und ohne Gravitation dargestellt. Der Simulationsaufbau und die Auswertesystematik sind in Abschnitt 6.3 beschrieben.





D Literaturverzeichnis

- [1] McKinsey & Company. Lightweight, heavy impact: How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive; 2012.
- [2] Acmite Market Intelligence. World Carbon Fiber Composite Market: Markets, Products, Applications, Innovations, Chances & risks, Competition, Prospects to 2018; 2010.
- [3] Gries T. Textiltechnik? Textiltechnik. Textiltechnik! Paderborn: Schöningh; 2006.
- [4] Mattheck C. Denkwerkzeuge nach der Natur. 1st ed; 2010.
- [5] Bobeth W. Textile Faserstoffe. Berlin; 1993.
- [6] Wikipedia. Lehm; Available from: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lehm>.
- [7] Lenze W. Fachwerkhäuser: restaurieren - sanieren - modernisieren. Materialien und Verfahren für eine dauerhafte Instandsetzung. 8th ed. Stuttgart: Fraunhofer IRB; 2012.
- [8] Endruweit A. Städtischer Wohnbau in Ägypten: Klimagerechte Lehmarchitektur in Amarna. Berlin: Gebr. Mann; 1994.
- [9] Eichler CW. Holzbootsbau - und der Bau von stählernen Booten und Yachten. Kiel: RKE-Verl; 1990.
- [10] Universität Stuttgart. Themenheft Forschung: Leichtbau. N° 3 - 2007; 2007.
- [11] Wissmann G. Abenteuer in Wind und Wolken: Die Geschichte des Segelfluges. Berlin: Transpress, Verl. für Verkehrswesen; 1988.
- [12] Gassan J. Naturfasser verstärkte Kunststoffe: Korrelation zwischen Struktur und Eigenschaften der Fasern und deren Composites. Dissertation. Kassel: Shaker; 1997.
- [13] Ehrenstein G W. Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. München: Hanser; 2006.
- [14] Flemming M, Ziegmann G, Roth S. Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1995.
- [15] Witten E, Jahn B. Composites-Marktbericht 2013: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; 2013.
- [16] Sika. Biresin CR120: Composite-Harzsystem. Produktdatenblatt; 2010.
- [17] Hexcel Corporation. HexFlow® RTM 6: 180°C epoxy system for Resin Transfer Moulding monocomponent system. Product Data; 2009.
- [18] Momentive. EPIKOTE™ Resin MGS® RIMR 235 and EPIKURE™ Curing Agent RIMH 235 - 238. Technical Data Sheet; 2013.

-
- [19] Drechsler K. Fertigungstechnik und Bauweisen für Leichtbaukonstruktionen. Stuttgart; 2009.
- [20] Helmut Schürmann. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag; 2005.
- [21] Wettemann T, Zaremba S, Ebel C, Reden T von. Development of braided bypass duct structure for high volume application. In: SAMPE EUROPE, editor. SETEC: New Solutions for new Requirement; 2007, p. 205–11.
- [22] Neitzel M, Mitschang P. Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. München: Hanser; 2004.
- [23] Flemming M, Ziegmann G, Roth S. Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1999.
- [24] Johannsen O. Die Geschichte der Textil-Industrie. Leipzig: Süd-Verl; 1932.
- [25] Drechsler K. Process and Simulation Chains for Advanced Textile Structural Composites. In: SAMPE, editor. SAMPE 2008: Material and Process Innovations: Changing our World; 2008.
- [26] Engels H. Flechttechnologie - Einführung in die Flechttechnik: Ein Lehrbuch für das berufliche Schulwesen im Ausbildungsberuf. 2nd ed. Eschborn; 1996.
- [27] Rosenbaum JU. Flechten: Rationelle Fertigung faserverstärkter Kunststoffe: TÜV Rheinland; 1991.
- [28] BMC Switzerland. factory tour - a look behind the scenes; Available from: <http://www.bmc-racing.com/int-en/impec/factory-tour.html>.
- [29] ZascheSitec Handling. Manipulatoren aus Carbon; 2012.
- [30] Autorenkollektiv. Handbuch der Textilwaren. Band 1. Leipzig: VEB Fachbuchverlag; 1980.
- [31] Kienbaum M. Bindungstechnik der Gewebe: Konstruktion und Gestaltung mit warenkundlichen Beispielen. Einflächige Schaftgewebe. 2nd ed. Berlin: Fachbuchverlag Schiele & Schön GmbH; 1989.
- [32] Gessler A, Maindl F, Schouten M. Advancements in Braiding Technology for Textile Preforming. In: SAMPE EUROPE, editor. SEICO: The use of Composite in the 21st. Century to save Energy and Weight; 2007, p. 585–9.
- [33] Eisenhauer C. Characterisation of UD-Braids. Master Thesis. Aachen; 2006.
- [34] Andreas Geßler. Textile Technologies and Preform Manuvaturing for Advanced Composites. In: SAMPE EUROPE, editor. SETEC 12: Advanced Composites - Design & Process for Sustainability; 2012.
- [35] Bigaud D, Dréano L, Hamelin P. Models of interactions between process, microstructure and mechanical properties of composite materials—a study of the interlock layer-to-layer braiding technique. Composite Structures 2005;67(1):99–114.
- [36] Tietze W (ed.). Handbuch Dichtungspraxis. Essen: Vulkan-Verl; 2003.
- [37] Herzog Flechtmaschinen. Packungsflechter.

-
- [38] Wulforth B. *Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung*. München: Hanser; 1998.
- [39] Winchester G. BRAIDING MACHINE(No. 81,061): Google Patents; 1861; Available from: <https://www.google.com/patents/US31061>.
- [40] Schneider M. *Konstruktion von dreidimensional geflochtenen Verstärkungs-textilien für Faserverbundwerkstoffe*. Dissertation. Aachen; 2000.
- [41] Kostar TD, Chou T. Process simulation and fabrication of advanced multi-step three-dimensional braided preforms. *Journal of Materials Science* 1994;29(8):2159–67.
- [42] Kostar TD. *Analysis, design, fabrication, and performance of three-dimensional braided composites*. Dissertation. Delaware; 1998.
- [43] Engels H. *Handbuch der Schmaltextilien: Die Flechttechnologie*. Teil I: Maschinen und Verfahren zur Erzeugung konventioneller Geflechte. Mönchengladbach; 1993.
- [44] Reden T von. *Entwicklung eines Verfahrens zum automatisierten Ausbilden von Wendepunkten bei geflochtenen Preformbauteilen*. Diplomarbeit. Stuttgart; 2006.
- [45] Rüger O, Fröhlich F, Wachter F. Verfahren zum Herstellen eines Vorformlings und eines daraus hergestellten Faserverbundfertigbauteils(DE102012004942 B4); 2012.
- [46] Rüger O, Fröhlich F, Wachter F. Verfahren zum Herstellen eines hohlen Faserverbundbauteils, Formkörper und Verwendung eines Formkörpers(EP 2468484 A1); 2010.
- [47] Siegfried M. *Optimisation of dwell pressure curing for FXCore molding process: Technischer Bericht zur Bachelorthesis*. Bachelorarbeit. Baden; 2010.
- [48] Falzon PJ, Herszberg I. Mechanical performance of 2-D braided carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology* 1998;Volume 58(2):253–65.
- [49] Littell JD. *The Experimental and Analytical Charakterization of the Macromechanical Response for Triaxial Braided Composite Materials*. Dissertation. Akron; 2008.
- [50] Minguet PJ, Fedro MJ, Gunther CK. *Test Methods for Textile Composites*. Hampton; 1994.
- [51] Eric J. Lang, Tsu-Wei Chou. The Effect of Strain Gage Size on Measurement Errors in Textile Composite Materials. *Composites Science and Technology* 1998;58(3-4):539–48.
- [52] Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. *Biotex-Schlussbericht*.
- [53] Röder M. *Experimentelle und analytische Charakterisierung mechanischer Eigenschaften von biaxialn und triaxialen Gelfechten für ausgewählte Flechtwinkel*. Diplomarbeit. Stuttgart; 2010.

- [54] Reden T von, Bulat M, Drechsler K. Mechanical Performance of Hybrid Carbon Glass Fibre Braids with a High Ratio of 0°-Fibres. In: Recent advances in textile Composites, Lille, 26.10.2010.
- [55] Baumann J. Untersuchung von Geflechtstrukturen und eines Impactschutzes für die Anwendung in einem Handhabungsgerät. Studienarbeit. Stuttgart; 2010.
- [56] Drechsler K. Beitrag zur Gestaltung und Berechnung von Faserverbundwerkstoffen mit dreidimensionaler Textilverstärkung. Dissertation. Stuttgart; 1992.
- [57] Selinger H. Untersuchung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von unidirektional geflochtenen textilen Preformen durch optimierte Garnansätze. Diplomarbeit. Stuttgart; 2009.
- [58] Weng A. Generierung und Messung einer Rovingschädigung und Bewertung des Einflusses auf die Kennwerte einer CFK-Struktur in Flechttechnologie. Studienarbeit. Stuttgart; 2010.
- [59] KU Leuven. Wise Tex suit; Available from: <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>.
- [60] Birkefeld K. Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten. Dissertation. Stuttgart; 2013.
- [61] Lomov SV, Verpoest I, Peeters T, Roose D, Zako M. Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate. *Composites Science and Technology* 2003;63:993–1007.
- [62] Chen B, Chou T. Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation. *Composites Science and Technology* 2000;60:2223–31.
- [63] Birkefeld K, Reden T von, Röder M, Bulat M, Drechsler K. Characterization of Biaxial and Triaxial Braids: Fiber Architecture and Mechanical Properties. *Applied Composite Materials* 2012;19(3-4):259–73.
- [64] Lyons J, Pastore CM. Effect of braid structure on yarn cross-sectional shape. *Fibers and Polymers* 2004;5(3):182–6.
- [65] Braley M, Dingeldein M. Advancements in Braided Materials Technology. In: SAMPE, editor. SAMPE 2001 - Long Beach; 2001.
- [66] Bulat M, Wascinski L von, Middendorf P, Rödel H. Consolidation of Braid-Based CRFP Structures using an Expandable Mandrel.
- [67] GIMP: GNU Image Manipulation Program; Available from: <http://www.gimp.org/>.
- [68] Miene A, Heumüller M, Weiland F, Weimer C. Quality Assurance System for Aircraft Structural Profile Preforms. In: SAMPE EUROPE, editor. SETEC 11: Advanced Composites, The integrated System; 2011, p. 259–66.
- [69] Miene A, Herrmann AS, Göttinger M. Quality Assurance by Digital Image Analysis for the Preforming and Draping Process of Dry Carbon Fiber Material. In: SAMPE EUROPE, editor. SEICO: Composites Forever; 2008.

-
- [70] Reden T von, Drechsler K. Automated Preform Manufacture by Triaxial Braiding and DryTow placement. In: SAMPE UK, editor. High Performance Composites Manufacturing – Advances in Automation; 2008.
- [71] Bulat M. Untersuchung des Einflusses der Fadenspannung beim Flechten auf Faserschädigung und Bauteilkennwerte. Diplomarbeit. Reutlingen; 2007.
- [72] Reden T von. Design and Energy Transmission for an Electronic Controlled Lace Bobbin. In: SAMPE EUROPE, editor. SETEC 10: Advanced Composites, the Driver for high Performance Return; 2010, p. 14–21.
- [73] Fabich B, Rosiepen C, Gries T. Concept of an Active Carrier-Based Tension-Contrnol System for Braiding Maschines. In: 12th World Textile Conference AUTEX, Zadar, 13. - 15.06.2012.
- [74] maxon Motor. maxon DC motor und maxon EC motor: Das Wichtigste; Available from: <http://www.maxonmotor.de/>
- [75] Albert Eßer. Berührungslose, kombiniererte Energie- und Informationsübertragung für bewegliche Systeme. Dissertation. Aachen; 1992.
- [76] Peter Knaup. Berührungslose Energieübertragung auf linear bewegte Systeme. Dissertation. Darmstadt; 1998.
- [77] Gessler R, Krause T. Wireless - Netzwerke für den Nahbereich: Eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren. 1st ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner; 209.
- [78] Munz C, Westermann T. Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen: Ein interaktives Lehrbuch für Ingenieure. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2012.
- [79] Brunnschweiler D. 5—The Structure and Tensile Properties of Braids. *Journal of the Textile Institute Transactions* 1954;45(1):T55–T77.
- [80] Brunnschweiler D. Braids and Braiding. *Journal of the Textile Institute Proceedings* 1953;44(9):P666–P686.
- [81] Du Gw, Popper P. Analysis of a Circular Braiding Process for Complex Shapes. *Journal of the Textile Institute* 1994;85(3):316–37.
- [82] Long AC. Process modelling for liquid moulding of braided preforms. *Composites Part A* 2001;32(7):941–53.
- [83] Rawal A. Geometrical Modeling of the Yarn Paths in Three-dimensional Braided Structures. *Journal of Industrial Textiles* 2005;35(2):115–35.
- [84] H. Nishimoto, A. Ohtani, A. Nakai, H. Hamada. Prediction Method for Fiber Orientation of Rectangular Braided Composite Pipe. In: SAMPE, editor. SAMPE 2008: Material and Process Innovations: Changing our World; 2008.
- [85] Kessels JFA, Akkerman R. Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms. *Composites Part A* 2002;33(8):1073–81.
- [86] Potluri P, Rawal A, Rivaldi M, Porat I. Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms. *Composites Part A* 2003;34(6):481–92.

- [87] Wikipedia. Virtual Reality Modeling Language; Available from: <http://de.wikipedia.org/wiki/VRML>.
- [88] Kim KJ, Woong-Ryeol Yu, Joon Seok Lee. Design of MTB Frame Using Three Dimensional Braided Composite. In: SAMPE, editor. SAMPE 2008: Material and Process Innovations: Changing our World; 2008.
- [89] Abaqus Unified FEA: Complete solutions for realistic simulation; Available from: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/abaqus-portfolio/abaqusstandard/>.
- [90] Tolosana N, Lomov S, Stüve J, Miravete A. Development of a Simulation Tool for 3D Braiding Architectures. In: American Institute of Physics, editor. AIP Conf. Proc. 907; 2007, p. 1005–10.
- [91] ESI. Software & Services; Available from: <http://www.esi-group.com/software-services>.
- [92] Pickett A, Erber A, Reden T von, Drechsler K. Comparison of analytical and finite element simulation of 2D braiding. *Plastics, Rubber and Composites* 2009;38(9/10):387–95.
- [93] Böhler P, Michaelis D, Heieck F, Middendorf P. Numerical Prediction and Experimental Validation of Triaxial Braided Fibre Architecture on Curved Mandrels. In: TexComp, editor. TexComp 11: the conference on textile composites; 2013.
- [94] Sebastian Vohrer. Untersuchung und Weiterentwicklung einer Flechsimulation mit PamCrash bezüglich der Faserablage. Studienarbeit. Stuttgart; 2011.