

Neue Verfahren zur integralen Herstellung schalenförmiger Gewebestrukturen: Technologien-, Methoden- und Maschinen- entwicklung

Dissertationsschrift

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

Fakultät Maschinenwesen
Technische Universität Dresden

vorgelegt von

Dipl. – Ing. Dominik Nuß

geboren am 18.04.1991 in Heidenheim

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Ficker

vorgelegt am: 16.01.2024
Tag der Verteidigung: 15.04.2024

Vorsitz der Prüfungskommission: Prof. Dr. Kristin Paetzold-Byhain

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif für die intensive Betreuung mit hohem Engagement sowie wertvollen Anregungen beim Verfassen dieser Arbeit. Darüber hinaus danke ich ganz herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Ficker für die Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit. Ebenfalls danke ich Frau Prof. Dr. Kristin Paetzold-Byhain für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Mein herzlichster Dank gilt Frau Dr.-Ing. Cornelia Sennewald sowie Herrn Dr.-Ing. Gerald Hoffmann für die äußerst hilfreichen fachspezifischen Anregungen und Diskussionen während meiner Tätigkeit am ITM, insbesondere für die Korrektur und die bereichernden Anmerkungen zu meiner Arbeit.

Ich danke allen ehemaligen und derzeitigen Kolleginnen und Kollegen der Forschungsgruppe „Flächenbildungstechnik“ für die kollegiale, angenehme Arbeitsatmosphäre und den spannenden fachlichen Austausch. Herrn Dr.-Ing. Johannes Mersch danke ich im besonderen Maße für die hilfreichen Hinweise und Unterstützung bei der Entwicklung der Algorithmen. Für die wertvolle Unterstützung der praktischen Arbeiten danke ich Herrn Theo Lehmann und Herrn Sebastian Berndt. Mein Dank gilt darüber hinaus allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ITM, dem Prüflabor, den Technikern, dem Werkstattteam, allen Diplomanden, Studentinnen und Studenten für die sehr gute Zusammenarbeit und ihren Beitrag zu dieser Arbeit.

Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF) danke ich für die Projektförderung und damit für die Bereitstellung der finanziellen Mittel im Rahmen des Bereichs „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF 19805 BR und IGF 21984 BR).

Abschließend gebührt ein besonderer Dank meiner Familie, die mich zu jeder Zeit bedingungslos unterstützt hat. Insbesondere gilt dies meiner Frau Irina und meinem Sohn Niklas, die mit Motivation, Geduld und Verständnis wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1 Einleitung.....	3
2.2 Übersicht zu zwei- und dreidimensionalen textilen Strukturen und deren Fertigungsverfahren	3
2.3 Definition räumlicher textiler Strukturen.....	4
2.4 Erzeugung dreidimensionaler textiler Strukturen	6
2.4.1 Dreidimensionale Gewebe.....	15
2.4.2 Dreidimensionale Gewirke	21
2.4.3 Dreidimensionale Gestricke.....	23
2.4.4 Dreidimensionale Geflechte	24
2.4.5 Weitere Verfahren.....	25
2.4.6 Sequentielles Preforming zur Erzeugung dreidimensionalen Strukturen.....	26
2.5 Ableitung der Anforderungen an textile Halbzeuge	28
2.6 Zusammenfassende Betrachtung.....	29
3 Zielsetzung und Lösungsweg.....	31
4 Entwicklung einer Technologie zur Fertigung konturgerechter Gewebe für ebenflächige und einachsig gekrümmte Schalenstrukturen.....	34
4.1 Einleitung.....	34
4.2 Entwicklung einer konstruktiven Lösung für ein elastomerbasiertes breitenvariables Webblattes für Breitwebmaschinen.....	35
4.3 Entwicklung eines Algorithmus zur Geometrieerfassung der Gewebe und Steuerungsentwicklung	42
4.4 Strukturentwicklung für breitenvariable Gewebe	44
4.5 Herstellung und Auswertung von Funktionsmuster unter Anwendung der entwickelten Lösungen	45
4.5.1 Analyse und Auswertung der gewebespezifischen Eigenschaften	48
4.5.2 Aufstellung des Zusammenhanges zwischen Kettfadenzugkräften und Verstellung der Gewebebreite für das entwickelte Webblatt	56
4.6 Gewebeentwicklung zur Herstellung einer Preform für ein Fanblade.....	61
5 Entwicklung von doppelachsig gekrümmten Geweben für Schalenstrukturen	66
5.1 Einleitung.....	66

5.2	Einordnung und Definition komplex gekrümmter Schalenstrukturen	66
5.3	Erläuterung des neu entwickelten Webprinzips	67
5.4	Modellierung eines Strukturverfahrens zur Erfassung der gekrümmten schalenförmigen Zielgeometrie.....	70
5.4.1	Einführung des zu betrachtenden Bezugssystems	70
5.4.2	Entwicklung einer Berechnungsmethode zur Bestimmung der Krümmung dreidimensionaler schalenförmiger Oberflächen	71
6	Konstruktiv-technologische Entwicklung des abzugsfreien Webens	80
6.1	Einführung	80
6.2	Konstruktiver Entwicklungsprozess zur Realisierung abzugsfrei gewebter Strukturen	80
6.3	Umsetzung der Vorzugslösung	82
6.3.1	Detailauslegung des Schussfadenrückhaltesystems.....	82
6.3.2	Einbau und Installation der Vorzugslösung zum abzugsfreien Weben	87
6.3.3	Einstellung der Maschinenparameter des abzugsfreien Webens	90
7	Entwicklung eines Strukturverfahrens, Bindungsentwicklung und Modellierung zur Umsetzung komplex gekrümmter schalenförmiger Gewebe.....	93
7.1	Erzeugung von unterschiedlichen Gewebelängenbereichen mittels Anordnung unterschiedlicher Bindungsbereiche	93
7.1.1	Berechnung der Verkreuzungen einer Gewebestruktur	93
7.1.2	Zusammenhang zwischen der Schussdichte abzugsfrei gewebter Strukturen und der theoretischen Verkreuzungsdichte	97
7.1.3	Überprüfung des funktionellen Zusammenhanges zwischen Schussdichtenverhältnissen und Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängen.....	101
7.2	Erzeugung von unterschiedlichen Kettfadenlängenbereichen mittels Einbringung von Teilschüssen	102
7.2.1	Aufstellung eines Berechnungsmodells zur Kalkulation der Gewebelängenerzeugung mittels Teilschüsse	103
7.2.2	Überprüfung des funktionellen Zusammenhanges zur Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängenbereiche mittels Einbringung von Teilschüssen.....	104
7.3	Anordnung der Bindungsbereiche in der Webebene zur Erzeugung gekrümmter schalenförmiger Gewebe	106
7.3.1	Einlagige doppelachsig gekrümmte schalenförmige Gewebe, die ein offenes Volumen teilumschließen.....	106
7.3.2	Einlagige bahnförmige Gewebe, deren Breite die Gewebebreite bildet	109
8	Entwicklung einer CAE gestützten Prozesskette zur Umsetzung gekrümmter schalenförmiger abzugsfrei gefertigter Gewebe	110
8.1	Entwicklung eines Algorithmus zur Erfassung der Zielgeometrie und Zuweisung der Bindungsbereiche.....	110
8.2	Webtechnische Umsetzung und Charakterisierung gekrümmter schalenförmiger Gewebe.....	114

8.2.1	Fertigung einer abzugsfrei gewebten Formschulter mittels unterschiedlicher Bindungen	114
8.2.2	Fertigung einer abzugsfrei gewebten Formschulter mittels Teilschüsse.....	118
8.2.3	Fertigung einer abzugsfrei gewebten Halbkugel	120
8.2.4	Fertigung eines bahnförmigen gewebten Trichters	127
9	Zusammenfassung und Ausblick	132
	Literaturverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	141
	Abbildungsverzeichnis	142

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
BMW	Bayerische Motoren Werke
bspw.	beispielsweise
CAD	Computer Aided Desgin
D	Dimension
DIN	Deutsches Institut für Normung
FKV	Faserkunststoffverbund
Gl.	Gleichung
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstoff- technik
KFZ	Kraftfahrzeug
m	Meter
mm	Millimeter
N	Newton
\mathbb{R}^2	zweidimensionaler Raum
\mathbb{R}^3	dreidimensionaler Raum
RHE	Rückhalteelement
STL	Standard Transformation Language
tex	Feinheit linienförmiger Textilien
TFP	Tailored Fibre Placement
theor.	theoretisch
TU	Technische Universität

VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche

Formel	Einheit	Beschreibung
a_i		Stützpunkt
b_i		Besetzungsfaktor in Schussrichtung
b_j		Besetzungsfaktor in Kettrichtung
C		fadenmaterialabhängige Konstante
CP		aktueller Punkt
d	mm	Abstand
DF		Deckungsfaktor
F	N	Kraft
$f(x)$		Funktion
i		Laufvariable
K		Kreuzungsquotient
k	N/mm	Federsteifigkeit
KD		Kettfadendichte
k_{ges}	N/mm	Gesamtfedersteifigkeit
K_v		Anzahl der Verkreuzungen in Kett- und Schussrichtung
k_v, s_v		Verkreuzungsdichte in Kette
L	mm	Länge
M		Anzahl der Kettfäden im Rapport
min		Minute
N		Nachbarpunkt
n		Laufvariable
NP		nächster Punkt
P		Punkt P

p		theoretischer Dichtefaktor Gewebebindung
P(x)		Polynom
PQ		Abstand zweier Punkte
Q		Punkt Q
R		Rapport
s		Fadendichte
SD		Schussfadendichte
s_l		Verkreuzungsdichte in Schuss
T		Fadenfeinheit
U		Umdrehung
x		x-Koordinate
X_l		Dichteindex Kettfadenrichtung
X_v		Dichteindex Schussfadenrichtung
y		y-Koordinate
z		z-Koordinate
α	°	Fadenwinkel am Expansionskamm
β		Schrittfaktor
γ	°	Fadenwinkel am Gewebeabzug
Φ		Bindungskoeffizienten

1 Einleitung und Motivation

Textilverstärkte Leichtbaustrukturen bieten aufgrund des Zusammenspiels zwischen Hochleistungsfilamentgarnen und umgebender Kunststoffmatrix ein höchstmögliches Leichtbaupotential. Der Einsatz dieses Verbundes ist unumgänglich, um die stetig wachsende Nachfrage nach Leichtbaulösungen für zunehmend komplexere Anwendungen zu erfüllen. Insbesondere birgen die zunehmenden Forderungen hinsichtlich der Energieeinsparung, Schonung der endlichen Ressourcen sowie Reduktion der CO₂-Emissionen eine kontinuierlich wachsende Nachfrage nach nachhaltigen und innovativen Komponentenlösungen. Neben der Entwicklung neuer verbesserter Werkstoffe sind zukunftssträchtige innovative Maschinenentwicklungen zur Bereitstellung textiler Konstrukte unabdingbar.

Die industrielle Forderung nach effizient gefertigten textilen Strukturen zur Verstärkung unterschiedlichster Kunststoffkomponenten führt zunehmend zum Einsatz von Technologien, welche die endkonturnahe Geometrie des Bauteils bereits im Herstellungsprozess auf das Textil übertragen können. Dadurch können Produktionsabfälle reduziert und gleichzeitig das mechanische Leistungspotential des Endbauteils gesteigert werden. Insbesondere bei schalenförmigen komplex gekrümmten Geometrien, liegt bis heute eine Limitation hinsichtlich der möglichen strukturerzeugenden Fertigungsverfahren vor. Die hierfür eingesetzten Verfahren weisen meist aufwendige konstruktive Maßnahmen und komplizierte Steuerungen auf, wodurch eine industrielle Umsetzung gehemmt wird.

Das textile Fertigungsverfahren des Webens gehört zu den ältesten textilen Herstellungsverfahren der Welt und ist die dominierende Art, textile Flächen zu generieren. Das Webverfahren selbst wurde im Laufe der Zeit stetig weiterentwickelt, wodurch heute komplexe, hochproduktive Webmaschinen zur Verfügung stehen. Großflächige Gebilde aus Hochleistungsfilamentgarnen werden vorrangig auf Greiferwebmaschinen mit einer Nennbreite von bis zu 5,40 m gefertigt. Prozessbedingt können mit diesen Maschinen keine schalenförmigen komplex gekrümmten Gewebe gefertigt werden, sondern lediglich ebene Strukturen. Die Überführung von Geweben in schalenförmigen Geometrien erfolgt deshalb vorrangig mittels Zuschnitt- und Drapierprozessen. Dies verursacht neben erheblichen Produktionsabfällen ein aufgrund der Einschnitte, Überlappungen und Faserverschiebungen der textilen Struktur reduziertes Leistungsvermögen.

Der Bedarf an schalenförmigen komplex gekrümmten Strukturen ist insbesondere für Anwendungen mit doppelachsig gekrümmten Geometrien relevant, die nicht ohne Weiteres abgewickelt werden können. Diese Strukturen werden, sofern sie aus gewebten Halbzeugen konzipiert sind, meist in manuellen Prozessschritten basierend auf sequentiellen Fertigungsverfahren erzeugt. Andere Fertigungsverfahren zur Erzeugung doppelachsig gekrümmter Flächen sind meist mit beachtlichen Investitionskosten verbunden und werden deshalb vorrangig in preisintensiven Marktbereichen - wie innerhalb der Luftfahrt - eingesetzt.

Aus diesem Grund werden neue Struktur- und Technologiekonzepte für Webmaschinen zur Umsetzung großformatiger, endkonturnaher und schalenförmiger und gekrümmter Gewebe benötigt. Das Webverfahren liefert hierzu aufgrund der inhärenten hohen Produktivität bei gleichzeitiger Modularität ein aussichtsreiches Potential, durch konstruktiv-technologische Entwicklungen ökonomische Vorteile für die Bauteilfertigung von endkonturnahen schalenförmigen Komponenten zu erzielen.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsschrift soll die Webtechnologie so weiterentwickelt werden, dass die Geometrie schalenförmiger komplex gekrümmter Strukturen direkt im Webprozess erzeugt werden kann. Dabei sollen industrielle Standards berücksichtigt werden, und somit wird die wirtschaftliche Bereitstellung von endkonturnahen Geweben wirtschaftlich ermöglicht. Dazu sind neben den grundlegenden Entwicklungen der Maschinenteknik die damit einhergehenden Bindungs- und Strukturentwicklungen zu vollziehen. Darüber hinaus muss die notwendige Prozesskettenentwicklung zur Überführung der geforderten Geometrien in die textile Struktur unter Anwendung der zu entwickelnden konstruktiv-technologischen Maßnahmen innerhalb der Webtechnik erfolgen. Anhand von Gewebedemonstratoren sollen die neuartigen Webprinzipien und die damit erzielbare geometrische Strukturvielfalt aufgezeigt werden.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Einleitung

Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht zum Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet dreidimensionaler (3D) textiler Strukturen und deren Herstellungsverfahren. Dazu erfolgt eine Klassifizierung zu zwei- und dreidimensionalen textilen Strukturen und es wird die Dreidimensionalität textiler Strukturen definiert. Unter Beachtung dieser Klassifizierung wird eine Übersicht zu gängigen textilen Fertigungsverfahren unter der erweiterten Betrachtung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die zur Erzeugung dreidimensionaler textiler Strukturen angewendet werden können. Basierend darauf werden die Anforderungen an textile Halbzeuge für den Einsatz in schalenförmigen Faserkunststoffverbund (FKV)-Bauteilen und das damit einhergehende Fertigungsverfahren abgeleitet.

2.2 Übersicht zu zwei- und dreidimensionalen textilen Strukturen und deren Fertigungsverfahren

Die Beschreibung konventioneller textiler Strukturen ist in der DIN 60000 „Textilien – Grundbegriffe“ festgehalten [1]. Hierbei werden unter anderem textile Halb- und Fertigfabrikate definiert. Diese werden in ungeformte Gebilde, linienförmige Gebilde sowie flächenförmige Gebilde unterteilt. Die Unterteilung der flächenförmigen Gebilde erfolgt nach zu verarbeitendem Material, Anzahl und Verlauf der Fadensysteme und dem Verfahren des Zusammenhalts. Die Unterteilung für Flächengebilde wird wie folgt gegliedert:

Tabelle 2-1: Definition textiler Flächen- und Körpergebilde nach DIN 60000[1]

Flächenförmige Gebilde	
Vliesstoffe	Flächengebilde, die durch Verfestigung von Faservliesen hergestellt sind
Gewebe	Flächengebilde, die mittels Fachbildung aus sich rechtwinklig verkreuzenden Fäden zweier Fadensysteme, Kette und Schuss, hergestellt sind
Geflechte	Flächen- oder Körpergebilde mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flecht-(Klöppel-) Fäden sich in schräger Richtung zu der Warenbahn verkreuzen
Gewirke und Gestricke	Flächengebilde, die aus einem oder mehreren Fäden oder aus einem oder mehreren Fadensystemen durch Maschenbildung hergestellt sind
Nähwirkstoffe	Flächengebilde aus Faservliesen oder lose übereinander gelegten, sich kreuzenden Fadenlagen, die durch die Maschenbildung eingenähter Fadenscharen verfestigt oder mit anderen Flächengebilden verbunden sind, oder textile Flächengebilde, in die Fäden oder Fasern, gegebenenfalls als Polhenkel geformt, eingebunden sind

Die in Tabelle 2-1 aufgeführten Definitionen geben zwar eine Auskunft über die Art der Erzeugung des textilen Gebildes, die Art der Fläche wird jedoch nicht näher beschrieben. Hierfür müssen neue, für diese Arbeit relevante Definitionen getroffen werden. Insbesondere muss die Art der räumlichen Struktur des Textils definiert werden.

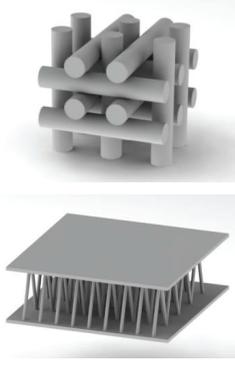
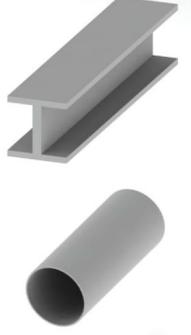
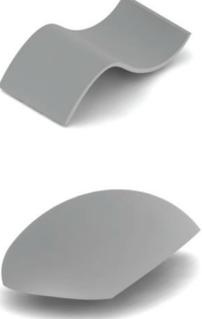
2.3 Definition räumlicher textiler Strukturen

In der Literatur werden dreidimensionale textile Strukturen oftmals als voluminöse Gebilde angesehen, die mehrere Fadensysteme übereinander angeordnet aufweisen [2, 3]. Dabei weist die textile Struktur in allen drei Raumrichtungen Fadensysteme auf, sodass diese nicht durch ein zweidimensionales (2D) Koordinatensystem beschrieben werden

können. Diese Strukturen können als Mehrlagen- oder Abstandsstrukturen ausgeführt werden.

Textile Strukturen, die ohne vorherige mechanische Einwirkung eine ein- oder zweiachsig gekrümmte Fläche aufweisen und dadurch ein Volumen ein- oder umschließen, werden ebenfalls als dreidimensionale textile Strukturen bezeichnet. Diese Flächen werden in abwickelbare und nicht abwickelbare Flächen unterteilt. Dabei ist die Art des Textils sowie die Anzahl der eingesetzten Fadensysteme irrelevant. Eine weitere Unterteilung muss jedoch hinsichtlich der Beschreibung der ein- oder umschließenden Fläche getroffen werden. Dabei weist die Anordnung der Verstärkungsfäden drei Raumrichtungen auf. Als geschlossene Strukturen werden 3D-Strukturen bezeichnet, die ein Volumen einschließen, wie etwa rotationsförmige Gebilde. Werden Oberflächen betrachtet, die ein Volumen nur teilweise umschließen, werden diese als schalenförmige Strukturen deklariert. Eine weitere Unterteilung muss hinsichtlich Profilstrukturen getroffen werden, sofern diese nicht als Hohlprofil ausgeführt werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass Profile mit definierter Querschnittsgeometrie wie etwa L-, T-, I-Querschnitte entlang einer geraden oder gekrümmten Profilachse verlaufen. Eine Übersicht der Klassifizierung dreidimensionaler textiler Strukturen ist in Tabelle 2-2 gegeben. Werden textile Strukturen durch nachträgliche Verarbeitungsprozesse wie Tiefziehen, Drapieren, Konfektionieren von Zuschnittteilen und deren Fixierung in 3D-Gebilde überführt, werden diese nicht als dreidimensionale textile Strukturen bezeichnet. Für alle in aufgeführten Tabelle 2-2 Klassifizierungen legt die Geometrie die Tragwirkung der eingesetzten Hochleistungsfilamentgarne über die Struktur fest [2]. So können die in den vorliegenden Richtungen verlaufenden Garne die beauftragten Lasten nach der nachfolgenden Verbundherstellung aufnehmen.

Tabelle 2-2: Klassifizierung dreidimensionaler textiler Strukturen

		
Mehrlagen- und Abstandsstrukturen	Rotationsförmige und profilförmige Strukturen	Flächen- und schalenförmige Strukturen

2.4 Erzeugung dreidimensionaler textiler Strukturen

Zur Einteilung und Übersicht wird in Tabelle 2-3 eine Einteilung und Erläuterung gängiger Fertigungsverfahren und deren Möglichkeit zur Erzeugung 3D-Textilien gegeben.

Die Unterteilung erfolgt für die Art des Textils sowie das damit einhergehende Fertigungsverfahren, das in zahlreichen Fällen Abwandlungen und Weiterentwicklung bereits etablierter textiltgebender Herstellprozesse darstellt. In der weiteren Klassifizierung werden die textilen Strukturen nach Art und Gegebenheit ihrer äußeren Geometrie unterschieden. Es werden die textilen Strukturen hinsichtlich ihrer erzielbaren Eigenschaften gegliedert sowie eine Betrachtung des Herstellungsverfahrens und Nennung möglicher Anwendungsbeispiele durchgeführt.

Die Aufstellung aller genannten Fertigungsverfahren erfolgt ausschließlich für die Verarbeitung von Fäden. Sogenannte „non-wovens“ werden nicht betrachtet.

Tabelle 2-3: Übersicht zu Herstellung und Verfahren dreidimensionaler textiler Strukturen

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
1. Dreidimensionale Gewebe					
Abstandsgewebe	Zwei Gewebelagen mit Polfäden verbunden Neigung der Polfäden einstellbar Ebene Geometrie mit Dicke in z-Richtung	Hohe Schäftfestigkeit, da Lagen miteinander verbunden	(Doppel-) Greifenweben	Industriell eingesetzt, automatisiert	Leichtbaupaneele [8] Isolation, Dämpfung, Schallschutz [9]
Spacer-Fabrics	Zwei Gewebelagen mit Stegsegmenten verbunden Ebene Geometrie mit Dicke in z-Richtung	Durchgängige Fadenslagen zwischen den Deckflächen	(Doppel-) Greifenweben mit Faltenwebtechnik	Entwicklungsstadium	Leichtbauplatten [7]
Mehrlagengewebe	Gewebelagen verbunden mit in z-Richtung verlaufendem Fadensystem Ebene Geometrie mit Dicke in z-Richtung	Hohe Gewebedicken Geringe Delamination im Verbund Mgl. vollständig gestreckte Ket- und Schusslagen	Allg. Webtechnik	Industriell eingesetzt, automatisiert	Farnblade Flugzeugturbinen [4] Leichtbauplatten [5, 6]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
1. Dreidimensionale Gewebe					
Profilförmige Gewebe	I-, T-förmige Gewebe mit 0°/90°	Durchgängige Verbindung zwischen Steg- und Flanschflächen	Spulenschützenbandweben mit Jacquardtechnik	Automatisiert, begrenzte Maschinengeschwindigkeiten	Flugzeugbau [14] Satelliten [15] FKV-Anwendungen [16]
Spiralförmiges Gewebe	Kreisförmig verlaufende Kettfäden	Durchgängige Kettfäden entlang der gesamten Struktur	Weben mit konischen Abzugswalzen	Prototyp industriell umgesetzt, Teilautomatisiert	Bremsscheiben [13]
Rundgewebe	Schlauchgewebe	Umlaufende Schlussfäden Verzweigungen mögl.	Rundweben Spulenschützenweben	Rundwebmaschine hochproduktiv Spulenschützenweben begrenzt produktiv, jedoch flexibel	Feuerwehrschräume Implantate [10] Rohrstrukturen [11, 12]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
1. Dreidimensionale Gewebe					
Schalenförmige Gewebe	Doppelachsig gekrümmtes Gewebe; Halbschalen	Durchgängige Fadenverläufe 3D-Endkontur	Weben mit speziellem Abzugssystem	Entwicklungsstadium	Prototyp Helmschalen [18]
2. Dreidimensionale Gewirke					
Abstandsgewirke	Zwei gewirkte Lagen mit Polfäden verbunden	Hohe Dämpfungseigenschaften, hohe Schälffestigkeit	Wirken mit doppeltbarriger Raschelmaschine	Industriell eingesetzt, automatisiert	Heimtextilien [17]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
2. Dreidimensionale Gewirke					
Multiaxialgewirke	Vorgelegte, gestreckte Fadenscharen mit definierten Winkel in der Ebene	Gestreckte Fadenlängen, einstellbare Winkelorientierung	Multiaxialkettenwirken	Industriell eingesetzt, automatisiert	Windkraftanlagen, FKV-Komponenten allg. [21, 22] Fahrgastzelle „BMW i3“ [23]
Rundgewirke	Geschlossenes und gitterförmiges, röhrenförmiges Gewirke	Hohe Dehnungseigenschaften	Rundwirken	Industriell eingesetzt, automatisiert	Verpackung [20]
Schalenförmige Gewirke	Vorgelegte 0° Fäden zu schalenförmiger Struktur durch Variation der Abstände	Durchgängige Fadenverläufe, offene und geschlossene Schalenstrukturen	Multiaxialkettenwirken	Entwicklungsstadium	Gitterstrukturen [18] Bauanwendungen [19] FKV-Schalen [19]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
3. Dreidimensionale Gestricke					
Abstandsgestricke	Zwei Deckflächen mit Polfäden verbunden	Hohe Dämpfungseigenschaften, hohe Schälfestigkeit	Flachstricken	Industriell eingesetzt, automatisiert	Bekleidung, Matratzen [26]
Mehrlagengestricke	Multiaxiale Verstärkungsfäden fixiert in Maschenstruktur	Begrenzung der Gestricke-Dehnung	Flachstricken	Biaxial: industriell eingesetzt Multiaxial: Entwicklungsstadium	FKV mit hoher Schwingfestigkeit [25]
Profilkörnige Gestricke	Eingebundene Fäden in Gestrick	Endkonturnahe Geometrie	Flachstricken	Entwicklungsstadium	FKV-Anwendungen [24]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
3. Dreidimensionale Gestricke					
Rundgestricke	Geschlossenes rohrförmiges Gestrick	Gute Dehnungseigenschaften	Rundstricken	Industriell eingesetzt, automatisiert	KFZ-Interieur [27]
Schalenförmige Gestricke	Eingebundene Fäden in Gestrick unterschiedliche Abzugslängen generieren Schalengeometrie	Endkonturnahe Geometrie	Flachstricken mit speziellem Abzugssystem	Entwicklungsstadium	FKV-Anwendungen [3]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
4. Dreidimensionale Geflechte					
Mehrschicht Rundgeflechte	3D-Rundgeflechte mit verbundenen Schichten	Dickwandige textile Struktur	Rundflechten, Radialflechten, Packungsflechten	Industriell eingesetzt, automatisiert	Rohre, Dichtungen, Schläuche [31]
Profilförmige Geflechte	Einflechten von Stahlfäden	Endkonturnahe Geometrie	2-Step-Flechten	Industriell eingesetzt, automatisiert	Profile, Spannen, Rippen [29, 30]
Dreidimensionale Geflechte	Umflechten von Kernelementen	Endkonturnahe Geometrie	Radialflechten	Industriell eingesetzt, automatisiert	EKV-Anwendungen [28]

Textilart	Textilgeometrie	Textileigenschaften	Fertigungsverfahren	Fertigungseigenschaften	Beispiele und Anwendungen
5. Weitere Verfahren					
Dreidimensionale Geometrien mittels Tailored Fibre Placement (TFP)	Fixierung eines Fadens auf löslichem Grund, Zugabe von Mehr-längen für 3D-Geometrie	Endkonturnahe Geometrie	Tailored Fibre Placement	Entwicklungsstadium	FKV-Gitterstrukturen [2, 34]
Dreidimensionale Geometrien mittels Tape-Legen	Fixierung vorgefertigter Tapes direkt im Werkzeug	Endkonturnahe Geometrie, einstellbare Faserorientierung	Tape-Legen	Industriell eingesetzt, automatisiert	Schalenstrukturen für Luftfahrt [32] Druckkalotte Flugzeugbau [33]
Rotationssymmetrische Geometrien mittels Wickelverfahren					

Die Angaben der Tabelle 2-3 geben einen ersten Überblick zum aktuellen Stand der industriell verfügbaren Fertigungsverfahren zur Bereitstellung von 3D-Textilien sowie ausgewählte Entwicklungsarbeiten. Aufgrund der Relevanz der in Kapitel 2.5 aufzustellenden Anforderungen an textile Strukturen wird im Folgenden auf die einzelnen Textilarten und deren Herstellungsverfahren näher eingegangen. Hierbei werden Entwicklungsmöglichkeiten und Einschränkungen genannt. Da für viele Anwendungen im Faserverbundbereich bis heute lediglich das Lagenlegen- und Zuschnittverfahren eingesetzt werden kann, wird dieses ebenfalls näher betrachtet.

2.4.1 Dreidimensionale Gewebe

Das Weben wird bereits seit mehreren tausend Jahren durchgeführt und ist das älteste textile Flächenbildungsverfahren. Die Gewebeerstellung wurde seit der Industrialisierung durch Einsatz des Maschinenbaus, Anwendung neuer Werkstoffe, Einsatz von Elektronikkomponenten und zuletzt insbesondere durch computerrechengestützte Verfahren kontinuierlich verbessert und weiterentwickelt. Dabei wurde vermehrt die Leistungsoptimierung von Standardartikeln forciert, sodass die Produktionsgeschwindigkeit, die Rüstzeiten, die Maschineneinrichtung sowie der Automatisierungsgrad verbessert wurden. Die Artikel bilden in den meisten Fällen flache Gewebe, deren Gewebebreite sich bei Bandgeweben mit einigen Millimetern bis hin zu Breitgeweben, die eine Breite über 5,4 m aufweisen können, erstreckt. Auf Sonderwebmaschinen kann die Gewebebreite bis zu 30 m betragen.

Konventionelle 2D-Gewebe bestehen aus mindestens zwei Fadensystemen, die rechtwinklig miteinander verkreuzt werden. Die in Fertigungsrichtung verlaufenden Fäden werden als Kettfäden und die quer dazu verlaufenden Fäden als Schussfäden bezeichnet. Durch den Wechsel der Position der Kett- und Schussfäden über- bzw. untereinander werden die beiden Fadensysteme miteinander verbunden: Es entsteht der Zusammenhalt des textilen Flächengebildes. Die Art und Weise der Verkreuzung wird als Bindung bezeichnet. Diese beeinflusst maßgeblich das Warenbild und die Eigenschaften des Gewebes, wie z. B. Festigkeit und Drapierbarkeit. Die Erläuterungen von Begriffen sind den Normen DIN 60900, DIN 63955, DIN 5239, DIN 9354 zu entnehmen.

Der grundlegende Aufbau einer klassischen Webmaschine ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Zur Verkreuzung der Fadensysteme werden die Kettfäden von einem Kettbaum oder Spulengatter über einen Streichbaum durch die Fachbildungseinrichtung und das

Webblatt geführt und abgezogen. Durch die vertikale gegenläufige Bewegung der Fachbildungseinrichtung wird die Fadenschar in mindestens zwei Ebenen aufgeteilt. In das dadurch entstehende Webfach wird der Schussfaden eingetragen. Die anschließende Anschlagbewegung des Webblattes drückt den Schussfaden an die Gewebekante. Durch das Fachwechseln werden die Ebenen getauscht und der Schussfaden mit den Kettfäden verkreuzt und somit im Gewebe gesichert. Der Gewebeabzug zieht alle Kettfäden gleichmäßig ab und gibt durch die beauftragte Abzugsgeschwindigkeit die Schussdichte des Gewebes vor. Je nach eingesetzter Fachbildungseinrichtung lassen sich hierzu unterschiedliche Bindungen realisieren.

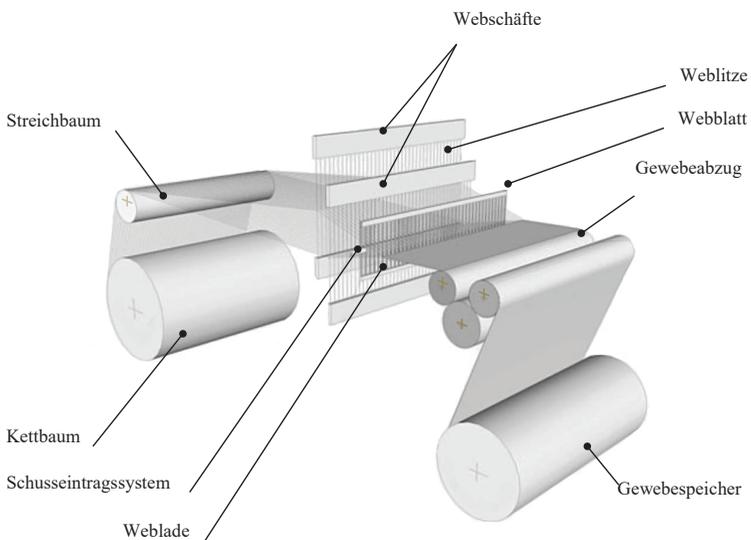


Abbildung 2-1: Grundaufbau klassischer Webmaschinen[2]

Vollständig automatisierte herkömmliche Webmaschinen können für die Fertigung von Abstands- und Mehrlagengewebe eingesetzt werden. Konventionelle Abstandsgewebe bestehen aus zwei Gewebelagen, die durch Polfäden miteinander verbunden sind. Die zwischen den Gewebelagen wechselnden Polfäden werden als zusätzliche Kettfäden eingebracht. Dabei kann der Winkel in Ketttrichtung variiert werden. Gefertigt werden Abstandsgewebe hauptsächlich auf Doppelgreiferwebmaschinen, da diese zwei übereinander-

der liegende Webfächer für die beiden Gewebelagen aufweisen und das gleichzeitige Eintragen zweier Schussfäden ermöglichen. Der durch die Polfäden verbundene Abstand der beiden Gewebelagen ist frei wählbar und kann damit als dreidimensionales voluminöses Textil angesehen werden. Die Gewebe können je nach eingesetztem Fadenmaterial und gewählter Bindungen begrenzt einachsrig umgeformt werden. Deshalb erfolgt der Einsatz weitestgehend für ebene Flächen, wie beispielsweise (bspw.) Schlauchboote, Luftmatratzen, oder zur Verstärkung von Leichtbauplatten in Kombination mit Harzsystemen.

Für die Herstellung von Mehrlagengeweben, eine 3D-Gewebestruktur mit mehreren übereinander liegenden Fadensystemen, ist keine spezielle Webmaschine notwendig. Lediglich der Einsatz der Fachbildungseinrichtung ist relevant. Bei einer Schaffmaschine muss diese so auf die zu webende Struktur abgestimmt sein, dass genügend Schäfte für die Bildung der Bindung vorhanden sind. Bei der Verwendung einer konventionellen Jacquardmaschine liegt diese Limitierung aufgrund der Einzelfadenansteuerung nicht vor. Mehrlagengewebe werden erzeugt, indem entweder ein zusätzliches Fadensystem (Bindfaden) einzelne Gewebelagen zusammenhält oder innerhalb der einzelnen Gewebelagen ausgewählte Kett- bzw. Schussfäden mit den anderen Gewebelagen abbinden und diese verbinden. Die 3D-Struktur bezieht sich hierbei auf die erzeugte Dicke des Gewebes. Deshalb liegt im Vergleich zu klassischen 2D-Geweben eine deutliche Anhäufung des Kett- und Schussfadenmaterials in der Gewebedickenrichtung vor. Mehrlagengewebe bieten die Möglichkeit, dass Kett- und Schussfäden vollständig in der Struktur angeordnet werden können. Dies verbessert insbesondere beim Einsatz von Hochleistungsfilamentgarnen die mechanischen Eigenschaften im Verbund deutlich. Der Einsatz eines Mehrlagengewebes als Verstärkungshalbzeug reduziert den Lagenlegenaufwand bei der Preformherstellung von FKV-Bauteilen und senkt damit die Kosten der Verbundbildung erheblich [35]. Durch die zunehmende Anzahl von Gewebelagen sinkt jedoch die Drapierfähigkeit der Strukturen, sodass gekrümmte Flächen nur mit hohem Aufwand abgebildet werden können.

Unter Anwendung des Grundprinzips der Mehrlagenwebtechnik können durch gezieltes Verbinden einzelner Lagenbereiche unterschiedliche 3D-Geometrien erzeugt werden. Dadurch werden Profile mit unterschiedlichen Querschnitten realisierbar [36, 37]. Insbesondere durch den Einsatz der Bandwebtechnik entfällt im Vergleich zur Breitwebtechnik der sonst notwendige Zuschnitt. Schmalgewebe weisen zudem feste Gewebekanten auf. Zur Fertigung von Profilen mit variablem Querschnitt kann durch den Einsatz von V- und

Y-Webblättern die Gewebebreite geändert werden. Dies ist jedoch auf schmale Gewebebreiten limitiert. Weiterer Querschnittsgeometrien, wie bei L-, T- und I-Profilen, können durch die Umkehr einzelner Schussfäden innerhalb des Gewebes generiert werden: Diese verbinden die einzelnen Gewebelagen, sodass durch den gemeinsamen Hoch- und Tiefgang aller Kettfäden die Gewebelagen getrennt vorliegen und nur in den Bereichen der Fadenumkehr miteinander verbunden werden. Somit lassen sich bspw. auch Schlauchgewebe herstellen. Unter Nutzung des Spulenschützenwebprozesses mit entsprechenden Modifikationen können Schlauchstrukturen mit Verzweigungen gefertigt werden. Dadurch sind komplexe 3D-Knotenelemente möglich, die in einem Stück gefertigt werden. Diese umschließen dabei ein Volumen und werden somit als direkt gefertigte 3D-Strukturen bezeichnet. Rund- und Schlauchgewebe lassen sich ebenfalls mit eigens dafür entwickelten Rundwebmaschinen herstellen. Rundwebmaschinen zeichnen sich durch die kreisförmige Anordnung der Kettfäden aus sowie einen auf einer Kreisbahn laufenden Webschützen in Kombination mit einer Fachbildungseinrichtung [38].

Schalenförmig endkonturnahe gewebte 3D-Geometrien können nicht ohne weitere konstruktive Maßnahmen direkt auf konventionellen Webmaschinen erzeugt werden. Die Erzeugung von schalenförmigen Strukturen erfordert eine unterschiedliche Garmlänge innerhalb der Struktur. Die hierfür entwickelten Fertigungsverfahren können grundlegend in folgende Methoden unterteilt werden: Zum einen kann ein schlauchförmiges und ein sich einseitig verjüngendes Mehrlagengewebe zu einer Rotationsschale ausgehoben werden. Zum anderen kann ein schalenförmiges Gewebe durch Einbringung unterschiedlicher Fadenlänge anhand der Variation der Kett- und Schussfadenabstände zueinander erzeugt werden.

Schlauchförmige Mehrlagengewebe:

Wird ein zweilagiges Schlauchgewebe mittel Spulenschützenwebtechnik so gefertigt, dass eine sich verjüngende Kontur mit fester Gewebekante entsteht und die Kettfäden nach und nach flottieren, kann nach der Entnahme des Gewebes diese Kontur zugeschnitten und aufgestellt werden. Mit diesem Verfahren kann jedoch kein regelmäßiges sphärisches Gewebe erstellt werden, da sich eine harte Kante an der Außenkontur der beiden verbundenen Gewebelagen bildet.

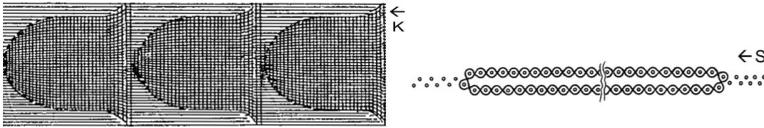


Abbildung 2-2: Fertigungsprinzip rotationsymmetrischer Kontur mittels Spulenschützenweben[39]

Deshalb wurde von Wiedemann und Rothe [40] dieses Verfahren weiterentwickelt. In dem Verfahren wird ebenfalls ein Schlauchgewebe mit endlosem Schusseintrag unter stufenweisem Flottieren der Randkettfäden gefertigt. Jedoch werden vier konische Gewebelagen übereinander gewebt, die nach der Entnahme des Gewebes zu einer 3D-Geometrie, die nahezu rotationssymmetrisch ist, ausgeformt werden können (Abbildung 2-3). Hierbei besteht die Möglichkeit mehrere Gewebelagen einzusetzen, wodurch sich jedoch die Schwachstellen an den Gewebekanten mehren. Darüber hinaus können solche Gewebekonstruktionen ohne Spulenschützeintrag gefertigt werden. So werden zum Beispiel mit diesem Verfahren auf Webmaschinen mit Luft- oder Wasserschussfadeneintrag One-Piece-Woven-Airbags gefertigt.

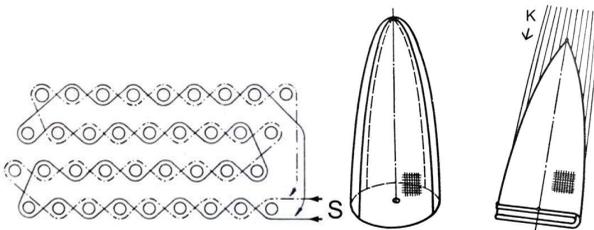


Abbildung 2-3: Fertigungsprinzip übereinanderliegende konischer Gewebelagen zu einer rotationssymmetrischen Kontur [40]

Koppelman [41] entwickelte 1961 ein Verfahren, um ein schlauchförmiges, einseitig verjüngtes Zweilagengewebe in eine 3D-Form zu bringen (Abbildung 3-7). Dabei werden sowohl die Kett- als auch die Schussfadenslängen lokal unterschiedlich eingebracht, wodurch sich das Zweilagengewebe zu einer 3D-Struktur aufwölbt (Abbildung 2-4). Jedoch liegt eine äußerst geringe Flexibilität vor, da für jede neue Endgeometrie die Webmaschinenperipherie geändert werden muss.

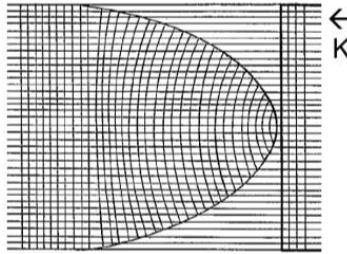


Abbildung 2-4: Fertigungsprinzip zur Erzeugung einer 3D-Kontur mittels lokal unterschiedlicher Kett- und Schussfadenlängen [41]

Variation der Fadenabstände

Werden bei der Gewebeerstellung die Abstände zwischen den Schuss- und Kettfäden variiert, resultieren daraus unterschiedliche Fadenlängen im Gewebe. Werden diese entsprechend in der Webebene angeordnet, wölbt sich das Gewebe zu einer gekrümmten textilen Struktur auf.

Die Einbringung zusätzlicher Fadenlängen kann mittels Weben mit speziellen Abzugssystemen erfolgen. Hierzu wurden nicht zylindrische Gewebeabzüge entwickelt. Diese weisen unterschiedliche Durchmesser auf, sodass unterschiedliche Kettfadenlängen abgezogen werden. Dazu werden die Kettfäden von Teilbäumen oder aus Spulengattern abgezogen. Je nach Geometrie der Abzugswalzen lassen sich unterschiedliche schalenförmige Krümmungen im Gewebe realisieren, wobei für jede Geometrie ein eigens dafür entwickeltes Abzugssystem notwendig ist. So wird beispielsweise bei zunehmendem Durchmesser der Walzen zur Gewebemitte in der Mitte mehr Kettfadenlänge abgezogen als in den Randbereichen. Dadurch bildet sich eine halbkugelförmige Struktur. Die unterschiedlichen Gewebedichten entlang der Gewebebreite können durch das Einbringen zusätzlicher Teilschüsse in der Gewebemitte ausgeglichen werden.

Das von Büsgen entwickelte „Shape 3 – Webverfahren ermöglicht die Herstellung von gewebten Schalengeometrien [42 – 44]. Die Einbringung zusätzlicher Kettfadenlängen erfolgt hierbei über einen programmierbaren segmentierten Abzugmechanismus. Zur Variation der Schussfadenlängen wird ein vertikal verstellbares V-Webblatt eingesetzt. Werden durch das Abzugssystem in Kombination mit dem V-Webblatt die Fadenabstände entsprechend lokal verändert, entsteht eine sphärische Wölbung der textilen Struktur (vgl. Abbildung 2-5). Die Abführung des Gewebes erfolgt nach unten. Die Strukturen werden

mittels Rahmen mit Schneidkanten aus der Webebene getrennt und anschließend gestapelt gelagert. Durch die unterschiedlichen Fadenabstände innerhalb des Gewebes resultieren unterschiedliche Gewebedichten. Diese werden durch die Variation der Bindung gezielt ausgeglichen, wodurch in begrenztem Maße eine relativ konstante Gewebedichte und damit Flächenmasse eingestellt werden kann. Das aufgeführte Verfahren ist aufgrund des V-Webblattes auf schmale Gewebebreiten limitiert. Darüber hinaus muss für jede Geometrie eine gesonderte Programmierung des Abzugsmechanismus erfolgen [43].

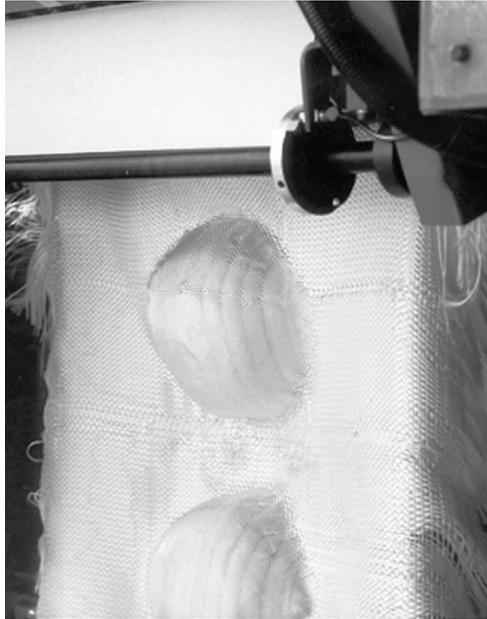


Abbildung 2-5: Shape 3 Verfahren – Webverfahren Helmverstärkung [44]

2.4.2 Dreidimensionale Gewirke

Die Herstellung von 3D-Gewirken wird hochproduktiv auf doppelbarrigen Raschelmaschinen durchgeführt. Dabei werden zwei voneinander unabhängige Flächen mittels gleichzeitiger Einarbeitung eines Polfadensystems verbunden. Das textile Konstrukt ist somit ein ebenes Gebilde mit einstellbarer Höhe in z-Richtung. Die Polfäden bestehen meist aus Monofilamenten, um eine druckelastische Verbindung zwischen den beiden Deckflächen zu generieren. Der Abstand kann dabei höchstens 65 mm betragen und wird

durch den Abstand der beiden gegenüberliegenden Nadelbarren eingestellt. Durch den Einsatz von zusätzlichen gestreckten Kett- und Schussfäden können die gewirkten Halbzeuge zudem verstärkt werden.

Neben der reinen Herstellung von Maschenwaren können mittels Multiaxial-Kettenwirkmaschinen mehrere gestreckte Lagen von Endlosfilamentgarnen in unterschiedlichen Richtungen übereinander gelegt und durch Wirken verfestigt werden. Dieses Verfahren ist hochproduktiv und wird für großflächige Strukturen für Leichtbauanwendungen eingesetzt. Die Eigenschaften des Textils sind dabei mit orthogonal gewebten Mehrlagengeewebe vergleichbar. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der glas- und carbonfaserverarbeitenden Multiaxial-Kettenwirktechnik konzentrieren sich auf die Steigerung der Produktivität, der Verbesserung der vorgelegten Lagen mittels zuvor gespreizten Tapes sowie die Reduktion der Produktionsabfälle. Die Überführung der ebenen 2D-Textilen in 3D-Strukturen erfolgt hauptsächlich über Zuschnitt- und Drapierprozesse.

Die direkte Herstellung von schalenförmigen Gewirken wurde in Entwicklungsarbeiten am ITM durchgeführt [45]. Dabei wird die Multiaxialkettenwirktechnik so modifiziert, dass unterschiedliche Abstände zwischen den vorgelegten Filamentgarnen resultieren (vgl. Abbildung 2-6). Diese unterschiedlichen Längen bilden im Nachhinein eine gekrümmte Fläche [46, 47]. Darüber hinaus wurden Entwicklungen zu gewirkten gekrümmten Abstandsgewirken getätigt. Diese zielen darauf, dass die Decklagen mit unterschiedlicher Länge gefertigt werden, wodurch einachsige gekrümmte Strukturen bereitgestellt werden können [48].

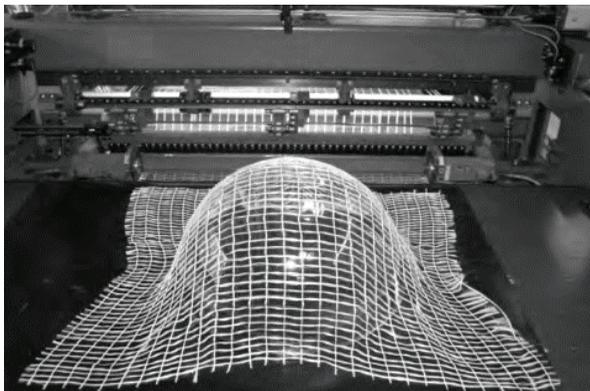


Abbildung 2-6: Gewirkte Hemisphäre[46]

2.4.3 Dreidimensionale Gestricke

Allgemein werden 3D-Gestricke mit integrierten Verstärkungsfäden in der Maschenstruktur als Mehrlagengestricke bezeichnet. Werden hierfür Flachstrickmaschinen mit mindestens zwei Nadelträgern eingesetzt, steht eine flexible Formgebung durch die gezielte Variation der Maschen zur Verfügung. So lassen sich Gestricklänge und –breite variieren, sodass eine einstellbare Drapierbarkeit oder endkonturnahe Geometrie erzeugt werden kann. Die mechanischen Eigenschaften in den jeweiligen Gestrickrichtungen werden von den eingesetzten Fadenmaterialien bestimmt. Hierbei können Schuss- und Kettfäden in das Gestrick eingearbeitet werden. Die Integration von Kettfäden innerhalb der Gestricke findet industriell kaum Anwendungen. Es bestehen jedoch Lösungen zur Integration gestreckter Kettfäden [49]. Hierzu gibt es maschinentechnische Modifikationen, die eine Zuführung des Kettfadens in den Maschenbildungsbereich von oben zwischen die Nadelträger einer Strickmaschine ermöglichen. Darüber hinaus können Kettfäden mit seitlichem Fadenversatz eingebracht werden, wodurch eine endkonturnahe Außen geometrie erzielt werden kann [50]. Durch die Kombination des Teilschusseintragens und Kettfadenversatz können endkonturnahe Geometrien wie schalen-, rohr-, spiralförmige Strukturen hergestellt werden (vgl. Abbildung 2-7) [51, 52]. Das Verfahren wird für industrielle Prototypen seitens der Firma Shima Seiki umgesetzt [53]. Die dafür eingesetzten Maschinentechnologien weisen jedoch eine äußerst geringe Produktivität auf und es liegen begrenzte Fasermassenanteile in den Gestricken vor.

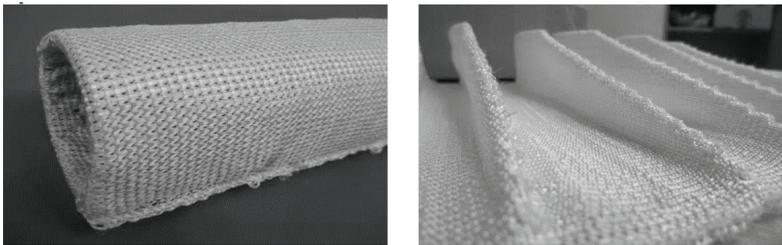


Abbildung 2-7: Verstärkte Mehrlagengestricke links: Rohrstruktur; rechts: Rippenstruktur [52]

Abstandstrukturen können ebenfalls auf Strickmaschinen hergestellt werden. Hierzu werden auf Flachstrickmaschinen zwei Deckflächen mit einer dazwischenliegenden Polfächenschicht miteinander verbunden. Der Abstand der beiden Deckflächen wird über den

Nadelbettenabstand sowie die Polfadeneinbindung realisiert. Werden anstelle der Polfäden gestrickte Stege eingesetzt, wie bei sogenannte Spacer Fabrics, können dickenflexible, druckstabile Abstandsstrukturen hergestellt werden [54]. Insbesondere bei der Verwendung von Hochleistungsfaserstoffen bieten diese Strukturen für Leichtbauanwendungen gute mechanische Eigenschaften.

2.4.4 Dreidimensionale Geflechte

Geflechte zählen traditionell zu den Schmaltextilien und bilden im Vergleich zu den vorher aufgeführten Verfahren keine großformatigen Flächen. Geflechte entstehen durch das regelmäßige Verkreuzen von mindestens drei Fäden, die diagonal zur Produktionsrichtung verlaufen. Grundsätzlich können 3D-Geflechte mittels Rund- und Umflechten hergestellt werden. Als 3D-Geflecht wird eine Struktur bezeichnet, deren Fäden in allen drei Raumrichtungen verkreuzt werden. Durch das Rundflechten können rohrförmige Strukturen erzeugt werden. Komplexere Geometrien lassen sich mittels Umflechten eines in der Regel robotergeführten Kerns abbilden. Die Geometrie des Kerns bestimmt die Endgeometrie. Es können sowohl rotationssymmetrische als auch gekrümmte Profile damit hergestellt werden. Unter Hinzunahme einer robotergestützten Führung des Kerns kann ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden. Die Bewegung kann so ausgeführt werden, dass ein mehrmaliges Umflechten des Kerns vollzogen wird. Weitere Entwicklungen beabsichtigen, dickwandige Strukturen zu produzieren, deren einzelne Lagen miteinander verbunden sind. Erzielt wird dies mit Rundflechtmaschinen, die radiale Nuten zum Klöppeltransport zwischen den einzelnen Lagen aufweisen. Weiterentwicklungen des Umflechtens wie das Radialumflechten, bei dem die Klöppel im inneren Kreisring des Maschinengerüsts angebracht werden, bieten den Vorteil der Erweiterung der Ringanzahl, die modular mit konzentrischen Klöppelbahnen zusammengebaut werden können (vgl. Abbildung 2-8). Damit können die Klöppel zwischen den einzelnen Schichten wechseln. Neben diesen Verfahren können 3D-Geflechte auf Flechtmaschinen mit modularen Klöppelantrieben hergestellt werden [55]. Das Geflecht entsteht durch die Anordnung mehrerer Flügelräder, die je nach gewünschtem Flechtbild einzeln betrieben werden können. Zur Übergabe der einzelnen Klöppel liegen steuerbare Weichen vor [56]. Die Flügelräder werden zu Modulen zusammengefasst. Diese können modular so angeordnet werden, dass bspw. profilmörmige Geometrien wie L- oder T-Profile geflochten werden können [57].

Das Flechtverfahren wird für zahlreiche Anwendungen, wie bspw. die Herstellung von Spanten im Flugzeugbau, bereits industriell eingesetzt [58]. Die Fertigung von schalenförmigen Geometrien kann verfahrensbedingt jedoch nicht umgesetzt werden.

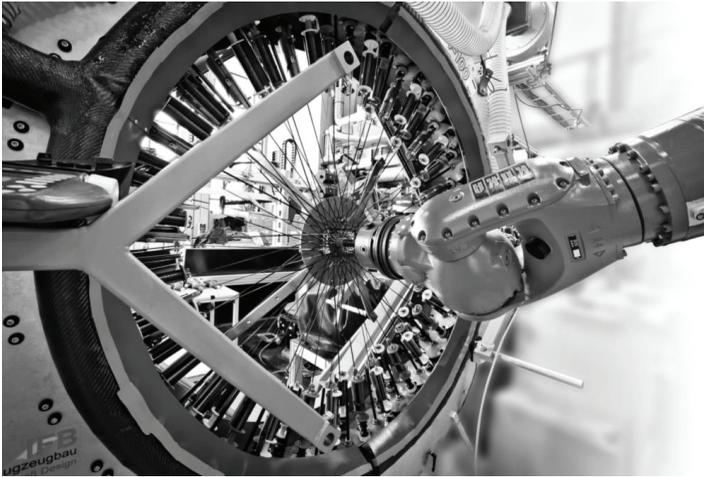


Abbildung 2-8: Robotergestütztes Radialflechten [59]

2.4.5 Weitere Verfahren

Zur Herstellung von schalenförmigen textilen Strukturen kann ebenfalls das Verfahren Tailored Fibre Placement-Verfahren eingesetzt werden [34]. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass der Verstärkungsfaden robotergestützt auf einem Stickgrund fixiert wird. Dabei kann der Ablagewinkel individuell eingestellt werden. Die Überführung in schalenförmige Geometrien erfolgt ausschließlich über Umformen der zuvor in der Ebene gefertigten Strukturen. Mit einer Ablagegeschwindigkeit von 5m/min je Ablagekopf ist das Verfahren lediglich für Kleinserien vorteilhaft.

Zur Erhöhung der Produktivität kann das Tape- Legeverfahren angewendet werden. Hierbei werden vorgefertigte Tapes mittels Roboter auf einem Werkzeug abgelegt [32]. Dies bietet den Vorteil eines direkten automatisierten Preformprozesses. Jedoch sind erhöhte Anlageninvestitionen notwendig und jede zu erzeugende Bauteilgeometrie benötigt eine entsprechende Werkzeugform. Aus diesem Grund wird das Tape-Legeverfahren nur in höherpreisigen Branchen wie in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt.

Im Maschinen- und Anlagenbau werden überwiegend FKV-Bauteile mit einer profil- und rotationssymmetrischen Geometrie als Serienbauteile hergestellt. Diese Geometrien lassen sich unter Nutzung des Pultrusions- und Wickelverfahrens unmittelbar aus dem Faser- und Matrixmaterial, ohne den Einsatz von 2D-Halbzeugen, herstellen und liefern somit eine hohe Rentabilität [60]. Die Fertigung von gekrümmten schalenförmigen Strukturen sind mit diesem Verfahren nicht umsetzbar.

2.4.6 Sequentielles Preforming zur Erzeugung dreidimensionalen Strukturen

Die Herstellung schalenförmig gekrümmter Strukturen erfolgt meist mittels sequentiellen Preformings. Dabei kommt es häufig zu verlängerten Produktionszeiten oder zu sehr hohen Verzugskräften bei dehnungsarmen Fasermaterialien wie Carbon- oder Glasfasern, sodass Strukturverzerrungen bis hin zu unerwünschtem Faltenwurf bei der weiteren Verarbeitung auftreten können [61].

Umformen zur Erzeugung dreidimensionaler textiler Strukturen:

Die Umformung ebener 2D-Textilien zu 3D-Strukturen ist in der Literatur ausgiebig beschrieben [2, 62 – 66]. Dabei wird das flache Textil durch das Einbringen von Umformkräften mittels Umformhilfen von der ausgehenden flachen Geometrie in eine dreidimensionale überführt. Der mögliche Grad der Umformung wird hierbei durch das Drapiervermögen der textilen Struktur begrenzt. Dabei liegt insbesondere beim Einsatz von Hochleistungsfasern, die sich durch eine geringe Dehnung auszeichnen, eine starke Limitierung vor. So rutschen bei zu starker Dehnung der Fasern diese an den Bindungspunkten der Gewebestruktur auseinander und werden damit undefiniert verschoben [67]. Hierbei treten sowohl Verschiebungen der Verstärkungsfäden als auch Unterbrechungen auf, wodurch die Festigkeit des finalen Bauteils minimiert wird. Eine Winkelabweichung von 10° von der Hauptbelastungsrichtung führt zur Reduktion der zugmechanischen Eigenschaften in diesen Bereichen eines FKV-Bauteil um bis zu 30 % [2]. Darüber hinaus tritt beim Verformen von orthogonalen Geweben aufgrund des frühzeitigen Erreichens des kritischen Scherwinkels Faltenbildung in den Flächengebilden auf. Das Erreichen des kritischen Scherwinkels kann bei gleichbleibendem Material durch die Art der Gewebeförderung beeinflusst werden. So können sich die Fäden innerhalb von Geweben mit weniger Kreuzungspunkten besser verschieben, wodurch der kritische Scherwinkel später eintritt, als dies bei Gewebeförderungen mit mehr Kreuzungspunkten der Fall ist. Jedoch

ist das Umformen hinsichtlich der erreichbaren Umformwege limitiert und nur bis zu einem gewissen Grad ohne negative Strukturverzerrungen und lokale Dünnstellen durchführbar.

Bauteilfertigung dreidimensional konfektionierter Textilstrukturen:

Unter Nutzung konfektionstechnischer Prozesse können ebene, zweidimensionale textile Strukturen durch Zusammensetzen von einzeln zugeschnittenen Textilien in 3D-Strukturen überführt werden. Die unterschiedlichen Prozessschrittmöglichkeiten sind in der nachstehenden Literatur aufgeführt [2, 68 – 70]. Die einzelnen Schritte können dabei wie in Abbildung 2-9 dargestellt übersichtlich zusammengefasst werden. Diese umfassen folgende Punkte:

- Bereitstellung ebener, 2D-Gewebe auf Rollen
- Berechnung der Abwicklung der Zielgeometrie und Generierung einzelner Zuschnitteile zur Abdeckung der Oberfläche
- Erzeugung eines Schnittbildes und Zuschnitt der Einzelstücke
- Laglegen, bzw. Fixierung der einzelnen Zuschnitte auf einem Werkzeug
- Konsolidierung und Fertigstellung des Bauteiles

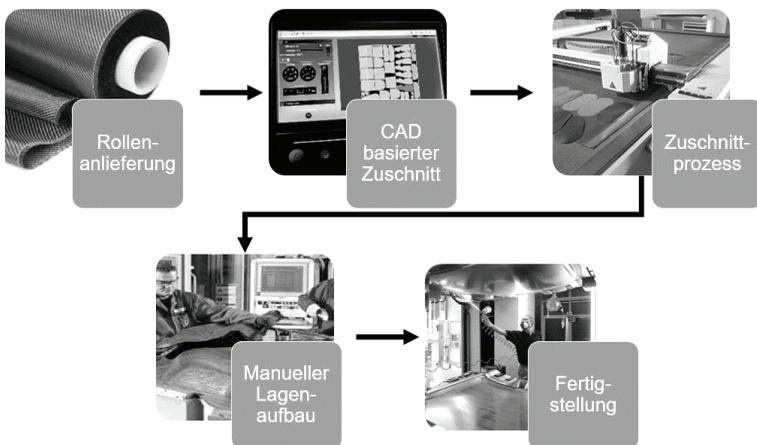


Abbildung 2-9: Prozessschritte der Bauteilfertigung 3D-konfektionierter Textilstrukturen[71 – 75]

Die textile Konfektion stellt somit ein Vorgehen dar, das je nach Geometrie des Endproduktes einen passgenauen Zuschnitt für dessen Abbildung generiert sowie das anschließende Verbinden der dafür notwendigen Einzelteile bereitstellt. Bedingt durch das Zuschnittverfahren treten bei komplexen Bauteilen hohe Zuschnittverluste auf, die bis zu 50 % des eingesetzten textilen Gebildes ausmachen können [76]. Darüber hinaus treten verfahrensbedingt Überlappungen an den Stoßstellen der einzelnen Zuschnitte auf, woraus inhomogene Wandstärken resultieren und keine durchgängigen Fadenverläufe innerhalb der Struktur vorliegen.

2.5 Ableitung der Anforderungen an textile Halbzeuge

Zur Verstärkung von FKV-Bauteilen, die eine schalenförmige Geometrie aufweisen, werden textile Strukturen benötigt, die diese Geometrie abbilden. Dabei sind neben der geometrieeinnehmenden Strukturen durchgängige Fadenverläufe innerhalb des Textils zur optimalen Aufnahme der eingeleiteten Last erforderlich. Neben diesen zentralen Aspekten werden folgende Anforderungen an textile Strukturen zur Verstärkung von FKV-Bauteilen gestellt:

- Die Geometrie des Textils soll der äußeren Geometrie des Bauteils gleichen
- Die textile Struktur soll zur Aufnahme der einwirkenden Kräfte durchgängige Fadenverläufe aufweisen
- Das Textil soll gut handhabbar sein
- Das Textil soll möglichst vollkommen einer direkten endkonturnahen Stückaufmachung entsprechen

Aus diesen Anforderungen lassen sich die zentralen Forderungen an das textile Fertigungsverfahren zur Erzeugung der Strukturen ableiten:

- Die eingesetzte Fertigungstechnik soll die Geometrie des Textils direkt erzeugen
- Die Fertigungstechnik soll einen hohen Grad an Automatisierung aufweisen
- Die Fertigungstechnik soll eine hohe Produktionsleistung aufweisen
- Die Fertigungstechnik soll minimale Faserschädigungen verursachen

- Die Fertigungstechnik soll die Verarbeitung möglichst vieler unterschiedlicher Fasermaterialien erlauben

2.6 Zusammenfassende Betrachtung

Schalenförmige mehrachsig gekrümmte endkonturnahe textile Strukturen besitzen ein sehr hohes Potential, um die steigende Nachfrage an kostengünstigen und leistungsverbesserten Textilien für den Einsatz in Leichtbauanwendungen zu erfüllen. Sie bieten den erheblichen Vorteil, dass die 3D-Geometrie des geforderten Bauteils, insbesondere für nicht abwickelbare doppelachsig gekrümmte Flächen, durch die textile Struktur direkt bereit gestellt werden kann. Dabei fallen sonst notwendige Zuschnitt- und Drapierprozesse weg, wodurch die Leistungsfähigkeit und das Leichtbaupotential des endgültigen Bauteils verbessert werden können. Damit lassen sich insbesondere bei der Verarbeitung von preisintensiven Fasermaterialien erhebliche wirtschaftliche Vorteile generieren.

Für die Herstellung von FKV-Bauteilen stellt sich die Forderung nach gut drapierbaren oder schalenförmigen Halbzeugen, die bereits die Endgeometrie aufweisen. Damit sollen die Produktionsleistung der bauteilfertigenden Verfahren unterstützt sowie Ressourcen durch Minimierung des Materialabfalls geschont werden. Für die Automatisierung der bis heute vorliegenden manuellen Prozessschritte bei der Fertigung von schalenförmigen gekrümmten Strukturen liegen jedoch kaum industrielle Lösungen vor. Die gegenwärtigen Verfahren zur direkten Herstellung von schalenförmigen textilen Strukturen zeigen zwar die Vorteile eines integralen Fertigungskonzeptes, jedoch sind diese meist mit aufwendigen Technologien verbunden, weshalb eine industrielle Umsetzung gehemmt wird. So wird bspw. für die Herstellung von schalenförmigen mit Endlosfilamentgarnen verstärkten Gewirken eine zusätzliche mit Servomotoren angetriebene Einrichtung zur längenflexiblen Einzellieferung der Kettfäden und die damit einhergehende Steuerung sowie ein differenziertes Abzugssystem benötigt. Die Herstellung von schalenförmigen Gestriicken ist auf Flachstrickmaschinen möglich. Diese Technologie benötigt die Änderung des Strickschlusses sowie ein differentiales Abzugssystem, welches für jede Geometrie programmiert werden muss. Entwicklungen zur Herstellung von schalenförmigen Geweben zeigen, dass Halbkugelschalen webtechnisch ohne nachfolgende Drapier- und Zuschnittprozesse möglich sind. Dieses Verfahren erfordert einen hohen maschinellen Aufwand, da das speziell entwickelte Abzugssystem für jede Geometrie angepasst werden muss.

Verfahrensbedingt sind darüber hinaus keine geschlossenen Geometrien sowie Hinterschnitte umsetzbar, da die Elemente des Hilfsabzuges aus dem Gewebe wieder entnommen werden müssen.

Eine Umsetzung komplexer schalenförmiger textiler Strukturen auf Basis einer flexiblen automatisierbaren Fertigungstechnologie, die ohne aufwendig programmierbare Zusatzmodule auskommt, ist bisher nicht bekannt. Ein erfolgsversprechender Ansatz zur Bereitstellung einer Technologie, ist die Nutzung etablierter Fertigungsverfahren, da diese industriell bereits eingesetzt werden und damit eine reproduzierbare, wirtschaftliche Fertigung umgesetzt werden kann.

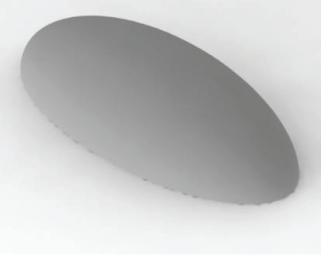
3 Zielsetzung und Lösungsweg

Die Betrachtung des Standes von Wissenschaft und Technik bezüglich der Technologien zur Herstellung von komplex gekrümmten textilen Schalenstrukturen aus Endlosfilamentgarnen zeigt, dass keine effizienten Verfahren zur integralen, direkten Fertigung von schalenförmigem Gewebe für den Einsatz in FKV-Anwendungen vorhanden sind. Gängige textile Flächenbildungsverfahren ermöglichen nicht ohne weitere komplexe Maßnahmen die direkte Fertigung von gekrümmten Schalenstrukturen. Durchgeführte Entwicklungen sind meist mit konstruktiv aufwendigen sowie steuerungstechnischen Maßnahmen verknüpft, weshalb eine industrielle Umsetzung nur zögernd voranschreitet.

Endkonturnahe textile Strukturen zur Verstärkung von FKV-Bauteilen zeichnen sich dadurch aus, dass deren Geometrie bereits die der Bauteilgeometrie entspricht. Dabei liegen die Verstärkungsfäden endlos und ohne Unterbrechung vor. Die Herstellung der textilen Strukturen soll ohne weitere Prozessschritte, wie Zuschnitt- und Drapierprozesse, integral im Fertigungsverfahren erfolgen, was der Zielsetzung des Fertigungsverfahrens entspricht. Dadurch sollen die Materialeffizienz der Halbzeuge verbessert und die Leistungsparameter erhöht werden. Diese Strukturen verfügen insbesondere für den Leichtbau über einen hohen wirtschaftlichen, ökologischen sowie technischen Mehrwert.

Das Webverfahren gilt als textiles Standardverfahren und wird insbesondere für die Herstellung von Flächen aus Hochleistungsmultifilamentgarnen eingesetzt. Aufgrund der vorliegenden Flexibilität hinsichtlich der Fertigung textiler Flächen bietet es einen hervorragenden Ausgangspunkt für die Entwicklung einer flexiblen Fertigungstechnologie zur Umsetzung doppelachsig gekrümmter, integral gewebter Schalenstrukturen. Bisher wurde jedoch das Potential zur Herstellung integral gefertigter gekrümmter Schalenstrukturen bei weitem nicht vollständig ausgenutzt. Dabei sollen, wie in Tabelle 3-1 aufgezeigt, unterschiedlichste geometrische Oberflächen direkt im Webprozess erzeugt werden.

Tabelle 3-1: Beispiele komplex gekrümmter Strukturen

Endkonturnahe Schalengeometrie	Halbkugel
	
Ellipsoid	Spiralen/Trichter
	

Ziel dieser Arbeit ist die konstruktiv-technologische Entwicklung eines neuartigen Webverfahrens zur Herstellung endkonturnah gewebter Schalenstrukturen. Dazu soll die Webtechnik so weiterentwickelt werden, dass die Nutzung industrienaher Webmaschinen realisiert werden kann. Dabei sollen Strukturen umgesetzt werden, deren Verstärkungsfäden eine endkonturnahe, bauteilgerechte Fadenanordnung aufweisen. Die Entwicklungsarbeiten umfassen folgende Teilziele:

- Entwicklung von neuartigen konturgerechten Geweben für einachsig gekrümmte Schalenstrukturen
- Entwicklung einer Technologie zur Anpassung der Gewebebreite im laufendem Webprozess auf Breitwebmaschinen

- Entwicklung von neuartigen doppelachsig gekrümmten Geweben für Schalenstrukturen
- Erarbeitung einer Methode zur Erfassung doppelachsig gekrümmter Oberflächen
- Durchführung eines konstruktiven Entwicklungsprozesses innerhalb der Greiferwebmaschinentechologie zur Etablierung des neuartigen Webprinzips
- Umsetzung der konstruktiven Vorzugslösung und Ermittlung der Maschinenparameter
- Erarbeitung der neuartigen Wirkzusammenhänge des Webprinzips zur Ausbildung endkonturnaher Gewebestrukturen
- Systematische Bindungsentwicklung zur Generierung doppelachsig gekrümmter Gewebe für Schalenstrukturen
- Entwicklung einer Prozesskette für die Auslegung und Überführung von Zielgeometrien in die entwickelte Webmaschinenumgebung
- Umsetzung ausgewählter Gewebegeometrie zur Demonstration und Erbringung des Technologienachweises

Zur Erreichung der aufgestellten Ziele wird folgender Lösungsweg formuliert:

- Durchführung eines konstruktiv-technologischen Entwicklungsprozesses und der damit einhergehenden Gewebeentwicklung zur Herstellung konturgerechter, breitvariabler Gewebe zur Verstärkung von einachsig gekrümmten schalenförmigen FKV-Bauteilen
- Durchführung eines konstruktiv-technologischen Entwicklungsprozesses und der damit einhergehenden Gewebeentwicklung für ein neuartiges Webverfahren, das zur integralen Herstellung von doppelachsig gekrümmten schalenförmigen Geweben für den Einsatz in FKV-Bauteilen angewendet werden kann

Die Ergebnisse der Arbeit werden zusammengefasst sowie das hohe Potential des entwickelten Verfahrens und der damit einhergehenden Strukturen für die industrielle Anwendung anhand ausgewählter Produktbeispiele aufgezeigt. Darüber hinaus erfolgen weitere Vorschläge zur Fortsetzung der Arbeit auf dem Gebiet der neuartigen entwickelten Webtechnologien und den damit erzeugbaren Gewebegeometrien.

4 Entwicklung einer Technologie zur Fertigung konturgerechter Gewebe für ebenflächige und einachsig gekrümmte Schalenstrukturen

4.1 Einleitung

Um komplexe FKV-Bauteile zu realisieren, soll die Kontur des verstärkenden Gewebes im Idealfall der Kontur des zu erzeugenden Bauteils entsprechen. Dies erfordert die Bereitstellung von endkonturnahen verschnittarmen Geweben. Werden schalenförmige Bauteile betrachtet, die mittels Gewebe verstärkt werden, erfolgt die Herstellung der Gewebe bisher auf Breitwebmaschinen mit konstanter Gewebebreite und Kettfadendichte. Die Endgeometrie der Preform wird mit konfektionstechnischen Prozessschritten erzielt. Daraus resultiert neben dem Materialverlust eine Unterbrechung der kraftaufnehmenden Endlosfilamentgarne. Zur Überwindung der vorliegenden technischen Limitationen der Breitweberei wird im folgendem Kapitel der konstruktiv-technologische Entwicklungsprozess einer Technologie zur integralen Anpassung der Gewebekontur im laufenden Webprozess durchgeführt. Dieser beinhaltet neben konstruktiven Arbeiten die Entwicklung einer Steuerung sowie eines Algorithmus zur Überführung der geforderten Gewebebreiten in die Steuerung. Darüber hinaus erfolgt die Gewebeentwicklung. Die Entwicklung ermöglicht die Änderung der Gewebebreite und damit die Kettfadendichte auf Breitwebmaschinen während des Gewebeherstellungsprozesses. Die Gewebebreite der damit herstellbaren Gewebe wird für die geforderte Geometrie von einachsig gekrümmten Schalenbauteilen direkt im Webprozess vorgegeben. Die Entwicklungen werden anhand der Fertigung zweier Funktionsmuster dargestellt und die daraus resultierenden gewebespezifischen Eigenschaften ausgewertet. Schlussendlich wird die Technologie zur Herstellung von breitenvariablen Geweben eingesetzt, die zur Verstärkung eines finalen FKV-Bauteils eingesetzt werden.

4.2 Entwicklung einer konstruktiven Lösung für ein elastomerbasiertes breitenvariables Webblattes für Breitwebmaschinen

Das Ziel des konstruktiven Entwicklungsprozesses ist die Entwicklung einer Technologie, die die kontinuierliche Änderung der Gewebebreite und damit auch die der Kettfahndichte im Webprozess ermöglicht. Das zu entwickelnde System soll in Breitwebmaschinen installiert werden. Dabei soll die Gewebebreite um bis zu 50 % reduziert werden sowie eine asymmetrische Gewebeaußenkontur ermöglicht werden.

Zur Zielerreichung wird anfangs die Funktion des zu entwickelten Systems aufgestellt (Abbildung 4-1). Die daraus abgeleiteten konstruktionstechnisch zu entwickelten Systeme lassen sich in folgende Punkte unterteilen:

- Rietstab-Mechanismus-Verbund

Dieser beinhaltet die Geometrie der Rietstäbe, die Führung der Rietstäbe sowie die Verstellmechanismen

- Rahmen-Lagerung

Diese beinhaltet die Sicherung des Rietstabverbundes in einer entsprechenden Lagerung und Erfüllung der Funktion des Webblattes hinsichtlich des Schussfadenschlages

- Positionsänderung-Antrieb

Diese beinhaltet die Einleitung einer Wegänderung auf den Rietstabverbund während des Webprozesses

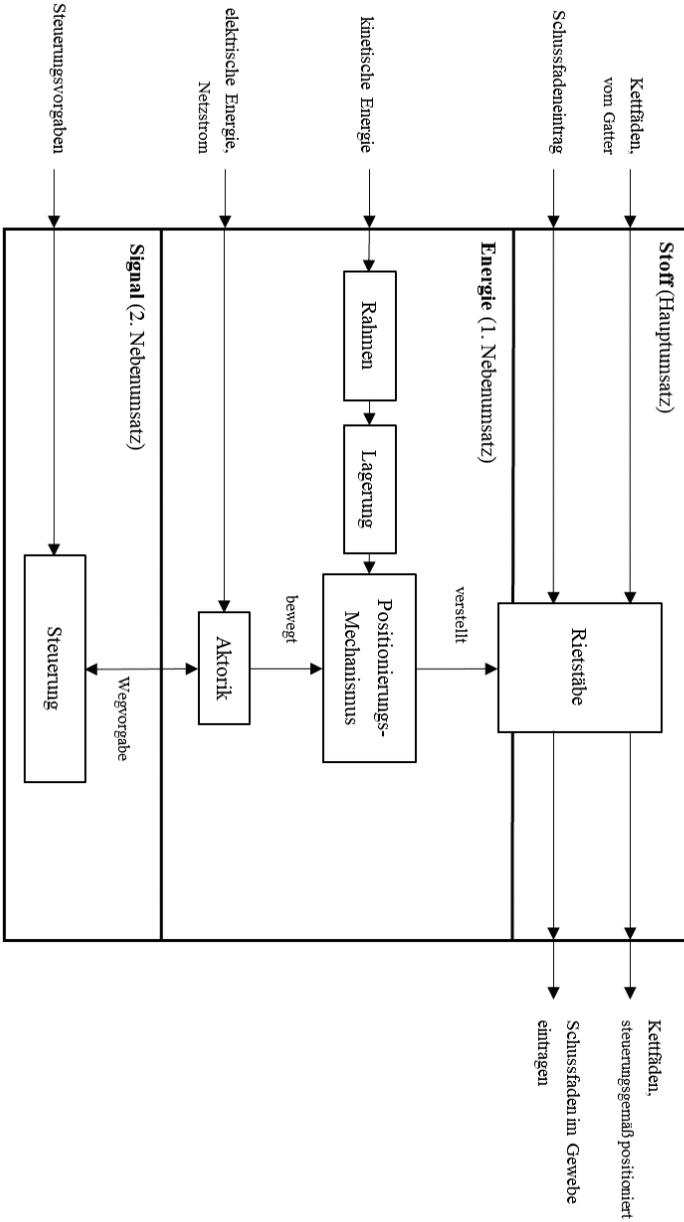


Abbildung 4-1: Erstellung der Funktionen zur Entwicklung eines breitenvariablen Webblattes[77]

Basierend auf dem konstruktiven Entwicklungsprozess wird folgende Vorzugslösung erarbeitet: Das entwickelte breitenvariable Webblatt basiert darauf, dass zwischen den Rietstäben elastische Elemente angeordnet werden, die in einem unteren und oberen Blattbund beweglich geführt werden. Die Verstellung des Webblattes erfolgt durch je einen an den Enden der Blattbreite befindlichen Linearschlitten, der mit oben und unten angeordneten Linearspindeln verstellt wird. Durch die Bewegung der Linearspindeln und damit die Verstellung der Schlitten erfolgt eine Änderung der Rietabstände und folgend eine Veränderung der Kettfadendichte. Die Wegänderung der Schlitten erfolgt simultan zum Gewebeherstellungsprozess, sodass die Kettfadendichte und damit Gewebebreitenänderung im Webprozess erfolgen (vgl. Abbildung 4-2).

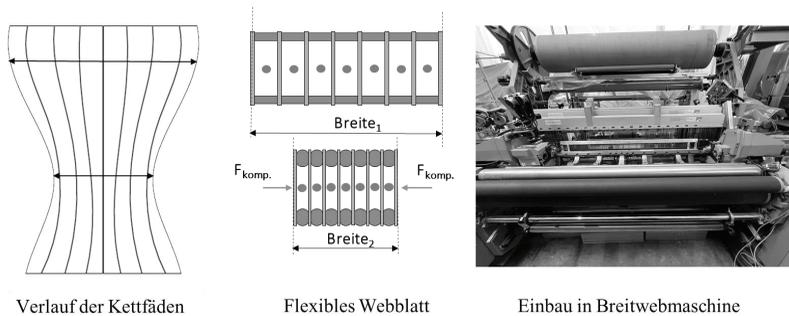


Abbildung 4-2: Funktionsprinzip eines elastischen Webblattes für Breitwebmaschinen

Die detaillierte konstruktiv umgesetzte Lösung (vgl. Abbildung 4-3) sieht vor, dass die Wegänderung der zu komprimierenden Elementen mittels Linear-Spindeleinheiten erfolgt. Diese werden von seitlich montierten Schrittmotoren angetrieben, die wiederum die Drehbewegung auf die Spindeln über biegsame Schaftwellen übertragen. Die Spindeln selbst treiben Schlitten an, die die Rotationsbewegung der Spindeln in eine lineare Verstellbewegung auf den Verbund übertragen. Zur Führung der einzelnen Rietstäbe und der dazwischen befindlichen elastischen Elemente werden diese reihenweise oben und unten auf Führungsstäben montiert, die wiederum an den seitlichen Rahmenelementen fixiert sind. Zur Stabilität der Konstruktion werden die Spindeln, die Führungsstäbe und die darauf befindlichen Rietstäbe in zwei U-Profilen geführt.

Die in Abbildung 4-3 gezeigte Konstruktion sieht vor, dass der mittlere Rietstab in seiner Position fixiert wird. Durch die voneinander unabhängigen Bewegungen der seitlichen Schlitten kann eine asymmetrische Verstellung des Webblattes erfolgen. Das umgesetzte Webblatt weist eine Grundfeinheit von 18 Rietlücken pro 10 cm auf, die auf eine Feinheit von 36 Rietlücken pro 10 cm durch die Verstellung der Schlitten erhöht werden kann. Die maximale Gewebebreite ist 115 cm und kann auf 56 cm verringert werden. Als elastische Elemente zwischen den Rietlücken werden Wellenfedern eingebaut, die einen freien Federweg von 5,28 mm aufweisen, wobei dieser um bis zu 52 % verringert werden kann [78]. Die genannten Parameter können durch die Wahl der Federelemente und der Rietstabbreite modifiziert werden, wodurch auch andere Feinheiten realisierbar sind. Zur Reduktion der während der Kettfadendichteverstellung entstehenden Kettfadenquerkräfte auf die Rietstäbe, wird im Hinterfach der Webmaschine zusätzlich ein Expansionskamm installiert. Dieser ermöglicht, dass die Kettfäden dem Webblatt immer mit dessen Breite zugeführt werden und damit die gewünschte Rietfeinheit nicht negativ beeinflusst wird. Die Breitenänderung des Expansionskamms wird ebenfalls mittels in der Steuerung implementierten Schrittmotors angepasst.

Der Einbau der entwickelten konstruktiven Lösungen erfolgt in einer Greiferwebmaschine des Typs P1, Lindauer Dornier. Die Installation des Webblattes erfolgt an Stelle des ursprünglichen Webblattes (vgl. Abbildung 4-4). Da aufgrund der Gewebebreitenänderung unterschiedliche Kettfadenlängen im Gewebe resultieren, erfolgt die Zuführung der Kettfäden über eine Einzelfadenzuführung mittels Gatter (vgl. Abbildung 4-5). Die Installation des Expansionskamms erfolgt zwischen Gatter und Streichbaum der Webmaschine (vgl. Abbildung 4-6). Die Kantenverfestigung erfolgt mittels zusätzlichen Dreherfäden. Diese sorgen dafür, dass die äußeren Kettfäden in ihrer Position verbleiben und nicht aus dem Gewebe herausrutschen.

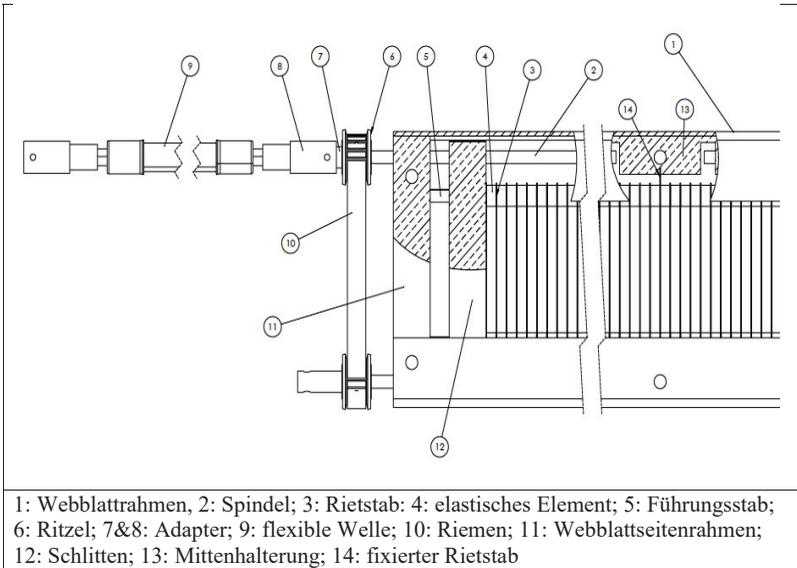


Abbildung 4-3: Konstruktionsprinzip des breitenvariablen Webblattes



Abbildung 4-4: Implementierung des breitenvariablen Webblattes in eine Dornier Greiferwebmaschine P1

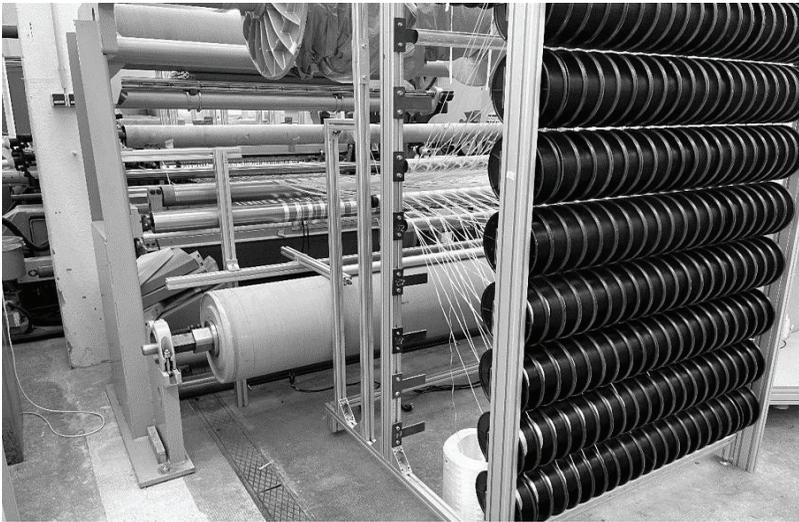


Abbildung 4-5: Zuführung der Kettfäden mittels Einzelfadenzuführung zur Herstellung breitenvariabler Gewebe



Abbildung 4-6: Installation eines Expansionskammes im Hinterfach der Webmaschine

Das Verarbeiten von Hochleistungsfilamentgarnen zu Geweben erfordert ein schädigungsarmes Verfahren, damit die daraus gefertigten FKV-Bauteile die höchste mechanische Leistung liefern. Zur Charakterisierung des entwickelten breitenvariablen Webblattes hinsichtlich der hervorgerufenen Kettfadenschädigung erfolgt die Überprüfung der Zugkraft von verarbeiteten Kettfäden und der Vergleich dieser mit dem Ausgangsmaterial (vgl. Abbildung 4-7). Die Entnahme der Kettfäden erfolgt aus einem gefertigten Gewebemuster, dessen Gewebebreite von 115 cm auf 57 cm reduziert wurde. Hierbei werden die ersten 15 Randkettfäden gewählt, da für diese die größte seitliche Auslenkung im Prozess erfolgte und somit die größte zu erwartende Schädigung vorliegt.

Im Ergebnis weist die mittlere Kettfadenhöchstzugkraft der verarbeiteten Kettfäden 398,4 N auf. Die Höchsthöchstfadenzugkraft des angelieferten Ausgangsmaterials beläuft sich auf 534,1 N. Zur Einordnung dieser Abweichung von 25 % wird zusätzlich die Fadenzugkraft des umgespulten Kettfadenmaterials gemessen. Dieses wird auf Scheibenspulen umgespult. Dessen mittlere Höchsthöchstfadenzugkraft beträgt 449,8 N. Somit liegt eine Abweichung im Vergleich zu den verwebten Kettfäden von 11% vor, wobei nachgewiesen wurde [2], dass der Einfluss im Verbund deutlich geringer ausfällt. Dieses Ergebnis erlaubt den Rückschluss, dass die Garnschädigung hauptsächlich durch das gewählte Umspulverfahren, insbesondere auf den Spulenkörper zurückzuführen ist und nicht durch das entwickelte Webblatt. Somit ist zu empfehlen, dass die Zuführung der Kettfäden über ein Gatter mit Rohmaterialspulen erfolgt.

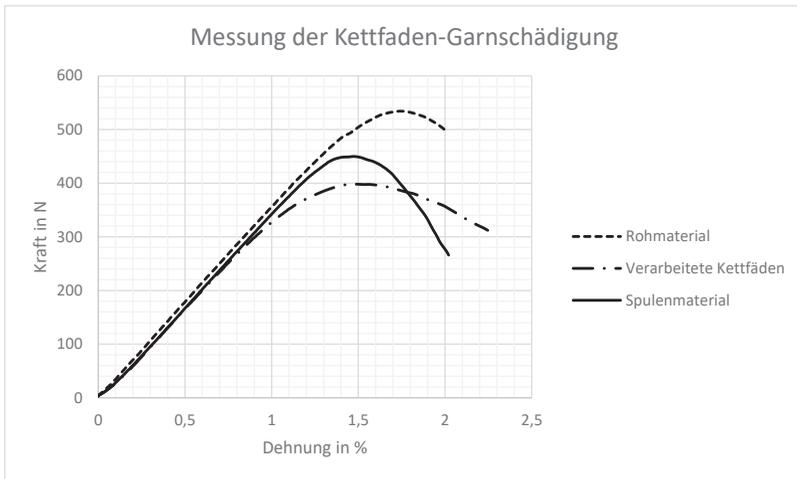


Abbildung 4-7: Messung der Garnschädigung der verarbeiteten Kettfäden

4.3 Entwicklung eines Algorithmus zur Geometrieerfassung der Gewebe und Steuerungsentwicklung

Damit die Schrittmotoren die korrekte Bewegung zur Anpassung der Gewebebreite durch Angabe der Werte in den Arrays durchführen, erfolgt die Entwicklung eines in Matlab implementierten Algorithmus, der die geforderten Breiten entsprechend in die Steuerung überführt. Der Algorithmus ermöglicht das direkte Einlesen der gewünschten Geometrien als Standard Transformation Language (STL)-Datei, sodass deren Breiten entlang eines vom Benutzer gewählten Rasters berechnet werden. Alternativ können direkt die gewünschten Breiten für die jeweilige Schussfadenabfolge als Tabelle eingegeben werden. Wird eine STL-Datei importiert, weist diese eine Punktwolke auf. Diese Informationen müssen in die entsprechenden Breiten für die dazugehörigen Schusseintragsnummern überführt werden. Dazu werden zunächst die Punkte der Ränder des Musters erfasst und unter Nutzung der Matlab-Funktion "interp1" eine interpolierte Funktion zur Abbildung der Außenkontur erstellt. Anschließend wird mit Hilfe der Matlab-Funktion "linspace" ein Vektor zwischen Gewebeanfang und -ende erstellt. Die Größe des Vektors entspricht dabei dem gewählten Raster, das wiederum der gewählten Schussanzahl des gesamten Musters entspricht. Zur Ermittlung der Randpunkte, die zur Berechnung der Gewebereite für den jeweiligen Schusseintrag notwendig sind, werden die Punkte des Rasters, die der

Kettfadenrichtung entsprechen, mit der interpolierten Randfunktion abgeglichen und gespeichert. In Abbildung 4-8 wird anhand einer fiktiven Geometrie der entwickelte Algorithmus gezeigt. Die rot markierten Punkte bilden die aus der STL-Datei ausgelesenen Randpunkte, die wiederum zur Berechnung der Splines der Außenkontur (blaue und grüne Linien) eingesetzt werden. Die Randpunkte ermöglichen schlussendlich die Berechnung der Gewebebreite für den jeweiligen Schusseintrag. Diese Information liefert die notwendigen Verstellwerte der Schrittmotoren. Dazu wird für den entsprechenden Geweberand die Differenz zum vorherigen Schusseintrag kalkuliert. Diese Differenzen werden wiederum in die entwickelte Steuerung implementiert.

Die Steuerung der Schrittmotoren sieht vor, dass durch Nutzung einer Arduino-Mikrocontroller-Steuerung, die geforderten Verstellung gemäß der Gewebebreite durchgeführt wird. Im hierfür programmierten Sketch werden die Verstellwege der Schrittmotoren in jeweils einem Array gespeichert. Die Positionen des Arrays entsprechen dabei den Schusseintragsnummern des Gewebemusters. Die Übertragung des aktuellen Schusseintrages wird mittels an der Hauptwelle der Webmaschine angeschlossenen Drehwinkelsensors in die Steuerung übertragen. Eingesetzt werden NEMA 23 Motoren, deren erzeugbare Kraft durch das zugeführte Drehmoment ausreicht, sodass der Rietstab-Verbund entsprechend komprimiert werden kann. Die Motoren werden mit entsprechenden Treibern (HBS 57) über ein Arduino-Board angesteuert. Damit die Ausgangsbreite des zu fertigenden Musters zu Beginn des Webprozesses vom Webblatt eingenommen wird, werden Endschalter eingebaut, auf deren Position die Schlitten eine Referenzfahrt durchführen. Schlussendlich werden durch die Steuerung simultan zur Gewebefertigung der eingesetzten Greiferwebmaschine die Schlitten in ihrer Position zum jeweiligen Schusseintrag verstellt.

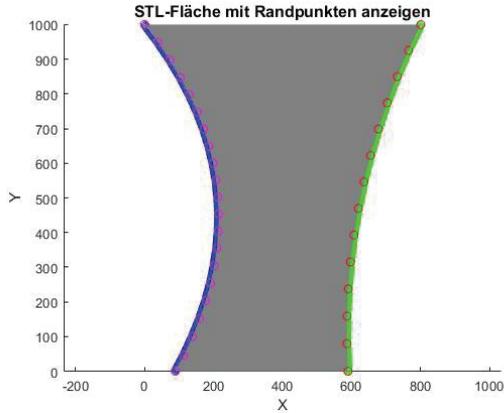


Abbildung 4-8: Ausgabe der Gewebebreiten durch Nutzung des entwickelten Programms

4.4 Strukturentwicklung für breitenvariable Gewebe

Gewebe, die zur Verstärkung von FKV-Bauteilen eingesetzt werden, erfordern eine konstante Flächenmasse, damit die mechanischen Anforderungen des Bauteils gewährleistet werden können. Da bei der Fertigung von breitenvariablen Geweben unterschiedliche Gewebebreiten und damit unterschiedliche Kettfadendichten vorliegen, ist eine Anpassung der Schussfadendichte und/oder eine Änderung der Gewebefaserbindung durchzuführen. Diese müssen so gewählt werden, dass eine konstante, relative Gewebedichte im Gewebe vorliegt. Dazu wird die relative Gewebedichte von Walz und Luibrand [79] angewendet und entsprechend die Schussfadendichten berechnet und/oder die Änderung des Besetzungsfaktors, der wiederum auf die Änderung der Gewebefaserbindung zurückzuführen ist.

Zur Berechnung der unterschiedlichen Schussdichten und/oder Gewebefaserbindungen wird der in Kapitel 4.3 entwickelte Algorithmus zur Bestimmung der Gewebebreiten so weiterentwickelt, dass für die unterschiedlichen Gewebebreiten die notwendigen Schussdichten und/oder Gewebefaserbindungen unter Beibehaltung der relativen Gewebedichte ermittelt werden. Wird die Schussfadendichte geändert, muss eine Anpassung des Rasters der Schusseintragszahl erfolgen, welches die Zuordnung der Breitenänderung zu den jeweiligen Schusseinträgen bestimmt. Dazu wird die Gewebelänge unter Beachtung der jeweiligen Gewebefaserbreite bereichsweise durch Anpassung der Schussanzahl korrigiert, sodass die Anzahl der Schusseinträge zu den damit erzeugbaren Gewebelängen übereinstimmt.

Die damit neu generierten Zuordnungen zwischen Schusseintragsnummer und jeweiliger Gewebebreite wird an die Steuerung zur Verstellung der Schrittmotoren übergeben. Da das entwickelte breitenvariable Webblatt eine asymmetrische Gewebeaußenkonturänderung zulässt, die Schussfadendichte entlang der Gewebebreite jedoch maschinenbedingt konstant ist, muss beim Weben von asymmetrischen Geometrien die Schussfadendichte der Gewebehälfte mit der größeren Gewebebreitenänderung gewählt werden. Wird dies nicht berücksichtigt, kann eine zu hohe Schussfadendichte zu einem zu großen Vortuch führen, wodurch aufgrund des zu kleinen Webfaches kein Schusseintrag erfolgen kann. Alternativ kann der Einzug der Webmaschine geändert werden, sodass eine auf die Mitlenkung des Webblatts bezogene, geteilte Bindungsmusterung durchgeführt werden kann.

Schlussendlich liefert der entwickelte Algorithmus die notwendige Bindung und/oder Information der Schussfadendichtenbereiche, die in die Webmaschine zur Herstellung der Muster eingegeben wird.

4.5 Herstellung und Auswertung von Funktionsmuster unter Anwendung der entwickelten Lösungen

Zur Überprüfung und Validierung des entwickelten breitenvariablen Webblattes erfolgt die Fertigung zweier Gewebemuster mit variabler Gewebebreite. Das erste Muster zeigt eine symmetrische Veränderung der Gewebebreite von 1000 mm auf 650 mm bei einer Gesamtmusterlänge von 1920 mm (vgl. Abbildung 4-9, symmetrisches Gewebemuster). Das zweite Muster zeigt eine asymmetrische Außenkontur auf, bei der die linke Seite der Gewebebreite von 500 mm auf 325 mm reduziert wird, während die rechte Seite abwechselnd um 100 mm abnimmt und wieder zunimmt (vgl. Abbildung 4-9, asymmetrisches Gewebemuster). Eingesetzt werden 200 Kettfäden (Glasmultifilamentgarn 1200 tex). Für jedes Muster erfolgt die Erstellung eines Computer Aided System (CAD)-Modells, das zur Berechnung der Stellwerte der Schrittmotoren in den entwickelten Algorithmus eingelesen wird. Zur Erzeugung der Gewebelänge werden die unterschiedlichen Schussdichten für die jeweiligen Gewebebereiche berechnet und die entsprechende Schussanzahl ausgegeben (vgl. Tabelle 4-1). Zur Abbildung der gesamten Gewebelänge sind 400 Schusseinträge notwendig, wobei die Muster mit einer Leinwandbindung hergestellt werden [79]. Aufgrund des festen mittleren Rietstabes muss die Schussfadendichte des

asymmetrischen Musters auf die Gegebenheiten der schmaleren Gewebehälfte ausgelegt werden. Deshalb werden hier ebenfalls die in Tabelle 4-1 aufgeführten Bereiche angewendet.

Die Schussfadendichtenbereiche werden im Muster der Webmaschine hinterlegt. Darüber hinaus erfolgt die Implementierung der Verstellwerte der Lineareinheiten, sodass die Gewebebreiten mit der jeweiligen Schusseintragsnummer übereinstimmen. Schlussendlich erfolgt die Herstellung der Muster (vgl. Abbildung 4-10) sowie die Entnahme aus der Webmaschine (vgl. Abbildung 4-11).

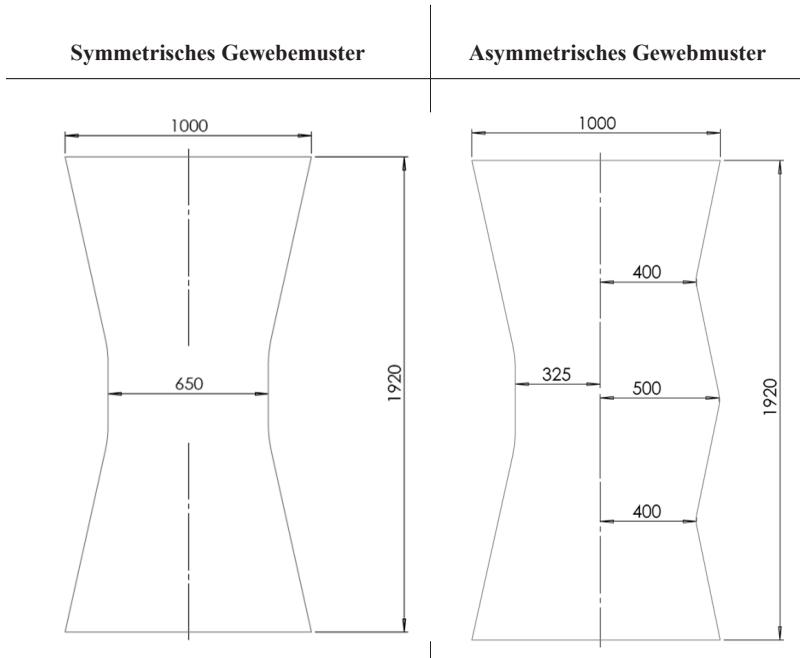


Abbildung 4-9: Maße der breitenvariablen Gewebemuster in mm

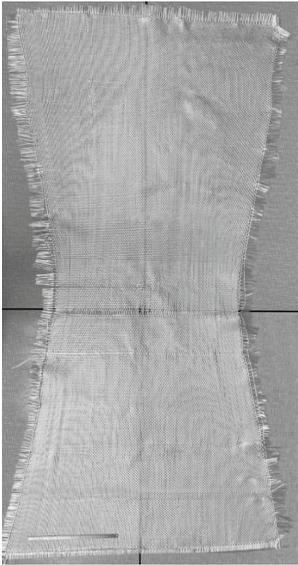
Tabelle 4-1: Berechnung der Schussfadendichten für die jeweiligen Schusseintragsbereiche

Schusseintragsbereich	Schussfadendichte in cm^{-1}
1 - 25	2.5
26 - 50	2.4
51 -75	2.3
76 - 100	2.1
101 - 125	2.0
126 - 150	1.9
151 - 175	1.7
176 - 235	1.6
236 - 260	1.7
261 - 285	1.9
286 - 310	2.0
311 - 335	2.1
336 - 360	2.3
361 - 385	2.4
386 - 400	2.5



Abbildung 4-10: Herstellung der breitenvariablen Gewebe auf einer Greiferwebmaschine des Typs Dornier P1, links: Musterbeginn (breites Gewebe), rechts: Musterfertigung (schmales Gewebe)

Symmetrisches Gewebemuster



Asymmetrisches Gewebemuster

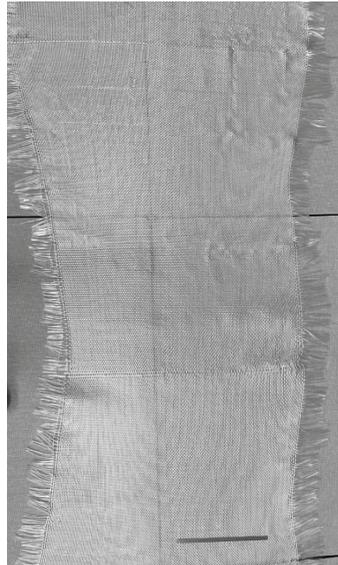


Abbildung 4-11: Gefertigte breitenvariable Gewebemuster; links: symmetrische Breitenänderung; rechts: asymmetrische Breitenänderung

4.5.1 Analyse und Auswertung der gewebespezifischen Eigenschaften

4.5.1.1 Analyse der Außenkontur der Gewebe:

Zur Auswertung der Außenkontur und damit der Geometrie Genauigkeit erfolgt eine Messung der Gewebebreiten in einem Abstand von 10 Schussfäden unter Berücksichtigung der DIN EN ISO 1773. Die Messung des asymmetrischen Gewebemusters erfolgt für die rechte und linke Gewebehälfte auf die Mitte bezogen getrennt voneinander entsprechend der Fixierung des mittleren Rietstabes.

Die mittlere Abweichung aller Gewebebreiten der symmetrischen Gewebeprobe liegt bei 0,8 % gegenüber der zuvor berechneten Außenkontur. Hierbei ist ein Hystereseeffekt im Umkehrpunkt bis zur Gewebehälfte festzustellen (vgl. Abbildung 4-12). Die Drehung der Schrittmotoren führte zu einer Verstellung der Schlitten mit einer Verschiebung von

2 mm pro Schusseintrag, sowohl bei der Gewebebreitenreduktion als auch bei der Gewebebreitenerweiterung. Die Änderungsrate von Schuss 1 bis Schuss 190 (bis zum Umkehrpunkt bei 650 mm) beträgt 1,99 mm pro Schusseintrag. Ab Schusseintrag 210 wird das Webblatt sukzessive auf die Ausgangsbreite zurückgefahren. Dabei beträgt die Änderungsrate 1,95 mm pro Schusseintrag, was einer Abweichung von 2,5 % im Vergleich zu den Verstellwerten der Schrittmotoren entspricht. Der vorliegende Hystereseeffekt resultiert aus der Veränderung des im Gewebe verlaufenden Kettfadenwinkels zwischen Webblatt und Warenabzug. Durch den Winkel wirken Querkräfte auf die Rietstäbe und damit auf die dazwischen liegenden Federelemente, wodurch deren Kompressionsweg verändert wird.

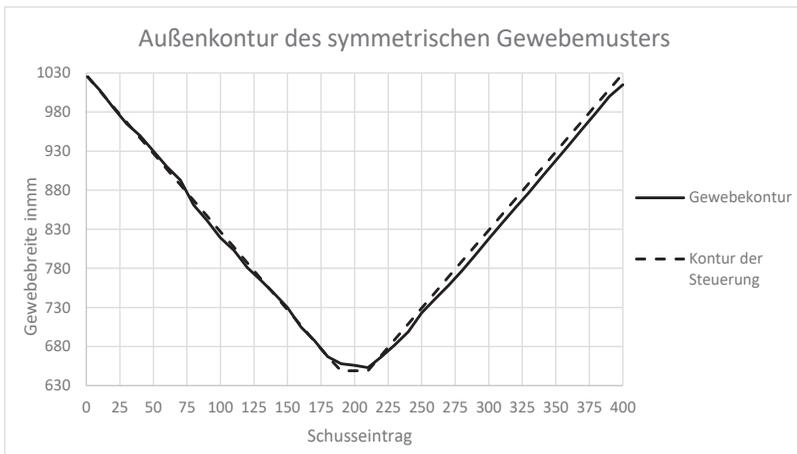


Abbildung 4-12: Analyse der Außenkontur des symmetrischen breitenvariablen Gewebemusters

Die Messung des asymmetrischen Musters erfolgt mittenzentriert (vgl. Abbildung 4-13). Die Messung der linken Gewebehälfte entspricht nahezu der Messung des symmetrischen Musters. Unter Beachtung der Stellwertrate eines einzelnen Schrittmotors von 1 mm pro Schusseintrag beträgt die Änderungsrate von Schuss 1 bis 190 0,99 mm pro Schusseintrag und von Schuss 210 bis 400 0,96 mm pro Schusseintrag.

Die rechte Gewebebreite des Musters wird über eine Spanne von 100 Schusseinträgen um 100 mm reduziert und entsprechend wieder erhöht. Die Änderungsrate der Breitenänderung beträgt von Schuss 1 bis 100 0,93 mm pro Schusseintrag, wodurch eine Breitenreduktion von 93 mm entsteht. Ausgehend von Schuss 100 bis 200 wird das Gewebe

mit einer Änderungsrate von 0,77 mm pro Schusseintrag erweitert. Dies führt zu einer mittenbezogenen Gewebebreite von 485 mm und somit zu einer Abweichung von 3 % zur ursprünglichen Gewebebreite. Von diesem Punkt an wurde das Gewebe erneut mit einer Änderungsrate von 0,77 mm pro Schusseintrag reduziert. Die Abweichung vom ersten Bereich (Schuss 1 bis 100) ist darauf zurückzuführen, dass die Schrittmotoren die Bewegung zwar vollständig ausführen, die Abstände zwischen den Rietstäben aber nicht in gleichem Maße folgen. Folglich ist die Änderungsrate der Gewebebreite bei erneuter Verkleinerung geringer, da der Ausgangspunkt für diese Verstellung der Umkehrpunkt bei Schuss 200 ist. Die Gewebebreitenzunahme zwischen Schuss 300 und 400 beträgt wieder 0,78 mm pro Schuss, was mit den zuvor ermittelten Werten übereinstimmt. Diese Abweichung resultiert daraus, dass nach der Verringerung der Gewebebreite die Querkräfte der im Gewebe verlaufenden Kettfadenzugkräfte zwischen Webblatt und Warenabzug den Druckkräften der Federelemente entgegenwirken. Folglich fällt die Vergrößerung der Gewebebreite geringer aus.

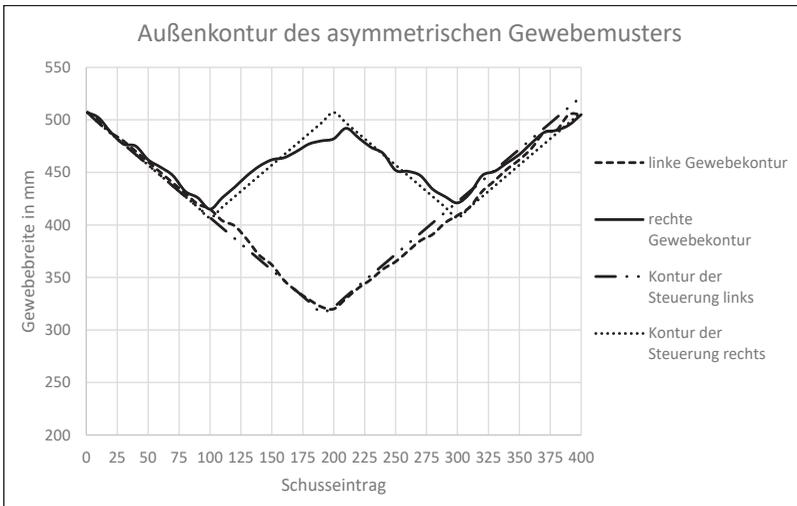


Abbildung 4-13: Analyse der Außenkontur des asymmetrischen breitenvariablen Gewebemusters

4.5.1.2 Analyse der Kettfadendichte:

Die Messung der resultierenden Kettfadendichten innerhalb der breitenvariablen Gewebemuster wird an acht Gewebebreiten unter Beachtung der DIN EN ISO 1049-2 durchgeführt. Dabei wird für jede Gewebebreite die Kettfadendichte am linken und rechten Geweberand sowie in der Gewebemitte ermittelt (Probengröße 10x10 cm²). Das Ergebnis zeigt, dass die Kettfadendichte des symmetrischen Gewebemusters zwischen den Randbereichen und der Mitte des Gewebes, insbesondere an der schmalsten Gewebebreite, eine unterschiedliche Kettfadendichte von bis zu 30 % aufweist (vgl. Abbildung 4-14).

Die Auswertung der Kettfadendichte des asymmetrischen Gewebemusters spiegelt dessen unterschiedlichen Gewebebreitenverlauf wider. Ähnlich wie beim ersten Bindungsmuster nimmt die Kettendichte auf der linken Gewebehälfte bis zur maximalen Gewebebreitenreduzierung zu und dann entsprechend ab. Die rechte Gewebehälfte zeigt eine Zu- und Abnahme der Kettfadendichte um jeweils 20 % (vgl. Abbildung 4-15).

Die unterschiedlichen Kettfadendichten zwischen Gewebemitte und -rändern zeigt, dass sich die Rietlücken im Verstellprozess nicht homogen entlang der Gewebebreite ausprägen. Die Gründe liegen hierbei im Zusammenspiel zwischen der Federsteifigkeit der Wellenfedern sowie den Kettfadenzugkräften, deren Querkräfte aufgrund des sich ändernden Winkels zwischen Webblatt und Warenabzug auf die Rietstäbe wirken. Darüber hinaus liegen Reibungskräfte innerhalb des Verbundes vor, die sich entlang der Webblattbreite aufsummieren.

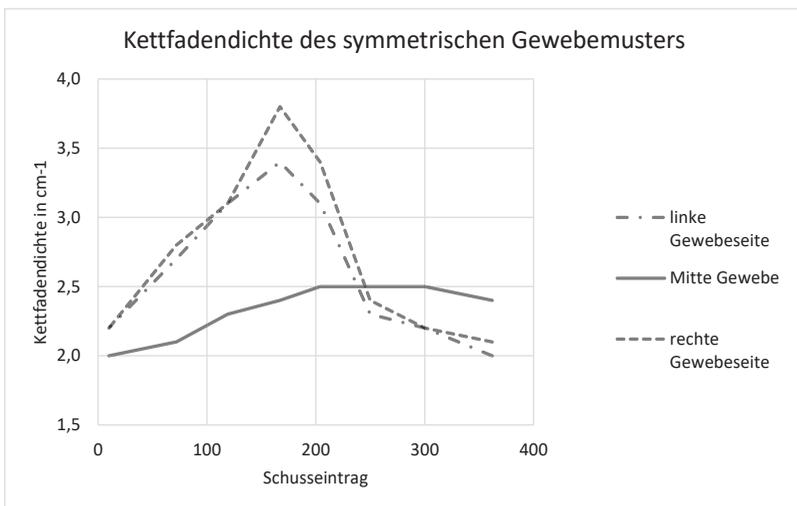


Abbildung 4-14: Analyse der Kettfadendichte des symmetrischen breitenvariablen Gewebemusters

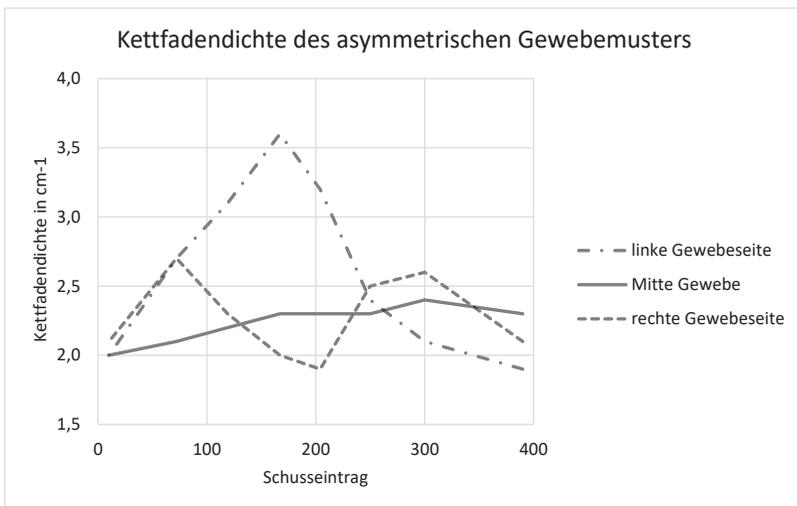


Abbildung 4-15: Analyse der Kettfadendichte des asymmetrischen breitenvariablen Gewebemusters

4.5.1.3 Analyse der Flächenmasse:

Die Analyse der Flächenmasse erfolgt entsprechend den selben Probenstücken der Auswertung der Kettfadendichten unter Berücksichtigung der ASTM D 3776. Das symmetrische Gewebemuster zeigt eine Zunahme der Flächenmasse in den entsprechenden Randbereichen, obwohl die Schussdichte entsprechend bei Zunahme der Kettfäden verringert wird. Konkret steigt die Flächenmasse von Schuss 1 bis zum Umkehrpunkt bei Schuss 200 sowohl auf der linken als auch auf der rechten Gewebeseite um 6,5 % (vgl. Abbildung 4-16). In der Mitte des Gewebemusters sinkt die Flächenmasse bis zum Schuss 200. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kettendichte in den äußeren Gewebebereichen stärker erhöht wird und die Schussdichte über die gesamte Gewebebreite konstant bleibt. Dies hatte zur Folge, dass das Gewebe in der Mitte eine insgesamt geringere Gewebedichte aufweist und daraus eine geringere Flächenmasse resultiert. Ab dem Umkehrpunkt der erneuten Verbreiterung des Gewebes liegt in allen Bereichen eine annähernd gleiche Flächenmasse vor.

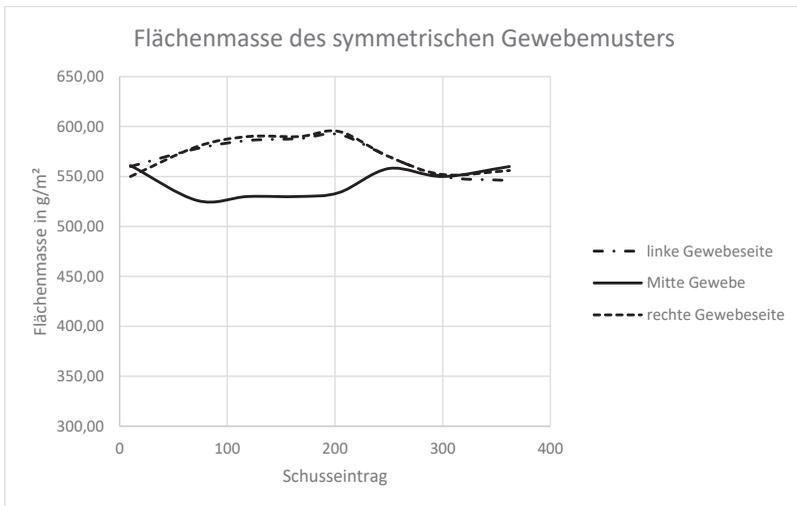


Abbildung 4-16: Analyse der Flächenmasse des symmetrischen breitenvariablen Gewebemusters

Die Auswertung der Flächenmasse des asymmetrischen Gewebemusters zeigt für die linke Gewebehälfte das gleiche Verhalten wie das symmetrische Gewebemuster. Innerhalb der rechten Gewebehälfte steigt die Flächenmasse bis zum Schusseintrag 100 um

5,8 % an, gefolgt von einer starken Abnahme bis zum Schusseintrag 200 (vgl. Abbildung 4-17). Diese wechselnde Änderung beruht darauf, dass sich durch den Verstellprozess des Webblattes die Kettfadendichte ändert, die Schussfadendichte entlang der Gewebebreite jedoch konstant bleibt.

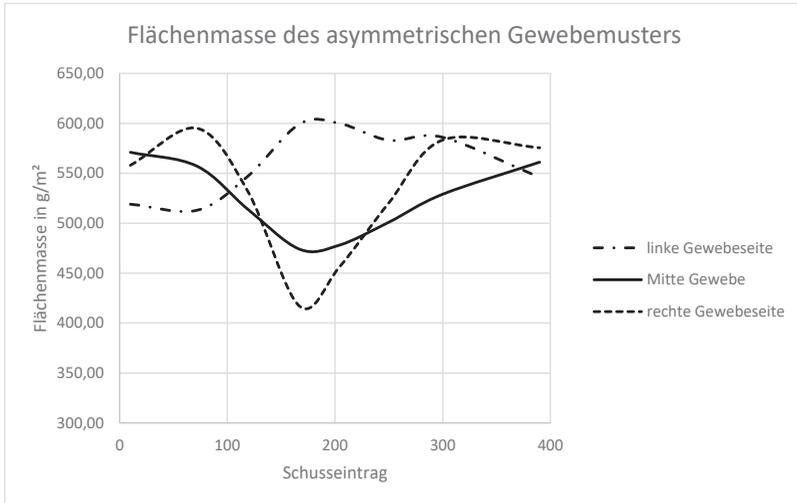


Abbildung 4-17: Analyse der Flächenmasse des asymmetrischen breitenvariablen Gewebemusters

4.5.1.4 Analyse der Kettfadenzugkräfte:

Die Messung der Kettfadenzugkräfte dient dazu, den Einfluss der Queranteile der Kettfadenzugkräfte auf den Verstellprozess des Webblattes zu ermitteln. Hierzu erfolgen Messungen im „breiten Zustand“ des Webblattes sowie während der Breitenreduktion. Darüber hinaus werden die Kettfadenzugkräfte am Rand des Gewebemusters (Kettfäden 10 bis 20 ausgehend vom linken Geweberand) sowie in der Mitte (Kettfäden 195 bis 205) gemessen. Die Messung erfolgt mittels VUTS-Fadenspannungsmesssystem für jeweils 10 Kettfäden. Durchgeführt wird die Messung im Hinterfach der Webmaschine und somit zwischen Abzugsgatter und installiertem Expansionskamm. Im Ergebnis zeigen die Ergebnisse in allen Messungen eine geringere Kettfadenzugkraft im Unterfach als im Oberfach. Dies ist auf die Fachgeometrie der eingesetzten Webmaschine zurückzuführen.

Die Messung der äußeren Kettfäden zeigt, dass mit abnehmender Gewebebreite die gemittelte Kettfadenzugkraft bis zum Umkehrpunkt (Schusseintrag 200) bei der kleinsten

Gewebebreite um 61,7 % ansteigt und danach mit zunehmender Gewebebreite allmählich abnimmt (vgl. Abbildung 4-18). Insgesamt beträgt die durchschnittliche Kettfadenzugkraft zu Beginn des Verstellprozesses (Schusseintrag 1) 3,1 cN, am Umkehrpunkt 8,1 cN und nach wieder Einnahme der ursprünglichen Gewebebreite (Schusseintrag 390) 3,2 cN. Die Messung der Kettfadenzugkräfte in der Gewebemitte zeigt ein relativ konstantes Verhalten von 4,9 cN (vgl. Abbildung 4-19).

Die Veränderung der Kettfadenzugkraft im äußeren Gewebebereich wird auf die unterschiedlichen Einlaufwinkel der Kettfäden zurückgeführt, die sich aus der Veränderung der Gewebebreite ergeben. Da der Expansionskamm die Kettfäden im Hinterfach bereits mit der notwendigen Breite zuführt, resultieren die Schwankungen vorrangig aus dem sich ändernden Kettfadenwinkel zwischen Webblatt und Gewebeabzug. Auf diese Zusammenhänge wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

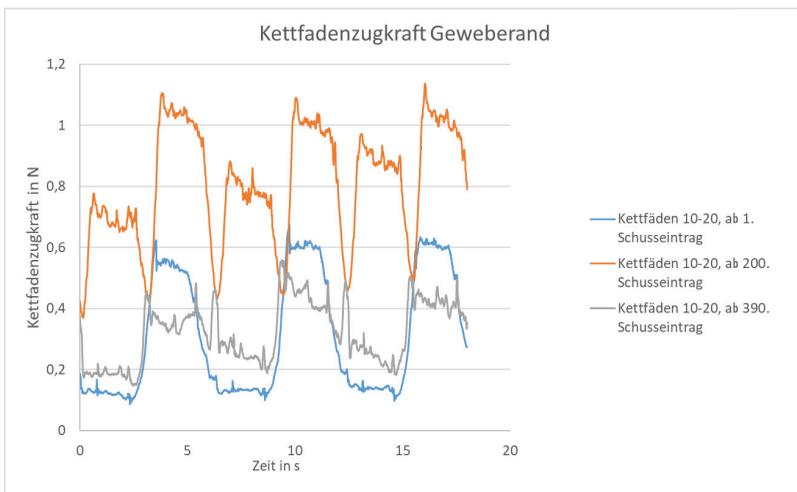


Abbildung 4-18: Messung der Zugkräfte der Kettfäden im Geweberand

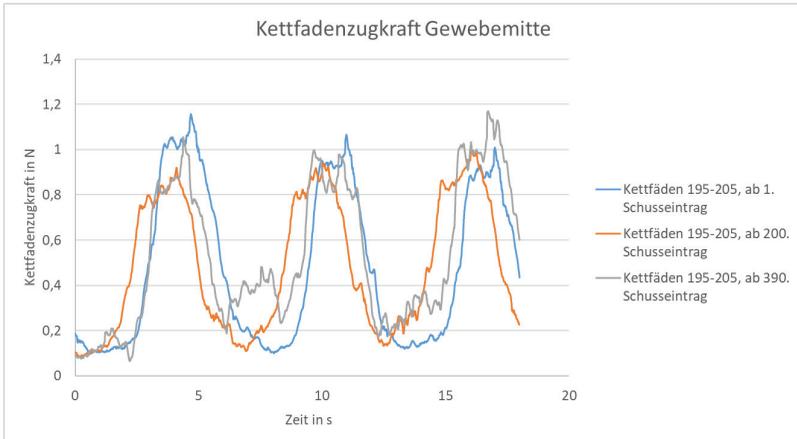


Abbildung 4-19: Messung der Zugkräfte der Kettfäden in der Gewebemitte

4.5.2 Aufstellung des Zusammenhanges zwischen Kettfadenzugkräften und Verstellung der Gewebebreite für das entwickelte Webblatt

Zur Ermittlung des Einflusses der aus den Kettfadenzugkräften resultierenden Querkraft auf den Verstellprozess des Webblattes wird der Einlaufwinkel eines Kettfadens parallel zur Erfassung der Kettfadenzugkraft gemessen. Dabei werden die Winkel des Kettfadens zwischen Expansionskamm und Webblatt sowie zwischen Gewebeabzug und Webblatt festgehalten. Zur Messung des Winkels wird der horizontale Abstand zwischen einer senkrecht zum Webblatt verlaufenden Linie des jeweiligen Kettfadens und seinem tatsächlichen Verlauf gemessen (vgl. Abbildung 4-20). Die Messung des äußeren Kettfadens (10. Kettfaden von links) zeigt zwischen Webblatt und Expansionskamm aufgrund der simultanen Bewegung keine Änderung. Die Änderung des Winkels zwischen Webblatt und Gewebeabzug geht mit der Breitenveränderung einher. Somit steigt dieser bis zur minimalen Gewebebreite an und dreht entsprechend nach dem Umkehrpunkt in die entgegengesetzte Richtung (vgl. Abbildung 4-21).

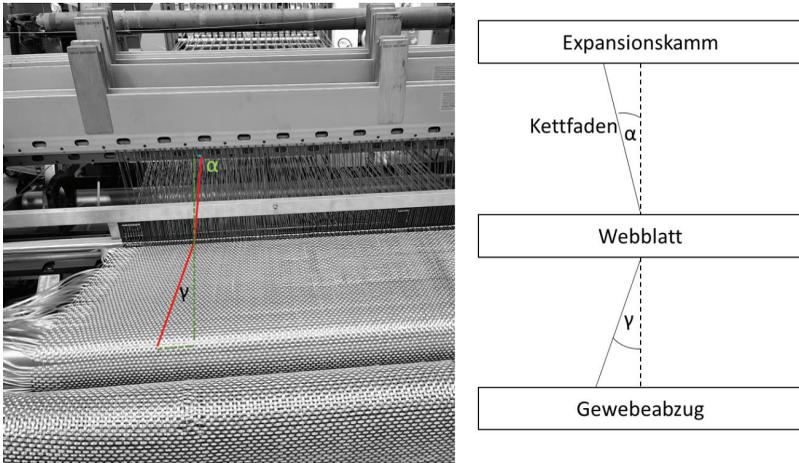


Abbildung 4-20: Messung des Einlaufwinkels eines Kettfadens

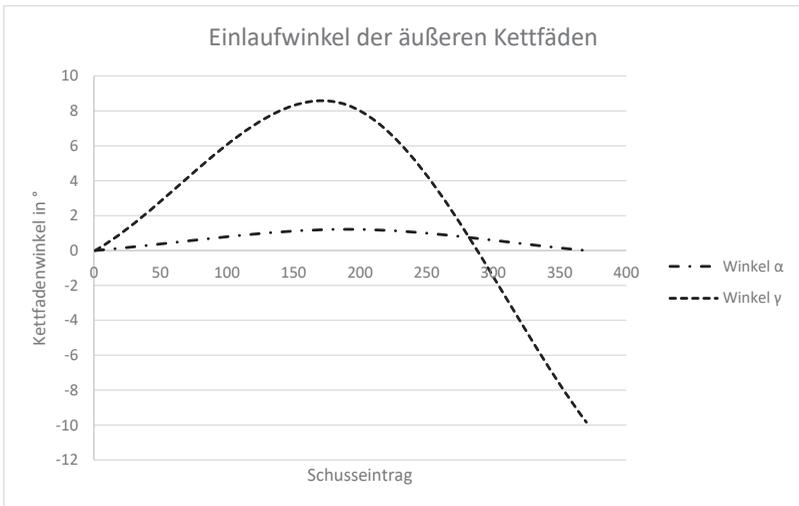


Abbildung 4-21: Auswertung des Winkelverlaufs des äußeren Kettfadens

Um den Einfluss der durch die Kettfadenzugkräfte bedingten Querkräfte auf die Einstellung des Verstellprozesses des Webblattes zu bewerten, kann folgende Beziehung ange-

wendet werden: Aufgrund der Verkleinerung oder Vergrößerung der Gewebebreite wirken die Querkkräfte basierend auf dem sich ändernden Winkel zwischen Webblatt und Gewebeabzug entgegen der Verstellrichtung des Webblattes. Dies soll am folgenden Beispiel erläutert werden. Für den betrachteten Verstellprozess wird die Gewebebreite verkleinert, wodurch ein positiver Kettfadenwinkel γ vorliegt. Zur Berechnung des Einflusses der horizontal wirkenden Kettfadenzugkräfte auf den Rietlückenabstand einer Rietlücke, wird die zu betrachtende Rietlücke freigeschnitten und die wirkenden Kräfte aufgeführt (vgl. Abbildung 4-22 links). Dabei wirkt die Federkraft der Federparallelschaltung entgegen den horizontal auftretenden Kettfadenzugkräften sowie der Federkraft des gesamten Webblatt-Federverbundes (vgl. Abbildung 4-22 rechts). Dabei nehmen die Querteile der Kettfadenzugkräfte mit steigendem Winkel zu.

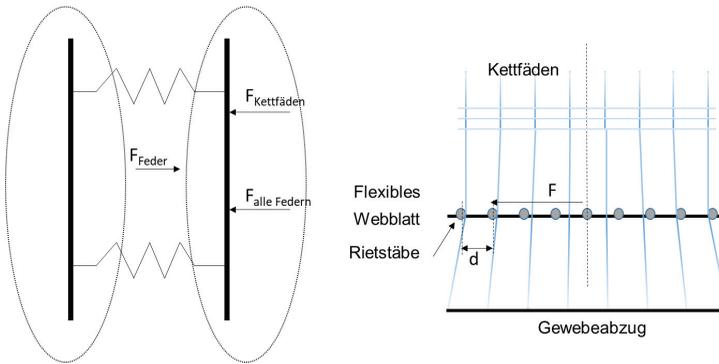


Abbildung 4-22: links: Freischnitt einer Rietlücke; rechts: gesamt einwirkende horizontale Kettfadenzugkräfte

Die Federsteifigkeit des gesamten Federverbundes berechnet sich aus einer Kombination von parallel und in Reihe geschalteten Federn (vgl. Abbildung 4-23). Die Federsteifigkeit einer einzelnen Feder beträgt 6,57 N/mm. Daraus ergibt sich eine Gesamtfedersteifigkeit von

$$k_{\text{total}} = 0.146 \text{ N/mm}$$

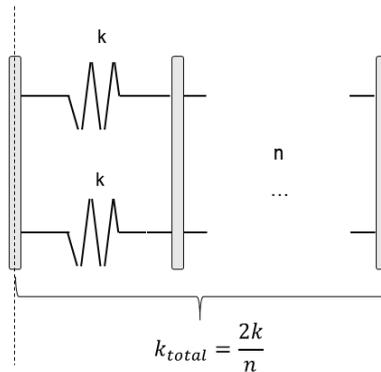


Abbildung 4-23: Berechnung der gesamten Federsteifigkeit des Webblatt-Federverbundes

Die Querkraft eines einzelnen Kettfadens berechnet sich aus dem Winkel zwischen Webblatt und Gewebeabzug. Dieser Winkel nimmt dabei ausgehend von der Gewebemitte zu den Geweberändern zu. Dieser vorliegende Einfluss wird an der 10. Rietlücke (ausgehend von linken Webblatrand) anhand der Messung der Rietlücke im Zuge des Verstellprozesses einmal mit und einmal ohne Kettfäden aufgezeigt. Die Kettfadenzugkraft des in der Mitte des Gewebes verlaufenden Kettfadens ($\gamma = 0^\circ$) beträgt 4,9 cN. Die Kettfadenzugkraft des Kettfadens, der in der 10. Rietlücke verläuft, beträgt 8,1 cN. Somit steigt die Kettfadenzugkraft um 3,2 cN bei einer Zunahme des Winkels β um $8,34^\circ$. Aus der Annahme eines linearen Zusammenhanges resultiert eine Zunahme der Kettfadenzugkraft von $0,038 \text{ N}/^\circ$. Dieser Zusammenhang wird zur Berechnung der Kettfadenzugkraft jedes einzelnen Kettfadens anhand eines Matlab-Skriptes herangezogen. Die Summe der wirkenden Querkraften der Kettfäden beträgt:

$$F_{\text{Kettfäden gesamt}} = 12.17 \text{ N}$$

Die Messung der Prozessgrößen erfolgt nach einer Komprimierung der Breite einer jeden Gewebehälfte um 175 mm an der 10. Rietlücke (durchgeführter Verstellweg eines Schrittmotors). Da die Rietstäbe jedoch starr im Verbund vorliegen, bringen die Federn einen gesamten Komprimierungsweg von 215,05 mm auf. Daraus ergibt sich eine Gesamtfederkraft aller Federn, die zwischen der 11. Rietlücke und der Mitte des Webblattes auf die 10. Rietlücke wirken, von

$$F_{\text{alle Federn}} = 31,4 \text{ N.}$$

In der Rietlücke selbst liegt ein Kräftegleichgewicht vor. Hier wirkt die Federkraft der beiden Federn mit 13,14 N/mm gegen die Gesamtfederkraft der zur Webblattmitte hin aufgereihten Rietstäbe und der gesamten Querkraft der Kettfäden. Die vorhandenen Reibungskräfte werden aufgrund der unzureichenden Aufzeichnungsmöglichkeit vernachlässigt. Die Messung der Rietlücke ohne Kettfäden ergibt 2,7 mm, die Messung mit Kettfäden hingegen 2,0 mm. Die unbelastete Ausgangshöhe der Feder beträgt 5,28 mm. Daraus ergibt sich eine Federkraft von

$$F_{\text{Rietlücke ohne Kettfäden}} = 33,9 \text{ N}$$

$$F_{\text{Rietlücke mit Kettfäden}} = 43,1 \text{ N}$$

Die Berechnung des Kräftegleichgewichts ohne Kettfäden beträgt:

$$F_{\text{Rietlücke ohne Kettfäden}} - F_{\text{alle Federn}} = 33,9 \text{ N} - 31,4 \text{ N} = 2,5 \text{ N}$$

Die Berechnung des Kräftegleichgewichts mit Kettfäden beträgt:

$$\begin{aligned} F_{\text{Rietlücke mit Kettfäden}} - F_{\text{alle Feder}} - F_{\text{Kettfäden gesamt}} \\ = 43,1 \text{ N} - 31,4 \text{ N} - 12,17 \text{ N} = -0,47 \text{ N} \end{aligned}$$

Die Abweichung zwischen der gesamten Federkraft sowie der Federkraft der einzelnen Rietlücke beträgt bei der Messung ohne Kettfäden 7,4 %. Die Summe der gesamten Federkraft und der Querkraft der Kettfäden beträgt 43,57 N. Somit liegt eine Abweichung zu der entgegenwirkenden Kraft der Federn innerhalb der Rietlücke von 1,07 % vor.

Die aufgestellte Berechnung zeigt damit deutlich den Einfluss der durch die Kettfadenzugkraft bedingten Querkraft auf den Verstellprozess des Webblattes. Die Abweichung ohne Kettfäden lässt darauf rückschließen, dass die Kettfäden den Verstellprozess der einzelnen Rietstäbe beeinflussen. Es ist zu empfehlen, dass die Federsteifigkeit der Federelemente entsprechend groß ausgelegt wird, wobei die Reibung jedoch nicht wesentlich erhöht wird. Des Weiteren ist die Kettfadenzugkraft möglichst gering zu halten.

Der Einfluss der durch die Kettfadenwinkel bedingten Querkraft auf die Verstellung der Rietstäbe wird im entwickelten Algorithmus berücksichtigt. Dazu wird die importierte geforderte Gewebegeometrie mit einem Raster belegt, das einen Abstand von 300 mm aufweist und damit dem Abstand zwischen Webblatt und oberstem Punkt der Abzugswalze

entspricht. Anschließend wird für jeden Kettfaden der zugehörige Winkel γ berechnet. Unter Nutzung dieser Werte wird an jeder Rietlücke die gesamtresultierende Querkraft berechnet. Diese Kraft wird der Federkraft entgegengesetzt. Dabei wird der Federweg innerhalb einer Rietlücke so angepasst, dass ein Kräftegleichgewicht vorliegt. Die berechneten Rietlückenabstände werden schlussendlich unter Berücksichtigung der starren Rietstäbe aufsummiert und in die Steuerung der Schrittmotoren eingelesen.

4.6 Gewebeentwicklung zur Herstellung einer Preform für ein Fanblade

Die Erbringung des Technologienachweises erfolgt anhand der Herstellung von Gewebepreformen für den Einsatz in einem Fanblade für Flugzeugturbinen. Die notwendigen gewebten Strukturen werden aus Carbonfaserrovings mit einer Feinheit von 1600 tex gefertigt. Die Geometrie des zu fertigenden Bauteils weist eine einachsige Krümmung auf, die in die Ebene abgewickelt werden kann. Mittels des entwickelten Matlab-Algorithmus werden die Gewebebreiten unter Berücksichtigung der notwendigen Schussanzahl berechnet. Der Einfluss des Kettfadenwinkels auf den Verstellprozess des Webblattes wird auf Grundlage seiner Berechnung bei der Steuerung der Schrittmotoren zur Abbildung der Gewebegeometrie entsprechend berücksichtigt, sodass die Abweichung zwischen Zielgeometrie und resultierender Gewebegeometrie minimiert wird. Die Abweichung wird im Algorithmus berechnet, indem die Querkräfte an der entsprechenden Rietlücke für den jeweiligen Schusseintrag ermittelt werden und daraus die geforderte Rietlückenbreite abgeleitet wird. Die resultierenden Gewebebreiten werden anschließend in die Steuerung der Schrittmotoren eingegeben. Gefertigt wird das Gewebe mittels Leinwandbindung. Für den Ausgleich der sich ändernden Kettfadendichten werden die Schussfadendichten angepasst. Die gesamten Prozessschritte sind in Tabelle 4-2 aufgelistet.

Die Fertigung erfolgt unter Nutzung des entwickelten breitenvariablen Webblattes (vgl. Abbildung 4-24). Das fertiggestellte Gewebe ist in Abbildung 4-25 dargestellt. Bei der Herstellung des Bauteils sind keine weiteren geometrieegebenden Zuschnittprozesse notwendig. Dadurch lässt sich der Zuschnittabfall im Vergleich zum sequentiellen Preforming um 30 % reduzieren. Darüber hinaus liegen keine Unterbrechungen der kraftaufnehmenden Fäden vor.

Tabelle 4-2: Prozessübersicht der einzelnen Schritte zur Erzeugung des Bindungsmusters sowie Steuerung der Schrittmotoren

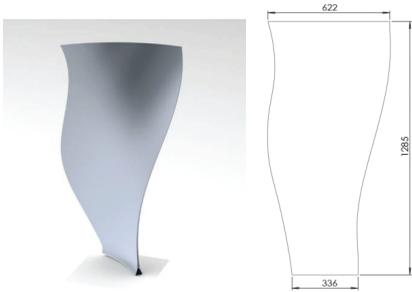
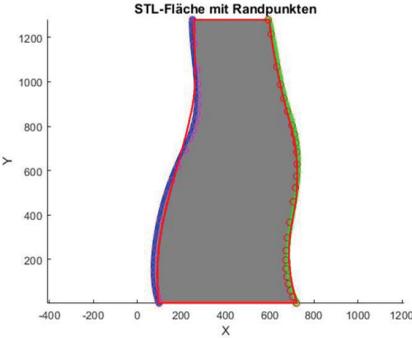
Prozessschritt	Darstellung
<p>Erstellung der CAD Geometrie und Berechnung der Abwicklung</p>	 <p>The image shows a 3D perspective view of a blue, curved, funnel-like shell structure on the left. To its right is a 2D technical drawing of the same structure's net. The net is a long, narrow strip with a wavy profile. Dimension lines indicate a width of 622 at the top, a width of 336 at the bottom, and a total length of 1285.</p>
<p>Berechnung der Gewebebreiten und Kalkulation der Abweichung bedingt durch Queranteile der Kettfadenzugkräfte auf die Rietlückenverstellung, wobei die geforderte Außenkontur rot dargestellt wird (gedrehtes Muster, da von breiter zu schmaler Gewebebreite gewebt wird)</p>	 <p>The image is a 2D plot titled "STL-Fläche mit Randpunkten". The vertical axis is labeled "Y" and ranges from 0 to 1200 with increments of 200. The horizontal axis is labeled "X" and ranges from -400 to 1200 with increments of 200. A grey shaded area represents the STL surface. The boundary of this area is marked with red dots. The shape is roughly bell-shaped, wider at the top and narrower at the bottom.</p>
<p>Erstellung des Steuerungsprogramms der Schrittmotoren</p>	
<p>Bindungserstellung und Berechnung der Schussdichtenbereiche</p>	



Abbildung 4-24: Weben der Gewebepreform eines Fanblades mittels breitenvariablen Webblattes

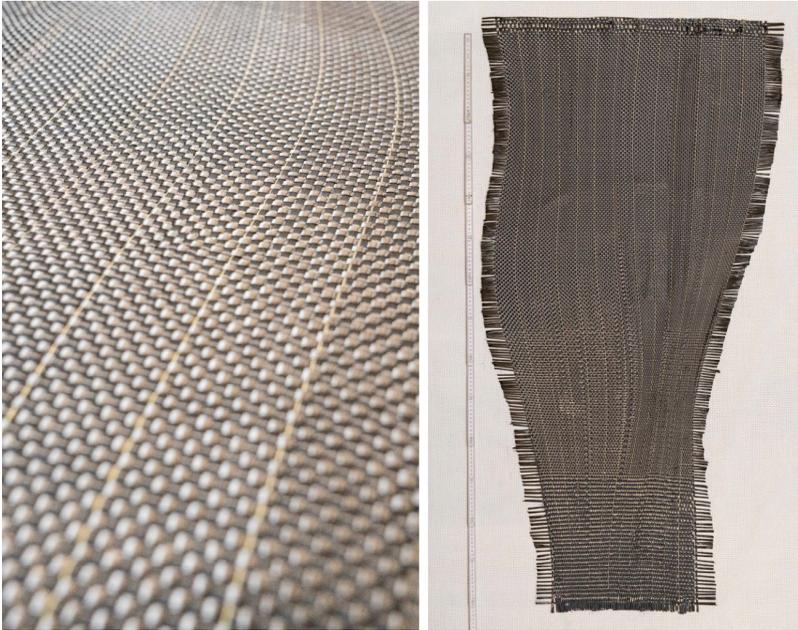


Abbildung 4-25: Fertiggestellte breitenvariable Gewebepreform zur Verstärkung eines Fanblades; links: Detail Kettfadenverlauf, rechts: Gesamtansicht

Zur Überprüfung der Geometriegenauigkeit der gewebten Preform wird die Außenkontur des gefertigten Gewebes mit der berechneten Abwicklung verglichen. Im Ergebnis liegt die maximale Abweichung zwischen Abwicklung und gefertigtem Gewebe im Bereich der linken Gewebeaußenkontur bei 9 mm, im Bereich der rechten Gewebeaußenkontur bei 4 mm. Die Abweichung der linken Gewebehälfte zeigt, dass bei Verringerung und anschließender Verbreiterung der Gewebebreite trotz der Berücksichtigung der kettfadenzugkraftbedingten Querkräfte ein Hystereseeffekt vorliegt. Dies liegt unter anderem an den auftretenden Reibkräften im Webblattmechanismus sowie an der Relaxation des Gewebes. Zur Überwindung der Reibkräfte ist der Einsatz von Federelementen mit einer höheren Federsteifigkeit förderlich, sodass die auf die Rietstäbe wirkenden Kräfte überwunden werden können. Des Weiteren wird zur Sicherung der Gewebekante ein Dreherfaden eingebunden, jedoch kommt es hierbei aufgrund der glatten Materialeigenschaften der Carbonfaser sowie des Polyesterfadens zu minimalem Rutschen der äußeren Kettfäden, wodurch die Gewebekante verändert wird.

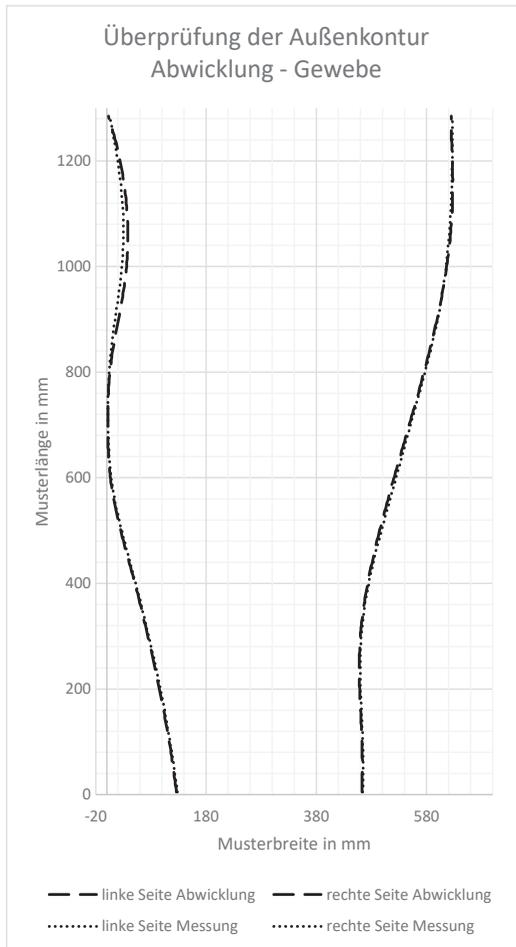


Abbildung 4-26: Überprüfung und Vergleich der Außenkontur zwischen Abwicklung und Gewebe

5 Entwicklung von doppelachsig gekrümmten Geweben für Schalenstrukturen

5.1 Einleitung

Neben der Entwicklung von endkonturnahen einachsig gekrümmten Geweben für den Einsatz in Schalenstrukturen ist die Bereitstellung weitaus komplexer gekrümmter integral gewebter Strukturen erstrebenswert, insbesondere für Strukturen, die eine doppelachsige Krümmung aufweisen. In diesem Kapitel wird dazu die grundlegende theoretische Entwicklung der Herstellungsmethode von doppelachsig gekrümmten Schalengeweben dargestellt. Dazu wird ein neuartiges Webprinzip und die damit einhergehende Erzeugung von komplex gekrümmten Schalenstrukturen erläutert. Damit diese textilen Strukturen korrekt eingeordnet werden können, wird die Art der Krümmung der zu erzeugenden Geometrien eingangs definiert. Basierend auf diesen Vorbetrachtungen erfolgen in Kapitel 6 die konstruktiv-technologischen Entwicklungen sowie in Kapitel 7 die Modellierung eines Strukturverfahrens und die Bindungsentwicklung zur Erzeugung der gekrümmten Gewebestrukturen.

5.2 Einordnung und Definition komplex gekrümmter Schalenstrukturen

Die im folgenden Kapitel als schalenförmig bezeichneten Strukturen, Gewebe und Geometrien sind solche, deren Oberfläche eine doppelachsige Krümmung bildet, die einlagig sind und damit ein Kett- und ein Schussfadensystem aufweisen. Die auf der Oberfläche verlaufenden gekrümmten Kurven haben dabei unterschiedliche Längen. Somit weisen die Gewebe zur Erzeugung der Geometrien in den jeweiligen Fadensystemen ebenfalls unterschiedliche Längen auf. Die Oberflächen umschließen, bzw. ummanteln ein Volumen und deren abgebildete Oberfläche ist ein Homöomorphismus. Dies bedeutet, dass die Abbildung stetig differenzierbar ist und dass für jeden Punkt der Fläche das Differential injektiv ist. Dadurch sind die Punkte der Oberfläche stets positiv sowie die Projektionen der Fläche vom \mathbb{R}^3 in den \mathbb{R}^2 bijektiv.

5.3 Erläuterung des neu entwickelten Webprinzips

Die Fertigung konventioneller Gewebe zeichnet sich dadurch aus, dass Längs- und Querfäden rechtwinklig zueinander verkreuzt werden [80]. Die Abstände der Längsfäden zueinander werden dabei durch die Teilung des eingesetzten Webblattes und dem darauf aufbauenden Einzug der Kettfäden festgelegt. Die Abstände der Querfäden zueinander resultieren aus der gewählten Schussdichte. Diese ist abhängig von der eingestellten Abzugsgeschwindigkeit der Webmaschine. Bei einer hohen Abzugsgeschwindigkeit wird eine geringe Schussdichte erreicht, bei einer niedrigen Abzugsgeschwindigkeit entsprechend eine höhere. Die Schussdichte selbst ist entlang der Gewebebreite gleichbleibend. Dadurch bleibt die Abzugslänge der Kettfäden über die Gewebelänge gleich (vgl. Abbildung 5-1).

Damit Gewebe in 3D-Schalenstrukturen überführt werden können, ohne dass negative Strukturverzerrungen auftreten, müssen die Gewebe entsprechend zusätzlich eingebrachte Gewebelängen aufweisen. Durch diese entlang der Gewebebreite unterschiedlichen Gewebelängen wölbt sich das Gewebe zwangsläufig zu einem schalenförmigen Gebilde in die dritte Dimension auf. So bildet sich bspw. bei einer Zunahme und anschließenden Abnahme der Gewebelängen entlang der Gewebebreite eine halbkugelähnliche, gekrümmte Struktur (Abbildung 5-2).

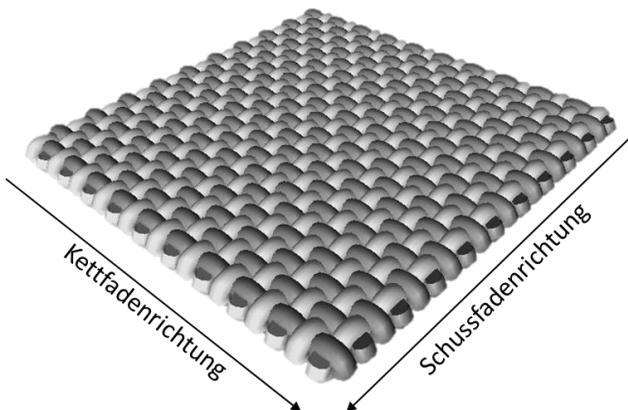


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung eines Gewebes mit Leinwandbindung

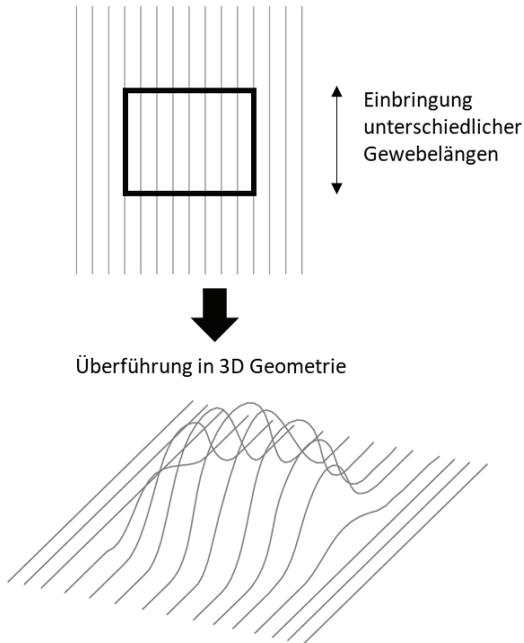


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung des Aufwölbens des Gewebes

Zur Einbringung unterschiedlicher Gewebelängen in ein Gewebe wird in dieser Arbeit ein neuartiges Webprinzip entwickelt. Dieses beruht darauf, dass unterschiedliche Gewebelängen entlang der Gewebebreite über die Art der Verkreuzung zwischen Kett- und Schussfäden in der Gewebestruktur generiert werden. Somit wird bei Anwendung einer Gewebefädelung mit hoher Anzahl an Verkreuzungspunkten mehr Gewebelängen in die Gewebestruktur bei gleicher Schussanzahl innerhalb des Betrachtungsbereiches erzeugt als bei einer geringeren Anzahl an Verkreuzungspunkten (vgl. schematische Darstellung in Abbildung 5-3). Dies bedeutet, dass eine Änderung der Schussfadendichte entlang der Gewebebreite erzwungen wird und daraus unterschiedliche Gewebelängen resultieren. Die Anzahl der Schussfäden im betrachteten Bereich bleibt dabei gleich. Die definierte Anordnung der unterschiedlichen Bindungen und damit Schussfadendichten, die wiederum die unterschiedlichen Gewebelängen erzeugen, führt schlussendlich zu einer gekrümmten, schalenförmigen Aufwölbung der textilen Struktur. Die Einbringung der Mehrlängen erfolgt hierbei in Kettfadenrichtung. Damit eine gekrümmte schalenförmige

Geometrie schlussendlich erzielt werden kann, werden die eingebrachten Mehrlängen nach Entnahme des Gewebes aus der eingesetzten Webmaschine ausgeformt. Das heißt die eingebrachten Mehrlängen in Kettfadenrichtung werden auf ihre Länge gebracht und das Gewebe wird in Schussfadenrichtung zusammengestaucht.

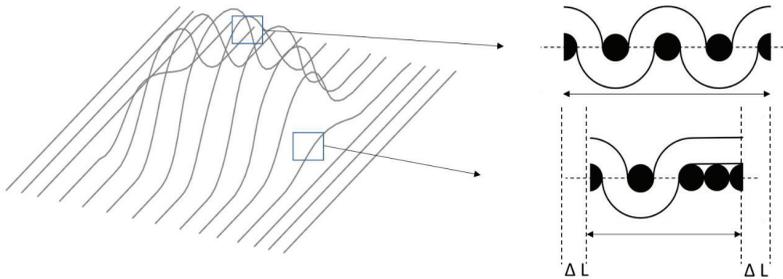


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung zur Erzeugung unterschiedlicher Kettfadenlängen über unterschiedliche Gewebebindungen, Abbildung im Schusschnitt

Da beim konventionellen Weben aufgrund des Abzuges entlang der Gewebebreite eine konstante Gewebelänge resultiert, wird der Gewebeabzug in der entwickelten Methode entfernt. Diese Methode wird als *abzugsfreies Weben* bezeichnet. Dadurch können anhand der Anordnung unterschiedlicher Bindungen mit unterschiedlichen Schussdichten entlang der Gewebebreite unterschiedliche Gewebelängen entlang der Gewebebreite erzeugt werden. Je nach gewählter Schussdichte der Bindungsbereiche liegt eine Gewebelängenzunahme oder -reduktion in der Gewebestruktur vor, die wiederum eine schalenförmige Geometrie bilden.

Beim Weben ist der Abzug jedoch von entscheidender Bedeutung, da dieser im Zusammenspiel mit der Kettblasseinrichtung die für die Gewebefertigung notwendigen Kettfadenzugkräfte für eine prozesssicheres Arbeiten erzeugt. Die Kettfadenzugkräfte sind für den Webprozess notwendig, damit zum einen ein Webfach zum Eintragen des Schussfadens gebildet werden kann und zum anderen das gebildete Gewebe nicht in die Fachbildungszone der Webmaschine zurückrutscht. Darüber hinaus wird das gesamte Gewebe abgezogen und somit aus der Maschine gefördert. Damit eine Webmaschine ohne Abzug betrieben werden kann, müssen die Kettfadenzugkräfte aufrecht erhalten werden. Dazu

ist eine Sicherung der Gewebekante notwendig, wodurch ein Zurückrutschen des Gewebes in die Schusseintragszone verhindert und die prozessbedingt notwendige Kettfadenzugkraft aufrecht erhalten wird. Der Transport des Gewebes selbst wird durch die Bewegung des Webblattes durchgeführt. Das Gewebe wird somit aus der Webmaschine herausgeschoben. Die dafür notwendigen konstruktiven Entwicklungen werden in Kapitel 6 aufgeführt.

5.4 Modellierung eines Strukturverfahrens zur Erfassung der gekrümmten schalenförmigen Zielgeometrie

Im Folgenden wird ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der unterschiedlichen notwendigen Gewebelängenbereiche auf der Zielgeometrie dargestellt. Dazu werden mathematische Modelle zur analytischen sowie interpolierenden Beschreibung gekrümmter Schalengeometrien betrachtet. Es werden virtuelle Oberflächenlinien eingeführt, die zur Berechnung der lokalen Längenbereiche auf der gekrümmten Schalengeometrie genutzt werden. Diese werden zur Anordnung der notwendigen unterschiedlichen Bindungsbereiche zur Erzeugung der unterschiedlichen Gewebelängenbereiche in der Gewebestruktur in Kapitel 7 herangezogen.

5.4.1 Einführung des zu betrachtenden Bezugssystems

Zur Einordnung der Anordnung der in dieser Arbeit betrachteten gekrümmter schalenförmigen Strukturen, wird ein Bezugssystem eingeführt. Dieses ist auf die Produktionsrichtung einer Webmaschine bezogen. Dabei bildet die x-Richtung des Koordinatensystems die Schussfadenrichtung, die y-Richtung des Koordinatensystems die Kettfadenrichtung und die z-Richtung die entsprechende Höhe bezogen auf die Webebene hinter der Gewebebildungszone (vgl. Abbildung 5-4).

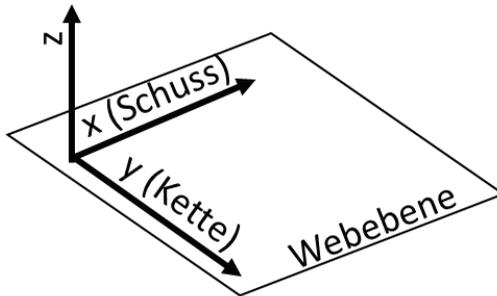


Abbildung 5-4: Eingeführtes Koordinatensystem

5.4.2 Entwicklung einer Berechnungsmethode zur Bestimmung der Krümmung dreidimensionaler schalenförmiger Oberflächen

Für das Weben gekrümmter Schalenstrukturen muss als Eingangsinformation die Krümmung der Oberfläche charakterisiert und daraus auf die notwendigen Gewebelängen zur Generierung einer gekrümmten schalenförmigen Oberfläche rückgeschlossen werden. Grundsätzlich kann die Krümmung einer Oberfläche mittels analytischen oder interpolierten Funktionen beschrieben werden. Liegt eine erhöhte Komplexität vor, ist der Einsatz von numerischen Interpolationsverfahren sinnvoll.

Durch Gleichungen beschriebene Flächen:

Die Flächen einfach doppelachsig gekrümmter Geometrien können sehr gut mit Flächen 2. Grades beschrieben werden [81, 82]. Diese Flächen werden implizite Flächen genannt und können durch die Gleichung der Form

$$F(x, y, z) = 0$$

Formel 5-1: Allgemeine Beschreibung Flächen 2. Grades [81, 82].

beschrieben werden, wobei die allgemeine Gleichung 2. Grades innerhalb des kartesischen Koordinatensystems wie folgt dargestellt werden kann.

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{14}x + 2a_{23}yz \dots a_{33}z^2 + 2a_{34}z + a_{44} = 0$$

Formel 5-2: Allgemeinen Gleichung 2. Grades innerhalb des kartesischen Koordinatensystems

Diese Darstellung stellt auf Grund der xy -, xz - und zy -Komponenten einen gemischten Term dar, wodurch die Hauptachsen nicht parallel zu den Koordinatenachsen liegen. Mittels Hauptachsentransformation können diese Mischterme eliminiert werden, woraus folgende Gleichung resultiert.

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dx + 2Ey + 2Fz + G = 0$$

Formel 5-3: Hauptachsentransformation der allgemeinen Gleichung 2. Grades innerhalb des kartesischen Koordinatensystems

Durch entsprechende Parallelverschiebungen des Koordinatensystems können 17 unterschiedliche Normalformen abgeleitet werden. Dabei stellen folgende Gleichungen doppelachsig gekrümmte schalenförmige Flächen dar, das heißt es handelt sich hierbei um nicht abwickelbare Flächen mit räumlicher Ausdehnung, die ein Volumen um- bzw. einschließen.

Betrachtung 1: $A \neq 0, B \neq 0, C \neq 0$

Für Betrachtung 1 ergibt sich mittels Parallelverschiebung der Gleichung II nachstehende Gleichung, wobei $G' \neq 0$ und daher -1 wählbar ist.

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + G' = 0$$

Formel 5-4: Betrachtung 1 Parallelverschiebung der allgemeinen Gleichung 2. Grades innerhalb des kartesischen Koordinatensystems

Aus dieser Betrachtung lässt sich als Normform die Fläche eines Ellipsoiden mit folgender Gleichung beschreiben:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Formel 5-5: Normalform der Fläche eines Ellipsoiden

Betrachtung 2: $A \neq 0, B \neq 0, C = 0, F \neq 0$

Für Betrachtung 2 ergibt sich mittels Parallelverschiebung der Gleichung II nachstehende Gleichung:

$$Ax^2 + By^2 + 2Fz = 0$$

Formel 5-6: Betrachtung 2 Parallelverschiebung der allgemeinen Gleichung 2. Grades innerhalb des kartesischen Koordinatensystems

Daraus ergibt sich für einen elliptischen Paraboloiden:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{2z}{c}$$

Formel 5-7: Normalform der Fläche eines elliptischen Paraboloiden

Für einen hyperbolischen Paraboloiden ergibt sich:

$$-\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{2z}{c}$$

Formel 5-8: Normalform der Fläche eines hyperbolischen Paraboloiden

Die Beschreibung von schalenförmigen Oberflächen mittels analytischen Berechnungsmethoden wird bei zunehmender Komplexität der vorliegenden Krümmung äußerst aufwendig. Somit lassen sich nicht alle Freiformflächen anhand von Gleichungen beschreiben. Insbesondere ist die Beschreibung von gekrümmten Oberflächen mittels analytischer Geometrie für die Belegung der Oberfläche mit beschreibenden Kett- und Schussfadenverläufen höchst komplex, da für jeden einzelnen Faden eine Gleichung bestimmt werden muss.

Durch Interpolation beschriebene Flächen:

Das Interpolationsverfahren zur Detektion gekrümmter Flächen beruht darauf, dass basierend auf hinreichend genauen Eingangsdaten diese mittels mathematischer Funktionen angenähert werden. Der große Vorteil der Beschreibung von Flächen mittels interpolierenden Methoden besteht darin, dass diese computergestützt durchgeführt und somit direkt in eine Prozesskette eingebunden werden können. Für die Beschreibung einer Fläche ist es notwendig, dass ausreichend Eingangsdaten vorliegen. Diese werden in der Regel als Punktwolke gegeben und liefern somit für jeden Punkt die Informationen innerhalb

des Raumes in Form der Raumkoordinaten x , y und z . Je nach Anzahl der gegebenen Daten kann aus den Informationen der Punkte die 3D-Oberfläche in Form eines Polygometzes zusammengesetzt werden.

Einführung virtueller Oberflächenlinien

Zur Erzeugung einer gekrümmten schalenförmigen Struktur müssen im Vorfeld die auf der Oberfläche des Zielobjektes verlaufenden Oberflächenlinien berechnet werden. Dazu muss die durch Koordinaten beschriebene Oberfläche (x,y,z) mit virtuellen Linien belegt werden. Für die Verteilung dieser virtuellen Linien ergeben sich je nach gegebener Geometrie unterschiedliche Anordnungsvarianten auf der entsprechenden Oberfläche.

a) Belegung der Oberfläche mittels glättenden Splines

Diese Methode sieht vor, dass die Oberflächenlinien horizontal und vertikal über auf der Oberfläche verlaufen. Dazu wird die Oberfläche in ein Raster unterteilt, dessen Gitterweite die Abstände der virtuellen Oberflächenlinien repräsentiert. Hierzu werden zunächst Punkte entlang der zuvor gewählten x - und y -Achsen gewählt, anschließend die Kreuzungspunkte der ausgehenden Linien bestimmt und die entsprechende z -Koordinate durch Projektion der x - und y -Werte auf die 3D-Zielfläche ermittelt. Die Schnittpunkte dienen als Stützpunkte für die Berechnung der Splines zur Abbildung der virtuellen Fadenverläufe auf der Oberfläche. Die Splines werden dabei mit folgender Gleichung berechnet:

$$u \sum_i^n w_i (y_i - s(x_i))^2 + (1 - u) \int \left(\frac{d^2s}{dx^2} \right)^2 dx$$

Formel 5-9: Berechnung der Splines basierend auf den Kreuzungspunkten, u : smoothing parameter; w_i : Wichtung; y_i : y -Wert; x_i : x -Wert; s : glättende Spline

Zur Berechnung der Splines wird der Parameter u zwischen 0 und 1 gewählt. Für $u = 0$ erfolgt eine lineare Anpassung der Daten nach der Methode der kleinsten Quadrate. $u = 1$ ergibt eine kubische Spline-Interpolation, w bildet eine Wichtung. Wird diese nicht spezifiziert, wird diese mit 1 angegeben. Der Algorithmus wird in Abbildung 5-5 bspw. zur Berechnung virtueller Linien auf einer Halbkugel angewendet.

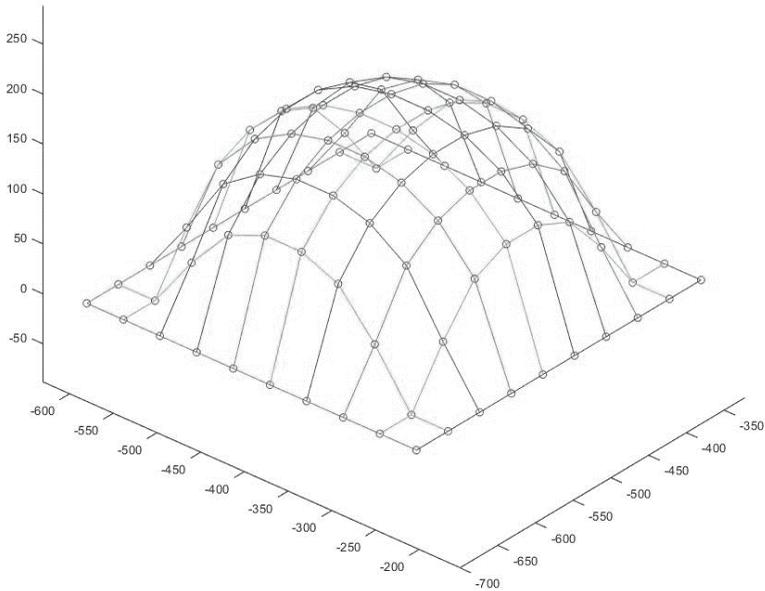


Abbildung 5-5: Anwendung des Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Kreuzungspunkte und Berechnung der virtuellen Oberflächenlinien auf einer Halbkugel

- b) Anpassung der Kreuzungspunkte zur Anpassung der Oberflächenlinien entsprechend der tatsächlichen Fadenverläufe innerhalb des Gewebes

Bei klassischen ebenen Geweben liegen die Kett- und Schussfäden in einem 90° Winkel zueinander verkreuzt vor. Diese Art der Verkreuzung lässt sich jedoch nicht auf eine doppelachsig gekrümmte Fläche übertragen, da die Orientierung der Kett- und Schussfäden nicht parallel zu den Hauptachsen verlaufen.

Wird eine Belegung der virtuellen Oberflächenlinien der 3D-Geometrie so berechnet, dass diese in der Projektion auf die xy-Ebene rechtwinklig zueinander und mit gleichmäßigen Gitterabständen vorliegen, entspricht dies nicht den realen Fadenverläufen innerhalb des Gewebes. Insbesondere treten diese Fehler für die Abstände der Oberflächenlinien in Bereichen mit hoher Steigung (Differenz der z-Koordinaten) auf. Zur Anpassung der auf der Zielgeometrie verlaufenden virtuellen Oberflächenlinienverläufe kann folgender entwickelter iterativer Berechnungsalgorithmus angewendet werden:

Der Algorithmus zielt darauf ab die zuerst berechneten Kreuzungspunkte so anzupassen, dass eine gleichmäßige Gitterweite auf der gekrümmten Oberfläche vorliegt. Dazu werden zunächst die aktuellen Abstände der Kreuzungspunkte sowohl in x- als auch y-Richtung berechnet. Das Verhältnis zwischen den Abständen der anliegenden und der aktuell betrachteten Punkte bestimmt die Richtung und Größe der durchzuführenden Verschiebung des betrachteten Punktes. Liegt der zu verschiebende Kreuzungspunkt näher an der Mitte seiner umliegenden Nachbarpunkte, wird eine kleinere Schrittweite angewendet. Durch diese iterative Verschiebung der Punkte und einer kontinuierlichen Verringerung der Schrittweite um einen zuvor gewählten konstanten Faktor β wird eine Konvergenz der Verschiebung aller Punkte erreicht. Die gesamte entwickelte Vorgehensweise ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Damit keine Änderung der Oberflächenkrümmung der Zielgeometrie auftritt, werden die Randpunkte fixiert (grün dargestellt). Die Verschiebung wird anhand der rot markierten Punkte aufgezeigt, wobei die Nachbarpunkte schwarz gestrichelt markiert sind. Die Berechnung einer Iterationsschleife wird für alle Punkte nacheinander (nächster Punkt blau markiert) durchgeführt. Die Abstände d_x werden als Länge der Kurve zwischen zwei Punkten auf einer Oberfläche berechnet (Formel 5-10). Die Vektoren zur Berechnung der neuen Position werden in 2D berechnet. Die Berechnung der neuen z-Koordinaten erfolgt über Interpolation der neuen x- und y-Werte mit der Punktwolke der Oberfläche der anfangs importierten Zielgeometrie. Die neuen geänderten Punkte dienen als Stützpunkte zur Berechnung der Splines (Formel 5-9), wodurch die angepassten virtuellen Oberflächenlinien dargestellt werden (vgl. Abbildung 5-6).

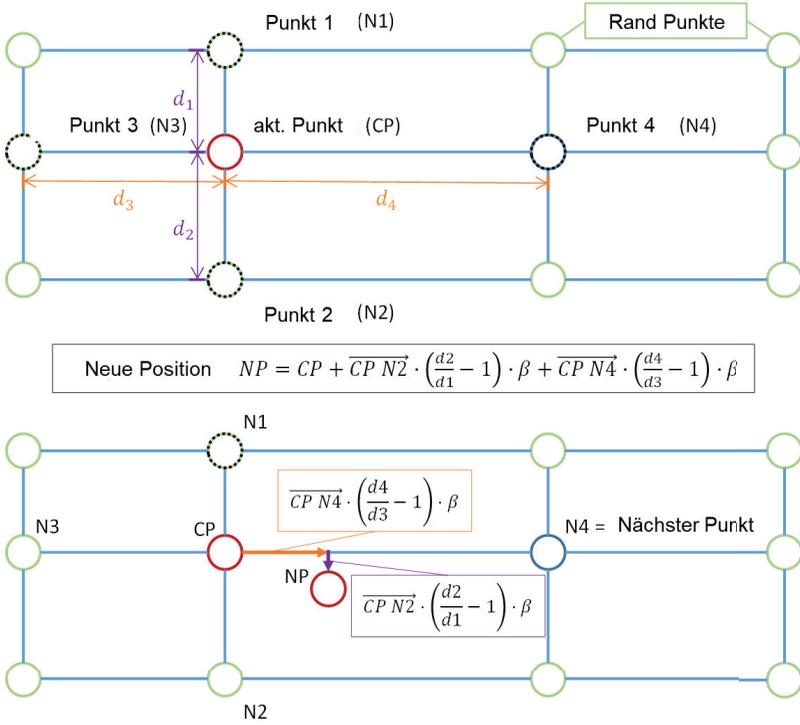


Abbildung 5-6: Prinzipschema des Optimierungsalgorithmus zur Anpassung der virtuellen Oberflächenlinien auf einer gekrümmten schalenförmigen Oberfläche

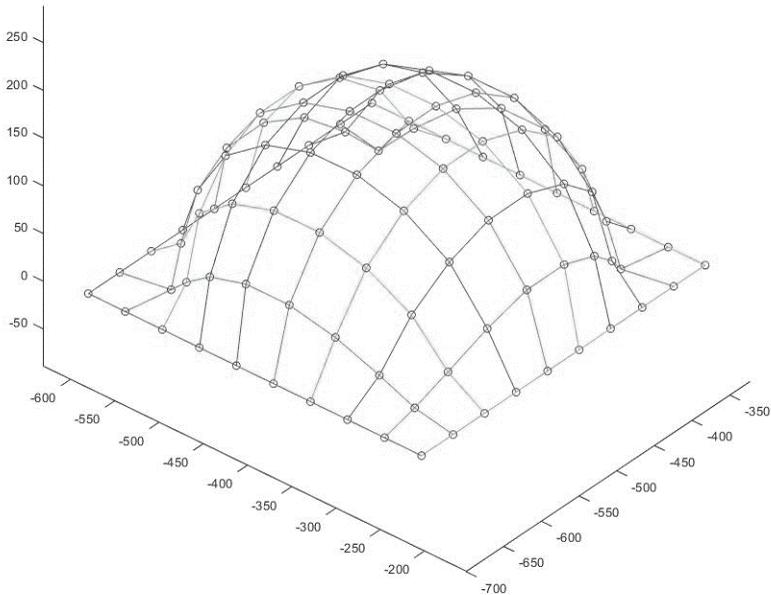


Abbildung 5-7: Anwendung des Optimierungsalgorithmus zur Anpassung der virtuellen Oberflächenlinien auf einer Halbkugel

c) Berechnung der Bogenlängen der einzelnen virtuellen Oberflächenlinien

Für die auf der Oberfläche gleichmäßig verteilten virtuellen Oberflächenlinien werden die jeweiligen Bogenlängen bestimmt. Dazu werden gemäß des eingeführten Koordinatensystems in x- und y-Richtung die einzelnen Kreuzungspunkte der jeweiligen virtuellen Linie herangezogen. Hierbei können die Abstände der zugehörigen Stützpunkte mittels Berechnung des Abstands zweier Punkte im Raum ermittelt werden. Die Abstände der Punkte P und Q werden mit nachstehender Gleichung berechnet. Die anschließende Summierung aller Abstände ergibt die jeweilige Bogenlänge der Oberflächenlinie.

$$|PQ|^2 = (P_x - Q_x)^2 + (P_y - Q_y)^2 + (P_z - Q_z)^2$$

Formel 5-10: Berechnung des Abstandes zweier Punkte im Raum

Liegen keine ausreichenden Stützpunkte für eine Oberflächenlinie vor, muss die Berechnung der Länge mittels eines Funktionsgraphen erfolgen. Diese wird wie folgt durchgeführt:

$$L(a, b) = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} f(x, y)\right)^2} dx$$

Formel 5-11: Berechnung der Bogenlänge mittels Funktionsgraphen

Die dafür notwendige beschreibende Funktion der virtuellen Oberflächenlinie $f(x, y)$ kann iterativ aus den Stützpunkten berechnet werden. Hierfür können Polynomfunktionen eingesetzt werden. Für die Beschreibung gekrümmter schalenförmiger Oberflächen sind insbesondere quadratische oder kubische Polynomfunktionen mit folgender Form anwendbar:

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, n \geq 0$$

Formel 5-12: Beschreibung quadratischer oder kubischer Polynomfunktionen

Die entwickelte Methode zur Erfassung der Zielgeometrie sowie die damit einhergehenden Berechnungen werden in Kapitel 7 angewendet, um die geforderten Gewebelängen zur Erzeugung der Zielgeometrie zu berechnen und die entsprechenden textilphysikalischen Wirkzusammenhänge zur Generierung der notwendigen Gewebebindungsmuster zuzuordnen.

6 Konstruktiv-technologische Entwicklung des abzugsfreien Webens

6.1 Einführung

Zur Ermöglichung des Webens gekrümmter schalenförmiger Strukturen ohne Gewebeabzug muss ein konstruktiver Entwicklungsprozess zur Modifikation der Webmaschinenperipherie erfolgen. Da verfahrensbedingt unterschiedliche Gewebebindungen entlang der Gewebebreite angeordnet werden müssen, die zu den geforderten unterschiedlichen Gewebelängen führen, muss die Jacquardtechnologie eingesetzt werden. Darüber hinaus ist eine Einzelfadenzuführung der Kettfäden aus einem Spulengatter notwendig, sodass unterschiedliche Längen abgezogen werden können. Einen zentralen Punkt stellt die Substitution des Gewebeabzuges dar. Dies ist notwendig, da im konventionellen Webprozess die Kettfäden gleichmäßig abgezogen werden und damit der Effekt der unterschiedlichen Einarbeitung der Gewebelängen zunichtegemacht würde. Wird hingegen der Abzug vollständig entfernt, kann diese Limitierung aufgehoben werden. Damit eine Webmaschine ohne Abzug betrieben werden kann, wird die Technologie des *abzugsfreien Webens* entwickelt. Die Entwicklungsschritte werden im Folgenden dargestellt und erläutert.

6.2 Konstruktiver Entwicklungsprozess zur Realisierung abzugsfrei gewebter Strukturen

Die Fertigung von gekrümmten schalenförmigen Geweben ist bisher auf konventionellen Webmaschinen technologisch nicht möglich. Das herkömmliche Webverfahren zeichnet sich wie bereits in Kapitel 2.4.1, Abbildung 2-1 beschrieben, dadurch aus, dass die Kettfäden ausgehend von einem Kettbaum oder einem Kettfadengatter über den Streichbaum der Fachbildungseinrichtung zugeführt werden. Diese kann entweder als Schaftmaschine oder als Einzelfadenansteuerung (Jacquardtechnik) ausgeführt werden. In das damit hervorgerufene Webfach wird der Schussfaden eingebracht und vom Webblatt an die Gewebekante angeschlagen. Durch den Wechsel der Kettfäden vom Unterfach in das Oberfach wird der Schussfaden mit den Kettfäden verkreuzt. Das Gewebe wird schlussendlich vom Gewebeabzug abgezogen und gespeichert. Da beim abzugsfreien Weben der konventio-

nelle Abzug der Webmaschine substituiert wird, müssen konstruktive Maßnahmen erfolgen, die die Kettfadenzugkraft innerhalb des Webprozesses aufrecht erhalten. Somit muss das sonst zwischen Ablass und Abzug bestehende Kräftegleichgewicht der Kettfäden durch zusätzliche Eingriffe beibehalten werden. Ein konventioneller Gewebeabzug sorgt dafür, dass das Gewebe nach dem Eintrag des Schussfadens abgezogen wird, damit die Gewebekante nicht in der Schusseintragszone verbleibt und somit ein sauberes Öffnen des Webfaches im Webprozess gewährleistet werden kann. Wird hingegen der Abzug entfernt, rutscht die Gewebekante in die Schusseintragszone zurück, wodurch keine ausreichende Webfachöffnung möglich ist. Aus diesen Gründen muss die zu entwickelnde Zusatzeinrichtung an der sonst üblichen Gewebekantenposition wirken und diese arretieren. Somit wird ein *Schussfadenrückhaltesystem* konstruiert.

Die Fertigung von gekrümmten schalenförmigen Geweben erfolgt vorrangig mit Hochleistungsgarnen wie Glas- oder Carbonmultifilamentgarnen, die eine grobe Feinheit aufweisen. Aus diesem Grund wird für die Entwicklung der Technologie des abzugsfreien Webens auf eine Stangengreiferwebmaschine zurückgegriffen, da diese die prozesssichere Verarbeitung des schweren Schussfadenmaterials ermöglicht. Aus diesen Bedingungen wird folgende Gesamt- und entsprechende Teilfunktion aufgestellt:

Die Gesamtfunktion der zu entwickelnden Zusatzeinrichtung zur Ermöglichung des abzugsfreien Webens stellt die Arretierung der Gewebekante ohne ein sonst übliches Abzugssystem dar. Aus der Gesamtfunktion werden die Teilfunktionen a) Sicherung des eingetragenen Schussfadens, b) Aufrechterhaltung der Kettfadenzugkraft und c) Aufnahme der Arretierungselemente sowie d) kollisionsfreie Führung der Elemente abgeleitet. Die Teilfunktionen können entsprechend Abbildung 6-1 unterteilt werden. Die Sicherungselemente der Gewebekante müssen dabei im Eingriff mit der Gewebebildungszone stehen. Hierbei ist es unabdingbar eine gegenüber den bewegten Teilen der Webmaschine kollisionsfreie Bewegung zu gewährleisten. Darüber hinaus müssen die Elemente so ausgeführt sein, dass die Faserschädigung gering gehalten wird. Da der konventionelle Abzug nicht genutzt werden soll, muss die Förderung des Gewebes selbst über die Anschlagsbewegung des Webblattes erfolgen. Somit ist eine entsprechende Führung des Gewebes hinter der Schusseintragszone notwendig.

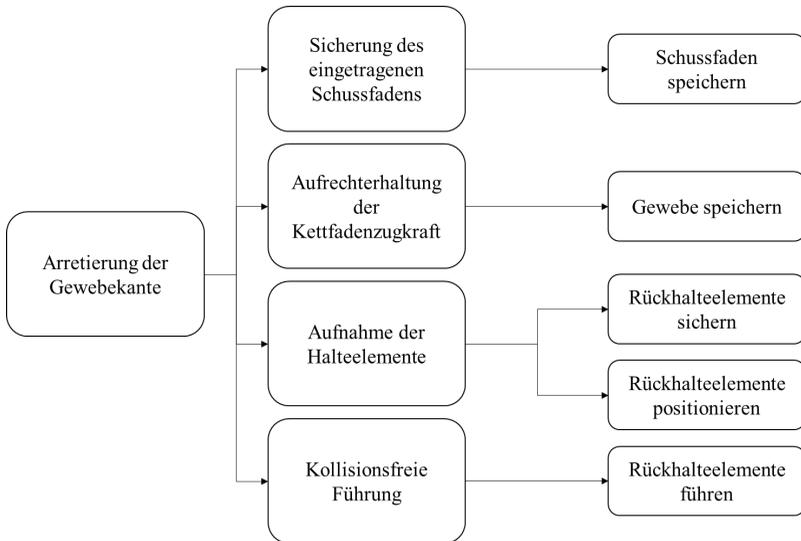


Abbildung 6-1: Aufstellung der Gesamt- und Teilfunktionen [83]

Für diese Teilfunktionen wurde ein vollständiger nach VDI 2221 [84] technischer Entwicklungsprozess durchgeführt auf dessen Vorzugvariante im Folgenden eingegangen wird.

6.3 Umsetzung der Vorzugslösung

6.3.1 Detailauslegung des Schussfadenrückhaltesystems

Die entwickelte Vorzugslösung sieht ein doppeltes, aus Haken bestehendes Arretierungssystem vor. Die Schusseintragszone befindet sich dabei zwischen den beiden Hakenleisten. Der Schussfaden wird in das geöffnete Webfach eingelegt und durch das Webblatt entlang des unteren Hakens hinter die Nase des oberen Hakens geschoben. Durch diese Anordnung kann gewährleistet werden, dass der zuletzt eingetragene Schussfaden zwangsläufig hinter die Nase des oberen Hakens geschoben wird und damit am Zurückrutschen in die Schusseintragszone gehindert wird. Das untere Hakensystem gewährleistet darüber hinaus die Führung des Gewebes. Dabei liegt das Gewebe auf den Hakenen-

den, sodass dieses durch die Anschlagsbewegung des Webblattes horizontal aus der Gewebbildungszone herausgeschoben wird. Damit keine Kollision zwischen dem Webblatt und den Haken auftritt, wird deren Geometrie so gestaltet, dass die auslaufenden Nasen dauerhaft im Eingriff mit den Rietlücken des Webblattes stehen. Die Nasen des unteren Hakensystems münden in der hinteren Webblattposition zwischen den Stegen der Stegladensohle. Die Nutzung einer Stegladensohle zur Greiferführung ist unabdingbar, da damit die Nasen der unteren Haken zwischen den Stegen eingreifen und der Greifer kollisionsfrei in das Webfach eintauchen kann. Der Schusseintrag durch den Greifer erfolgt zwischen den oberen und unteren Hakennasen (vgl. Abbildung 6-2). Der zuletzt eingetragene Schussfaden wird im Webfach abgelegt und entlang des unteren Hakens durch den Blattanschlag (Abbildung 6-2; Pos. 1-3) in die Nasen der oberen Haken (Abbildung 6-2; Pos. 4-7) geführt. Dabei wird der Schussfaden in den Positionen 4 und 5 durch Querkraftbelastung ausgelenkt. Damit die Fadenschädigung in diesen Positionen gering gehalten wird, ist der seitliche Abstand zwischen den unteren und oberen Haken entsprechend einzustellen. Darüber hinaus ist die Hakendichte und damit der seitliche Abstand zueinander an die Kettfadendichte anzupassen. Hierbei wird die Hakendichte im Verhältnis 1 zu 10 zur Kettfadendichte gewählt. Dies bedeutet, dass bei einer Kettfadendichte von 5 Fäden pro cm, eine Hakendichte von 0,5 Haken pro cm vorliegt.

Die Positionierung der oberen Haken wird mit Blöcken realisiert, in deren Schlitze die Haken eingelegt und formschlüssig arretiert werden (Abbildung 6-3; Bauteil 5). Die Blöcke werden auf einem Profil befestigt, das mittels Adapterstücken an den Böcken der Webmaschine montiert wird. Dabei kann über die Konturfräsung im Befestigungswinkel (Abbildung 6-3; Bauteil 4) die Position des oberen Hakensystems eingestellt werden. Die Einstellung der gesamten Position des oberen Hakensystems bezüglich der Eingriffstiefe im Webblatt erfolgt mittels durch Spindeln einstellbaren Positionierungseinheiten (Abbildung 6-3; Bauteil 6). Die Arretierung der unteren Hakensegmente erfolgt ebenfalls mittels geschlitzter Blöcke (Abbildung 6-3; Bauteil 8), die auf einer Profilschiene aufgereiht werden (Abbildung 6-3; Bauteil 9). Diese wird auf der vorhandenen Befestigung der Gewebestütze montiert und kann mittels einer Einstellvorrichtung in der Ebene positioniert werden (Abbildung 6-3; Bauteil 7). Durch die Einstellmöglichkeit kann sowohl der Abstand zwischen der oberen und der unteren Hakenleiste modifiziert werden, als auch die Position der Hakennasen bezüglich des Webblattes justiert werden.

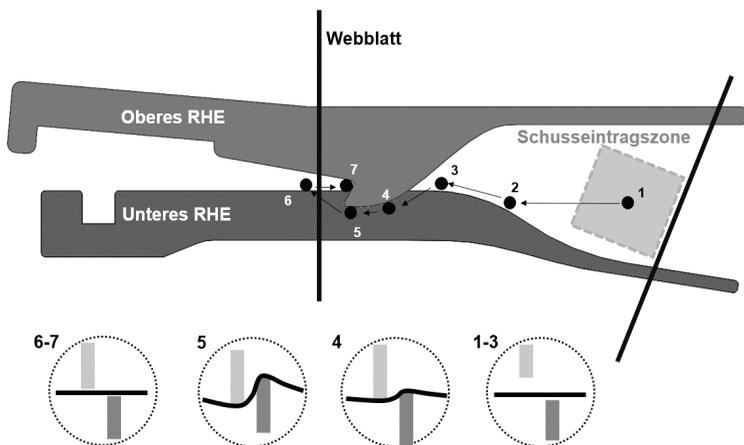
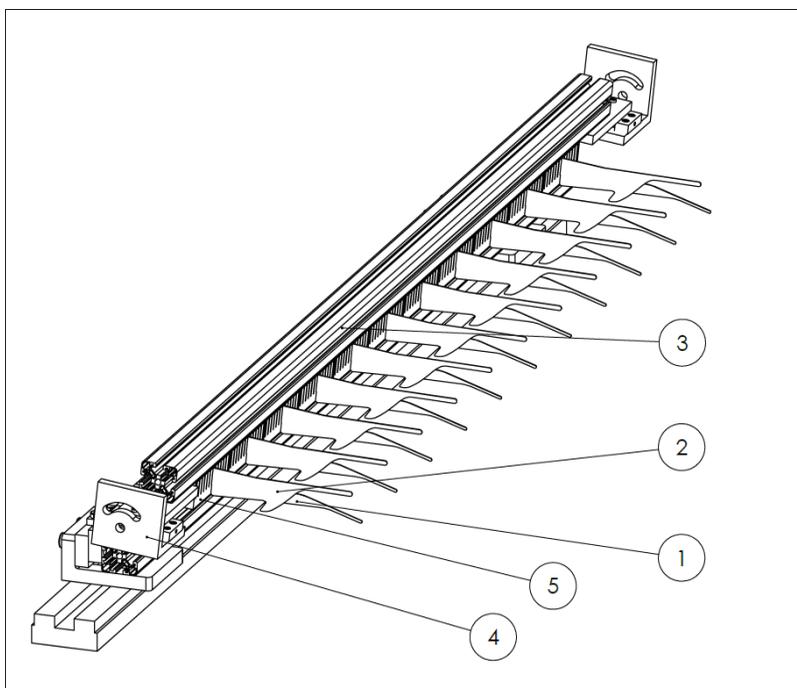


Abbildung 6-2: Detailansicht doppeltes Hakensystem mit Rückhalteelemente (RHE)



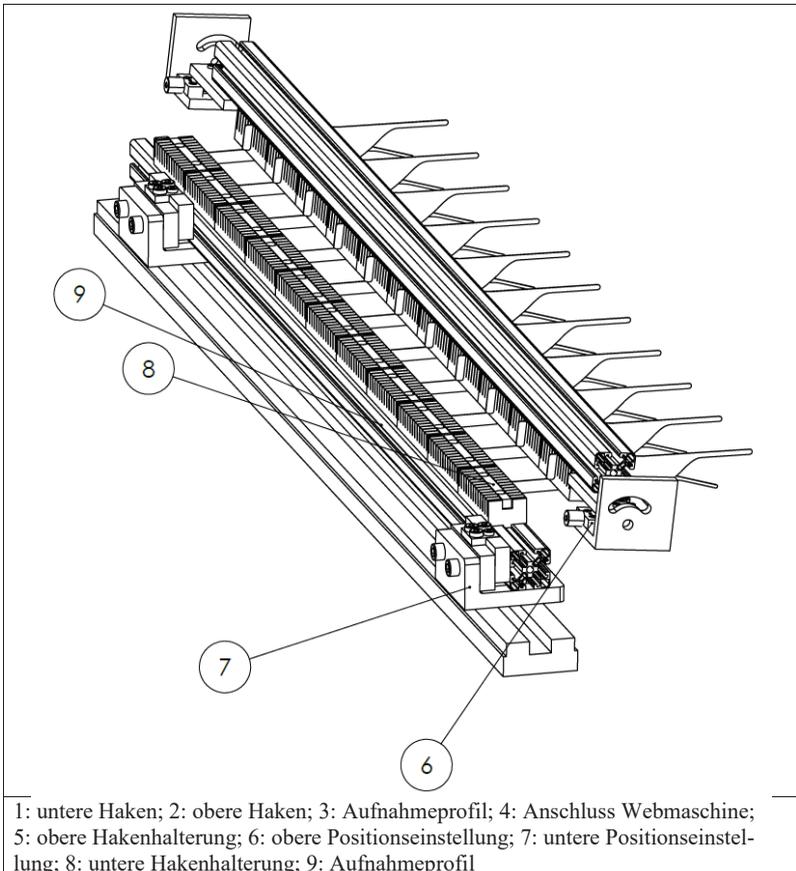


Abbildung 6-3: Konstruktionsprinzip des Schussfadenrückhaltesystems

Neben dem seitlichen Abstand der Haken zueinander können die Hakenpositionen, wie in Abbildung 6-4 dargestellt, eingestellt werden. Diese sind so ausgelegt, dass die Positionierung der Haken eine dauerhafte Sicherung der Gewebekante im Webprozess gewährleistet. Darüber hinaus kann die faserschonende Verarbeitung des eingesetzten Garnmaterials durch die Positionierung verbessert werden. Diese hängt insbesondere von der Höhe der beiden Hakensysteme zueinander ab. Wird die Höhe zu gering gewählt, tritt eine Scherwirkung zwischen den oberen und unteren Hakenelementen auf, wodurch das zu verarbeitende Garnmaterial geschädigt wird. Liegt hingegen ein zu großer Abstand

vor, kann keine ausreichende Sicherung des zuletzt eingetragenen Schussfadens stattfinden. Die Hakenposition ist zudem an das eingesetzte Schussfadenmaterial und dessen Biegesteifigkeit anzupassen.

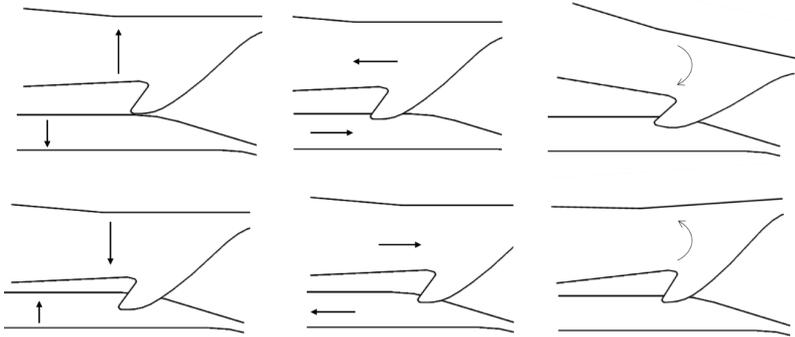


Abbildung 6-4: Einstellmöglichkeiten des doppelten Hakensystems

Das gesamte Arretierungssystem, bestehend aus oberer und unterer Hakenleiste, wird an den Befestigungspunkten des Gewebetisches der Webmaschine montiert (Abbildung 6-5). Zur Montage wird die konventionelle Gewebestütze entfernt und an deren Stelle das untere Hakensystem befestigt. Das obere Hakensystem wird an den Befestigungspunkten des linken und rechten Greiferbockes installiert. Bedingt durch den Prozessablauf der Greiferwebmaschine wird der zuletzt eingetragene Schussfaden beim Greifen des nachfolgenden Schussfadens durchtrennt. Damit ein prozesssicheres Weben gewährleistet werden kann, muss der Greifer den Schussfaden für jeden Schusseintrag im selben Winkel zwischen Gewebekante und Schussfadenschere erfassen. Aufgrund des in der Webebene frei liegenden Gewebes ist diese Beziehung nicht zwangsläufig gegeben. Durch den Einsatz von Schussfadenfangleisten, die durch den konventionellen Abzug geführt werden, wird eine gleichbleibende Position des zuletzt eingetragenen Schussfadens gewährleistet. Damit diese das abzugsfrei gewebte Gewebe nicht negativ verzerren, werden die Leisten unmittelbar nach dem Schusseintrag vom abzugsfreien Gewebe mittels Kantenschere getrennt. Die Schussfadenfangleisten ermöglichen darüber hinaus das Einbringen von Teilschüssen, da diese sonst lose auf dem Gewebe liegen würden und somit kein erneutes Fassen des Schussfadens vom Greifer möglich wäre.

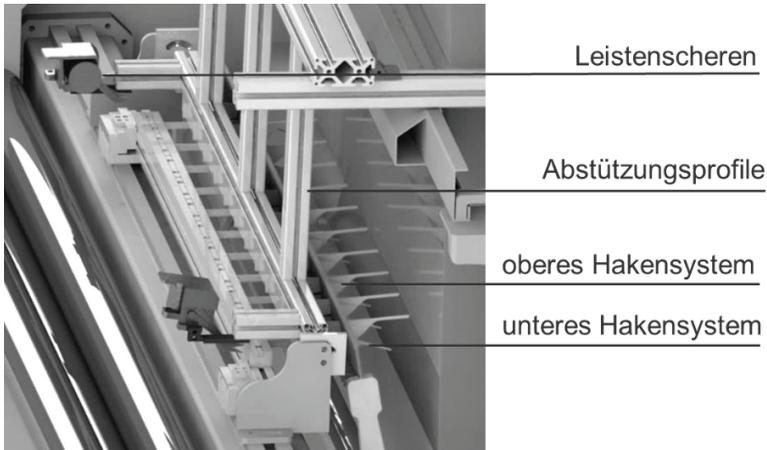


Abbildung 6-5: Einbauprinzip des Schussfadenrückhaltesystem

6.3.2 Einbau und Installation der Vorzugslösung zum abzugsfreien Weben

Zur Umsetzung des abzugsfreien Webens wurde die entwickelte Vorzugslösung in einer konventionellen Stangengreiferwebmaschine des Typs Dornier PTSJ mit Jacquardfachbildungseinrichtung installiert. Dazu wurde das untere Hakensystem an den entsprechenden Befestigungspunkten montiert (Abbildung 6-6, links). Darauf folgend wurde die Position der Hakenelemente mittels der Einstellvorrichtung justiert, sodass die Hakenenden zwischen den Stegen der Webladensohle freiführend in die Rietlücken des Webblattes eingreifen (Abbildung 6-6, rechts).

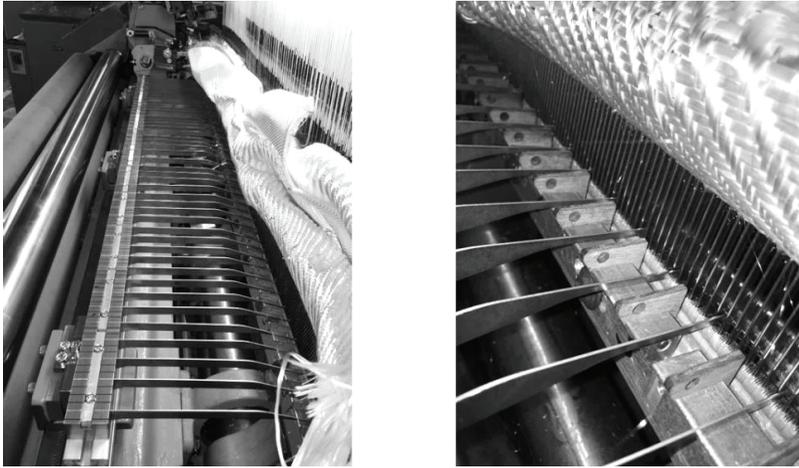


Abbildung 6-6: Einbau des unteren Hakensystems; rechts: Montage in der Webmaschine; links: Detail Hakennasenföhrung in der Stegladensohle

Die Installation des oberen Hakensystems erfolgt an den an die Gewebebreite anpassbaren Greiferböcken. Dazu wird eine Profilschiene angebracht und mit den Halterungssegmenten bestückt. Die gewählte Kettfadendichte beträgt 5 Fäden pro cm, woraus eine Hakendichte von 0,5 Haken pro cm resultiert. Somit beträgt der seitliche Abstand der Haken zueinander 2 cm. Dadurch wird verhindert, dass der eingetragene Schussfaden durch eine etwaige Scherwirkung der Haken geschädigt wird. Des Weiteren wird die Position der oberen Haken so eingestellt, dass die „Nasen“ der Haken beim vorderen Umkehrpunkt des Webblattes (Schussanschlag) einen Abstand zu den Rietstäben vom 1,5-fachen der Schussfadendicke bilden. Dadurch wird das Gewebe beim Anschlagen hinter die Haken geschoben und bei der Rückbewegung des Webblattes die Gewebekante in den Haken arretiert. Für die Gewährleistung eines prozesssicheren Schussfadeneintrages werden Schussfadenfangleisten angebracht, die direkt nach der Bildung des abzugsfrei gewebten Gewebes von diesem getrennt werden. Zur weiteren Einrichtung der Webmaschine muss zu Beginn des abzugsfreien Webprozesses ein Gewebe erzeugt werden, damit die Kettfadenzugkräfte aufgebracht werden können. Dazu wird zunächst ein Gewebe mit herkömmlichem Abzug gebildet (vgl. Abbildung 6-7; links) und, nachdem eine ausreichende Festigkeit im Gewebe vorliegt, aus dem Abzug entnommen (vgl. Abbildung 6-9).



Abbildung 6-7: Einbau und Einstellung des oberen Hakensystems

Neben dem Einbau des entwickelten Arretierungssystems muss für die Einzelfadenzulieferung der Kettfäden ein Spulengatter genutzt werden. Zur Einstellung der Kettfadenzugkraft ist eine Einzelbremsung der Kettfäden anzubringen. Zum Ausgleich der resultierenden Kettfadenlängenschwankungen aufgrund der Fachbildung ist eine Kompensation dieser vorzunehmen (vgl. Abbildung 6-8). Alternativ können kombinierende Systeme wie elektronisch gesteuerte Abwickelstellen innerhalb des Gatters genutzt werden.

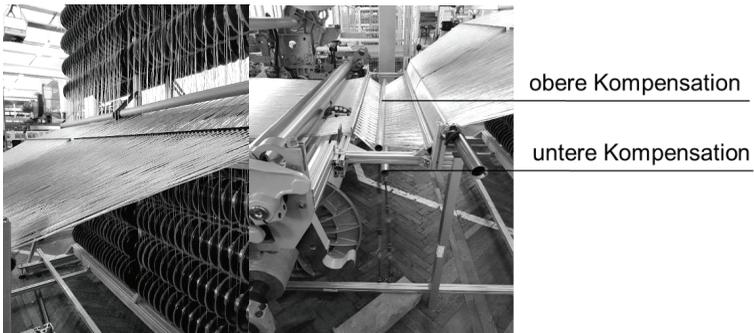


Abbildung 6-8: Eingesetztes Spulengatter und verwendete Kompensationseinrichtung

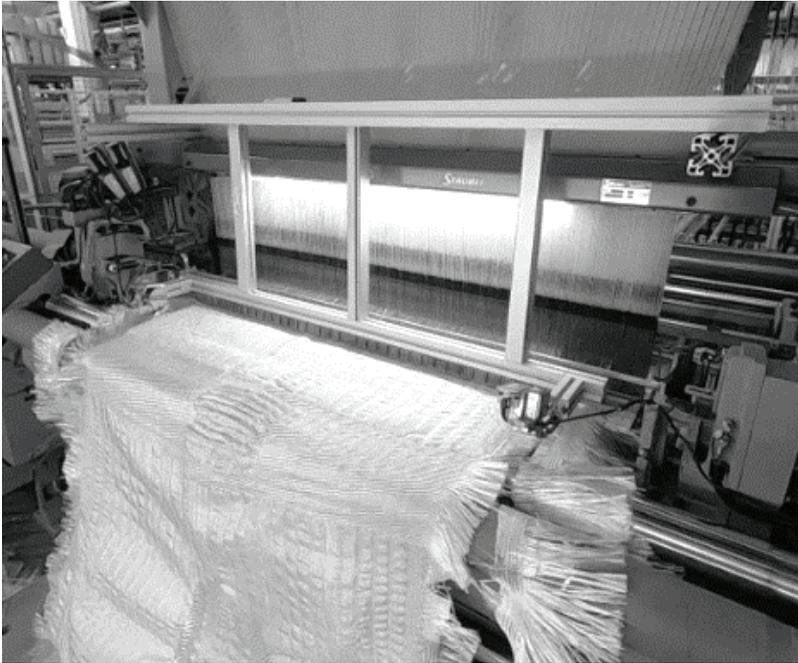


Abbildung 6-9: Einbau und abzugsfreie Gewebefertigung

6.3.3 Einstellung der Maschinenparameter des abzugsfreien Webens

Für die Ausbildung gekrümmter schalenförmiger Strukturen mittels des abzugsfreien Webens sind neben den unterschiedlichen Bindungen entlang der Gewebebreite die vorliegenden Kettfadenzugkräfte maßgebend. Liegen höhere Kettfadenzugkräfte vor, resultiert daraus ein dichteres Gewebe, wodurch bei Beibehaltung der Gewebebindung geringere Gewebelängen erzeugt werden. Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit erfolgt deshalb die Erfassung der Kettfadenzugkräfte. Die Messung der Kettfadenzugkräfte (gemessen mittels WAWEON der Firma VUTS) erfolgt im Hinterfach der Webmaschine an insgesamt 20 Kettfäden. Die Messung wird mit einer Maschinengeschwindigkeit von 100 U/min durchgeführt. Die Kettfadenzugkräfte werden zunächst mit Abzug und anschließend ohne Abzug unter Variation der Kompensationselemente (vgl. Abbildung 6-8) erfasst.

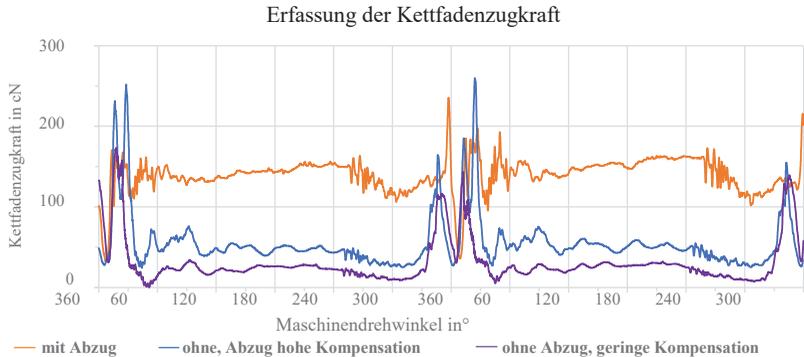


Abbildung 6-10: Messung der Kettfadenzugkräfte beim Weben mit und ohne Abzug [85]

Die Messung der Kettfadenzugkräfte zeigt beim Weben mit Abzug eine deutlich höhere mittlere Kettfadenzugkraft als beim Weben ohne Abzug (vgl. Abbildung 6-10). Wird eine höhere Kompensation eingesetzt, steigen die mittleren Kettfadenzugkräfte und die Zugkraftspitzen an. Damit ein prozesssicheres abzugsfreies Weben möglich ist, wird die Kompensation der Kettfäden so eingestellt, dass die Kettfadenzugkräfte nicht auf „null“ fallen und gleichzeitig nicht 250 cN/Faden im Höchstbelastungsfall überschreiten, da sonst die Belastung für die Servomotoren der Jacquardmaschine zu hoch wird, wodurch die Maschine stoppen bzw. geschädigt werden würde.

Zur Einordnung der Garnschädigung, die durch die entwickelte Zusatzeinrichtung verursacht wird, erfolgt die Überprüfung der Fadenzugkraft der zu Geweben verarbeiteten Kett- und Schussfäden und deren Vergleich mit dem Ausgangsmaterial (vgl. Abbildung 6-11). Hierzu werden Gewebe abzugsfrei gefertigt und jeweils 30 Kett- und Schussfäden entnommen. Im Ergebnis weist die Höchstfadenzugkraft des Ausgangsmaterials 534,1 N, die der verarbeiteten Kettfäden 441,3 N und die der verarbeiteten Schussfäden 462,8 N auf. Zur Charakterisierung des Einflusses der Kettfadenspulenkonfektion wird die Schädigung durch den Umspülprozess ebenfalls erfasst. Diese Messung ergibt eine Höchstzugkraft von 449,8 N. Im Ergebnis liegt die Schädigung des Schussfadenmaterials im Vergleich zum Rohmaterial bei 13 %. Die Schädigung des Kettfadenmaterials wird auf das Ergebnis des Umspülprozesses bezogen, woraus ein maximaler Fadenzugkraftverlust von 1,9 % resultiert. Die Schädigung des Schussfadens lässt sich mittels quer wirkender Belastung auf die Fäden durch das Hakensystem beurteilen. Aufgrund des Gleich-

tens der Schussfäden entlang der Hakennasen beim Schussfadenanschlag wird dieser geschädigt. Zur Minimierung dieser Schädigung ist die Oberfläche der Haken zu verbessern. Dies kann bspw. mit einer „topocrom“ Beschichtung erfolgen [86].

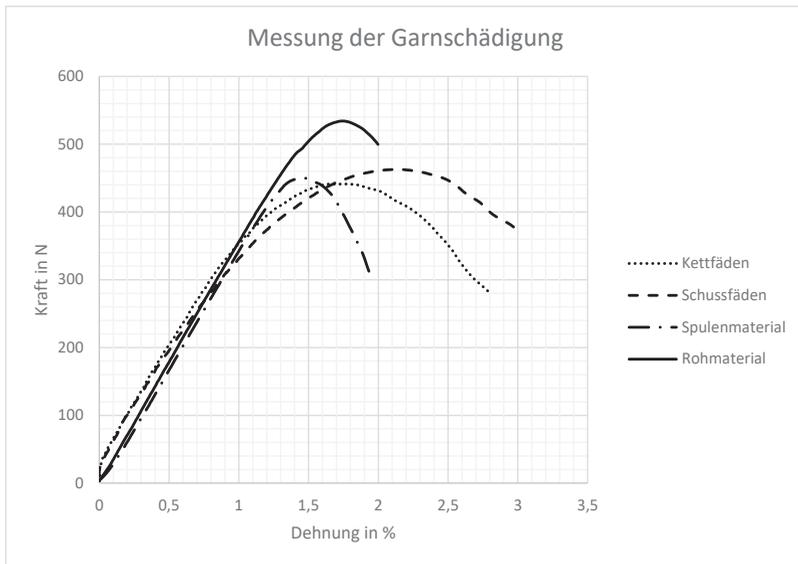


Abbildung 6-11: Messung der Garnschädigung von abzugsfrei gefertigten Geweben

7 Entwicklung eines Strukturverfahrens, Bindungsentwicklung und Modellierung zur Umsetzung komplex gekrümmter schalenförmiger Gewebe

Die komplex gekrümmte schalenförmige Geometrie der gewebten Struktur wird durch das Einbringen unterschiedlicher Gewebelängen innerhalb des Gewebes unter Nutzung der Technologie des abzugsfreien Webens erzeugt. Zur Bildung der unterschiedlichen Gewebelängen muss der Zusammenhang zwischen erzeugbarer Länge und der dafür notwendigen unterschiedlichen Verkreuzung zwischen Kett- und Schussfaden aufgestellt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen des Kapitels 5 wird in diesem Kapitel die Bindungsentwicklung zur Erzeugung komplex gekrümmter schalenförmiger Gewebe erarbeitet.

7.1 Erzeugung von unterschiedlichen Gewebelängenbereichen mittels Anordnung unterschiedlicher Bindungsbereiche

7.1.1 Berechnung der Verkreuzungen einer Gewebestruktur

Zur Charakterisierung und Beschreibung einer Gewebestruktur müssen unterschiedliche zu betrachtende Faktoren herangezogen werden. Diese lassen sich prinzipiell in folgende Kennzahlen unterteilen:

- Deckungsfaktor,
- Dichteindex und
- Strukturkoeffizienten

Der Deckungsfaktor (F) beschreibt das Verhältnis zwischen den Fadendichten der einzelnen Fadensysteme und der Garnfeinheit. Dieser wurde von Peirce so beschrieben, dass der Koeffizient der Fadendichte (s) der einzelnen Fadensysteme und der Fadenfeinheit (T) die Deckung eines Gewebes deklariert [87].

$$DF = \frac{s * \sqrt{T}}{\sqrt{1000}}$$

Formel 7-1: Berechnung des Deckungsfaktor (F) nach Peirce [87]

Da bei dieser Berechnung nur äquivalente Kett- und Schussdichten berücksichtigt werden, wurde von Illés und Alpár die Beschreibung des Deckungsfaktors durch die Summe der Deckungsfaktoren der Kett- und Schussfäden erweitert und wie folgt beschrieben [88]:

$$DF = \frac{s_l \sqrt{T_l} + s_v \sqrt{T_v}}{\sqrt{1000}}$$

Formel 7-2: Berechnung des Deckungsfaktors nach Illés und Alpár [88]

In beiden erstellten Beschreibungsmethoden zur Charakterisierung der Gewebedichte wird jedoch nicht die Gewebebindung berücksichtigt. Hierzu wurde von Brierley eine empirisch entwickelte Berechnungsmethode entwickelt [89]:

$$DF = CK^a$$

Formel 7-3: Berechnung des Deckungsfaktors nach Brierley [89]

Dabei bildet C eine vom Fadenmaterial abhängige Konstante, K beschreibt einen Kreuzungsquotienten, wobei a von der vorliegenden Bindung abhängt. Diese Beschreibung ist jedoch unzureichend für die Beschreibung von mehrfädigen Bindungen. Damit in der Beurteilung der Gewebestrukturen dies mit berücksichtigt wird, wurde von Alpár eine Kombination entwickelt, die die Deckung eines mehrfädigen Gewebes anhand des Quotienten der Summe der Kett- und Schussfadenfeinheiten und dem Brierley-Bindungskoeffizienten berechnet [90].

$$\phi = \frac{\sqrt{T_l} + \sqrt{T_v}}{2CK^a \sqrt{1000}}$$

Formel 7-4: Berechnung des Brierley-Bindungskoeffizienten nach Alpár [90]

Der Dichteindex von Geweben beschreibt unter Berücksichtigung der Fadenquerschnitte die Anzahl der Verkreuzungen einer Bindungseinheit und wurde von Ashenurst und Bon

für ideal quadratische Bindungen und einen idealen Fadenquerschnitt wie folgt definiert [91]:

$$X_v = s_l d_l + k_v d_v$$

Formel 7-5: Berechnung des Dichteindex von Geweben nach Ashenhurst und Bon [91]

Dabei geben d_l und d_v die Fadendurchmesser und s_l und k_v die Anzahl der Verkreuzungen bezogen auf die Rapportlänge an. Für die Betrachtung nicht quadratischer Bindungen kann die Anzahl der Verkreuzungen in Kett- und Schussrichtung wie folgt beschrieben werden:

$$K_v = \frac{s_l}{k_v} = \frac{M}{\kappa}$$

Formel 7-6: Berechnung der Anzahl der Verkreuzungen in Kett- und Schussrichtung nach Ashenhurst und Bon [91]

Hierbei bildet M die Anzahl der Kettfäden im Rapport und κ die Anzahl der Verkreuzungen der Schussfäden. Somit ist der Dichteindex in Schussfadenrichtung:

$$X_v = s_l \left(d_l + \frac{d_v}{K_v} \right)$$

Formel 7-7: Berechnung des Dichteindex in Schussfadenrichtung nach Ashenhurst und Bon [91]

und in Kettfadenrichtung:

$$X_l = s_v \left(d_v + \frac{d_l}{K_l} \right)$$

Formel 7-8: Berechnung des Dichteindex in Kettfadenrichtung nach Ashenhurst und Bon [83]

Die Definition des Dichteindex wurde von Walz und Luibrand weiterentwickelt, sodass sowohl die Dichte in Kett- als auch in Schussfadenrichtung berücksichtigt wird [79].

$$X = X_l X_v = p * s_l s_v * (d_l + d_v)^2$$

Formel 7-9: Berechnung des Dichteindex nach Walz und Luibrand [79]

Die Berechnung des Dichteindex nach Walz und Luibrand erfolgt unter Beachtung eines bindungsabhängigen Dichtefaktors. Dieser kann für nicht quadratische Bindungen wie folgt berechnet werden. Hierbei wird für jede Reihe des Rapports in Schuss- und Kettfadenrichtung (i, j) die Verkreuzung durch Summierung der Fadenquerschnitte und Bildung des Produktes mit anschließender Bildung des Quotienten bezogen auf die maximal mögliche Verkreuzung R ermittelt.

$$p = \frac{\sum_1^i b_i * \sum_1^j b_j}{R_{Breite} * R_{Länge}}$$

p	Theoretischer Dichtefaktor
b _i	Besetzungsfaktor in Schussrichtung
b _j	Besetzungsfaktor in Kettrichtung
R	Maximale Besetzung in Rapportbreite und Rapportlänge

Formel 7-10: Berechnung des Gewebe-Dichtefaktors nach Walz und Luibrand [79]

Für das Beispiel einer Körperbindung ergeben sich nach Formel 7-10 in Schuss- und Kettfadenrichtung 6 Verkreuzungen (Besetzungsfaktor) bei einer maximal möglichen Verkreuzungsanzahl von 8 und damit ein theoretischer Dichtefaktor von 0,56 (vgl. Abbildung 7-1).

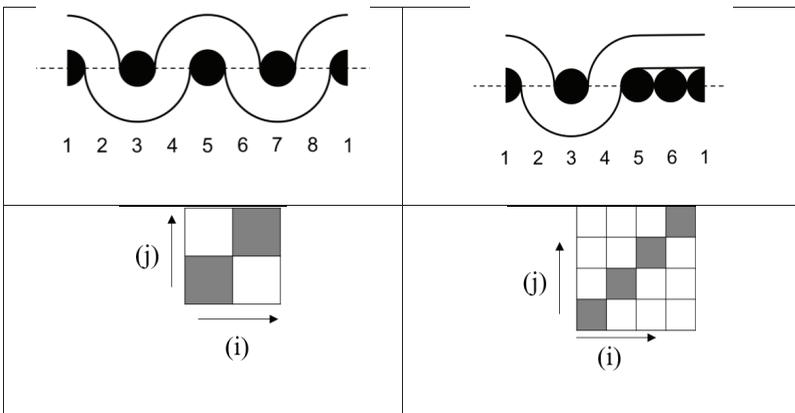


Abbildung 7-1: Beispiel zur Berechnung des theoretischen Dichtefaktors

Für die Rückführung der Art und Anzahl der Verkreuzungen zwischen Schuss- und Kettfäden auf die damit einhergehende Längeneinarbeitung zeigt sich die Berechnung der Verkreuzungsanzahl anhand des von Walz und Luibrand aufgestellten Dichtefaktors als günstig. Dieser ermöglicht es, dass die Verkreuzungen sowohl von nichtquadratischen als auch unsymmetrischen Bindungen berechnet werden können. Folgend wird für diesen Faktor die Berechnungsgrundlage zur Bildung des Zusammenhanges zwischen Verkreuzungsart einer Gewebbindung und der damit möglichen Einarbeitung unterschiedlicher Kettfadenslängen entwickelt.

7.1.2 Zusammenhang zwischen der Schussdichte abzugsfrei gewebter Strukturen und der theoretischen Verkreuzungsdichte

Zur Einbringung unterschiedlicher Gewebelängen in die abzugsfrei gewebte Struktur werden Gewebbindungen über die Gewebbreite angeordnet, die unterschiedliche Schussfadendichten aufweisen. Die nach Formel 7-9 berechnete relative Gewebedichte (Dichteindex) bleibt in den unterschiedlichen Bindungsbereichen konstant. Dadurch können diese Bereiche gleichgesetzt werden. Unter Beibehaltung des Fadenmaterials sowie der Kettfadendichte resultiert folgender Zusammenhang:

$$X_{\text{Bindung 1}} = X_{\text{Bindung 2}}$$

Formel 7-11: Gleichsetzung der Bindungsbereiche beim abzugsfreien Weben

und damit:

$$\frac{S_{i; \text{Bindung 1}}}{S_{i; \text{Bindung 2}}} = \frac{p_{\text{Bindung 2}}}{p_{\text{Bindung 1}}}$$

Formel 7-12: Zusammenhang zwischen Schussfadendichte und Dichtefaktor unterschiedlicher Bindungsbereiche beim abzugsfreien Weben

Die vorliegenden Schussfadendichten der unterschiedlichen Bindungsbereiche geben wiederum Aufschluss auf die damit einhergehenden unterschiedlichen Gewebelängen. Die Schussfadendichten stehen dabei wie folgt im reziproken Verhältnis zu den Gewebelängenbereichen:

$$\frac{\text{Schussdichte}_{\text{Bindung 1}}}{\text{Schussdichte}_{\text{Bindung 2}}} = \frac{\text{Gewelänge}_{\text{Bindung 2}}}{\text{Gewelänge}_{\text{Bindung 1}}}$$

Formel 7-13: Gleichsetzung der Schussfadendichten- und damit einhergehenden Gewebelängenverhältnissen - beim abzugsfreien Weben

Anhand dieses Zusammenhangs können Gewebebereiche mit unterschiedlichen Gewebelängen zueinander in ein Verhältnis gesetzt werden. Dies bedeutet, dass der Quotient unterschiedlicher Bogenlängen innerhalb der Gewebestruktur dem reziproken Quotienten der unterschiedlichen Schussdichten in den jeweiligen Bereichen entspricht. Der reziproke Zusammenhang beruht darauf, dass eine geringe Schussdichte zu einer großen Gewebelänge und entsprechend umgekehrt führt. Die Schussdichten unterschiedlicher Bindungsbereiche sind abhängig von den Webprozessparametern und dem Fadenmaterial selbst. Für eine Gewährleistung einer hohen Reproduzierbarkeit sind insbesondere die Kettfadenzugkräfte ausschlaggebend. Eine hohe Kettfadenzugkraft führt dazu, dass eine höhere Schussfadendichte vorliegt und damit eine geringere Gewebelänge für diese Bereiche. Somit ist es unabdingbar, dass eine definierte Kettfadenzugkraft beim Blattanschlag vorhanden ist. Diese kann mit hohem Aufwand hinsichtlich des eingesetzten Gatters und den damit verbundenen Komponenten zur Bremsung und Kompensation der Kettfäden gewährleistet werden. Zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit werden die unterschiedlichen Schussdichten der zur Erzeugung der Gewebelängenunterschiede unter Beachtung der vorliegenden Maschinenparameter berechnet. Das heißt, die Berechnung der Schussdichten erfolgt unter Beibehaltung der vorliegenden Kettfadenzugkräfte, der Maschinengeschwindigkeit, des Fadenmaterials sowie der Kettfadendichte. Diese Faktoren werden in einer auf Messtechnik basierten Daten entwickelten Gleichung zur Berechnung der Schussfadendichten berücksichtigt. Messungen und Aufstellung der Gleichung müssen bei einer erneuten Maschinenrüstung oder Änderung der Maschinenparameter wiederholt werden.

Für die Messung der Schussfadendichten wurden Gewebe mit in Tabelle 7-1 gelisteten Bindungen gefertigt und anschließend deren Schussdichten ausgewertet. Hierzu wurden Bindungen mit absteigendem theoretischen Dichtefaktor gewählt. Die Muster wurden dabei abzugsfrei mittels der in Kapitel 6 beschriebenen Vorrichtung gefertigt. Als Kett- und Schussfadenmaterial wurde Glasfilamentgarn mit einer Feinheit von 1200 tex eingesetzt. Die relative Gewebedichte beträgt 51,4 %, die mittlere Kettfadenzugkraft beläuft sich auf 25,1 cN pro Faden.

Tabelle 7-1: Auswahl von Bindungen zur Messung der tatsächlich vorliegenden Schussfadendichte

Bindung	Kettfadendichte in Fäden / cm	Schussfadendichte in Fäden / cm	Theoretischer Dichtefaktor p
Leinwand	5	5	1
Köper 1/2	5	6	0,69
Köper 1/3	5	7	0,56
Gleichgratköper 3/3	5	10	0,44
Gleichgratköper 4/4	5	13	0,39

Damit die Zuweisung der passenden Bindungskombinationsbereiche zur Erzeugung der Gewebelängenunterschiede berechnet werden kann, wird der in Kapitel 7.1.1 aufgeführte theoretische Dichtefaktor einer Bindungseinheit herangezogen. Dieser kann genutzt werden um im Vorfeld die Schussfadendichte der damit verbundenen Gewebebindung zu berechnen. Dazu werden die in Tabelle 7-1 durch Versuche ermittelten Werte in eine approximierte Gleichung überführt. Die Ergebnisse des Zusammenhangs zwischen Schussdichte und theoretischen Dichtefaktor der Bindungen sind in Abbildung 7-2 aufgeführt. Aus der Nutzung der Messpunkte als Stützpunkte zur Aufstellung eines funktionellen Zusammenhangs mittels iterativer Methode resultiert Formel 7-14. Die Parameter a, b, c, d der Formel 7-14 sind dabei nur gültig, sofern keine Material- und Maschinenperipherieänderungen erfolgen. Die empirische Ermittlung der Formel 7-14 hat den entscheidenden Vorteil, dass der funktionelle Zusammenhang zwischen vorliegenden Maschinenparametern und resultierenden Schussfadendichten direkt in der in Kapitel 8 entwickelten Prozesskette eingesetzt werden kann. Die Ermittlung der dafür notwendigen Gleichungsstützparameter, die anhand der Auswertung der Schussfadendichte von gefertigten Gewebemustern ermittelt werden, ist weit weniger aufwendig als eine definierte Einrichtung der gesamten Webmaschine, sodass immer die gleichen Produktionsbedingungen vorliegen.

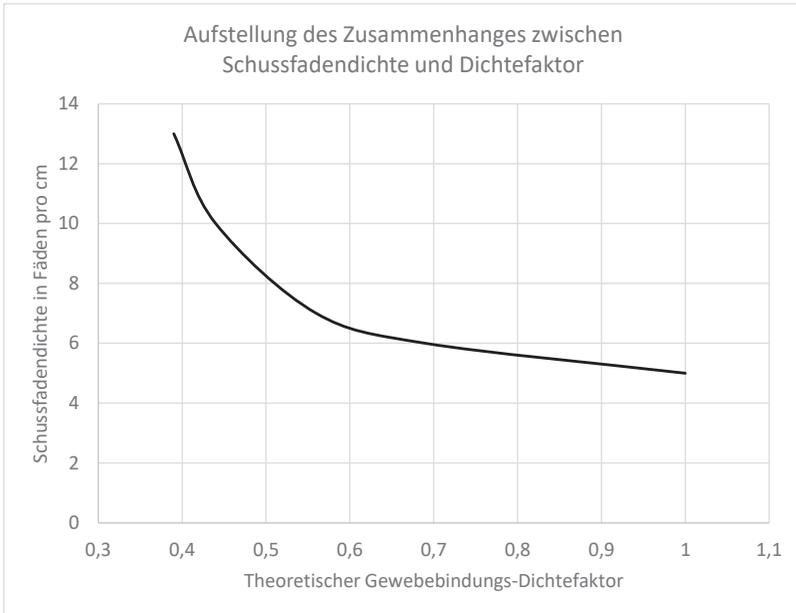


Abbildung 7-2: Experimentell ermittelter Zusammenhang zwischen Schussfadendichte und theoretischem Dichtefaktor einer Gewebebindung beim abzugsfreien Weben

$$f_{Schussdichte}(p) = a * e^{bp} + c * e^{dp}$$

a = 2.458e+04

b = -21.77

c = 10.46

d = -0.7742

Formel 7-14: Aufgestellter Zusammenhang zwischen Schussfadendichte und theoretischem Dichtefaktor einer Gewebebindung (empirisch entwickelt)

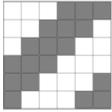
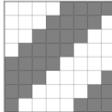
Zur Einbringung unterschiedlicher Gewebelängen in die abzugsfrei gewebte Struktur werden unterschiedliche Bindungskombinationen eingesetzt. Dazu liegt zunächst die Informationen der notwendigen Bogenlängen der unterschiedlichen Gewebelängen vor. Deren Berechnung erfolgt unter Nutzung der in Kapitel 5.4 entwickelten Methode. Das

Verhältnis der Gewebelängen wird mit Formel 7-13 berechnet. Zur Bestimmung der dafür notwendigen Gewebebindungskombination wird zunächst eine Basisbindung, auf die die Gewebelängenunterschiede angewendet werden, festgelegt. Deren Schussdichte wird anhand Formel 7-14 berechnet. Darauffolgend wird Formel 7-13 so umgestellt, dass die Schussfadendichte der Bindung, die nicht die Basisbindung ist, berechnet wird. Schlussendlich wird der theoretische Dichtefaktor der berechneten Schussfadendichte anhand von Formel 7-14 bestimmt. Dieser gibt wiederum Aufschluss über eine entsprechende Gewebebindung, die diesen Dichtefaktor aufweist. Der vollständige Berechnungsprozess zur Zuweisung der Bindungskombinationen zur Erzeugung der unterschiedlichen Gewebelängen wird in Kapitel 8 softwaregestützt und damit automatisiert entwickelt.

7.1.3 Überprüfung des funktionellen Zusammenhanges zwischen Schussdichtenverhältnissen und Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängen

Zur Überprüfung des in Kapitel 7.1.2 aufgestellten funktionellen Zusammenhanges zwischen Schussfadendichte, des damit einhergehenden theoretischen Dichtefaktors und der erzeugbaren Gewebelängenunterschiede werden Gewebemuster mit unterschiedlichen Bindungskombinationen mittels abzugsfreien Webens gefertigt und analysiert. Hierzu werden unterschiedliche Gewebelängen gewählt und die zuvor entwickelten Berechnungsschritte angewendet. Zunächst erfolgt die Festlegung einer Basisgewebebindung, die zur Erzeugung des längeren Gewebelängenabschnitts herangezogen wird. Es wird eine Leinwandbindung mit einer Schussdichte von 5 Fäden pro cm gewählt. Basierend auf dem berechneten Längenverhältnis der unterschiedlichen Gewebelängenbereiche wird die dafür benötigte Schussfadendichte der zweiten Bindung berechnet (Formel 7-13). Anhand dieser erfolgt eine entsprechende Bindungszuweisung unter Anwendung des theoretischen Dichtefaktors (Formel 7-14). Die Überprüfung der erzielten Gewebelängenbereiche erfolgt durch Entnahme der Gewebebereiche und Messung der Überlänge des „längeren“ Bereiches unter Berücksichtigung der Länge des „kürzeren“ Bereiches.

Tabelle 7-2: Vergleich ausgewählter Bindungskombinationen

Muster	1	2	3
Gewebelängenbereiche	Länge 1 =100mm Länge 2 =140mm	Länge 1 =100mm Länge 2 =180mm	Länge 1 =100mm Länge 2 =250mm
Gewebelängenverhältnis	0,72	0,55	0,4
Benötigte Schussdichte des kürzeren Bereichs	6,90	9,14	12,78
Erzeugende Bindungskombination	Leinwand – Köper 1/3	Leinwand – Gleichgratköper 3/3	Leinwand – Gleichgratköper 4/4
Schussdichtenverhältnis	0,72	0,55	0,39
Theoretischer Gewebelängenunterschied	28 %	45 %	61 %
Rapport			
Gewebebild			
Gemessene Gewebelängenunterschiede	24 %	46 %	57 %

7.2 Erzeugung von unterschiedlichen Kettfadenlängenbereichen mittels Einbringung von Teilschüssen

Die Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängen in abzugsfrei gewebten Strukturen zur Ausbildung von komplex gekrümmten schalenförmigen Geweben kann neben der Bindungsvariation durch das gezielte Einbringen von lokalen Teilschüssen erfolgen.

7.2.1 Aufstellung eines Berechnungsmodells zur Kalkulation der Gewebelängenerzeugung mittels Teilschüsse

Durch das gezielte Einbringen von Teilschüssen werden Gewebelängenunterschiede in der Struktur erzeugt, indem die Teilschüsse in den Gewebebereichen mit geforderter größerer Gewebelänge eingebunden werden und entsprechend in den benachbarten Bereichen mit kürzer Gewebelänge flottieren. Zur Berechnung der Gewebelängenunterschiede wird die Anzahl der gesamten Schüsse im Rapport ins Verhältnis zu den Teilschüssen gesetzt und mit dem theoretischen Dichtefaktor p der Gewebebindung ohne Betrachtung der Teilschüsse multipliziert.

$$p_{\text{Teilschuss}} = p_{\text{Bindung}} * \left(1 - \frac{\text{Anzahl}_{\text{Teilschuss}}}{\text{Anzahl}_{\text{Schüsse Rapport}}}\right)$$

Formel 7-15: Berechnung des geänderten theoretischen Dichtefaktors unter Nutzung von Teilschüssen

Damit wird ein neuer theoretischer Dichtefaktor für den Gewebebereich mit flottierenden Teilschüssen berechnet. Für diesen wird anhand Formel 7-14 die Schussfadendichte bestimmt. Dabei muss beachtet werden, dass diese Schussfadendichte rein theoretisch ist und zur Berechnung der Gewebelängenverhältnisse genutzt wird. Die tatsächlich resultierende Schussdichte in diesem Gewebebereich entspricht der Gewebebindung ohne Schussfadenflottierungen.

Die Berechnung des theoretischen Dichtefaktors unter Hinzunahme zusätzlicher Teilschüsse ist beispielhaft in Abbildung 7-3 aufgeführt. Dabei wird eine Bindungskombination einer Leinwandbindung mit einer Rapportlänge von 4 Schüssen mit entsprechend 2 flottierenden Schüssen gewählt. Somit ergibt sich ein theoretischer Dichtefaktor für den Bindungsbereich mit flottierten Teilschüssen in Bezug auf den Bindungsbereich der eingebundenen Schussfäden von 0,5.

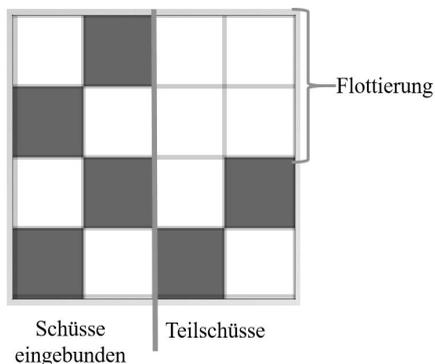
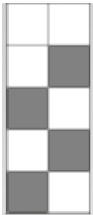
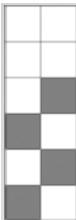
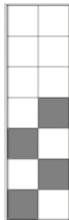
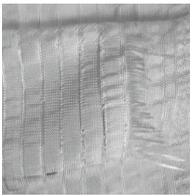
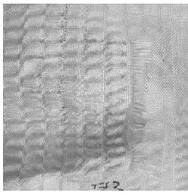
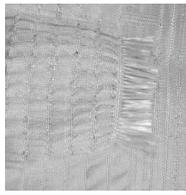


Abbildung 7-3: Bindungskombination Leinwand – Eintragung von 2 Teilschüssen

7.2.2 Überprüfung des funktionellen Zusammenhangs zur Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängenbereiche mittels Einbringung von Teilschüssen

Zur Überprüfung des ermittelten Zusammenhangs unterschiedlicher Gewebelängenbereiche mittels Einbringung gezielter Teilschussbereiche in die Gewebestruktur wurden unterschiedliche Bindungskombinationen überprüft. Dazu wurden Bindungen mit unterschiedlicher Anzahl an Teilschüssen mit einer Leinwandbindung mit einer Schussdichte von 5 Fäden pro cm kombiniert. Anschließend wurden die jeweiligen Gewebebereiche entnommen und deren Längen gemessen.

Tabelle 7-3: Vergleich nach Einbringung unterschiedlicher Teilschuss-Kombinationen

Muster	1	2	3
Gewebelängenbereiche	Länge Flottierung=100mm Länge Teilschuss =115mm	Länge Flottierung=100mm Länge Teilschuss =125mm	Länge Flottierung=100mm Länge Teilschuss =135mm
Gewebelängenverhältnis	0,87	0,8	0,74
Benötigte theoretische Schussdichte des Teilschussbereiches	5,63	6,29	6,83
Theor. Dichtefaktor des Teilschussbereichs	0,80	0,66	0,57
Bindungskombination	LW-TS1-Rapport 5	LW-TS2-Rapport 6	LW-TS3-Rapport 7
Theoretisches Schussdichtenverhältnis	0,88	0,79	0,73
Theoretischer Gewebelängenunterschied	12 %	21 %	27 %
Rapport			
Gewebe			
Gemessene Gewebelängenunterschiede	12 %	24 %	31 %

7.3 Anordnung der Bindungsbereiche in der Webebene zur Erzeugung gekrümmter schalenförmiger Gewebe

Damit der ermittelte Zusammenhang zwischen resultierender Schussfadendichte der unterschiedlichen Bindungsbereiche und der damit einhergehenden Gewebelängenunterschiede in der gewebten Struktur zu gewünschten gesamtresultierenden doppelachsig gekrümmten Schalengeweben führen kann, muss eine Übertragung der Geometrie in die Webebene erfolgen.

Grundsätzlich muss eine Unterteilung in die Korrelation zwischen der Zielgeometrie und Überführung dieser in die flache Webebene und der damit einhergehenden Anordnung der Bindungsbereiche erfolgen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Darstellung der Bindungsbereiche in einer Ebene erfolgt, jedoch nicht die Fertigung selbst. Darüber hinaus müssen für die entwickelten Varianten die in Kapitel 7.1 und 7.2 hergeleiteten webtechnischen Zusammenhänge zwischen Anordnung unterschiedlicher Bindungsbereiche und damit erzeugbare Gewebelängenunterschieden betrachtet werden. Für jede Anordnung der zu webenden Gebilde wird das in Abbildung 5-4 eingeführte Koordinatensystem angewendet. Die Unterteilung der Gebilde wird wie folgt vorgenommen:

- Einlagige doppelachsig gekrümmte schalenförmige Gewebe, die ein offenes Volumen teilumschließen
- Einlagige bahnförmige Gewebe, deren Breite die Gewebebreite bildet

7.3.1 Einlagige doppelachsig gekrümmte schalenförmige Gewebe, die ein offenes Volumen teilumschließen

Weist die zu webende schalenförmige gekrümmte Struktur ein offenes Volumen auf, wie bspw. die Geometrie eines Ellipsoiden, elliptischen Paraboloiden, zweischaligen Hyperboloiden oder eine allgemeine Freiform, die eine Erhebung aus der Ebene bildet, können die dafür notwendigen Bindungsbereiche wie folgt in der Webebene angeordnet werden:

- Variante 1: Die gekrümmte schalenförmige Struktur wird aus einem der Geometrie umgebenden festgelegten Bindungsbereich „herausgehoben“
- Variante 2: Die gekrümmte schalenförmige Struktur umfasst die gesamte Gewebebreite

a) Variante 1:

Bei dieser Variante wird die zu webende gekrümmte schalenförmige Struktur in die Webebene gesetzt und durch einen ebenen Gewebebereich umschlossen. Die Ebene weist einen Bindungsbereich mit geringerer Gewebelängenerzeugung auf, als die der zur Ausformung der Struktur notwendigen Bindungsbereiche (vgl. Abbildung 7-4). Zur Ausbildung der gekrümmten schalenförmigen Struktur werden zunächst die einzelnen Gewebelängen der Geometrie erfasst sowie die dazugehörige in der Ebene laufende Grundlänge von Erhebungspunkt zu Erhebungspunkt (vgl. Abbildung 7-5). Diese beiden Längen werden in ein Verhältnis gesetzt. Anschließend werden diesem Verhältnis, wie in Kapitel 7.1.2 beschrieben, zugehörige Schussdichten zugewiesen. Dabei wird die Schussdichte der Bindung, die die Grundlänge und somit die umgebende Grundebene bildet, konstant gehalten. Anhand der Schussdichte wird der theoretische Dichtefaktor bestimmt, der wiederum zur notwendigen Bindung für den jeweiligen Bereich führt.

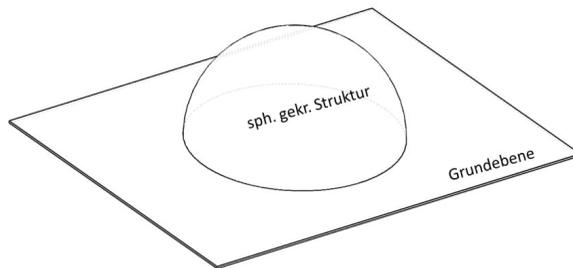


Abbildung 7-4: Betrachtung der Geometrieordnung in der Webebene mittels Grundebene

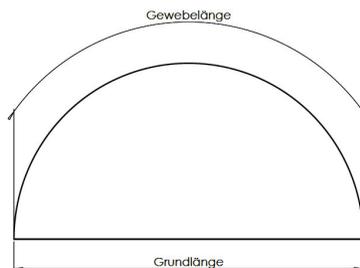


Abbildung 7-5: Messung der Längen zur Bindungszuweisung für Variante 1

b) Variante 2:

Alternativ zu Variante 1 kann die zu webende gekrümmte schalenförmige Struktur die gesamte Webbreite einnehmen. Somit bilden die linke und rechte Erhebung der Geometrie in Schussrichtung die Geweberänder. Zur Ausformung der geforderten Erhebung der Struktur aus der Webebene werden entlang der Gewebebreite unterschiedliche Gewebelängen in die Struktur eingearbeitet. Zur Anordnung der geforderten Bindungsbereiche zur Erzeugung dieser Längenunterschiede in der Struktur werden zunächst die virtuellen Gewebelängen ermittelt. Anschließend wird der größte Gewebelängenbereich herausgelesen und diesem eine Bindung zugewiesen, die eine möglichst hohe Längenerzeugung bietet (bspw. Leinwandbindung). Zur Erzeugung der weiteren Gewebelängenbereiche, werden die Gewebelängen in ein Längenverhältnis zur längsten Gewebelänge gesetzt (vgl. Abbildung 7-6). Diesem Verhältnis wird wie ebenfalls in Kapitel 7.1.2 beschrieben ein Schussdichtenverhältnis zugewiesen. Dabei werden zuvor unterschiedliche Bindungen mit unterschiedlichen Verkreuzungsdichten gewählt und deren Schussdichten anhand der experimentell aufgestellten Formel 7-14 berechnet. Anhand des theoretischen Dichtefaktors kann schlussendlich die längenerzeugende Bindung den entsprechenden Bereichen zugewiesen werden. Dabei werden immer entsprechend der Rapportgröße der Bindung Kettfäden zusammengefasst.

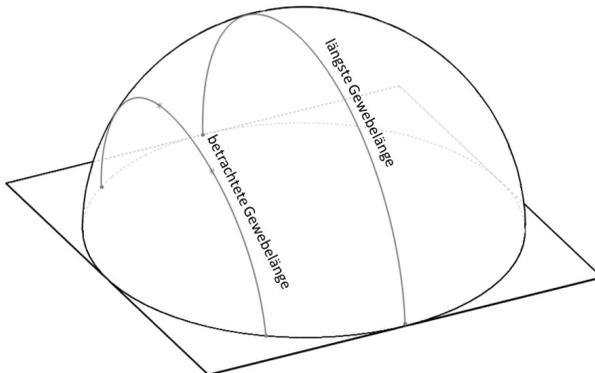


Abbildung 7-6: Betrachtung der Geometrieordnung in der Webebene bezogen auf die komplette Gewebebreite

7.3.2 Einlagige bahnförmige Gewebe, deren Breite die Gewebebreite bildet

Neben der Ausformung zu doppelachsig gekrümmten schalenförmigen Geweben kann die Technologie des abzugsfreien Webens so angewendet werden, dass bahnförmige Gewebe direkt im Webprozess gefertigt werden können. Dazu werden Bindungen mit unterschiedlicher Schussfadendichten entlang der Gewebebreite so angeordnet, dass diese je nach Richtungsverlauf und Radius zunehmende bzw. abnehmende Gewebelängen erzeugen (vgl. Abbildung 7-7). Zur Erzeugung der geforderten bogenförmigen Bahn, wird die Struktur entsprechend mit virtuellen Gewebelängen belegt und deren Bahnlängen berechnet. Damit die geforderten unterschiedlichen Gewebelängen erzeugt werden, wird ebenfalls das Längenverhältnis zwischen der virtuellen Gewebelänge mit der längsten Bogenlänge und den verkürzenden Gewebelängenbereichen entlang der Gewebebreite gebildet. Durch Zuweisung der Längenverhältnisse zu entsprechenden Schussdichtenverhältnissen und den damit einhergehenden theoretischen Dichtefaktoren der Bindungen werden die geforderten Bindungsbereiche in der Webebene zugewiesen.

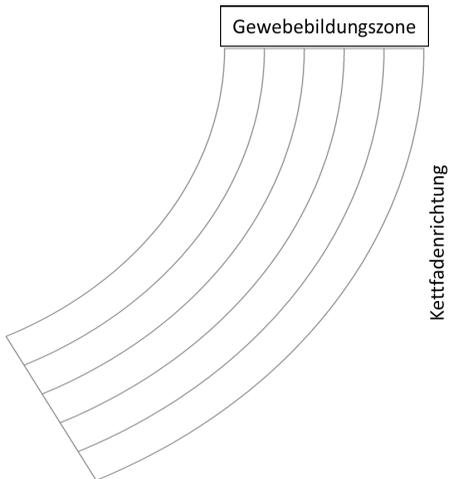


Abbildung 7-7: Prinzipskizze für bahnförmige abzugsfrei gewebte Strukturen

8 Entwicklung einer CAE gestützten Prozesskette zur Umsetzung gekrümmter schalenförmiger abzugsfrei gefertigter Gewebe

In diesem Kapitel erfolgt die Entwicklung einer CAE gestützten Prozesskette zur Überführung der Zielgeometrie in die erzeugende Bindungseinheit. Dazu werden die entwickelten Lösungen der Kapitel 5, 6 und 7 angewendet.

8.1 Entwicklung eines Algorithmus zur Erfassung der Zielgeometrie und Zuweisung der Bindungsbereiche

Für die Umsetzung gekrümmter schalenförmiger Gewebe, gefertigt mittels der Technologie des abzugsfreien Webens, wird in diesem Kapitel der dazugehörige entwickelte Algorithmus beschrieben. Der hierzu entwickelte Programmablaufplan ist in Abbildung 8-1 dargestellt. Das globale Ziel der Programmroutine ist die Überführung der unterschiedlichen Kettfadenslängen in die dafür notwendigen Gewebefindungen mit den jeweiligen Schussdichten und deren Anordnung in der Webebene. Der Algorithmus nutzt dabei folgende Softwarelösungen:

- CAD-Softwareumgebung zur Erstellung der Zielgeometrie via STL-Dateiformat
- Matlab zur Durchführung der Berechnungen
- EAT DesginScope victor zur Erstellung der Musterdatei für die eingesetzte Jacquardfachbildungseinrichtung der Webmaschine

Zunächst erfolgt die Erstellung des CAD-Modells und die Ableitung der Oberfläche als STL-Datei. In dem auf Matlab basierenden entwickelten Programm wird darauf folgend die Zielgeometrie des zu fertigenden Bauteils importiert. Dabei ist zu beachten, dass die im entsprechenden CAD-Programm erstellte STL-Datei lediglich die Oberfläche der Geometrie aufweist. Andernfalls können die darauf folgenden Berechnungen nicht durchgeführt werden. Zur Berechnung der virtuellen Gewebelängenbereiche werden die in Kapitel 5.4 beschriebenen Prozesse angewendet. Dazu wird zunächst eine Auflösung der Gitterweite der virtuellen Gewebebereiche gewählt. Anhand dieser Auflösungen werden die

in der STL-Datei befindlichen Punkte detektiert, die die entsprechenden Linien der virtuellen Bereiche bilden. Zur Optimierung der im ersten Schritt rechtwinklig verlaufenden virtuellen Linien wird der in Kapitel 5.4.2 b) erläuterte Optimierungsalgorithmus angewendet. Damit werden die Gitterweiten auf der Zielgeometrie homogenisiert und ein natürlicherer Verlauf der Gewebebereiche und der darin enthaltenen Kett- und Schussfäden nachgebildet. Die Berechnung der Bogenlängen der virtuellen Gewebelängenbereiche erfolgt mittels Aufsummierung der Ergebnisse der Abstandsberechnung zweier Punkte im Raum, also der jeweiligen benachbarten Punkte innerhalb des Berechnungsnetzes. Je nach in Kapitel 7.3 aufgeführter Variante zur Anordnung der Zielgeometrie in die Webebene, werden die Längenverhältnisse berechnet.

Die Zuweisung der Bindungen zu den jeweiligen Längenbereichen erfolgt mittels einer Bindungsdatenbank. Dazu werden Bindungsmuster in das Programm eingegeben, die eine Rasterung des theoretischen Dichtefaktors von mind. 0,15 zueinander aufweisen. Die Eingabe einer Bindung erfolgt dabei als Matrix, wobei 0 einen Ketttiefgang und 1 einen Kethochgang darstellt. Die Spalten der Matrix bilden die Kettfäden, die Zeilen entsprechend die Schussfäden. Für die Bestimmung der Schussdichten der implementierten Bindungseinheiten wird Formel 7-14 angewendet. Die darin aufgeführten Parameter werden im Vorfeld anhand der Messung der Schussdichte ausgewählter Bindungen ermittelt. Hierzu ist die Berechnung des theoretischen Dichtefaktors der Bindung mittels Formel 7-10 notwendig.

Für die Zuordnung der Bindungen zu den entsprechenden Längenverhältnissen wird zunächst der längste Gewebebereich, die Bindung mit der höchsten Längeneinarbeitung zugewiesen. Anschließend werden die Längenverhältnisse der Bereiche berechnet. Durch Anwendung der Formel 7-13 werden die Schussdichten, die zur Erzeugung des Längenverhältnisse notwendig sind, berechnet. Diese können nun den zuvor berechneten Schussdichten der eingegebenen Bindungen zugewiesen werden. Darauf folgend werden die Bindungen der unterschiedlichen Gewebelängenbereiche in einer Bilddatei angeordnet. Unter Beachtung der vorliegenden Kettfadendichte der Webmaschine erfolgt eine pixelgetreue Umrechnung der erstellten Bilddatei, sodass im späteren Webverlauf ein Pixel einen Kett- bzw. Schussfaden repräsentiert. Die finale Bilddatei wird aus dem Programm exportiert und in die EAT-Softwareumgebung importiert. Unter Nutzung dieser Software werden die Bindungseinheiten den zugehörigen Farbbereichen zugewiesen und die Steu-

erungsdatei für die Jacquardmaschine erstellt. Darüber hinaus erfolgt die Programmierung der Fangleisten. Die exportierte Steuerungsdatei wird schlussendlich in die eingesetzte Webmaschine eingelesen und das gewünschte Muster mittels abzugsfreien Webens gefertigt.

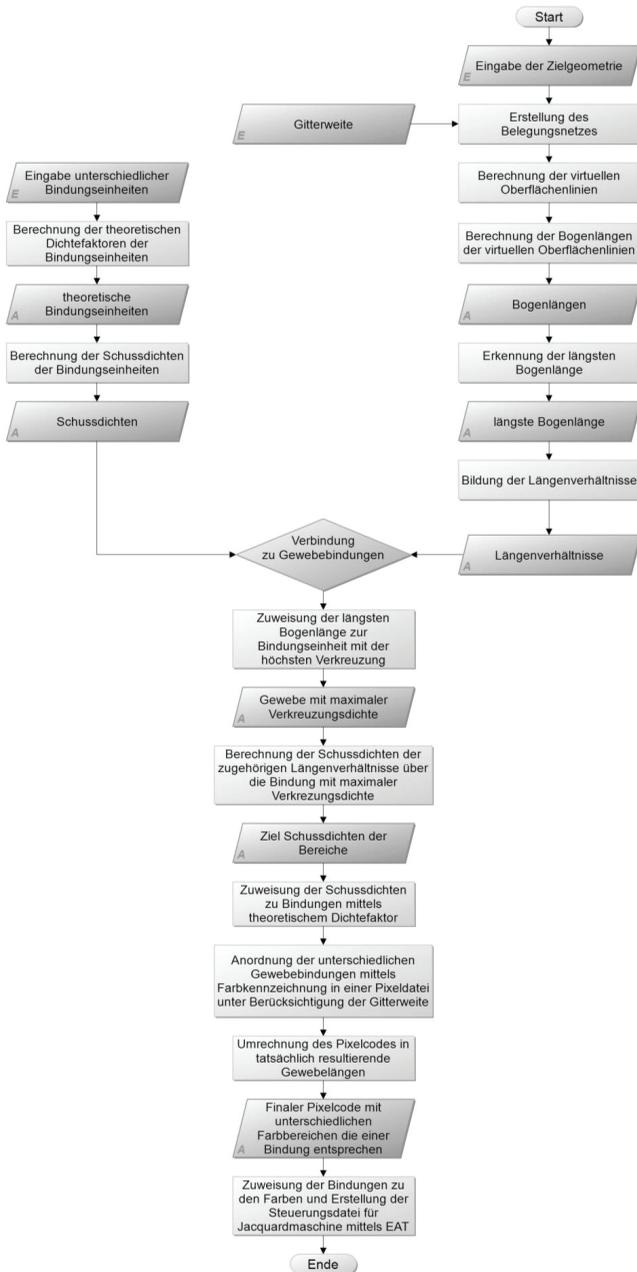


Abbildung 8-1: Programmablaufplan zur Erfassung der Zielgeometrie und Zuweisung der Bindungen

8.2 Webtechnische Umsetzung und Charakterisierung gekrümmter schalenförmiger Gewebe

Zur Präsentation der in dieser Arbeit vorgestellten Entwicklung des abzugsfreien Webens zur Herstellung gekrümmter schalenförmiger gewebter Strukturen sowie zur Validierung der gesamten durchgeführten Entwicklungsarbeiten werden im folgenden Kapitel anhand ausgewählter Geometrien die Prozessschritte zur Erzeugung dieser dargestellt. Dazu wird entsprechend der in Kapitel 7.3 aufgezeigten Anordnungsvarianten eine Formschulter, eine Halbkugel sowie ein bahnförmiger gewebter Trichter präsentiert. Diese Strukturen wurden aufgrund der zunehmenden Komplexität sowie Übertragbarkeit auf beliebige Bauteile gewählt. So kommen diese Geometrien in der Luft- und Raumfahrt (Rumpfschalen mit doppelachsiger Krümmung, Radome, Triebwerkverkleidung), im Maschinen- und Anlagenbau (Abschlusselemente Druckbehälter, Schutzhelme, Maschinengehäuse), im Kraftfahrzeugbereich (Sitzschalen, Karosserieteile, Bodengruppe) sowie im Sportgerätebau (Bootsrumpf, Bobverkleidung, Sitzschalen) vor.

8.2.1 Fertigung einer abzugsfrei gewebten Formschulter mittels unterschiedlicher Bindungen

Unter Anwendung der entwickelten Tools zur Fertigung gekrümmter schalenförmiger Gewebe wird im Folgenden die Fertigung einer Formschulter präsentiert. Diese wird unter Anwendung der in Kapitel 7.3.1 a) entwickelten Anordnung der Struktur in der Webebene durchgeführt und damit aufgezeigt, dass durch Kombination von Bindungen mit unterschiedlicher Einarbeitung eine schalenförmige Struktur aus der Webebene generiert werden kann. Die Geometrie sieht eine Erhöhung der Struktur aus der Ebene vor (vgl. Abbildung 8-2).

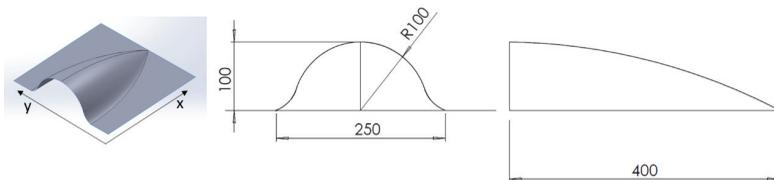


Abbildung 8-2: CAD-Erstellung der Formschulter mit entsprechender Dimensionierung

Die einzelnen Berechnungsschritte werden im Folgenden erläutert:

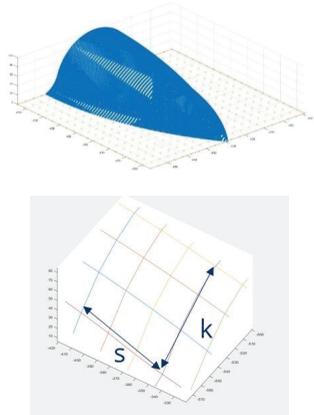
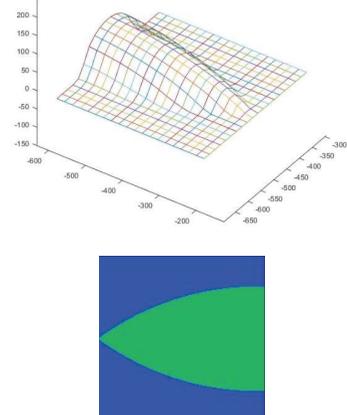
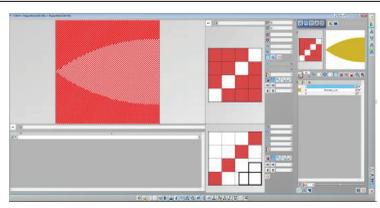
Zuerst werden das CAD-Modell sowie ausgewählte Bindungen mit unterschiedlichen Verkreuzungsdichten in das Programm importiert. Diese Bindungen werden den unterschiedlichen Gewebelängenbereichen zugewiesen, sodass daraus ein Bereich in der Webebene und ein Bereich zur Generierung der Mehrlängen resultiert. Die Berechnung erfolgt dabei so, dass für jeden Gewebebereich die betrachtete Gewebelänge ins Verhältnis zu der dazugehörigen Grundlänge (in der Ebene) gesetzt wird und diesem Verhältnis die Schussdichten der Bindungen zugewiesen werden. Den Bindungsbereichen werden Farben zugordnet und in einer Bilddatei gespeichert. Dabei entspricht die Pixelgröße die der einzutragenden Schüsse, wodurch die Länge des Gewebemusters erzeugt wird. Die Berechnung soll am Beispiel der längsten Bogenlänge gezeigt werden:

Die Bogenlänge beträgt 350 mm, die Grundlänge 250 mm. Zuerst wird Formel 7-13 umgestellt. Zur Erzeugung der Mehrlängen für die Gewebebereiche zur Ausprägung der schalenförmigen Struktur wird als Basisbindung eine Leinwandbindung festgelegt. Diese weist unter den gegebenen Maschinenkonfigurationen eine Schussdichte von 5,0 Fäden pro cm auf.

$$Schussdichte_{gesucht} = Schussdichte_{Leinwand} \frac{Länge_{Bogen}}{Länge_{Grund}} = 6,8 \frac{Fäden}{cm}$$

Anschließend erfolgt die Zuweisung der Bindung. Dazu werden die Schussdichten der zuvor eingegebenen Bindungen basierend auf deren theoretischen Dichtefaktoren mittels Formel 7-10 berechnet. Dieser Schussfadendichte wird die dazugehörige Bindung zugewiesen. In diesem Fall liefert die Köperbindung 1/3 mit einem theoretischen Dichtefaktor von 0,56 und damit mit einer Schussdichte von 6,8 Fäden/cm die passende Bindung. Schlussendlich wird das Farbbild generiert. Für eine pixelgetreue Länge wird die Bogenlänge exakt mit 170 Pixel, die den Schüsseinträgen entsprechend in der Bilddatei gespeichert. Das Farbbild wird in EAT DesignScope victor implementiert. Die Software wird genutzt, um den Farbbereichen die Bindungen zuzuweisen und die Steuerungsdatei für die Jacquardmaschine zu erstellen. Der Fertigungsprozess und die final gewebte Formschulter sind in Tabelle 8-1 dargestellt.

Tabelle 8-1: Prozessschritte zur Erstellung der Bindung zur Erzeugung einer Formschulter mittels Bindungswechsels

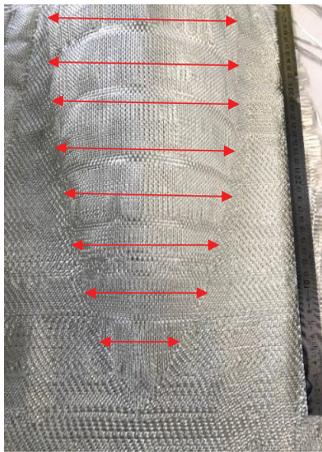
<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung CAD Geometrie und Import • Eingabe der Rastergröße als Berechnungsgrundlage • Berechnung der Kreuzungspunkte der virtuellen Fäden • Interpolation der Abstände zwischen benachbarten Punkten 	
<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Bogenlängen • Berechnung der Grundlängen • Ausgabe der Verhältnisse • Berechnung der Schussdichten • Zuordnung der Schussdichten • Umrechnung auf längengetreue Pixelanzahl der Bereiche • Ausgabe der Bilddatei 	
<ul style="list-style-type: none"> • Zuweisung der Bindungen in der Steuerungssoftware • Erstellung der Steuerdatei 	

- Fertigung des Musters
- Entnahme und Ausformung



Zur Überprüfung der schalenförmigen Formschulter erfolgt die Überprüfung der erzeugten unterschiedlichen Kettfadenslängen innerhalb der Struktur. Dazu werden innerhalb eines definierten Abstandes (5 cm) die Bogenlängen der Kettfäden und die dazugehörigen Grundlängen gemessen (vgl. Tabelle 8-2). Die maximale Abweichung zwischen den gemessenen Längenverhältnissen und den längenerzeugenden Schussdichtenverhältnissen beträgt 5,1 %.

Tabelle 8-2: Messung der Bogenlängen der Formschulter (Bindungswechsel) und Abgleich mit Schussdichtenverhältnis

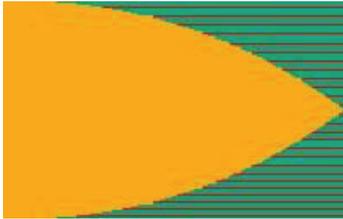
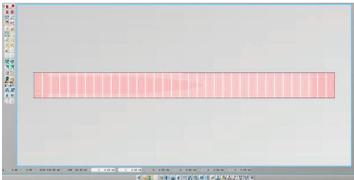
	Bogenlängen in mm	Grundlängen in mm	Längenverhältnis	Schussdichtenverhältnis
	350	250	0,74	$SD_{\text{Leinwand}} /$
	331	248	0,75	$SD_{\text{Köper1-3}}$
	315	240	0,76	$5,0 / 6,8 = 0,74$
	290	222	0,76	
	254	197	0,77	
	208	163	0,78	
	150	115	0,77	
	82	62	0,75	

8.2.2 Fertigung einer abzugsfrei gewebten Formschulter mittels Teilschüsse

Die Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängen in die zu webende Struktur kann wie in Kapitel 7.2 beschrieben ebenfalls durch Einbringung von Teilschüssen erfolgen. Dies wird im Folgenden anhand der webtechnischen Fertigung der Formschulter mittels Teilschüsse aufgezeigt. Die geometrischen Maße entsprechen der in Abbildung 8-2 gezeigten Angaben. Des Weiteren sind zur Berechnung der Gewebelängenverhältnisse ebenfalls die in Tabelle 8-1 aufgezeigten Schritte zur Erfassung der Geometrie, Belegung dieser mit virtuellen Linien sowie Berechnung der Bogenlängen identisch. Das berechnete Längenverhältnis wird dabei durch eine Schussfadendichte von 6,8 Fäden pro cm erzielt. Durch Umstellung der Formel 7-15 wird das Verhältnis $\text{Anzahl}_{\text{Teilschuss}}$ und $\text{Anzahl}_{\text{Schüsse}}$ Rapport berechnet und iterativ die passende Bindung unter Berücksichtigung der Beibehaltung

der Leinwandbindung zugewiesen. Die geforderte Schussdichte wird mit einer Leinwandbindung in Kombination mit drei Teilschüssen bei einer Rapportlänge von sieben erzeugt. Der theoretische Dichtefaktor ist damit 0,57.

Tabelle 8-3: Prozessschritte zur Erstellung der Bindung zur Erzeugung einer Formschulter mittels Einbringung von Teilschüssen

<ul style="list-style-type: none"> • Zuweisung der Teilschussbereiche • Bindung Leinwand (gelb) • Roter Bereich Teilschuss mit Leinwand 	
<ul style="list-style-type: none"> • Bindungszuweisung • Erstellung Steuerungsdatei 	
<ul style="list-style-type: none"> • Fertigung des Musters • Entnahme und Ausformung 	

Entsprechend der Messungen der Formschulter, erzeugt mittels Bindungswechsel, wird ebenfalls die Formschulter, die mittels Einbringung von Teilschüssen erzeugt wurde, überprüft. Dazu werden die Bogenlängen der resultierenden Gewebelängenbereiche sowie die in die Ebene projizierten Grundlängen gemessen. Die maximale Abweichung zwischen den gemessenen Längenverhältnissen und dem längenerzeugenden Schussdichtenverhältnis beträgt 3,9 % (vgl. Tabelle 8-4).

Tabelle 8-4: Messung der Bogenlängen der Formschulter (Teilschüsse) und Abgleich mit Schussdichtenverhältnis

	Bogenlängen in mm	Grundlängen in mm	Längenverhältnis	Schussdichtenverhältnis
	350	250	0,71	$SD_{\text{Leinwand}} /$
	333	245	0,74	$SD_{\text{TS 3; Rapport 7}}$
	318	238	0,75	$5,0 / 6,8 = 0,74$
	295	223	0,76	
	258	197	0,76	
	210	162	0,77	
	152	116	0,76	
	85	63	0,74	

8.2.3 Fertigung einer abzugsfrei gewebten Halbkugel

Im folgenden Abschnitt wird die Herstellung einer Halbkugel unter Nutzung der entwickelten Methoden aufgezeigt. Die Halbkugel wird mit der in Kapitel 7.3.1 b) erläuterten Anordnung gefertigt, sodass die Geometrie die Gewebebreite einnimmt. Gefertigt wird die Halbkugel mit Glasmultifilamentgarn (Feinheit 1200 tex).

Zu Beginn der Prozesskette erfolgt die Erstellung des CAD-Modells (vgl. Abbildung 8-3). Die gewählte Halbkugel weist einen Grunddurchmesser von 377,2 mm und eine Höhe von 188,6 mm auf. Aus der CAD-Softwareumgebung wird die Oberfläche der Geometrie via STL-Dateiformat exportiert, in den in Kapitel 8.1 aufgeführten Algorithmus importiert und ausgeführt. Zunächst wird die Gitterweite zur Berechnung der virtuellen Gewebelängen gewählt und daraus folgend die Kreuzungspunkte der virtuellen Linien, die auf der Oberfläche liegen, bestimmt. Die Kreuzungspunkte werden anschließend

unter Anwendung des in Kapitel 5.4.2 b) aufgezeigten Optimierungsalgorithmus so angepasst, dass die Gitterweiten homogenisiert werden und damit angepasste realistische virtuelle Gewebeverläufe und die damit einhergehenden Kett- und Schussfäden vorliegen. Die Bogenlängen der virtuellen Linien werden mittels Aufsummierung der Punktabstände (Gleichung 4.10) berechnet und die längste Bogenlänge detektiert.

Vor dem Webprozess werden Gewebebindungsmuster entworfen und in den Algorithmus als Matrix importiert. Unter Anwendung der Formel 7-10 werden die theoretischen Dichtefaktoren der Bindungen berechnet. Diese werden wiederum genutzt, um mittels Formel 7-14 die tatsächliche, maschinen- und materialabhängige Schussfadendichte der einzelnen Bindungen zu bestimmen. Zur Erzeugung der unterschiedlichen Gewebelängen mittels unterschiedlicher Einarbeitung in die gewebte Struktur wird Formel 7-13 so umgestellt, dass für jede Bogenlänge die entsprechende Schussdichte berechnet wird. Somit wird zuerst die längste Bogenlänge der Bindung mit der maximalsten Einarbeitung zugewiesen und schließlich deren Schussdichte sowie Bogenlänge für alle Bereiche konstant belassen. Den berechneten Schussdichten werden die eingangs eingegebenen Bindungen zugewiesen. Unter Nutzung dieser Information wird basierend auf der gewählten Gitterweite eine Matrix erstellt, deren Nummerierung den Bindungsbereichen entspricht. Da im Webprozess eine Zeile der Matrix einem Schussfadeneintrag entspricht, wird die tatsächliche notwendige Schussanzahl zur Erzeugung der korrekten Bogenlänge in Form eines Matrixerweiterungsmultiplikators angewendet. Dieser wird dabei auf die längste Bogenlänge bezogen. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass zum Weben der Halbkugel mit einer maximalen Bogenlänge von 584 mm 292 Schusseinträge bei einer Schussdichte der Bindung zur Erzeugung der größten Gewebelänge von 5,0 Schuss pro cm notwendig sind. Die maximierte Matrix wird schlussendlich als Bilddatei, worin jeder Farbbereich der entsprechend berechneten Bindung entspricht, exportiert.

Die gesamte Berechnung ist in Abbildung 8-4 veranschaulicht. Für das markierte Beispiel wird die Gewebelängenvariation durch das Verhältnis der unterschiedlichen Einarbeitungen einer Körperbindung $1/3$ und einer Leinwandbindung erzeugt. Der entsprechende Bindungsbereich in der generierten Bilddatei wird braun markiert. Die Bindungszuordnung aller Gewebebereiche ist in Tabelle 8-5 gelistet.

Die Bilddatei wird anschließend in die Softwareumgebung EAT DesignScope victor importiert. Diese ermöglicht die Zuweisung der einzelnen Bindungseinheiten zu den jeweiligen Farbbereichen sowie die Erstellung der Steuerungsdatei für die Jacquardfachbildungseinrichtung der Webmaschine.

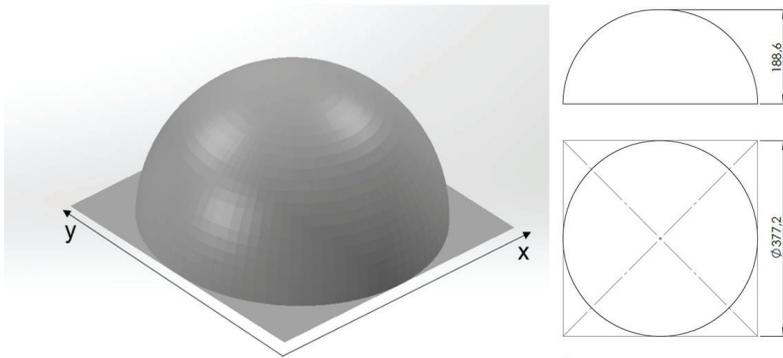


Abbildung 8-3: CAD-Erstellung der Halbkugel mit entsprechender Dimensionierung

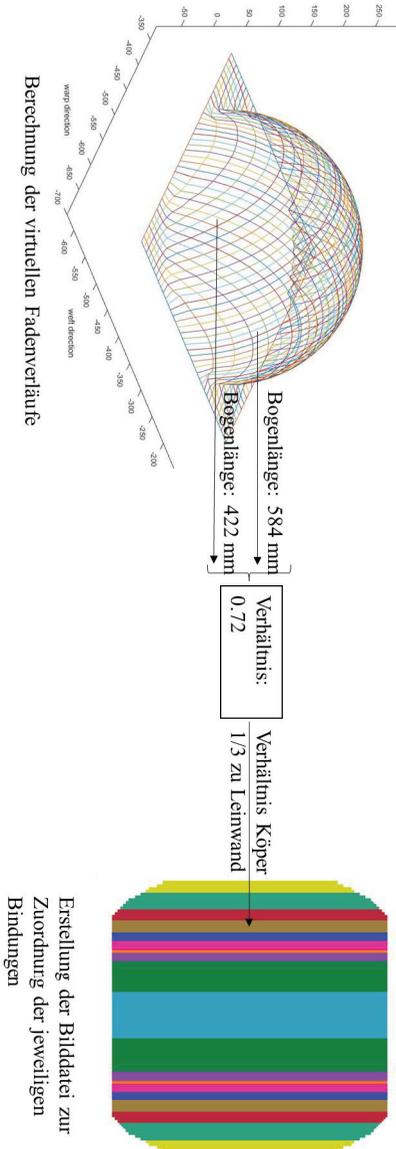
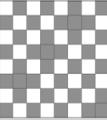
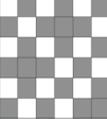
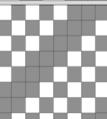
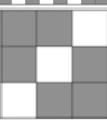
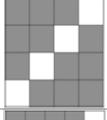
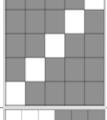
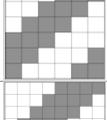
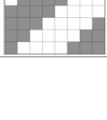


Abbildung 8-4: Berechnung der Bogenlängen und Zuweisung der Bindungsbereiche für eine Halbkugel

Tabelle 8-5: Zuordnung der Bindungsbereiche zur Berechnung der Bogenlängen und Erzeugung einer Halbkugel

Bezeichnung (TGL 50060/01 [92])	Bindungsmuster	Theor. Dichtefaktor	Schussfadendichte	Verhältnis der Schussfadendichten	Farbbe-reich
2,2(+1-1)X2		1,00	5,0	1,00	türkis
8,8(+1-1)x2 U (2,3;4,5;6,7;8,1)		0,88	5,3	0,91	grün
6,6(+1-1)X2 U (2,3;4,5;6,1)		0,84	5,4	0388	lila
6,6(-1 +2 -1 +1)X2		0,81	5,6	0,86	orange
8,8(+3-1+1-1+1-1)X2		0,77	5,8	0,83	pink
3,3(-1+2)X2		0,70	6,1	0,79	blau
4,4(-1+3)X2		0,56	6,8	0,70	braun
5,5(-1+4)X2		0,49	7,7	0,62	rot
6,6(+3-3)X2		0,44	8,9	0,54	hellgrün
8,8(+4-4)X2		0,39	12,7	0,37	gelb

Die Fertigung der Halbkugel erfolgt unter Nutzung des in Kapitel 6 entwickelten Schussfadenrückhaltesystems. Die gewebte Struktur wird aus der Webebene entnommen und ausgeformt. Das Ergebnis ist in Abbildung 8-5 dargestellt.

Die Analyse der Geometrie der gewebten Halbkugel erfolgt durch Messung der Gewebelängen der unterschiedlichen Bindungsbereiche. Diese werden in das Verhältnis zur längsten Gewebelänge gesetzt und mit den zuvor theoretisch berechneten Bogenlängen verglichen. Darüber hinaus erfolgt eine Gegenüberstellung der Gewebelängenverhältnisse mit dem jeweiligen längenerzeugenden Schussdichtenverhältnis des Bindungsbereichs. Die Auswertung zeigt eine maximale Abweichung der gemessenen Gewebelängen zu den berechneten Bogenlängen von 1,85 %. Die maximale Abweichung zwischen den Gewebelängenverhältnissen und den zugehörigen Schussdichtenverhältnis weist 4,8 % auf. Die gesamten Werte aller Bindungsbereiche sind in Tabelle 8-6 gelistet.



Abbildung 8-5: Abzugsfrei gewebte Halbkugel

Tabelle 8-6: Abgleich der berechneten Bogenlängen mit gefertigter Gewebestruktur der Halbkugel

Farbbereich Gewebebindung	Verhältnis der Schussdichten	Berechnete Bogenlängen in mm	Verhältnis der berechneten Bogenlängen	Gemessene Bogenlängen in mm	Verhältnis der gemessenen Bogenlängen	Abweichung der Bogenlängen in %	Abweichung der Verhältnisse Bogenlängen und Schussdichten in %
türkis	1,00	584,00	1,00	584,00	1,00	0,00	0,00
grün	0,94	532,00	0,91	540,00	0,92	1,50	2,48
lila	0,93	516,00	0,88	520,00	0,89	0,78	3,88
orange	0,89	504,00	0,86	505,00	0,86	0,20	3,68
pink	0,86	488,00	0,84	490,00	0,84	0,41	2,56
blau	0,82	460,00	0,79	462,00	0,79	0,43	3,62
braun	0,74	409,00	0,70	408,00	0,70	0,24	4,80
rot	0,65	362,00	0,62	360,00	0,62	0,55	4,52
hellgrün	0,56	313,00	0,54	315,00	0,54	0,64	3,88
gelb	0,39	216,00	0,37	220,00	0,38	1,85	3,48

8.2.4 Fertigung eines bahnförmigen gewebten Trichters

Die Technologie des abzugsfreien Webens kann neben der Herstellung von schalenförmigen doppelachsig gekrümmten Flächen zur Erzeugung spiral- und bahnförmiger Gewebe angewendet werden. Die Strukturen können bspw. Einsatz innerhalb der Turbinen- und Triebwerktechnik finden. Hierzu wird die in Kapitel 7.3.2 erläuterte Anordnung des Gewebes in der Webmaschine angewendet. Spiral- und bahnförmige Gewebe können direkt im Webprozess erzeugt werden, indem Gewebelängen mit unterschiedlichen Gewebelängenbereichen entlang der Gewebebreite angeordnet werden, sodass diese kontinuierlich zu- bzw. abnehmen. Die gewählte Geometrie des Trichters weist einen Grunddurchmesser von 850 mm und einen oberen Durchmesser von 140 mm bei einer Höhe von 580 mm auf (vgl. Abbildung 8-6).

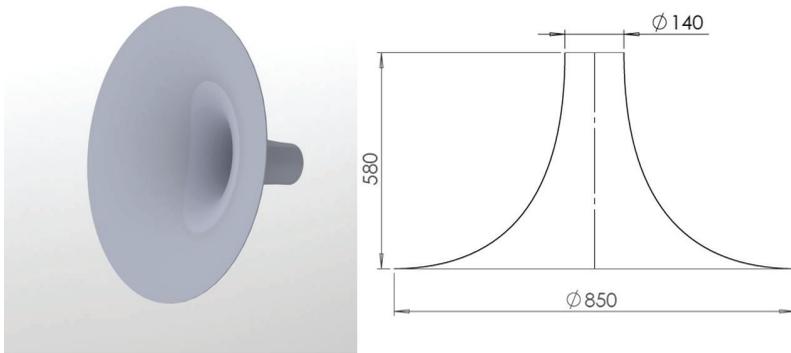


Abbildung 8-6: Erstellung der CAD-Datei des Trichters und Angabe dessen Abmaße

Zur Berechnung der Gewebelängenbereiche zur Erzeugung der Geometrie des Trichters wird dessen Oberfläche in entsprechende kreisförmige Bereiche unterteilt. Die Einteilung erfolgt in 14 Bereiche, woraus ein Abstand zwischen den Linien von 50 mm resultiert (vgl. Abbildung 8-7). Die Längen dieser Bereiche werden berechnet und das Gewebelängenverhältnis für jeden Bereich gebildet. Dazu wird als Basisbindung eine Panama-Bindung gewählt, die eine Schussfadendichte von 6,9 Fäden pro cm aufweist und zur Erzeugung des längsten Gewebebereiches dient. Unter Anwendung der Formel 7-13 werden die Gewebelängenverhältnisse gebildet und entsprechend die erzeugende Schussfadendichte berechnet. Für die Schussfadendichten wird der theoretische Dichtefaktor mittels

Formel 7-14 bestimmt und dessen Werten passende Gewebebindungen zugeordnet. Die Berechnung und die daraus resultierenden Bindungen sind in Tabelle 8-7 aufgeführt.

Zur webtechnischen Fertigung des Bahngewebes für die Trichtergeometrie wird das Bindungsmuster mittels EAT DesignScope victor erstellt. Dazu wird zunächst das Bindungsbelegungsbild erzeugt. Dieses weist entsprechend der Bindungen 14 Bereiche auf. Dabei entspricht die Breite eines Bereichs, die der Einteilung durch die zuvor gewählten virtuellen Linien. Somit liegt eine Breite von 5 cm und damit 25 Kettfäden pro Bereich vor. Dem Farbbild werden anschließend die Bindungseinheiten zugewiesen und die Steuerungsdatei für die Jacquardmaschine erstellt. Die abzugsfreie Fertigung des bahnförmigen Gewebes erfolgt mittels der in Kapitel 6 aufgezeigten Zusatzeinrichtungen (vgl. Abbildung 8-9). Nach der Entnahme des Gewebes aus der Webmaschine wird die bahnförmige Struktur zusammengelegt, wodurch die Trichtergeometrie entsteht (vgl. Abbildung 8-10).

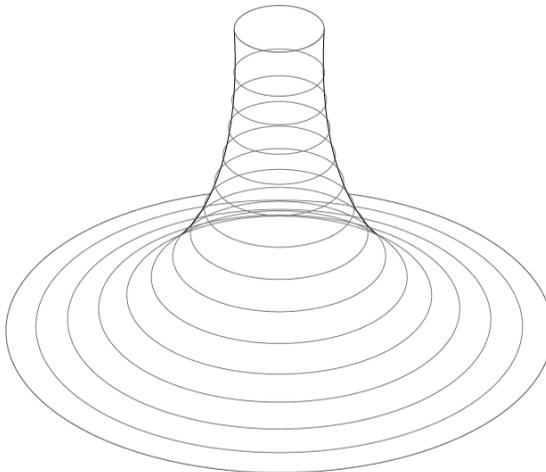


Abbildung 8-7: Einteilung der Gewebelängenbereiche des Trichters

Tabelle 8-7: Berechnung der Gewebelängenverhältnisse und Bindungszuweisung zum Weben eines Trichters

Bereich	Gewebelänge in mm	Verhältnis der Gewebelängen	Erzeugende Schussdichte	Schussdichtenverhältnis	Bindungsbezeichnung (DIN ISO 9354 [93])
1	2670,00	1,00	6,90	1,00	10-02 02-02-00
2	2360,00	0,88	8,18	0,84	10-02 04-04-00
3	2054,00	0,77	9,25	0,75	10-03 02-04 04-00
4	1764,00	0,66	10,39	0,66	10-03 03-04 04-00
5	1600,00	0,60	11,57	0,60	10-04 03-04 04-00
6	1250,00	0,47	16,66	0,41	10-04 04-08 08-00
7	1040,00	0,39	19,36	0,36	10-05 04-08 08-00
8	867,00	0,32	20,04	0,34	10-05 05-08 08-00
9	750,00	0,28	21,55	0,32	10-06 05-08 08-00
10	630,00	0,24	33,48	0,21	10-06 06-12 12-00
11	550,00	0,21	35,50	0,19	10-07 06-12 12-00
12	496,00	0,19	37,36	0,18	10-07 07-12 12-00
13	465,00	0,17	39,07	0,18	10-08 07-12 12-00
14	445,00	0,17	40,60	0,17	10-08 08-12 12-00

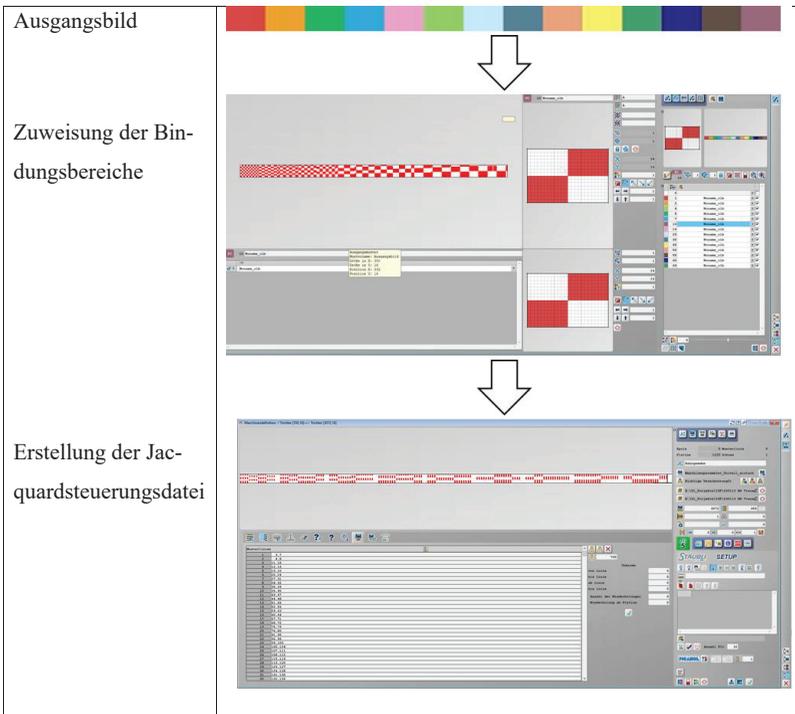


Abbildung 8-8: Erstellung der Bindungs- und Steuerungsdatei für das bahnförmige Gewebe



Abbildung 8-9: Fertigung des spiralförmigen Gewebes zur Ausbildung einer Trichtergeometrie



Abbildung 8-10: Abzugsfrei gewebte Trichtergeometrie

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten konstruktiv-technologischen Entwicklungen innerhalb der Webtechnologie bieten die Möglichkeit, völlig neuartige räumliche Gewebekonstrukte und damit Gewebegeometrien, insbesondere für gekrümmte schalenförmige Strukturen auf Standardwebmaschinen, zu erzeugen. Durch die Verwendung von industriellen Standardwebmaschinen können die Technologien zur Fertigung angepasster Gewebeformen für vielfältige Anwendungen mit entsprechend geforderten konkreten Anforderungen eingesetzt werden. Insbesondere für die Bereitstellung von Geweben für den Einsatz in Faserkunststoffbauteilen bieten die neuartigen Webverfahren Gewebestrukturen, die aufgrund der bauteilangepassten endkonturnahen Geometrie deutlich weniger Zuschnitt- und Drapierprozesse benötigen. Die in dieser Arbeit entwickelten Lösungen zur Struktursystematik und Nutzung der erarbeiteten Berechnungstools zur Überführung der geforderten Geometrie in die dafür notwendigen Gewebebindungen und Maschinensteuerungen ermöglichen sowohl einachsige als auch doppelachsig gekrümmte endkonturnahe schalenförmige Gewebe.

Die Entwicklung des breitenvariablen Webblattes ermöglicht erstmals die direkte Erzeugung der bauteilgerechten Gewebekontur im Webprozess unter Anwendung industrieller Breitwebmaschinen. Die damit hergestellten Gewebe zeigen deutlich den Vorteil des endkonturnahen Webens, in dem keine weiteren Zuschnittprozesse notwendig sind und keine Unterbrechungen der lastaufnehmenden Verstärkungsfäden vorliegen.

Die direkte integrale Fertigung von doppelachsig gekrümmten schalenförmigen Geweben wird in dieser Arbeit mit der entwickelten innovativen Technologie des abzugsfreien Webens aufgezeigt. Diese neuartige Entwicklung zeichnet sich dadurch aus, dass unter Nutzung eines in dieser Arbeit entwickelten Schussfadenrückhaltesystems für industrielle Greiferwebmaschinen der ursprüngliche Gewebeabzug entfernt werden kann. Dies ermöglicht, dass unter Einsatz einer Jacquardfachbildungseinrichtung, allein durch die Wahl der Gewebebindungsanordnung, unterschiedliche Gewebelängen in der zu webenden Struktur erzeugt werden können. Die entwickelte konstruktive Lösung wurde in einer industriellen Greiferwebmaschine installiert und damit wurden abzugsfrei gekrümmte schalenförmige Strukturen gewebt. Mit der in dieser Arbeit umgesetzten Strukturentwicklung und den damit einhergehenden Berechnungsmethoden wurde der Zusammenhang zwischen geforderter dreidimensionaler Ausgangsgeometrie und der dafür notwendige

Überführung in die Bindungskombination und -anordnung dargestellt. Die auf den entwickelten Algorithmen basierende Prozesskette kann zur effizienten und vollautomatisierten Fertigung von gekrümmten schalenförmigen Geweben genutzt werden. Die damit gefertigten Gewebe weisen unterschiedliche Gewebelängen innerhalb der Struktur auf und nehmen damit die geforderte schalenförmige dreidimensionale Geometrie an. Die hier entwickelte modifizierte Webtechnologie und die damit verbundene Herleitung der neuartigen Wirkzusammenhänge sind einzigartig und eröffnen durch die Nutzung etablierter Fertigungsprinzipien wirtschaftliche Vorteile in der Halbzeugherstellung, insbesondere für die Faserverbundteilfertigung. Der Technologienachweis wurde anhand ausgewählter Gewebemuster, deren resultierende Geometrien ausgewertet wurden, durchgeführt. Dabei konnte die grundlegende Theorie des Zusammenhanges zwischen Schussfahndichten der unterschiedlichen Bindungen und erzeugbaren Gewebelängen nachgewiesen werden. Das große Potential der in dieser Arbeit entwickelten Modifikationen des Webprozesses ist jedoch bei Weitem nicht ausgeschöpft. So kann die Technologie des abzugsfreien Webens zur Fertigung von Mehrlagengeweben herangezogen werden. Die Technologie ermöglicht die Fertigung von unterschiedlichen Gewebelängen innerhalb übereinanderliegender Lagen, wodurch völlig neuartige Gewebestrukturen und -geometrien hergestellt werden können. Darüber hinaus ist eine Kombination der entwickelten Konstruktionen und somit die Nutzung des abzugsfreien Webens mit dem entwickelten breitenvariablen Webblatt aussichtsreich. Die damit erzeugbaren Potentiale für die Webtechnologie bieten weitere neuartige geometriegebende Möglichkeiten.

Durch die entwickelten Fertigungskonzepte liegen durchgehende Fadenverläufe in den gewebten Strukturen vor. Um das damit bedingte Leichtbaupotential vollständig auszuschöpfen und die Ergebnisse in Serienanwendungen zu überführen, insbesondere für Faserverbundbauteile, sind weitere Entwicklungsarbeiten zur Berechnung der lastaufnehmenden Fadenverläufe notwendig. Hierzu sind Simulations- und Berechnungsmethoden zu entwickeln, die einen variablen Winkel der Verstärkungsfäden innerhalb der Gewebe für eine kraftgerechte Bauteilauslegung berücksichtigen. Die Erweiterung der bereits entwickelten Prozesskette um diesen Schritt liefert ein sehr hohes Potential, um komplex gekrümmte schalenförmige Gewebe anwendungsorientiert aufzubauen und in die industrielle Praxis zu überführen. So können damit ressourceneffiziente, maßgeschneiderte, lastangepasste Gewebe bereitgestellt werden. Der Einsatz empfiehlt sich hierbei im Mobilitätssektor - wie bspw. bei Heckklappenverstärkungen [28] -, in der Luft- und Raum-

fahrt - wie bspw. für Radom oder Druckkalotten [94 – 96] -, sowie im Sport- und Freizeitbereich - wie bspw. Bootsrümpfe [97, 98] -. Neben dem Einsatz in Faserverbundanwendungen können die entwickelten Fertigungskonzepte ebenfalls für Anwendungen in der Architektur, wie bspw. bei textilen Membranen für Dächer [99] sowie in der Medizintechnik für Implantate oder Prothesen [100] genutzt werden. Darüber hinaus können durch die Erzeugung unterschiedlicher Gewebelängen innerhalb von Mehrlagengeweben gezielt Falten in die Struktur eingebracht werden. Der Einsatz dieser Gewebe als Preform für FKV-Crashstrukturen ermöglicht es aufgrund der Faltengeometrie hohe Energieeinträge zu absorbieren. Schlussendlich können die in dieser Arbeit entwickelten neuartigen Technologien zur Fertigung innovativer Gewebepreformen zur Herstellung von FKV-Bauteilen eingesetzt werden. Dies wird anhand der Fertigung eines Fanblades für den potentiellen Einsatz in Flugzeugturbinen aufgezeigt, dessen einlagige eingesetzte Verstärkungsgewebe mittels der in dieser Arbeit entwickelten Technologie ressourceneffizient gefertigt wurden.



Abbildung 9-1: Fertiggestelltes Fanblade, verstärkt mit in dieser Arbeit entwickelten endkonturnahen breitenvariablen Geweben

Literaturverzeichnis

- [1] Norm DIN EN 60 000 Januar 1969. Textilien Grundbegriffe.
- [2] CHERIF, C.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. - ISBN 9783642179914.
- [3] CHEN, X.: *Advances in 3D textiles*. Band number 167, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, 2015. - ISBN 9781782422143.
- [4] FEHRM, B.: Bjorn's corner; Turbofan engine challenges; Part 2 - Leeham News and Analysis. <https://leehamnews.com/2016/11/04/bjorns-corner-turbofan-engine-challenges-part-2/>, (02.01.2024).
- [5] PADAKI, N. V.; ALAGIRUSAMY, R.; DEOPURA, B. L.; FANGUEIRO, R.: Influence of Preform Interlacement on the Low Velocity Impact Behavior of Multilayer Textile Composites. *Journal of Industrial Textiles* 40(2010) 2, S. 171–185.
- [6] SHIMEK, M. E.; FAHRENTHOLD, E. P.: Impact Dynamics Simulation for Multilayer Fabrics of Various Weaves. *AIAA Journal* 53(2015) 7, S. 1793–1811.
- [7] MOUNTASIER, A.: *Entwicklung einer flexiblen Webtechnologie zur Fertigung integral gewebter 3D-Halbzeuge für Faserkunststoffbauteile komplexer Geometrie*: Technische Universität Dresden. Dissertation, 2016.
- [8] NEITZEL, M.; MITSCHANG, P.; BREUER, U.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. 2. Auflage, München: Hanser, 2014. - ISBN 9783446436978.
- [9] KNIPPERS, J.; WAIMER, F.; OPPE, M.: *Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen*. Stahlbau Kalender 2015: Wiley, (2015). - ISBN 9783433031049, S. 463–516.
- [10] SCHEGNER, P.; FAZELI, M.; HOFFMANN, G.; CHERIF, C.: Technology development for direct weaving of complex 3D nodal structures, Manchester (GB), (2018).
- [11] FAZELI, M.; HÜBNER, M.; LEHMANN, T.; GEBHARDT, U.; HOFFMANN, G.; CHERIF, C.: Development of spatially branched woven node structures on the conventional weaving loom. *Textile Research Journal* 88(2017) 13, S. 1453–1465.
- [12] HÜBNER, M.; FAZELI, M.; GEREKE, T.; CHERIF, C.: Geometrical design and forming analysis of three-dimensional woven node structures. *Textile Research Journal* 2(2016), S. 213–224.
- [13] Gerster Techtex » Spiralgewebe. <https://gerster-techtex.com/composites/spiralgewebe/>, (02.01.2024).
- [14] TORUN, A. R.: *Advanced manufacturing technology for 3D profiled woven preforms*, 2011. - ISBN 9783867802413.
- [15] Bally Ribbon Mills: 3-D Woven Joints - Bally Ribbon Mills. <https://www.ballyribbon.com/woven-ribbon>, (02.01.2024).
- [16] WENDLAND, B.; VOM BAUR, P.; GRIES, T.: 3D-Omega-Verstärkungsprofil für die Großserienproduktion auf konventionellen Bandwebmaschinen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 2(2013), S. 76–80.
- [17] Frank Uwe Helbig: *Gestaltungsmerkmale und mechanische Eigenschaften druckelastischer Abstandsgewirke*. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz. Dissertation, 2006.
- [18] HAHN, L.; ZIEROLD, K.; GOLLA, A.; FRIESE, D.; RITTNER, S.: 3D Textiles Based on Warp Knitted Fabrics: A Review. *Materials* 16(2023) 10, S. 3680.

- [19] SANKARAN, V.: Development of a Novel Multiaxial Warp Knitting Based Technology for Production of 3D Near Net Shape Preforms: Entwicklung Einer Innovativen ... Dresden: Technische Universität Dresden. Dissertation, 2017.
- [20] Maschinenfabrik HARRY LUCAS GmbH & KG, Co.: [HARRY LUCAS - modulare Textilmaschinen für wachsende Anforderungen]. <https://www.lucaselha.de/deutsch/produkte/warppknitting/re.html>, (02.01.2024).
- [21] HENNING, F.: Handbuch Leichtbau. München: Hanser Verlag, 2011. - ISBN 978-3-446-42267-4.
- [22] ENERCON Global GmbH: Komponenten. <https://www.enercon.de/technologie/komponenten/>, (02.01.2024).
- [23] BMW Group PressClub: BMW i3 Produktion BMW Werk Leipzig: CFK-Karosserie. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo-detail/P90127372/bmw-i3-produktion-bmw-werk-leipzig-cfk-karosserie-09-13>, (02.01.2024).
- [24] BOLLENGIER, Q.; WIECZOREK, F.; HELLMANN, S.; TRÜMPER, W.; CHERIF, C.: One-step manufacturing of innovative flat-knitted 3D net-shape preforms for composite applications. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 254(2017), S. 42007.
- [25] GUDE, M.; HUFENBACH, W.; KOCH, I.: Schwingfestigkeits- und Schädigungsverhalten von mehrlagengestrick-verstärkten Kunststoffverbunden unter überlagerter Zug/Druck-Schubbeanspruchung. Verbundwerkstoffe: Wiley, (2009). - ISBN 9783527326150, S. 427–432.
- [26] GÜLTNER, M.; GROBE, A.: 3Dknit – Neuartige Bezugstoffe aus strukturierten, voluminösen 3D-Gestricken. <https://www.stfi.de/aktuelles/meldungen/meldungen-detailseite/3dknit-neuartige-bezugstoffe-aus-strukturierten-voluminoesen-3d-gestricken>, (02.01.2024).
- [27] Christoph Gregor Peiner: Herstellung und Verarbeitung von 3D-Rundgestrieken. Aachen: RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation, 29.08.2022.
- [28] FRIEDRICH, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. - ISBN 978-3-8348-1467-8.
- [29] Metzner C.; Gessler A.; Kaufmann J.: Hocheffiziente Fertigungstechnik zur Herstellung von komplex geformten Profilen auf Basis von UD-Flechten. Chemnitz, Airbus Group Innovations, TU-Chemnitz SLK 20./21. Januar 2016.
- [30] MONNOT, P.; LÉVESQUE, J.; LABERGE LEBEL, L.: Automated braiding of a complex aircraft fuselage frame using a non-circular braiding model. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 102(2017), S. 48–63.
- [31] thoenes@ Dichtungstechnik GmbH: Dichtungslösungen. <https://thoenes-solutions.com>, (02.01.2024).
- [32] Markus Milwich: Tapelegen: moderne Herstellungstechnik für hochwertige Faserverbund-Bauteile - DITF. <https://www.ditf.de/index.php/de/aktuelles/presse-meldungen/detail/Tapelegen.html>, (02.01.2024).
- [33] WAIBEL, N.: DLR - Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie - Weltweit erster Demonstrator für Großbauteil Druckkalotte aus carbonfaserverstärktem Thermoplast beim ZLP Augsburg gefügt. https://www.dlr.de/bt/desktopdefault.aspx/tabid-11743/11208_read-51560/year-all/, (02.01.2024).

- [34] SPICKENHEUER, A.; SCHEFFLER, C.; BITTRICH, L.; HAASE, R.; WEISE, D.; GARRAY, D.; HEINRICH, G.: Tailored Fiber Placement in Thermoplastic Composites. *Technologies for Lightweight Structures (TLS)* 1(2018) 2, S. 114–127.
- [35] NOSRAT NEZAMI, F.; GEREKE, T.; CHERIF, C.: Analyses of interaction mechanisms during forming of multilayer carbon woven fabrics for composite applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 84(2016), S. 406–416.
- [36] WENDLAND, B.; RAMASWAMY, S.; SCHÄFER, J.; GRIES, T.: Three-dimensional composite manufacturing processes. *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*: Elsevier, (2015). - ISBN 9781782423072, S. 131–146.
- [37] M Fazeli, D Ahrendt, S Krzywinski, G Hoffmann, C Cherif: Development of a CAE-supported technology for the flexible manufacturing of complex woven 3D net-shape preforms. *Technical Textiles*(2018), S.
- [38] Rundwebmaschinen: Starlinger. <https://www.starlinger.com/de/verpackung/rundwebmaschinen/>, (02.01.2024).
- [39] C. Lipper: Method of making hats and the product thereof. Schutzrecht US1,735,467. 12.11.1929.
- [40] ROTHE, H.; WIEDEMANN, G.: Über die Herstellung und den Einsatz räumlicher Gewebe für die Kunststoffverstärkung. *Deutsche Textiltechnik*(1963), S. 95–101.
- [41] E. Koppelman: Woven fabrics and method of weaving. Schutzrecht US2,998,030. 29.08.1961.
- [42] BUESGEN, A.; FINSTERBUSCH, K.; Birghan A.: Simulation of composite properties reinforced by 3D shaped woven fabrics. In: 12th European conference on composite materials (ECCM) 2006.
- [43] BUESGEN, A.: Shell three-dimensional woven textiles. *Advances in 3D textiles*. Band number 167 Auflage, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, (2015). - ISBN 9781782422143, S. 79–98.
- [44] BUESGEN, A.; EHRMANN, A.: Engineering design and manufacturing of 3D shell fabrics for industrial and automotive applications. 6th World conference on 3D fabrics and their applications, Raileigh, NC.(2015), S. 26–28.
- [45] ZIEROLD, K.; STEINBERG, J.; HAHN, L.; RITTNER, S.; FRIESE, D.; CHERIF, C.: Development of a method and technology for the production of 3D knitted reinforcement grids. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 30(2022) 3, S. 18–26.
- [46] Vignaesh Sankaran: Entwicklung einer innovativen Technologie auf Basis der Multiaxialkettenwirktechnik zur Herstellung von lastangepassten und endkonturnahen 3D-Preforms. Dresden: Technische Universität Dresden. Dissertation, 27.09.2016.
- [47] SANKARAN, V.; RITTNER, S.; HAHN, L.; CHERIF, C.: Development of multiaxial warp knitting technology for production of three-dimensional near net shape shell preforms. *Textile Research Journal* 87(2017) 10, S. 1226–1241.
- [48] Christian Franz: Entwicklung von Abstandsgewirken aus Hochleistungsfaserstoffen für gekrümmte Leichtbaupaneele. Dresden: Technische Universität Dresden. Dissertation, 14.10.2020.
- [49] Agramante; Ferruccio: Flachstrickmaschine mit zwei einander gegenüberstehenden Fadenführern zur Herstellung einer in Laengsrichtung undehnbaren Ware. Schutzrecht DE700291. 17.12.1940.

- [50] Essig K.: Verfahren zum Einstricken eines Effektmaterials. Schutzrecht DE3117362A1. 02.05.1981.
- [51] TRÜMPER, W.; DIESTEL, O.; CHERIF, C.: Stricktechnische Lösungen für die Herstellung endkonturnaher Preformen/Solutions for flat knitting of near net shape textile preforms. *Melliand Textilberichte* 88(2007) 7/8, S. 537–538.
- [52] TRÜMPER, W.; LIN, H.; CALLIN, T.; BOLLENGIER, Q.; CHERIF, C.; KRZYWINSKI, S.: Recent developments in multi-layer flat knitting technology for waste free production of complex shaped 3D-reinforcing structures for composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 141(2016), S. 12015.
- [53] Shima Seiki: Prototype weft knitting machine capable of multi-axial yarn insertion combines stretch characteristics of knitted fabrics with the stability of woven textiles. <https://www.knittingindustry.com/shima-seiki-to-show-multi-axial-knitting-machine-in-frankfurt/>, (02.01.2024).
- [54] ABOUNAIM, M.; DIESTEL, O.; HOFFMANN, G.; CHERIF, C.: Thermoplastic composites from curvilinear 3D multi-layer spacer fabrics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29(2010) 24, S. 3554–3565.
- [55] EMONTS, C.; GRIGAT, N.; MERKORD, F.; VOLLBRECHT, B.; IDRISSE, A.; SACKMANN, J.; GRIES, T.: Innovation in 3D Braiding Technology and Its Applications. *Textiles* 1(2021) 2, S. 185–205.
- [56] SCHNEIDER, M.: Konstruktion von dreidimensional geflochtenen Verstärkungstextilien für Faserverbundwerkstoffe. Aachen: RWTH Aachen, Fakultät Maschinenwesen. Dissertation, 2000.
- [57] GONDRAN, M.; ABDIN, Y.; GENDREAU, Y.; KHAMENEIFAR, F.; LABERGE LEBEL, L.: Automated braiding of non-axisymmetric structures using an iterative inverse solution with angle control. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 143(2021), S. 106288.
- [58] BOGDANOVICH, A. E.: An overview of three-dimensional braiding technologies. *Advances in Braiding Technology*: Elsevier, (2016). - ISBN 9780081009260, S. 3–78.
- [59] Holger Ahlborn: Flechten am IFB. <https://www.ifb.uni-stuttgart.de/en/research/ManufacturingTechnology/braiding/>, (02.01.2024).
- [60] BOISSE, P.: *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*: Elsevier Science, 2015. - ISBN 9781782423201.
- [61] Gereke T, Döbrich O, Hübner M, Cherif C: Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 46(2013) 1, S. 1–10.
- [62] WITTEN, E.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. 4 Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. - ISBN 1306704227.
- [63] FLEMMING, M.; ZIEGMANN, G.; ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. - ISBN 9783642648403.
- [64] HÜBNER, M.; NEZAMI, F.; DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; CHERIF, C.: Drapiersimulation textiler Verstärkungsstrukturen auf Meso- und Makroebene am Beispiel komplexer Automobilgeometrien. In: *Proceedings. compoForm 2015*. München 12. Mai 2015.
- [65] CHEN, X.: *Advances in 3D textiles*. Band number 167, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, 2015. - ISBN 1782422145.

- [66] EHRENSTEIN, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. 2 Auflage, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006. - ISBN 9783446227163.
- [67] HÄRTEL, F.; NEZAMI, F.; SCHUR, N.: Innovative Preforming-Routen für die Herstellung von CFK-Bauteilen. *Lightweight Design* 8(2015) 2, S. 54–61.
- [68] GRIES, T.; VEIT, D.; WULFHORST, B.: *Textile Fertigungsverfahren*. 3 Auflage, München: Hanser, 2019. - ISBN 9783446456846.
- [69] WEIMER, C.: Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde. Band Bd. 31, Kaiserslautern: IVW, 2002. - ISBN 3-934930-27-1.
- [70] RÖDEL, H.: *Konfektion von Fertigprodukten. Vliesstoffe*, 2 Auflage, Weinheim: Wiley-VCH, (2012). - ISBN 9783527645862, S. 449–478.
- [71] Lectra GmbH: Software für Stoffzuschnitt - Lectra - 3D 2D Konversion / für Werft. <https://www.nauticexpo.de/prod/lectra/product-27757-230252.html>, (02.01.2024).
- [72] Konfektionierung von Composite Materialien | Zuschnitt von Geweben, Gelegen sowie Folien und Vliesen - HALARIT Composites GmbH. <https://www.haco-tech.com/dienstleistungen/konfektionierungzuschnitt>, (02.01.2024).
- [73] BMW Group PressClub: BMW Werk Landshut: Innovations- und Produktionszentrum CFK - Mitarbeiter konfektionieren Preforms, aus denen ein BMW i8 Seitenrahmen entsteht. (06/2014). <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90152298/bmw-werk-landshut-innovations-und-produktionszentrum-cfk-mitarbeiter-konfektionieren-preforms-aus>, (02.01.2024).
- [74] IMPORT, M.: Von der Nische in die Großserie. <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/von-der-nische-in-die-grossserie/>, (02.01.2024).
- [75] Weißgerber GmbH & Co KG: Carbon-Gewebe, Köper. www.carbon-verbtrieb.com, (02.01.2024).
- [76] KRZYWINSKI, S.; LIN, H.; BRANKE, D.; KÄSTNER, M.: Drapieren, textiltechnische 3D-Formgebung oder Konfektion – Ergebnisse theoretischer und experimenteller Untersuchungen am Beispiel eines druckbelasteten FVK-Bauteiles als Entscheidungshilfe zur faserverbundgerechten Kon-struktion. In: 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung. Chemnitz Mai 2014.
- [77] KOCH, F.: *Konstruktiv-technologische Entwicklung und Auslegung eines elastischen Webblattes zur Manipulation der Kettfadendichte von Geweben*. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und Hochleistungswerkstofftechnik. Diplomarbeit, 04.08.2020.
- [78] Smalley Europe: CMS10-L2. <https://www.smalley.com/de/wave-spring/cms10-l2>, (07.10.2023).
- [79] WALZ, F.; LUIBRAND, J.: Die Gewebedichte. *Textilpraxis* 2(1947), S. 330–335, 366-37.
- [80] KIENBAUM, M.: *Bindungstechnik der Gewebe*. Band 1, 3 Auflage, Berlin: Schiele & Schön, 1999. - ISBN 3794906306.
- [81] FISCHER, G.: *Analytische geometrie*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2001. - ISBN 9783322964175.
- [82] FLADT, K.; BAUR, A.: *Analytische Geometrie spezieller Flächen und Raumkurven*. Band Bd. 136, Braunschweig: Vieweg, 1975. - ISBN 352808278x.
- [83] KUBE, L.: *Konstruktiv-technologische Auslegung eines Schussfadenrückhalte-systems zur webtechnischen Fertigung großformatiger sphärisch gekrümmter Flächen für den Leichtbau*. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für

- Textilmaschinen und Hochleistungswerkstofftechnik. Forschungsarbeit, 02.04.2019.
- [84] VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1993.
- [85] NEURURER, O.: Bindungs- und Gewebeerwicklung zur Fertigung von großformatigen, sphärisch gekrümmten Flächenstrukturen. Reutlingen: Hochschule Reutlingen, Fakultät Textil & Design. Masterarbeit, 15.04.2019.
- [86] topocrom. <https://www.topocrom.com/>, (02.01.2024).
- [87] PEIRCE, F. T.: 5—THE GEOMETRY OF CLOTH STRUCTURE. *Journal of the Textile Institute Transactions* 28(1937) 3, S. 45-96.
- [88] ILÉS, I.; ALPÁR, B.: A szövés elmelete es korszerű technologiaja. TKI Közleményei. Budapest, (1954).
- [89] BRIERLEY, S.: Cloth Setting Reconsidered. *Textile Manufacturer* 57(1952), S. 349.
- [90] ALPÁR, B.: Pamutzövögepek egyseges technologiai beallitasa. *Textilipari könyvtar*. Budapest, 20(1964).
- [91] HAJÓS, I.: Szövetek szerkesztése. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, (1961).
- [92] Norm TGL 50060 Juni 1983. Gewebebindungen Einteilung Darstellung Übersicht.
- [93] Norm DIN ISO 9354 Oktober 1993. Gewebe Bindungskurzzeichen und Beispiele.
- [94] *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*: Elsevier, 2016. - ISBN 9780081009390.
- [95] BOYER, R. R.; COTTON, J. D.; MOHAGHEGH, M.; SCHAFFRIK, R. E.: Materials considerations for aerospace applications. *MRS Bulletin* 40(2015) 12, S. 1055–1066.
- [96] GHORI, S. W.; SIAKENG, R.; RASHEED, M.; SABA, N.; JAWAID, M.: The role of advanced polymer materials in aerospace. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*: Elsevier, (2018). - ISBN 9780081021316, S. 19–34.
- [97] Institut für Forschung und Entwicklung von Sportgeräten (FES) – ein Institut des Vereins IAT/FES e.V. <https://fes-sport.de/>, (02.01.2024).
- [98] Die Werft | BAVARIA YACHTS. <https://www.bavariayachts.com/de-de/were-bavaria/die-werft/>, (02.01.2024).
- [99] SL Rasch GmbH - DAI Verband Deutscher Architekten- und Ingenieurvereine e.V. <https://www.dai.org/verband/partner/foerderpartner/89-sl-rasch-gmbh>, (02.01.2024).
- [100] VAN LANGENHOVE, L.: *Smart textiles for medicine and healthcare*. Boca Raton, Florida, Cambridge, England, s.l.: CRC Press, 2007. - ISBN 9781845692933.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Definition textiler Flächen- und Körpergebilde nach DIN 60000	4
Tabelle 2-2: Klassifizierung dreidimensionaler textiler Strukturen	6
Tabelle 2-3: Übersicht zu Herstellung und Verfahren dreidimensionaler textiler Strukturen	7
Tabelle 3-1: Beispiele komplex gekrümmter Strukturen	32
Tabelle 4-1: Berechnung der Schussfadendichten für die jeweiligen Schusseintragsbereiche	47
Tabelle 4-2: Prozessübersicht der einzelnen Schritte zur Erzeugung des Bindungsmusters sowie Steuerung der Schrittmotoren	62
Tabelle 7-1: Auswahl von Bindungen zur Messung der tatsächlich vorliegenden Schussfadendichte.....	99
Tabelle 7-2: Vergleich ausgewählter Bindungskombinationen	102
Tabelle 7-3: Vergleich nach Einbringung unterschiedlicher Teilschuss- Kombinationen	105
Tabelle 8-1: Prozessschritte zur Erstellung der Bindung zur Erzeugung einer Formschulter mittels Bindungswechsels	116
Tabelle 8-2: Messung der Bogenlängen der Formschulter (Bindungswechsel) und Abgleich mit Schussdichtenverhältnis.....	118
Tabelle 8-3: Prozessschritte zur Erstellung der Bindung zur Erzeugung einer Formschulter mittels Einbringung von Teilschüssen.....	119
Tabelle 8-4: Messung der Bogenlängen der Formschulter (Teilschüsse) und Abgleich mit Schussdichtenverhältnis.....	120
Tabelle 8-5: Zuordnung der Bindungsbereiche zur Berechnung der Bogenlängen und Erzeugung einer Halbkugel	124
Tabelle 8-6: Abgleich der berechneten Bogenlängen mit gefertigter Gewebestruktur der Halbkugel.....	126
Tabelle 8-7: Berechnung der Gewebelängenverhältnisse und Bindungszuweisung zum Weben eines Trichters	129

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Grundaufbau klassischer Webmaschinen	16
Abbildung 2-2: Fertigungsprinzip rotationsymmetrischer Kontur mittels Spulenschützenweben	19
Abbildung 2-3: Fertigungsprinzip übereinanderliegende konischer Gewebelagen zu einer rotationssymmetrischen Kontur	19
Abbildung 2-4: Fertigungsprinzip zur Erzeugung einer 3D-Kontur mittels lokal unterschiedlicher Kett- und Schussfadnlängen	20
Abbildung 2-5: Shape 3 Verfahren – Webverfahren Helmverstärkung	21
Abbildung 2-6: Gewirkte Hemisphäre	22
Abbildung 2-7: Verstärkte Mehrlagengestricke links: Rohrstruktur; rechts: Rippenstruktur.....	23
Abbildung 2-8: Roboter gestütztes Radialflechten.....	25
Abbildung 2-9: Prozessschritte der Bauteilfertigung 3D-konfektionierter Textilstrukturen.....	27
Abbildung 4-1: Erstellung der Funktionen zur Entwicklung eines breitenvariablen Webblattes.....	36
Abbildung 4-2: Funktionsprinzip eines elastischen Webblattes für Breitwebmaschinen	37
Abbildung 4-3: Konstruktionsprinzip des breitenvariablen Webblattes	39
Abbildung 4-4: Implementierung des breitenvariablen Webblattes in eine Dornier Greiferwebmaschine P1	39
Abbildung 4-5: Zuführung der Kettfäden mittels Einzelfadenzuführung zur Herstellung breitenvariablen Gewebe.....	40
Abbildung 4-6: Installation eines Expansionskammes im Hinterfach der Webmaschine	40
Abbildung 4-7: Messung der Garnschädigung der verarbeiteten Kettfäden	42
Abbildung 4-8: Ausgabe der Gewebebreiten durch Nutzung des entwickelten Programms	44
Abbildung 4-9: Maße der breitenvariablen Gewebemuster in mm	46
Abbildung 4-10: Herstellung der breitenvariablen Gewebe auf einer Greiferwebmaschine des Typs Dornier P1, links: Musterbeginn (breites Gewebe), rechts: Musterfertigung (schmales Gewebe)	47
Abbildung 4-11: Gefertigte breitenvariable Gewebemuster; links: symmetrische Breitenänderung; rechts: asymmetrische Breitenänderung.....	48
Abbildung 4-12: Analyse der Außenkontur des symmetrischen breitenvariablen Gewebemusters	49
Abbildung 4-13: Analyse der Außenkontur des asymmetrischen breitenvariablen Gewebemusters	50

Abbildung 4-14: Analyse der Kettfadendichte des symmetrischen breitenvariablen Gewebemusters	52
Abbildung 4-15: Analyse der Kettfadendichte des asymmetrischen breitenvariablen Gewebemusters	52
Abbildung 4-16: Analyse der Flächenmasse des symmetrischen breitenvariablen Gewebemusters	53
Abbildung 4-17: Analyse der Flächenmasse des asymmetrischen breitenvariablen Gewebemusters	54
Abbildung 4-18: Messung der Zugkräfte der Kettfäden im Geweberand	55
Abbildung 4-19: Messung der Zugkräfte der Kettfäden in der Gewebemitte	56
Abbildung 4-20: Messung des Einlaufwinkels eines Kettfadens	57
Abbildung 4-21: Auswertung des Winkelverlaufs des äußeren Kettfadens	57
Abbildung 4-22: links: Freischnitt einer Rietlücke; rechts: gesamt einwirkende horizontale Kettfadenzugkräfte	58
Abbildung 4-23: Berechnung der gesamten Federsteifigkeit des Webblatt-Federverbundes	59
Abbildung 4-24: Weben der Gewebepreform eines Fanblades mittels breitenvariablen Webblattes	63
Abbildung 4-25: Fertiggestellte breitenvariable Gewebepreform zur Verstärkung eines Fanblades; links: Detail Kettfadenverlauf, rechts: Gesamtansicht	64
Abbildung 4-26: Überprüfung und Vergleich der Außenkontur zwischen Abwicklung und Gewebe	65
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung eines Gewebes mit Leinwandbindung	67
Abbildung 5-2: Schematische Darstellung des Aufwölbens des Gewebes	68
Abbildung 5-3: Schematische Darstellung zur Erzeugung unterschiedlicher Kettfadenlängen über unterschiedliche Gewebebindungen, Abbildung im Schussschnitt	69
Abbildung 5-4: Eingeführtes Koordinatensystem	71
Abbildung 5-5: Anwendung des Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Kreuzungspunkte und Berechnung der virtuellen Oberflächenlinien auf einer Halbkugel	75
Abbildung 5-6: Prinzipschema des Optimierungsalgorithmus zur Anpassung der virtuellen Oberflächenlinien auf einer gekrümmten schalenförmigen Oberfläche	77
Abbildung 5-7: Anwendung des Optimierungsalgorithmus zur Anpassung der virtuellen Oberflächenlinien auf einer Halbkugel	78
Abbildung 6-1: Aufstellung der Gesamt- und Teilfunktionen	82
Abbildung 6-2: Detailansicht doppeltes Hakensystem mit Rückhalteelemente	84
Abbildung 6-3: Konstruktionsprinzip des Schussfadenrückhaltesystems	85
Abbildung 6-4: Einstellmöglichkeiten des doppelten Hakensystems	86
Abbildung 6-5: Einbauprinzip des Schussfadenrückhaltesystem	87

Abbildung 6-6: Einbau des unteren Hakensystems; rechts: Montage in der Webmaschine; links: Detail Hakennasenführung in der Stegladensohle	88
Abbildung 6-7: Einbau und Einstellung des oberen Hakensystems.....	89
Abbildung 6-8: Eingesetztes Spulengatter und verwendete Kompensationseinrichtung.....	89
Abbildung 6-9: Einbau und abzugsfreie Gewebefertigung.....	90
Abbildung 6-10: Messung der Kettfadenzugkräfte beim Weben mit und ohne Abzug.	91
Abbildung 6-11: Messung der Garnschädigung von abzugsfrei gefertigten Geweben..	92
Abbildung 7-1: Beispiel zur Berechnung des theoretischen Dichtefaktors.....	96
Abbildung 7-2: Experimentell ermittelter Zusammenhang zwischen Schussfadendichte und theoretischem Dichtefaktor einer Gewebebindung beim abzugsfreien Weben.....	100
Abbildung 7-3: Bindungskombination Leinwand – Eintragung von 2 Teilschüssen...	104
Abbildung 7-4: Betrachtung der Geometrieordnung in der Webebene mittels Grundebene	107
Abbildung 7-5: Messung der Längen zur Bindungszuweisung für Variante 1	107
Abbildung 7-6: Betrachtung der Geometrieordnung in der Webebene bezogen auf die komplette Gewebebreite.....	108
Abbildung 7-7: Prinzipskizze für bahnförmige abzugsfrei gewebte Strukturen	109
Abbildung 8-1: Programmablaufplan zur Erfassung der Zielgeometrie und Zuweisung der Bindungen.....	113
Abbildung 8-2: CAD-Erstellung der Formschulter mit entsprechender Dimensionierung.....	114
Abbildung 8-3: CAD-Erstellung der Halbkugel mit entsprechender Dimensionierung.....	122
Abbildung 8-4: Berechnung der Bogenlängen und Zuweisung der Bindungsbereiche für eine Halbkugel.....	123
Abbildung 8-5: Abzugsfrei gewebte Halbkugel.....	125
Abbildung 8-6: Erstellung der CAD-Datei des Trichters und Angabe dessen Abmaße	127
Abbildung 8-7: Einteilung der Gewebelängenbereiche des Trichters.....	128
Abbildung 8-8: Erstellung der Bindungs- und Steuerungsdatei für das bahnförmige Gewebe.....	130
Abbildung 8-9: Fertigung des spiralförmigen Gewebes zur Ausbildung einer Trichtergeometrie.....	131
Abbildung 8-10: Abzugsfrei gewebte Trichtergeometrie.....	131
Abbildung 9-1: Fertiggestelltes Fanblade, verstärkt mit in dieser Arbeit entwickelten endkonturnahen breitenvariablen Geweben	134