

**Grundlegende Ermittlung von Struktur-
Eigenschaftsbeziehungen beim Strukturknäuelprozess
für technische Anwendungen**

**Basic investigation of structure-property relationships in
the structure ball winding process
for technical applications**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Kathrin Haigis

aus Esslingen a. N.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf

Tag der mündlichen Prüfung: 21.04.2022

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF)
in Zusammenarbeit mit dem Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT)
der Universität Stuttgart

2022

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung Denkendorf.

Großer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser für die Betreuung meiner Arbeit, hier insbesondere für die konstruktiven Anregungen, für die fachliche Unterstützung und die Förderung. Bedanken möchte ich mich ebenfalls herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Ferner gilt mein Dank Herrn Christoph Riethmüller, der mich fachlich sehr unterstützte sowie mir als Bereichsleiter stets die Möglichkeit gab, an spannenden und interessanten Projekten zu arbeiten. Dadurch wurden mir gleichzeitig die großen Freiräume gewährt, die maßgeblich zum Gelingen meiner Promotion beitrugen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen an den DITF danke ich für die tolle Unterstützung und für das stets hilfsbereite und freundschaftliche Arbeitsumfeld. Insbesondere bedanke ich mich bei Viola Finckh und Julia Riedel für die lebendigen und sehr aufschlussreichen fachlichen Diskussionen im Spultechnikum.

Mein ganz besonderer Dank gebührt schließlich meiner Familie und meinem Mann Christopher für die unermüdliche Motivation und Unterstützung. Mit euren liebevollen Worten und Gesten habt ihr maßgeblich zum Gelingen meiner Promotion beigetragen.

Leinfelden-Echterdingen, 25.05.2022

Kathrin Haigis

Kurzfassung

Die Strukturknäueltechnik ist eine Technologie, um hochautomatisiert und wirtschaftlich leichte Strukturbauteile herzustellen, bei denen das Garn auf allen Seiten des Dornkörpers abgelegt wird. Typische Anwendungen liegen weniger im Bereich sehr hoher Festigkeiten, sondern in günstigen, leichten Komponenten hoher Stückzahl für technische Bauteile. Die für einen Übertrag in technische Anwendungen notwendigen Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung sind jedoch nicht bekannt.

Die vorliegende Arbeit untersucht erstmalig die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen beim Strukturknäuelprozess für technische Anwendungen. Hierfür werden die Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung erstmalig definiert und erarbeitet, zu denen neben den knäueltechnologischen Aspekten auch die Maschinenelemente Flyer und Dorn sowie die garnseitigen Einflussfaktoren gehören. Diese technologischen Zusammenhänge stellen die Grundlage dar für ein Berechnungsmodell, das in der Arbeit erarbeitet wird und anhand dessen verschiedener recheneffizienten Strategien eine auf Dornkörpergrundformen abgestimmte Berechnung der Ablagepunkte erfolgt.

Die Flyerbewegung als prozesscharakterisierende Größe zeigt eine Einordnung verschiedener Strukturknäuelwicklungen und wird im eingeführten Koordinatensystem beschrieben. Als Voraussetzung für die Ausbildung einer Strukturhauptwicklung wird die Rotation des Flyers und des Dorns definiert. Ebenso zeigt die Arbeit eine grundlegende Einteilung und Definition verschiedener Dornkörperformen und erarbeitet darauf aufbauend die Strukturknäuelbildung. Die knäueltechnologischen Einflussfaktoren werden untersucht und ihr Einfluss auf die Strukturknäuelbildung dargestellt.

Der minimale Anstellwinkel für eine Fadenablage auf den Stirnseiten wird für verschiedene Dornkörperformen berechnet. Der Einfluss der Flyer- und Dornzahl auf die Fadenablage kann als gering bewertet werden. Mit der Erfassung und Interpretation der Fadenspannungsverläufe für verschiedene typische Dornkörperformen und Flyerdrehzahlen wird gezeigt, dass die Garnbelastungen, welche zu dornkörper-typischen Ausschlägen in der Fadenspannung führen, über eine höhere Garndehnung reduziert werden können. Der Bereich des freien, ungeführten Fadens zwischen Flyer und Dorn verursacht keine negativen Effekte auf die Fadenablage.

Die Arbeit zeigt auf, dass die Feinheit und die Haarigkeit der untersuchten prozess-typischen Garne keinen Einfluss auf die Strukturknäuelbildung nehmen. Dies bestätigt die Eignung der Technologie für den Einsatz für technische Anwendungen, da es sich um einen stabilen und gut reproduzierbaren Prozess handelt.

Abstract

Structure ball winding is a technology for the highly automated and economical production of lightweight structural components in which the yarn is laid down on all sides of the mandrel body. Typical applications are not so much in the area of very high strength, but rather in low-cost, lightweight, high-volume components for technical parts. However, the necessary factors that influence the formation of structural tangles in regards to technical applications are not known.

This paper is the first to investigate the structure-property relationships in the structure ball winding process for technical applications. For this purpose, the factors influencing the formation of structure balls are defined and elaborated for the first time, including not only the technological aspects of the balls but also the machine elements flyer and mandrel as well as the yarn-side influencing factors. These technological interrelationships form the basis for a calculation model, which is developed in the thesis and on the basis of which various computationally efficient strategies are used to calculate the deposit points adapted to basic mandrel body shapes.

The flyer movement as a process-characterizing variable shows a classification of different structural tangle windings and is described in the introduced coordinate system. As a prerequisite for the formation of a main structure winding, the rotation of the flyer and the mandrel is defined. Likewise, this thesis shows a basic classification and definition of different mandrel body shapes, upon which the structure ball formation is elaborated on. The technological factors are investigated and their influence on the formation of structural balls is presented.

The minimum tilting angle for yarn placement on the end faces is calculated for different mandrel body shapes. The influence of the flyer and mandrel speed on the yarn laydown can be evaluated as low. By recording and interpreting the yarn tension curves for various typical mandrel body shapes and flyer speeds, it can be determined that the yarn stresses which lead to deflections in the yarn tension typical of mandrel bodies can be reduced by means of higher yarn elongation. The area of free, unguided yarn between the roving frame and the mandrel does not cause any negative effects on yarn laydown.

This thesis shows that the fineness and hairiness of the process-typical yarns investigated have no influence on the formation of structural tangles. This confirms the suitability of the technology for use in technical applications, as it is a stable and well reproducible process.

Inhalt

Vorwort und Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhalt	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XIX
Abkürzungen	XXIII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Konventionelle Knäueltechnik	5
2.1.1 Knäuelbildung und Aufbau des konventionellen Knäuels	6
2.1.2 Entwicklungsziele beim konventionellen Knäueln	8
2.2 Strukturknäueltechnik	9
2.2.1 Strukturknäuelbildung und Aufbau des Strukturknäuels	10
2.2.2 Entwicklungsarbeiten in der Strukturknäueltechnik	10
2.3 Zusammenfassung und Abgrenzung	12
3 Ziel, Arbeitshypothesen und Lösungsweg	15
4 Grundlegende Zusammenhänge und Maschinenelemente bei der Strukturknäuelbildung	19
4.1 Begriffe und Definitionen am Fadenlauf, im Knäuelraum und am Strukturknäuel	19
4.1.1 Definition des Fadenlaufs	19
4.1.2 Definitionen im Knäuelraum	20
4.1.3 Definitionen am Strukturknäuel	23
4.2 Einflussfaktoren auf den Strukturknäuelprozess	24
4.3 Definition von Strukturknäueln und der Strukturknäueltechnik	25
4.4 Grundprinzip der Strukturknäuelbildung	25

4.5	Aufbau und Analyse von Strukturhauptwicklungen	27
4.5.1	Ondulierung	32
4.5.2	Fehler in der Fadenablage	35
4.6	Der Flyer in der Strukturknäueltechnik	37
4.6.1	Betrachtete Geometrie der Flyerbahn	37
4.6.2	Charakterisierung von Strukturknäuelwicklungen über die Flyerbewegung ...	38
4.7	Dorn und Dornkörper in der Strukturknäueltechnik	43
4.7.1	Grundlegende Einteilung der Dornkörper.....	44
4.7.2	Taillierung bei offenen Dornaußenkonturen	46
4.7.3	Konkave und konvexe Dornkörper	49
4.8	Zusammenfassung der Grundlagen der Strukturknäueltechnik	50
5	Knäueltechnologische Einflussfaktoren auf die Fadenablage	51
5.1	Drehzahlen und Drehzahlverhältnisse	51
5.1.1	Einfluss der Flyerdrehzahl auf die Fadenablage	52
5.1.2	Einfluss der Dornzahl auf die Fadenablage	54
5.1.3	Einfluss der Oberflächengeschwindigkeit auf die Fadenablage	56
5.2	Fadenspannung im Strukturknäuelprozess.....	58
5.2.1	Messaufbau und eingesetzte Materialien.....	59
5.2.2	Einfluss der Dornkörpergeometrie auf die Fadenspannung	61
5.2.3	Einfluss der Garndehnung auf die Fadenspannung	65
5.2.4	Einfluss der Flyerdrehzahl auf die Fadenspannung	67
5.2.5	Fadengrundspannung	69
5.3	Anstellwinkel des Dornbalkens und Dornposition im Knäuelraum	71
5.3.1	Anstellwinkel und Dornposition beim Kugeldorn	71
5.3.2	Anstellwinkel und Dornposition beim Zylinderdorn.....	76
5.4	Bereich des freien Fadens	80
5.4.1	Einfluss der Flyerdrehzahl im Bereich des freien Fadens	82
5.4.2	Einfluss der Fadengrundspannung im Bereich des freien Fadens.....	86
5.5	Zusammenfassung der knäueltechnologischen Einflussfaktoren.....	88
6	Garnseitige Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung.....	91
6.1	Durchführung der Bewertung der Fadenablage	91
6.2	Einfluss der Feinheit auf die Strukturknäuelbildung	92
6.3	Einfluss der Haarigkeit auf die Strukturknäuelbildung.....	93
6.4	Zusammenfassung der garnseitigen Einflüsse auf die Strukturknäuelbildung	95
7	Modell zur Berechnung der Fadenablage	97
7.1	Voraussetzungen und Annahmen für die Berechnung.....	97

7.2	Schnittebenenmodelle für verschiedene Dornkörperkonturen und - geometrien	99
7.2.1	Schnittebenenmodell für den Zylinderdorn.....	101
7.2.2	Schnittebenenmodell für den Kugeldorn	108
7.2.3	Programmablaufdiagramme für Zylinder- und Kugeldorn	111
7.2.4	Verifizierung der berechneten Fadenablage und Bewertung	113
7.2.5	Fazit der Berechnung der Fadenlage für Zylinder- und Kugeldorn	116
8	Zusammenfassung	119
9	Ausblick	123
10	Literaturverzeichnis	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip der Wickelbildung beim Strukturspulen (rechts) und beim Strukturknäueln (links). Die Rotationsachsen sind mit R1 (Rotation des Flyers), R2 (Rotation des Dorns) und R3 (Rotation der Spule) gekennzeichnet.	2
Abbildung 2:	Knäuelraum mit Flyer und Metallstrebendorn (links) und Prinzip des Knäuelns (rechts)	5
Abbildung 3:	Darstellung der vier Wickelphasen beim konventionellen Knäueln [17]	7
Abbildung 4:	Darstellung der Zusammenhänge der zu untersuchenden Parameter, der Teilziele und der Arbeitshypothesen der Arbeit	17
Abbildung 5:	Bereiche des Fadenlaufs beim Strukturknäueln	20
Abbildung 6:	Zwei Ansichten des Knäuelraums mit Koordinatensystem, Flyer, Zylinderdorn und Flyerbahn	21
Abbildung 7:	Darstellung eines Dornkörpers im Knäuelraum. z_D : Position des Dornzentrums auf der z-Achse, ΔK : Verschiebung der Flyerbahn entlang der Flyerrotationsachse, α : Anstellwinkel	22
Abbildung 8:	Darstellung eines Strukturknäuels mit markierter Kopf (K)-, Mantel (M)- und Fuß- (F)seite und Bereich ohne Garnabdeckung mit Radius r_{OK}	23
Abbildung 9:	Relevante Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung in den vier Bereichen des Fadenlaufs	24
Abbildung 10:	Schematische Darstellung eines Zylinderdorns im Koordinatensystem mit Flyer, Rotationsachsen, Flyerbahn. α : Anstellwinkel, φ : Flyerwinkel	26
Abbildung 11:	Zylinderdornkörper im betrachteten Koordinatensystem mit den aufeinander folgenden Ablagepunkten P_1 und P_2 . δ : Dornwinkel, h_D : Höhe des Dorns, r_D : Radius des Dorns	27
Abbildung 12:	Darstellung des Winkelschritts λ (grün) zwischen zwei benachbarten Verkreuzungen, Drehzahlverhältnis $h = 24$ mit 24 Verkreuzungen. Die Ablagepunkte sind mit grünen Kreisen markiert.	28
Abbildung 13:	Fadenablagen auf dem Zylinderdorn bei einer geraden ($h = 24$; links) und einer wilden ($h = 4,8$; rechts) Strukturwicklung, die das gleiche Wickelbild ergeben.	30
Abbildung 14:	Schematische Darstellung eines ondulierten Garns und einer zweiten Garnlage	32

Abbildung 15:	Fadenablage einer geraden Strukturwicklung auf dem Zylinderdorn ($h = 24$) ohne Ondulierung innerhalb einer Lage	34
Abbildung 16:	Fadenablage einer geraden (oben) und einer wilden (unten) Strukturwicklung mit gekennzeichneteter Ondulierung bei der wilden Strukturwicklung (unten)	34
Abbildung 17:	Verschiebung eines Verkreuzungspunktes (blau: korrekte Fadenablage, orange: fehlerhafte Fadenablage), rechts: Darstellung der Winkelschritte als Differenz zum berechneten Wert λ_W	36
Abbildung 18:	Verschiebung mehrerer Verkreuzungspunkte (blau: korrekte Fadenablage, orange: fehlerhafte Fadenablage), rechts: Darstellung der Winkelschritte als Differenz zum berechneten Wert λ_W	37
Abbildung 19:	Geometrische Zusammenhänge für die Berechnung der Bahn der Flyeraustrittsöse A. M: Mittelpunkt der Flyerbahn, U: Ursprung des Koordinatensystems, d: Verbindung zw. A und U, r_F : Flyerradius, α : Anstellwinkel, β : Hilfswinkel zw. d und z-Achse, φ : Flyerwinkel	38
Abbildung 20:	Schematische Darstellung der Strukturhauptwicklung beim Strukturknäueln auf dem Zylinderdorn mit Dornrotationsachse (z-Ache) (blau: Garn).....	39
Abbildung 21:	Schematische Darstellung einer Bauchbinde (A), einer Strukturumfangwicklung (B) und einer Strangwicklung (C) auf einem zylindrischen Dornkörper	40
Abbildung 22:	Mögliche Wicklungen beim statischen Flyer.....	41
Abbildung 23:	Mögliche Wicklungen beim pendelnden Flyer	41
Abbildung 24:	Mögliche Wicklungen beim rotierenden Flyer.....	42
Abbildung 25:	Dornkörper des Zylinderdorns mit Formmasse an der Außenkante der Stirnseite	43
Abbildung 26:	Einteilung der Dornkörperarten beim Strukturknäueln hinsichtlich ihrer Außenkontur und der Ausformung der Mantelfläche bei geschlossenen Außenkonturen	45
Abbildung 27:	Schematische Darstellung der Taillierung bei offener (B) im Vergleich zur geschlossenen (A) Außenkontur eines Zylinderdorns. t: Taillierung	46
Abbildung 28:	Schematische Darstellung zur Berechnung der Taillierung t. E: Schnittpunkt der Verbindung von P_1 und P_2 mit der x,y-Ebene,	

	P_1, P_2 : Ablagepunkte, r_D : Radius des Zylinderdorns, h_D : Höhe des Dorns, δ_1, δ_2 : Dornwinkel zu P_1, P_2	47
Abbildung 29:	Beispielhafter Verlauf der Taillierung t in cm für einen Dornradius von $r_D = 10$ cm. Hier gilt $\delta_1 = \delta_F$; $\delta_2 = 0^\circ$; $z_D = 0$ cm.	48
Abbildung 30:	Taillierung am offenen Zylinderdorn (links), Beispiel für einen zylindrischen Dorn mit offener Außenkontur (Mitte) und für einen Metallstrebendorn (rechts).....	48
Abbildung 31:	Schematische Darstellung von konkaven (links, blau) und konvexen (rechts, orange) Bereichen der Dornaußenkontur bzgl. der z-Achse.....	49
Abbildung 32:	Einflussfaktoren auf das Drehzahlverhältnis beim Strukturknäuelprozess.....	50
Abbildung 33:	Differenz der gemessenen Winkelschritte λ zum berechneten Winkelschritt ($\lambda_W = 15^\circ$) bei unterschiedlichen Flyerdrehzahlen ($n_F = 10$ und 300 1/min, $h = 24$).....	53
Abbildung 34:	Differenz der gemessenen Winkelschritte λ zum berechneten Winkelschritt ($\lambda_W = 15^\circ$) bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen ($h = 4,8$ und $h = 24$)	54
Abbildung 35:	Darstellung des Punkts P auf der Kugeloberfläche in Abhängigkeit des lokalen Radius' r_P , des Winkels ϑ entlang der Kugeloberfläche und vom Dornkörperdurchmesser r_D	56
Abbildung 36:	Exemplarischer Verlauf der Oberflächengeschwindigkeit entlang der Kugeloberfläche, Betrachtung von der Kopfseite ($\vartheta = 0^\circ$) bis zur Fußseite ($\vartheta = 180^\circ$)	58
Abbildung 37:	Verwendete Strukturknäuelmaschine SBW 2 der JBF Maschinen GmbH.....	61
Abbildung 38:	Fadenspannungsverlauf für PP-Garn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min) für eine Lage am Zylinderdorn	62
Abbildung 39:	Detailaufnahme des Fadenspannungsverlaufs für PP-Garn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min) für sechs Flyerumdrehungen am Zylinderdorn	63
Abbildung 40:	Schematische Darstellung der Ablagepunkte beim Strukturknäueln mit Zylinderdorn	64
Abbildung 41:	Fadenspannungsverlauf für PP-Garn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min) für eine Lage (24 Flyerumdrehungen) am Kugeldorn.....	64
Abbildung 42:	Fadenspannungsverlauf für Glasgarn für zwölf Flyerumdrehungen am Zylinderdorn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min).....	65

Abbildung 43:	Vergleich der Fadenspannungsverläufe für Glas- und CO/PES-Garn bei den gleichen Einstellungen.....	66
Abbildung 44:	Vergleich der Fadenspannungsverläufe (in cN) für Glasgarn am Zylinderdorn für sechs Umdrehungen. Ordinate: Fadenspannung in cN, Abszisse: Umdrehungen. Mitte (grüne Markierung): Referenzkurve, $h = 24$, $n_F = 100$ 1/min. rechts: $h = 24$, $n_F = 10$ 1/min. links: $h = 4,8$, $n_F = 100$ 1/min.....	67
Abbildung 45:	Vergleich der Fadenspannungsverläufe (in cN) für PP-Garn, 24 Flyerumdrehungen (eine Lage), ($h = 4.8$), links: $n_F = 10$ 1/min; rechts: $n_F = 100$ 1/min	68
Abbildung 46:	Vergleich der Fadenspannungsverläufe (in cN) für CO/PES-Garn, 24 Flyerumdrehungen (eine Lage), beim Zylinderdorn ($h = 4.8$), links: $n_F = 10$ 1/min; rechts: $n_F = 100$ 1/min	68
Abbildung 47:	Fadenspannungsverlauf für PP-Garn am Zylinderdorn, $h = 24$, $n_F = 100$ 1/min, Erhöhung der Fadengrundspannung in fünf Stufen.....	69
Abbildung 48:	Detailbetrachtung des Fadenspannungsverlaufs zwischen der 24. und der 25. Flyerumdrehung (PP-Garn, $h = 24$, $n_F = 100$ 1/min).....	70
Abbildung 49:	Schematische Darstellung des Kugeldorns im Koordinatensystem. Blau: Zentrum-Zentrum-Position, grün: z_D -Zentrum-Position. z_D : Dornzentrum, r_D : Dornkörperradius, α : Anstellwinkel	72
Abbildung 50:	Zusammenhang zwischen dem Radius r_0 der freien Bereiche auf den Stirnflächen und dem Anstellwinkel beim Kugeldorn ($r_D = 100$ mm) in Zentrum-Zentrum-Position	74
Abbildung 51:	Schematische Darstellung des Kugeldorns für die z_D -Zentrum-Position. z_D : Dornzentrum, M' : Mittelpunkt der Flyerbahn für z_D -Zentrum-Position für $z_D > 0$, M'' : Mittelpunkt der Flyerbahn für z_D -Zentrum-Position für $z_D < 0$, α : Anstellwinkel, ΔK : Flyerbahnverschiebung	75
Abbildung 52:	Schematische Darstellung des Zylinderdorns im Koordinatensystem. Blau: Zentrum-Zentrum-Position, grün: z_D -Zentrum-Position. ΔK : Verschiebung der Flyerbahn. h_D , r_D : Höhe und Radius des Dornkörpers, M' : Mittelpunkt der Flyerbahn für z_D -Zentrum-Position für $z_D > 0$	77
Abbildung 53:	Kräfte am betrachteten Punkt des Garns (grün). A: Austrittsöse Flyer, P: Ablagepunkt des Garns auf dem Dornkörper, κ : Winkel	

	zw. Tangente an Flyerbahnebene und Garn. F_F : Fadenzugkraft, F_L : Luftwiderstandskraft, F_B : Beschleunigungskraft, F_Z : Zentrifugalkraft	81
Abbildung 54:	Aufbau für die High-Speed-Aufnahmen mit High-Speed-Kamera, Knäuelraum und Strahlern	82
Abbildung 55:	High-Speed-Aufnahmen der Fadenablage auf dem Zylinderdorn, PES-Zwirn, Flyerdrehzahl $n_F = 100$ 1/min, $h = 24$	83
Abbildung 56:	Detailaufnahme des Garnverlaufs bei PES-Zwirn, $n_F = 300$ 1/min, $h = 24$, mit gekennzeichneteter Ballonierung (rot) zwischen dem Garn und der gestreckten Linie (blau)	84
Abbildung 57:	Detailaufnahmen der Knäuelversuche mit mittlerer (A) und geringer (B) Fadengrundspannung (Flyerdrehzahl: $n_F = 300$ 1/min, $h = 24$)	87
Abbildung 58:	Darstellung der Differenzen der Winkelschritte λ zum berechneten Wert $\lambda_W = 15^\circ$, Knäuelversuche mit CO/PES-Garn (grün) und PES-Zwirn (rot) für $h = 24$, Flyerdrehzahl $n_F = 100$ 1/min	92
Abbildung 59:	Fadenablage für CO/PES-Garn (linke Spalte) und PES-Zwirn (rechte Spalte), obere Zeile jeweils unbearbeitete Fotos, untere Zeile jeweils nach Bildbearbeitung	93
Abbildung 60:	Fadenablage für CO/PES-Garn (linke Spalte) und PP-Garn (rechte Spalte), obere Zeile jeweils unbearbeitete Fotos, untere Zeile jeweils nach Bildbearbeitung	94
Abbildung 61:	Geometrische Zusammenhänge im Knäuelraum, dargestellt ist der Zylinderdorn (blau). r_D : Dornradius, r_F : Flyerradius, A: Garnaustritt aus der Flyeröse, U: Ursprung Koordinatensystem, d: Abstand zwischen A und U, M: Schnittpunkt Flyerbahnebene mit der Flyerrotationsachse, α : Anstellwinkel, β : Hilfswinkel	98
Abbildung 62:	Zylinderdorn mit beispielhaften Schnittebenen $z_{KS,k}$, dem Startpunkt P_0 und der Flyeraustrittsöse im Punkt A	102
Abbildung 63:	Geometrische Zusammenhänge für die Fälle 1 ($y_M < 0$, rot) und 2 ($y_M > 0$, grün) mit den geometrischen Kenngrößen A: Austrittsöse für Flyerbahn in Zentrum-Zentrum-Position, A': Austrittsöse für Flyerbahn in Zentrum- Δ K-Position für $y_M < 0$, A'': Austrittsöse für Flyerbahn in Zentrum- Δ K-Position für $y_M > 0$, U: Ursprung des Koordinatensystems, d: Abstand zwischen A und U, d': Abstand zwischen A' und U, d'': Abstand zwischen A'' und U, M: Schnittpunkt Flyerbahnebene durch A mit der	

	Flyerrotationsachse, M' : Schnittpunkt Flyerbahnebene durch A' mit der Flyerrotationsachse, M'' : Schnittpunkt Flyerbahnebene durch A'' mit der Flyerrotationsachse, $\beta, \beta', \beta'', \gamma, \gamma', \gamma'', \varepsilon$: Hilfswinkel, α : Anstellwinkel, r_F : Radius des Flyers 103
Abbildung 64:	Schematische Darstellung des Zylinderdornkörpers im Koordinatensystem, dargestellt ist die x,z-Ebene. A_0 : Startpunkt der Austrittsöse. P_0 : Startpunkt, erster Ablagepunkt. A_{S1} : Austrittsöse beim ersten gefundenen Schnittpunkt P_{S1} . A_{S2} : Austrittsöse beim zweiten gefundenen Schnittpunkt P_{S2} . A_{S3} : Austrittsöse beim dritten gefundenen Schnittpunkt P_{S3} , $z_{KS,1}, z_{KS,2}$: Schnittebenen, φ : Flyerwinkel 108
Abbildung 65:	Darstellung des Prinzips der Schnittpunktberechnung beim Kugeldorn am Beispiel zweier Schnittebenen. A : Austrittsöse, P_0 : Startpunkt, erster Ablagepunkt, P_{S1} : zweiter gefundener Ablagepunkt, $z_{KS,0}, z_{KS,1}$: Schnittebenen, g : Gerade durch A und Ablagepunkte P 109
Abbildung 66:	Darstellung der Schnittebenen 1 und 2 beim Kugeldorn 110
Abbildung 67:	Programmablaufdiagramm für Zylinderdorn 112
Abbildung 68:	Programmablaufdiagramm für Kugeldorn 113
Abbildung 69:	Vergleich der Fadenablage beim Versuch (links) und der berechneten Ablagepunkte (rechts) 115
Abbildung 70:	Berechnete Ablagepunkte am Zylinderdorn für zwei verschiedene Anstellwinkel 116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einflussfaktoren auf die Knäuelbildung beim konventionellen Knäueln	8
Tabelle 2:	Übersicht über die durchgeführten und über die noch offenen Arbeiten	11
Tabelle 3:	Zusammenfassende Gegenüberstellung des Entwicklungsstands der Knäuel- und der Strukturknäueltechnik	13
Tabelle 4:	Vergleich der geraden und der wilden Strukturwicklung	32
Tabelle 5:	Vergleich der Ondulierung bei der geraden und der wilden Strukturwicklung	33
Tabelle 6:	Übersicht über die zu untersuchenden knäueltechnologischen Einflussfaktoren	51
Tabelle 7:	Parametersätze für die Versuche in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2	52
Tabelle 8:	Parametersätze und Ergebnisse für die Ermittlung des Einflusses der Flyerdrehzahl	52
Tabelle 9:	Ergebnisse der Knäuelversuche mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen	55
Tabelle 10:	Übersicht über Flyer- und Dornrehzahlen und der resultierenden Fadenablage auf der Kugeloberfläche	57
Tabelle 11:	Einflussparameter auf die Fadenspannung im Strukturknäuelprozess	59
Tabelle 12:	Verwendete Garne	60
Tabelle 13:	Mittelpunkt M der Flyerbahn für Fall 1 und Fall 2	73
Tabelle 14:	Aufnahmeeinstellungen und Ergebnisse der Beurteilung des Garnverhaltens im Bereich IV für CO/PES-Garn und PES-Zwirn	85
Tabelle 15:	Vergleich der Fadenablage von CO/PES-Garn und PES-Zwirn bei unterschiedlichen Flyerdrehzahlen, $h = 24$, Std.Abw. steht für die Standardabweichung des jeweiligen Werts	85
Tabelle 16:	Fadengrundspannungen bei den betrachteten Flyerdrehzahlen	86
Tabelle 17:	Einstellungen und Ergebnisse der Beurteilung des Garnverhaltens im Bereich IV für PES-Zwirn für unterschiedliche Fadengrundspannungen	88
Tabelle 18:	Zusammenfassung der knäueltechnischen Einflussfaktoren auf die Fadenablage	89
Tabelle 19:	Beziehungen für Schnittebenen für unterschiedliche Dornkörperaußenkonturen	100
Tabelle 20:	Einstellungen für die Berechnung der Fadenablage	114

Tabelle 21:	Berechnungsschema der Ablagepunkte für den Zylinderdorn mit offener Außenkontur.....	117
-------------	---	-----

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔK	mm	Verschiebung der Flyerbahn für Zentrum-Zentrum-Position
$\Delta K'$	mm	Verschiebung der Flyerbahn für $z_D > 0$
$\Delta K''$	mm	Verschiebung der Flyerbahn für $z_D < 0$
$\Delta\varphi$	°	Winkelschritt des Flyerwinkels
A	mm	Garnaustritt am Flyer (Austrittsöse)
A'	mm	Garnaustritt am Flyer (Austrittsöse) für $z_D > 0$
A''	mm	Garnaustritt am Flyer (Austrittsöse) für $z_D < 0$
A_{S1}	mm	Austrittsöse am Schnittpunkt 1
A_{S2}	mm	Austrittsöse am Schnittpunkt 2
A_{S3}	mm	Austrittsöse am Schnittpunkt 3
c	-	Laufvariable
d	mm	Abstand zwischen A und U
d'	mm	Abstand zwischen A' und U
d''	mm	Abstand zwischen A'' und U
d_D	mm	Durchmesser des Dornkörpers
d_L	-	Anzahl Dornumdrehungen pro Lage
d_{SEG}	mm	Abstand des Schnittpunkts SEG zum Koordinatensystem- ursprung
E	mm	Schnittpunkt der Ablagepunkte mit der x,y-Ebene
f	-	Anzahl Flyerumdrehungen pro Lage
F_B	N	Beschleunigungskraft
F_F	N	Fadenzugkraft
F_L	N	Luftwiderstandskraft
F_Z	N	Zentrifugalkraft

g	-	Gerade durch P und A
h	-	Geschwindigkeitsverhältnis
h_D	mm	Höhe des Zylinderdorns
H_D	mm	Gesamthöhe des Zylinderdorns
k	-	Laufvariable für die Schnittebenenberechnung
M		Schnittpunkt der Flyerbahnebene mit der Rotationsachse des Flyers
n_D	1/min	Drehzahl des Dorns
n_F	1/min	Drehzahl des Flyers
n_{KS}	-	Anzahl der Schnittebenen
P	mm	Ablagepunkt auf dem Dornkörper
P_0	mm	Startwert, erster Ablagepunkt
P_i	mm	Ablagepunkte
P_{Si}	mm	Gefundene Schnittpunkte pro Inkrementalschritt
r_B	mm	Bahnradius
r_D	mm	Radius des Dorns
r_F	mm	Radius des Flyers bzg. Auf seine Rotationsachse
$r_{\bar{O}}$	mm	Radius des Bereichs an der Dornstirnseite ohne Garnablage
$r_{\bar{O}K}$	mm	Radius des Bereichs an der Dornkopfseite ohne Garnablage
$r_{\bar{O}K}$	mm	Radius des Bereichs an der Dornfußseite ohne Garnablage
r_P	mm	Lokaler Durchmesser auf der Kugeloberfläche
R_z	-	Rotationsmatrix um die z-Achse
t	mm	Taillierung bei offenkantigen Dornkörpern

T_t	tex	Titer bzw. Garnfeinheit
U	mm	Ursprung des Koordinatensystems
v_{OF}	m/min	Oberflächengeschwindigkeit auf der Kugeloberfläche
x_{L1}, x_{L2}	mm	Schnittpunkte im Berechnungsmodell
z_D	mm	Verschiebung des Dornmittelpunkts aus dem Ursprung
$z_{KS,k}$	-	Schnittebene durch den Dornkörper
α	°	Anstellwinkel des Dornbalkens
β	°	Hilfswinkel zwischen d und der z-Achse
β'	°	Hilfswinkel zwischen d' und der z-Achse
β''	°	Hilfswinkel zwischen d'' und der z-Achse
γ	°	Hilfswinkel zwischen r_F und d
γ'	°	Hilfswinkel zwischen r_F und d'
δ	°	Dornwinkel
δ_F	°	Winkelschritt des Dorns pro Flyerumdrehung
ε	°	Hilfswinkel zwischen d'' und der Rotationsachse des Flyers
κ	°	Winkel zwischen Tangente an die Flyerbahnebene und dem Garn
λ	°	Winkelschritt zwischen den Verkreuzungen
λ_W	°	Winkelschritt am Wickelbild
φ	°	Rotationswinkel des Flyers
ω	°	Flyerwinkel einer Flyerumdrehung

Abkürzungen

CO/PES	Baumwolle-Polyester(-Mischung)
Det	Kontrolldeterminante für die Prüfung der Schnittbedingung
DITF	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung
PES	Polyester
PP	Polypropylen
SEG	Berechneter Schnittpunkt
T/cm	Touren pro cm, Einheit für die Garndrehungen
R1	Rotationsachse des Flyers
R2	Rotationsachse des Dorns
R3	Rotationsachse der Spule

1 Einleitung und Motivation

Die Strukturspul- und die Strukturknäueltechnik gehören zu den textilen Aufwindedprozessen und bieten das Potential einer flexiblen, wirtschaftlichen und automatisierbaren Herstellung technischer Bauteile.

Die Strukturspultechnik zur Herstellung technischer Bauteile und Komponenten hat sich aus der konventionellen Spultechnik heraus entwickelt und nutzt die Vorteile der präzisen Fadenablage bei hoher Wirtschaftlichkeit [7]. Sie basiert auf der konventionellen Spultechnik, die bislang für die Herstellung von Garnspeichern genutzt wurde [9].

Die Garne werden bei der Strukturspulenbildung mit hohen Geschwindigkeiten und Drehzahlen auf der Hülse abgelegt, so dass sich entweder flächige Wickelbilder oder gezielte Fadenbänder ausbilden. Die Struktur lässt sich wie beim konventionellen Spulen maßgeblich über das Windungsverhältnis beeinflussen, welches die Anzahl der Hülsenrotationen pro Doppelhub des changierenden Fadenführers beschreibt. [1], [2], [3] Über die gezielte Fadenablage können so bspw. Dichteunterschiede im Spulenwickel erzeugt werden, die für eine gezielte sequenzielle Funktionalisierung von Garnen genutzt werden [4].

Die Strukturspultechnik wurde bereits dazu genutzt, verschiedene Leuchten bzw. Lichtrichtelemente zu entwickeln. Durch die hohe Präzision der Fadenablage konnte eine Einstellbarkeit der Abstrahlcharakteristik erzielt werden [5], [6]. Ebenso konnte gezeigt werden, dass Hybridgarne, die über integrierte Drahtstrukturen bspw. eine Heizfunktion wahrnehmen, genau platziert werden können. So konnte ein Heizelement hergestellt werden, das ein geringes Eigengewicht aufweist und bei geringem Materialeinsatz eine gute Heizfunktion bietet.

Zur Herstellung eines Bauteils wird ein strukturgespulter oder strukturgeknäuelter Garnkörper konsolidiert [7]. Für die Herstellung von strukturgespulten oder strukturgeknäuelten Bauteilen werden die in Hybridgarnen, die aus einer garnförmigen Thermoplast- bzw. Matrixkomponente und aus einer ebenfalls garnförmigen Verstärkungskomponente bestehen, enthaltenen Thermoplastanteile aufgeschmolzen. Diese bilden nach dem Abkühlen die Matrix, die die Verstärkungsfasern einbettet. Andere Konsolidierungsmethoden erfordern das Einbringen von Klebstoffsystemen. Dies kann bspw. über die vorgelagerte Herstellung eines mit Klebstoff beschichteten Garns erfolgen oder über die Infiltrierung der Strukturspule oder des Strukturknäuels mit anschließender Aushärtungsreaktion des Klebstoffs [6]. So werden Bauteile bzw.

Komponenten hergestellt, bei denen das Garn auf dem Wickelkörper verbleibt und im Vergleich zu konventionellen Garnspulen nicht wieder abgezogen wird.

Verfahrensbedingt erfolgt die Fadenablage bei Strukturspulen wie oben beschrieben und in Abbildung 1 gezeigt allerdings nur entlang der Mantelfläche, also auf der zylindrischen Umfangsfläche ohne die Grund- bzw. Stirnflächen der Hülse. Der Faden wird beim Strukturspulen aufgrund der Changierbewegung des Fadenführers nicht über die Stirnflächen abgelegt. Diese Fadenablage führt zu keiner Lastaufnahme in Richtung der Rotationsachse des Strukturspulbauteils.

Zur Herstellung von dreidimensionalen Strukturbauteilen, die eine in weitem Maße frei geformte Außenkontur mit nur einer Öffnung besitzen, muss das Garn über die Stirnseite abgelegt werden können, also überall auf der Mantelfläche einschließlich der Stirnseiten.

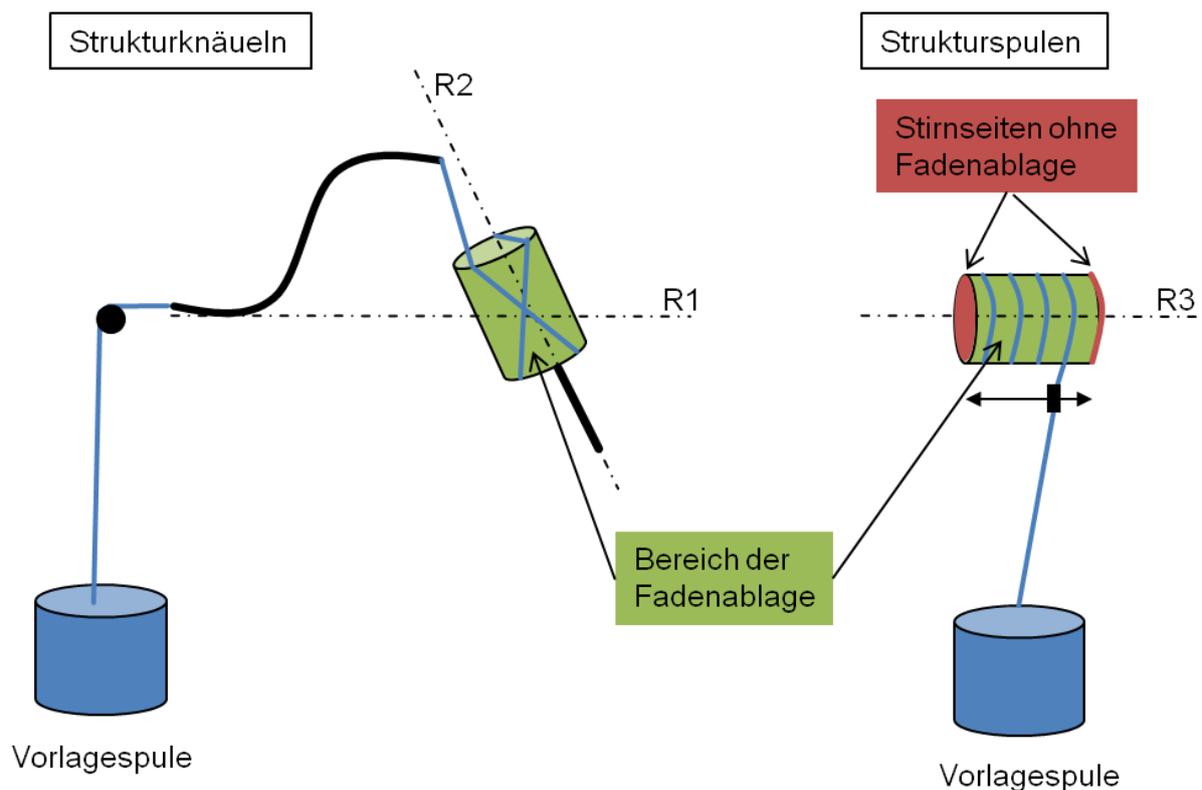


Abbildung 1: Prinzip der Wickelbildung beim Strukturspulen (rechts) und beim Strukturknäueln (links). Die Rotationsachsen sind mit R1 (Rotation des Flyers), R2 (Rotation des Dorns) und R3 (Rotation der Spule) gekennzeichnet.

Die Strukturknäueltechnologie erfüllt diese Anforderung für die Herstellung dreidimensionaler, endlosfaserbasierter Strukturkörper. Beim Strukturknäueln erfolgt die Fadenführung und -ablage rotatorisch um bzw. auf den gekippten Dornkörper, wes-

wegen die Stirnseiten des Dorns mit Faden bedeckt werden können [8]. Das Grundprinzip des Strukturspulens und des Strukturknäuelns ist in Abbildung 1 gezeigt.

Die Vorteile der Strukturknäueltechnik für die Anwendung im technischen Bereich liegen in der hohen Wirtschaftlichkeit und in der Anpassungsfähigkeit des Verfahrens. Die Anpassungsfähigkeit bezieht sich hierbei auf den Einsatz von Garnmaterialien und auf die Formflexibilität der verwendeten Dorne. [9], [38] Ebenso bietet die Strukturknäueltechnik ein großes Automatisierungspotential [19], [23]. Trotz dieser Vorteile und Potentiale sind aktuell keine Umsetzungen in technische Produkte von Strukturknäuelbauteilen bekannt.

Der großflächigen Nutzung der Strukturknäueltechnologie für die wirtschaftliche Herstellung von technischen Leichtbauteilen mit großem Potential einer hohen Automatisierung steht aktuell noch entgegen, dass keine verfahrenstechnischen Grundlagen in Form von wissenschaftlichen Analysen des Prozesses vorliegen. Hier setzt das Ziel dieser Arbeit an: In dieser Arbeit wird durch die Definition und Untersuchung der relevanten Prozessparameter auf die Strukturknäuelbildung diese Lücke geschlossen. Die für eine Analyse der Fadenablage relevanten knäueltechnologischen und garnseitigen Parameter werden definiert und untersucht. Zudem wird ein Berechnungsmodell erarbeitet, mit dem die Fadenablage auf verschiedenen Dornkörpergrundformen berechnet werden kann. Es wird so eine Grundlage geschaffen, eine ressourcenoptimierte Entwicklung von Strukturknäuelbauteilen zu ermöglichen und damit den Strukturknäuelprozess für technische Anwendungen zugänglich zu machen.

2 Stand der Technik

2.1 Konventionelle Knäueltechnik

Ein Knäuel ist eine Form des Garnspeichers, der häufig für gröbere Naturfasergarne, Bindfäden oder flauschige Acrylgarne eingesetzt wird [10]. Es sind verschiedene Knäuelformen bekannt, die hauptsächlich im Haushalt und im Gewerbe Einsatz finden. Zu den wichtigsten Knäuelformen zählen bspw. hülsenlose Hartknäuel für Bindfäden im Handwerk, Rundknäuel für Papiergarne und Weichknäuel für Handstrickgarne [11], [12]. Die Nutzung von Knäueln als eigenständige technische Bauteile ist bislang nicht bekannt.

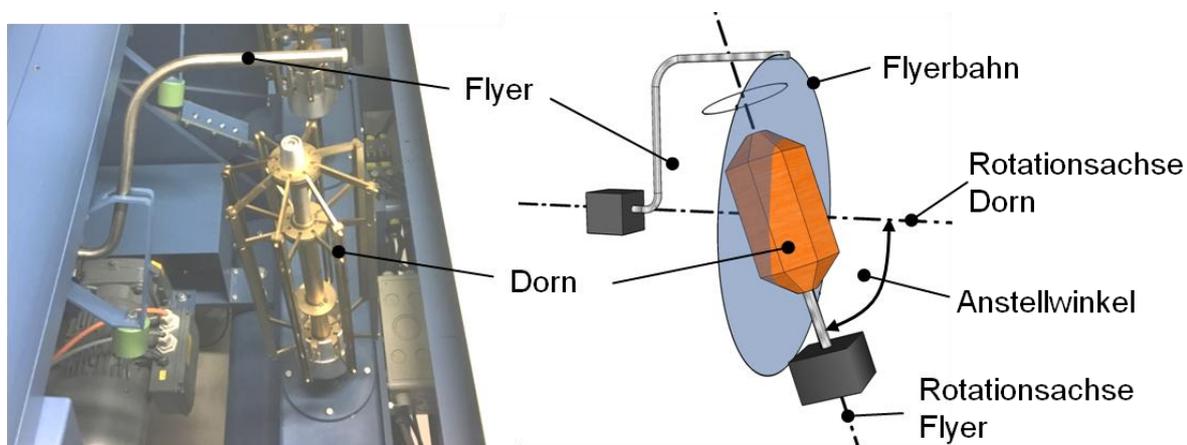


Abbildung 2: Knäuelraum mit Flyer und Metallstrebendorn (links) und Prinzip des Knäuels (rechts)

Abbildung 2 zeigt den Knäuelraum in der Strukturknäuelmaschine SBW 2 der JBF Maschinen GmbH. Zu sehen ist der s-förmige Flyer sowie ein Dornkörper eines Metallstrebendornes, der für Acryl- bzw. Handstrickgarne eingesetzt wird. Der Dorn ist im Dornbalken gelagert, welcher zudem die Neigung um den Anstellwinkel umsetzt.

Beim Knäuelvorgang rotiert ein Flyer um den geneigten Dornkörper, so dass das Garn als sog. Einfeldwickel auf dem Dornkörper abgelegt wird [13]. Das Garn wird durch den häufig s-förmigen Flyer geführt und tritt an dessen Ende aus. Die Austrittsöse am Ende des Flyers bewegt sich entlang der Flyerbahn. Der Dorn ist bezogen zur Horizontalen bzw. zur Flyerrotationsachse um den Anstellwinkel geneigt (vgl. Abbildung 2). [14], [15] Diese Neigung bewirkt eine Fadenablage auf allen Seiten des Dornkörpers.

Bei der Herstellung klassischer Garnknäuel wird der Anstellwinkel während des Knäuelvorgangs verändert, damit werden der Aufbau und das Knäuelgewicht beeinflusst.

lusst. Durch eine Reduzierung können bspw. Knäuel mit hohem Volumen hergestellt werden.

Die JBF Maschinen GmbH benennt das fadenführende Element als Flyer bzw. Wickelflügel, das Garn wird auf dem sog. Wickeldorn abgelegt, der wiederum im Wickeldornbalken gelagert ist [16]. Ferner sind in der Literatur keine weiteren festen Begriffe aufgeführt, die für eine Untersuchung der Strukturknäueltechnologie, wie in dieser Arbeit angestrebt, herangezogen werden können.

Durch die Rotationsbewegungen des Flyers und des Dorns wird im Bereich zwischen der Austrittsöse am Flyer und dem Ablagepunkt auf dem Dornkörper das Garn berührungslos geführt. Die dynamischen und garnseitigen Einflussfaktoren auf die Knäuelbildung sind nicht bekannt.

2.1.1 Knäuelbildung und Aufbau des konventionellen Knäuels

Konventionelle Garnknäuel werden maschinengesteuert und meist vollautomatisiert hergestellt. Die klassische Wicklung kann nach [35] und [17] in verschiedene Wickelphasen eingeteilt werden. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt. Dadurch können Knäuelaufbauten hergestellt werden, die einen stabilen Aufbau aufweisen, der garnabhängig ist und für die Weiterverarbeitung eine Rolle spielt.

Zu Beginn wird eine schmale Umfangsan- bzw. Anfangswicklung (1) erzeugt, bei der der Dorn fast senkrecht zur Flyerachse steht. Eine anschließende Grundgrob- bzw. Grundwicklung (2) bewirkt durch eine stärkere Verkreuzung eine Volumenzunahme des Wickels und damit den Knäuelaufbau.

Der Anstellwinkel wird reduziert und das Kreuzungsverhältnis der beiden Rotationsdrehzahlen erhöht. Das Kreuzungsverhältnis (vgl. Tabelle 1) stellt beim konventionellen Knäueln ein Maschinenparameter dar, der das Verhältnis von Flyer- zu Dornumdrehungen angibt. [27] Als dritte Lage kann die Deckwicklung (3) erfolgen. Hierbei wird das Kreuzungsverhältnis erhöht, was zu einer Reduzierung der Rotationsgeschwindigkeit des Dorns führt. Diese Lage bestimmt das Aussehen des Knäuels maßgeblich. Schließlich ist als vierte Lage eine sog. Umfangswicklung (4) möglich. Diese entsteht, wenn der Dorn wieder fast senkrecht steht (Anstellwinkel gegen 90°).

Diese vier Lagen sind in ihrer Ausprägung frei einstellbar, wodurch die Struktur, Optik und Eigenschaften des Knäuels beeinflusst werden können. Die Knäuelrezepte, die auf diesem Aufbau basieren, haben das Ziel, einen stabilen und gleichmäßigen Knäuelwickel herzustellen. In Tabelle 1 sind solche typischen Knäuelparameter angegeben.



Abbildung 3: Darstellung der vier Wickelphasen beim konventionellen Knäueln [17]

Beim konventionellen Knäueln werden hauptsächlich die Massen der Knäuel und die Grundformen der Knäuel parametrisiert [18]. Bei weichen Handstrickgarnen wird ein Fokus auf der Erzielung eines großen Volumens gelegt, grobe Bindfäden hingegen erfordern eine erhöhte Stabilität im Wickel [19].

Für hülsenlose Knäuel werden kollabierbare Metallstreben- bzw. Expansionsdorne in verschiedenen, vom Maschinenhersteller vorgegebenen Größen eingesetzt. Diese spannen sich im Knäuelbildungsprozess auf und klappen die Streben im Anschluss zusammen, so dass der Knäuelwickel vom Dorn entnommen werden kann. [20], [21] Knäuel mit Hülse werden auf zylindrischen, auf die Hülsengeometrie angepassten Massivdornen geknäuel [22], [23], [24].

Für die Herstellung liefern die Maschinenhersteller Standarddorne, auf denen Produkte hergestellt werden, die diese Anforderungen erfüllen. Hierzu werden standardisierte Rezepte für Knäuelstrategien, die die Knäuelparameter wie bspw. das Kreuzungsverhältnis, die Flyerdrehzahl und den Anstellwinkel vorgeben, eingesetzt. Individuelle Dornformen und darauf abgestimmte Knäuelstrategien für strukturierte Fadenablagen sind nicht bekannt.

Konventionelle Knäuel, die typischerweise im Haushalt oder Handwerk eingesetzt werden, weisen also eine bestimmte Anwendung und einen dafür charakteristischen Aufbau auf. Dieser variiert nur bzgl. materialtypischer Anforderungen und der Endanwendung und ist dadurch gekennzeichnet, dass das Garnmaterial möglichst stabil

und gleichmäßig auf dem Dorn verteilt wird. Die Einstellung verschiedener Parametersätze, die insbesondere aus dem Kreuzungsverhältnis und dem Anstellwinkel bestehen, ist der einzige technologische Einflussfaktor auf den Knäuelaufbau. Der Einfluss der Fadenspannung im Knäuelprozess auf die Knäuelbildung und damit auf die Masse des Knäuels ist nicht bekannt. Lediglich der Bedarf einer geringen und konstanten Fadenspannung für ein gleichmäßiges Knäuelgewicht wird in [37] beschrieben.

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf die Knäuelbildung beim konventionellen Knäueln

Einflussparameter	Beschreibung des Einflusses beim konventionellen Knäueln
Drehzahl des Dorns und des Flyers	<ul style="list-style-type: none"> • Sind gekoppelt über das Kreuzungsverhältnis und beeinflussen den Knäuelaufbau • Typischer Flyerdrehzahlbereich: 350 bis 2000 U/min [25], [26] • Limitierung der Flyerdrehzahl über die Größe des Knäuels. [27], [28]
Kreuzungsverhältnis	<ul style="list-style-type: none"> • Beschreibt das Verhältnis von Flyer- zu Dornumdrehungen • Typischer Wertebereich: 2,0 bis 12,0 [29], [30], [31]. • Hat Einfluss auf die Struktur, Optik, Gewicht und Dichte des Knäuels [32]. • Erhöhung bewirkt Absenkung der Drehzahl des Dorns
Anstellwinkel	<ul style="list-style-type: none"> • Winkel zwischen Dornachse und der Horizontalen [33] • Ermöglicht die Fadenablage auf den Stirnseiten des Knäuels und Einstellung der Packungsdichte • Typischer Wertebereich: ca. 10° bis 85°
Dorne	<ul style="list-style-type: none"> • Kollabierbare Metallstrebendorne, Expansionsdorne in verschiedenen Standardgrößen [20], [21], [35] • Meist vom Maschinenhersteller vorgegeben [19]
Garnmaterial	<ul style="list-style-type: none"> • Naturfasergarne, Bindfäden, Handstrickgarne (Acryl), Papiergarne [10]

2.1.2 Entwicklungsziele beim konventionellen Knäueln

Ein wichtiges Entwicklungsziel beim Knäuelprozess ist es bis heute, eine definierte Optik hinsichtlich der einzelnen Wicklungslagen einzustellen, die den Kundenerwartungen entsprechen müssen. Es sind bspw. nationale Besonderheiten zu berücksich-

tigen, die sich jedoch ausschließlich auf optische aufmachungstechnische Gesichtspunkte wie das Gewichtsvolumenverhältnis des Knäuels beziehen. [34] Auch die Positionierung des Garnanfangs im Inneren des Knäuels ist sichtbar oder unsichtbar einstellbar, das Garnende wird meist innerhalb des Knäuels platziert [12]. Als technischer Gesichtspunkt wird die Aufmachung auf die Weiterverarbeitung abgestimmt [35], [36].

Ein konstantes Knäuelgewicht wird umgesetzt über eine geringe, konstante Fadenspannung in der Garnzuführung [37]. Auch werden einfache Fadenbremsen entwickelt, die sich dann automatisch einschalten, wenn der Wickelflügel bzw. Flyer die Drehzahl reduziert [18].

Ferner werden wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt, denen insbesondere umfassende Prozessautomatisierungen an den eigentlichen Knäuelprozess geschuldet sind. Automatisierungen in der Zuführung von Hülsen über Magazine [23], in der automatischen Abnahme der fertigen Knäuel [19] und in Banderolierprozessen, die meist noch auf der Knäuelmaschine erfolgen, bilden den Schwerpunkt der Entwicklungen. [36], [31]

Der Fokus der Entwicklungsarbeiten liegt, wie dargestellt, auf der Optimierung des bestehenden Knäuelprozesses insbesondere hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte und der Aufmachungsform des Produkts. Technologische Entwicklungsarbeiten am Knäuelprozess sind nicht bekannt.

2.2 Strukturknäueltechnik

Die Strukturknäueltechnik ist eine Technologie zur Herstellung von faserbasierten dreidimensionalen Körpern. Ein Strukturknäuel ist ein Wickelkörper, der über den Strukturknäuelprozess hergestellt wurde. [8], [38]

Ein Strukturknäuel wird aus mindestens einem durchgängigen Garnsystem hergestellt. Für technische Anwendungen können technische Garne eingesetzt werden. Einschränkungen bzgl. garnspezifischer Eigenschaften können aktuell nicht getroffen werden, da diese im Stand der Technik nicht vorliegen. Der Strukturknäuel wird typischerweise nicht mehr abgezogen. Erfolgt eine Konsolidierung der Garnlagen zu einem eigenständigen Bauteil, so spricht man von einem Strukturknäuelbauteil [38]. Die Konsolidierung kann bspw. über das Aufschmelzen von garnseitig integrierten Thermoplastkomponenten oder über ein zusätzliches Klebstoffsystem erfolgen [6], [9], [8].

Das Prinzip der Strukturknäuelbildung basiert auf der konventionellen Knäueltechnik. Auch hier rotiert der fadenführende Flyer um den ebenfalls rotierenden Dornkörper. Dieser ist um den Anstellwinkel zur Horizontalen gekippt. Eine detaillierte Betrachtung der technologischen Zusammenhänge der Rotationsbewegungen des Flyers und des Dorns ist nicht bekannt. Der Einfluss des Anstellwinkels auf den Strukturknäuelaufbau wurde bislang in [38] qualitativ untersucht.

2.2.1 Strukturknäuelbildung und Aufbau des Strukturknäuels

Strukturknäuel weisen eine definierte Fadenablage auf, das bedeutet, dass die Ablagepunkte der Garne auf dem Dornkörper auf diesen oder auf die Anwendung abgestimmt sind. Diese Forderung ergibt sich nicht nur aus mechanischen Eigenschaften von Strukturknäueln, sondern auch, wenn höherfunktionale Garne exakt im Bauteil platziert werden sollen. Sollen bspw. leichte Verstärkungsstrukturen erzeugt werden, so können Rippen- und Wabenstrukturen erzeugt werden. Diese zeichnen sich durch eine große Stabilität bei gleichzeitig geringem Materialeinsatz und mit einem geringen Eigengewicht auf.

Strukturwicklungen bestehen damit aus einer definierten Anzahl an Garnlagen. Der Faden wird dabei auf einem dreidimensionalen Dornkörper auf allen Ebenen $((x,y), (x,z), (y,z))$ definiert abgelegt. Dem Leichtbaugedanken folgend wird nur so viel Garnmaterial eingesetzt, wie es die Anwendung erfordert. Hieraus ergeben sich geringe Aufbauhöhen und damit geringe Wandstärken. Anders als beim konventionellen Knäuel steht also die Ausbildung einer spezifischen Packungsdichte weniger stark im Vordergrund. Auch eignen sich die meisten typischen Strukturwicklungen nicht für Abzugsprozesse.

Als Grundlage fehlen aktuell notwendige Begriffe und Definitionen, die eine einheitliche, reproduzierbare Beschreibung der Strukturknäuelbildung ermöglichen. Auch eine grundlegende Untersuchung der garnseitigen Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung wurde noch nicht durchgeführt.

2.2.2 Entwicklungsarbeiten in der Strukturknäueltechnik

In [9] werden die bislang erarbeiteten grundlegenden Zusammenhänge der Strukturknäueltechnik erläutert. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag an den DITF Denkendorf bislang auf der Technologieentwicklung, auf der Entwicklung neuer Dornkonzepte und der Erarbeitung von geeigneten Materialien und Materialkombinationen für die wirtschaftliche und anforderungsorientierte Herstellung von technischen Strukturknäuelbauteilen.

Bislang sind außer den Arbeiten an den DITF keine Entwicklungsarbeiten im Bereich der Strukturknäueltechnologie bekannt. An den DITF wurde erfolgreich eine leichte, textile Druckbehälterarmierung mit integrierter garnbasierter Sensorik entwickelt. Hauptanwendungsgebiet ist der Einsatz als leichter, formenangepasster Druckbehälter für pneumatische Linienaktoren in Bauanwendungen. Zum Einsatz kommen insbesondere Polyestergerne. [38] Eine erste Untersuchung der Strukturknäuelaufbauten liefert [38], die die Grundlage für diese Arbeit darstellt. In Tabelle 2 sind die durchgeführten und noch ausstehenden Entwicklungsarbeiten gegenüber gestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die durchgeführten und über die noch offenen Arbeiten

Durchgeführte Entwicklungsarbeiten	Offene Entwicklungsarbeiten
Grundlegende, größtenteils empirisch ermittelte Zusammenhänge der Strukturknäueltechnik	Grundlegende, ganzheitliche Untersuchung des Prozesses und der technologischen Einflussfaktoren
Anwendungsorientierte Entwicklung von Dornkörperkonzepten	Mathematische Berechnung der Fadenablage auf verschiedenen Dornformen
Anwendungsorientierte Entwicklung von Materialien und Materialkombinationen	Untersuchung des Einflusses der Eigenschaften typischer Garne auf die Strukturknäuelbildung

In weiteren Forschungs- und Industrieprojekten wurden neue Maschinenkomponenten entwickelt, bspw. neue Dornkörperkonzepte. Der Entwicklungsschwerpunkt lag hierbei auf der wirtschaftlichen, automatisierbaren Umsetzung verschiedener Dornkörperformen.

Die Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Strukturknäueltechnik zeigen alle eine klare Richtung. Die Stärke der Technologie wird nicht im klassischen Bereich der Faserverbundtechnik gesehen, bei dem häufig der Grundsatz „minimales Gewicht bei maximaler Festigkeit“ im Vordergrund steht. Vielmehr sollen bei der Strukturknäueltechnologie – äquivalent zur Strukturspultechnologie – schwerpunktmäßig dreidimensionale Strukturkörper für angepasste Leichtbauanwendungen entwickelt werden, die weniger sehr hohen Festigkeitsansprüchen genügen, sondern vielmehr wirtschaftliche Lösungen aufzeigen. Denkbar sind leichte Dämpfungs- oder Crashelemente, die über die präzise abgelegten Garne eine materialeffiziente Lastabtragung ermöglichen.

2.3 Zusammenfassung und Abgrenzung

Die Strukturknäueltechnik ist eine Technologie, die Potentiale für den Einsatz in technischen Anwendungen bietet. Insbesondere die Möglichkeit, Garne über die kompletten Stirnseiten der Dornkörper abzulegen, stellt eine große Erweiterung im Vergleich zur Strukturspultechnik dar. Ein wirtschaftlicher Einsatz in technischen Anwendungen wird erzielt über den Einsatz von preisgünstigem, auf dem Markt gut verfügbarem Garnmaterial wie bspw. Polypropylen- oder Polyestergerne, einer vergleichsweise einfachen Maschinenteknik sowie einem sehr hohen Automatisierungsgrad, der wiederum durch die konventionelle Knäueltechnik gefördert wird [9].

Für eine reproduzierbare, wirtschaftliche Herstellung von technischen Bauteilen durch die Strukturknäueltechnik ist die Kenntnis dieser Struktur-Eigenschaftsbeziehungen von großer Bedeutung. Nur mit einer Kenntnis der Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung und einem grundlegenden Verständnis dieser kann die Strukturknäueltechnik für wirtschaftliche, reproduzierbare technische Anwendungen erschlossen werden.

Hierfür erforderliche grundlegende technologische Zusammenhänge beim Strukturknäuelprozess sind, wie in Tabelle 3 gezeigt, heute nicht bekannt.

Tabelle 3: Zusammenfassende Gegenüberstellung des Entwicklungsstands der Knäuel- und der Strukturknäueltechnik

Entwicklungsziel	Konventionelle Knäueltechnik	Strukturknäueltechnik
Prozessautomatisierung	Etabliert, bspw. Knäuelabnahme, Schneiden	Großes Potential vorhanden, noch nicht umgesetzt
Beherrschung des Prozesses	Standardrezepturen und –dorne vorhanden	Grundlegende Zusammenhänge für technische Anwendungen noch unbekannt.
Anstellwinkel	In Standardrezepten hinterlegt. Ziel: Einstellung großvolumiger Knäuel	Technolog. Untersuchungen fehlen. Ziel: Anpassung auf Dornkörper und des garnfreien Bereichs an Stirnseiten.
Kreuzungsverhältnis	In Standardrezepten hinterlegt. Ziel: Packungsdichte und Stabilität des Knäuels	Technologische Untersuchungen fehlen. Ziel: anwendungsangepasste Fadenablage.
Typ. Wertebereiche für Prozessparam.	Liegen in Standardrezepturen vor.	Liegen nicht vor. Drehzahlen und Anstellwinkel wurden noch nicht technologisch untersucht.
Maschinenelemente Dorn und Flyer	Einbindung in Standardrezepturen ohne systematische Untersuchung	Dorn und Flyer wurden noch nicht technologisch untersucht.
Fadenspannung	Einfluss auf die Fadenablage nicht bekannt.	Einfluss auf die Fadenablage nicht bekannt.
Bereich des freien Fadens	Wurde so noch nicht identifiziert.	Untersuchungen liegen noch nicht vor.
Eingesetztes Garnmaterial	Grobe Acrylgarne, Naturfasergarne, Papiergarne werden gut beherrscht.	Feine PP- und PES-Typen, systematische Untersuchung liegt noch nicht vor.
Berechnungsmodell	Fadenablage kann noch nicht rechnerisch bestimmt werden.	Fadenablage kann noch nicht rechnerisch bestimmt werden.

3 Ziel, Arbeitshypothesen und Lösungsweg

Ziel dieser Arbeit ist es, die grundlegenden Struktur-Eigenschaftsbeziehungen des Strukturknäuelprozesses zu erarbeiten und zu analysieren. Hierzu gehört eine erstmalige Definition der relevanten strukturknäueltechnologischen Begriffe und der Zusammenhänge bei der Strukturknäuelbildung. Die technologischen Einflüsse der zentralen Maschinenelemente Flyer, Dorn und Dornbalken auf die Strukturknäuelbildung werden erarbeitet mit dem Ziel eines systematischen Überblicks über die Technologie.

Ein wichtiger Fokus liegt auf der Analyse der garnseitigen Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung. Diese erlauben in Ergänzung zu den knäueltechnologischen Einflussfaktoren eine Aussage zur Stabilität und Reproduzierbarkeit des Prozesses. Die gefundenen technologischen Zusammenhänge werden in ein Berechnungsmodell überführt, durch das die Fadenablage bei der Strukturknäuelbildung auf verschiedenen Dornkörpern rechnerisch bestimmt werden kann.

Über das erarbeitete Berechnungsmodell und mit der Kenntnis der technologischen Zusammenhänge der Strukturknäuelbildung wird ein grundlegendes Verständnis des Strukturknäuelprozesses geschaffen, das als Grundlage für die Bewertung der Beknäuelbarkeit und damit für eine ressourcenoptimierte Entwicklung von dreidimensionalen Strukturbauteilen für technische Anwendungen genutzt werden kann.

Für die Zielerreichung in dieser Arbeit werden drei **Arbeitshypothesen** aufgestellt und überprüft:

- (1) Mit der Definition und der Analyse der technologischen Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Fadenablage sowie durch die Untersuchung der relevanten Maschinenelemente wird ein grundlegendes technologisches Verständnis der Strukturknäuelbildung geschaffen.
- (2) Wenn die Einflussfaktoren des Garns auf die Strukturknäuelbildung bekannt sind, kann eine Aussage über die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Strukturknäuelprozesses getroffen werden.
- (3) Mit einem Berechnungsmodell, das auf der Definition und Analyse der knäueltechnologischen Einflussfaktoren basiert, wird eine Möglichkeit geschaffen, die Fadenablage auf verschiedenen Dornkörperformen rechnerisch zu bestimmen.

Für die Überprüfung der Arbeitshypothesen werden fünf Teilziele definiert, welche den Rahmen dieser erstmaligen technologischen Untersuchung feststecken und gleichzeitig den Lösungsweg abbilden. In Abbildung 4 sind die Parameter und Zu-

sammenhänge gezeigt, die in den Teilzielen (TZ) analysiert werden. Gleichzeitig erfolgt in dieser systematischen Untersuchung die Überprüfung der Arbeitshypothesen.

Die Teilziele eins, zwei und drei werden für die Überprüfung der **ersten Arbeitshypothese** bearbeitet. Es werden als **erstes Teilziel** die knäueltechnologischen Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung definiert und untersucht. Besonderes Augenmerk wird auf die Maschinenelemente Flyer, Dorn und Dornbalken gelegt. Die Strukturknäuelbildung wird systematisch analysiert und die Einflüsse der verschiedenen Flyer- und Dorn Drehzahlen untersucht. Es erfolgt die Ermittlung und Untersuchung der Einflussfaktoren, nämlich der Dorn- und Flyer Drehzahlen, des Anstellwinkels und der Position und Geometrie des Dorns auf die Fadenablage anhand von Strukturknäuelversuchen und deren Auswertung. Über eine Betrachtung des Einflusses des Anstellwinkels und der Positionierung des Dornkörpers im Knäuelraum wird ein Beitrag zur Aussage über die Beknäuelbarkeit verschiedener Dornkörpergrundformen geschaffen.

Als **zweites Teilziel** wird die Fadenspannung beim Strukturknäueln für verschiedene Dornkörpergrundformen untersucht. Ziel ist es hierbei, ein tieferes Verständnis der auftretenden Fadenspannungen zu erarbeiten. Die Abhängigkeit der Fadenspannung von der Flyer Drehzahl und die Fadengrundspannung werden untersucht. Hierfür werden systematische Strukturknäuelversuche mit einem in den Fadenlauf integrierten Fadenspannungssensor durchgeführt und ausgewertet.

Der Bereich des freien Fadens wird als **drittes Teilziel** untersucht. Anhand dieser Untersuchung kann das Verhalten des Garns im Strukturknäuelprozess und die Zusammenhänge desselben mit der Flyer Drehzahl und der Fadengrundspannung beurteilt werden. Hierfür werden High-Speed-Aufnahmen durchgeführt und ausgewertet.

Es werden als **viertes Teilziel** und zur Überprüfung der **zweiten Arbeitshypothese** die garnseitigen Einflussfaktoren Feinheit und Haarigkeit auf den Strukturknäuelprozess und insbesondere auf die Strukturknäuelbildung untersucht. Hierfür werden Strukturknäuelversuche mit unterschiedlichen, typischen Garnen durchgeführt und bewertet.

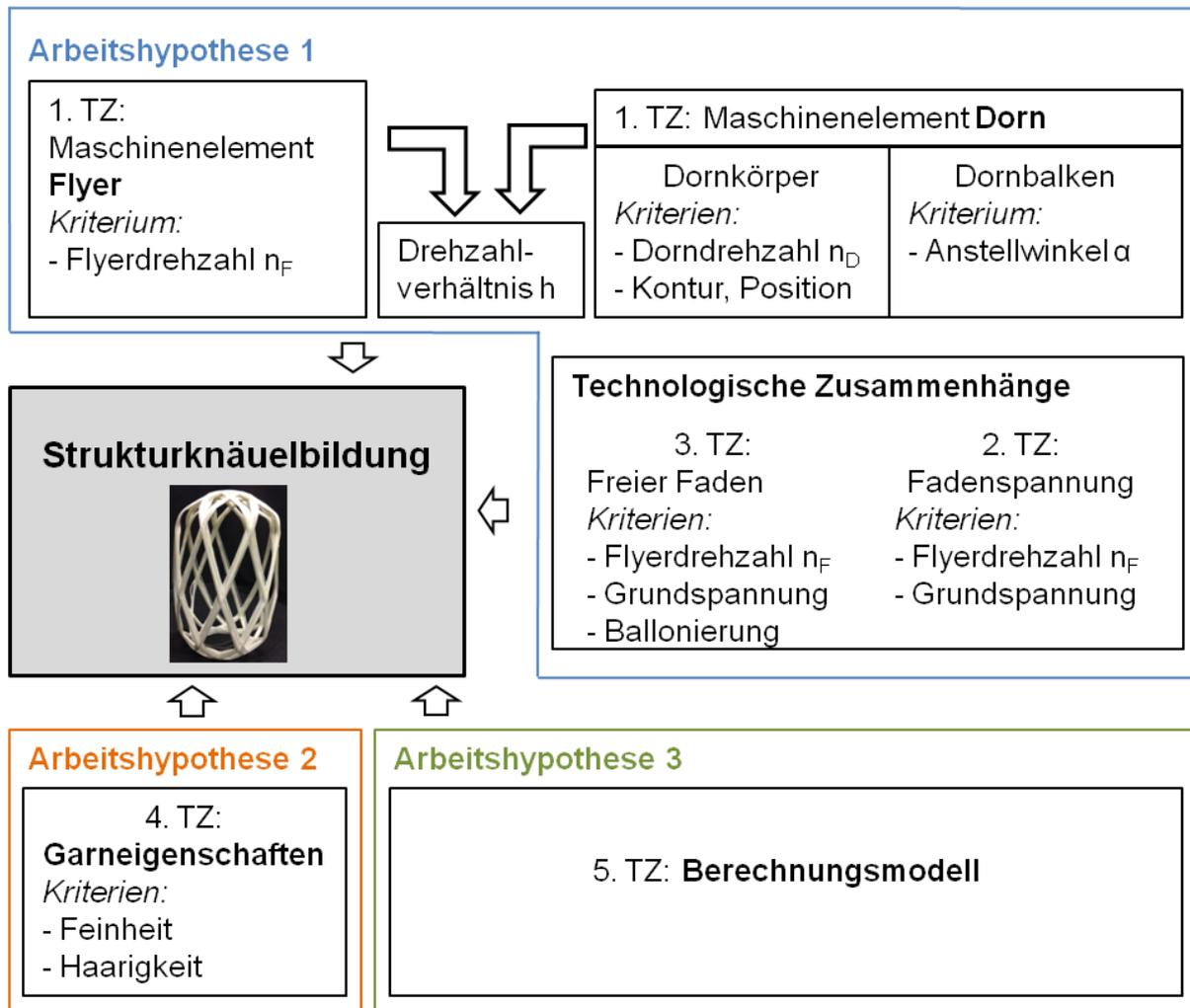


Abbildung 4: Darstellung der Zusammenhänge der zu untersuchenden Parameter, der Teilziele und der Arbeitshypothesen der Arbeit

Schließlich wird als **fünftes Teilziel** und zur Überprüfung der **dritten Arbeitshypothese** ein Modell der Fadenablage aufgestellt, über das der Einfluss der vorher untersuchten Parameter Anstellwinkel, Drehzahlverhältnis, Geometrie und Position des Dornkörpers im Knäuelraum dargestellt werden kann. Dies ergänzt die Erkenntnisse der technologischen Untersuchungen. Das Ziel ist es hierbei, die Ablagepunkte des Garns für verschiedene Dornkörpergrundformen zu berechnen. Die Zusammenhänge, die aus den vorangegangenen Betrachtungen des Strukturknäuelprozesses hervorgegangen sind, sowie die Bedingungen und Voraussetzungen werden aufgezeigt.

4 Grundlegende Zusammenhänge und Maschinenelemente bei der Strukturknäuelbildung

Ein Strukturknäuel wird als Bauteil in technischen Bereichen eingesetzt und muss folglich neuen Anforderungen bzgl. der Fadenablage und damit zusammenhängend des strukturellen Aufbaus genügen. Für eine Nutzung der Strukturknäueltechnik für technische Anwendungen müssen zudem die Prozessgrößen und die Zusammenhänge der Einflussfaktoren auf eine definierte Strukturknäuelbildung bekannt sein.

4.1 Begriffe und Definitionen am Fadenlauf, im Knäuelraum und am Strukturknäuel

In der Strukturknäueltechnik treten neue, strukturknäuelspezifische Begriffe auf, die zum Teil in keinem anderen textilen Prozess so gebräuchlich sind. Da heute in der Literatur keine eindeutigen, durchgängigen Definitionen der für die grundlegende Analyse in dieser Arbeit relevanten, strukturknäueltechnischen Begrifflichkeiten zu finden ist, werden die nachfolgenden Definitionen z.T. erstmalig festgelegt.

4.1.1 Definition des Fadenlaufs

Für den Fadenlauf beim Strukturknäuelprozess werden die vier Bereiche

- I: Fadenzuführung
- II: Flyerbereich
- III: Bereich des freien Fadens
- IV: Fadenablage

definiert. Diese sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Die Bereiche bilden den Strukturknäuelprozess im Ganzen ab und werden, wie nachfolgend beschrieben, in dieser Arbeit untersucht.

Die Vorlagespule beim Strukturknäueln befindet sich in dieser Darstellung auf der linken Seite. Das Garn kann in der Fadenzuführung (I) über mehrere Umlenk- und Fadenleitorgane geführt werden. Diese beeinflussen insbesondere die Fadengrundspannung. Deren Relevanz im Strukturknäuelprozess wird in Kapitel 5.2.5 untersucht.

Im Anschluss befindet sich der Flyerbereich (II). Der Flyer wird in Kapitel 4.6 näher beschrieben. Der Eintritt des Garns in den Flyerbereich erfolgt zentriert, d.h. ohne dass das Garn einen Berührungspunkt aufweist. Das Garn tritt an der Austrittsöse des Flyers wieder aus. Die Geometrie des Flyers in Form des Radius r_F zwischen der

Austrittsöse und seiner Rotationsachse stellt eine wichtige Größe für das Modell der Fadenablage dar.

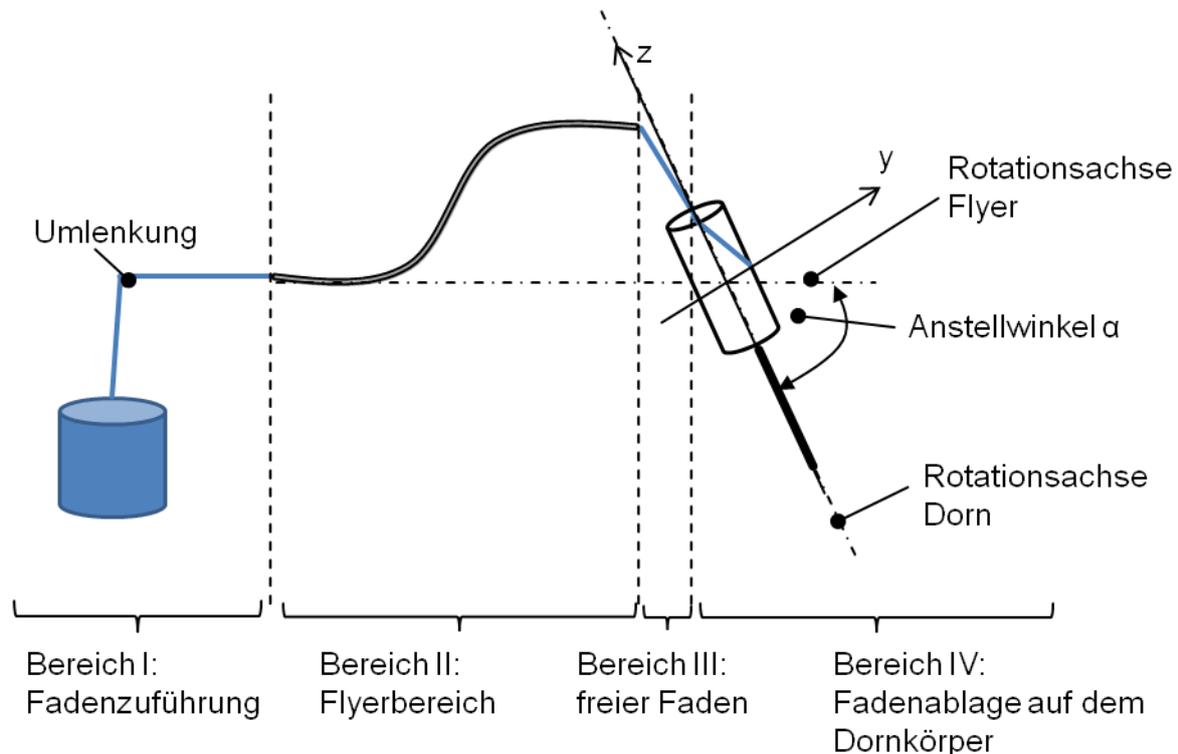


Abbildung 5: Bereiche des Fadenlaufs beim Strukturknäueln

An der Austrittsöse beginnt der Bereich des freien Fadens (III). Das ist der Bereich zwischen der Austrittsöse am Flyer und dem Punkt der Fadenablage auf dem Dornkörper. Das Garn liegt hier berührungsfrei, unter einer Fadengrundspannung gespannt, vor. Der Bereich des freien Fadens wird in Kapitel 5.4 untersucht.

Die Fadenablage erfolgt schließlich auf dem Dornkörper (IV). Durch die Außenkontur des Dornkörpers werden die Form und die Fadenablage des Strukturknäuels definiert. Der Dornkörper wird in Kapitel 4.6 analysiert, die Abhängigkeit der Fadenablage wird in Kapitel 4.7 untersucht.

4.1.2 Definitionen im Knäuelraum

Für die technologische Untersuchung des Strukturknäuelprozesses in dieser Arbeit werden die folgenden Begriffe definiert.

Flyer (Bereich II): Der Flyer ist das hauptfadenführende Element beim Strukturknäuelprozess. Er rotiert um seine Rotationsachse. Das Garn wird durch den röhrenförmigen Flyer geführt und tritt an dessen Ende durch die Austrittsöse A aus. Nach

Durchlaufen des Bereichs des freien Fadens wird das Garn dann auf dem Dornkörper abgelegt. Der Flyerradius r_F wird vom Garnaustrittspunkt an der Austrittsöse A zur Flyerrotationsachse gemessen.

Flyerbahn (Bereich III): Der Flyer rotiert beim Strukturknäueln um die Flyerrotationsachse, die Austrittsöse am Ende des Flyers beschreibt so die Flyerbahn mit dem Radius r_F . Im betrachteten Koordinatensystem wird die Flyerbahn als Ellipse dargestellt, da die Flyerrotationsachse nicht in der y-Achse liegt. Dies ist in Abbildung 6 rechts (B) dargestellt. Um eine Fadenablage auf dem Dornkörper zu gewährleisten, muss die Ebene durch die Flyerbahn den Dornkörper schneiden. Damit das Garn auf der Stirnseite abgelegt wird, muss die Ebene durch die Flyerbahn die Stirnseite des Dornkörpers schneiden. In Kapitel 4.6.1 wird die Bewegungskurve der Flyerbahn im betrachteten Koordinatensystem gezeigt.

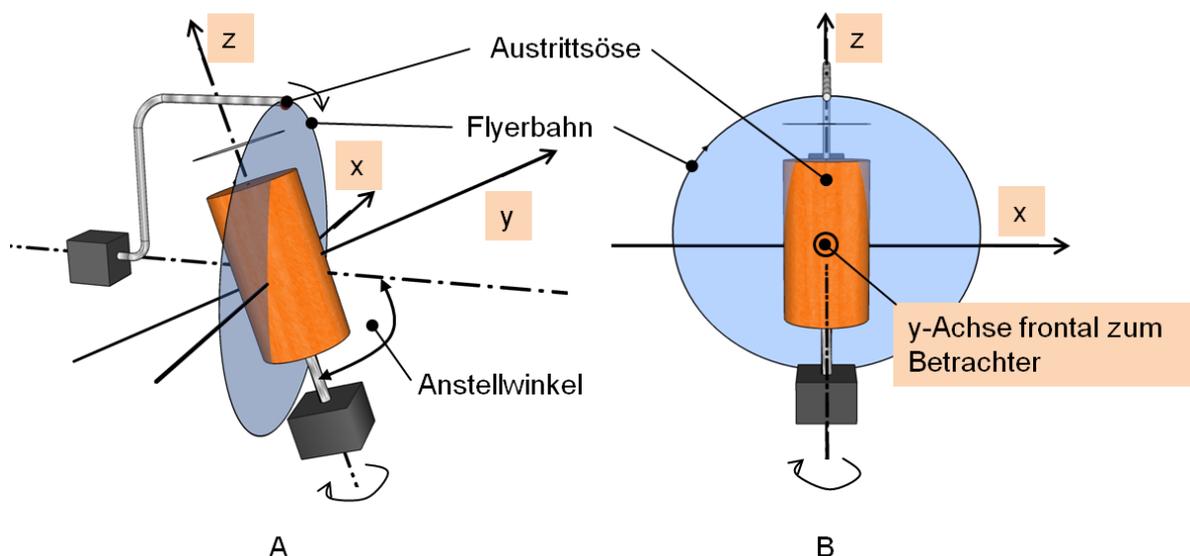


Abbildung 6: Zwei Ansichten des Knäuelraums mit Koordinatensystem, Flyer, Zylinderdorn und Flyerbahn

Knäuelraum (Bereiche III und IV): In Abbildung 6 ist der Knäuelraum schematisch dargestellt. Dieser wird vom rotierenden Flyer mit Radius r_F umschlossen.

Koordinatensystem (Bereiche III und IV): Es gilt das in Abbildung 7 gezeigte Koordinatensystem. Die z-Achse liegt in der Rotationsachse des Dorns, die x-Achse liegt rechtwinklig zur z-Achse und in der Horizontalen. Die y-Achse liegt rechtwinklig zur x- und z-Achse.

Dorn, Dornkörper, Dornbalken (Bereich IV): Die Fadenablage beim Strukturknäueln erfolgt auf dem Dornkörper. Gemeinsam mit dem Dornschaft bildet der

Dornkörper den Dorn. In dieser Arbeit wird ein zylindrisch geformter Dornkörper eingesetzt mit dem Radius r_D und der Gesamthöhe $H_D = 2h_D$. Außerdem wird ein kugelförmiger Dornkörper eingesetzt mit dem Radius r_D . Der Dorn ist über den Dornschaft mit dem Dornbalken verbunden. Der Dornbalken schließt mit der Horizontalen den Anstellwinkel α ein.

Dornkörperposition im Knäuelraum (Bereich IV): Für die Beschreibung der Position des Dornkörpers im Knäuelraum wird für diese Arbeit die folgende Nomenklatur eingeführt.

- Zentrum-Zentrum-Position: der Mittelpunkt des Dornkörpers und der Mittelpunkt der Flyerbahn liegen im Ursprung des Koordinatensystems (vgl. blaue Darstellung in Abbildung 7).
- Dornzentrum (z_D)-Zentrum-Position: der Mittelpunkt des Dornkörpers liegt um den Wert des Dornzentrums auf der z-Achse (z_D) zum Ursprung des Koordinatensystems verschoben und der Mittelpunkt der Flyerbahn liegt im Ursprung des Koordinatensystems (vgl. grüne Darstellung in Abbildung 7).
- Zentrum-Flyerverschiebung (ΔK)-Position: der Mittelpunkt des Dornkörpers liegt im Ursprung des Koordinatensystems, der Mittelpunkt der Flyerbahn liegt um die Flyerverschiebung ΔK zum Ursprung des Koordinatensystems verschoben (vgl. orange Darstellung in Abbildung 7).

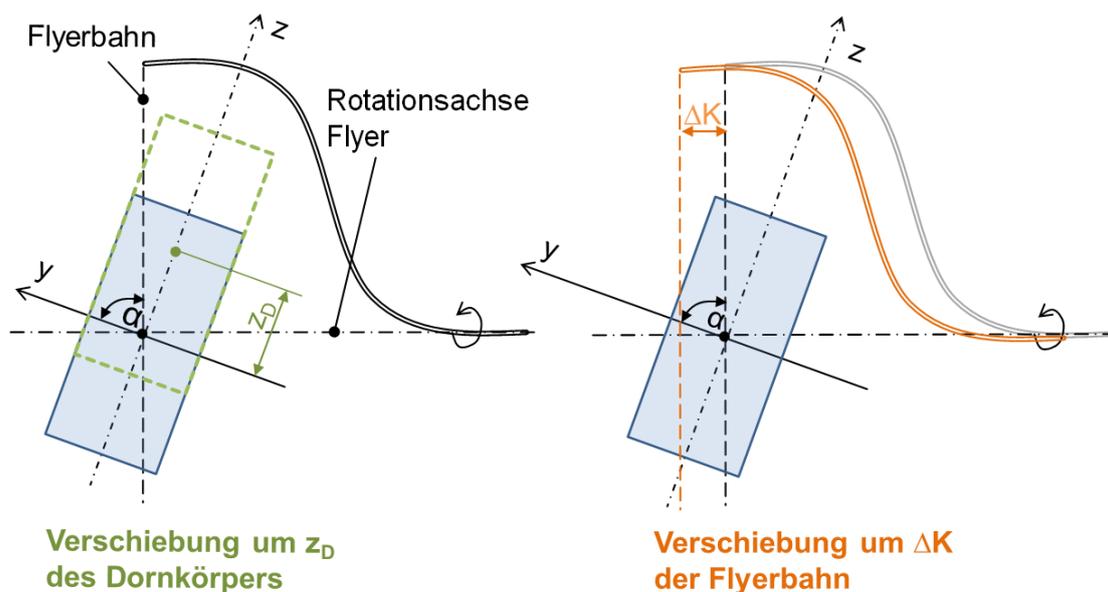


Abbildung 7: Darstellung eines Dornkörpers im Knäuelraum. z_D : Position des Dornzentrums auf der z-Achse, ΔK : Verschiebung der Flyerbahn entlang der Flyerrotationsachse, α : Anstellwinkel

4.1.3 Definitionen am Strukturknäuel

Wie eingangs bereits beschrieben, zeichnet sich ein Strukturknäuel insbesondere durch die Eigenschaft aus, dass die Fadenablage auf mindestens einer der beiden Stirnflächen erfolgt. In Abbildung 8 ist ein konsolidierter Strukturknäuel mit einer deutlichen Rippenstruktur dargestellt. Für den Strukturknäuel werden die folgenden Definitionen festgelegt.

Kopfseite: Stirnseite, die dem Dornbalken abgewandt ist. Eine Ebene durch die Kopfseite schneidet die Rotationsachse des Dorns (vgl. Abbildung 8).

Fußseite: Stirnseite, die dem Dornbalken zugewandt ist. Hier befindet sich immer eine Öffnung für die Dornaufnahme. Eine Ebene durch die Fußseite schneidet die Rotationsachse des Dorns (vgl. Abbildung 8).

Mantelseite: Seite des Knäuels, die zwischen den Stirnseiten liegt. Eine Ebene durch die Mantelseite muss die Rotationsachse des Dorns nicht zwingend schneiden, sondern kann auch parallel dazu liegen (vgl. Abbildung 8).

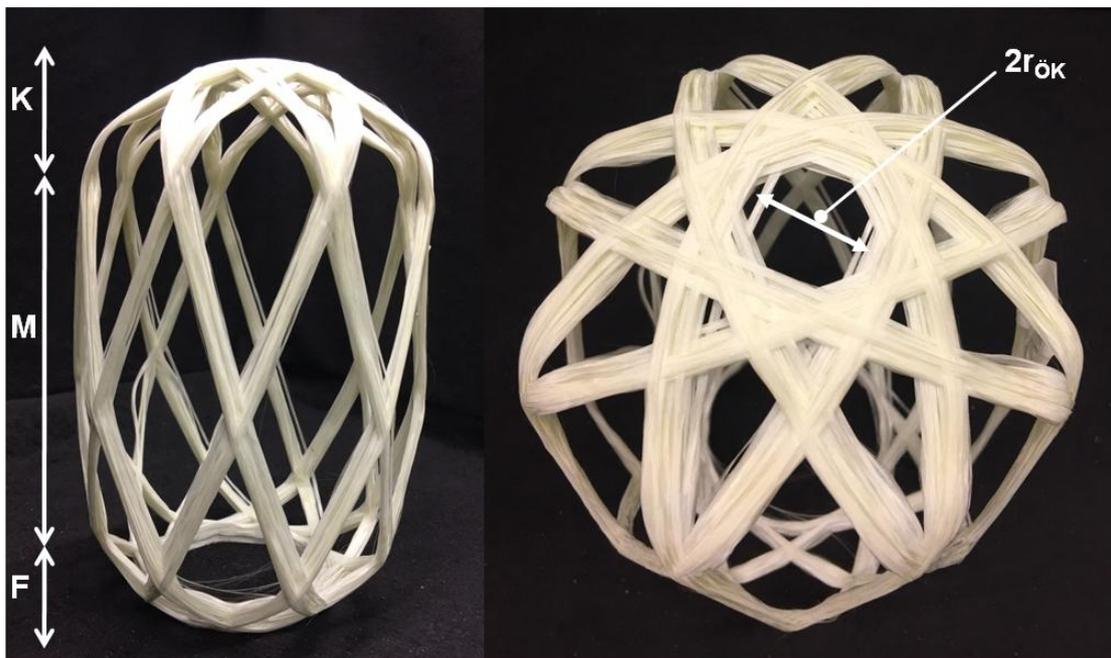


Abbildung 8: Darstellung eines Strukturknäuels mit markierter Kopf (K)-, Mantel (M)- und Fuß- (F)seite und Bereich ohne Garnabdeckung mit Radius $r_{\text{ök}}$

Bereiche ohne Garnabdeckung: Beim Strukturknäueln ist es abhängig von den gewählten Parametern möglich, an der Stirn- und Fußseite je einen Bereich zu erzeugen, auf dem kein Garn abgelegt wird. Diese garnfreien Bereiche werden durch $r_{\text{ök}}$ (Kopfseite) und $r_{\text{öf}}$ (Fußseite) beschrieben (vgl. Abbildung 8). Befindet sich der

Dornkörper im Knäuelraum in Zentrum-Zentrum-Position, so sind $r_{ÖK}$ und $r_{ÖF}$ gleich groß.

Garnlage (Lage): Jede Strukturknäuelwicklung besteht aus mehreren Flyerumdrehungen und mindestens einer Dornumdrehung. Liegt das Garn nach einer endlichen Anzahl an Flyer- und Dornumdrehungen wieder exakt auf der Ablagespur der vorhergehenden Umdrehungen ab, so beginnt hier die nächste Garnlage. Die Anzahl der Flyer- und Dornumdrehungen pro Lage wird über das Drehzahlverhältnis h definiert.

4.2 Einflussfaktoren auf den Strukturknäuelprozess

In Abbildung 9 sind die Einflussfaktoren auf den Strukturknäuelprozess aufgeführt. Der Strukturknäuelprozess ist hierfür in die vier charakteristischen Bereiche des Fadenlaufs eingeteilt (vgl. Kapitel 4.1.1).

<p>Bereich I: Fadenzuführung</p> <p>Fadengrundspannung</p>	<p>Bereich II: Flyerbereich</p> <p>Flyerdrehzahl n_F</p> <p>Flyerradius r_F</p>
<p>Bereich III: freier Faden</p> <p>Ballonierungseffekte</p> <p>Garnfeinheit</p> <p>Fadengrundspannung</p>	<p>Bereich IV: Fadenablage</p> <p>Dornkörperform</p> <p>Dornkörperposition</p> <p>Dorndrehzahl n_D</p> <p>Ablagepunkte</p> <p>Wicklungsart</p> <p>Anstellwinkel</p>

Abbildung 9: Relevante Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung in den vier Bereichen des Fadenlaufs

Diese Einteilung bildet die Grundlage für die systematische Untersuchung des Strukturknäuelprozesses in dieser Arbeit. Sie beinhaltet eine Untersuchung der Strukturknäuelbildung unter Einbeziehung der relevanten Einflussgrößen und Prozessparameter.

4.3 Definition von Strukturknäueln und der Strukturknäueltechnik

Es ist keine einheitliche Definition und Untersuchung von Strukturknäueln bekannt. Aus diesem Grund wird nachfolgend eine Definition und damit Abgrenzung der Strukturknäueltechnik formuliert, welche die Grundlage für diese Arbeit darstellt.

Ein Strukturknäuel ist eine dreidimensionale Struktur, bei der das Garn auf einer (sphärisch gekrümmten) Fläche abgelegt wird. Im definierten Koordinatensystem bedeutet das, dass die Fadenablage auf allen drei Ebenen durch die x-, die y- und die z-Achse erfolgt. Das Garn wird bei Strukturknäueln typischerweise nicht wieder vom Dornkörper abgezogen. Strukturknäuel können geschlossene Wicklungen aufweisen, aber auch ausgeprägte Rippen- und Gitterstrukturen werden umgesetzt.

Typische Strukturknäuelaufbauten (sog. Hauptwicklungen) bestehen aus Strukturwicklungen mit meist geringerer Aufbauhöhe und präzise platzierten Garnen. Anstatt auf der Erzielung spezifischer Packungsdichten liegt beim Strukturknäueln der Fokus auf der Präzision und der Gleichmäßigkeit der Fadenablage auf dem Dornkörper.

Anders als beim konventionellen Knäueln wird das Drehzahlverhältnis beim Strukturknäueln nicht auf einen typischen Bereich begrenzt, sondern nimmt beliebige, anwendungsabhängige Werte größer Null an. Eine Strukturhauptwicklung entsteht nur dann, wenn der Flyer und der Dorn je eine Rotationsbewegung ausführen. Hierdurch werden die Ablagepunkte des Garns auf dem Dornkörper definiert und können so bspw. an mechanische Anwendungen angepasst ausgelegt werden. Sonderformen der Strukturknäuelwicklung sind Bauchbinden, Strukturumfangwicklungen und Strangwicklungen (vgl. Kapitel 4.6.2).

Die Voraussetzung für die Strukturknäuelbildung wird in dieser Arbeit also so definiert, dass die beiden im Drehzahlverhältnis h betrachteten Drehzahlen des Flyers und des Dorns jeweils nicht Null werden dürfen.

4.4 Grundprinzip der Strukturknäuelbildung

Beim Strukturknäuelprozess wird das Vorlagegarn (Bereich I) über den Flyer (Bereich II) geführt und auf dem Dornkörper abgelegt (Bereich IV). Wie beim konventionellen Knäueln rotieren der Flyer und der Dorn jeweils um ihre Rotationsachsen. Der Dornbalken samt Dorn wird über den Anstellwinkel geneigt. [9] Durch die Neigung des Dornbalkens bzw. des Dorns können die Ablagepunkte des Garns auf den Stirnseiten variiert und auf die Dornkörperform angepasst werden.

Beim hier betrachteten Strukturknäuelprozess dreht sich der fadenführende Flyer im Uhrzeigersinn, die Austrittsöse läuft auf der Flyerbahn. Der Dorn rotiert in entgegengesetzter Richtung. Es erfolgt dann also eine Fadenablage auf dem Dornkörper, da der Dornkörper und der Flyer in unterschiedliche Richtungen bzw. entlang unterschiedlicher Achsen rotieren. Der Fadenabzug erfolgt durch die Aufwicklung des Garns auf dem Dornkörper, somit ist die Drehzahl des Dorns die prozessgeschwindigkeitsbestimmende Größe. Zudem muss das Garn anfänglich auf dem Dornkörper fixiert sein und geeignete Parametersätze des Drehzahlverhältnisses sowie des Anstellwinkels gewählt werden. Das Garn wird stets entlang des kürzesten Wegs abgelegt. Dieser ist insbesondere abhängig von der Dornkörpergestalt (vgl. Kapitel 4.7.1).

In Abbildung 10 sind die beschriebenen und relevanten Größen im in dieser Arbeit definierten Koordinatensystem dargestellt. Zu beachten ist, dass die Rotationsachse des Flyers nicht der y-Achse entspricht. Dadurch wird die Kreisbahn der Austrittsöse am Flyer im Koordinatensystem nicht als Kreis, sondern als Ellipse dargestellt (vgl. auch Abbildung 6).

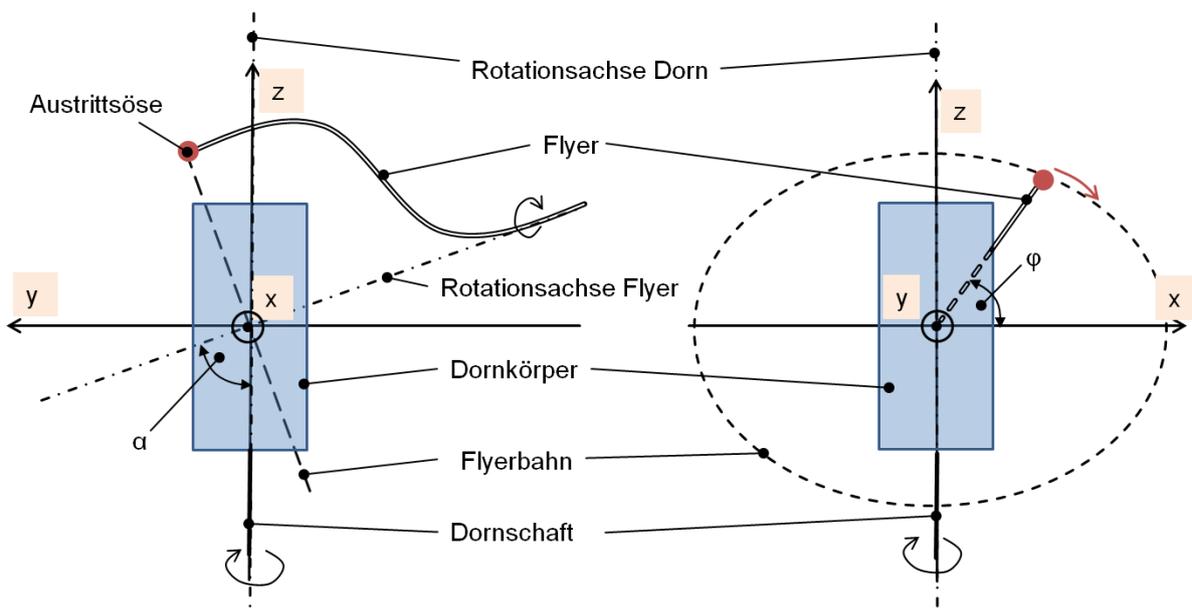


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Zylinderdorns im Koordinatensystem mit Flyer, Rotationsachsen, Flyerbahn. α : Anstellwinkel, φ : Flyerwinkel

Die Position der Austrittsöse im Koordinatensystem wird über den Flyerwinkel φ beschrieben. Der Dorn rotiert mit dem Dornwinkel δ um die z-Achse (vgl. Abbildung 11). Der Anstellwinkel α des Dornbalkens ist der Winkel zwischen den beiden Rotationsachsen (vgl. Abbildung 10). Über eine Verschiebung des Flyers entlang seiner Ro-

tationsachse ΔK als lineare Bewegungsrichtung kann die Position der Flyerbahn bezogen auf die Rotationsachse des Dornkörpers beeinflusst werden (vgl. Abbildung 7).

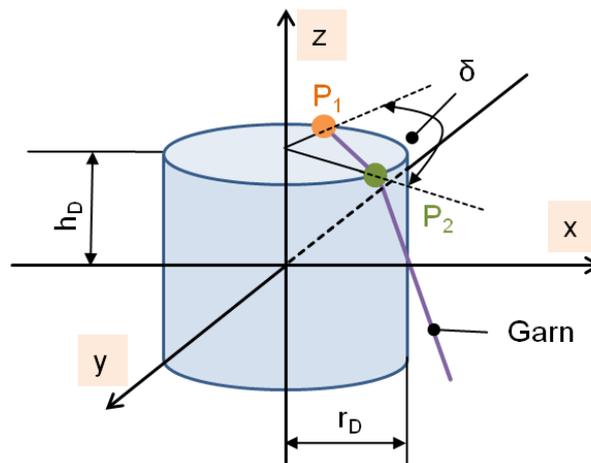


Abbildung 11: Zylinderdornkörper im betrachteten Koordinatensystem mit den aufeinander folgenden Ablagepunkten P_1 und P_2 . δ : Dornwinkel, h_D : Höhe des Dorns, r_D : Radius des Dorns

4.5 Aufbau und Analyse von Strukturhauptwicklungen

Bei Strukturhauptwicklungen erfolgt die Fadenablage definitionsgemäß auf mindestens einer Stirn- und der Mantelseite des Dornkörpers. Für die Untersuchung des Aufbaus von Strukturknäueln werden nun die Ablage- bzw. Verkreuzungspunkte des Garns auf dem Dornkörper betrachtet.

Das Drehzahlverhältnis h bestimmt die Lage der Verkreuzungspunkte und damit den Aufbau der Strukturknäuelwicklung. In dieser Arbeit werden damit erstmalig die beiden Wicklungsarten gerade und wilde Strukturwicklung definiert. Das Drehzahlverhältnis h bestimmt die entstehende Wicklung und wird wie folgt definiert.

$$h = \frac{n_F}{n_D} = \frac{f}{d_L} \quad 4.1$$

f ... Anzahl der Flyerumdrehungen pro abgelegter Lage

d_L ... Anzahl der Dornumdrehungen pro abgelegter Lage

n_F ... Drehzahl des Flyers in 1/min

n_D ... Drehzahl des Dorns in 1/min.

Für eine klare Darstellung insbesondere bei nicht-ganzzahligen Werten kann das Verhältnis als Bruch anstatt als Dezimalzahl dargestellt werden. Durch Kürzen des Bruchs kann die Anzahl der Dornumdrehungen pro Lage (d_L) ermittelt werden. Im gekürzten Zustand ist der Zähler als die Anzahl der Flyerumdrehungen (f) zu lesen, die innerhalb der im Nenner ersichtlichen Dornumdrehungen (d_L) vollzogen werden.

Für die Strukturknäuelwicklung gilt also:

- Die Anzahl der Flyerumdrehungen muss größer sein als die Anzahl der Dornumdrehungen pro Lage, also gilt $h > 0$ sowie $n_D \neq 0$ und $n_F \neq 0$.
- Über das Drehzahlverhältnis können entweder gerade und wilde Strukturhauptwicklungen erzeugt werden.
- Je größer das Drehzahlverhältnis h ist, desto mehr Verkreuzungen bilden sich.
- Die Zahl der Flyerumdrehungen f ergibt die Anzahl der Verkreuzungspunkte auf dem Dornkörper.

Analyse der Fadenablage

Die Analyse der Fadenablage auf den Stirnseiten erfolgt über die Bestimmung der Anzahl sowie des Winkelschritts zwischen den Verkreuzungen λ bzw. den Ablagepunkten an der Außenkante.

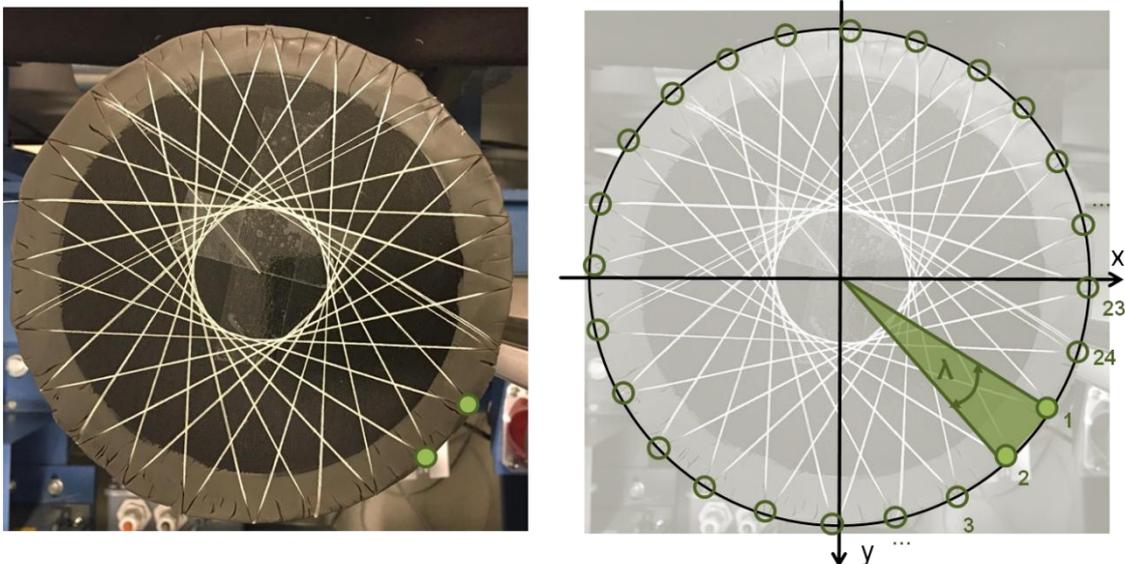


Abbildung 12: Darstellung des Winkelschritts λ (grün) zwischen zwei benachbarten Verkreuzungen, Drehzahlverhältnis $h = 24$ mit 24 Verkreuzungen. Die Ablagepunkte sind mit grünen Kreisen markiert.

Die Betrachtung dieser Winkel gibt Auskunft über die Gleichmäßigkeit der Fadenablage auf den Stirnseiten. Insbesondere Fehler im Strukturknäuelprozess können so erkannt werden. Im in

Abbildung 12 gezeigten Beispiel liegen beim gewählten Drehzahlverhältnis ($h = 24$) 24 Ablagepunkte bzw. Verkreuzungspunkte auf der betrachteten Stirnseite vor. Diese sind mit grünen Kreisen markiert. Der Winkelschritt λ wird wie exemplarisch gezeigt zwischen zwei der Verkreuzungspunkte und dem Mittelpunkt gemessen.

Über

$$\lambda_W = \frac{\omega}{f} \quad 4.2$$

lässt sich der Winkelschritt λ_W des Wickelbilds zwischen zwei benachbarten Ablagepunkten des Garns berechnen. Der Wert f steht hierbei für die Anzahl der Flyerumdrehungen pro einer Lage, der Winkel ω steht für den Flyerwinkel bei einer Garnumdrehung, hier gilt $\omega = 360^\circ$.

Der Winkelschritt δ_F des Dorns pro Flyerumdrehung während des Strukturknäuelprozesses lässt sich durch

$$\delta_F = \frac{\omega}{h} \quad 4.3$$

berechnen. λ_W beschreibt also den messbaren Winkel am Wickelbild, δ_F beschreibt den Winkelschritt des Dorns pro einer Flyerumdrehung während des Wickelvorgangs und damit den Winkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verkreuzungspunkten. Der Unterschied dieser beiden Werte wird in Beispiel 2 der wilden Wicklung verdeutlicht. Für eine Darstellung der Gleichmäßigkeit können die Differenzen des messtechnisch erfassten Winkelschritts (vgl.

Abbildung 12) zum nach (4.2) berechneten Winkelschritt λ_W berechnet und dargestellt werden.

Nachfolgend werden die gerade und die wilde Strukturwicklung beschrieben.

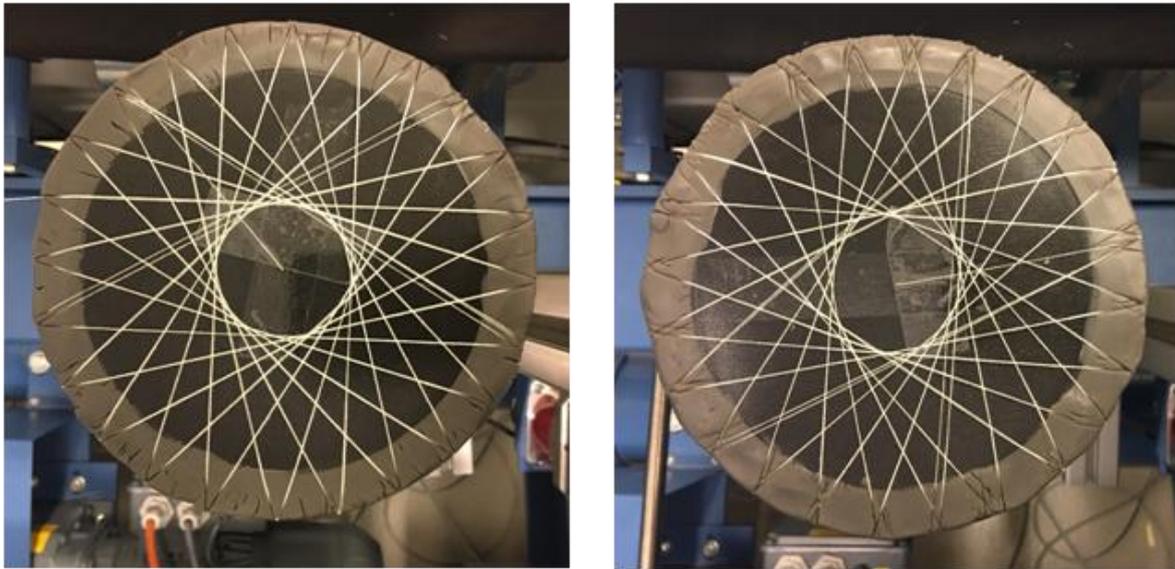


Abbildung 13: Fadenablagen auf dem Zylinderdorn bei einer geraden ($h = 24$; links) und einer wilden ($h = 4,8$; rechts) Strukturwicklung, die das gleiche Wickelbild ergeben.

Gerade Strukturwicklung

Gerade Strukturwicklungen zeichnen sich durch ein ganzzahliges Drehzahlverhältnis aus. Kleine Werte bilden engmaschige Gitterstrukturen aus, große Werte weitmaschige. Die Fadenablage soll an nachfolgendem Beispiel verdeutlicht werden. Die Winkelschritte während dem Knäuelvorgang entsprechen denen des Wickelbilds ($\delta_F = \lambda_W$).

Beispiel 1 für eine gerade Strukturwicklung: Der Flyer rotiert mit einem Drehzahlverhältnis von $h = 24$.

Hieraus ergibt sich $h = 24 = \frac{24}{1}$. Daraus bildet sich die folgende Fadenablage auf der Stirnseite aus. Es gilt nach (4.1)

- Anzahl der Flyerumdrehungen pro Lage: $f = 24$
- Anzahl der Dornumdrehungen pro Lage: $d_L = 1$.

Der Dorn dreht sich nach (4.2) pro einer Flyerumdrehung um den Winkelschritt $\lambda_W = \frac{\omega}{f} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$ weiter. Da außerdem gilt $f = h$ gilt $\lambda_W = \delta_F$. Die Fadenablage erfolgt also bei jeder Flyerumdrehung um 15° versetzt, so dass die Ablage der 25-ten Flyerumdrehung, was der ersten Flyerumdrehung der zweiten Lage entspricht, wieder auf der Bahn der ersten Umdrehung liegt. Die Fadenablage ist in Abbildung 13, links dargestellt.

Wilde Strukturwicklung

Wilde Strukturwicklungen zeichnen sich durch ein nicht-ganzzahliges Drehzahlverhältnis aus. Sie können abhängig vom Drehzahlverhältnis h rasch geschlossene Oberflächen bilden, also solche, bei denen die Außenkontur des Dornkörpers annähernd komplett mit Garn bedeckt ist. Dadurch sind die Gitterstrukturen schwerer voneinander zu differenzieren und wirken häufig unregelmäßig

Bei gleicher Anzahl an Flyerumdrehungen pro Lage bilden sich zu den geraden Strukturwicklungen mit gleichen Flyerumdrehungen f identische Winkelschritte λ_W zwischen den Ablagepunkten im Wickelbild aus. Jedoch legen sich die einzelnen Fadenlagen nicht nacheinander ab, sondern erfahren eine Ondulierung innerhalb einer Lage, da der Dorn sich pro Lage mehr als einmal um die eigene Achse dreht (vgl. Kapitel 4.5.1). Die Winkelschritte während dem Knäuelvorgang weichen von denen des Wickelbilds ab ($\delta_F \neq \lambda_W$).

Beispiel 2 für eine wilde Strukturwicklung: Der Flyer rotiert mit einem Drehzahlverhältnis von $h = 4,8$ um den Dorn.

Hieraus ergibt sich $h = 4,8 = \frac{24}{5}$. Nach vollständigem Kürzen lässt sich aus dem Zähler ablesen, dass der Flyer 24-mal pro Lage rotiert ($f = 24$). Pro Lage rotiert der Dorn fünfmal ($d_L = 5$). Mit der sechsten Dornumdrehung beginnt die zweite Lage und das Garn liegt auf der Bahn der ersten Rotation. Der Dorn dreht sich also pro Flyerumdrehung während des Strukturknäuelprozesses nach (4.3) um $\delta_F = \frac{360^\circ}{4,8} = 75^\circ$ weiter. Hieraus ergibt sich, dass sich nach der ersten Dornumdrehung bzw. nach der sechsten Flyerumdrehung die Winkelschritte $\lambda_W = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$ ausbilden. Die Fadenablage ist in Abbildung 13, rechts dargestellt.

In Abbildung 13 sind die in den beiden Beispielen beschriebenen Fadenablagen gezeigt. Es sind bei beiden Drehzahlverhältnissen 24 Verkreuzungen erkennbar, die von der gleichen Anzahl an Flyerumdrehungen gebildet werden. Die erfassten Winkelschritte λ sind jeweils nahezu identisch.

In Tabelle 4 ist die gerade und die wilde Strukturwicklung vergleichend gegenüber gestellt.

Tabelle 4: Vergleich der geraden und der wilden Strukturwicklung

	Gerade Strukturwicklung	Wilde Strukturwicklung
Drehzahlverhältnis	Ganzzahlig, d.h. eine Dornumdrehung pro Lage.	Nicht-ganzzahlig, d.h. mehr als eine Dornumdrehung pro Lage.
Ondulierung	Innerhalb einer Lage nicht vorhanden	Innerhalb einer Lage vorhanden.
Fadenablage und Wickelbild	$\lambda_W = \delta_F$, d.h. der Winkelschritt des Wickelbilds ist identisch zum Winkelschritt während des Strukturknäuelprozesses.	$\lambda_W \neq \delta_F$, d.h. der Winkelschritt des Wickelbilds weicht vom Winkelschritt während des Strukturknäuelprozesses ab.
Struktur	i.d.R. klare Gitterstrukturen, Wiederholung der Fadenablage ab Beginn der zweiten Dornumdrehung.	Chaotisch wirkende Gitterstruktur, bilden rasch geschlossene Oberflächen.

4.5.1 Ondulierung

Mit einer Ondulierung wird eine teilweise Umschlingung bzw. eine Garnumlenkung von zwei sich verkreuzenden Garnen bezeichnet [41]. Diese ist schematisch in Abbildung 14 dargestellt. Die Umlenkung der grau dargestellten Garne einer zweiten Garnlage im Querschnitt wird hierbei nicht dargestellt.



Abbildung 14: Schematische Darstellung eines ondulierten Garns und einer zweiten Garnlage

Ondulierungen können in textilen Strukturen zu zweierlei Effekten führen. Durch eine hohe Ondulierung wird die Stabilität der textilen Struktur aufgrund von Reibungseffekten zwischen den Garnen erhöht. Gleichzeitig liegt ein Teil des Garns nicht mehr in der kraftaufnehmenden Richtung. In Faserverbundbauteilen treten durch diese mikro- und makromechanischen Einflüsse insbesondere in technischen Anwendungen negative Effekte hinsichtlich mechanischer Eigenschaften wie Zug- und Druckfestigkeit auf. [39], [40], [41]

Bei den in Abbildung 13 gezeigten Beispielen 1 und 2 ist ersichtlich, dass es mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen möglich ist, die gleiche Anzahl an Verkreuzungen auf dem Dornkörper umzusetzen, in beiden Fällen ist nach (4.2) $f = 24$ (vgl. Tabelle 5). Die beiden Strukturen ($h = 24,0$ und $h = 4,8$) unterscheiden sich jedoch in ihrem strukturellen Aufbau der einzelnen Lagen zueinander.

Bei der geraden Strukturwicklung rotiert der Dorn zwischen zwei Flyerumdrehungen um den berechneten Winkelschritt $\delta_F = \lambda_W$ weiter. Die Anzahl der Dornumdrehungen pro Lage beträgt $d_L = 1$. Hieraus ergibt sich innerhalb einer Lage ein ondulierungs-freier Knäuelwickelaufbau bei der geraden Strukturwicklung. Bei der wilden Strukturwicklung gilt wiederum $\delta_F \neq \lambda_W$, die Anzahl der Dornumdrehungen pro Lage ist größer Null (im betrachteten Beispiel gilt $d_L = 5$, vgl. Tabelle 5) bei gleicher Anzahl an Flyerumdrehungen und damit gleicher Anzahl an Verkreuzungspunkten.

Tabelle 5: Vergleich der Ondulierung bei der geraden und der wilden Strukturwicklung

	Gerade Strukturwicklung	Wilde Strukturwicklung
Drehzahlverhältnis	$h = 24$	$h = 4,8$
Anzahl Verkreuzungspunkte auf Stirnseite	$f = 24$	$f = 24$
Anzahl Dornumdrehungen pro Lage	$d_L = 1$	$d_L = 5$
Winkelschritt des Dorns pro Flyerumdrehung nach (4.3)	$\delta_F = 15^\circ$	$\delta_F = 75^\circ$
Winkelschritt im Wickelbild nach (4.2)	$\lambda_W = 15^\circ$	$\lambda_W = 15^\circ$
Ondulierung innerhalb einer Lage	keine	vorhanden

In Abbildung 15 ist die Fadenablage einer geraden Strukturwicklung auf der Stirnseite des Zylinderdorns gezeigt. Die Garne liegen übereinander, ohne dass Ondulierungen innerhalb einer Lage entstehen.

In Abbildung 16 sind die Fadenablagen auf der Stirnseite des Zylinderdorns für eine gerade (oben) und für eine wilde (unten) Strukturwicklung gezeigt. Im unteren Ausschnitt ist eine Fadenlage hervorgehoben, an der die Berührungspunkte mit anderen, vorherigen und anschließenden Fadenlagen markiert sind.

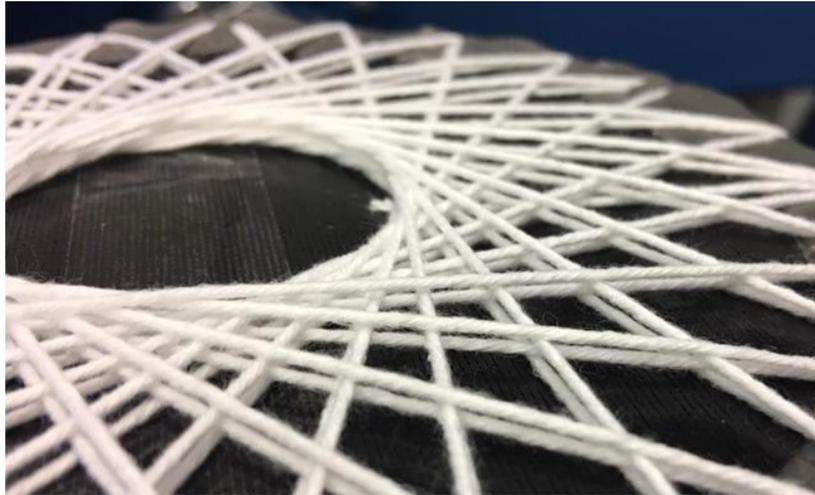


Abbildung 15: Fadenablage einer geraden Strukturwicklung auf dem Zylinderdorn (h = 24) ohne Ondulierung innerhalb einer Lage

Die grünen Markierungen zeigen die Berührungspunkte, an denen das Garn der hervorgehobenen Fadenlage über den vorherigen bzw. anschließenden Fadenablagen liegt. Die roten Markierungen zeigen diejenigen Berührungspunkte, bei denen die hervorgehobene Fadenlage unten den vorherigen bzw. anschließenden Fadenablagen liegt. Diese beiden Arten der Berührungspunkte wechseln sich bei der wilden Strukturwicklung ab, das Garn liegt innerhalb einer Lage onduliert vor. Die grau markierten Berührungspunkte resultieren aus vorhergehenden Fadenlagen und werden nicht betrachtet.

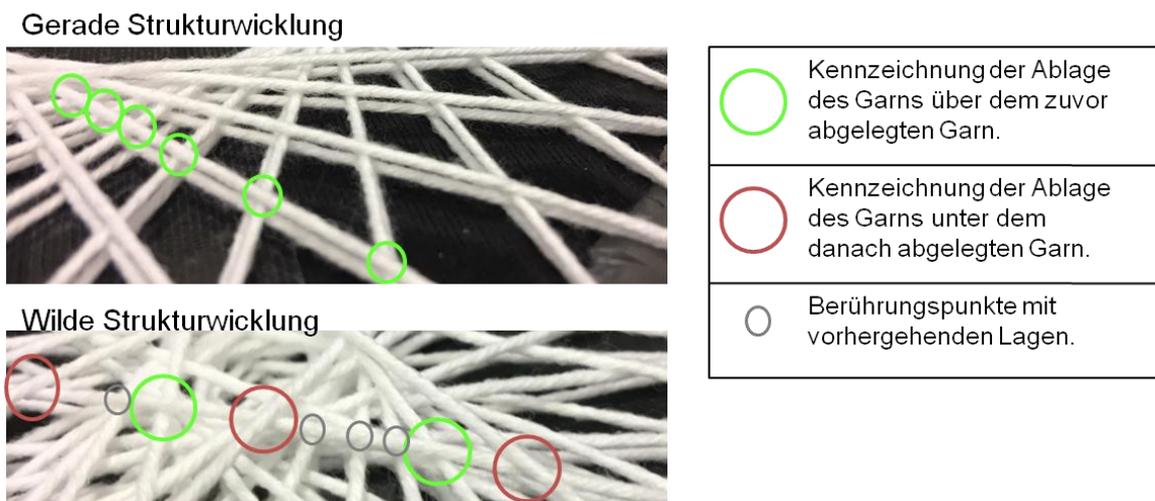


Abbildung 16: Fadenablage einer geraden (oben) und einer wilden (unten) Strukturwicklung mit gekennzeichnete Ondulierung bei der wilden Strukturwicklung (unten)

Über das Drehzahlverhältnis können beim Strukturknäuelprozess Wicklungen mit und ohne Ondulierungen erzeugt werden. Gerade Strukturwicklungen zeigen keine Ondulierungen innerhalb einer Lage und unterliegen so geringeren inneren Reibungskräften zwischen den Garnen als wilde Strukturwicklungen. Der Wickelaufbau einer geraden Strukturwicklung ist durch die reduzierten Verkreuzungspunkte in sich weniger stabil als der einer wilden Strukturwicklung. Jedoch wirken bei einer geraden Strukturwicklung die Garne stärker bei einer Kraftbeaufschlagung in Garnrichtung, da keine ondulierungsbedingte Auslenkung aus der Krafrichtung vorliegt.

Die Höhe der Ondulierung ist abhängig vom Garndurchmesser und vom gewählten Drehzahlverhältnis. Große Ondulierungswinkel, wie sie bspw. bei Näh- oder Flechtprozessen auftreten können, sind beim Strukturknäueln nicht zu erwarten [41].

4.5.2 Fehler in der Fadenablage

Veränderungen in der Fadenablage, die nicht den gezeigten Zusammenhängen entsprechen, werden in dieser Arbeit als Fehler in der Fadenablage behandelt. Die Fadenablage erfolgt hierbei anders als beabsichtigt und wird als Fehler bewertet. Die Fehler treten insbesondere einmalig bzw. in nicht periodischen Abständen auf.

Über die Ermittlung der Winkelschritte λ zwischen den Verkreuzungspunkten an der Außenkante können beim Strukturknäuelprozess die zwei Fehlertypen Abschläger und Abgleiter beschrieben werden.

Weichen die erfassten Winkelschritte λ stark voneinander bzw. vom berechneten Wert λ_w ab, so erfolgt die Fadenablage nicht gleichmäßig. Dies kann beobachtet werden, wenn das Garn auf der Dornoberfläche abrollt bzw. vom Flyer mitgerissen wird. Dann erfolgt keine geodätische Fadenablage. Abbildung 17 zeigt diesen Fehler des Typs Abgleiter in der Fadenablage schematisch bei einem fehlerhaft abgelegten Verkreuzungspunkt.

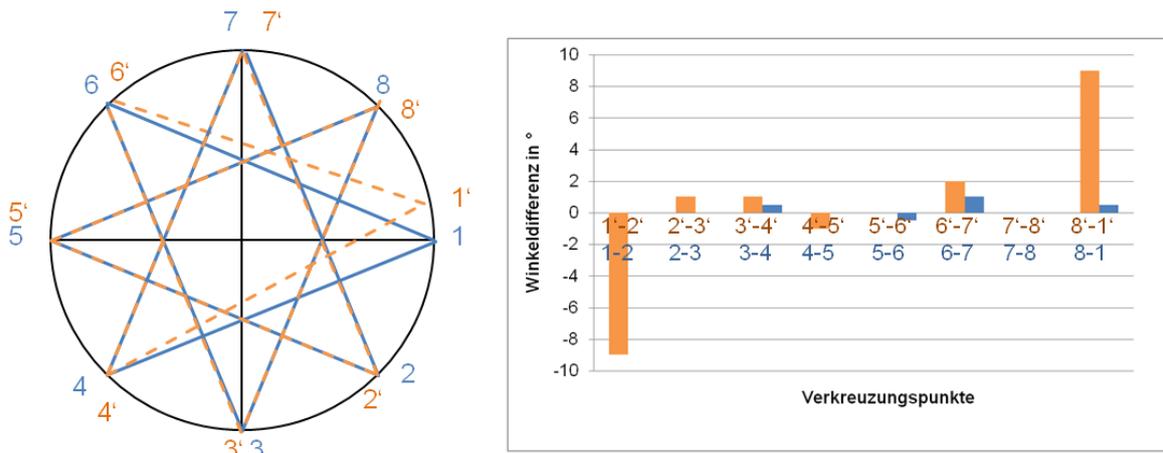


Abbildung 17: Verschiebung eines Verkreuzungspunktes (blau: korrekte Fadenablage, orange: fehlerhafte Fadenablage), rechts: Darstellung der Winkelschritte als Differenz zum berechneten Wert λ_W

Ebenso ist dargestellt, wie die Winkelschritte zwischen jeweils zwei der markierten Ablagepunkte beispielhaft verlaufen können. Die Winkelschritte sind wiederum als Differenzen zum nach (4.2) rechnerisch bestimmten Wert λ_W aufgetragen. Im dargestellten Beispiel beträgt das Drehzahlverhältnis $h = 8,0$ einer geraden Strukturwicklung, was sich in den acht Verkreuzungspunkten 1 bis 8 der korrekten Fadenablage (in blau dargestellt) bzw. 1' bis 8' (der fehlerhaften Fadenablage, in orange dargestellt) zeigt. Es ergibt sich nach (4.2) ein berechneter Winkelschritt von $\lambda_W = 40^\circ$. Die im Diagramm rechts dargestellten Werte sind nun die Abweichungen der erfassten Winkelschritte zwischen zwei Ablagepunkten von diesem Wert. Die Abweichungen zwischen den Punkten 1' und 8' und 1' und 2' sind deutlich erhöht. Das Garn liegt also nicht am definierten Ablagepunkt sondern deutlich von ihm verschoben ab.

Nach dem gleichen Schema können auch alle Verkreuzungspunkte von der theoretischen Ablage abweichen, wodurch sich hohe Werte in den Differenzen zwischen den berechneten und den erfassten Winkelschritten ergeben. Dieser Fall ist schematisch in Abbildung 18 dargestellt.

Wird das Garn auf einer Stirnseite nicht abgelegt, sondern verfehlt seinen ursprünglichen Ablagepunkt, bildet sich ein sogenannter Abschläger aus. Das Garn wird dann vom Flyer direkt mitgerissen und bildet keinen Ablagepunkt auf der Stirnseite aus. Gründe für solch einen Abschläger können falsch eingestellte Parametersätze, bspw. zu große Anstellwinkel, oder eine zu geringe Haftreibung auf der Dornoberfläche sein.

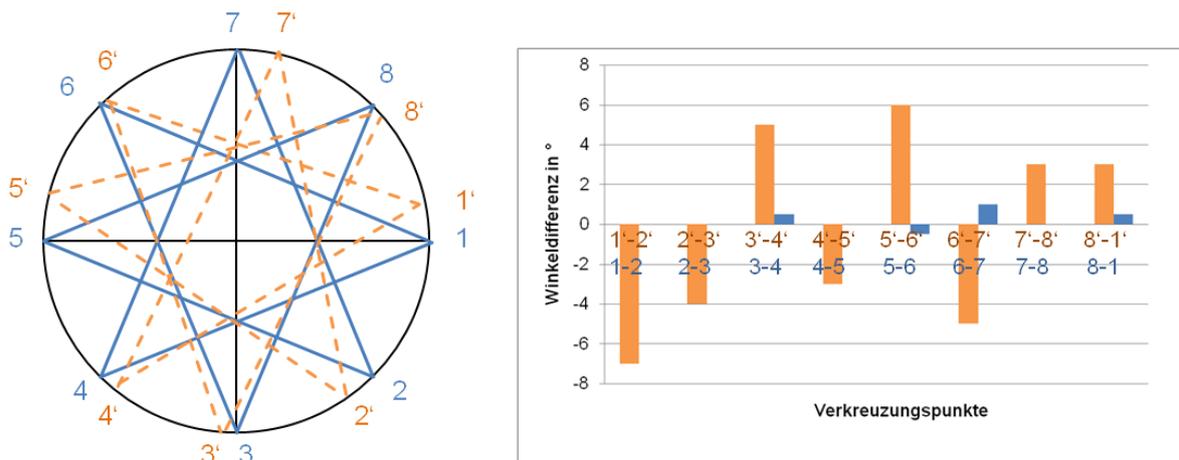


Abbildung 18: Verschiebung mehrerer Verkreuzungspunkte (blau: korrekte Fadenablage, orange: fehlerhafte Fadenablage), rechts: Darstellung der Winkelschritte als Differenz zum berechneten Wert λ_w

4.6 Der Flyer in der Strukturknäueltechnik

Der Flyer ist das Hauptfadenführungselement im Strukturknäuelprozess. Er rotiert um die Flyerachse und definiert so gemeinsam mit dem verwendeten Dornkörper die Position des abgelegten Fadens. Durch dessen Rotationsbewegung um den Dornkörper ist es möglich, dass das Garn auch auf den Stirnseiten abgelegt werden kann.

In Abbildung 19 ist ein typischer s-förmiger Flyer dargestellt. Das Garn tritt in Bereich I (Fadenzuführung) über die Eintrittsöffnung hinein und verlässt den Flyer über die Austrittsöse A in Bereich III (freier Faden). Der Flyerradius r_F wird immer vom Austrittspunkt des Garns, also von der Innenkante, hin zur Flyerrotationsachse gemessen.

4.6.1 Betrachtete Geometrie der Flyerbahn

Die Bewegung der Austrittsöse A am Flyer hat eine hohe Relevanz im Strukturknäuelprozess. Über die Flyerbewegung lassen sich verschiedene Strukturknäuelwicklungen charakterisieren. Zudem stellt die Kenntnis der Flyerbahn im Knäuelraum eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Fadenablage (vgl. Kapitel 7) dar.

Die Flyerbahn lässt sich unter Beachtung der gezeigten Koordinatenachsen und Geometrien wie folgt berechnen. Es liegen die in Abbildung 19 gezeigten geometrischen Zusammenhänge zugrunde. Die Ebene der Flyerbahn verläuft in dieser Darstellung nicht durch den Ursprung des Koordinatensystems.

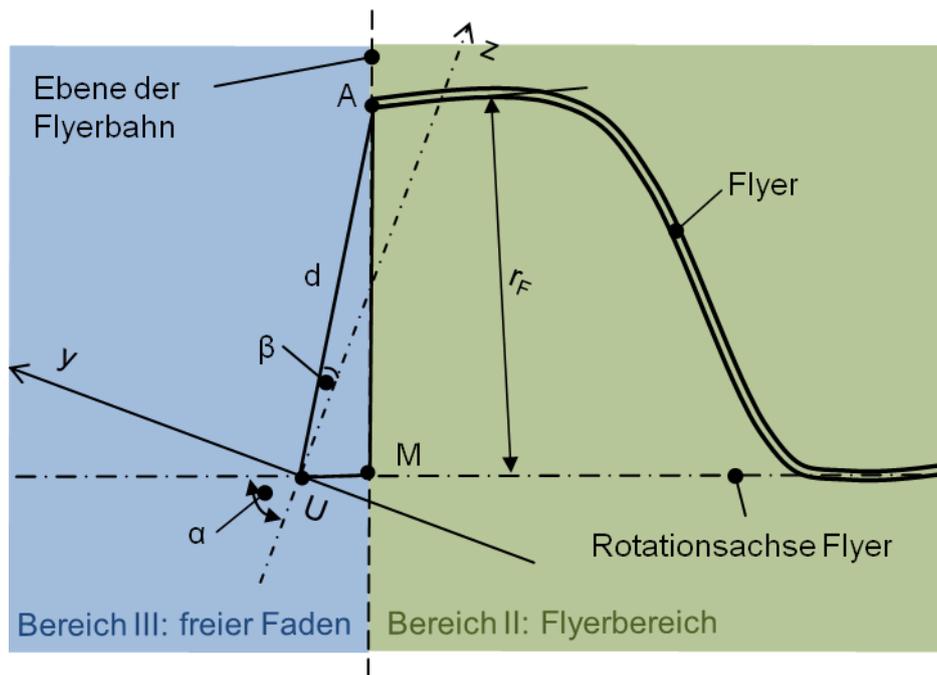


Abbildung 19: Geometrische Zusammenhänge für die Berechnung der Bahn der Flyeraustrittsöse A. M: Mittelpunkt der Flyerbahn, U: Ursprung des Koordinatensystems, d: Verbindung zw. A und U, r_F : Flyerradius, α : Anstellwinkel, β : Hilfswinkel zw. d und z-Achse, φ : Flyerwinkel

Die Austrittsöse A folgt der Flyerbahn, die im gewählten Koordinatensystem eine elliptische Bahn beschreibt. Die Kenntnis der genauen Position der Austrittsöse im Knäuelraum spielt für die Berechnung der Fadenablage eine wichtige Rolle, vgl. hierzu Kapitel 7. Die Bewegung von A auf der Flyerbahn wird durch den Flyerwinkel φ beschrieben.

Die Austrittsöse am Flyer folgt im betrachteten Koordinatensystem den folgenden Koordinaten

$$x_A = r_F \cdot \cos(2\pi - \varphi) \quad 4.4$$

$$y_A = \sin\beta \cdot r_F \cdot \sin(2\pi - \varphi) + y_M \quad 4.5$$

$$z_A = \cos\beta \cdot r_F \cdot \sin(2\pi - \varphi) + z_M \quad 4.6$$

4.6.2 Charakterisierung von Strukturknäuelwicklungen über die Flyerbewegung

Die Flyerbewegung ist eine den Strukturknäuelprozess charakterisierende Größe. Wie in Abbildung 22 - Abbildung 24 dargestellt, kann über die Flyerbewegung eine

Einteilung in verschiedene Strukturknäuelverfahren mit unterschiedlichen Wicklungsergebnissen erfolgen.

Eine nähere Betrachtung der Strukturhauptwicklung beim Strukturknäueln erfolgt in Kapitel 4.5. Die Fadenablage erfolgt hier über die Stirnseiten des Dornkörpers. In Abbildung 20 ist die Hauptwicklung schematisch dargestellt.

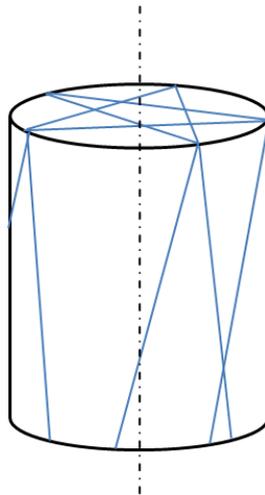


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Strukturhauptwicklung beim Strukturknäueln auf dem Zylinderdorn mit Dornrotationsachse (z-Achse) (blau: Garn)

Neben dieser Strukturhauptwicklung, bei der auf allen drei Ebenen und damit auf den Stirnseiten und auf der Mantelseite Garn abgelegt wird, können beim Strukturknäueln Bauchbinden, Strukturumfangwicklungen und Strangwicklungen erzeugt werden (vgl. Abbildung 21) [38], [27]. Diese drei Wicklungsarten stellen keine eigenständigen Strukturknäuelwicklungen im Sinne dieser Arbeit dar, da das Garn bei der Bauchbinde (A) und bei der Strukturumfangwicklung (B) nicht auf den Stirnseiten des Dornkörpers abgelegt wird. Bei der Strangwicklung (C) erfolgt die Fadenablage zwar auch der Stirnseite, jedoch nicht über die Außenkontur der Stirnseite verteilt. Dies resultiert daraus, da der Dorn im Prozess nicht rotiert, sondern statisch verweilt. Diese Wicklungen können Teilstrukturen von Strukturknäueln sein [38].

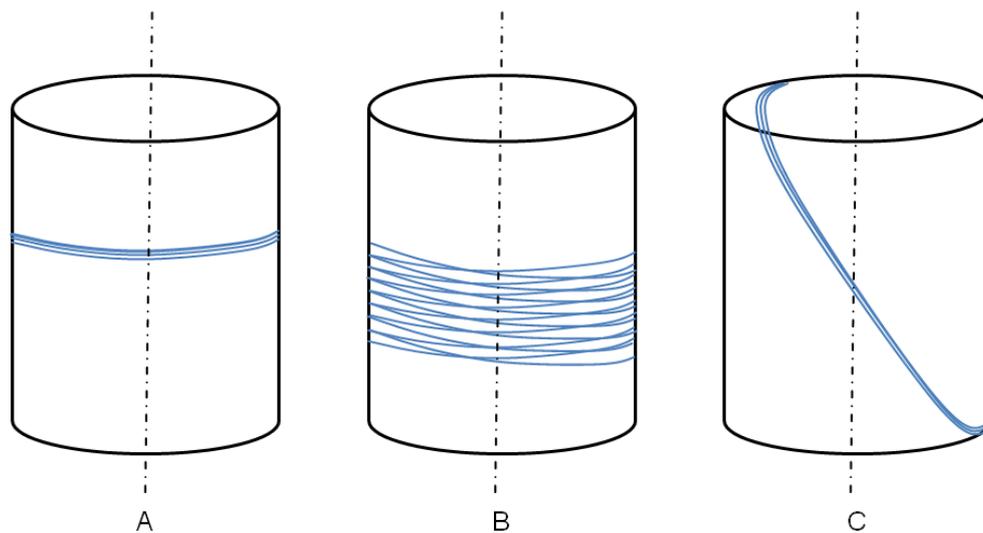


Abbildung 21: Schematische Darstellung einer Bauchbinde (A), einer Strukturumfangswicklung (B) und einer Strangwicklung (C) auf einem zylindrischen Dornkörper

Der Flyer kann drei verschiedene Bewegungsarten durchführen: das statische Verweilen (vgl. Abbildung 22), die Pendelbewegung (vgl. Abbildung 23) und die Rotationsbewegung (vgl. Abbildung 24). Bei der Pendelbewegung bewegt sich der Flyer bzw. die Austrittsöse in einem Flyerwinkelbereich von min. 0° bis max. 180° und kehrt dann jeweils um, wodurch eine oszillierende Pendelbewegung entsteht. Bei der Rotationsbewegung nimmt der Flyerwinkel Werte zwischen 0° und 360° an und vollführt damit eine echte Rotation um die Rotationsachse in die gleiche Richtung. Verweilt der Flyer statisch, so ändert er seine Position im Knäuelraum nicht.

Über die Bewegungen des Dorns und des Dornbalkens erfolgt eine weitere Einteilung in die sich ausbildende Wickelstruktur auf dem Dornkörper. Der Dorn kann kontinuierlich um seine Rotationsachse rotieren oder statisch verweilen. Der Dornbalken kann verschiedene Anstellwinkel annehmen und so eine Pendelbewegung vollführen oder aber ebenfalls statisch verweilen. Dann ändert sich der Anstellwinkel nicht.

Die Hauptrichtung der Flyerrotation wird für diese Arbeit festgelegt und verläuft im Uhrzeigersinn bei einer Betrachtung von vorne. Die Hauptrichtung der Dornrotation wird für diese Arbeit festgelegt und verläuft im Uhrzeigersinn bei einer Betrachtung von oben. Hierauf bezogen werden gegenläufige Bewegungsrichtungen als negativ gesehen.

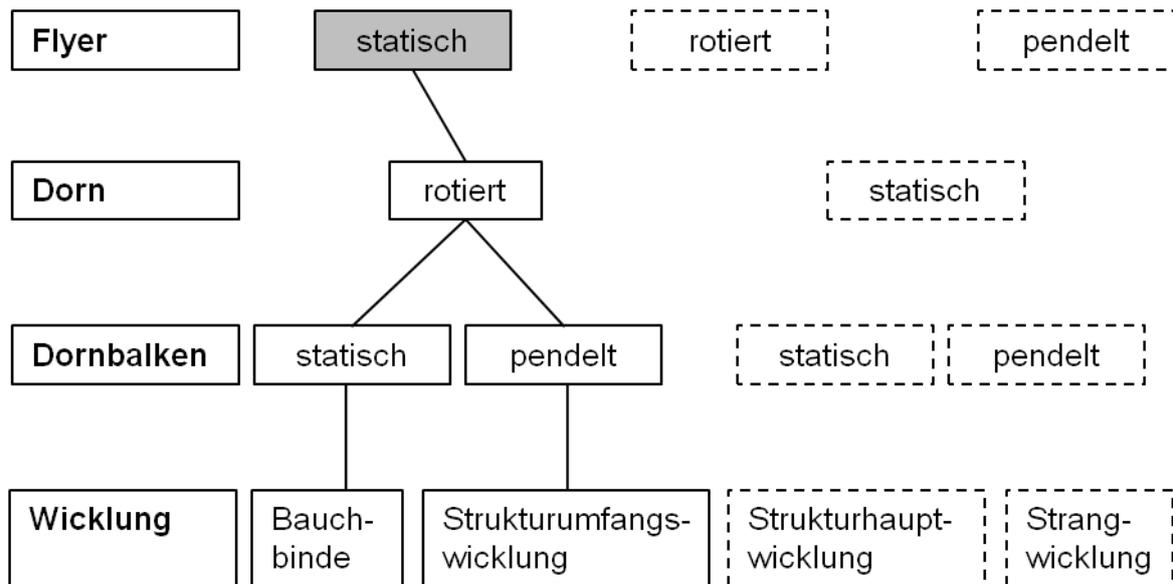


Abbildung 22: Mögliche Wicklungen beim statischen Flyer

In Abbildung 22 sind die möglichen Wicklungen beim statischen Flyer gezeigt. In diesem Fall ist eine Knäuelbildung nur möglich, wenn der Dorn rotiert. Verweilt dieser ebenfalls statisch, findet kein Aufwindeprozess statt, die Fadengeschwindigkeit ist Null. Eine Bauchbinde entsteht beim statischen Flyer, wenn lediglich der Dorn rotiert und der Dornbalken statisch verweilt. Prinzipiell wird hierbei bei jeder Dornrotation eine Garnlage direkt aufeinander abgelegt. Eine Bauchbinde ist in Abbildung 21, Bild A schematisch dargestellt. Eine Strukturumfangswicklung (vgl. Abbildung 21, Bild B) bildet sich aus, wenn der Flyer pendelt und der Dorn dabei rotiert.

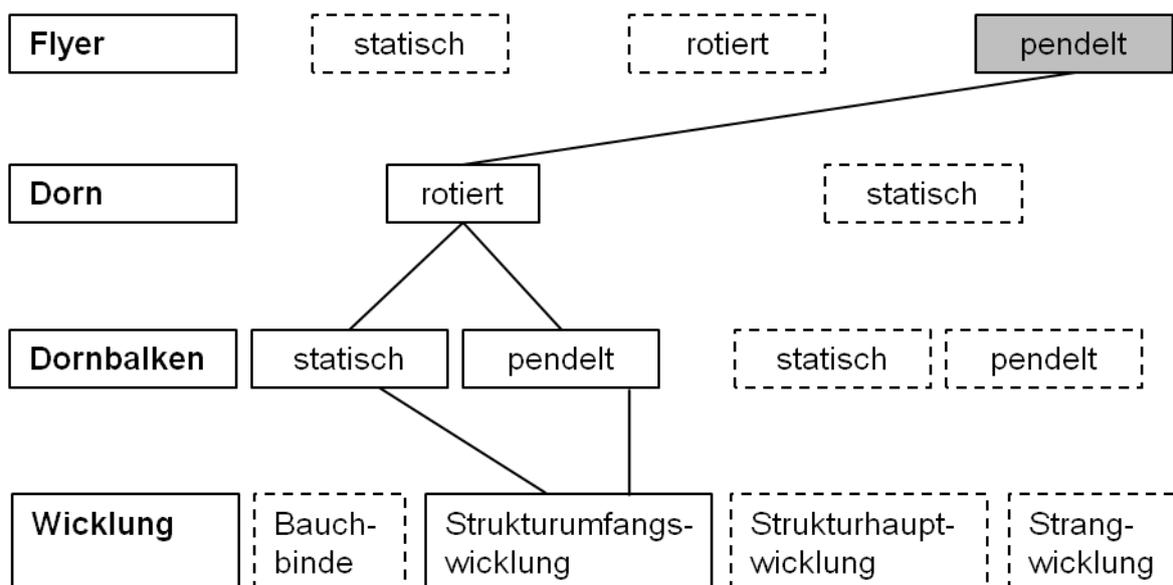


Abbildung 23: Mögliche Wicklungen beim pendelnden Flyer

In Abbildung 23 sind die möglichen Wicklungen beim pendelnden Flyer gezeigt. Auch in diesem Fall ist eine Strukturknäuelbildung nur möglich, wenn der Dorn rotiert. Verweilt dieser ebenfalls statisch, findet kein Aufwindeprozess statt, die Fadengeschwindigkeit ist Null. Rotiert der Dorn, so bilden sich bei statisch verweilendem oder auch beim pendelnden Dornbalken eine Strukturumfangswicklung aus.

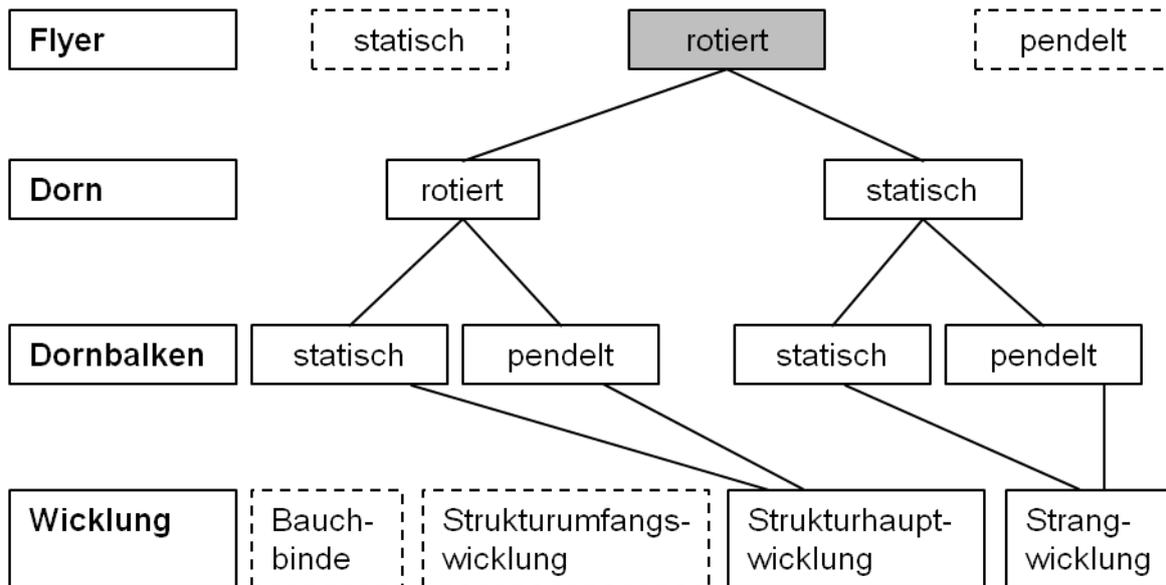


Abbildung 24: Mögliche Wicklungen beim rotierenden Flyer

In Abbildung 24 sind die möglichen Wicklungen beim rotierenden Flyer gezeigt. Hierbei handelt es sich um die für Strukturknäuelprozesse typische Bewegungsform des Flyers. Eine typische Strukturknäuelwicklung wie die in dieser Arbeit untersuchte Hauptwicklung, entsteht, wenn beim rotierenden Dorn der Dornbalken statisch verweilt oder auch pendelt. Bleiben beim rotierenden Flyer Dornbalken und Dorn statisch, so entsteht eine sog. Strangwicklung (vgl. Abbildung 21, Bild C).

Fazit

Der s-förmige Flyer ist das fadenführende Element beim Strukturknäueln. Die Austrittsöse A verläuft auf der Flyerbahn, ihre Koordinaten sind bekannt und werden insbesondere durch den Flyerwinkel φ beschrieben. Wird die Flyerbewegung in Kombination mit der Dornbewegung betrachtet, so ergibt sich eine Möglichkeit, die verschiedenen Strukturknäuelwicklungsarten zu klassifizieren. Der Flyer kann dabei statisch verweilen, eine Pendel- oder Rotationsbewegung vollführen.

Eine typische Strukturknäuelwicklung (Strukturhauptwicklung) entsteht, wenn der Flyer und der Dorn jeweils eine Rotationsbewegung vollführen. Die Drehzahlen des Flyers n_F und des Dorns n_D können in diesem Fall also nicht die Werte Null anneh-

men. Pendelt zusätzlich der Dornbalken und vollführt damit der Dornkörper ebenfalls eine Pendelbewegung, so kann dadurch insbesondere der Strukturaufbau hinsichtlich des einzustellenden Volumens beeinflusst werden. Dies stellt eine wichtige Grundlage für die Umsetzung in technischen Anwendungen dar.

4.7 Dorn und Dornkörper in der Strukturknäueltechnik

Neben der Funktion wird im Folgenden eine grundlegende Einteilung verschiedener Dornkörper gezeigt. Der Dornkörper stellt den Körper im Knäuelraum dar, auf dem das Garn abgelegt wird (Bereich IV). Der Dornkörper bildet zusammen mit dem Dornschaft den Dorn, welcher im Dornbalken fixiert bzw. angetrieben wird (vgl. Kapitel 4.1). Die Schnittstelle zum Dornbalken erfolgt über den Dornschaft, der über eine Steckverbindung mit dem Dornbalken fest verbunden wird. Hier spielt die schlupffreie Übertragung der Rotationsbewegung auf den Dorn eine wichtige Rolle, da andernfalls keine reproduzierbare Fadenablage erreicht wird.

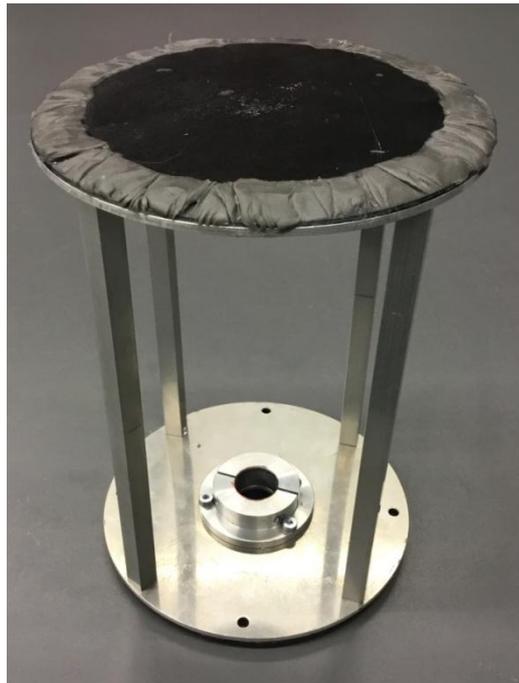


Abbildung 25: Dornkörper des Zylinderdorns mit Formmasse an der Außenkante der Stirnseite

Die Formen, die der Dornkörper annehmen kann, werden in Kapitel 4.7.1 erläutert. In dieser Arbeit werden insbesondere zwei Dornkörperformen betrachtet, dies sind der Zylinderdorn sowie der Kugeldorn. Beim Zylinderdorn besteht der Dornkörper aus einem zylindrischen Körper mit dem Radius r_D und der Gesamthöhe $H_D = 2h_D$. Dieser wurde gewählt, da dieser eine wichtige Grundlage für technische Anwendungen darstellt. In Abbildung 25 ist der verwendete Dornkörper des Zylinderdorns gezeigt. An

der Außenkante der Stirnseiten ist eine Formmasse angebracht, die das abgelegte Garn fixiert. Beim Kugeldorn besteht der Dornkörper aus einer Kugel mit dem Radius r_D . Der Kugeldorn hat weder Ecken noch Kanten.

4.7.1 Grundlegende Einteilung der Dornkörper

Die Dornkörpergrundform hat den maßgebenden Einfluss auf die Außenkontur eines Strukturknäuels. Abhängig von den Eigenschaften des Garns, das zu einem Strukturknäuel gewickelt werden soll, bestimmt die Dornart die Fadenablage und die Eigenschaften des Strukturknäuels. Auch können so von verschiedenen geometrischen Grundformen, wie bspw. dem Zylinder, der Kugel oder dem Quader, neue Dornkörperformen abgeleitet werden.

Aus diesen Gründen ist die grundlegende Kategorisierung der verschiedenen Dornkörper für eine Nutzung der Strukturknäueltechnik für technische Anwendungen wichtig. Die Dornkörper, die beim Strukturknäueln verwendet werden, können bzgl. der nachfolgenden, in Abbildung 26 gezeigten Aspekte eingeteilt werden.

Die Außenkontur beschreibt die den Dornkörper einhüllende Fläche. Diese Hülle kann offen oder flächig geschlossen gestaltet sein. Bei einer offenen Kontur sind nicht alle Konturlinien durch eine feste Linie gekennzeichnet, die Bereiche im Inneren des Dornkörpers sind an mindestens einer Stelle mit dem Raum außerhalb verbunden. Bei einer flächig geschlossenen Außenkontur wird die komplette Außenkontur von einer bzw. mehreren einhüllenden Strukturen umschlossen.

Als Beispiel für eine offene Außenkontur ist in Abbildung 30 (rechts) der Metallstrebdorn gezeigt, der für die Herstellung konventioneller Handstrickgarnknäuels verwendet wird. Dieser hat eine achteckige Grundform, die aus der Anordnung der acht Metallstreben gebildet wird. Jedoch fehlt hierbei eine Verbindung der acht Eckpunkte miteinander, wodurch sich eine offene Dornkontur ergibt.

Als Beispiel für eine flächig geschlossene Außenkontur kann ein wie in dieser Arbeit verwendeter Zylinder- oder Kugeldorn herangezogen werden, wenn dieser aus einem vollflächigen Körper in Form eines Zylinder oder einer Kugel besteht. Ein weiteres Beispiel ist ein quaderförmiger Dorn, bei dem alle zwölf Außenkanten durch miteinander verbundene Stangen dargestellt werden. Bei einem flächig geschlossenen Dornkörper wird das Garn direkt auf der Außenkontur abgelegt. Hier muss wiederum weiter unterschieden werden in Dornkörper mit konvexen und konkaven Bereichen (vgl. Kapitel 4.7.3).

Innerhalb der geschlossen-konvexen Außenstrukturen lässt sich wiederum die folgende Einteilung vornehmen:

1. Geschlossen-konvexe Außenkontur mit Kanten und geraden Flächen, also mit Ecken (Beispiel: Quader), bzw. geschlossen-konvexe Außenkontur mit Kanten und einfach gekrümmten Flächen. (Beispiel: Zylinder)
2. Geschlossen-konvexe Außenkontur ohne Kanten, mit mehrfach gekrümmten Flächen und rotationssymmetrisch (Beispiel: Kugel)

Der Unterschied der beiden Dornaußenkonturen wird klar, wenn das Ergebnis der Fadenablage betrachtet wird. Beim Strukturknäueln wird das Garn entlang des kürzesten Wegs abgelegt. Dies kann beim Dornkörper mit offener Kontur zu Taillierungen führen, die im Vergleich zu geschlossenen Außenkonturen eine Reduktion des vom Garn eingeschlossenen Volumens bewirken. Im nachfolgenden Kapitel 4.7.2 wird die Taillierung näher behandelt.

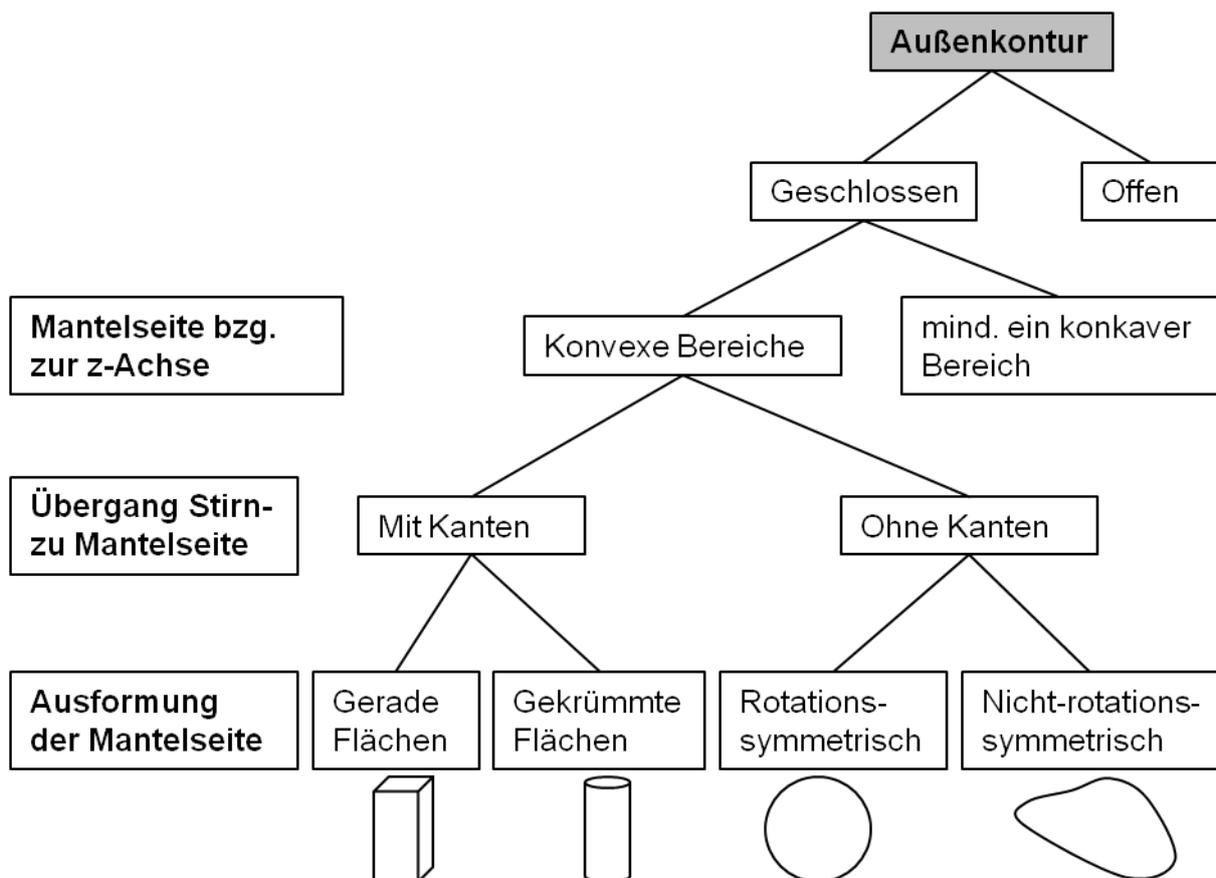


Abbildung 26: Einteilung der Dornkörperarten beim Strukturknäueln hinsichtlich ihrer Außenkontur und der Ausformung der Mantelfläche bei geschlossenen Außenkonturen

4.7.2 Taillierung bei offenen Dornaußenkonturen

Die Taillierung ist eine spezielle Form der Fadenablage. Da an der Mantelseite keine formgebende Außenkontur vorliegt, wird das Garn zwischen zwei Ablagepunkten entlang der geodätischen Linie abgelegt. In Abbildung 30 links ist solch eine Taillierung gezeigt. Diese taillierte Struktur (vgl. Abbildung 27, B) schließt ein geringeres Volumen ein, als es ein zylindrischer Dornkörper (vgl. Abbildung 27, A) mit geschlossener Außenkontur und den gleichen Maßen würde. Dieser kürzeste Weg des Garns wird zudem durch die bereits abgelegten Garne verändert. Ähnliche Strukturen bilden sich bei konkaven Dornkörpern aus.

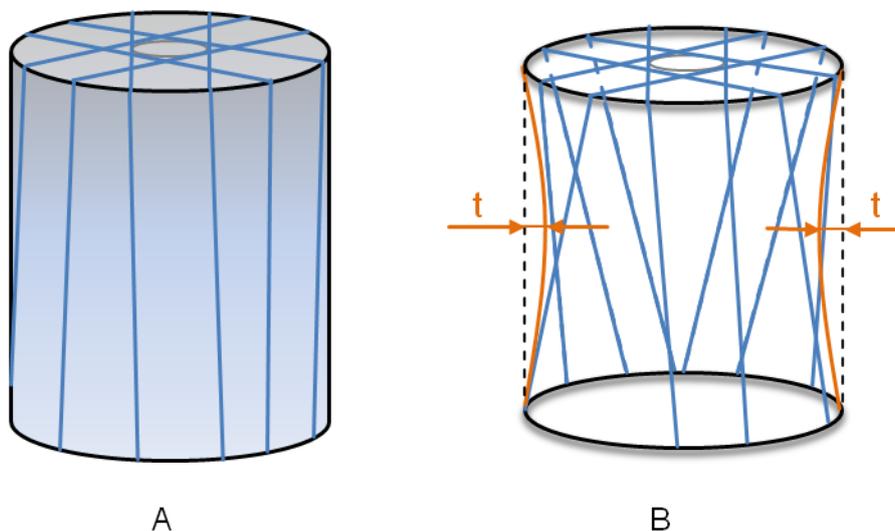


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Taillierung bei offener (B) im Vergleich zur geschlossenen (A) Außenkontur eines Zylinderdorns. t: Taillierung

Die Ausbildung der Taillierung bei offenkantigen, symmetrischen Dornkörpern ist abhängig von der Dorngeometrie sowie vom Drehzahlverhältnis h und damit nach (4.3) vom Dornwinkel δ_F . Für gerade und wilde Strukturwicklungen gilt außerdem $\delta_F = \delta_1 - \delta_2$.

In Abbildung 28 sind zwei aufeinander folgende Ablagepunkte mit P_1 und P_2 sowie den zugehörigen Dornwinkeln δ_1 und δ_2 auf dem offenen Zylinderdorn mit dem Radius r_D gekennzeichnet. P_1 liegt auf der kopfseitigen Stirnfläche ($z_{D,P1} = h_D + z_D$), P_2 liegt auf der fußseitigen Stirnfläche ($z_{D,P2} = -h_D + z_D$).

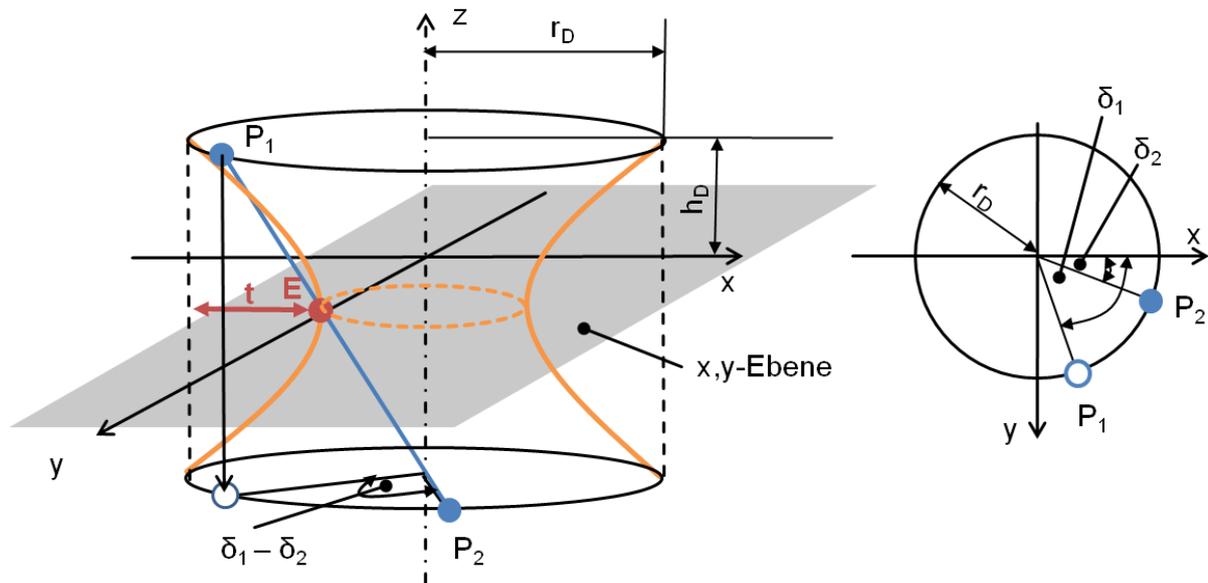


Abbildung 28: Schematische Darstellung zur Berechnung der Taillierung t . **E:** Schnittpunkt der Verbindung von P_1 und P_2 mit der x,y -Ebene, P_1, P_2 : Ablagepunkte, r_D : Radius des Zylinderdorns, h_D : Höhe des Dorns, δ_1, δ_2 : Dornwinkel zu P_1, P_2

Der Abstand des dargestellten Punkts E zur Mantelseite des Dorns (vgl. roter Pfeil in Abbildung 28) stellt die Taillierung t der Strukturknäuelwicklung dar, die über den Zusammenhang

$$t = r_D - \frac{r_D}{2} \sqrt{\left(\cos(\delta_1) \cdot \left(1 - \frac{z_D}{h_D}\right) + \cos(\delta_2) \cdot \left(1 + \frac{z_D}{h_D}\right) \right)^2 + \left(\sin(\delta_1) \cdot \left(1 - \frac{z_D}{h_D}\right) + \sin(\delta_2) \cdot \left(1 + \frac{z_D}{h_D}\right) \right)^2} \quad 4.7$$

berechnet werden kann. Der Punkt E ist der Durchstoßpunkt der Verbindung zwischen den Ablagepunkten P_1 und P_2 durch die x,y -Ebene. Der Mittelpunkt des Dornkörpers ist in $z = z_D$ platziert.

Die Taillierung t nimmt beim offenkantigen Zylinderdorn mit steigender Differenz zwischen den Dornwinkeln zu. Das bedeutet, dass die Taillierung t bei geringen Drehzahlverhältnissen h stärker ausgeprägt ist als bei hohen Drehzahlverhältnissen. In Abbildung 29 ist ein beispielhafter Verlauf der Taillierung und typische Werte des Drehzahlverhältnisses in Abhängigkeit des Dornwinkels $\delta_1 = \delta_F$ für einen Zylinderdorn mit $r_D = 10$ cm aufgezeigt. Hier gilt $\delta_2 = 0^\circ$, $z_D = 0$ (Zentrum-Zentrum-Position).

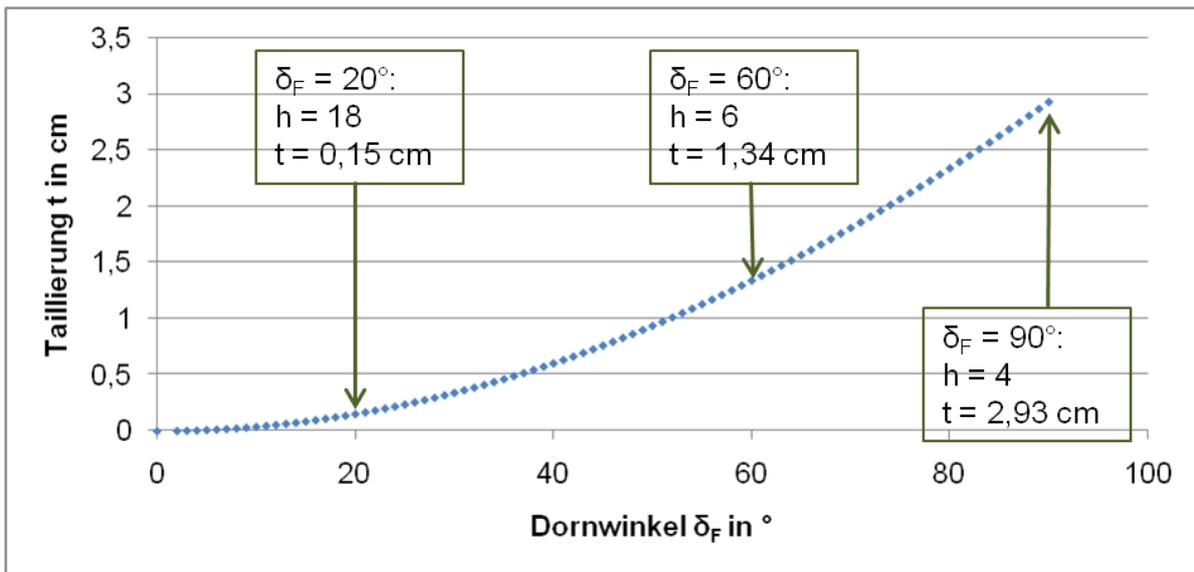
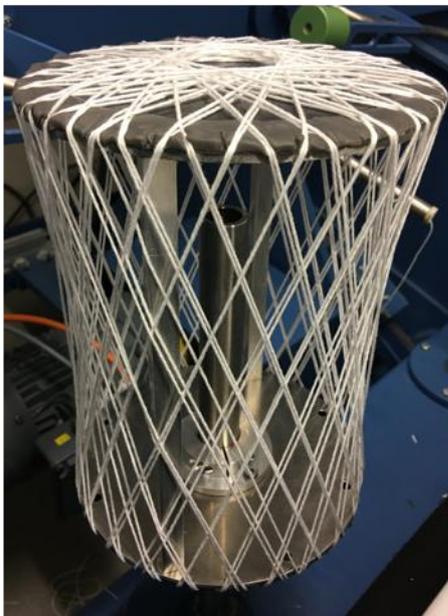
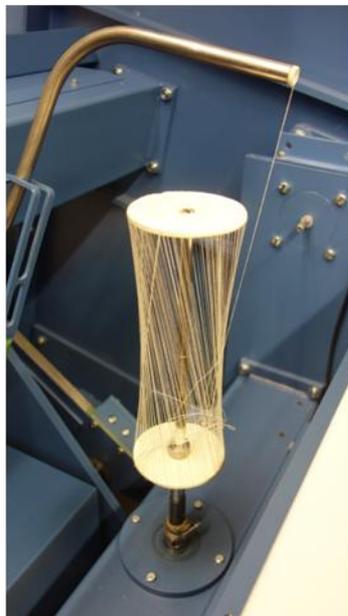


Abbildung 29: Beispielhafter Verlauf der Taillierung t in cm für einen Dornradius von $r_D = 10$ cm. Hier gilt $\delta_1 = \delta_F$; $\delta_2 = 0^\circ$; $z_D = 0$ cm.

Bei geraden Strukturwicklungen tritt die Taillierung erst ab der zweiten Garnlage auf, bei wilden Strukturwicklungen können die abgelegten Garne über die nachfolgend abgelegten Garne zusätzlich abgelenkt werden.



Taillierung am offenen Zylinderdorn



Offener Zylinderdorn



Metallstrebendorn als offene Kontur

Abbildung 30: Taillierung am offenen Zylinderdorn (links), Beispiel für einen zylindrischen Dorn mit offener Außenkontur (Mitte) und für einen Metallstrebendorn (rechts)

4.7.3 Konkave und konvexe Dornkörper

Die Bezugsachse zur Beurteilung der Konvex- und Konkavität ist die Rotationsachse des Dorns (z-Achse). Die Außenkontur ist bzgl. der Rotationsachse des Dorns dann konkav, wenn sich die Verbindungsstrecke zweier Punkte auf der Außenkontur außerhalb des Dornkörpers befindet. Die Außenkontur ist wiederum dann konvex, wenn sich die Verbindungsstrecke innerhalb des Dornkörpers befindet. Dies ist in Abbildung 31 schematisch dargestellt.

Hat der Dornkörper also eine geschlossene Außenkontur und weist mindestens einen konkaven Bereich auf, so erfolgt in dessen Umgebung die Fadenablage wie bei einem offenkantigen Dornkörper entlang der geodätischen Linie, was zu Hohlräumen zwischen dem Garn und dem Dornkörper führen kann. Diese können durch nachfolgende Garne wieder verschlossen werden, da diese die abgelegten Garne wieder an den Dornkörper andrücken. Nur bei bezogen auf die Dornrotationsachse konvexen Konturen erfolgt eine planare Fadenablage auf der Außenkontur.

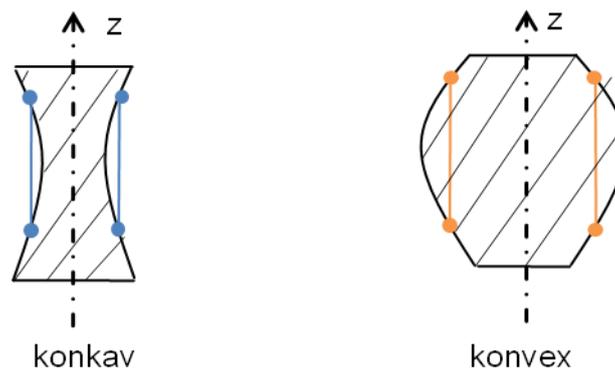


Abbildung 31: Schematische Darstellung von konkaven (links, blau) und konvexen (rechts, orange) Bereichen der Dornaußenkontur bzgl. der z-Achse.

Fazit

Der Dorn besteht aus dem Dornkörper und dem Dornschaft. Über die Außenkontur wird die Erscheinung des Strukturknäuels und über die Dornzahl n_D wird die Prozessgeschwindigkeit vorgegeben. Die Außenkontur des Dornkörpers kann in die offene und in die geschlossene Kontur eingeteilt werden und bestimmt damit die Fadenablage und das entstehende Wickelbild. Bei offenen Konturen wird das Garn entlang der geodätischen Linie abgelegt, wodurch die verkürzte Länge des abgelegten Fadens Taillierungen entstehen. Geringe Drehzahlverhältnisse können zu Taillierungen entlang der Mantelseite führen. Bei geschlossenen Konturen erfolgt eine Unterscheidung über die Ausformung der Mantelseite.

4.8 Zusammenfassung der Grundlagen der Strukturknäueltechnik

In der nachfolgenden Abbildung 32 sind die untersuchten Einflussfaktoren auf die Fadenablage und damit auf das entstehende Wickelbild zusammenfassend dargestellt. Somit kann die erste Arbeitshypothese in diesen Punkten bestätigt werden.

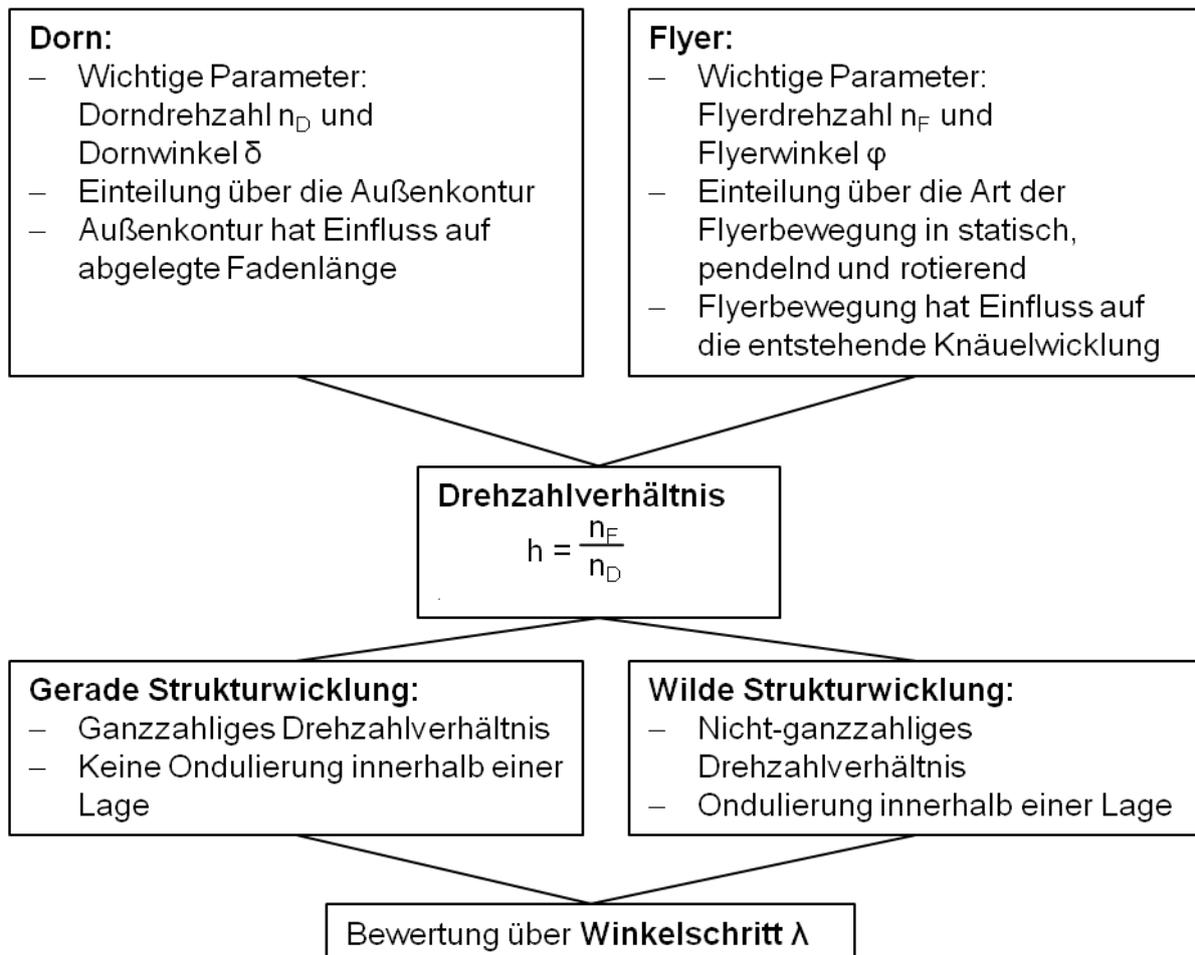


Abbildung 32: Einflussfaktoren auf das Drehzahlverhältnis beim Strukturknäuelprozess

Der Flyer und der Dorn sind die technologisch relevanten Maschinenelemente im Strukturknäuelprozess. Wichtige Parameter sind deren Drehzahlen n_F und n_D sowie der Dorn- und der Flyerwinkel. Diese kommen insbesondere in der Berechnung der Fadenablage zum Tragen. Verschiedene Dornkörper können über die Außenkontur eingeteilt werden. Die Flyerbewegung kann dazu genutzt werden, eine grundsätzliche Einteilung der entstehenden Wicklung vorzunehmen. Beide Elemente sind über das Drehzahlverhältnis h miteinander gekoppelt, welches einen zentralen Parameter im Prozess darstellt. Das Drehzahlverhältnis bestimmt, ob eine gerade oder eine wilde Strukturwicklung entsteht. Die sich ausbildende Fadenablage kann über die Bestimmung des Winkelschritts λ bewertet werden.

5 Knäueltechnologische Einflussfaktoren auf die Fadenablage

Bezogen auf den in Abbildung 5 gezeigten Fadenlauf, der in die vier charakteristischen Bereiche eingeteilt wird, werden die in dieser Arbeit zu betrachtenden relevanten knäueltechnologischen Einflussfaktoren gemäß nachfolgender Tabelle definiert.

Tabelle 6: Übersicht über die zu untersuchenden knäueltechnologischen Einflussfaktoren

Bereich im Fadenlauf	Einflussfaktor	Abhängigkeiten und zu untersuchende Zusammenhänge	Methoden
Bereich I: Fadenzuführung	Fadenspannung	Einfluss der Dornkörpergeometrie, der Garndehnung und der Flyerdrehzahl n_F auf den Fadenspannungsverlauf.	Erfassung der Fadenspannung im Fadenlauf in Strukturknäuelversuchen über einen Fadenspannungssensor.
Bereich II: Flyerbereich	Flyerdrehzahl n_F	Einfluss der Flyerdrehzahl n_F auf die Fadenablage.	Optische Erfassung und Vergleich der Winkelschritte.
Bereich III: Bereich des freien Fadens	Freier Faden	Einfluss der Flyerdrehzahl n_F und der Fadengrundspannung	High-Speed-Aufnahmen für eine optische Bewertung von Ballonierungseffekten.
Bereich IV: Fadenablage auf dem Dornkörper	Dorndrehzahl n_D	Einfluss der Flyerdrehzahl n_D auf die Fadenablage.	Optische Erfassung und Vergleich der Winkelschritte.
	Anstellwinkel α	Einfluss verschiedener Anstellwinkel auf die Fadenablage beim Kugel- und Zylinderdorn, Berechnung des minimalen Anstellwinkels und Quantifizierung der Bereiche ohne Fadenablage auf den Stirnseiten	Mathematische Berechnungen.

5.1 Drehzahlen und Drehzahlverhältnisse

Die Strukturknäuelbildung erfolgt durch das Zusammenwirken von zwei unterschiedlichen Rotationsbewegungen, der Rotation des Flyers und des Dorns. Im Folgenden wird der Einfluss der dabei wirkenden Drehzahlen analysiert. Da jede Änderung des Anstellwinkels bei ansonsten gleichen Parametern eine Veränderung des Struktur-

knäuelbilds bewirkt, sind für die nachfolgenden Betrachtungen die Anstellwinkel so eingestellt, dass die Verkreuzungen der einzelnen Flyerumdrehungen an der Außenkontur der Stirnseite abgelegt werden. Die nachfolgend gezeigten Versuche wurden mit den in Tabelle 7 gezeigten Parametersätzen durchgeführt.

Tabelle 7: Parametersätze für die Versuche in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2

Parameter	Wert bzw. Ausführung
Dornkörper	Zylinderdorn, $H_D = 206$ mm; $r_D = 77,5$ mm. Formmasse an der relevanten Außenkante verhindert Abrutschen des Garns.
Position im Knäuelraum	Zentrum-Zentrum-Position, d.h. symmetrische Fadenablage auf den Stirnseiten
Drehzahlverhältnis 1	$h = 24$; gerade Strukturwicklung
Drehzahlverhältnis 2	$h = 4,8$; wilde Strukturwicklung
Garn	Baumwoll-Polyester-Stapelfasergarn (CO/PES, vgl. Tabelle 12)
Anstellwinkel	$\alpha = 80^\circ$

5.1.1 Einfluss der Flyerdrehzahl auf die Fadenablage

Für die Analyse des Einflusses der Flyerdrehzahl n_F werden exemplarisch drei typische Drehzahlen dargestellt. Unter Beachtung des Drehzahlverhältnisses h zwischen Flyer und Dorn ergeben sich somit die nachfolgend dargestellten Werte.

Tabelle 8: Parametersätze und Ergebnisse für die Ermittlung des Einflusses der Flyerdrehzahl

Flyerdrehzahl n_F [1/min]	Drehzahlverhältnis h	Flyerumdrehungen pro Lage (f)	Dornumdrehungen pro Lage (d_L)	Mittelwert Winkelschritt λ [°] (Std.abw.)
10	24	24	1	14,7 (0,57)
100	24	24	1	14,6 (0,54)
300	24	24	1	15,2 (0,68)

In den nachfolgenden Abbildungen sind die qualitativen Ergebnisse der Kopfseite dargestellt. Die Verkreuzungspunkte am Rand der Stirnseite (vgl. auch

Abbildung 12) werden nummeriert.

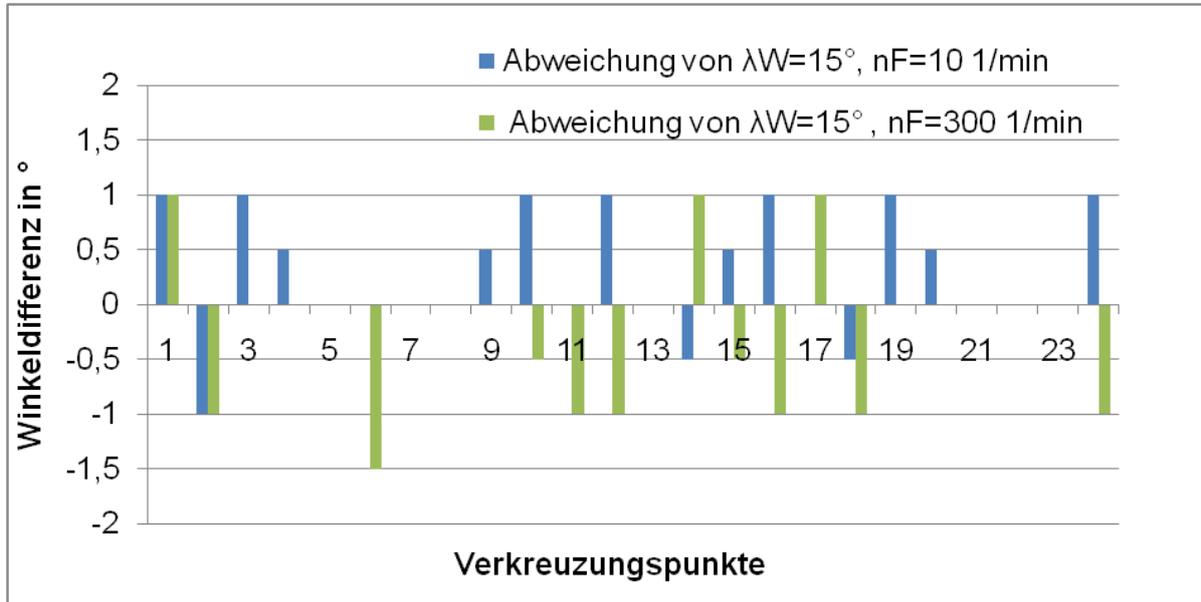


Abbildung 33: Differenz der gemessenen Winkelschritte λ zum berechneten Winkelschritt ($\lambda_W = 15^\circ$) bei unterschiedlichen Flyerdrehzahlen ($n_F = 10$ und 300 1/min, $h = 24$)

In Abbildung 33 ist die Differenz der erfassten Winkelschritte λ zum nach (4.2) berechneten Winkelschritt ($\lambda_W = 15^\circ$) des gezeigten Drehzahlverhältnisses und für die beiden Flyerdrehzahlen $n_F = 100$ 1/min und $n_F = 300$ 1/min aufgezeigt. Die messtechnisch bestimmten Winkelschritte weichen maximal um $-1,5^\circ$ vom berechneten Wert ab. Die in Tabelle 8 gezeigten Standardabweichungen der erfassten Winkelschritte liegen zwischen $0,54^\circ$ und $0,68^\circ$ und sind auch unter Berücksichtigung der auftretenden Messungenauigkeiten als gering zu werten. Die Winkelschritte zwischen den Ablagepunkten differieren für beide Flyerdrehzahlen nicht sehr stark und weichen nur geringfügig vom berechneten Wert ab.

Fazit

Es ist erkennbar, dass die Winkelschritte für beide Flyerdrehzahlen nicht stark differieren. Eine Abhängigkeit der sich ausbildenden Struktur von den betrachteten Flyerdrehzahlen ist also nicht zu erkennen. Dieser Zusammenhang spielt unter Berücksichtigung möglicher Prozessgeschwindigkeiten eine Rolle. Die Flyer- und die Dorndrehzahl sind über das Drehzahlverhältnis h miteinander gekoppelt. Bei großen Drehzahlverhältnissen rotiert der Flyer mit einer entsprechend hohen Drehzahl. Die Wirtschaftlichkeit des Prozesses muss also nicht eingeschränkt werden durch eine

Limitierung der Flyerdrehzahl. Hohe Flyerdrehzahlen mindern nicht die Qualität der Fadenablage, was für einen stabilen Prozess spricht.

5.1.2 Einfluss der Dorndrehzahl auf die Fadenablage

Die Dorndrehzahl n_D ist der Parameter, der die Prozessgeschwindigkeit bestimmt. Aufgrund des Zusammenhangs des Drehzahlverhältnisses h der Flyer- und der Dorndrehzahlen n_F und n_D nach (4.1) sind sehr hohe Dorndrehzahlen bei geringen Flyerdrehzahlen beim Strukturknäueln in der praktischen Umsetzung nicht möglich, da die Dorndrehzahl im Quotienten als Nennerkomponente eingeht und da für eine Strukturknäuelbildung gelten muss $h > 1$. Der Fall $n_D = 0$ stellt den in Kapitel 4.6.2 gezeigten Sonderfall der Strangwicklung dar. Dieser Fall tritt also nicht auf, wenn Strukturhauptwicklungen betrachtet werden. Eine echte Strukturhauptwicklung setzt je eine Rotationsbewegung des Flyers und des Dorns voraus. Hieraus ergibt sich, dass die Flyer- und Dorndrehzahl n_F bzw. n_D nicht den Wert Null annehmen dürfen.

In Abbildung 34 sind die Differenzen des berechneten Winkelschritts $\lambda_W = 15^\circ$ zu den erfassten Winkelschritten dargestellt. Die Standardabweichung (vgl. auch Tabelle 9) dieser Differenzen liegt beim Drehzahlverhältnis von $h = 24$ bei $0,57^\circ$, bei $h = 4,8$ liegt diese bei $1,07^\circ$ und ist damit leicht erhöht.

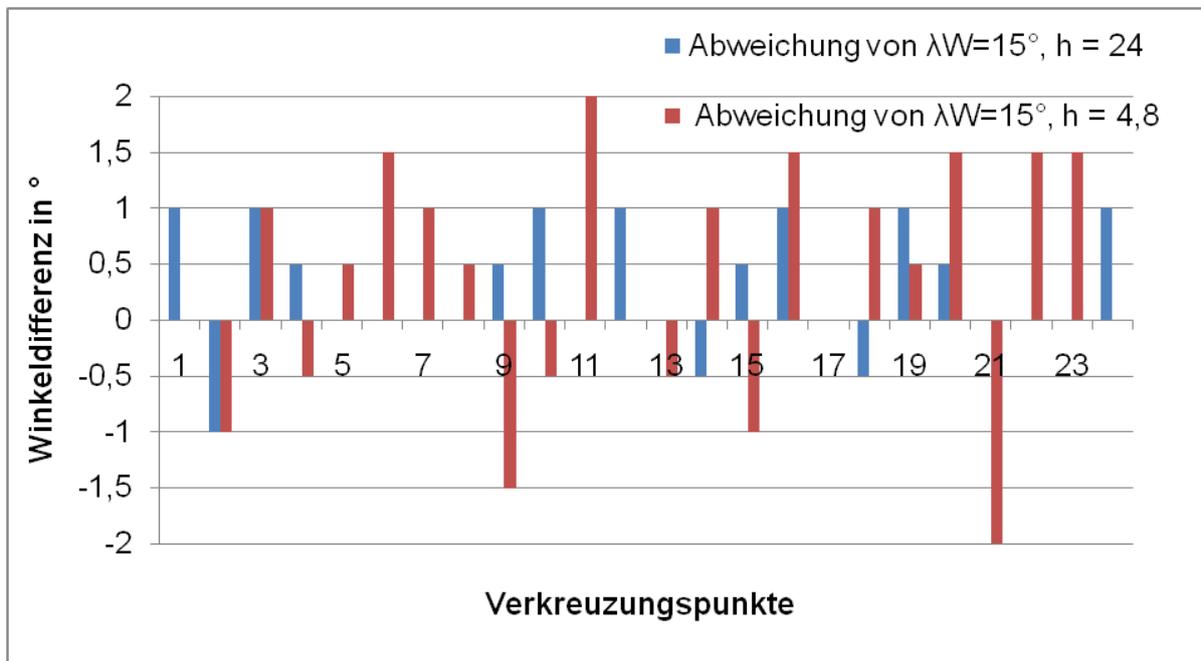
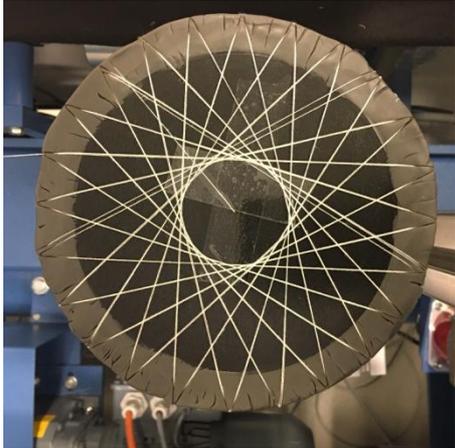
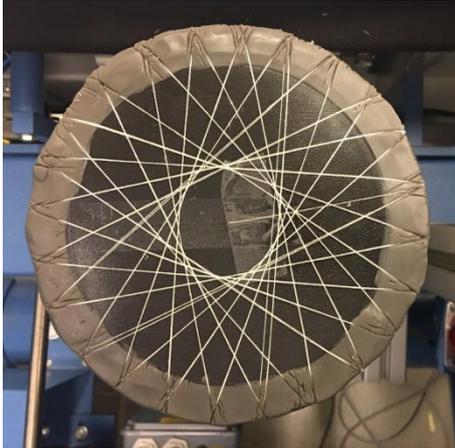


Abbildung 34: Differenz der gemessenen Winkelschritte λ zum berechneten Winkelschritt ($\lambda_W = 15^\circ$) bei unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen ($h = 4,8$ und $h = 24$)

Die erfassten Winkelschritte λ auf den Stirnseiten unterscheiden sich bei den gezeigten Parametersätzen nur in sehr geringem Maße. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt, sie zeigen eine gleichmäßige Fadenablage unabhängig vom Drehzahlverhältnis. Die Drehzahlverhältnisse sind so gewählt, dass die Flyerumdrehungen pro Lage (f) jeweils identisch sind, die Unterscheidung erfolgt in der Anzahl der Dornumdrehungen pro Lage (d_L).

Tabelle 9: Ergebnisse der Knäuelversuche mit unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen

	Gerade Strukturwicklung	Wilde Strukturwicklung
Foto		
h	24	4,8
n_F	10 1/min	10 1/min
f	24	24
d_L	1	5
λ [°]	14,71	14,67
(Std.abw.)	(0,57)	(1,07)

Fazit

Auch in den Darstellungen der Fadenablagen ist ersichtlich, dass sich die Dornzahl nicht merklich auf die Fadenablage auswirkt. Die Gleichmäßigkeit im Bild der Fadenablage ist in den gezeigten Bildern erkennbar. In beiden betrachteten Fällen weichen die berechneten Werte nicht stark von den messtechnisch erfassten Werten ab. Auch in diesem Zusammenhang zeigt sich die Stabilität des Prozesses. Die Dornzahl bestimmt die Prozessgeschwindigkeit, da hier der Fadenabzugs- bzw.

Aufwindeprozess erfolgt. Insbesondere bei kleinen, wilden Strukturwicklungen, bei denen die Dorndrehzahl höher ist, sind im betrachteten Drehzahlbereich keine Limitierungen durch die Dorndrehzahl auf die Prozessgeschwindigkeit zu erwarten.

5.1.3 Einfluss der Oberflächengeschwindigkeit auf die Fadenablage

Rotationssymmetrische Dornkörper mit geschlossen-konvexer, mehrfach gekrümmter Außenkontur ohne Kanten stellen eine Besonderheit bei der Betrachtung des Einflusses der Dorndrehzahl dar. Die Dornradien r_D sind aufgrund der Krümmung um die y-Achse bspw. bei einem Kugeldorn auf der Oberfläche nicht konstant. Dies bewirkt, dass bei höheren Dorndrehzahlen keine geradlinige Fadenablage entlang der Außenkontur erfolgt. Da kugelförmige Dornkörper beim Strukturknäuelprozess realistische Anwendungsfelder darstellen – schließlich liegt der Fokus nicht allein auf den günstigsten Gewichts-Festigkeitsverhältnissen sondern auch auf der Umsetzung individueller Formen für innovative Anwendungen – ist die Kenntnis dieses Phänomens bei der Fadenablage wichtiger Bestandteil der Analyse der Fadenablage. Hierzu erfolgt die Betrachtung eines kugelförmigen Dornkörpers.

Die Oberflächengeschwindigkeit auf der Kugeloberfläche berechnet sich nach [42] zu

$$v_{OF} = r_P \cdot 2\pi \cdot n_D \quad 5.1$$

mit der Dorndrehzahl n_D und dem lokalen Radius r_P , r_P liegt dabei zwischen 0 und dem Dornradius r_D .

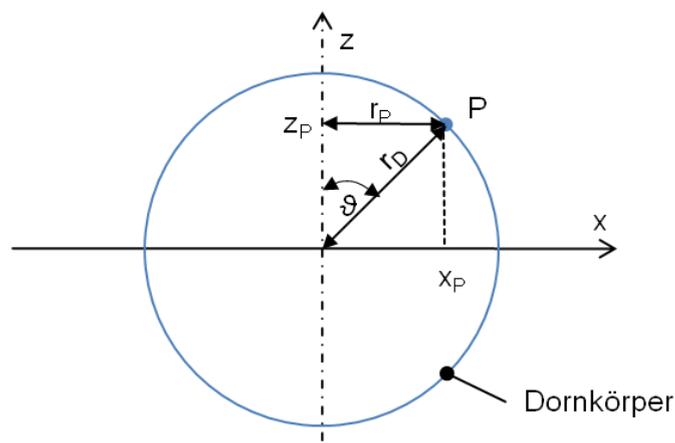
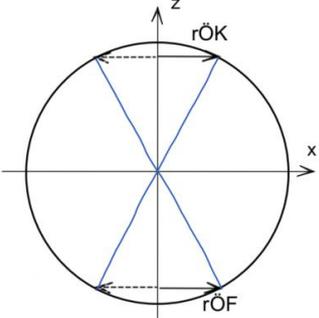
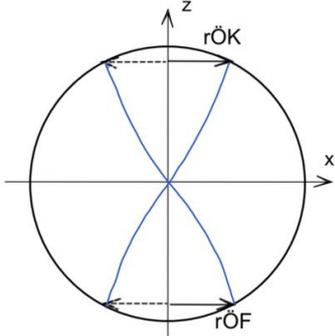
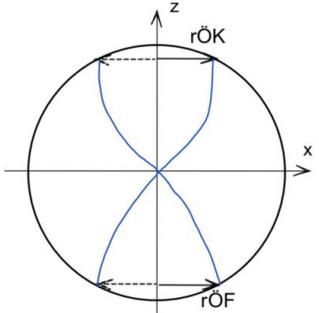


Abbildung 35: Darstellung des Punktes P auf der Kugeloberfläche in Abhängigkeit des lokalen Radius' r_P , des Winkels ϑ entlang der Kugeloberfläche und vom Dornkörperdurchmesser r_D

Der lokale Radius r_P berechnet sich zu $r_P = r_D \cdot \sin(\vartheta)$. Der Winkel ϑ verläuft von 0° an der Kopfseite bis 180° an der Fußseite.

Tabelle 10: Übersicht über Flyer- und Dorndrehzahlen und der resultierenden Fadenablage auf der Kugeloberfläche

Drehzahlverhältnis h	Flyerdrehzahl n_F [1/min]	Dorndrehzahl n_D [1/min]	Fadenablage
80	100	$n_D = \frac{100}{80} = 1,25$	 <p>Kein Schwung</p>
8	100	$n_D = \frac{100}{8} = 12,5$	 <p>Leicht geschwungen</p>
8	400	$n_D = \frac{400}{8} = 50$	 <p>Stärker geschwungen</p>

Die Oberflächengeschwindigkeit entlang der Kugeloberfläche hat ihr Maximum am Bereich des größten Radius', nämlich genau dann, wenn gilt $r_P = r_D$. Die Abhängigkeit der Dorndrehzahl n_D zeigt sich in den in Tabelle 10 dargestellten Fadenlagen auf dem Kugeldorn.

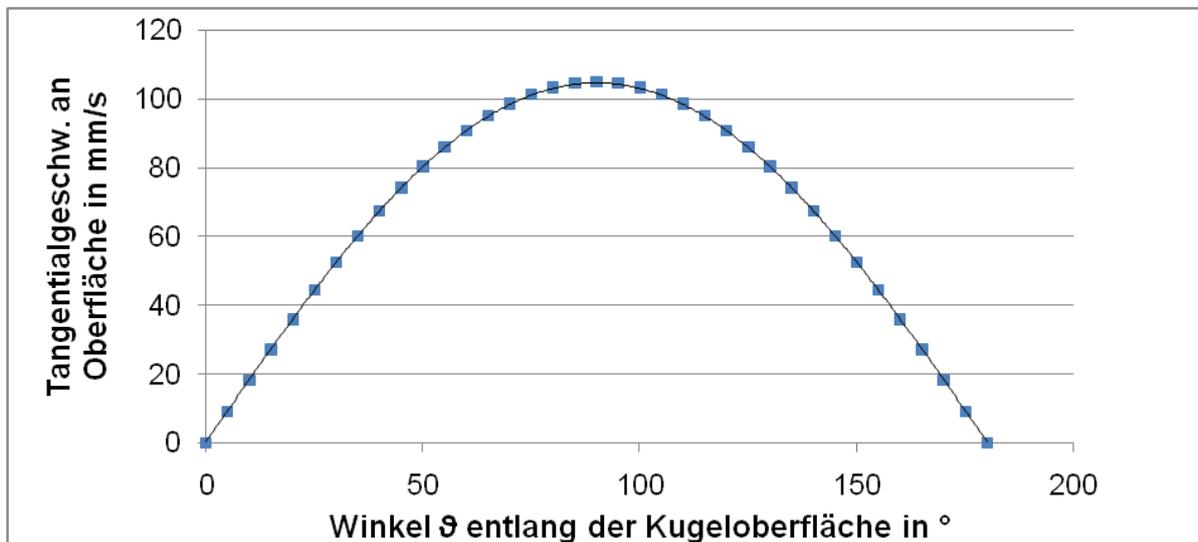


Abbildung 36: Exemplarischer Verlauf der Oberflächengeschwindigkeit entlang der Kugeloberfläche, Betrachtung von der Kopfseite ($\theta = 0^\circ$) bis zur Fußseite ($\theta = 180^\circ$)

Fazit

Je größer die Dorndrehzahl ist, desto stärker weicht bei geschlossen-konvexen Außenkonturen mit gekrümmten Kanten die Fadenablage in den Bereichen großer lokaler Radien r_P von der Geraden ab. Es zeigt sich bei zunehmender Dorndrehzahl ein Schwung in der Fadenablage. Dieser entsteht bei dieser Dornkörperform aufgrund der Abhängigkeit der Oberflächengeschwindigkeit von der Dorndrehzahl.

Das Garn wird auf der konvexen Dornkörperoberfläche abgelegt, die sich mit zunehmender Dorndrehzahl im Bereich des größten Radius' r_P am schnellsten bewegt. Aus diesem Grund ergibt sich eine Vergrößerung der abgelegten Fadenlänge. Das Garn weicht hier von seinem kürzesten Weg ab und bildet den gezeigten Schwung auf der Oberfläche aus.

5.2 Fadenspannung im Strukturknäuelprozess

Die Fadenspannung spielt bei textilen Abzugs- und Ablageprozessen eine wichtige Rolle. Insbesondere wenn von einem Strukturknäuelbauteil definierte Kräfte aufgenommen werden sollen ist es wichtig, die Spannungsverhältnisse im Ablageprozess zu verstehen. [43], [44] Wie bei allen garnbasierten textilen Prozessen, bei denen

biegeschlaffe Garne verarbeitet werden, ist auch beim Strukturknäueln eine Prozesskontrolle in Form der Kontrolle der Fadenspannung wichtig.

Der strukturelle Aufbau und damit einhergehend die Stabilität des Wickelkörpers beim Strukturknäueln hängt von den inneren Reibungen zwischen den Ablagepunkten auf dem Dornkörper ab. Wird die Fadenspannung im Rahmen der anwendungs- und parameterbedingten Grenzen im Strukturknäuelprozess erhöht, so erfolgt damit eine Erhöhung der Reibkräfte an den Verkreuzungspunkten aufgrund der vergrößerten Auflageflächen zwischen den einzelnen Garnen. Dadurch wird prinzipiell eine Erhöhung der Statik des Strukturknäuelwickels bewirkt.

In Tabelle 11 sind die zu untersuchenden Einflussparameter dargestellt.

Tabelle 11: Einflussparameter auf die Fadenspannung im Strukturknäuelprozess

Parameter	Auswirkung
Geometrie des Dornkörpers	Die geometrischen Bedingungen des Dornkörpers können bewirken, dass auch bei konstanten Flyer- und Dorn Drehzahlen keine konstante Fadenlaufgeschwindigkeit auftritt, bspw. durch den veränderten Fadenweg [45]. Diese Geschwindigkeitsänderungen bewirken Spitzen im Fadenspannungsverlauf.
Oberflächengeschwindigkeit am Ablagepunkt	Stark variierende Oberflächengeschwindigkeiten bei Kugeldornen können die Fadenablage beeinflussen.
Dehnung des Garns [46]	Eine große Garndehnung kann Änderungen in den Fadenlaufgeschwindigkeiten und dadurch verursachte prozessbedingte Impulsstöße ausgleichen, wodurch auch die daraus resultierenden Spitzen in der erfassten Fadenspannung abgeschwächt werden können.

5.2.1 Messaufbau und eingesetzte Materialien

Ein Fadenspannungssensor Fatec, 500cN wird in den Fadenzulauf (Bereich I) eingebunden, da hier Störeinflüsse durch sich stark bewegende Teile ausgeschlossen werden können. Der Sensor wurde in der 3-Punkt-Auslenkung eingesetzt und in Fadenlaufrichtung kalibriert. Durch die Fadenführung und die stetige Grundfadenspannung im Strukturknäuelprozess ist davon auszugehen, dass die Fadenspannungen übertragen werden. Jedoch werden aufgrund der unterschiedlichen Garncharakteristiken die erfassten Fadenspannungsverläufe nicht absolut, sondern insbesondere

vergleichend betrachtet. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Reibungskräfte am Messzylinder des Fadenspannungssensors nicht näher betrachtet.

Die Fadenführung in Bereich I, also von der Vorlagespule zur Eintrittsöse am Flyer, ist konstant ausgeführt, so dass Einflüsse von den Vorlagespulen minimiert und in den Auswertungen nicht berücksichtigt werden.

Für die nachfolgend gezeigten Untersuchungen wurden verschiedene typische Garne eingesetzt, welche in Tabelle 12 dargestellt sind.

Tabelle 12: Verwendete Garne

	CO/PES	PP	Glas	PES
Garnart	Stapelfaser	Multifilament	Multifilament	Stapelfaser
Material	Baumwoll-Polyester-mischung	Polypropylen	Glas	Polyester
Feinheit	36,1 tex	37,1 tex	68 tex	445,6 tex
Dehnung	10,59%	24,83%	2,05%	18,24%
Oberfläche	Mittlere bis ausgeprägte Haarigkeit	Mittlere bis geringe Haarigkeit	Sehr geringe Haarigkeit, glatte Oberfläche	Ausgeprägte Haarigkeit
Durchmesser	0,2 mm	0,3 mm	0,6 mm	1,0 mm

Die Strukturknäuelversuche werden an der in Abbildung 37 gezeigten Strukturknäuelmaschine SBW 2 der JBF Maschinen GmbH durchgeführt.



Abbildung 37: Verwendete Strukturknäuelmaschine SBW 2 der JBF Maschinen GmbH

5.2.2 Einfluss der Dornkörpergeometrie auf die Fadenspannung

Für die Ermittlung des Einflusses der Dornkörpergeometrie auf die Fadenspannung werden zwei verschiedene Dornkörpergrundformen betrachtet. Der Kugeldorn, dessen Grundkörper eine Kugel mit dem Radius $r_D = 100$ mm darstellt, hat weder Kanten noch Ecken, sondern besteht aus einer konvexen Außenkontur. Er hat zusammenfassend eine geschlossen-konvexe Außenkontur ohne Kanten mit mehrfach gekrümmten Flächen und ist rotationssymmetrisch.

Vergleichend hierzu wird der Zylinderdorn betrachtet. Dieser hat eine Gesamthöhe von $H_D = 206$ mm und einen Radius von $r_D = 77,5$ mm. Der Zylinderdorn hat eine geschlossen-konvexe Außenkontur mit Kanten entlang der Stirnseiten, die rechtwinklig zur Rotationsachse liegen, und eine einfach gekrümmte Mantelfläche.

In Abbildung 38 ist ein typischer Fadenspannungsverlauf für den Zylinderdorn bei einem Drehzahlverhältnis von $h = 24$ und einer Flyerdrehzahl von $n_F = 100$ 1/min gezeigt. Es ist eine Lage dargestellt, d.h. der Flyer rotiert 24-mal um den Dorn, der sich in dieser Zeit einmal um seine eigene Achse dreht. In dieser Lage sind 24 höhere Peaks in der Fadenspannung erkennbar. Ebenso ist einordnend die Standardabweichung der Fadenspannung gezeigt. Hier sind keine besonders hohen Abweichungen erkennbar.

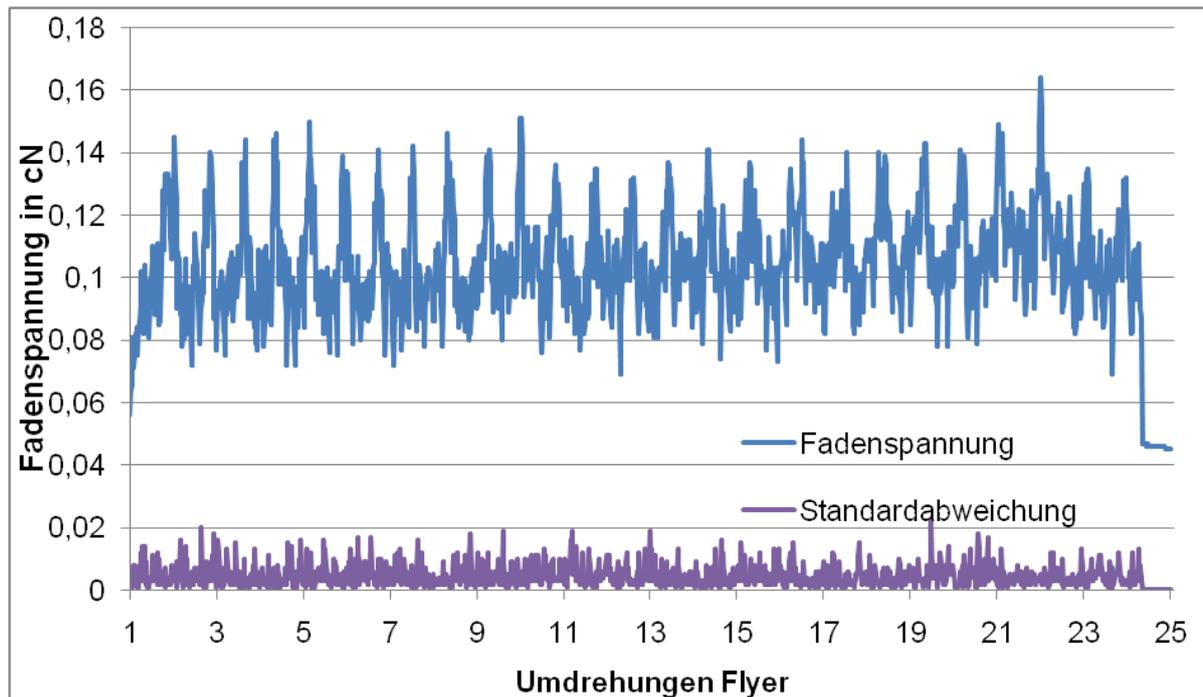


Abbildung 38: Fadenspannungsverlauf für PP-Garn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min) für eine Lage am Zylinderdorn

Zwischen den Peaks sind drei weitere kleinere Peaks erkennbar, die in Abbildung 39 deutlicher dargestellt sind. Pro Flyerumdrehung gibt es also vier Ausschläge in der Fadenspannung, ein größerer Peak und drei kleinere Ausschläge. In den Farben rot, gelb, grün und blau sind die Ausschläge in der Fadenspannung markiert, die durch die Ablagepunkte auf dem Dornkörper entstehen.

Diese Ausschläge in der Fadenspannung erklären sich aus der Zylinderform bzw. aus dem daraus resultierenden unterschiedlichen Fadenweg und damit aus den unterschiedlichen Fadenlaufgeschwindigkeiten. Eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 40. Beim Strukturknäueln am Zylinderdorn wird das Garn auf einem Ablagepunkt auf der Außenkontur des Dornkörpers abgelegt, sobald es um eine Kante gelegt wird. Durch diese Geometrieänderung erfolgt eine sprunghafte Änderung der Fadengeschwindigkeit.

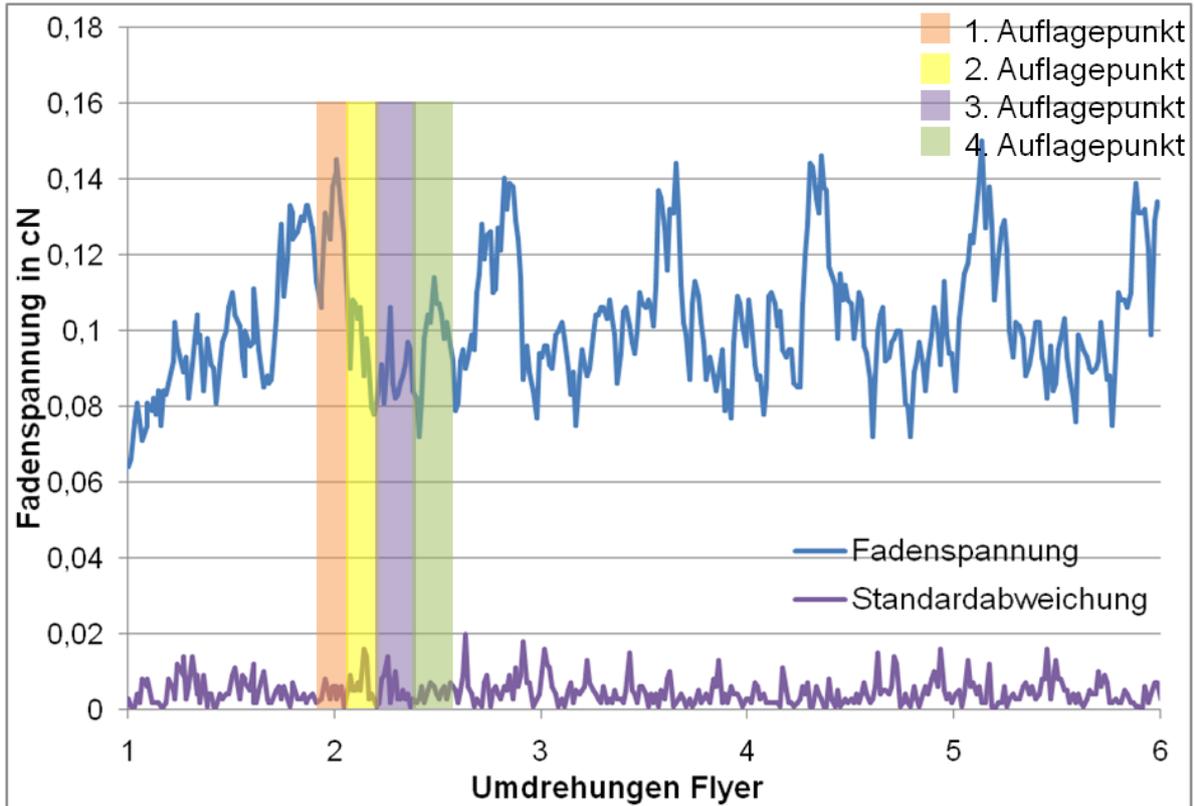


Abbildung 39: Detailaufnahme des Fadenspannungsverlaufs für PP-Garn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min) für sechs Flyerumdrehungen am Zylinderdorn

Das Garn wird aus seiner ursprünglichen Bahn des geringsten Weges gezwungen und erfährt damit eine abrupte Beschleunigung. Diese bewirkt einen Impulsstoß auf das Garn. Der Zylinder weist innerhalb einer Flyerumdrehung vier solcher Kanten und damit Impulsstöße auf, an denen das Garn abgelegt und reibungsbedingt fixiert wird.

Der erste Ausschlag ist bei der gezeigten Konfiguration höher als die nachfolgenden drei. Der erste (rot) und der dritte (blau) Ausschlag entstehen durch die abrupte Geschwindigkeitsänderung ab der Dornkante, nachdem der Flyer und damit das Garn die Längsseite passiert hat. Hier ist die freie Fadenlänge größer als bei den Ablagepunkten zwei (gelb) und vier (grün). Der dritte Impuls (blau) wird durch die Garndehnung abgeschwächt.

Die Impulsstöße können nur durch die Garndehnung kompensiert werden, weswegen Unterschiede in der Höhe der Ausschläge bei unterschiedlichen Garneigenschaften erkennbar sind. Dies wird im Folgenden gezeigt.

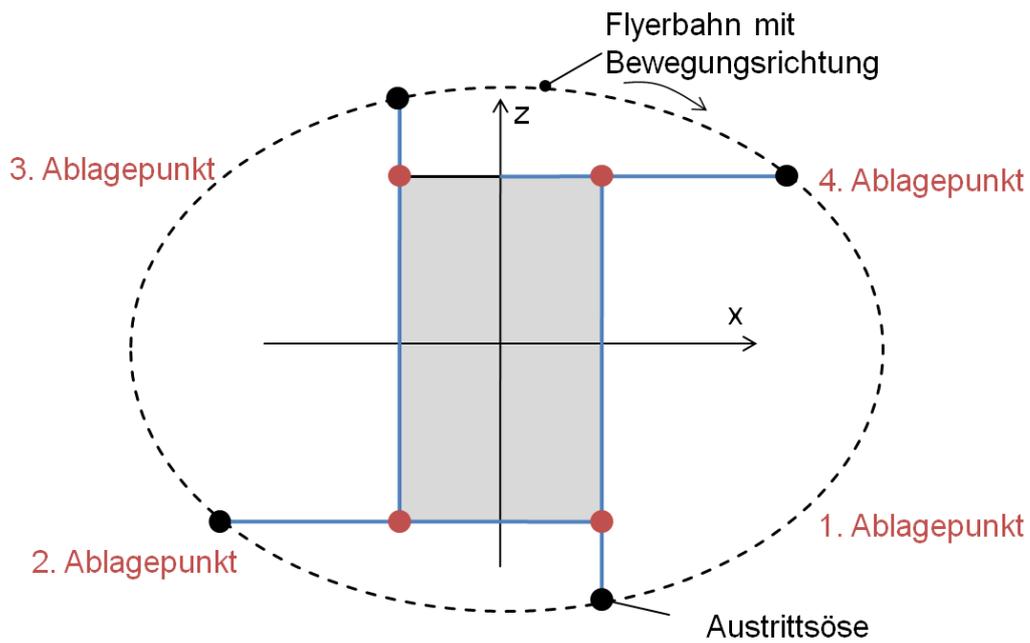


Abbildung 40: Schematische Darstellung der Ablagepunkte beim Strukturknäueln mit Zylinderdorn

In Abbildung 41 ist der Fadenspannungsverlauf für die gleiche Konfiguration am Kugeldorn aufgezeigt. Der Kugeldorn hat weder Kanten noch gerade Flächen, sondern besteht aus einer durchgehend konvexen Außenkontur.

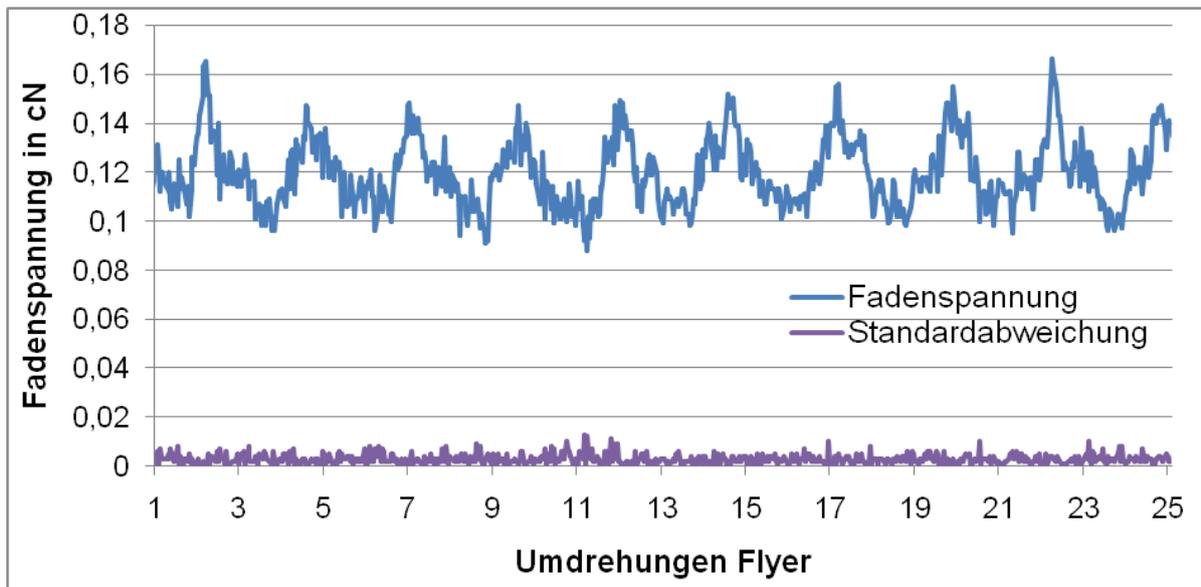


Abbildung 41: Fadenspannungsverlauf für PP-Garn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min) für eine Lage (24 Flyerumdrehungen) am Kugeldorn

Die Fadenspannung verläuft hier nicht konstant, sondern weist ebenfalls Peaks auf. Diese lassen sich jedoch, anders als beim Zylinderdorn, nicht den 24 Flyerumdre-

hungen der gezeigten Lage zuordnen. Zwar ist beim Kugeldorn der Fadenweg konstant, da die freie Fadenlänge zwischen dem Austritt aus dem Flyer und dem Ablagepunkt auf der Dornoberfläche konstant ist, jedoch variiert die Oberflächengeschwindigkeit auf der Kugeloberfläche. Hieraus ergeben sich die Schwankungen in der Fadenspannung, da die Fadenlaufgeschwindigkeit nicht konstant ist.

Der Kugeldorn vergleichmäßigt die Fadenspannung im Vergleich zum Zylinderdorn. Diese erreicht jedoch nicht ein homogenes Niveau, sondern ist weiterhin Schwankungen unterworfen. Unter Beachtung der Schwankungen der Werte liegen die Maximalwerte der Peaks bei beiden Dornformen auf einem ähnlichen Niveau.

5.2.3 Einfluss der Garndehnung auf die Fadenspannung

Nachfolgend wird der Einfluss der Garndehnung auf die Fadenspannung beim Strukturknäueln anhand eines Garns mit sehr geringer Dehnung von 2,05% (Glasgarn) und eines mit höherer Dehnung von 10,59% (CO/PES-Garn) aufgezeigt.

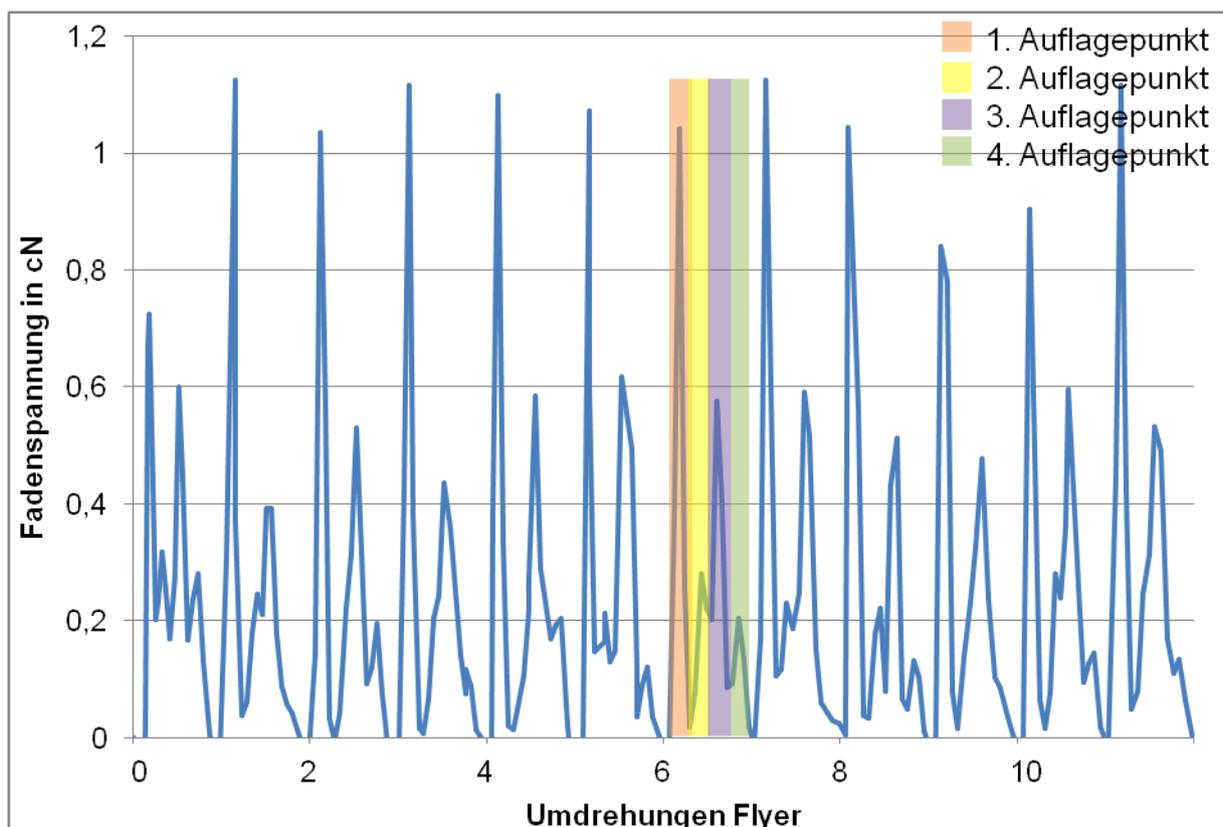


Abbildung 42: Fadenspannungsverlauf für Glasgarn für zwölf Flyerumdrehungen am Zylinderdorn ($h = 24$, $n_F = 100$ 1/min)

In Abbildung 42 sind zwölf Flyerumdrehungen am Zylinderdorn mit Glasgarn dargestellt, was bei einem Drehzahlverhältnis von $h = 24$ einer Dornumdrehung von 90° entspricht. Sehr deutlich sind die vier Peaks pro einer Flyerumdrehung zu erkennen.

In Abbildung 43 sind die Fadenspannungsverläufe der beiden Garne vergleichend dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Peaks, die für den Zylinderdorn typisch sind, beim CO/PES-Garn mit höherer Dehnung nur schwach bzw. kaum wahrnehmbar ausgeprägt sind.

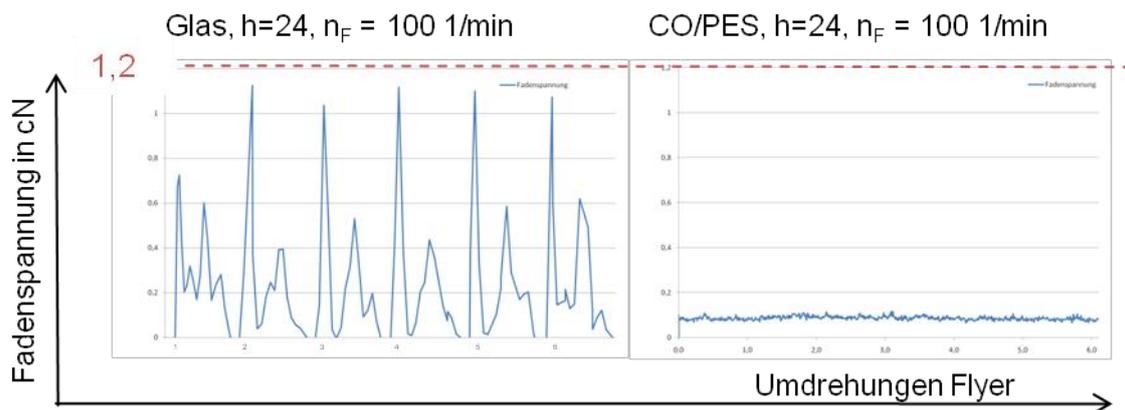


Abbildung 43: Vergleich der Fadenspannungsverläufe für Glas- und CO/PES-Garn bei den gleichen Einstellungen

Die geringere Garndehnung bewirkt also eine Erhöhung der Fadenspannung und eine deutlich erkennbare Dornkörpercharakteristik beim Zylinderdorn im Strukturknäuelprozess. Die in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Impulsstöße auf das Garn aufgrund der Flyerrotation und der Dornkörpergeometrie werden durch eine vorhandene Garndehnung reduziert. Somit reduziert sich die gemessene Fadenspannung.

In Abbildung 44 sind drei verschiedene Fadenspannungsverläufe für Glasgarn gezeigt. In der Mitte (mit grüner Markierung) ist ein Drehzahlverhältnis $h = 24$ bei einer Flyerdrehzahl von $n_F = 100$ 1/min aufgezeigt. Im Diagramm links daneben ist der Verlauf für ein Drehzahlverhältnis $h = 4,8$ bei ebenfalls $n_F = 100$ 1/min gezeigt, im Verlauf rechts daneben wurde das Drehzahlverhältnis $h = 24$ beibehalten und die Flyerdrehzahl auf $n_F = 10$ 1/min reduziert.

Der charakteristische Verlauf der Fadenspannung zeigt beim links dargestellten Verlauf keine für den Zylinderdorn typischen Peaks, während die Verläufe der beiden Konfigurationen mit hoher Flyerdrehzahl, aber unterschiedlichen Drehzahlverhältnissen vergleichbare Charakteristiken zeigen.

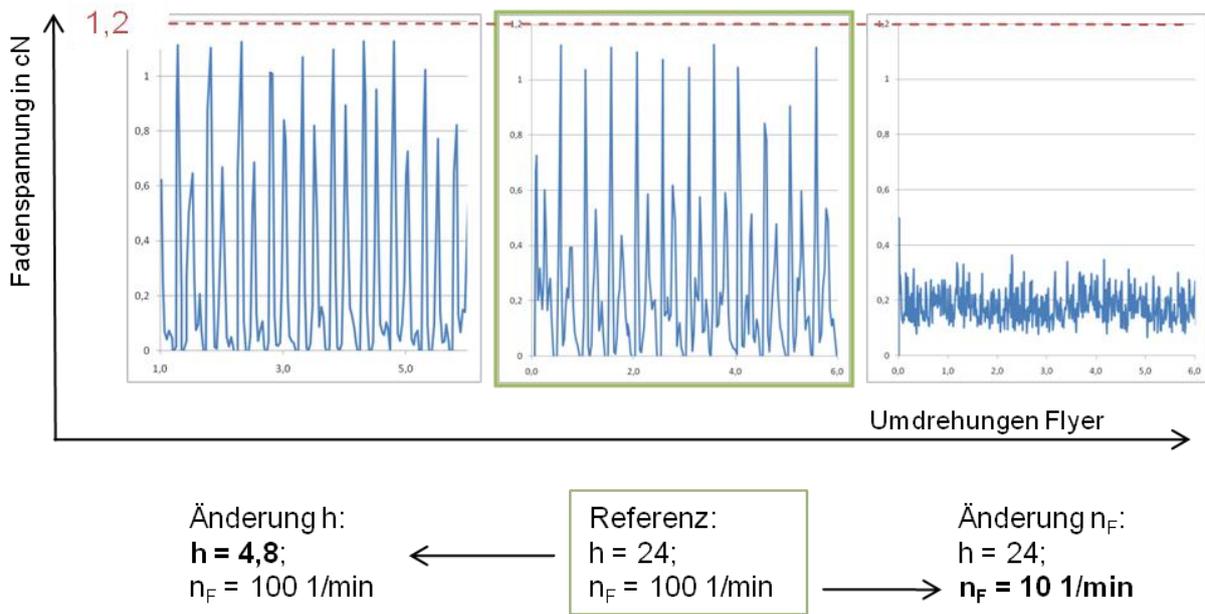


Abbildung 44: Vergleich der Fadenspannungsverläufe (in cN) für Glasgarn am Zylinderdorn für sechs Umdrehungen. Ordinate: Fadenspannung in cN, Abszisse: Umdrehungen. Mitte (grüne Markierung): Referenzkurve, $h = 24$, $n_F = 100$ 1/min. rechts: $h = 24$, $n_F = 10$ 1/min. links: $h = 4,8$, $n_F = 100$ 1/min

Die beiden Drehzahlverhältnisse $h = 24$ und $h = 4,8$ zeigen bei einer höheren Flyerdrehzahl von $n_F = 100$ 1/min die gleiche Charakteristik im Fadenspannungsverlauf. Garne mit geringer Dehnung zeigen eine größere Abhängigkeit von der Flyerdrehzahl, wohingegen die Drehzahlverhältnisse h keinen großen Einfluss nehmen. Es ist anzunehmen, dass bei einer Absenkung der Flyerdrehzahl auf $n_F = 10$ 1/min verstärkt Störeinflüsse, die bspw. von der Garnreibung am Messkopf kommen können, erfasst werden. Diese überlagern sich mit dem Messsignal.

5.2.4 Einfluss der Flyerdrehzahl auf die Fadenspannung

Die Flyerdrehzahlen beim Strukturknäueln sind typischerweise geringer als beim klassischen Knäueln. Anstatt einer optimierten Produktionsgeschwindigkeit zur Erzeugung möglichst vieler Garnknäuel pro Stunde liegen beim Strukturknäueln die Präzision der Fadenablage und eine garnschonende Verarbeitung im Fokus. Für die Bewertung des Einflusses der Flyerdrehzahl auf die Fadenspannung werden jeweils zwei verfahrenstypische Flyerdrehzahlen betrachtet, eine geringe Flyerdrehzahl von $n_F = 10$ 1/min und eine höhere von $n_F = 100$ 1/min.

Geringe Flyerdrehzahlen bewirken in der Regel einen gleichmäßigeren Verlauf der Fadenspannungen, der sich insbesondere durch eine reduzierte Anzahl an Peaks auszeichnet.

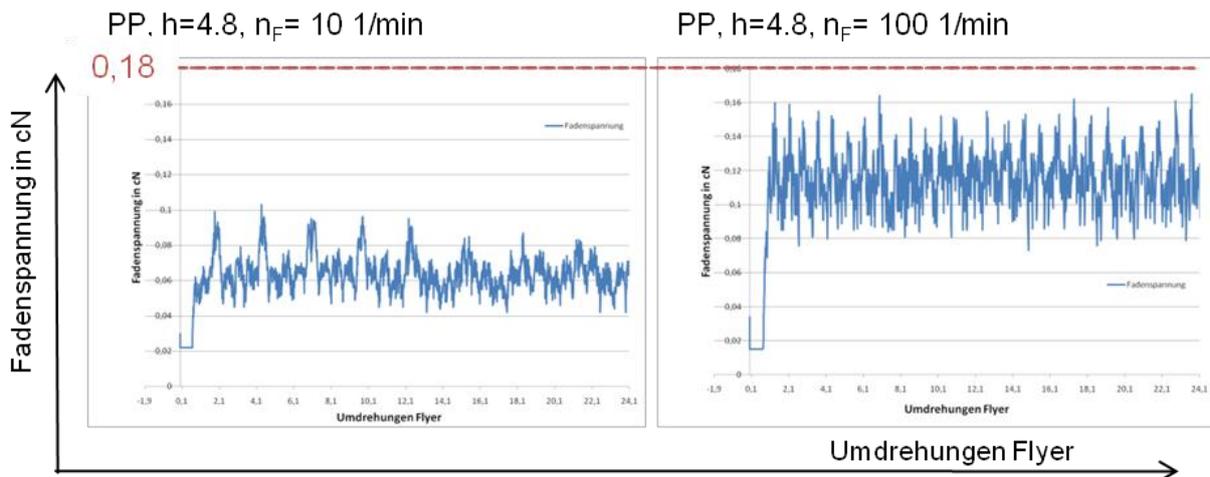


Abbildung 45: Vergleich der Fadenspannungsverläufe (in cN) für PP-Garn, 24 Flyerumdrehungen (eine Lage), ($h = 4.8$), links: $n_F = 10$ 1/min; rechts: $n_F = 100$ 1/min

Bei den PP- und bei den CO/PES-Garnen ist dieses Verhalten in Abbildung 45 und in Abbildung 46 deutlich zu erkennen. Hier ist im linken Fadenspannungsverlauf eine deutlich reduzierte Flyerdrehzahl von $n_F = 10$ 1/min im Vergleich zu $n_F = 100$ 1/min im rechten Bild gezeigt. Die Anzahl und die Höhe der Peaks in der Fadenspannung nehmen bei einer reduzierten Flyerdrehzahl ab. Dies resultiert aus der geringen Beschleunigung im Prozess und damit aus der geringeren Belastung des Garns.

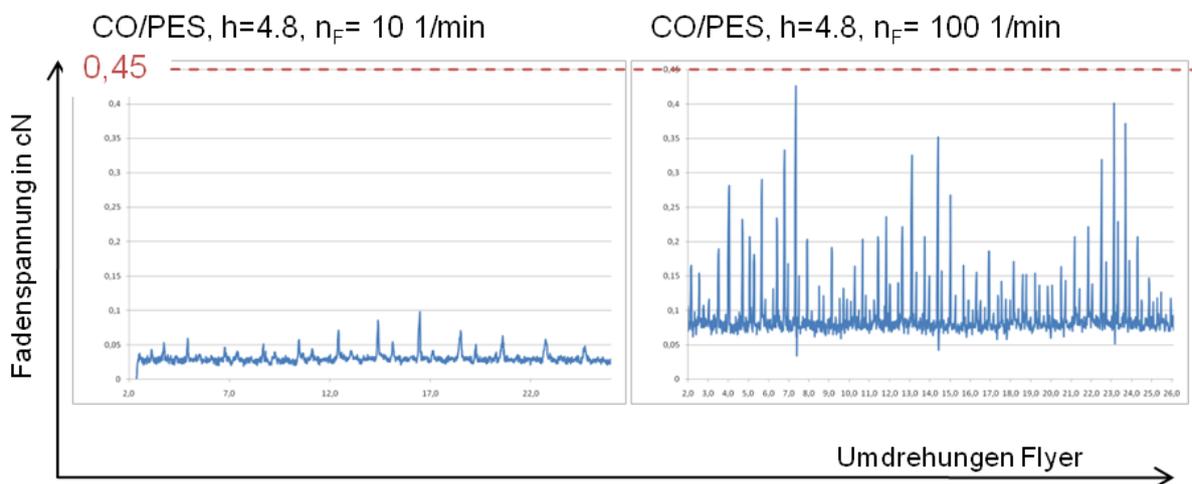


Abbildung 46: Vergleich der Fadenspannungsverläufe (in cN) für CO/PES-Garn, 24 Flyerumdrehungen (eine Lage), beim Zylinderdorn ($h = 4.8$), links: $n_F = 10$ 1/min; rechts: $n_F = 100$ 1/min

Die beschriebenen, für den Zylinderdorn charakteristischen Fadenspannungsverläufe sind abhängig von der verwendeten Garnart für niedrige und höhere Flyerdrehzahlen erkennbar. Bei PP-Garn sind die Peaks und Nebenpeaks deutlich stärker ausgeprägt als beim CO/PES-Garn. Dieses Verhalten ist auf die Garndehnung zurückzuführen,

die die wirkenden Impulsstöße auf das Garn reduziert. Geringe Flyerdrehzahlen sowie hohe Garndehnungen vergleichmäßigen also den Fadenspannungsverlauf.

5.2.5 Fadengrundspannung

Beim Strukturknäuelprozess steht das Garn unter einer Fadengrundspannung. Wird im Garnzulauf keine zusätzliche Spannung über Fadenbremsen aufgebracht, so besteht die Fadengrundspannung aus den Reibkräften, die entlang des Fadenlaufs auf das Garn wirken. Diese hängen einerseits von Garneigenschaften ab, andererseits spielt die geometrische Ausführung des Flyers sowie dessen Material bzw. Beschichtung auf der Innenseite eine Rolle. Im Fadenzulauf kann über Fadenbremsen die Fadengrundspannung verändert und gezielt kontrolliert werden.

Nachfolgend ist der Fadenspannungsverlauf dargestellt, bei dem die Fadengrundspannung in fünf Stufen schrittweise erhöht wurde. Pro Spannungsstufe wurde eine halbe Lage geknäuel, was zwölf Flyerumdrehungen entspricht. Erkennbar sind die bereits beschriebenen, für den Zylinderdorn charakteristischen großen Peaks in der Fadenspannung. In jedem Niveau der Fadengrundspannung läuft die Fadenspannung stabil. Dieses Verhalten zeigt sich unabhängig von der Dehnung des Garns.

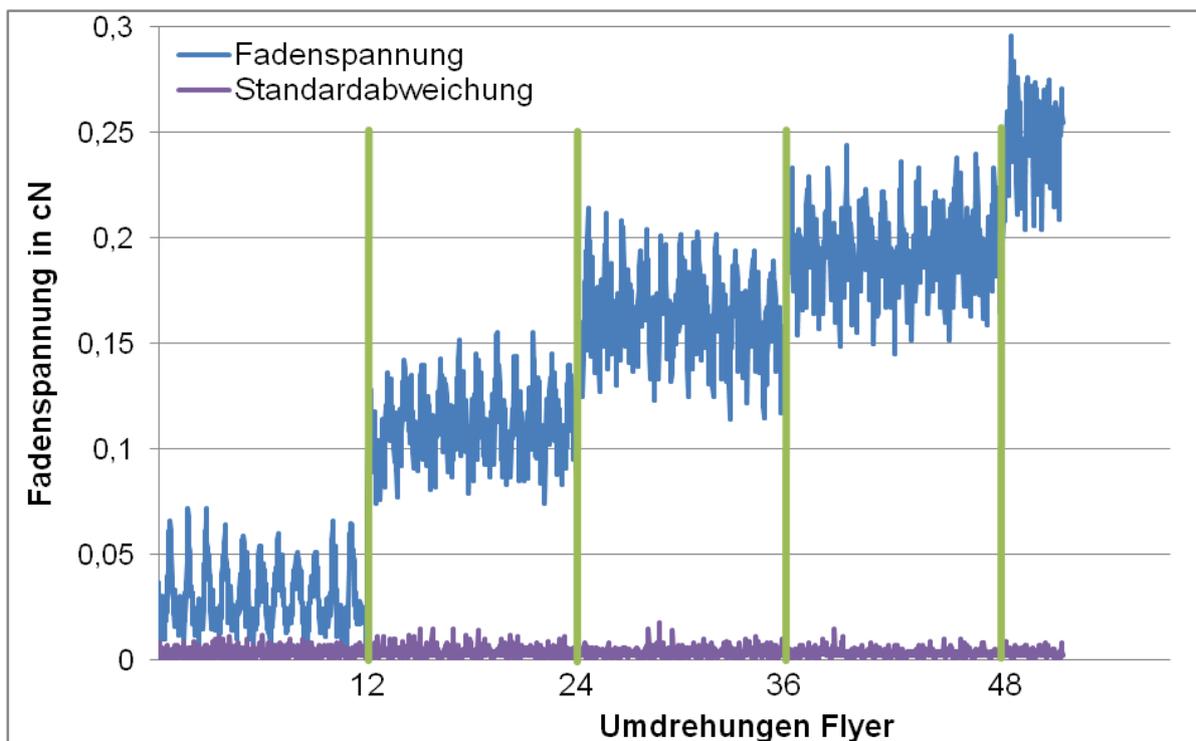


Abbildung 47: Fadenspannungsverlauf für PP-Garn am Zylinderdorn, $h = 24$, $n_F = 100$ 1/min, Erhöhung der Fadengrundspannung in fünf Stufen

In Abbildung 48 ist ein Ausschnitt des Fadenspannungsverlaufs an der zweiten Erhöhung der Fadengrundspannung aus Abbildung 47 gezeigt. Die Verläufe auf beiden Spannungsniveaus zeigen vergleichbare Charakteristiken. Die hohen Peaks sind erkennbar, die weiteren drei kleineren Peaks größtenteils ebenfalls.

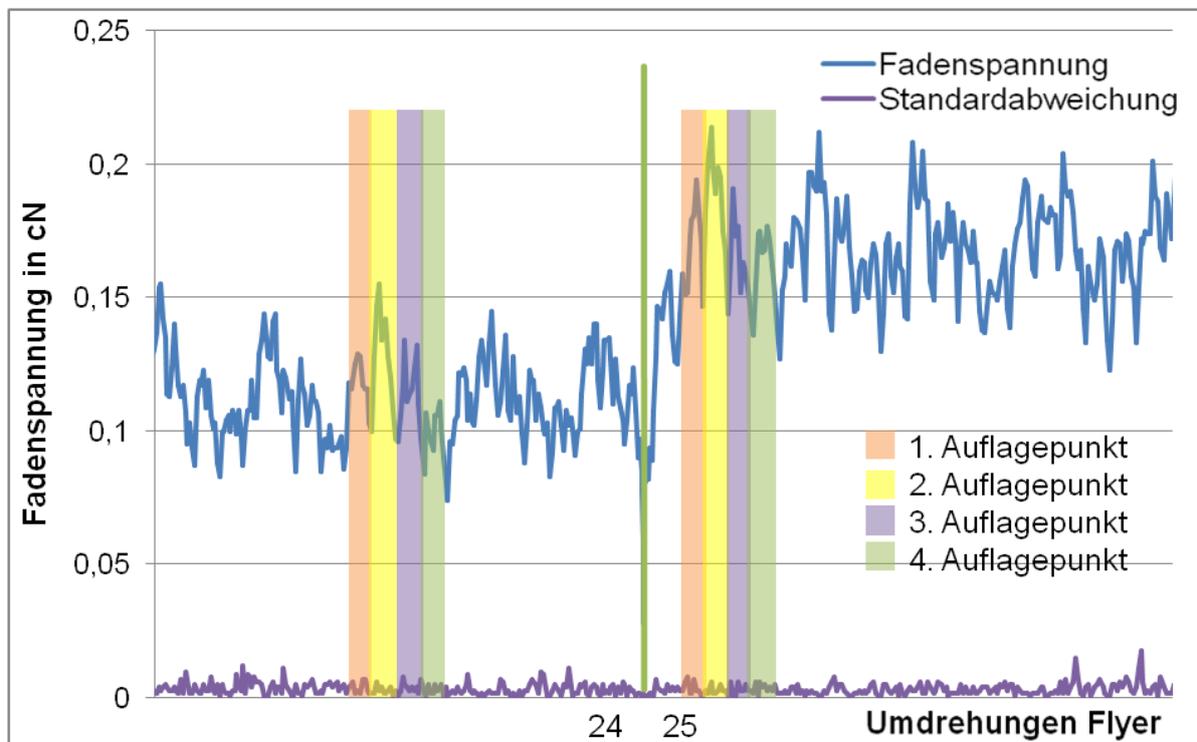


Abbildung 48: Detailbetrachtung des Fadenspannungsverlaufs zwischen der 24. und der 25. Flyerumdrehung (PP-Garn, $h = 24$, $n_F = 100$ 1/min)

Eine Erhöhung der Fadengrundspannung hat also keine Auswirkung auf den Fadenspannungsverlauf ausgenommen der Parallelverschiebung um das Niveau der Fadengrundspannung selbst. Die charakteristischen, dornformabhängigen Verläufe bleiben erhalten.

Fazit

Die gemessene Fadenspannung zeigt beim Zylinderdorn, welcher ein geschlossener Dornkörper mit gekrümmten Flächen und Kanten exemplarisch darstellt, einen charakteristischen Verlauf. Pro Flyerumdrehung sind vier Peaks im Fadenspannungsverlauf messbar, die durch die abrupten Änderungen in der Fadengeschwindigkeit und die daraus resultierenden Impulsstöße auf das Garn entstehen. Dieses Verhalten kann durch die Garndehnung kompensiert werden. Garne mit einer geringen Garndehnung zeigen also einen Fadenspannungsverlauf mit höheren Ausschlägen und

damit eine größere Abhängigkeit von der Flyerdrehzahl als Garne mit hohen Garndehnungen.

Eine hohe Flyerdrehzahl spiegelt sich in der höheren Fadenspannung wider, da die Garnbelastung aufgrund der höheren Beschleunigung größer ist. Geringe Flyerdrehzahlen und hohe Garndehnungen vergleichmäßigen also den Prozess, es sind geringere und niedrigere Ausschläge in der Fadenspannung messbar.

Die Fadengrundspannung ändert die Grundcharakteristik der Fadenspannung nicht. Eine Erhöhung der Fadengrundspannung bewirkt eine entsprechende Parallelverschiebung des Fadenspannungsverlaufs.

5.3 Anstellwinkel des Dornbalkens und Dornposition im Knäuelraum

Der Anstellwinkel α beschreibt den Winkel zwischen der Rotationsachse des Dorns und der Horizontalen und hat einen direkten Einfluss auf die Fadenablage. Er wird über den Dornbalken vorgegeben. Bei Strukturknäueln wird definitionsgemäß das Garn neben der Mantelseite auch auf den Stirnseiten abgelegt, was jedoch nicht bei allen theoretisch möglichen Anstellwinkeln und entsprechenden Parametersätzen möglich ist.

Diese Zusammenhänge zwischen dem Anstellwinkel, der Dornkörpergeometrie und der Dornkörperposition im Knäuelraum werden nachfolgend für die Dornkörpergrundformen Kugel und Zylinder untersucht. Es wird der minimal mögliche Anstellwinkel für eine Fadenablage als Strukturknäuel ermittelt, der für eine Ablage auf den Stirnseiten zwingend erforderlich ist. Ebenso werden Berechnungsmöglichkeiten für die Bereiche ohne Garnabdeckung auf den Stirnseiten erarbeitet. Aufgrund der Rotations-symmetrie werden die Zusammenhänge im zweidimensionalen System dargestellt.

5.3.1 Anstellwinkel und Dornposition beim Kugeldorn

Zusammenhänge der Parameter Anstellwinkel, Dornkörpergeometrie und Dornkörperposition

Betrachtet wird ein kugelförmiger Dorn mit dem Radius r_D , wie er in Abbildung 49 dargestellt ist. Dieser stellt eine geschlossen-konvexe Außenkontur ohne Kanten dar. Die Stirnseiten sind beim kugelförmigen Dornkörper gewölbt.

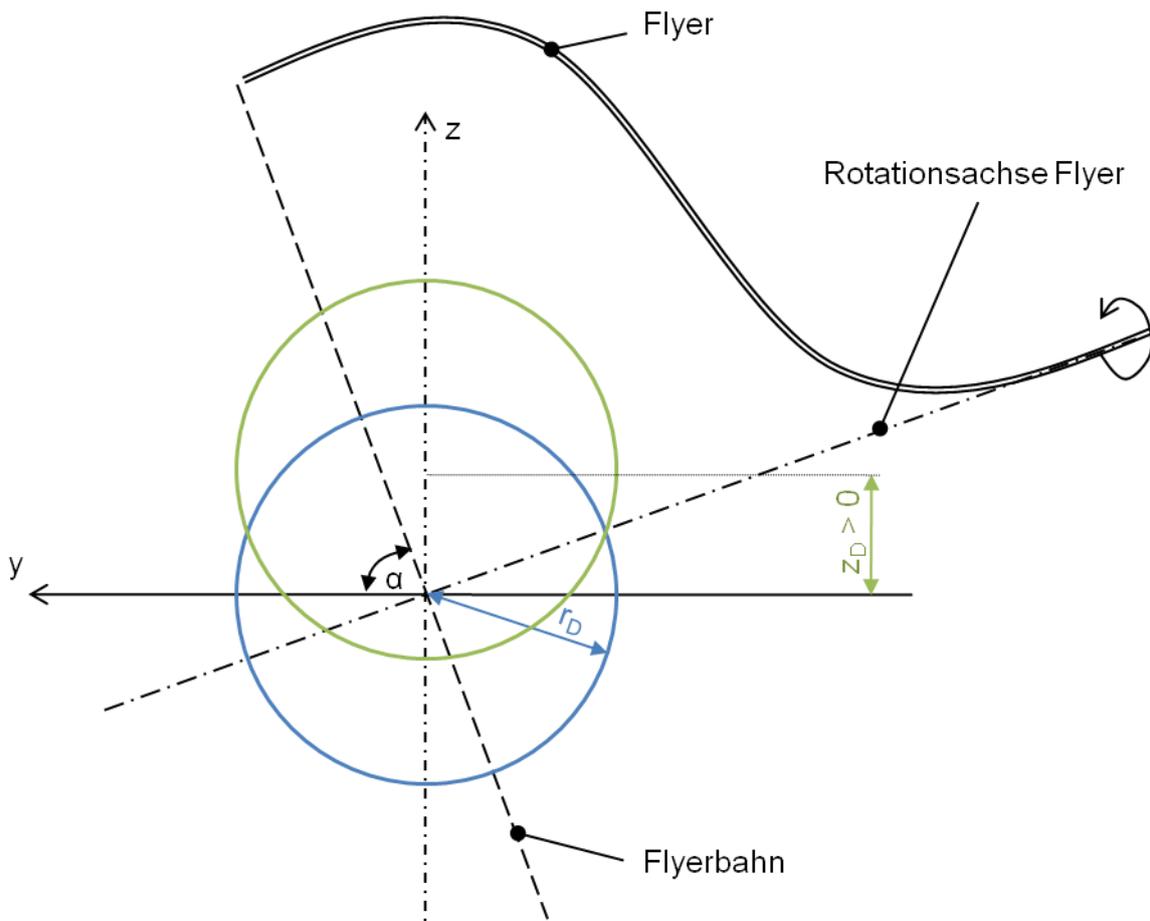


Abbildung 49: Schematische Darstellung des Kugeldorns im Koordinatensystem. Blau: Zentrum-Zentrum-Position, grün: z_D -Zentrum-Position. z_D : Dornzentrum, r_D : Dornkörperradius, α : Anstellwinkel

Für die Darstellung der Zusammenhänge wird die Gleichung der Flyerbahn im gegebenen, zweidimensionalen Koordinatensystem aufgestellt.

$$z = y \cdot \tan \alpha \quad 5.2$$

Die Kreisgleichung, die die Dornkörperkontur im Zweidimensionalen beschreibt, lautet

$$(x - x_D)^2 + (z - z_D)^2 = r_D^2 \quad 5.3$$

wobei x_D und z_D die Verschiebung des Dornkörpers aus dem Koordinatenursprung beschreiben. Bei der Zentrum-Zentrum-Position gilt $x_D = z_D = 0$.

Positionierung des Dornkörpers im Knäuelraum

Prinzipiell kann der Dornkörper entlang der drei Achsen im betrachteten Koordinatensystem verschoben werden. In dieser Arbeit wird die Verschiebung entlang der z-Achse betrachtet, da diese in der Praxis sinnvoll umgesetzt werden kann. Eine Verschiebung entlang der x- und der y-Achse bedeutet die Erzwingung einer drastischen Asymmetrie, die für technische Anwendungen so nicht üblich ist.

Bei der Betrachtung der Positionierung des Dornkörpers im Knäuelraum muss also zwischen zwei Fällen unterschieden werden. Fall 1 beschreibt die Positionierung in Zentrum-Zentrum-Position, Fall 2 beschreibt die Verschiebung des Dornkörpers um z_D . Es gelten für den Mittelpunkt der Flyerbahn (y_M, z_M) folgende, in Tabelle 13 genannten Zusammenhänge.

Tabelle 13: Mittelpunkt M der Flyerbahn für Fall 1 und Fall 2

	Mittelpunkt der Flyerbahn (y_M, z_M)
Fall 1 (Zentrum-Zentrum-Position)	$M = (y_M, z_M) = 0; y_D = z_D = 0$. M liegt im Ursprung des Koordinatensystems.
Fall 2 (z_D -Zentrum-Position)	$M = (y_M, z_M)$ ist der Schnittpunkt der um ΔK verschobenen Flyerbahn mit der Rotationsachse des Flyers.

Fall 1: Dornkörper liegt in der Zentrum-Zentrum-Position, d.h. die Ebene durch die Flyerbahn schneidet den Dornkörper in dessen Mittelpunkt und der Dornkörper liegt im Koordinatensystemursprung.

In diesem Fall haben die beiden garnfreien Bereiche an der kopf- und fußseitigen Stirnseite die gleichen Radien $r_{\ddot{o}}$. Diese nehmen mit wachsendem Anstellwinkel ab. Es gilt der Zusammenhang

$$r_{\ddot{o}} = r_D \cdot \cos \alpha \quad 5.4$$

In Abbildung 49 ist dieser Fall 1 dargestellt. In nachfolgender Abbildung 50 ist der berechnete Zusammenhang für einen Dornradius von $r_D = 100$ mm dargestellt. Bei einem Anstellwinkel von $\alpha = 90^\circ$ ist ein Radius $r_{\ddot{o}} = 0$ mm möglich, was einer vollflächig mit Garn bedeckten Stirnseite entspricht.

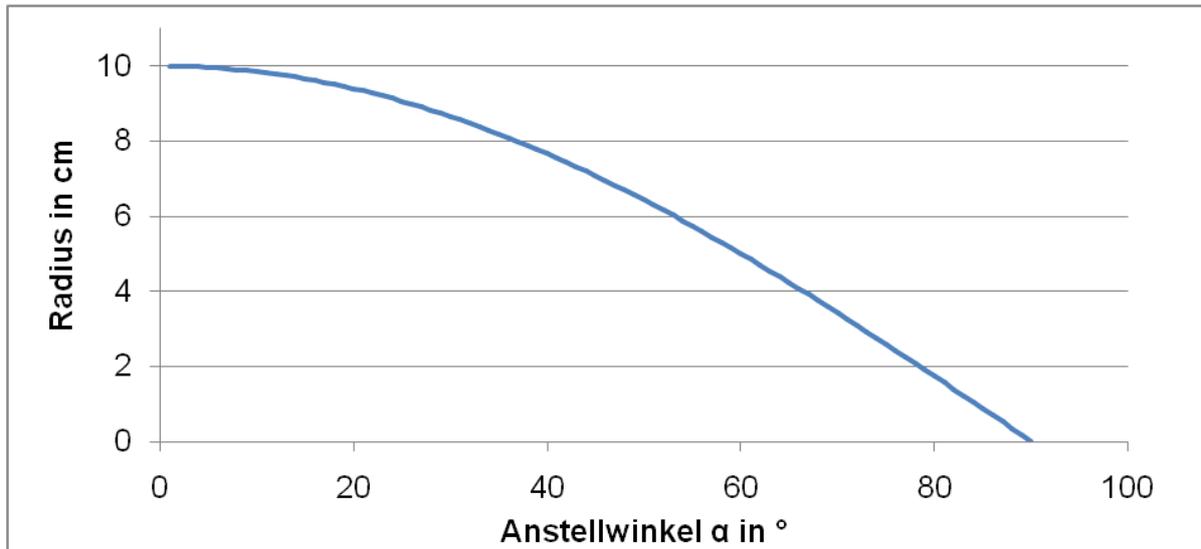


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen dem Radius r_0 der freien Bereiche auf den Stirnflächen und dem Anstellwinkel beim Kugeldorn ($r_D = 100$ mm) in Zentrum-Zentrum-Position

Fall 2: Dornkörper liegt um z_D entlang der z-Achse verschoben, d.h. in der z_D -Zentrum-Position.

Für die Berechnung der nicht vom Garn bedeckten Bereiche wird das Schnittproblem gelöst, das vom Schnitt der Ebene durch die Flyerbahn mit dem Konturkreis des Dornkörpers aufgestellt wird, durch Einsetzen von (5.2) in die Kreisgleichung (5.3).

$$x^2(1 + \tan^2 \alpha) + x(-2x_D - 2 \tan \alpha \cdot z_D) + x_D^2 + z_D^2 = r_D^2 \quad 5.5$$

Durch Auflösung dieser Gleichung nach x lassen sich die Radien der Bereiche auf den kopf- und fußseitigen Stirnseiten r_{0K} und r_{0F} berechnen, die bei statischer, zweidimensionaler Betrachtung unter Annahme des Anstellwinkels α nicht von Garn bedeckt werden.

$$r_{0K} = \frac{z_D \cdot \tan \alpha + \sqrt{z_D^2 \cdot \tan^2 \alpha - (1 + \tan^2 \alpha)(z_D - r_D)^2}}{1 + \tan^2 \alpha} \quad 5.6$$

$$r_{0F} = \frac{z_D \cdot \tan \alpha - \sqrt{z_D^2 \cdot \tan^2 \alpha - (1 + \tan^2 \alpha)(z_D - r_D)^2}}{1 + \tan^2 \alpha} \quad 5.7$$

Die nicht vom Garn bedeckten Bereiche auf den Stirnseiten r_{0K} und r_{0F} sind also direkt abhängig von

- der Dornkörperposition im Knäuelraum, d.h. von der Verschiebung des Dornkörpers aus dem Ursprung des Koordinatensystems in z-Richtung z_D ,
- dem Anstellwinkel α und
- dem Dorndurchmesser r_D .

Wird der Dornkörper um $z = z_D$ in z-Richtung verschoben, so entspricht dies einer Verschiebung der Flyerbahn aus dem Zentrum. Dieser Fall ist in Abbildung 49 in grün dargestellt. Soll in diesem Fall weiterhin eine symmetrische Beknäuelung erfolgen, muss die Flyerbahn durch eine Verschiebung ΔK nachgeführt werden. In der Abbildung 51 sind diese Zusammenhänge zwischen dem Mittelpunkt z_D des Dornkörpers (Index D) und dem Mittelpunkt der Flyerbahn (Index M) verdeutlicht.

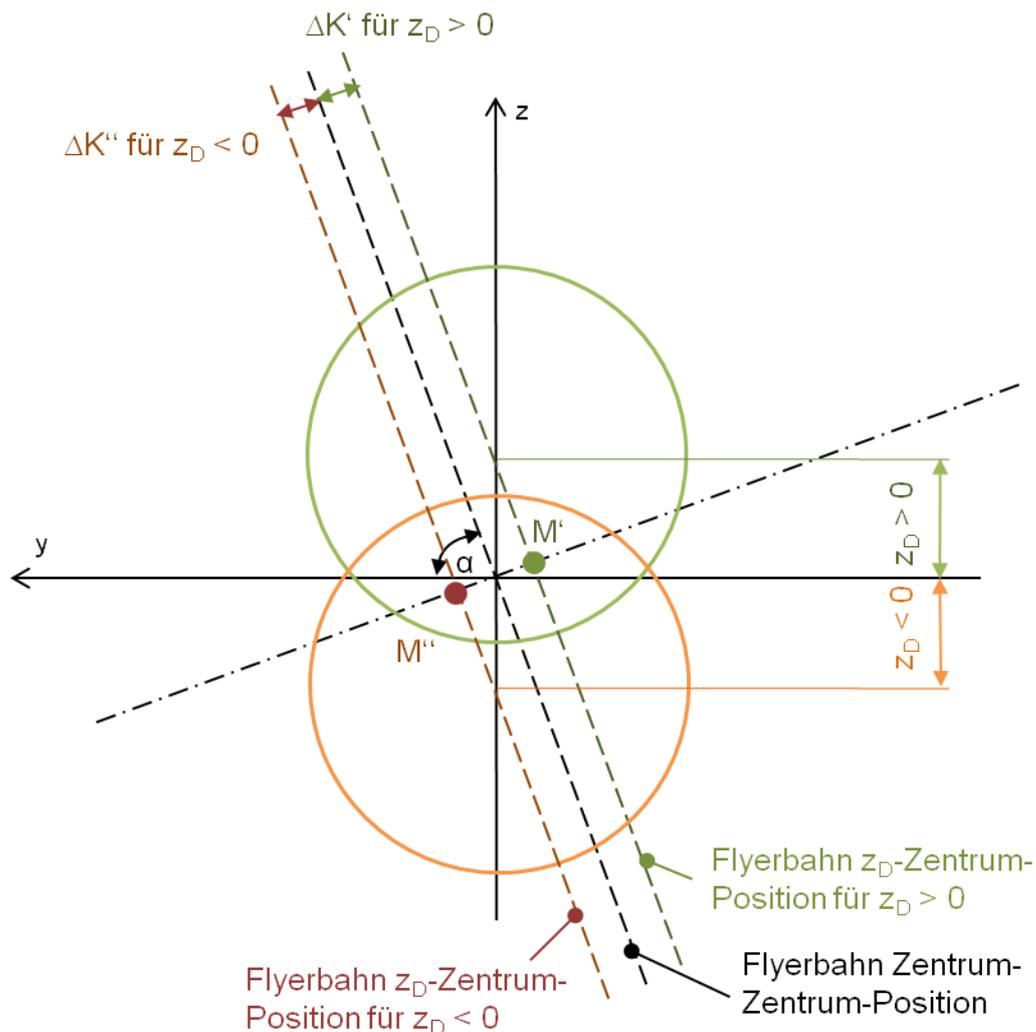


Abbildung 51: Schematische Darstellung des Kugeldorns für die z_D -Zentrum-Position. z_D : Dornzentrum, M' : Mittelpunkt der Flyerbahn für z_D -Zentrum-Position für $z_D > 0$, M'' : Mittelpunkt der Flyerbahn für z_D -Zentrum-Position für $z_D < 0$, α : Anstellwinkel, ΔK : Flyerbahnverschiebung

Es gelten nun für Fall 2 die folgenden Beziehungen:

- Eine Verschiebung des Dornkörpers aus dem Ursprung des Koordinatensystems um $z = z_D \neq 0$ hat zur Folge, dass die Bereiche auf den Stirnseiten, die nicht mit Garn bedeckt sind ($r_{\text{ÖK}}$ und $r_{\text{ÖF}}$), unterschiedlich große Werte annehmen.
- Eine Verschiebung des Dorns in positiver Koordinatenrichtung, d.h. um $z_D > 0$ ohne Verschiebung der Flyerbahn um $\Delta K'$ bewirkt, dass die Asymmetrie $r_{\text{ÖK}} > r_{\text{ÖF}}$ gilt.
- Eine Verschiebung des Dorns in negativer Koordinatenrichtung, d.h. um $z_D < 0$ ohne Verschiebung der Flyerbahn um $\Delta K''$ bewirkt, dass die Asymmetrie $r_{\text{ÖK}} < r_{\text{ÖF}}$ gilt.

Eine Symmetrie ($r_{\text{ÖK}} = r_{\text{ÖF}}$) kann erhalten werden, indem die Flyerbahn um den Wert ΔK nachgeführt wird. Diese Verschiebung ΔK der Flyerbahn entlang der Rotationsachse berechnet sich zu

$$\Delta K = z_D \cdot \cos \alpha \quad 5.8$$

Zu beachten ist, dass ein fußseitiger Radius $r_{\text{ÖF}} = 0$ mm in der Praxis nicht umsetzbar ist, da sich hier der Dornschaft befindet. Das Garn wird sich in diesem Fall entlang des Dornschafts aufeinander ablegen. Je größer der Anstellwinkel ist, desto kleiner wird die für eine Symmetrie erforderliche Verschiebung der Flyerbahn ΔK . Große Anstellwinkel sind demzufolge in der Praxis weniger anfällig für Änderungen der Flyerbahn bezogen auf das Koordinatensystem. Bei großen Anstellwinkeln sind die Radien der Bereiche auf den Stirnseiten kleiner, auf denen keine Fadenablage erfolgt. Es ist bei großen Anstellwinkeln also möglich, eine größere Fläche des Dornkörpers mit Garn zu bedecken als bei kleinen Anstellwinkeln. Der freie Radius auf der Kopfseite $r_{\text{ÖK}}$ kann Werte zwischen 0 mm und prinzipiell dem Dornradius r_D annehmen. Es ist möglich, die Stirnseite komplett mit Garn zu bedecken. Hierfür muss der Dornkörper entweder im Anstellwinkel $\alpha = 90^\circ$ beknäueln (Fall 1) oder um $z_D = -r_D$ verschoben werden, d.h. in negativer z-Richtung (Fall 2).

5.3.2 Anstellwinkel und Dornposition beim Zylinderdorn

Zusammenhänge der Parameter Anstellwinkel, Dornkörpergeometrie und Dornkörperposition

Betrachtet wird ein zylindrischer Dorn mit dem Radius r_D und der Höhe $H_D = 2h_D$. Für die Ausbildung eines Knäuels soll das Garn auf den Stirnseiten abgelegt werden. Die

Fadenablage auf den Stirnseiten hängt beim Zylinderdorn ab von den Parametern Anstellwinkel, Dornkörpergeometrie und der Dornkörperposition im Knäuelraum.

Es gelten, analog zum Kugeldorn, die in Abbildung 52 gezeigten geometrischen Zusammenhänge und Bezeichnungen.

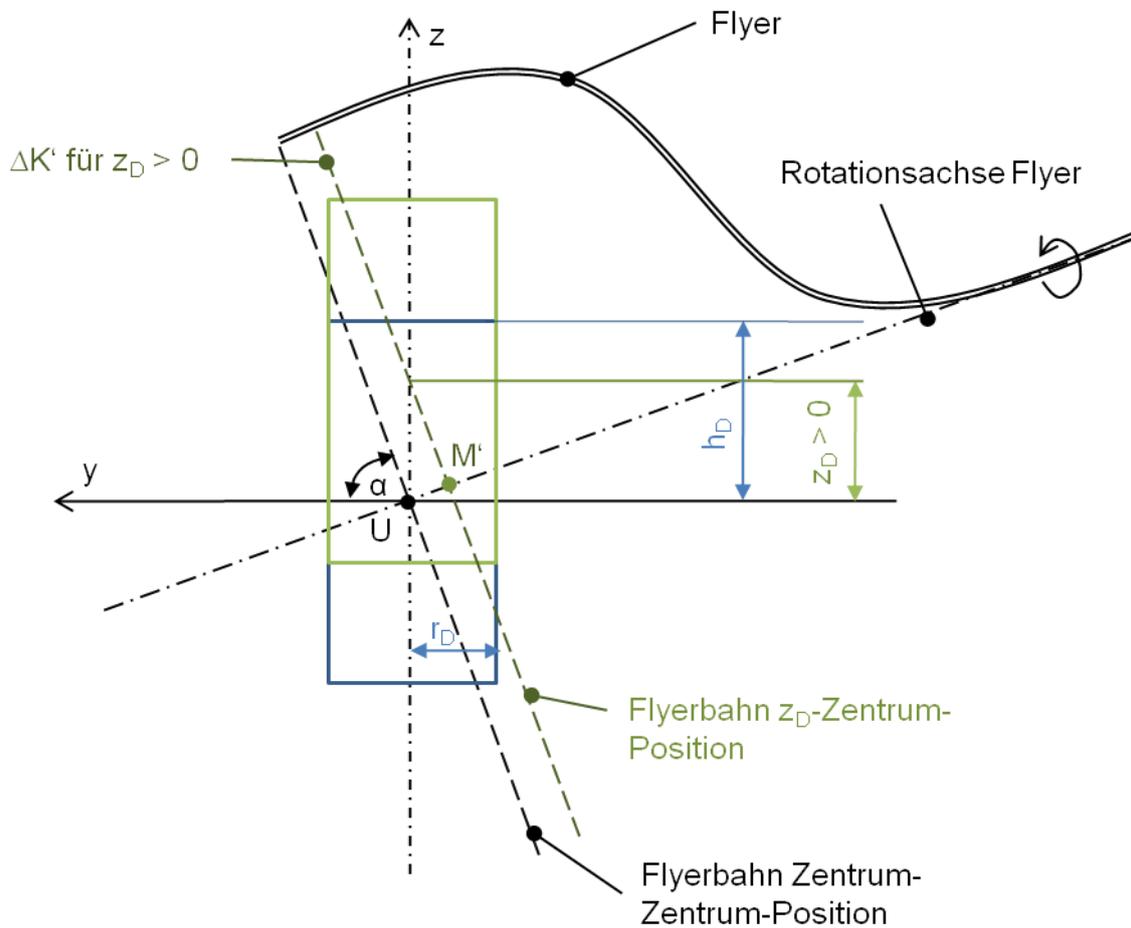


Abbildung 52: Schematische Darstellung des Zylinderdorns im Koordinatensystem. Blau: Zentrum-Zentrum-Position, grün: z_D -Zentrum-Position. ΔK : Verschiebung der Flyerbahn. h_D , r_D : Höhe und Radius des Dornkörpers, M' : Mittelpunkt der Flyerbahn für z_D -Zentrum-Position für $z_D > 0$

Es muss analog zum Kugeldorn zwischen den folgenden Fällen unterschieden werden.

Fall 1: Der Dorn liegt in der Zentrum-Zentrum-Position ($z_D = 0$) das bedeutet, der Mittelpunkt des zylindrischen Körpers liegt im Mittelpunkt des Koordinatensystems und die Ebene durch die Flyerbahn schneidet dieses im Ursprung.

Dieser Fall ist in Abbildung 52 in blauer Farbe dargestellt. Es erfolgt eine Fadenablage auf der Stirnfläche, wenn für den Anstellwinkel gilt

$$\alpha \geq \arctan \frac{h_D}{r_D} \quad 5.9$$

Es ergeben sich auf der Kopf- und Stirnseite Bereiche, die geometrisch bedingt nicht vom Garn bedeckt werden können. Durch die symmetrische Positionierung des Dorns sind diese Bereiche im beschriebenen Fall gleich groß. Sie lassen sich bei bekanntem Anstellwinkel α durch die Beziehung

$$r_{\ddot{o}} = \frac{h_D}{\tan \alpha} \quad 5.10$$

berechnen. Für die Zentrum-Zentrum-Position gilt $r_{\ddot{o}} = r_{\ddot{o}K} = r_{\ddot{o}F}$. Der Radius $r_{\ddot{o}}$ nimmt mit steigendem Anstellwinkel ab. Bei kleinen Drehzahlverhältnissen bildet sich dieser Bereich nicht kreisförmig, sondern als Polyeder aus. Hier stellt $r_{\ddot{o}}$ ein Mittelwert aus zu betrachtendem Inkreis- und Umkreisradius dar. Gilt $r_{\ddot{o}} = r_D$, so beschreibt der Winkel

$$\alpha_{min} = \arctan \frac{h_D}{r_D} \quad 5.11$$

den theoretischen minimalen Anstellwinkel für eine minimale Fadenablage auf den Stirnflächen.

Fall 2: Der Dorn liegt in z_D -Zentrum-Position, d.h. er ist um z_D entlang der z-Achse verschoben, die Flyerbahnebene verläuft durch den Ursprung des Koordinatensystems.

In diesem Fall ist eine Fadenablage auf der Stirnfläche und damit die Ausbildung eines Knäuels möglich, wenn für den Anstellwinkel gilt

$$\alpha \geq \arctan \frac{h_D + z_D}{r_D} \quad 5.12$$

Liegt der zylindrische Dornkörper mit Radius r_D also um den Wert $z = z_D$ aus dem Mittelpunkt verschoben, so berechnet sich der nun mögliche minimale Anstellwinkel α_{min} für eine Fadenablage auf der Stirnseite zu

$$\alpha_{min} = \arctan \frac{h_D + z_D}{r_D} \quad 5.13$$

So kann über (5.13) eine Beurteilung der Beknäuelbarkeit in Abhängigkeit des Anstellwinkels α , der Position z_D des Dornkörpers im Knäuelraum und der Dornkörpermaße r_D und h_D erfolgen.

Die Bereiche, die auf den Stirnseiten nicht mit Garn bedeckt sind, haben die Radien $r_{\text{ÖK}}$ und $r_{\text{ÖF}}$ und lassen sich aus den Zusammenhängen (5.14) und (5.15) berechnen.

Für eine Verschiebung in positiver Richtung entlang der z-Achse gelten die Zusammenhänge

$$\tan \alpha = \frac{h_D - z_D}{r_{\text{ÖF}}} \quad 5.14$$

für die fußseitige Stirnseite und

$$\tan \alpha = \frac{h_D + z_D}{r_{\text{ÖK}}} \quad 5.15$$

für die kopfseitige Stirnseite.

Unter Beibehaltung des ursprünglich gesetzten Anstellwinkels im Fall $z = z_D$ kann die Fadenablage auf der Stirnseite durch eine Verschiebung der Flyerbahn um ΔK erreicht werden.

Die Rotationsachse des Flyers folgt der Gleichung

$$z = -y \cdot \tan(90^\circ - \alpha) \quad 5.16$$

Die Flyerbahn lässt sich in der y,z-Ebene wie folgt darstellen:

$$z = y \cdot \tan \alpha + z_D + h_D - r_D \cdot \tan \alpha \quad 5.17$$

Die Lösung des Schnittproblems der beiden dargestellten Gleichungen ergibt die y-Koordinate des Mittelpunkts der verschobenen Flyerbahn

$$y_M = \frac{r_D \cdot \tan \alpha - z_D - h_D}{\tan \alpha + \tan(90^\circ - \alpha)} \quad 5.18$$

Mit der Beziehung $\sin \alpha = \frac{y_M}{\Delta K}$ und y_M berechnet sich die für eine Fadenablage auf der Stirnfläche erforderliche Verschiebung der Flyerbahn ΔK zu

$$\Delta K \geq \frac{r_D \cdot \tan \alpha - z_D - h_D}{(\tan \alpha + \tan(90^\circ - \alpha)) \cdot \sin \alpha} \quad 5.19$$

Fazit der Untersuchung des Anstellwinkels und der Dornposition im Knäuelraum

Die dargelegten Zusammenhänge ermöglichen über die Dornkörperform und den Anstellwinkel eine Berechnung der Fadenablage auf dem Dorn und damit eine Einschätzung der Beknäuelbarkeit. Durch die Reduzierung auf die zweidimensionale Be-

trachtung gelten die Zusammenhänge für rotationssymmetrische Körper, die entsprechend der Angaben und Skizzen im Knäuelraum platziert werden. Die gezeigten Zusammenhänge gelten insbesondere für beim Strukturknäueln geringe Dorn- und Flyerdrehzahlen.

Die folgenden Parameter beeinflussen die Beknäuelbarkeit:

- Anstellwinkel
- Dornkörperform
- Dornposition im Koordinatensystem, d.h. bezogen auf die Rotationsachse des Flyers und des Dorns.

Die Bereiche, die beim Kugel- und Zylinderdorn nicht von Garn bedeckt werden, können über die Radien $r_{\text{ÖK}}$ und $r_{\text{ÖF}}$ berechnet werden. Es ist möglich, die Kopfseite komplett mit Garn zu bedecken ($r_{\text{ÖK}} = 0$ mm) und so eine geschlossene Struktur zu erzeugen.

5.4 Bereich des freien Fadens

Der Bereich, zwischen dem das Garn die Flyeraustrittsöse A verlässt und dem Auf-
laufpunkt auf dem Dornkörper, ist der Bereich des freien Fadens. Zwischen der Aus-
trittsöse und der Fixierung auf dem Dorn wird das Garn kontaktlos geführt. Aus die-
sem Grund ist es wichtig, das Verhalten des Garns bei verschiedenen Flyerdrehzah-
len zu kennen. Es wird nun phänomenologisch untersucht, wann Ballonierungseffek-
te des Garns auftreten.

Ballonierungen entstehen bei einem Ungleichgewicht der am Garn wirkenden Kräfte,
die dann das Garn aus der gestreckten Linie bewegen [47]. Diese sind in Abbildung
53 schematisch dargestellt. Die Kräfte der auftretenden spontanen Längenänderun-
gen durch die Geschwindigkeitssprünge bei der Fadenablage und die daraus resul-
tierenden Impulsstöße werden nicht berücksichtigt.

Betrachtet wird ein Punkt zwischen dem Auflagepunkt auf dem Dornkörper und der
Austrittsöse A, an dem die in Abbildung 53 gezeigten Kräfte angreifen. Betrachtet
wird außerdem die (x,z)-Ebene.

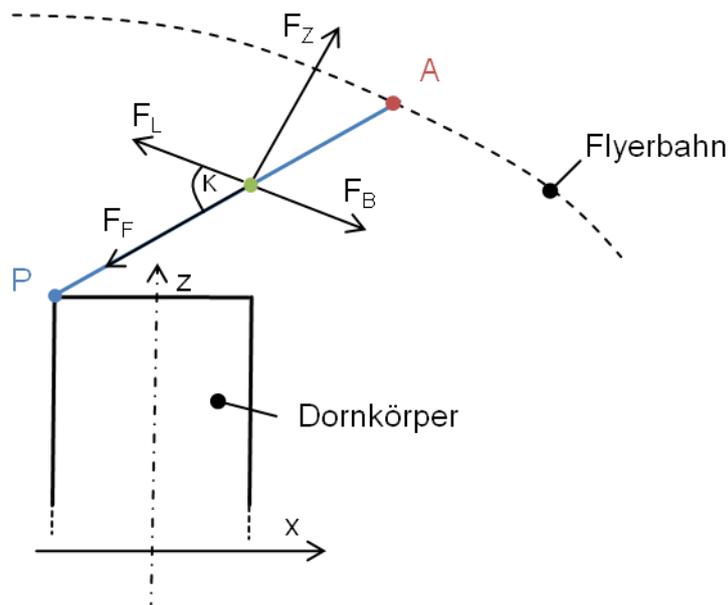


Abbildung 53: Kräfte am betrachteten Punkt des Garns (grün). A: Austrittsöse Flyer, P: Ablagepunkt des Garns auf dem Dornkörper, κ : Winkel zw. Tangente an Flyerbahnebene und Garn. F_F : Fadenzugkraft, F_L : Luftwiderstandskraft, F_B : Beschleunigungskraft, F_Z : Zentrifugalkraft

Die Zentrifugalkraft F_Z ist abhängig von der bewegten Masse m , von der Bahngeschwindigkeit v_B sowie vom Bahnradius r_B [37]. Die Beschleunigungskraft F_B wird von der Flyerrotation aufgebracht und hängt ab von der Garnmasse und der Beschleunigung. Die Luftwiderstandskraft F_L hängt neben dem c_W als Luftwiderstandsbeiwert und der Querschnittsfläche des Garns von der Flyerdrehzahl n_F ab [48]. Die bewegte Masse errechnet sich hierbei aus der Feinheit des Garns, der Beschleunigung durch die Flyerrotation sowie der Fadenlänge des Angriffspunkts [47]. Der Winkel κ beschreibt den Winkel zwischen der Tangente an die Flyerbahnebene und dem Garn. Er variiert mit jedem Schritt des Flyerwinkels φ . Die Richtungen von F_L und F_B liegen tangential an die Flyerbahn, F_Z steht rechtwinklig dazu.

Die Fadenzugkraft F_F lässt sich über das Kräftegleichgewicht am betrachteten Punkt auf dem Garn als

$$F_B = F_L + F_F \cdot \cos \kappa \quad 5.20$$

ausdrücken.

Treten keine Ballonierungseffekte auf, so bedeutet dies, dass die Vorschubkraft F_B , die vom rotierenden Flyer aufgebracht wird, und der wirkende Anteil der Fadenzugkraft F_F bzw. der Fadengrundspannung der Luftwiderstandskraft F_L entgegen wirken. Die Kräfte stehen dann im Gleichgewicht.

Es werden verschiedene Flyerdrehzahlen n_F , Garne mit verschiedenen Feinheiten bzw. bewegten Massen und Fadengrundspannungen untersucht. Für die Beschreibung des Verhaltens in diesem Bereich (Bereiche III und IV) werden Aufnahmen mit einer High-Speed-Kamera Basler A 504 k durchgeführt. Der Aufbau für die Messungen ist in Abbildung 54 dargestellt. Die Kamera ist frontal zum Dornkörper platziert. Der Flyer umfährt im über die Kamera erfassten Bereich einen Bereich von ca. 100° . Für die Ausleuchtung werden zwei Strahler eingesetzt.

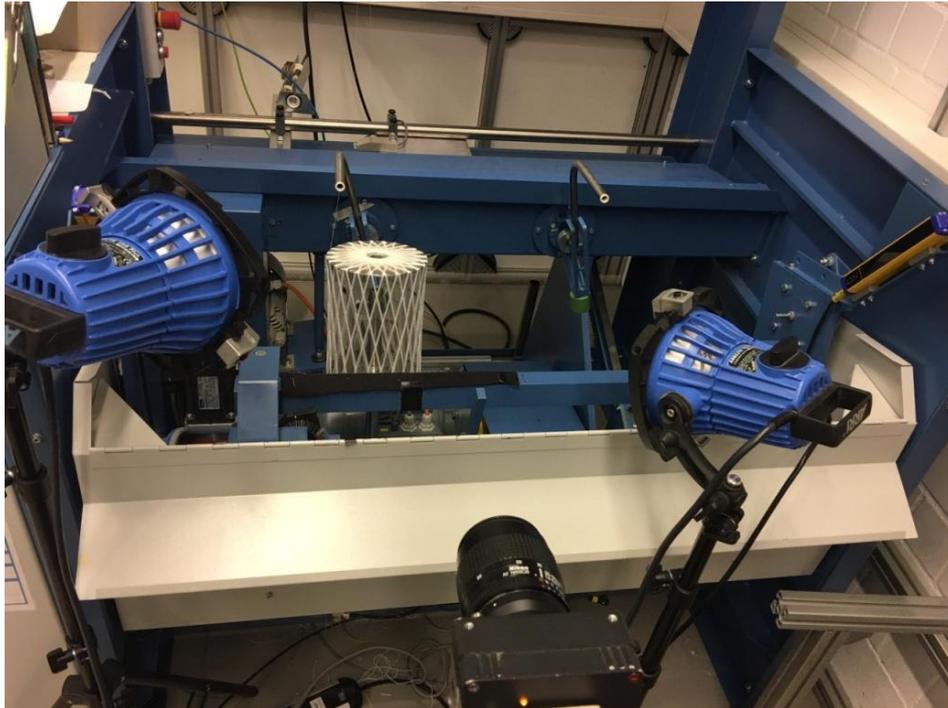


Abbildung 54: Aufbau für die High-Speed-Aufnahmen mit High-Speed-Kamera, Knäuelraum und Strahlern

5.4.1 Einfluss der Flyerdrehzahl im Bereich des freien Fadens

Zunächst wird der Einfluss der Flyerdrehzahl auf das Garnverhalten im Bereich des freien Fadens beschrieben. Es werden die beiden Flyerdrehzahlen $n_F = 100$ 1/min und 300 1/min gewählt, da hierbei bei allen Garnarten stabile Strukturknäuelverhältnisse einstellbar sind. Die Garnablage erfolgt im Drehzahlverhältnis $h = 24$ bei mittelstarker Fadengrundspannung. Betrachtet werden hier die beiden Garne, die eine höhere Haarigkeit aufweisen, das CO/PES-Garn und der PES-Zwirn.

In Abbildung 55 ist exemplarisch ein Ausschnitt einer Bildfolge des PES-Zwirns im beschriebenen Bildausschnitt für Flyerdrehzahl von $n_F = 100$ 1/min gezeigt. Es ist zu erkennen, dass der PES-Zwirn stets gespannt zwischen der Austrittsöse und dem Ablagepunkt auf dem Dorn geführt wird. Es sind keine Ballonierungseffekte erkenn-

bar. Die Fadengrundspannung in Zusammenarbeit mit der für die geringere Flyerdrehzahl $n_F = 100$ 1/min geringeren Luftwiderstandskraft ist in diesem Flyerdrehzahlbereich ausreichend groß, um Ballonierungseffekte zu verhindern.

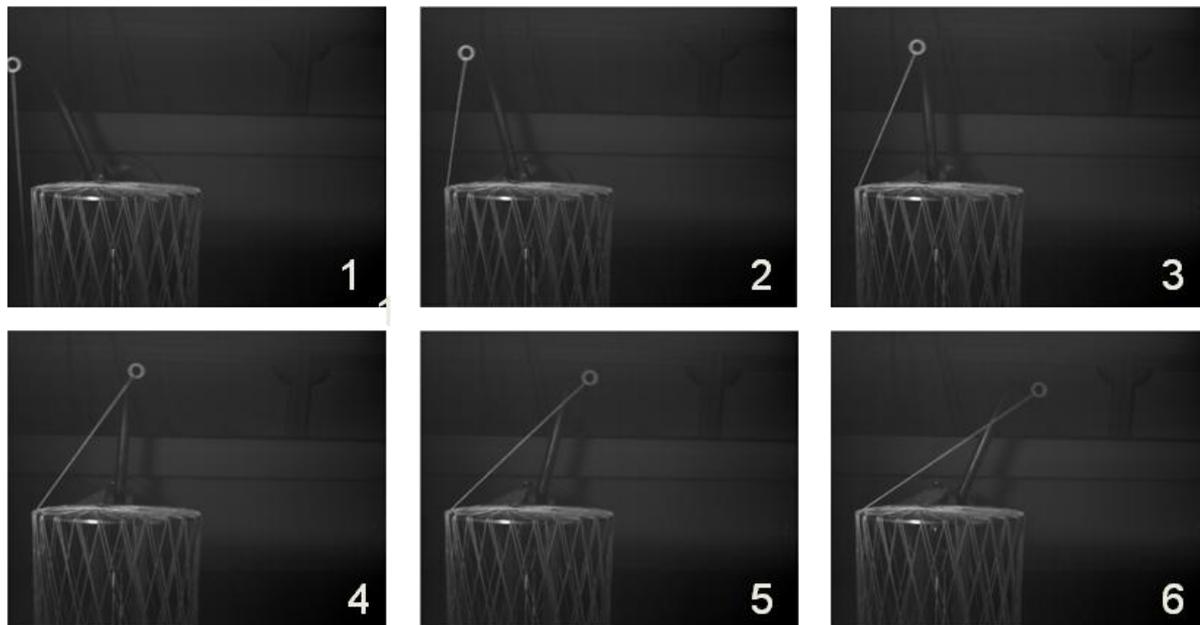


Abbildung 55: High-Speed-Aufnahmen der Fadenablage auf dem Zylinderdorn, PES-Zwirn, Flyerdrehzahl $n_F = 100$ 1/min, $h = 24$

In Abbildung 56 ist eine Detailaufnahme des PES-Zwirns bei einer erhöhten Flyerdrehzahl von $n_F = 300$ 1/min dargestellt. Hier liegt das Garn nicht mehr rein gestreckt vor, sondern zeigt leichte Ballonierungseffekte. Die gestreckte Verbindung von der Austrittsöse zum Ablagepunkt auf dem Dornkörper ist mit einer blauen Linie gekennzeichnet. Die Abweichung durch den Ballonierungseffekt des Garns ist mit roten Pfeilen gekennzeichnet.

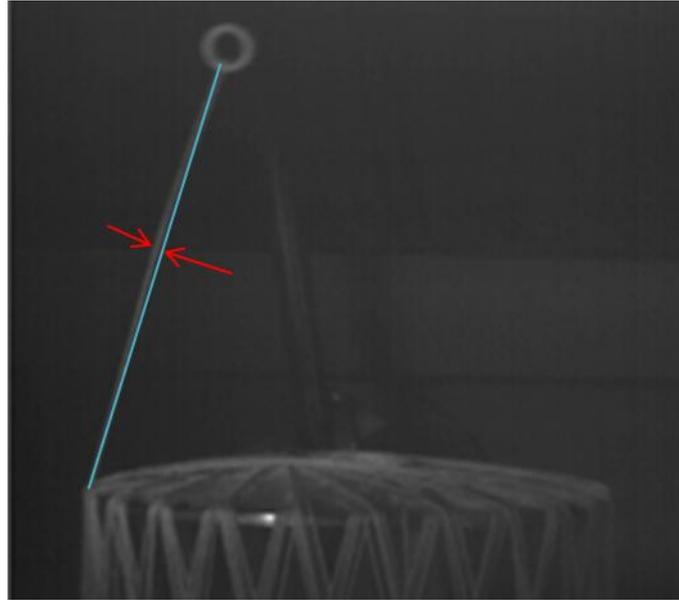


Abbildung 56: Detailaufnahme des Garnverlaufs bei PES-Zwirn, $n_F = 300$ 1/min, $h = 24$, mit gekennzeichnete Ballonierung (rot) zwischen dem Garn und der gestreckten Linie (blau)

Die Fadengrundspannung ist für diesen Fall der erhöhten Flyerdrehzahl $n_F = 300$ 1/min im Vergleich zu $n_F = 100$ 1/min nicht erhöht. Bei dem verwendeten größerem Garn (PES-Zwirn) mit hohen Flyerdrehzahlen ($n_F = 300$ 1/min) stehen die Luftwiderstands- und die wirkenden Anteile der Fadenzugkraft nicht mehr im Gleichgewicht mit der Beschleunigungskraft durch die Flyerrotation, weswegen sich ein Ballonierungseffekt ausbildet.

Die gleichen Untersuchungen werden für das feinere CO/PES-Garn durchgeführt. Hier liegt das Garn im Bereich des freien Fadens für beide Flyerdrehzahlen gestreckt vor. Es kommt zu keinen Ballonierungen. Das bedeutet, dass die alleinige Flyerdrehzahlerhöhung bei gleichzeitig einer reduzierten Luftangriffsfläche durch das feinere Garn keine Auswirkung auf die Ballonierung hat. Ebenso wirkt die eingestellte Fadengrundspannung im Falle des CO/PES-Garns feinheitsspezifisch stärker, wodurch ebenfalls die Ausbildung von Ballonierungseffekten unterdrückt wird.

Tabelle 14: Aufnahmeeinstellungen und Ergebnisse der Beurteilung des Garnverhaltens im Bereich IV für CO/PES-Garn und PES-Zwirn

Flyerdrehzahl n_F	100 1/min	300 1/min
Aufnahmeeinstellungen:	Bildrate: 60 fps, Belichtungszeit: 1,5 msec	Bildrate: 120 fps, Belichtungszeit: 0,5 msec
	Ergebnisse	
CO/PES-Garn, geringe Feinheit (36,1 tex)	Garn liegt gestreckt zwischen Öse und Ablagepunkt auf dem Dornkörper.	Garn liegt gestreckt zwischen Öse und Ablagepunkt auf dem Dornkörper.
PES-Zwirn, hohe Feinheit (445,6 tex)	Garn liegt gestreckt zwischen Öse und Ablagepunkt auf dem Dornkörper.	Garn zeigt teilweise leichten Ballonierungseffekt.

Werden die Winkelschritte λ der Fadenablage betrachtet, so zeigt sich, dass die leichten Ballonierungseffekte keinen negativen Einfluss auf die Präzision der Fadenablage zeigen. Diese unterscheiden sich weder zwischen den Garnarten, noch zwischen den Flyerdrehzahlen in bedeutendem Maße.

Tabelle 15: Vergleich der Fadenablage von CO/PES-Garn und PES-Zwirn bei unterschiedlichen Flyerdrehzahlen, $h = 24$, Std.Abw. steht für die Standardabweichung des jeweiligen Werts

		Flyerdrehzahl $n_F = 100$ 1/min	Flyerdrehzahl $n_F = 300$ 1/min
PES-Zwirn	Winkelschritt λ (Std. Abw.)	14,7° (0,5°)	14,4° (0,5°)
CO/PES-Garn	Winkelschritt λ (Std. Abw.)	14,6° (0,5°)	15,2° (0,7°)

Fazit

Haarige Garne mit höherer Feinheit und damit höheren Massen und Angriffsflächen zeigen bei hohen Flyerdrehzahlen leichte Ballonierungseffekte. Bei geringeren Flyerdrehzahlen ist der Effekt nicht zu beobachten. Haarige Garne mit geringer Feinheit zeigen bei keiner der betrachteten Drehzahl Ballonierungseffekte. Die Fadengrundspannung wirkt Ballonierungseffekten entgegen. Der Hauptgrund für das Auftreten von Ballonierungseffekten ist die erhöhte Flyerdrehzahl in Kombination mit ei-

ner erhöhten Feinheit. Dadurch bietet sich eine erhöhte Angriffsfläche für die Luftwiderstandskraft.

5.4.2 Einfluss der Fadengrundspannung im Bereich des freien Fadens

Die Fadengrundspannung wird eingestellt über im Fadenzulauf (Bereich I) integrierte Fadenbremsen. Sie wird aber auch beeinflusst über Parameter wie die Garnoberfläche und die Geometrie und Innenfläche des Flyers (Bereich II) aufgrund der Reibungsverhältnisse zwischen Garn und Flyer.

An dieser Stelle werden zwei Fadengrundspannungen auf ihren Einfluss auf das Garnverhalten im Bereich des freien Fadens untersucht. Es handelt sich um eine mittlere Fadengrundspannung, die über die Einstellung 2 der maschinenseitig montierten Tellerbremse umgesetzt wurde. Durch das Umgehen der Fadenbremse konnte eine weitere, sehr niedrige Fadengrundspannung reproduzierbar erzeugt werden. Die Fadengrundspannungen werden für die Drehzahlen und Garnmaterialien erfasst, sie liegen jeweils in unterschiedlichen Bereichen (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Fadengrundspannungen bei den betrachteten Flyerdrehzahlen

	Flyerdrehzahl n_F	Geringe Fadengrundspannung (gemittelt)	Mittlere Fadengrundspannung (gemittelt)
CO/PES	100 1/min	0,01 cN	0,12 cN
	300 1/min	0,01 cN	0,11 cN
PES	100 1/min	0,04 cN	0,28 cN
	300 1/min	0,04 cN	0,32 cN

In Kapitel 5.4.1 wird gezeigt, dass der haarige PES-Zwirn bei einer Flyerdrehzahl von $n_F = 300$ 1/min und einer mittleren Fadengrundspannung Ballonierungseffekte zeigt. Nachfolgend werden nun die Ergebnisse gezeigt, die bei einer Reduktion der Fadengrundspannung beobachtet werden konnten.

In Abbildung 56 werden exemplarisch zwei Detailaufnahmen der Strukturknäelversuche des gleichen Garns (PES-Zwirn) und der gleichen Flyerdrehzahl ($n_F = 300$ 1/min) mit mittlerer (A) und geringer (B) Fadengrundspannung gegenübergestellt.

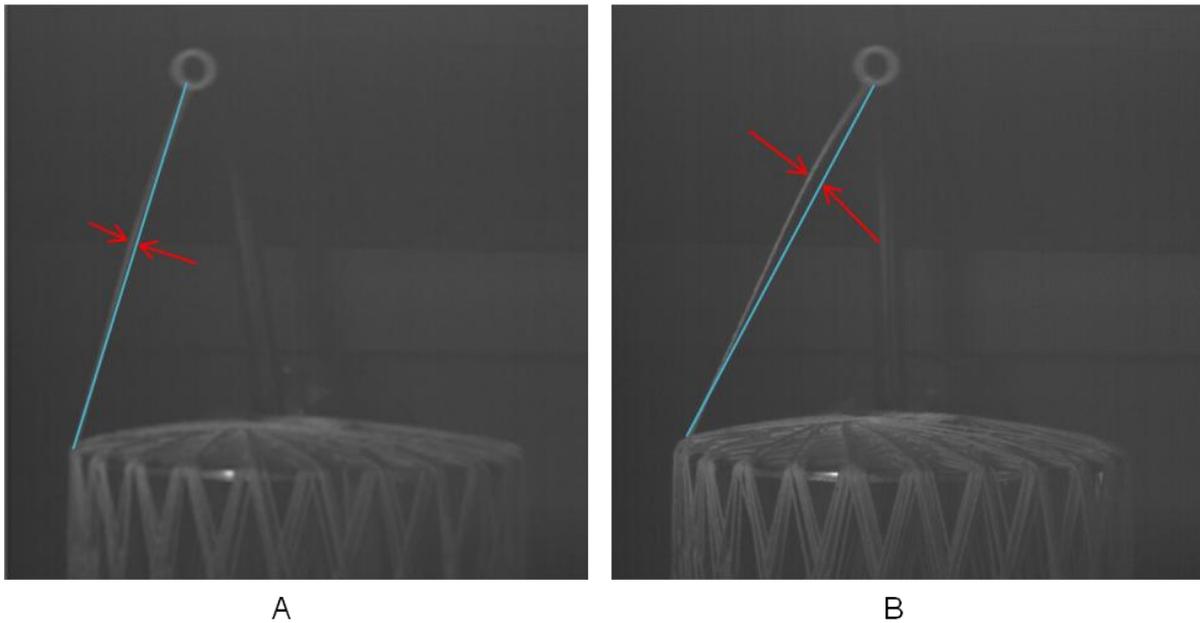


Abbildung 57: Detailaufnahmen der Knäuelversuche mit mittlerer (A) und geringer (B) Fadengrundspannung (Flyerdrehzahl: $n_F = 300$ 1/min, $h = 24$)

Deutlich zu erkennen ist, dass sich bei einer Reduktion der Fadengrundspannung der Ballonierungseffekt verstärkt. Die Größe der entstehenden Ausbauchung der Ballonierung ist mit je zwei Pfeilen gekennzeichnet. Bei größerem Garn (PES-Zwirn) mit hohen Flyerdrehzahlen ($n_F = 300$ 1/min) und geringen Fadengrundspannungen stehen die Luftwiderstands- und die wirkenden Anteile der Fadenzugkraft nicht mehr im Gleichgewicht mit der Beschleunigungskraft durch die Flyerrotation, weswegen sich ein Ballonierungseffekt ausbildet.

Als vergleichende Messung wird der Ballonierungseffekt bei einer Flyerdrehzahl von $n_F = 100$ 1/min und einer mittleren und einer geringeren Fadengrundspannung betrachtet. Es zeigt sich hierbei auch bei geringer Fadengrundspannung kein sichtbarer Ballonierungseffekt. Hier bleibt aufgrund der geringeren Flyerdrehzahlen das Gleichgewicht zwischen der Luftwiderstands- und der Fadenzugkraft mit der Beschleunigungskraft bestehen. Auch hier ist kein negativer Einfluss auf die Fadenablage erkennbar. Die Werte der Winkelschritte liegen auch hier in vergleichbaren Bereichen und zeigen nur geringe Abweichungen voneinander.

Tabelle 17: Einstellungen und Ergebnisse der Beurteilung des Garnverhaltens im Bereich IV für PES-Zwirn für unterschiedliche Fadengrundspannungen

Flyerdrehzahlen n_F	300 1/min	100 1/min
Aufnahmeeinstellungen	Bildrate: 120 fps, Belichtungszeit: 0,5 msec	Bildrate: 60 fps, Belichtungszeit: 1,5 msec
	Ergebnisse	
Mittelstarke Fadengrundspannung	Geringer Ballonierungseffekt	Kein Ballonierungseffekt, Garn liegt gestreckt
Geringe Fadengrundspannung, ohne Fadenbremse im Zulauf	Stärker ausgeprägter Ballonierungseffekt	Kein Ballonierungseffekt, Garn liegt gestreckt

Fazit

Die Fadengrundspannung hat nur bei hohen Flyerdrehzahlen einen Einfluss auf die Ausbildung des Ballonierungseffekts. Die Fadengrundspannung wirkt in Richtung der in Abbildung 53 eingezeichneten Fadenzugkraft F_F . Eine niedrige Fadengrundspannung verstärkt bei groben Garnen und hohen Flyerdrehzahlen die Ballonierung. Der Ballonierungseffekt kann bei dem verwendeten groben PES-Zwirn alleinig durch die Reduktion der Fadengrundspannung nicht hervorgerufen werden. Die Auswirkungen des Ballonierungseffekts, der durch die Reduktion der Fadengrundspannung hervorgerufen wird, auf die Fadenablage sind als sehr gering zu werten. Dies hat einen positiven Effekt auf die Stabilität des Strukturknäuelprozesses. Diese Kenntnis beschleunigt und vereinfacht die Entwicklungsprozesse von technischen, strukturgepulsten Bauteilen.

5.5 Zusammenfassung der knäueltechnologischen Einflussfaktoren

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchung der knäueltechnologischen Einflussfaktoren bei Strukturknäuelprozess zusammengefasst. Diese erlauben eine Aussage zur Beknäuelbarkeit verschiedener Dornkörper mit gewählten Parametersätzen. Damit kann die erste Arbeitshypothese bestätigt werden.

Tabelle 18: Zusammenfassung der knäueltechnischen Einflussfaktoren auf die Fadenablage

Bereich im Fadenlauf	Einflussfaktor	Ergebnisse
Bereich I: Fadenzuführung	Fadenspannung	<ul style="list-style-type: none"> - Charakteristischer Verlauf beim Zylinderdorn mit vier Peaks. - Garne mit einer geringen Garndehnung zeigen solch einen Fadenspannungsverlauf mit höheren Ausschlägen und damit eine größere Abhängigkeit von der Flyerdrehzahl als Garne mit hohen Garndehnungen. - Geringe Flyerdrehzahlen und hohe Garndehnungen vergleichmäßigen den Prozess, es sind geringere und niedrigere Ausschläge in der Fadenspannung messbar. - Die Variation der Fadengrundspannung ändert die Grundcharakteristik der Fadenspannung nicht, sondern bewirkt eine entsprechende Parallelverschiebung des Fadenspannungsverlaufs.
Bereich II: Flyerbereich	Flyerdrehzahl n_F	<ul style="list-style-type: none"> - Eine Abhängigkeit der sich ausbildenden Struktur von den betrachteten Flyerdrehzahlen ist nicht zu erkennen.
Bereich III: Bereich des freien Fadens	Freier Faden	<ul style="list-style-type: none"> - Eine niedrige Fadengrundspannung verstärkt bei groben Garnen und hohen Flyerdrehzahlen die Ballonierung. - Der Ballonierungseffekt kann bei dem verwendeten PES-Zwirn alleinig durch die Reduktion der Fadengrundspannung nicht hervorgerufen werden. - Haarige Garne mit höherer Feinheit zeigen bei hohen Flyerdrehzahlen leichte Ballonierungseffekte.
Bereich IV: Fadenablage auf dem Dornkörper	Dorndrehzahl n_D	<ul style="list-style-type: none"> - Die Dorndrehzahl wirkt sich nicht merklich auf die Fadenablage aus. - Die Dorndrehzahl bestimmt die Prozessgeschwindigkeit, da hier der Fadenabzugs- bzw. Aufwindeprozess erfolgt.
	Anstellwinkel α	<ul style="list-style-type: none"> - Der minimale Anstellwinkel gibt den Winkel vor, ab dem eine Beknäuelung möglich ist. - Er dient der Berechnung der Fadenablage auf dem Dorn und damit einer Einschätzung der Beknäuelbarkeit der betrachteten Dornkörper. - Relevante Parameter sind die Dorngeometrie und die Dornposition im Knäuelraum.

6 Garnseitige Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung

Der Strukturknäuelprozess ist ein dynamischer Prozess, um endlosfaserbasierte Strukturen zu erzeugen. Anders als in der klassischen Faserverbundtechnik üblich werden hier typischerweise keine groben Glas- oder Carbonrovings verarbeitet, sondern der Schwerpunkt liegt auf textiltypischen technischen Massenfäsern. Diese liegen meist in deutlich geringeren Feinheitsbereichen vor. Wie in Kapitel 2 erwähnt, ist beim Strukturknäueln ein Entwicklungsziel, anwendungsangepasste Leichtbauteile zu entwickeln. Diese müssen nicht immer sehr großen Festigkeitsansprüchen genügen, sondern bspw. formflexibel und in sehr großen Stückzahlen sehr günstig herstellbar sein. Hierfür werden vergleichbare Garne wie die für diese Arbeit ausgewählten genutzt (vgl. Tabelle 12). Diese typischerweise Polyester- oder Polypropylentypen haben einen annähernd runden Querschnitt und weisen geringere Feinheiten auf.

Nachfolgend werden die relevanten garntechnischen Einflussfaktoren Haarigkeit und Feinheit hinsichtlich deren Einfluss auf die Strukturknäuelbildung untersucht. Die Ergebnisse liefern Erkenntnisse über die Abhängigkeit des Strukturknäuelprozesses vom verwendeten Garnmaterial. Eine geringe Abhängigkeit zeichnet einen stabilen, vielseitig einsetzbaren Prozess aus. Für die Auswertung werden die erzeugten Knäuelbilder quantitativ sowie anhand der sich ausbildenden charakteristischen Strukturmerkmale analysiert.

6.1 Durchführung der Bewertung der Fadenablage

Für die Bewertung der Einflussparameter auf die Fadenablage werden Strukturknäuelversuche an der Strukturknäuelmaschine SBW 2 durchgeführt. Verwendet wird ein zylindrischer Dorn in Zentrum-Zentrum-Position. Die Außenkanten der Stirnseiten sind mit Formmasse präpariert, so dass das Garn hier sauber abgelegt werden kann. Nach der Beknäuelung von zwei Lagen wird die Stirnseite fotografiert. Die Fotos werden über ein Bildbearbeitungsprogramm bearbeitet.

So können die in Kapitel 4.5 beschriebenen Werte der Winkelschritte (λ) zwischen den einzelnen Verkreuzungspunkten erfasst werden. Diese geben Aufschluss über die Gleichmäßigkeit der Fadenablage.

Es werden exemplarisch eine gerade ($h = 24$) und eine wilde Strukturwicklung ($h = 4,8$) untersucht. Beide zeigen je 24 Verkreuzungen pro Lage.

6.2 Einfluss der Feinheit auf die Strukturknäuelbildung

Der Einfluss der Feinheit auf die Fadenablage wird anhand der Gegenüberstellung zweier Stapelfasergarne mit unterschiedlichen Feinheiten aufgezeigt. Es handelt sich um die in Tabelle 12 gezeigten Garne CO/PES (Feinheit: 36,1 tex) und der PES-Zwirn (Feinheit: 445,6 tex). Es wird an dieser Stelle angenommen, dass das Grundmaterial keinen Einfluss auf die Fadenablage hat.

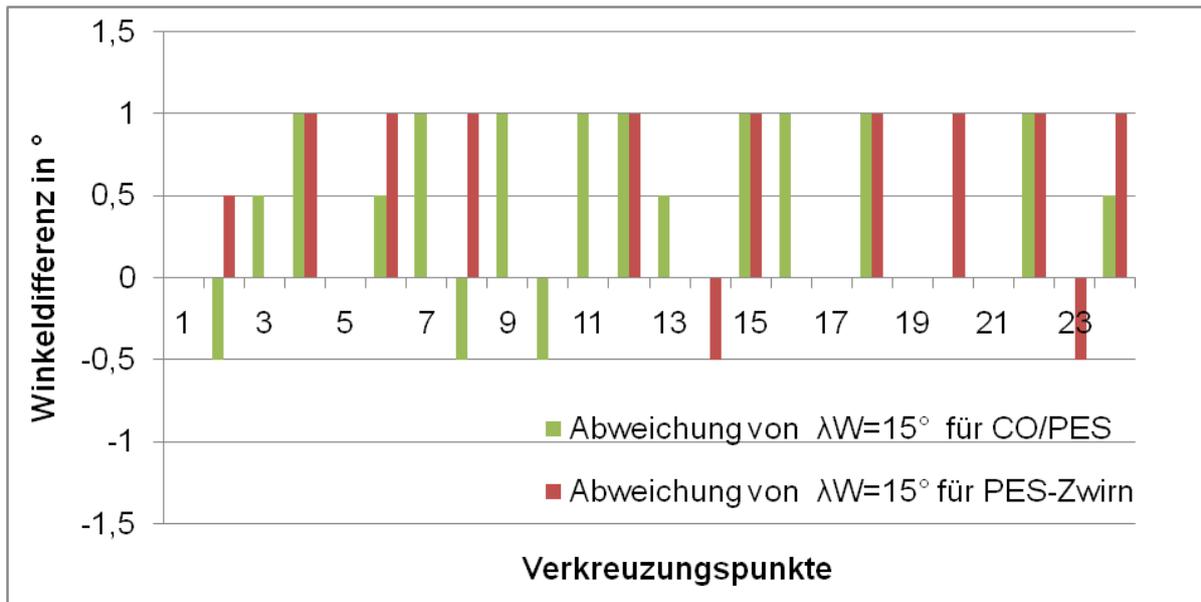


Abbildung 58: Darstellung der Differenzen der Winkelschritte λ zum berechneten Wert $\lambda_W = 15^\circ$, Knäuelversuche mit CO/PES-Garn (grün) und PES-Zwirn (rot) für $h = 24$, Flyerdrehzahl $n_F = 100$ 1/min

In Abbildung 58 sind die Differenzen der gemessene Winkelschritte λ zum berechneten Wert $\lambda_W = 15^\circ$ aufgetragen. Die beiden Garne CO/PES und PES-Zwirn weisen eine vergleichbare Haarigkeit auf (vgl. Tabelle 12), sie unterscheiden sich jedoch in der Feinheit stark. Die Abweichungen der messtechnisch erfassten zu den berechneten Werten der Winkelschritte betragen max. 1° und sind damit sehr gering. In beiden Fällen erfolgte die Fadenablage sehr konstant, die Winkelschritte liegen gleichmäßig auf der Stirnfläche verteilt.

Die Ergebnisse der Fadenablagen sind in Abbildung 59 dargestellt. In der linken Spalte ist das CO/PES-Garn mit geringerer Feinheit, in der rechten Spalte ist der PES-Zwirn mit höherer Feinheit gezeigt. Es ist zu sehen, dass die Fadenablage der Verkreuzungen sehr stabil und gleichmäßig erfolgt. Die Feinheit der betrachteten Garne nimmt keinen deutlich messbaren Einfluss auf die Fadenablage.

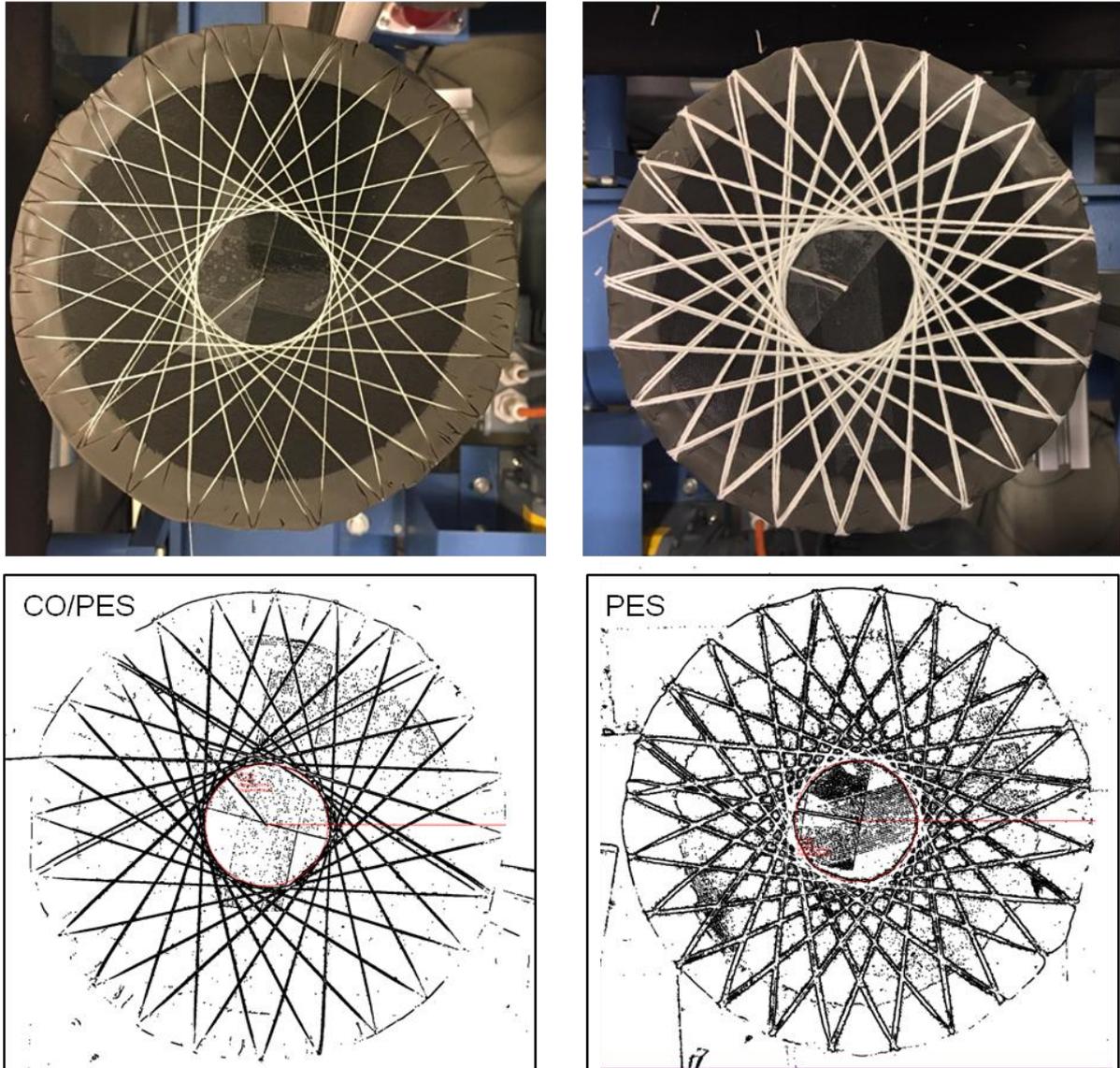


Abbildung 59: Fadenablage für CO/PES-Garn (linke Spalte) und PES-Zwirn (rechte Spalte), obere Zeile jeweils un bearbeitete Fotos, untere Zeile jeweils nach Bildbearbeitung

6.3 Einfluss der Haarigkeit auf die Strukturknäuelbildung

Bei der Fadenablage beim Strukturknäueln kommt in erster Linie die mit der Haarigkeit einhergehende Oberflächenrauigkeit zum Tragen. Eine hohe Oberflächenrauigkeit des Garns bewirkt, dass das Garn bei der Fadenablage weniger stark auf der Dornoberfläche und auf den bereits abgelegten Lagen abgleitet. Dadurch erhöht sich die Stabilität des Strukturknäuelprozesses bzw. des Strukturknäuelwickels.

Vergleichend werden nachfolgend die Fadenablagen von je einem glatten Multifilamentgarn (PP) und einem haarigen Stapelfasergarn (CO/PES) gleicher Feinheit für

zwei Lagen gezeigt. Das Drehzahlverhältnis beträgt $h = 24$. Es ist in Abbildung 60 zu erkennen, dass die Fadenablagen sich nicht unterscheiden.

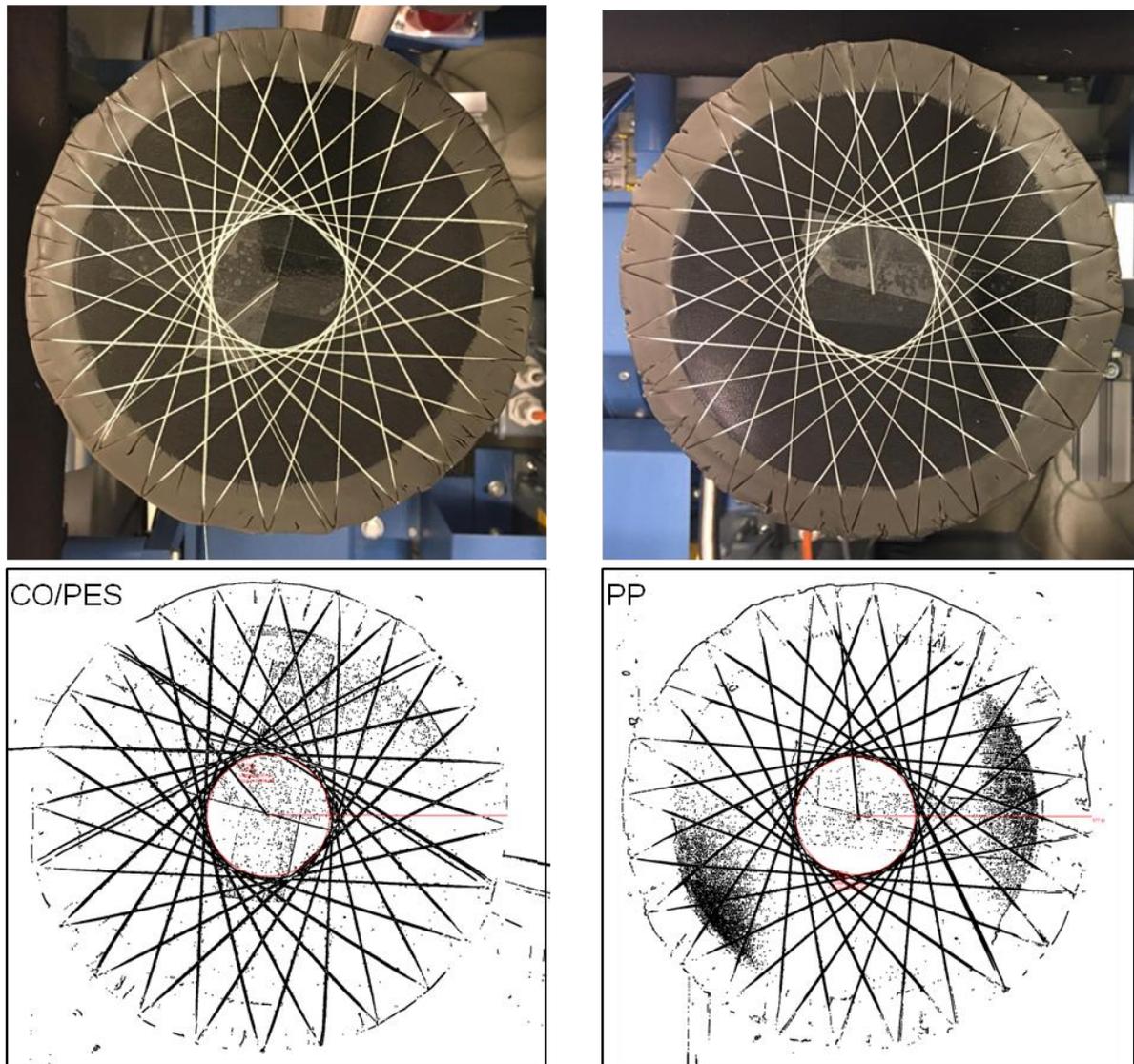


Abbildung 60: Fadenablage für CO/PES-Garn (linke Spalte) und PP-Garn (rechte Spalte), obere Zeile jeweils unbearbeitete Fotos, untere Zeile jeweils nach Bildbearbeitung

Im Prozess ist zu beobachten, dass das glatte Garn verstärkter zur Ausbildung von Abschlägern neigt als das haarige Garn. Dieser Effekt tritt insbesondere bei wilden Strukturwicklungen ($h = 4,8$) auf, bei denen größere Relativbewegungen zwischen der Dorn- und der Flyerbewegung vorherrschen. Es ist ggf. notwendig, den Anstellwinkel anzupassen. Nach der Findung von geeigneten Parametern kann eine stabile und gleichmäßige Fadenablage erfolgen.

Die Haarigkeit des Garns hat bei den untersuchten Knäuelparametern also keinen Einfluss auf die entstehende Fadenablage. Eine wichtige Voraussetzung bei der

Verarbeitung von Garnen mit geringer Haarigkeit ist jedoch die Einstellung von passenden Anstellwinkeln. Insbesondere bei großen Relativbewegungen zwischen Flyer und Dorn, die v.a. bei wilden, kleinen Strukturwicklungen (bspw. $h = 4,8$) auftreten, gibt dieser Effekt Grenzen für den (minimalen) Anstellwinkel vor. Kleine Anstellwinkel, d.h. stark geneigte Dornkörper, begünstigen Abschläger an den Stirnseiten.

Ebenfalls spielt die Oberfläche des Dornkörpers eine wichtige Rolle für die sich ausbildende Fadenablage. Eine glatte Dornoberfläche, auf der das Garn leicht abgleiten kann, führt ebenfalls zu verfälschten Fadenablagen, insbesondere innerhalb der ersten Lage. Ab der zweiten Lage stabilisieren sich die Fadenablagen wieder gegenseitig.

6.4 Zusammenfassung der garnseitigen Einflüsse auf die Strukturknäuelbildung

Die Feinheit der betrachteten, repräsentativen Garne nimmt keinen messbaren Einfluss auf die Fadenablage. Diese Tatsache spricht für die Robustheit und Stabilität des Prozesses. Dies bedeutet insbesondere Vorteile in einer effizienten Umsetzung für technische Anwendungen, da für viele Garntypen keine maschinenbaulichen Anpassungsarbeiten beim Garnwechsel vorzunehmen sind. Für sehr grobes Material gelten prinzipiell die gezeigten Zusammenhänge, jedoch ist zu beachten, dass die Beurteilung der Fadenablage durch sehr grobe Garne erschwert wird.

Die Haarigkeit der betrachteten Garne nimmt ebenfalls keinen messbaren Einfluss auf die Strukturknäuelbildung. Für die Fadenablage ist jedoch zu beachten, dass bei großen Relativbewegungen zwischen Flyer und Dorn, die bspw. bei kleinen, wilden Strukturwicklungen auftreten, bei geringen Garnhaarigkeiten größere Anstellwinkel gewählt werden müssen, um eine stabile Fadenablage zu gewährleisten.

Also ist der Strukturknäuelprozess für die gezeigten Garntypen stabil und in diesem gezeigten Rahmen nahezu garnunabhängig. Ebenso geht mit dieser geringen Abhängigkeit der betrachteten Garnparameter eine gute Reproduzierbarkeit von Strukturknäuelwicklungen einher.

Diese Kenntnis beschleunigt und vereinfacht die Entwicklungsprozesse von technischen, strukturgeknäuelten Bauteilen. Die Ergebnisse bestätigen die zweite Arbeitshypothese.

7 Modell zur Berechnung der Fadenablage

Mit dem vorliegenden Berechnungsansatz wird die Position des Garns auf dem Dornkörper beim Strukturknäuelprozess mit der Vorgabe verschiedener Prozessgrößen bestimmt. Durch die rechnerische Ermittlung der Ablagepunkte bzw. der Fadenposition für verschiedene geometrische Grundkörper kann der Einfluss der im Modell abgebildeten Prozessparameter ohne empirische Versuche bestimmt werden. Dies stellt eine wichtige Grundlage dar für eine ressourcenoptimierte Entwicklung von dreidimensionalen Strukturknäuelbauteilen für technische Anwendungen.

In der in den vorherigen Kapiteln gezeigten technologischen Untersuchung des Strukturknäuelprozesses werden Punkte untersucht, wie bspw. die Fadenspannung sowie der Einfluss der Flyerdrehzahl, die im vorliegenden Modell nicht abgebildet sind. Vielmehr wird eine numerische Berechnung des Strukturknäuelprozesses unter definierten Annahmen gezeigt, die für eine Einstufung und für Vergleiche von Parametersätzen genutzt werden kann. Garneigenschaften werden im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt. Jedoch konnte in Kapitel 6 gezeigt werden, dass diese auf die Fadenablage unter den gewählten Bedingungen keinen signifikanten Einfluss nehmen. Diese Bedingungen spiegeln sich in den getroffenen Annahmen wider.

Über die Reduktion auf einfachere Grundformen ist anhand des vorgestellten Algorithmus eine Vorabbestimmung der Fadenposition bzw. der Ablagepunkte auch bei komplexen Dornkörperformen möglich. Hierbei wird ausgenutzt, dass der Fadenführer eine konstante Rotationsbewegung, die durch den Flyer definiert wird, ausführt. Mit Kenntnis des Einflusses der Knäuelparameter und der Dornkörperkontur kann die Fadenposition über den erarbeiteten Algorithmus berechnet werden, der keine aufwendige Simulationssoftware erfordert.

7.1 Voraussetzungen und Annahmen für die Berechnung

In dieser Arbeit wird für den Strukturknäuelprozess ein Koordinatensystem eingeführt, welches auch der Berechnung der Fadenablagen zugrunde liegt. Neben dem Anstellwinkel α sind in Abbildung 61 die verwendeten Kenngrößen dargestellt.

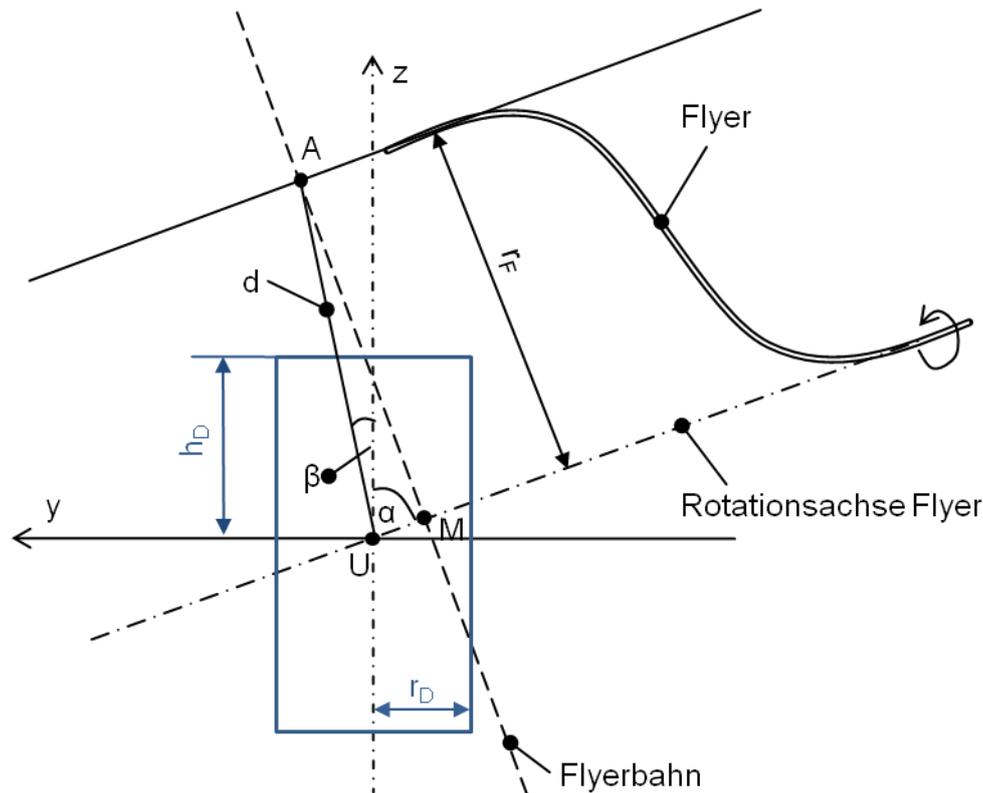


Abbildung 61: Geometrische Zusammenhänge im Knäuelraum, dargestellt ist der Zylinderdorn (blau). r_D : Dornradius, r_F : Flyerradius, A: Garnaustritt aus der Flyeröse, U: Ursprung Koordinatensystem, d: Abstand zwischen A und U, M: Schnittpunkt Flyerbahnebene mit der Flyerrotationsachse, α : Anstellwinkel, β : Hilfswinkel

Zusätzlich zu den gezeigten geometrischen Zusammenhängen gelten für die Berechnung die folgenden Annahmen:

- Die Dornkörperoberfläche ist ideal rutschhemmend.
- Das Garn rollt nicht auf der Oberfläche ab (geodätische Fadenablage).
- Das Garn wird an der Startposition fixiert.
- Das Garn steht unter einer konstanten Spannung.
- Die Dehnung, die Haarigkeit und die Feinheit des Garns werden nicht berücksichtigt.
- Es gelten die in Abbildung 61 beschriebenen geometrischen Zusammenhänge und Größen, insbesondere
 - Die Rotationsachse des Dorns schließt mit der Horizontalen den Anstellwinkel α ein.
 - Die Rotationsachse des Dorns schneidet die Rotationsachse des Flyers im Ursprung U des Koordinatensystems. Die z-Achse weist in Richtung der Rotationsachse des Dorns.

- Die Bewegungskurve (Flyerbahn) der Fadenaustrittsöse am Flyer verläuft in einer Kreis- bzw. Ellipsenbahn mit Radius r_F .
- Der Flyer rotiert um seine Rotationsachse und damit um den Ursprung U des Koordinatensystems mit dem Winkel φ .
- Der Dorn rotiert um seine Rotationsachse (z-Achse) mit dem Winkel δ .
- Der Zylinderdorn hat den Radius r_D und die Höhe $H_D = 2h_D$. Der Kugeldorn hat den Radius r_D .
- Der Wert d beschreibt die Verbindung zwischen der Austrittsöse A und dem Koordinatenursprung U . Für die Zentrum-Zentrum-Position gilt $d = r_F$.
- Die Aufbauhöhe bei der Berechnung mehrerer Lagen wird nicht berücksichtigt. Beim Strukturknäueln sind geringe Wandstärken üblich, weswegen keine großen Aufbauhöhen betrachtet werden müssen.

7.2 Schnittebenenmodelle für verschiedene Dornkörperkonturen und -geometrien

Für die Berechnung der Fadenablage auf dem Dornkörper werden verschiedene Algorithmen und Berechnungsansätze gezeigt. Für alle Ansätze wird das Berechnungsprinzip der Strukturknäuelbildung zugrunde gelegt:

1. Zu Beginn des Strukturknäuelbildungsprozesses wird das Garn an einer definierten Stelle fixiert (Ausgangspunkt).
2. Bedingt durch die Rotationsbewegungen des Dorns und des Flyers wird das Garn abgezogen. Aufgrund der Relativbewegung, der Prozessparameter (Drehzahlverhältnis h , Anstellwinkel α) und abhängig von der Dornkörperform berührt das Garn den Dornkörper im neu gefundenen Ablagepunkt auf dem Dornkörper.
3. Dieser gefundene Ablagepunkt wird als neuer Ausgangspunkt genutzt. Die Berechnung wird erneut durchgeführt, solange bis alle geforderten Ablagepunkte gefunden wurden.

Für die Berechnung der Ablageposition werden die folgenden Lagebeziehungen zwischen den geometrischen Punkten zugrunde gelegt, deren Position im Koordinatensystem bekannt sind. Diese führen wiederum zu Schnittproblemen, deren Lösung die Ablagepunkte liefern.

Das Garn liegt in der Gerade durch die Punkte P und A . Der Punkt P beschreibt den auf dem Dornkörper fixierten Ausgangspunkt bzw. den im vorherigen Schritt gefundenen Ablagepunkt, der Punkt A beschreibt die Austrittsöse am Flyer. Es werden nun die Schnittpunkte dieser Gerade mit jeweils definierten Schnittebenen z_{KS} gesucht.

Die Lage und geometrische Beschreibung dieser Ebenen hängt von der Dornkörperkontur bzw. –geometrie ab. Die zugrunde liegenden Diskretisierungen werden im Folgenden beschrieben.

Die Schnittebenenbeziehungen für offene und geschlossene Dornkörperaußenkonturen sind in Tabelle 19 dargestellt. Die Schnittmodelle für den Zylinder- und für den Kugeldorn werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Tabelle 19: Beziehungen für Schnittebenen für unterschiedliche Dornkörperaußenkonturen

Außenkontur	offen	geschlossen	
Mantelkontur	Nicht vorhanden	Konvexer Bereich	Konkaver Bereich
Beziehung für Schnittebenen	Für die beiden Schnittebenen gilt: $z_{KS,1} = +\frac{H_D}{2}$ $z_{KS,2} = -\frac{H_D}{2}$	Je mehr Schnittebenen k berechnet werden, desto präziser erfolgt die Berechnung der Fadenposition: $-\frac{H_D}{2} \leq z_{KS,k} \leq +\frac{H_D}{2},$ $k \in \mathbb{N}.$ Sonderfall: Außenkontur hat Kanten zwischen Stirnseite und Mantelkontur: $z_{KS,1} = +\frac{H_D}{2}$ $z_{KS,2} = -\frac{H_D}{2}$	Für die beiden Schnittebenen gilt: $z_{KS,1} = +\frac{H_D}{2}$ $z_{KS,2} = -\frac{H_D}{2}$
Rechenaufwand	gering	Größer, abhängig von der Anzahl der Schnittebenen	gering

Bei einer offenen Außenkontur sind nur die Stirnseiten als Schnittebenen für die Berechnung der Fadenablage relevant. Diese bilden, ausgedrückt über die Höhe des Dornkörpers H_D , somit die Schnittbedingungen. Bei offenen Dornaußenkonturen folgt das Garn der geometrisch kürzesten Linie zwischen den beiden Schnittpunkten an den Stirnflächenkanten. Hier wird für die Berechnung angenommen, dass das Garn zwischen den Ablagepunkten auf den Stirnseiten gerade und gestreckt abliegt.

Bei einer geschlossenen, konvexen Außenkontur müssen mehrere Schnittebenen berechnet werden. Je mehr Schnittebenen betrachtet werden, desto genauer kann die Fadenablage berechnet werden. Gleichzeitig erhöhen sich die Anzahl der Rechenoperationen und damit der Rechenaufwand. Ein Beispiel für solche Geometrien sind Kugelformen.

Hat eine geschlossen-konvexe Außenkontur Kanten zwischen der Stirnseite und der Mantelkontur, so kann ggf. auf die Berechnung der zusätzlichen Schnittebenen neben den Stirnseiten verzichtet werden. Dies ist der Fall bspw. bei Zylinderformen. Hat die geschlossene Außenkontur konkave Bereiche, so werden diese behandelt wie offene Außenkonturen. Das Garn folgt der geodätischen Linie und legt sich nicht in die konkaven Bereiche ab, die Grenzen der konkaven Bereiche haben die gleiche Funktion wie Kanten.

Die gefundenen Schnittpunkte bilden bei Gültigkeit der jeweils beschriebenen Bedingungen die neuen Ausgangspunkte und damit die Fadenposition auf dem Dornkörper.

Die kontinuierlichen Rotationsbewegungen des Flyers und des Dornkörpers werden für die Berechnung in Inkrementaldarstellungen überführt, das heißt, der Flyerwinkel φ wird schrittweise erhöht. Unter Berücksichtigung des Drehzahlverhältnisses ergibt sich ebenfalls eine schrittweise Erhöhung des Dornwinkels δ . Pro Inkrementalschritt wird eine Schnittpunktberechnung durchgeführt.

Die gefundenen Schnittpunkte werden hinsichtlich verschiedener Abbruchbedingungen geprüft. Wird eine Abbruchbedingung als negativ bewertet, wird der anschließende Inkrementalschritt durchgeführt. Bei positiver Bewertung erfolgen ein Abbruch der Winkelerhöhung und damit die Festlegung auf eine gefundene Ablageposition auf dem Dornkörper. Diese bildet den neuen Ausgangspunkt P für die nachfolgenden Berechnungen.

7.2.1 Schnittebenenmodell für den Zylinderdorn

Für das vorgestellte Schnittebenenmodell gelten die in Abbildung 62 und in Abbildung 63 gezeigten Zusammenhänge.

Für die Berechnung des Schnittproblems müssen die Koordinaten bzw. die z-Koordinaten der Schnittebenen bekannt sein. Die Schnittebenen verlaufen parallel zur x,y-Ebene durch die jeweiligen Werte $z_{KS,k}$. Die Koordinaten der Schnittebenen $z_{KS,k}$ berechnen sich bspw. zu

$$z_{KS,k} = \frac{H_D}{2} - \left(\frac{n_{KS}}{H_D} \cdot k\right) \quad 7.1$$

n_{KS} beschreibt die Anzahl der zu berechnenden Schnittebenen $z_{KS,k}$ k stellt eine Laufvariable dar mit $k \in [0; n_{KS}]$.

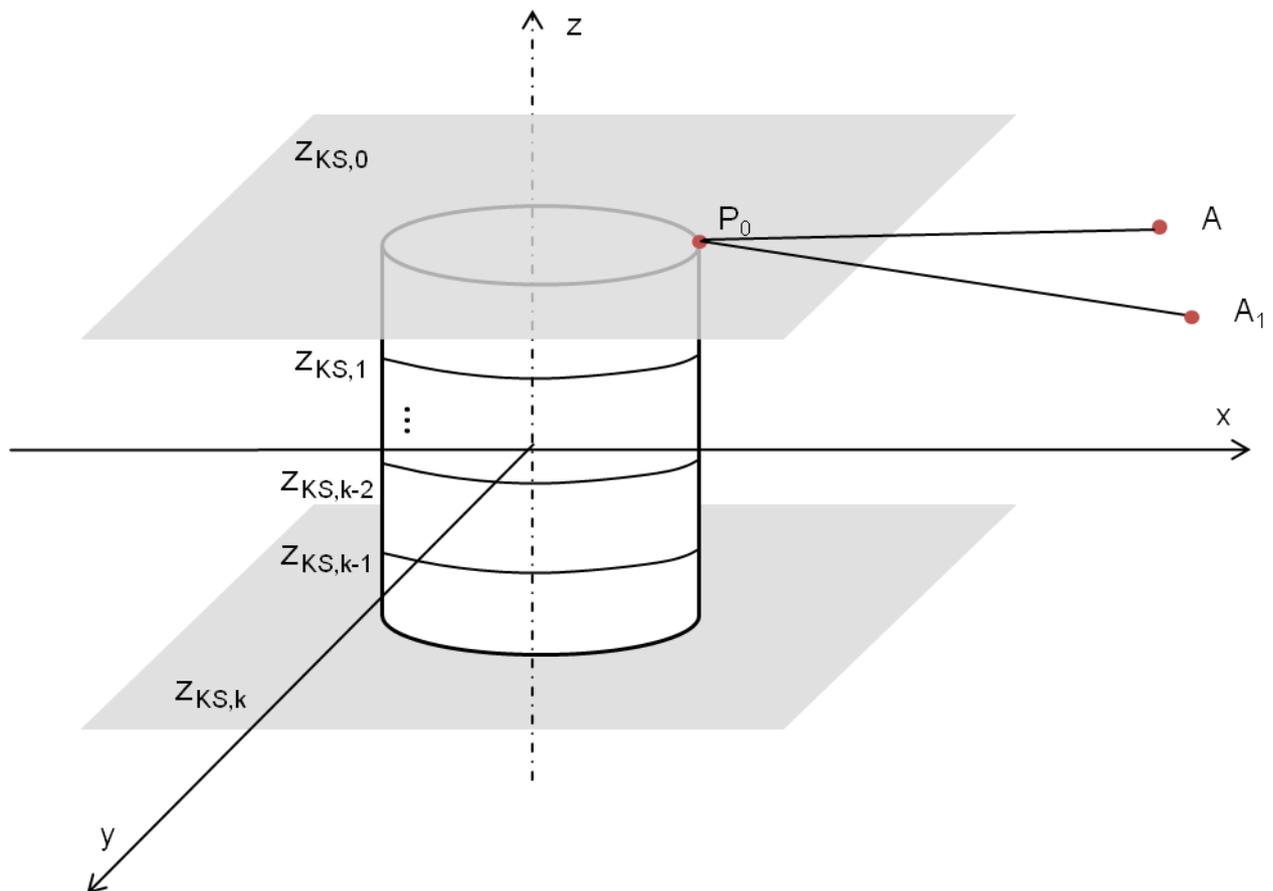


Abbildung 62: Zylinderdorn mit beispielhaften Schnittebenen $z_{KS,k}$, dem Startpunkt P_0 und der Flyeraustrittsöse im Punkt A

Wenn die Flyerbahn nicht durch den Ursprung des Koordinatensystem verläuft ($y_M = 0$), müssen die Fälle

- 1) $y_M < 0$: Flyerbahnebene schneidet die Dornrotationsachse hinter dem, d.h. rechts vom Ursprung (vgl. Abbildung 63, dargestellt in rot).
- 2) $y_M > 0$: Flyerbahnebene schneidet die Dornrotationsachse vor dem, d.h. links vom Ursprung (vgl. Abbildung 63, dargestellt in grün).

unterschieden werden.

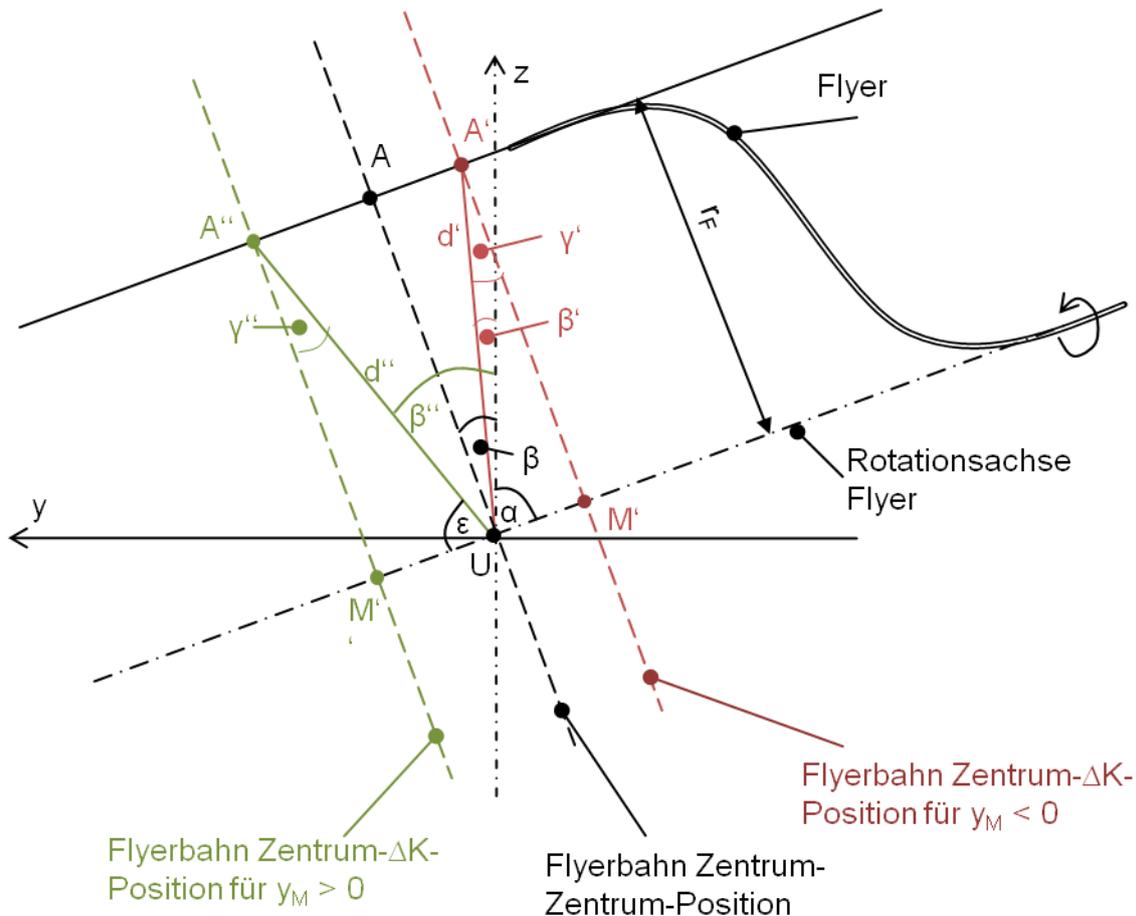


Abbildung 63: Geometrische Zusammenhänge für die Fälle 1 ($y_M < 0$, rot) und 2 ($y_M > 0$, grün) mit den geometrischen Kenngrößen A: Austrittsöse für Flyerbahn in Zentrum-Zentrum-Position, A': Austrittsöse für Flyerbahn in Zentrum- Δ K-Position für $y_M < 0$, A'': Austrittsöse für Flyerbahn in Zentrum- Δ K-Position für $y_M > 0$, U: Ursprung des Koordinatensystems, d: Abstand zwischen A und U, d': Abstand zwischen A' und U, d'': Abstand zwischen A'' und U, M: Schnittpunkt Flyerbahnebene durch A mit der Flyerrotationsachse, M': Schnittpunkt Flyerbahnebene durch A' mit der Flyerrotationsachse, M'': Schnittpunkt Flyerbahnebene durch A'' mit der Flyerrotationsachse, β , β' , β'' , γ , γ' , γ'' , ϵ : Hilfswinkel, α : Anstellwinkel, r_F : Radius des Flyers

Für den Fall 1) gilt der Zusammenhang

$$\beta' < 90^\circ - \alpha \quad 7.2$$

worin α den Anstellwinkel des Dorns bezogen zur Horizontalen und β' den Hilfswinkel zwischen der z-Achse und d' beschreiben.

Wird die Beziehung für den Hilfswinkel γ' (Winkel zwischen r_F und d')

$$\gamma' = \arccos\left(\frac{r_F}{d'}\right) \quad 7.3$$

in die Winkelsumme

$$180^\circ = 90^\circ + \gamma' + \beta' + \alpha \quad 7.4$$

eingesetzt, errechnet sich der Winkel β' für den Fall 1) zu

$$\beta' = 90^\circ - \alpha - \arccos\left(\frac{r_F}{d'}\right) \quad 7.5$$

Äquivalent hierzu kann für den Fall 2) der Zusammenhang für den Hilfswinkel β'' (Winkel zwischen der z-Achse und d'')

$$\beta'' > 90^\circ - \alpha \quad 7.6$$

definiert werden. Es wird der weitere Hilfswinkel zwischen d'' und der Flyerrotationssachse

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{r_F}{d''}\right) \quad 7.7$$

definiert und in die Winkelsumme

$$180^\circ = \alpha + \varepsilon + \beta'' \quad 7.8$$

eingesetzt. Hieraus berechnet sich der Winkel β'' (Hilfswinkel zwischen d'' und der z-Achse) für den Fall 2) zu

$$\beta'' = 180^\circ - \alpha - \arcsin\left(\frac{r_F}{d''}\right) \quad 7.9$$

Für jeden Inkrementalschritt der Berechnung nimmt der Flyerwinkel φ_i einen neuen Wert φ_{i+1} an, der über das Winkelinkrement $\Delta\varphi$ berechnet wird

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi \quad 7.10$$

Der Startwert des Flyerwinkels soll üblicherweise so gewählt werden, dass der Punkt A (Austrittsöse) auf der Höhe der Dornoberkante starten soll. Diese Höhe entspricht beim Zylinderdorn dem Wert $z_{\text{Start}} = \frac{H_D}{2}$. Es muss also die Bedingung

$$z_A = \cos\beta \cdot r_F \cdot \sin(2\pi - \varphi) + z_M = \frac{H_D}{2} = z_{\text{Start}} \quad 7.11$$

gelten, woraus sich der Startwert des Flyerwinkels φ_{Start} errechnet zu

$$\varphi_{Start} = 2\pi - \arcsin\left(\frac{\frac{H_D}{2} - z_M}{r_F \cdot \cos\beta}\right) \quad 7.12$$

Für die Berechnung der Fadenablage auf dem Zylinderdorn sind nun die folgenden Teilberechnungsschritte pro Inkrementalschritt des Flyerwinkels durchzuführen.

Der Dornwinkel δ ist der Quotient aus Flyerwinkel φ und dem Drehzahlverhältnis h .

$$\delta = \frac{\varphi}{h} \quad 7.13$$

Die Fadenaustrittsöse des Flyers A bzw. deren Koordinaten x_A, y_A, z_A folgt dem in (4.4), (4.5) und (4.6) gezeigten Zusammenhängen. Der jeweilige Startwert P, also der Punkt der Fadenablage, der im vorherigen Inkrementalschritt gefunden bzw. zu Beginn definiert wurde, rotiert im jeweils aktuellen Inkrementalschritt um die z-Achse, die die Rotationsachse des Dornkörpers darstellt. Diese Rotation wird über die Rotationsmatrix

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos\delta & -\sin\delta & 0 \\ \sin\delta & \cos\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad 7.14$$

beschrieben. Die Rotation des Punktes P im jeweiligen Inkrementalschritt berechnet sich durch

$$P_{i+1} = R_z \cdot P_i \quad 7.15$$

mit $P = (x_P, y_P, z_P)$.

Nachfolgend wird die Berechnung der Fadenablage für den Zylinderdorn mit offener Außenkontur dargestellt. Hierbei müssen zwei Schnittebenen $z_{KS,1}$ und $z_{KS,2}$ betrachtet werden, die in den beiden Stirnflächen des Zylinders liegen

$$z_{KS,1} = \frac{H_D}{2} \quad 7.16$$

$$z_{KS,2} = -\frac{H_D}{2} \quad 7.17$$

Zu Beginn erfolgt eine Unterscheidung der Schnittbedingungen über die Lagebeziehung. Hieraus leiten sich die jeweils gültigen Stoppkriterien ab, die schließlich den gefundenen neuen Schnittpunkt und damit den Ablagepunkt auf der Dornoberfläche definieren. Betrachtet wird der in Abbildung 64 dargestellte Verlauf der Austrittsöse, welche wiederum vom Flyerwinkel vorgegeben wird.

Der Punkt P_0 wird als Startwert vorgegeben, der zugehörige Winkel φ_{Start} der Austrittsöse A_0 kann über (7.12) berechnet werden. Die Rotation des Flyers erfolgt im Uhrzeigersinn. Pro Inkrementalschritt des Flyerwinkels φ wird jeweils eine neue Position der Punkte P und A berechnet. Der Ablagepunkt P rotiert dabei auf dem Dornkörper um die z-Achse, der Punkt A (Austrittsöse) läuft auf der Flyerbahn.

Die Gerade durch P und A in der dargestellten x,z-Ebene lautet

$$g: \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{A,i+1} \\ z_{A,i+1} \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} x_{P,i+1} - x_{A,i+1} \\ z_{P,i+1} - z_{A,i+1} \end{pmatrix} \quad 7.18$$

bzw.

$$z = x \cdot m + c' \quad 7.19$$

mit $m = \frac{z_{A,i+1} - z_{P,i+1}}{x_{A,i+1} - x_{P,i+1}}$ und $c' = z_{A,i+1} - \frac{(z_{A,i+1} - z_{P,i+1}) \cdot x_{A,i+1}}{x_{A,i+1} - x_{P,i+1}}$.

Beginnt nun der Flyerwinkel φ in der dargestellten Position ($\varphi = \varphi_{\text{Start}}$), so muss zuerst nach dem Schnittpunkt der Geraden g durch P und A mit der Ebene durch $z = z_{KS,2}$ gesucht werden. Nach Lösung dieses Schnittpunkts ergibt sich nach Kriterium I der Schnittpunkt SEG der Gerade g durch P und A mit der Ebene E durch $z_{KS,2}$ zu

$$\overrightarrow{SEG} = A + \frac{z_{KS,k} - z_{A,i+1}}{z_{P,i+1} - z_{A,i+1}} \cdot (\vec{P} - \vec{A}) \quad 7.20$$

worin $\overrightarrow{SEG} = (x_{SEG,i+1}, y_{SEG,i+1}, z_{SEG,i+1})$ bedeutet. Der Schnittpunkt SEG wird für jeden Inkrementalschritt berechnet. Ein tatsächlicher Ablagepunkt ist gefunden, wenn die Stoppkriterien des Kriteriums I erfüllt sind.

Kriterium I: Stopp der Inkrementierung von φ , wenn

- die Gerade g durch die Punkte P und A die Ebene durch $z_{KS,k}$ schneidet und
- der Schnittpunkt auf der Außenkontur der Stirnfläche liegt, also $|\overrightarrow{SEG}| = \sqrt{r_D^2 + z_{KS,k}^2}$.

Bei Erfüllung beider Bedingungen kann der gefundene Schnittpunkt SEG als neuer Startpunkt P gesetzt werden.

Der nächste zu berechnende Ablagepunkt liegt erneut in $z_{KS,2} = \frac{-H_D}{2}$. Für dessen Berechnung wird der Flyerwinkel φ nach Kriterium II gesucht, bei dem die Gerade g durch die Punkt P und A in der Ebene durch $z_{KS,2}$ liegt. Für diesen Fall wird der Schnittpunkt mit der Gerade g und einem Kreis mit dem Radius $r = r_D$ um die z-Achse

gesucht. Dieser kann über die Kreisgleichung in der x,z-Ebene beschrieben werden zu

$$k: x^2 + z^2 = r_D^2 \quad 7.21$$

Die Lösungen x_{L1} und x_{L2} des Schnittproblems lauten

$$x_{L1/L2} = \frac{-2mc' \pm \sqrt{4m^2c'^2 - 4(1+m^2)(c'^2 - r_D^2)}}{2(1+m^2)} \quad 7.22$$

mit $m = \frac{z_{A,i+1} - z_{P,i+1}}{x_{A,i+1} - x_{P,i+1}}$ und $c' = z_{A,i+1} - \frac{(z_{A,i+1} - z_{P,i+1}) \cdot x_{A,i+1}}{x_{A,i+1} - x_{P,i+1}}$.

Für die Wahl des Ablagepunkts wird der jeweilige Abstand der gefundenen Schnittpunkte x_{L1} und x_{L2} zum Punkt A berechnet. Derjenige Schnittpunkt mit dem geringeren Abstand ist der tatsächliche Ablagepunkt auf der Dornoberfläche.

Ein Ablagepunkt ist dann gefunden, wenn die Stoppkriterien des Kriteriums II erfüllt sind.

Kriterium II: Stopp der Inkrementierung von φ , wenn

- die Gerade g durch die Punkte P und A in der Ebene durch $z_{KS,k}$ liegt und
- die Ebene durch $z_{KS,k}$ auf der jeweils betrachteten Stirnfläche liegt, also $|z_{KS,1}| = |z_{KS,2}| = \frac{H_D}{2}$.

Die beiden Kriterien I und II dürfen nicht gleichzeitig gelten. Nachfolgend und in Abbildung 64 ist gezeigt, wie die Kriterien als Bedingungen geschaltet werden können.

1. Start bei P_0 und A_0
2. Schrittweise Erhöhung des Flyerwinkels φ : $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$. Kriterium I ist aktiv, Kriterium II ist blockiert.
3. Die Gerade durch P_0 und A_{S1} schneidet die Ebene $z_{KS,2}$ im Schnittpunkt P_{S1} , der über den Punkt SEG nach (7.20) gefunden wurde. P_{S1} ist ein neuer Schnittpunkt. Stopp nach Kriterium I.
4. P_{S1} wird als neuer Startpunkt gesetzt, schrittweise Erhöhung des Flyerwinkels φ : $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$. Kriterium II ist aktiv, Kriterium I wird blockiert.
5. P_{S2} ist ein neuer, gefundener Schnittpunkt, da Kriterium II erfüllt wird (Gerade durch P_{S2} und A_{S2} liegt in Schnittebene $z_{KS,2}$, gefunden über x_{L1} und x_{L2} nach (7.22)).
6. P_{S2} wird als neuer Startpunkt gesetzt, schrittweise Erhöhung des Flyerwinkels φ : $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$. Kriterium I ist aktiv, Kriterium II wird blockiert.

7. P_{S3} wird wieder als echter Schnittpunkt in der Schnittebene $z_{KS,1}$ gefunden, da Kriterium I erfüllt ist.

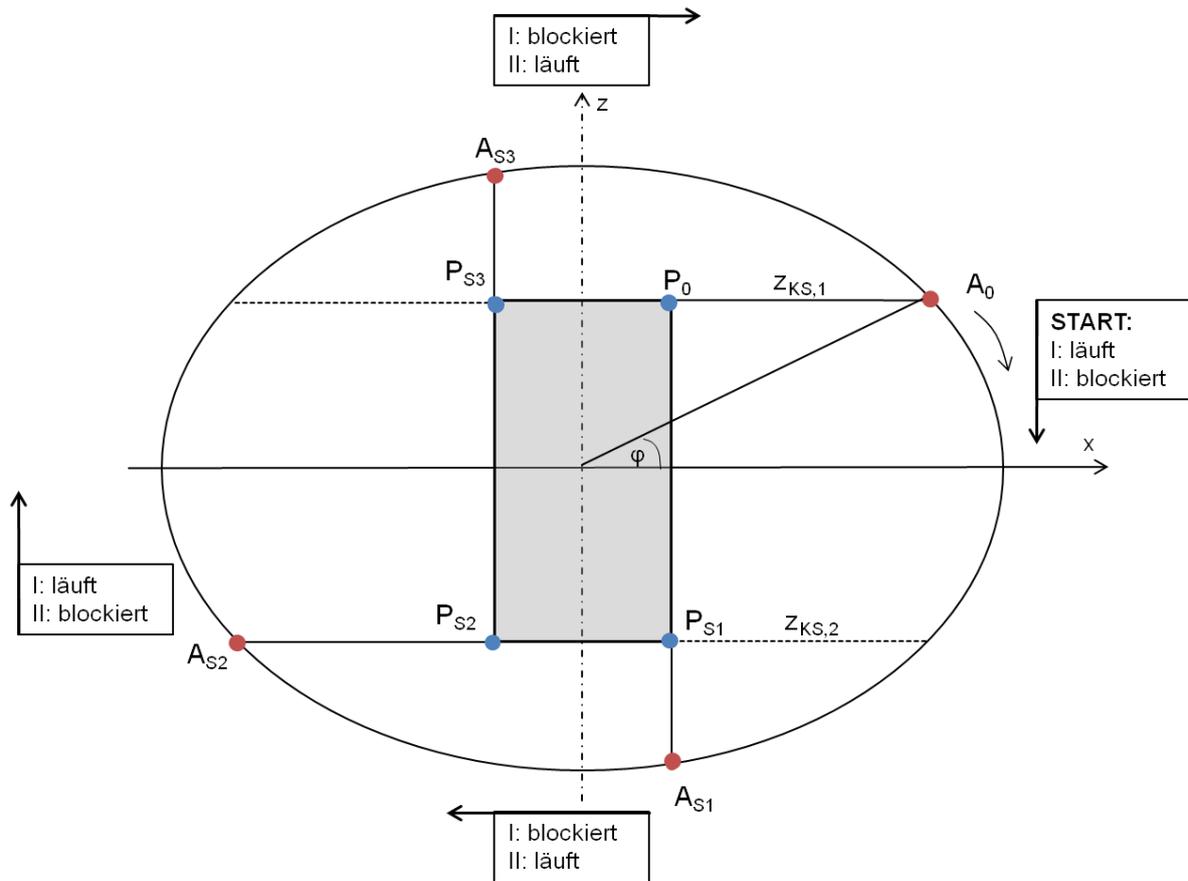


Abbildung 64: Schematische Darstellung des Zylinderdornkörpers im Koordinatensystem, dargestellt ist die x,z -Ebene. A_0 : Startpunkt der Austrittsöse. P_0 : Startpunkt, erster Ablagepunkt. A_{S1} : Austrittsöse beim ersten gefundenen Schnittpunkt P_{S1} . A_{S2} : Austrittsöse beim zweiten gefundenen Schnittpunkt P_{S2} . A_{S3} : Austrittsöse beim dritten gefundenen Schnittpunkt P_{S3} . $z_{KS,1}$, $z_{KS,2}$: Schnittebenen, φ : Flyerwinkel

7.2.2 Schnittebenenmodell für den Kugeldorn

Der Kugeldorn soll als Beispiel für rotationssymmetrische Dornkörper ohne Kanten und mit einer mehrfach gekrümmten Fläche gezeigt werden. Die beim Zylinderdorn gezeigten Voraussetzungen gelten auch bei Kugeldorn, auch das Berechnungsprinzip erfolgt über die Berechnung einzelner Inkrementalschritte.

Die Kugel wird in n_{KS} Schnittebenen z_{KS} aufgeteilt. Anders als beim Zylinderdorn ist der Dorndurchmesser hier nicht konstant, sondern muss für jede Schnittebene neu berechnet werden. Bei konstantem Abstand zwischen den einzelnen Schnittebenen können die z -Koordinaten der Schnittebenen über

$$z_{KS,k} = r_D - k \cdot \frac{2r_D}{n_{KS}} \quad 7.23$$

berechnet werden. Hierbei ist k eine Laufvariable, für die gilt $k \in [0; n_{KS}]$. Je größer die Anzahl der Schnittebenen ist, desto feiner aufgelöst kann der Fadenverlauf auf der Dornoberfläche berechnet werden.

Für die Berechnung der Ablagepunkte auf der Dornoberfläche wird das in Abbildung 65 dargestellte Schnittproblem der Gerade g durch die Punkte P_{Si} und A mit den jeweiligen Schnittebenen gelöst.

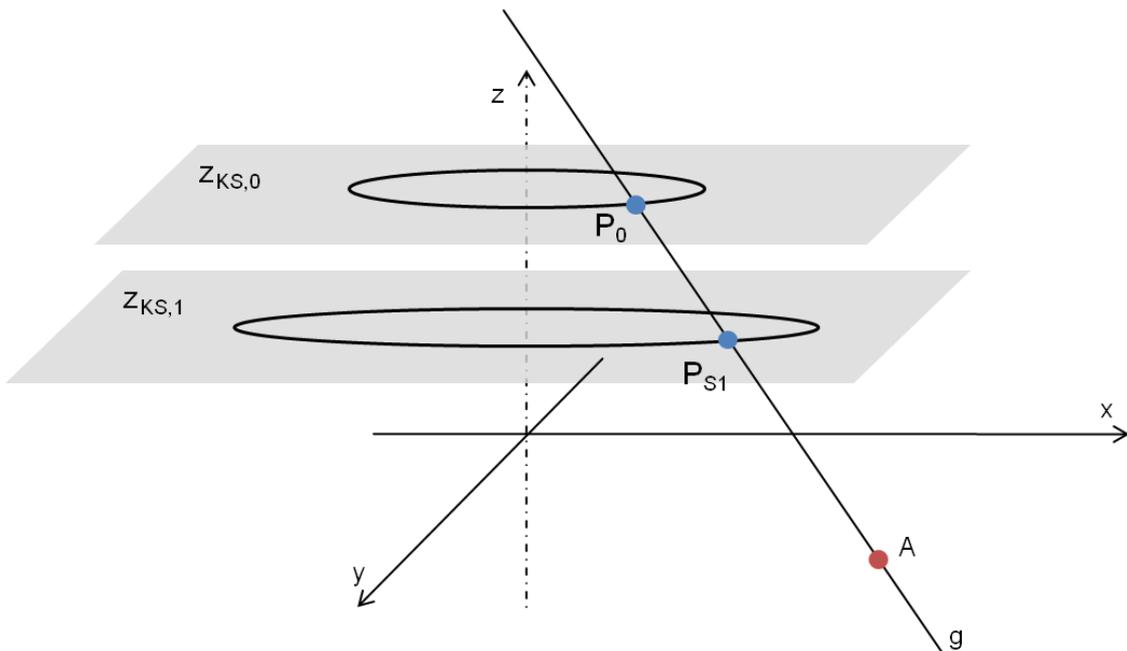


Abbildung 65: Darstellung des Prinzips der Schnittpunktberechnung beim Kugeldorn am Beispiel zweier Schnittebenen. A: Austrittsöse, P_0 : Startpunkt, erster Ablagepunkt, P_{S1} : zweiter gefundener Ablagepunkt, $z_{KS,0}$, $z_{KS,1}$: Schnittebenen, g : Gerade durch A und Ablagepunkte P

Pro Inkrementalschritt des Flyerwinkels erfolgt solch eine Berechnung. Über ein Stoppkriterium wird festgestellt, wann der berechnete Schnittpunkt mit dem Ablagepunkt auf der Dornoberfläche übereinstimmt.

Die Gerade durch P und A lautet

$$g: \vec{X} = \vec{P} + j(\vec{A} - \vec{P}) = \vec{P} + j \cdot \vec{w} \quad 7.24$$

Die Ebene E durch die durch $z_{KS,k}$ definierten Schnittebenen lautet

$$E: z = z_{KS,k} \quad 7.25$$

Die Ebenen durch $z_{KS,k}$ liegen parallel zur x,y-Ebene.

Der Schnittpunkt der Gerade g mit der Ebene E für den Inkrementalschritt bzw. für φ_{i+1} berechnet sich zu

$$\overrightarrow{SEG'} = \vec{A} + \frac{z_{KS,i+1} - z_{A,i+1}}{z_{P,i+1} - z_{A,i+1}} \cdot (\vec{P} - \vec{A}) \quad 7.26$$

Ein tatsächlicher Ablagepunkt ist gefunden, sofern die folgenden Bedingungen erfüllt sind.

- 1) Die Gerade g durch P und A und die Ebene E durch $z_{KS,k}$, die parallel zur x,y-Ebene liegt, schneiden sich.
- 2) Der Abstand des gefundenen Schnittpunkts SEG' zum Ursprung des Koordinatensystems entspricht dem Dorn- bzw. Kugeldurchmesser.

Zur Überprüfung der Gültigkeit der Bedingung 1) wird nach [49] die Kontrolldeterminante Det aufgestellt und berechnet.

$$Det = \begin{pmatrix} r_{KS,i} & 0 & -(x_{P,i+1} - x_{A,i+1}) \\ 0 & r_{KS,i} & -(y_{P,i+1} - y_{A,i+1}) \\ 0 & 0 & -(z_{P,i+1} - z_{A,i+1}) \end{pmatrix} \quad 7.27$$

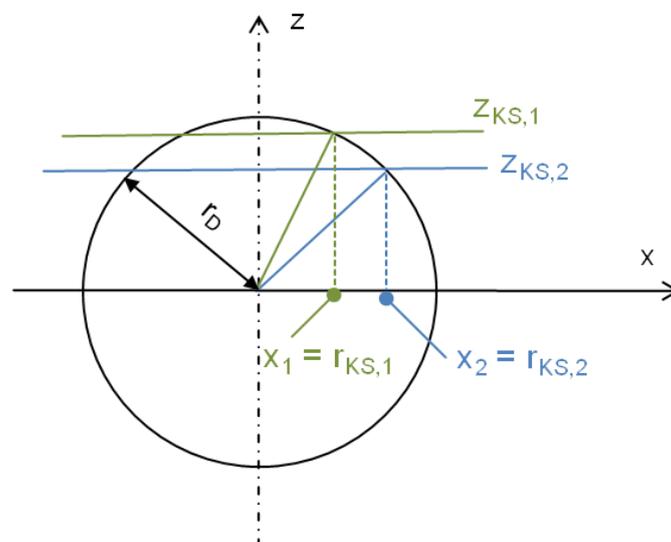


Abbildung 66: Darstellung der Schnittebenen 1 und 2 beim Kugeldorn

Hierbei sind die Radien $r_{KS,k}$ die Radien der Kreise auf der Dornkontur, die an den jeweiligen Schnittebenen gebildet werden. Sie berechnen sich gemäß Abbildung 66 zu

$$r_{KS,k} = x_{KS,k} = \sqrt{r_D^2 - z_{KS,k}^2} \quad 7.28$$

Gilt nun Bedingung 1) und es liegt ein Schnittpunkt der Geraden g mit der Ebene E vor, so gilt $\text{Det} \neq 0$.

Zur Überprüfung der Gültigkeit der Bedingung 2) wird der Abstand des berechneten Schnittpunkts SEG' zum Ursprung $(0, 0, 0)$ des Koordinatensystems berechnet.

$$d_{SEG} = \sqrt{x_{SEG}^2 + y_{SEG}^2 + z_{SEG}^2} \quad 7.29$$

Gilt Bedingung 2) und der gefundene Schnittpunkt liegt auf der Dorn- bzw. Kugeloberfläche mit dem Radius r_D , so gilt $d_{SEG} = r_D$.

7.2.3 Programmablaufdiagramme für Zylinder- und Kugeldorn

Die gezeigten Berechnungen sind programmatisch umgesetzt, so dass nun die Ablagepunkte beim Strukturknäueln für Zylinder- und Kugeldorne berechnet werden können. Es werden die folgenden Eingabeparameter vorausgesetzt.

- Anstellwinkel α des Dorns bezogen zur Horizontalen
- Drehzahlverhältnis h
- Geometrie des Dorns, d.h. Radius r_D und ggf. Höhe H_D .
- Anzahl der Zylinderschnitte n_{KS}
- d ist die Distanz des Ursprungs des Koordinatensystems zur Austrittsöse A . Wenn der Dorn in Zentrum-Zentrum-Position liegt, gilt $d = r_D$.
- Winkelinkrement $\Delta\varphi$, mit dem die Inkrementalschritte $\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi$ berechnet werden.

In Abbildung 67 und in Abbildung 68 sind die Programmablaufdiagramme für den Zylinderdorn und für den Kugeldorn dargestellt.

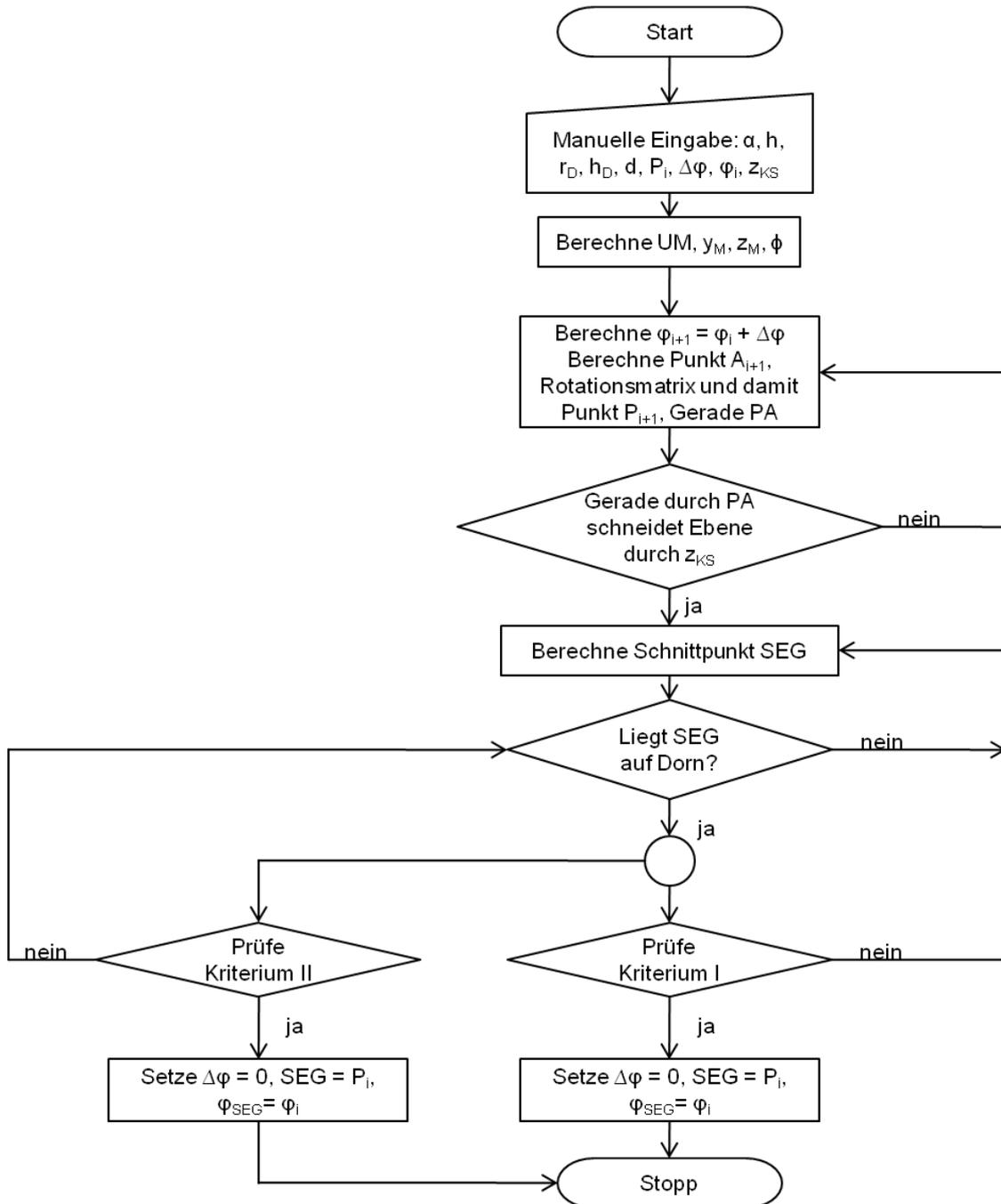


Abbildung 67: Programmablaufdiagramm für Zylinderdorn

In den in Abbildung 67 und Abbildung 68 gezeigten Programmablaufdiagrammen bedeutet der Programmstopp am Ende, dass ein neuer Ablagepunkt gefunden wurde. Dieser wird für die nächste Berechnung wieder als Startwert P_0 gesetzt. Das Programm muss in der dargestellten Form so oft durchlaufen werden, bis eine Lage komplett berechnet wurde, d.h. bis sich die Ablagepunkte wiederholen.

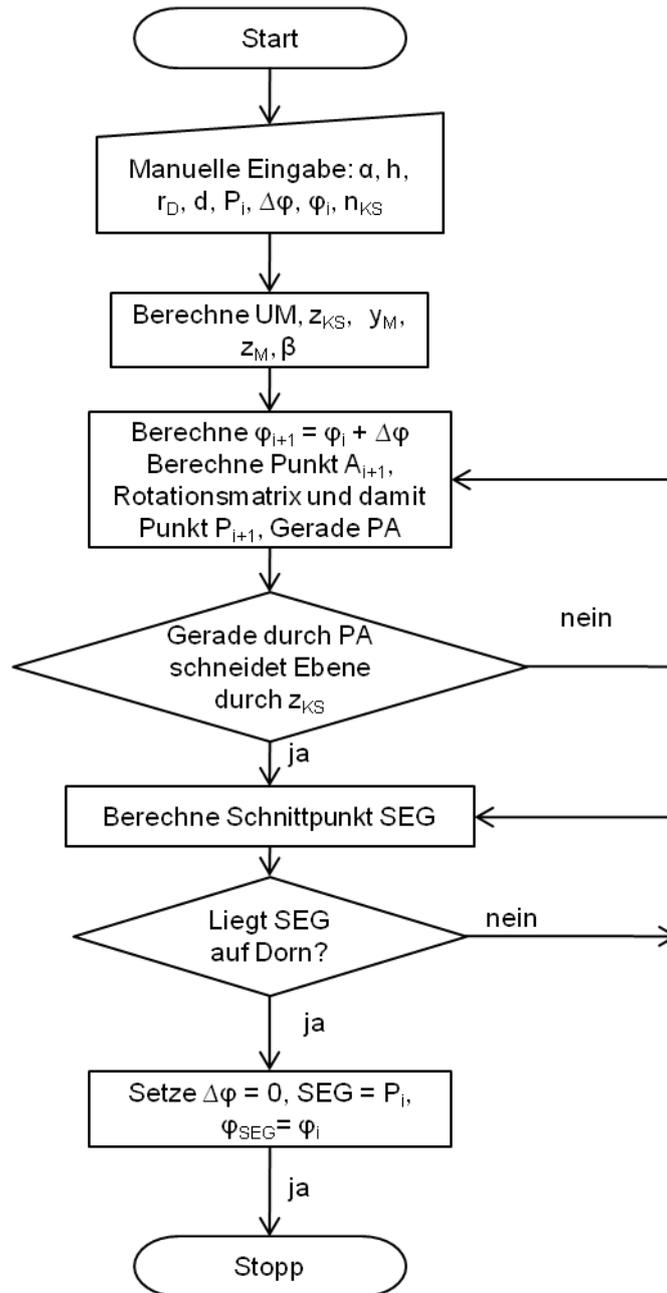


Abbildung 68: Programmablaufdiagramm für Kugeldorn

7.2.4 Verifizierung der berechneten Fadenablage und Bewertung

Für eine Verifizierung des gezeigten Berechnungsalgorithmus werden Strukturknäuelversuche durchgeführt. Es wird CO/PES-Garn eingesetzt, welches eine geringe Feinheit aufweist und gute Ablageeigenschaften zeigt, und eine Flyerdrehzahl von $n_F = 100$ 1/min eingestellt. Hierfür werden die Einstellungen an der Strukturknäuelmaschine SBW 2 im Berechnungsprogramm übernommen. An dieser Stelle werden

die Ergebnisse anhand einer Strukturknäuelwicklung mit den folgenden Eigenschaften und Einstellungen gezeigt.

Tabelle 20: Einstellungen für die Berechnung der Fadenablage

Parameter	Wert	Einheit
Drehzahlverhältnis h	5,0	-
Anstellwinkel α	72,90	°
Schrittweite $\Delta\varphi$	0,1	°
P_0 (erster Ablagepunkt)	(7,8; 0; 10,3)	(cm; cm; cm)
Dorngrundform	Zylinder	-
Radius Dorn r_D	7,8	cm
Höhe Dorn (gesamt) H_D	20,6	cm
Abstand zwischen A und U	23,45	cm
Radius Flyer r_F	23,45	cm
Anzahl Schnittebenen n_{KS}	2	-
Schnittebene 1: $z_{KS,1}$	10,3	cm
Schnittebene 2: $z_{KS,2}$	-10,3	cm

Der Zylinderdorn liegt durch $d = r_F$ in der Zentrum-Zentrum-Position. Die Positionierung im Knäuelraum wird mit einem in der Rotationsachse angebrachten Laser überprüft. Die Stirnseiten des Dornkörpers sind mit Formmasse präpariert, um ein Abrollen des Garns zu minimieren.

Die Berechnung der Ablagepunkte wird gemäß dem oben gezeigten Programmablaufdiagramm und den beschriebenen Zusammenhängen durchgeführt. Die berechneten Ablagepunkte werden mitsamt dem zugehörigen Winkel des Dorns abgespeichert. Für eine übersichtliche Darstellung werden die Ablagepunkte in einer Auswertung wieder um die jeweiligen Dornwinkel zurückgedreht und dargestellt.

In Abbildung 69 ist links die erzeugte Fadenablage auf dem Zylinderdorn gezeigt. Daneben sind die berechneten Ablagepunkte ebenfalls auf der Stirnseite gezeigt. Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen die für das Drehzahlverhältnis $h = 5,0$ typische fünffache Verkreuzung vorliegt.

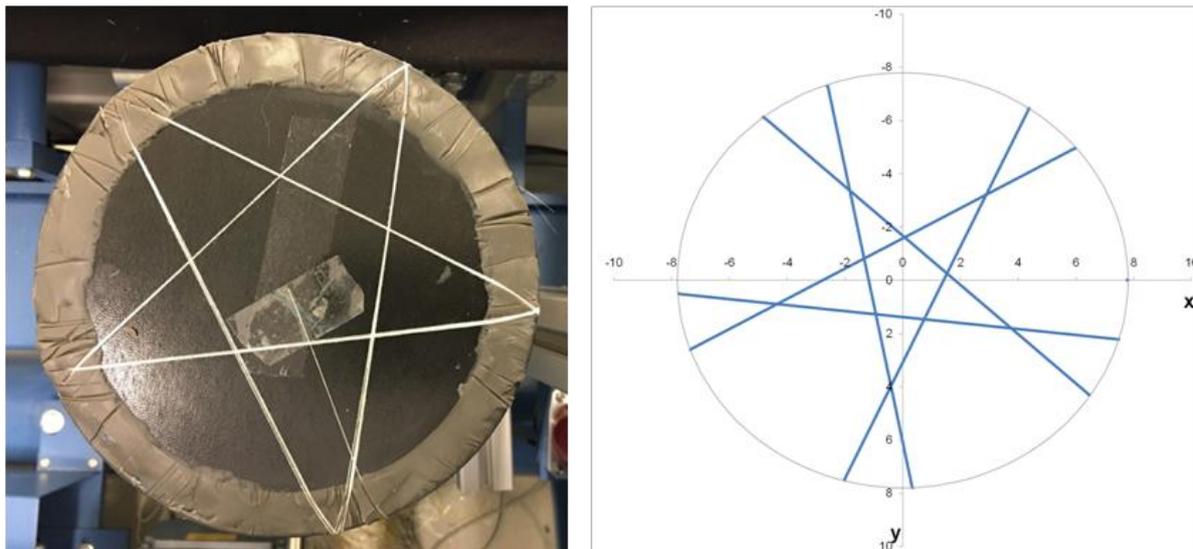


Abbildung 69: Vergleich der Fadenablage beim Versuch (links) und der berechneten Ablagepunkte (rechts)

Es fällt auf, dass die äußeren Verkreuzungspunkte beim Versuch auf der Außenkante, wohingegen sie bei der berechneten Darstellung weiter in Richtung des Mittelpunkts liegen. In beiden Fällen beträgt der Winkelschritt erwartungsgemäß $\lambda = \lambda_W = 75^\circ$. Der Bereich auf der Stirnseite, auf dem kein Garn abgelegt wird, liegt rechnerisch bei $r_{\text{ÖK}} = 31,69$ mm. Der an der Fadenablage im Versuch ermittelte Radius liegt bei $r_{\text{ÖK, Versuch}} = 27$ mm, an der berechneten Fadenablage kann dieser über eine Mittelung von Inkreis- und Umkreis zu $r_{\text{ÖK, berechnet}} = 13$ mm bestimmt werden.

Die Abweichung in der Fadenablage kann daraus resultieren, dass im vorgestellten Berechnungsalgorithmus Garneigenschaften wie der Garndurchmesser nicht berücksichtigt werden. Durch die Wahl des feinen CO/PES-Garns, welches in Strukturknäuelversuchen ein stabiles Ablageverhalten zeigt, wurde dieser Tatsache entgegengewirkt. Ballonierungseffekte beim Strukturknäueln, die die Fadenablage ebenfalls verfälschen könnten, konnten durch die Garn- und Parameterauswahl als vernachlässigbar bewertet werden.

Die in Tabelle 20 gezeigten Einstellungen wurden entweder händisch vermessen oder werden von der Strukturknäuelmaschine selbst erfasst und im Bedientableau angezeigt. Insbesondere der Anstellwinkel α birgt hierbei Potential für solche Unterschiede in der Fadenablage, wie sie festgestellt wurden. Eine Absenkung des Anstellwinkels um $2,90^\circ$ bewirkt eine deutliche Verschiebung der Verkreuzungspunkte in Richtung der Außenkanten, wie es in Abbildung 70 für die Anstellwinkel $\alpha = 72,90^\circ$ und $\alpha = 70,00^\circ$ beispielhaft gezeigt ist. Wird der Anstellwinkel von der Maschine nur um wenige Grad verändert erfasst und angezeigt, birgt sich hierin ein großes Poten-

tial, die Geometrie der Fadenablage zu verändern. Dies wird deswegen als realistische Möglichkeit für die Abweichung der im Algorithmus berechneten von den im Versuch ermittelten Ablagepunkten gesehen.

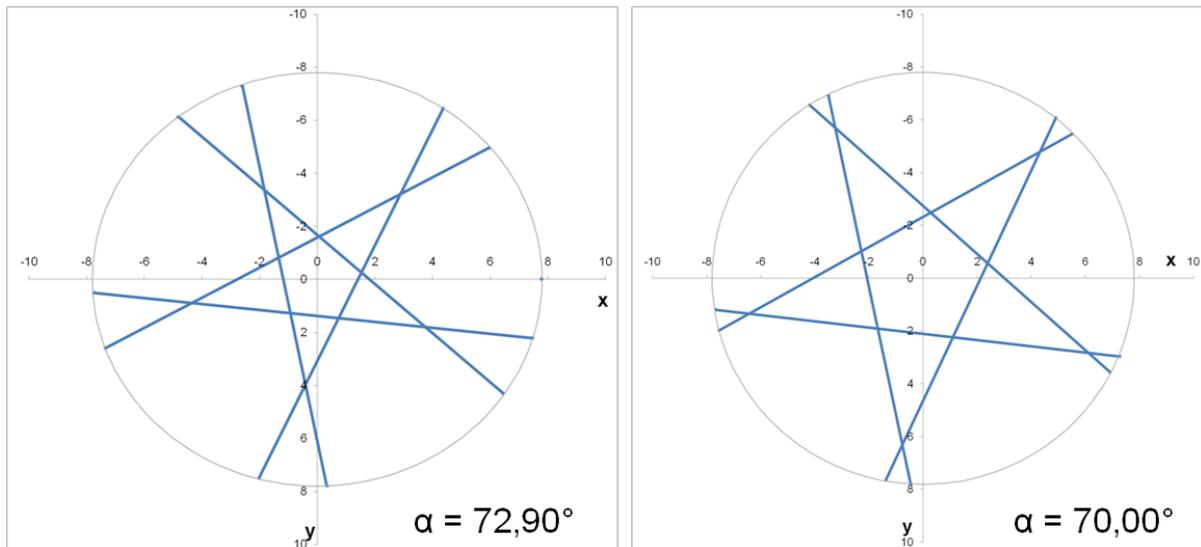


Abbildung 70: Berechnete Ablagepunkte am Zylinderdorn für zwei verschiedene Anstellwinkel

Ein weiterer Grund für diese Abweichungen kann in der nicht exakt vorgebbaren Dornkörperposition sowie des Abstands zwischen der Austrittsöse A und dem Koordinatensystemursprung U liegen. Diese werden für die Versuche nach Möglichkeit genau eingestellt, jedoch erlaubt die Maschinengeometrie keine präzise Einstellung dieser Werte. Abweichungen können also nicht ausgeschlossen werden.

7.2.5 Fazit der Berechnung der Fadenlage für Zylinder- und Kugeldorn

Für den Zylinderdorn mit geschlossener Außenkontur können die gezeigten Zusammenhänge und der Berechnungsalgorithmus genutzt werden, um Ablagepunkte des Garns an den Kanten der Stirnseiten zu berechnen. Die Ablagepunkte auf der Mantelseite ergeben sich durch die Verbindung zweier aufeinanderfolgenden Ablagepunkte. Soll die Fadenposition über die Mantelseite rechnerisch exakt bestimmt werden, so können die für den Kugeldorn gültigen Schnittprobleme mit konstantem Dornradius genutzt werden.

Für den Zylinderdorn mit offener Außenkontur können die Schnittpunkte berechnet werden, indem abwechselnd zwei Schnittprobleme zur Ermittlung der Schnittpunkte SEG bzw. x_{L1} oder x_{L2} gelöst werden. Es müssen die hierbei pro Flyerumdrehung um 360° anzulegenden Kriterien in der folgenden Reihenfolge berücksichtigt werden.

Wird das Modell der offenen Außenkontur zugrunde gelegt, bei dem nur die beiden Schnittebenen durch die Stirnseiten des Zylinders berechnet werden, kann die Fadenablage mit wenigen Rechenoperationen bestimmt werden. Insbesondere für hohe, ganzzahlige Drehzahlverhältnisse h stimmen diese Berechnungen auch mit der tatsächlichen Fadenablage auf der Mantelseite aufgrund der geringen Taillierung überein.

Tabelle 21: Berechnungsschema der Ablagepunkte für den Zylinderdorn mit offener Außenkontur

Kriterium	Schnittproblem	Schnittebene
I	Gerade g durch P und A schneidet Ebene durch z_{KS}	$z_{KS,2} = -\frac{H_D}{2}$
II	Gerade g liegt in Ebene durch z_{KS} und schneidet Kreis mit Radius r_D	$z_{KS,2} = -\frac{H_D}{2}$
I	Gerade g durch P und A schneidet Ebene durch z_{KS}	$z_{KS,1} = +\frac{H_D}{2}$
II	Gerade g liegt in Ebene durch z_{KS} und schneidet Kreis mit Radius r_D	$z_{KS,1} = +\frac{H_D}{2}$

Mit der Berechnung über die beiden Schnittebenen, die in den beiden Stirnseiten liegen, können also auch Dornkörperformen berechnet werden, die Bereiche vom Zylinder abweichende Bereiche vorweisen. Beispielsweise verändern Kuppelformen auf den Stirnseiten die tatsächlichen Ablagepunkte nicht. Dies stellt eine Möglichkeit einer recheneffizienten Berechnung der Fadenablage bei hohen Drehzahlverhältnissen dar.

Der gezeigte Algorithmus für den Kugeldorn erlaubt ebenfalls eine Berechnung der einzelnen Ablagepunkte der Fadenablage auf der Dornoberfläche. Durch eine Anpassung der Auflösung über die Festlegung der Anzahl der Schnittebenen können diese für unterschiedliche Dornkörpergrundformen mit geringem Rechenaufwand berechnet werden.

Die erarbeiteten technologischen und geometrischen Zusammenhänge bilden die Grundlage für die Berechnung der Ablagepunkte im gezeigten Berechnungsmodell. Der Verlauf der Austrittsöse auf der Flyerbahn nimmt bei der Berechnung eine wichtige Rolle ein, da nur dadurch die Schnittpunkte bestimmt werden können. Die dritte Arbeitshypothese kann so bestätigt werden.

8 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die grundlegenden Einflussfaktoren und damit die Struktur-Eigenschaftbeziehungen auf den Strukturknäuelprozess definiert und untersucht. Zur Zielerreichung werden in der Arbeit drei Arbeitshypothesen überprüft und bestätigt:

- (1) Mit der Definition und der Analyse der technologischen Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Fadenablage sowie durch die Untersuchung der relevanten Maschinenelemente wird ein grundlegendes technologisches Verständnis der Strukturknäuelbildung geschaffen.
- (2) Wenn die Einflussfaktoren des Garns auf die Strukturknäuelbildung bekannt sind, kann eine Aussage über die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Strukturknäuelprozesses getroffen werden.
- (3) Mit einem Berechnungsmodell, das auf der Definition und Analyse der knäueltechnologischen basiert, wird eine Möglichkeit geschaffen, die Fadenablage auf verschiedenen Dornkörperformen rechnerisch zu bestimmen.

Die grundlegenden Begriffe und die knäueltechnologischen sowie die garnseitigen Einflussfaktoren beim Strukturknäuelprozess werden hierfür definiert und untersucht. Diese fließen in das Berechnungsmodell mit ein, mit dem die Fadenablage rechenefizient berechnet werden kann.

Bei jeder Dornkörpergrundform haben der Anstellwinkel, die Dornform selbst und die Position im Knäuelraum entlang der z- bzw. der Dornrotationsachse einen wesentlichen Einfluss auf die Beknäuelbarkeit. Es werden für den Kugeldorn und für den Zylinderdorn in unterschiedlichen Ausprägungen die wesentlichen Zusammenhänge und Voraussetzung für eine Knäuelbildung gezeigt.

Der Aufbau eines Strukturknäuels wird systematisch analysiert und in die gerade und in die wilde Strukturwicklung eingeteilt. Gerade Strukturwicklungen zeigen in der Fadenablage keine Ondulierung innerhalb einer Lage, wilde Strukturwicklungen hingegen schon. Diese sind demzufolge aufgrund der ondulierungsbedingten erhöhten Reibungskräfte zwischen den Garnen an den Verkreuzungspunkten stabiler in ihrer Struktur. Die Ondulierung kann jedoch gleichzeitig eine Reduktion der Krafteinleitung in Garnrichtung in die Struktur bewirken.

Es wird eine Bewertungsmethode der Fadenablage erarbeitet, die es erlaubt, die Gleichmäßigkeit der Fadenablage zu bewerten. Hierzu werden die Winkelschritte (λ) zwischen den Ablagepunkten bestimmt und mit dem berechneten Winkelschritt λ_w verglichen.

Die Dornzahl ist die prozessgeschwindigkeitsbestimmende Größe und bewirkt den Fadenabzug von der Vorlage. Ein Einfluss der Dornzahl auf die Fadenablage ist nur bei geschlossenen Außenkonturen, bspw. beim Kugeldorn, festzustellen, der sich in einer Verlängerung der Fadenlänge infolge der nicht konstanten Oberflächengeschwindigkeit auf der Außenkontur kommen. Die Flyerdrehzahl hat beim Strukturknäueln im betrachteten Bereich keinen messbaren Einfluss auf die Fadenablage.

Die Fadenspannung ist abhängig von der Dornkörperform und von der Garndehnung. Eine hohe Garndehnung schwächt die Ausbildung der charakteristischen Peaks beim Zylinderdorn in der Fadenspannung generell ab. Es ist kein Unterschied zwischen geraden und wilden Strukturwicklungen bzgl. der Fadenspannung zu erkennen.

Im Bereich des freien Fadens zeigen sich bei hohen Flyerdrehzahlen, einer geringen Fadengrundspannung und beim haarigen, groben PES-Zwirn leichte Ballonierungseffekte. Eine Absenkung der Fadengrundspannung erhöht beim PES-Zwirn den Ballonierungseffekt zusätzlich. Bei der Einstellung einer mittleren Fadengrundspannung und einer hohen Flyerdrehzahl ist keine Abhängigkeit von der Garnhaarigkeit zu erkennen. Die Ballonierungseffekte zeigen keinen Einfluss auf die Fadenablage. Mit dieser Analyse der technologischen Parameter und Einflussfaktoren auf die Fadenablage sind die grundlegenden Zusammenhänge des Strukturknäuelprozesses ermittelt und können für technische Anwendungen eingesetzt werden. Die erste Arbeitshypothese wird mit dieser Analyse der technologischen Zusammenhänge, der Maschinenelemente und Einflussfaktoren auf die Strukturknäuelbildung bestätigt.

Die Feinheit der betrachteten, repräsentativen Garne hat keinen messbaren Einfluss auf die Fadenablage auf dem Dornkörper. Auch die Haarigkeit spielt für die Bewertung der Winkelschritte für die betrachteten Garne keine große Rolle. Diese Unabhängigkeit der Strukturknäuelbildung von den garnseitigen Einflussfaktoren bestätigt eine Stabilität und Reproduzierbarkeit des Strukturknäuelprozesses und bestätigt damit die zweite Arbeitshypothese.

Die Fadenablage auf den Dornkörpergrundformen lässt sich über das gezeigte Modell berechnen. Dies bestätigt die dritte Arbeitshypothese. Für die Berechnung müssen die beschriebenen Voraussetzungen beachtet werden. Die berechneten Ablagepunkte auf den Stirnseiten bzw. auf den Kanten gelten auch für Modifikationen an den Grundformen, wodurch dieser Berechnungsansatz vielfältige Potentiale für den Übertrag auf weitere Formen bietet.

Die vorliegende Arbeit liefert also die Grundlagen dafür, beim Strukturknäuelprozess anwendungsabhängig akzeptable Prozessfenster zu finden, die eine gute Grundlage für einen stabilen Prozess darstellen. Zudem ist ersichtlich, dass die Abhängigkeit der Fadenablage von den Prozessgrößen beherrschbar ist.

Durch die geometrischen Zusammenhänge im Knäuelraum müssen die Dornkörper nur an einer Seite fixiert werden. Es können also vielfältige Dornformen beknäuel werden, so lange diese im Knäuelraum fixiert werden können. So sind auch geschlossene Wicklungen über die Stirnseite möglich. Die Fadenablage kann über die Wahl der geeigneten Strukturknäuelparameter so eingestellt werden, dass auf der Dornkopfseite die Radien der Bereiche ohne abgelegtes Garn sehr klein ausfallen bzw. nicht auftreten.

Eine rasche Abschätzung der Beknäuelbarkeit kann anhand der vorgestellten Ergebnisse erfolgen. Über eine Reduktion auf geometrische Grundformen anhand typischer Geometriemerkmale kann eine Berechnung der Ablagepunkte durchgeführt werden. Hierbei wird genutzt, dass insbesondere bei Dornkörpern, die Kanten zwischen der Stirn- und der Mantelseite aufweisen, an den Kanten eine Fixierung des Garns erfolgt. Eine programmatische Implementierung erfordert so nur einen geringen Rechenaufwand, wenn als relevante Schnittebenen die beiden Stirnseiten genutzt werden. Für eine höher aufgelöste Berechnung der Ablagepunkte bei geschlossenen Dornkörpern erfolgt eine Segmentierung in mehrere Schnittebenen.

Die Kenntnis der Einflussfaktoren auf die Beknäuelbarkeit, welche insbesondere vom Anstellwinkel, der Dornkörperform und der Position des Dornkörpers im Knäuelraum definiert wird, führt also zu einer ressourcenoptimierten, anwendungsangepassten Knäuelstrategie und Fadenablage. Hierbei wird genutzt, dass der Flyer beim Strukturknäuelprozess entlang der konstanten Flyerbahn verläuft. Es sind so keine für verschiedene Dornkörperformen individuellen Flyer- bzw. Ablagebahnen zu berechnen.

Damit können alle drei Arbeitshypothesen bestätigt werden. Die Strukturknäueltechnik ist eine geeignete Technologie zur ressourcenoptimierten Herstellung von dreidimensionalen Strukturbauteilen für technische Anwendungen. Sie ermöglicht eine stabile und reproduzierbare Fadenablage und lässt eine Vielzahl möglicher Dornkörperformen zu.

9 Ausblick

Mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit liegen die grundlegenden knäueltechnischen und garnseitigen Einflussfaktoren auf die Fadenablage beim Strukturknäuelprozess vor. Mit dem entwickelten Berechnungsmodell können Fadenablagepunkte auf dem Dornkörper ermittelt werden. Diese Erkenntnisse bieten eine gute Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten.

Die in der Arbeit betrachteten Garnmaterialien orientieren sich an den bislang eingesetzten, prozesstypischen Materialien. Es handelt sich um Garne mit einem annähernd runden Querschnitt. Für eine Nutzung des Strukturknäuelprozesses für Anwendungen, die bislang durch in der Faserverbundtechnik etablierte Verfahren hergestellt wurden, kann eine Untersuchung der Eignung von Glasfaser- oder Carbonrovings erfolgen. Diese Materialien haben meist einen bändchenförmigen Querschnitt. Das Verhalten solcher Materialien auf die Fadenablage im Strukturknäuelprozess ist zu untersuchen. Ein möglicher Prozess, der durch die Strukturknäueltechnologie ersetzt werden kann, ist das Faserwickeln von thermoplastischen Strukturen, bspw. von Druckbehältern. Hierbei ist zu untersuchen, ob auf einen der beim Faserwickeln typischen zwei Einspannpunkte des Dornkörpers verzichtet werden kann. Ebenfalls kann geprüft werden, ob die Knäuelstrategie auf die Anforderungen hin angepasst und umgesetzt werden kann. Den wirtschaftlichen und entwicklungstechnischen Vorteil, auf computergestützte CAW-Programme (computer aided winding) zu verzichten, gilt es entsprechend zu bewerten.

Das Berechnungsmodell bezieht sich bislang auf rotationssymmetrische, starre Körper. Dieses kann in weiteren Arbeiten auf Freiformkörper erweitert werden. Die Geometrie von Freiformkörpern kann bspw. über ein 3D-Kamerasystem erfasst werden. Die so erzeugte Punktwolke kann in den Berechnungsalgorithmus übertragen werden. Eine Anpassung der Schnittprobleme im Berechnungsmodell ist schließlich vorzunehmen, mit denen die Ablagepunkte auf dem freigeformten Dornkörper berechnet werden können. Die in dieser Arbeit getroffenen Voraussetzungen für die Gültigkeit des Modells müssen angepasst werden. Damit kann die Fadenablage auch für solche Körper berechnet werden, die nicht von einfachen geometrischen Grundformen abgeleitet werden können. So sind zudem formflexible Dornkörper berechenbar, was wiederum die Einsatzmöglichkeiten des Strukturknäuelprozesses für technische Anwendungen stark erweitert.

Die erarbeiteten Grundlagen dieser Arbeit können zudem genutzt werden, um nach einer Vorgabe der Fadenposition auf dem Dornkörper die zugehörigen knäueltechnologischen Parameter zu berechnen. Bei einer maschinenbaulichen Umsetzung kön-

nen so die Anforderungen an die Fadenposition anstatt der knäueltechnologischen Parameter vom Nutzer vorgegeben werden. Anhand der Berechnungsansätze können so bspw. eine Ausgabe bzw. direkte Einstellung des Anstellwinkels, eines Drehzahlverhältnisses abhängig von der zu erzielenden Struktur sowie eine geeignete Positionierung des Dornkörpers im Knäuelraum möglich sein. Diese ergebnisorientierte Entwicklung macht den Strukturknäuelprozess für viele Branchen zugänglich, sofern die Kenntnis der wirkenden Kräfte die Vorgabe der Fadenposition auf dem Dornkörper erlaubt.

Eine detaillierte Betrachtung der Kräfte, die beim Strukturknäueln am Garn wirken, wird weitere Aufschlüsse über die Beknäuelbarkeit von Dornsystemen und über die Eignung von Garnen liefern. Die Impulsstöße an den Ablagepunkten sind hierzu im Dreidimensionalen zu untersuchen. Dies kann über eine entsprechende Auswertung der Fadenspannung erfolgen. Auch können hierfür weitere Dornkörpergeometrien, Garne und Parametersätze gewählt werden, die den zu untersuchenden Effekt verstärken. Die Haftreibungseffekte an den Ablagepunkten unter realen Bedingungen, wie sie bspw. auf einem Dornkörper vorliegen, der für eine technische Anwendung eingesetzt wird, können in diesem Zusammenhang ebenfalls untersucht werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Scheibe, H., Gerig-Leifeld, M., Gölden, P.: Moderne Spultechnologie für Hochleistungsspulmaschinen. Melliand Textilberichte 3/2004, S. 138 ff.
- [2] Koranne, M.: Fundamentals of Yarn Winding. Woodhead Publishing USA. 2013
- [3] Riethmüller, C., Lange, A., Planck, H., Traub, D., Ohmer, M., Plischke, N., Pneumatischer Linearantrieb für Spulen mit verbessertem Ablaufverhalten, Melliand Textilberichte, 9, 623-627 (2006)
- [4] V. Finckh, J. Schmidt, K. Scharpf, C. Riethmüller, A. Dinkelmann, H. Finckh, G. T. Gresser: Garnbasierter Plagiatschutz durch Sequenzfunktionalisierung, Melliand Textilberichte 98 3 (2017) 151-152
- [5] Riethmüller, C.: Textile Lichtrichtgitter durch Strukturspulen. AiF-Forschungsbericht Nr. 17382 N/1 (März 2014)
- [6] Finckh, V., Haigis, K., Riethmüller, C., Gresser, G. T., Götzinger, R., Schabel, S., Heeb, N., Schairer, K., Martin, G.: Entwicklung von rezyklierbaren Leuchten aus Papier-Verbundwerkstoffen. DBU-AZ: 35166, 13.11.2020
- [7] Riethmüller, C., Baesch, B., Planck, H.: Strukturspulen – neues Verfahren zur Herstellung intelligenter Bauteile. Melliand Textilberichte 2/2011, S. 85
- [8] Scharpf, K., Riethmüller C.: Strukturspulen – vielseitige Produktmöglichkeiten mit einer neuen Technologie, Denkendorfer Innovationstag, 25.02.2015, Denkendorf
- [9] Scharpf, K., Riethmüller, C.: Wirtschaftliche Herstellung von Bauteilen durch die Strukturpul- und Strukturknäueltechnik. Technische Textilien 04/2016 Seite 170
- [10] Anonym: Aktuelle Neuheiten auf dem Gebiet der thermischen Behandlung von Hand- und Maschinenstrickgarnen. Wirkerei- und Strickerei-Technik Band 29 (1979) Heft 10, S. 717 ff.
- [11] http://www.jbf-maschinen.de/textilmaschinen_endprodukte.php, abgerufen am 14.06.2017
- [12] Anonym: Eine leistungsstarke Langknäuel-Spulmaschine. Textilbetrieb, März 1972, Seite 82
- [13] Simon, L., Hübner, M.: Vorbereitungstechnik für die Weberei, Wirkerei und Strickerei. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983
- [14] Rohn, G.: Die Garnverarbeitung. Die Fadenverbindungen, ihre Entwicklung und Herstellung für die Erzeugung der textilen Waren. Verlag von Julius Springer, Berlin, 1917

- [15] Karmarsch, K.: Handbuch der mechanischen Technologie. 3. Band, Aufbereitung der Sammelkörper, Abteilung 1: Die Spinnerei. Leipzig 1892, Baumgärtner's Buchhandlung
- [16] <https://jbf-maschinen.de/textilmaschinen/knauelwickelautomaten/knauelwickelautomat-typ-hk/>, abgerufen am 19.05.2021
- [17] JBF Maschinen GmbH: Prospekt zum Knäuel-Wickelautomat KW 765 und KW 765 G, Hohentengen
- [18] Anonym: Fortschrittliche Garnaufbereitungs- und Aufmachungssysteme. Textilbetrieb Band 103 (1985) Heft 3, S. 54 ff.
- [19] Anonym: Ein neuer Knäuelautomat in drei Modellen. Textilbetrieb Band 90 (1972) Heft 12, S. 10
- [20] Anonym: Versatile Range of Ball Winders. Textile Horizons Band 3 (1983) Heft 6, S. 16
- [21] CH Patentschrift 544 716 (Gesuchsnr. 16314/72): Schirmdorn für Knäuel-Wickelautomaten. Inhaber: G+W Maschinen AG, Pfäffikofen (Zürich)
- [22] Anonym: Elektronisch-hydraulisch gesteuerte Knäuelwickelmaschine. Int. Tex. Bull. Spinnerei (1976) Heft 3, S. 319 ff.
- [23] Anonym: Ball winders from W. Germany. Textile Month, März 1985, S. 19
- [24] Anonym: Garnaufmachung – Garnbehandlung auf computergesteuerten Kontinuestraßen bis zur Endaufmachung. Internat. Textil Bulletin Garnherstellung Band 30 (1984) Heft 1, S. 23 ff.
- [25] Anonym: Automatische Knäuelwickel- und Banderoliermaschine. Chemiefasern – Textilindustrie Band 37/89 (1987) Heft 11, S. 1100
- [26] Anonym: New steaming and shrinking technology in a continuous process of hand knitting yarns. Canadian Textile Journal, Band 105 (1988) Heft 2, S. 18 ff.
- [27] Handbuch „Operation Manual 2“, SBW 2, C+L Textilmaschinen GmbH, Mengen, 2004
- [28] Anonym: German machine speeds up packaging of hand-knitting yarns. Wool Record Band 134 (1978) Heft 3406, S. 47 ff.
- [29] Anonym: Knäuelautomaten und Verpackungsmaschinen. Maschinen des Jahres MDJ, Textil Praxis International, Band 32 (1977). S. 1476ff
- [30] Leary, R.H.: Automatisierte Kreuzspulmaschinen für Nähgarne. Textile Asia Band XIV (1983) Heft 11, Seite 43-45

- [31] Anonym: Fortschrittliche Knäuelwickel- und Banderoliermaschine. Textilbetrieb Band 98 (1980) Heft 12, S. 72
- [32] Anonym: Elektronisch-hydraulisch gesteuerte Knäuelwickelmaschine. Int. Text. Bull. Spinnerei (1976) Heft 3, Seite 319 ff.
- [33] Bergmann, J.: Handbuch der Spinnerei. Verlag Julius Springer, Berlin 1927
- [34] Gespräch mit Alexander Buzengeiger, 20.06.2019, Barcelona
- [35] Anonym: Vollautomatischer Knäuelwickelautomat für kleine Garnkörper. Textilbetrieb 102 (1984) Heft 10/11 Seite 37 ff.
- [36] Anonym: Automatic balling machine. Textile Month (1972) S. 66
- [37] Anonym: More versatile yarn processing. A German firm offers a number of machines for economical hand-knitting yarn production. Textile Aisa Band XV, (1984) Heft 11, S. 60 ff.
- [38] Riethmüller, C., Finckh, V., Haigis, K., Gresser, G.T.: Entwicklung leichter, textiler Druckbehälterarmierungen für Bauanwendungen am Beispiel pneumatischer Linienaktoren. Vorhaben-Nr. IGF 18587 N. 2019
- [39] Mierzwa, A., Ebel, C., Drechsler, K.: Auswirkungen lokaler Garnlücken auf die mechanischen Eigenschaften geflochtener Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde. Zeitschrift Kunststofftechnik, 14 (2018) 2
- [40] Metzner, C., Gizik, D., Gessler, A., Weimer, C., Kaufmann, J., Kroll, L.: Studie der Einflussparameter an mir unidirektional geflochtener Carbonfaser verstärkten Kunststoffen. Zeitschrift Kunststofftechnik 12 (2016) 4, Seite 239 ff.
- [41] Sickinger, C., Wilmes, H., Herbeck, L., Herrmann, A., Köhnke, B., Wockatz, R.: Strukturelles Nähen – eine Maßnahme zur Realisierung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen, im Internet abgerufen unter https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKE-wirzbz_pIntAhUO2BoKHQNBC70QFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.dlr.de%2Ffa%2FResourcelmage.aspx%3Fraid%3D22107&usg=AOvVaw0n_3DMzXBUs6NJjxfDHRcG, Stand: 17.11.2020
- [42] <https://www.cnc-lehrgang.de/berechnungen-bei-kreisfoermigen-bewegungen/>, abgerufen am 07.10.2021
- [43] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: Faserverbundbauweisen. Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999. S. 118 ff.
- [44] Scheibe, H., Gerig-Leifeld, M., Gölden, P.: Moderne Spultechnologie für Hochleistungsspulmaschinen. Melliand Textilberichte 3/2004, S. 138 ff.

- [45] Lange, A., Weinsdörfer, H.: Garnbeanspruchung beim Abzug von der Spule. Weberei 21 - Qualität und Flexibilität für Spezialitäten, Denkendorfer Weberei-Kolloquium, 9 * (2000) Seite 1-6
- [46] Fraser, W. B.: The Effect of Yarn Elasticity on an Unwinding Balloon. J. Text. Insti., 1992, 83 No. 4, Textile Institute, S. 603 ff.
- [47] Simon, L.: Fadenabzug von stehenden Spulen bei hohen Geschwindigkeiten. Textiltechnik 27 (1977) 3, S. 147 ff.
- [48] <https://www.leifiphysik.de/mechanik/reibung-und-fortbewegung/grundwissen/luftreibung>, abgerufen am 02.12.2020
- [49] https://ingo-bartling.de/mathe/klasse13/html/ebenen/ebenen_schnitte.html, abgerufen am 03.12.2020