

**Einfluss der Handhabung textiler Halbzeuge auf die
Qualität von Preforms**

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. Martin Adam Rolbiecki

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag

Tag der mündlichen Prüfung: 26.08.2020

Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben für seine wissenschaftliche und methodische Unterstützung während der gesamten Bearbeitungsphase meiner Dissertation.

Außerdem gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Jan-Hendrik Ohlendorf vom Institut für Integrierte Produktentwicklung (BIK) der Universität Bremen, der mich bei der Bearbeitung dieser Arbeit stets durch zielführende Diskussionen und anhaltende Hilfestellung begleitet und unterstützt hat.

Anne Oelze danke ich für die zahlreichen und unermüdlichen Gespräche, Ratschläge und Anmerkungen, die mich auf dem Weg zur fertigen Arbeit immer wieder neue Aspekte und Ansätze entdecken ließen. Auch die vielen nichtwissenschaftlichen und motivierenden Gespräche haben meine Arbeit unterstützt.

Allen Mitarbeitern des BIK und des BIBA an der Universität Bremen sowie allen Beteiligten meiner Studien bin ich sehr dankbar für die gute und zahlreiche Unterstützung sowie für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Besonders möchte ich an dieser Stelle auch meiner Familie – Mona, Hanna, Zdzislaw und Bartosch Rolbiecki – für die unermüdliche Stärkung und Motivierung danken sowie für das stets offene Ohr für meine Gedanken.

Zusammenfassung

Textile Halbzeuge erfahren in der gesamten Prozesskette des Preformings, beginnend mit der Textilherstellung, über den Transport, bis zur eigentlichen Preform-Herstellung, zahlreiche Handhabungsprozesse. Durch die biegeeweiche Charakteristik textiler Halbzeuge führen die vielseitigen Belastungen in Handhabungsprozessen zu unausweichlichen Handhabungseffekten. Diese Effekte können zu Imperfektionen im Preform und somit zu Defekten im Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) führen.

Die Entwicklung von Automatisierungslösungen für Handhabungsprozesse bei der Herstellung von Preforms aus textilen Halbzeugen führt zu zahlreichen technischen Herausforderungen. Neben dem schwer vorhersehbaren Materialverhalten steht die Frage nach der zulässigen Belastung des zu handhabenden Textils im Vordergrund. Um die Spezifikationen für automatisierte Handhabungssysteme definieren zu können, müssen die zulässigen Belastungen für textile Halbzeuge bekannt sein. Erst dann können sinnvolle technische Lösungen erarbeitet werden. Deshalb ist eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Produktentstehungsprozesses notwendig, um die besonderen Handhabungseigenschaften textiler Halbzeuge zu berücksichtigen.

Im Entstehungsprozess von Produkten aus FKV sind die Halbzeug-Produktion, das Produktdesign sowie die Produktion der FKV stark voneinander abgegrenzt. Die Methodik der integrierten Produktentwicklung bietet hierbei einen interessanten Ansatz, um die gängigen Grenzen zwischen den relevanten Teilnehmern des Produktentstehungsprozesses aufzubrechen. Auf diesem Gedankenmodell setzt diese Arbeit auf und versucht, den Weg des Preforms über die gesamte Prozesskette seiner Entstehung zu verfolgen.

Die an diese Dissertation gestellte Zielstellung beinhaltet die Beurteilung des Einflusses von Handhabungsprozessen auf die Qualität des Preforms. Da die betrachteten Handhabungsprozesse über die gesamte Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV stattfinden, wurden diese ausführlich abgebildet. Diese Prozesskette umfasst vereinfacht die Produktion der textilen Halbzeuge, die Logistik, den Preform-Aufbau und schließlich die Verdichtung des Preforms. Ausgehend von dieser Betrachtungsweise der Problemstellung wurden die folgenden zentralen Fragestellungen formuliert:

1. Welche Spuren (Handhabungseffekte) hinterlassen Handhabungsprozesse in textilen Halbzeugen über die gesamte Preforming-Prozesskette?
2. Führen die durch Handhabungseffekte entstandenen Imperfektionen zu Defekten in Preforms?

Um den Einfluss von handhabungsbedingten Effekten auf die Qualität von Preforms zu ermitteln, wurde ein Modell erarbeitet, das die Zusammenhänge zwischen Ereignissen und Imperfektionen aufzeigt. Hierzu wird der Ansatz der Festigkeitslehre gewählt, bei dem ein Zusammenhang zwischen von außen auf einen Körper einwirkenden Belastungen und den daraus resultierenden inneren mechanischen Beanspruchungen betrachtet wird. Es wurde angenommen, dass textile Halbzeuge in der gesamten Prozesskette zur Herstellung von FKV handhabungsbedingten Belastungen ausgesetzt sind. Diese Belastungen führen zu qualitätsbeeinflussenden Imperfektionen in textilen Preforms.

Das unter dieser Annahme erarbeitete Modell zur Erklärung der Entstehung von Defekten in Preforms wurde anschließend auf eine reale Prozesskette übertragen. Dabei wurden die Systemgrenzen so gewählt, dass alle relevanten Teilprozesse von der Textilproduktion bis hin zur Infusion einbezogen wurden. Die Prozesskette zur Fertigung von Preforms wurde erfasst und unter der Berücksichtigung von Kriterien zur Bewertung von Handhabungseffekten analysiert. Hierbei wurden zunächst der Herstellungs- und der Logistikprozess von Textilien bei einem Textilproduzenten untersucht. Der Fokus lag auf Handhabungsprozessen, auf der innerbetrieblichen Logistik, auf der Lagerung sowie auf der Verpackung und auf der Kommissionierung. Anschließend wurden die Auswirkungen des Transportprozesses zu einem Rotorblatthersteller betrachtet und die Warenannahme, die Qualitätsprüfung, die Vorkonfektionierung sowie der Preformaufbau wurden untersucht. Die einzelnen Prozessschritte der verschiedenen Prozessteilnehmer wurden als eine zusammenhängende Prozesskette verstanden, in der die üblichen Systemgrenzen aufgebrochen wurden. Die beobachteten Effekte wurden in ‚Auslenkung aus der Textilebene‘ sowie ‚äußere Formabweichung‘ klassifiziert. Am häufigsten beobachtet wurden Handhabungseffekte, die sich in Form von Beulen und Falten in den textilen Halbzeugen vorfinden. Deshalb wurde diese Kategorie der Handhabungseffekte bei der experimentellen Untersuchung näher betrachtet. Hierzu wurden eine Versuchsmethodik sowie eine geeignete Versuchsvorrichtung entwickelt, mit deren Hilfe parametrierbare und reproduzierbare Imperfektionen in textile Halbzeuge eingebracht werden können. Durch optische Messverfahren konnten die geometrischen Eigenschaften der Imperfektionen in den textilen Halbzeugen sichtbar gemacht werden. Anhand der Erfassung des Fließfrontverlaufs wurde ein Zusammenhang zwischen Handhabungseffekten und der Qualität von Preforms (ausgedrückt durch die Permeabilität) aufgestellt.

Die Annahme, dass Imperfektionen im textilen Aufbau des Preforms einen Einfluss auf die Permeabilität der textilen Struktur haben, konnte durch die experimentelle Untersuchung grundsätzlich bestätigt werden. Faserfehlorientierungen haben einen nahezu linearen Einfluss auf die Durchtränkungseigenschaften. Eine in die Textilstruktur eingebrachte Beule wird

durch die Evakuierung der Vakuumfolie nahezu kompensiert. Ab einer bestimmten Beulengröße jedoch bildet sich nach der Evakuierung unter der Vakuumfolie eine Falte. Je nach Handhabungsbelastung und abhängig vom untersuchten Material entsteht eine Vielzahl an unterschiedlichen Faltenmustern.

Die Form der Falte hat zahlreiche sich überlagernde Defektformen im Inneren der Textilstruktur zur Folge. Über die resultierende Höhe der Falte lässt sich dennoch ein Zusammenhang zwischen dem Handhabungseffekt und der Permeabilität aufzeigen. Im untersuchten UD-Material führen die Imperfektionen zu einer Verringerung der Permeabilität. Im BIAx-Material führen die Imperfektionen zu einer Erhöhung der Permeabilität. Durch die Falten entstehen zusätzliche Kanäle im Textil, so dass das Medium den Weg des leichtesten Widerstands geht und somit um die Fehlstelle fließt. Beim untersuchten TRIAX-Material ist kein derart signifikanter Zusammenhang zur Veränderung der Permeabilität zu erkennen. Dieses Material scheint unempfindlich für lokale Veränderungen in der Faserstruktur zu sein.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen auf, dass es einen starken Zusammenhang zwischen Handhabungsbelastungen und der Qualität von Preforms gibt. Das Thema Handhabungsbelastungen und die daraus folgenden Einflüsse auf die Textilstruktur betreffen alle Bereiche der Produktentwicklung, vom Design über die Prozessentwicklung bis hin zur Halbzeugherstellung. Das Wissen über die zulässige Handhabungsbeanspruchung textiler Halbzeuge im Entstehungsprozess zum Preform könnte Vorteile für die Optimierung des Produktentstehungsprozesses liefern.

Definierte Standards könnten bezogen auf zulässige Handhabungsbelastungen einen positiven Einfluss auf die Herstellungskosten bewirken. Hierdurch könnte bereits in einem sehr frühen Stadium der Prozessentwicklung auf Wissen zurückgegriffen werden, um beispielsweise die Auswahl von geeigneten Greifsystemen zu optimieren. Auf der anderen Seite würde das Wissen über die Prozessbelastungen auf die Auswahl eines geeigneten Materials im Produktdesign Einfluss nehmen.

Der Ansatz der integrierten Produktentwicklung für FKV im Preforming-Verfahren berücksichtigt ebenfalls die Ebene der Halbzeug-Produktion. Neben der Reduktion von Handhabungseffekten durch eine angemessene Gestaltung von Produktions- und Logistikprozessen ist eine stärkere Berücksichtigung von Materialeigenschaften im Produktentwicklungsprozess wünschenswert.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Handhabung textiler Halbzeuge bei der Herstellung von FKV aus Preforms	6
2.1 Begriffsdefinition Preforming	8
2.2 Materialverhalten bei der Handhabung	11
2.3 Ungewissheit über die zulässige Beanspruchung von Textilien.....	13
2.4 Herausforderungen für die Automatisierung der Handhabung von Textilien	16
3 Stand der Forschung	18
3.1 Ansätze zur Systematisierung der Handhabung beim Preforming	18
3.2 Ansätze zur Bewertung des Einflusses des Preforms auf die Qualität des FKV	20
3.3 Ansätze zur Bewertung von Handhabungseinflüssen in Preforms	24
3.4 Forschungsbedarf	26
4 Erklärungsmodell für die Entstehung von Defekten in Preforms	28
4.1 Handhabung als Ursache für Defekte in Preforms	28
4.2 Textile Halbzeuge als Handhabungsgegenstand	30
4.3 Ereignisse und Belastungen in der Preforming-Prozesskette	33

4.4	Effekte in der Preform-Struktur durch Handhabungsbelastungen.....	38
4.4.1	Auslenkung aus der Textilebene.....	39
4.4.2	Äußere Formabweichungen.....	42
4.5	Imperfektionen im Preform.....	44
4.5.1	Faserfehlorientierung.....	46
4.5.2	Faserbeschädigung.....	49
5	Analyse von handhabungsbedingten Ereignissen in der Prozesskette....	51
5.1	Motivation und Bezug zum Erklärungsmodell.....	51
5.2	Prozesskette zur Fertigung von Preforms für FKV	51
5.2.1	Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Textilproduktion	55
5.2.2	Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Logistik	58
5.2.3	Handhabungsbedingte Ereignisse im Preformaufbau	60
5.2.4	Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Verdichtung	63
5.3	Auswertung der Prozessanalyse.....	65
6	Untersuchung von Handhabungseffekten	67
6.1	Motivation.....	67
6.2	Versuchsplanung.....	67
6.2.1	Methoden und Material.....	67
6.2.2	Versuchsvorrichtung zur Erzeugung künstlicher Imperfektionen in textilen Halbzeugen	74
6.2.3	Versuchsablauf.....	79
6.3	Einfluss von Handhabungseffekten auf die Formeigenschaften von Preforms	80
6.3.1	Effekte bei der Transformation von „Beule“ zur „Falte“	81
6.3.2	Quantitative Bewertung der Transformation von Beule zu Falte	84
6.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	92
6.4	Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität von Preforms	93
6.4.1	Einfluss der Faserfehlorientierung auf die Permeabilität von Preforms	94
6.4.2	Einfluss von Falten auf die Permeabilität in UD-Materialien.....	98

6.4.3	Einfluss von Falten auf die Permeabilität in BIAX-Materialien.....	100
6.4.4	Einfluss von Falten auf die Permeabilität in TRIAX-Materialien.....	102
6.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	104
7	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Referenzen.....	112
	Anhang	119
	Studentische Arbeiten.....	139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Preform-Arten angelehnt an Flemming (vgl. [FlZR96]).....	11
Tabelle 3-1: Physikalische Eigenschaften und Prüfverfahren von Multiaxialgelegen nach EN 13473-1 (vgl. [En1300]).....	25
Tabelle 4-1: Auflistung der wesentlichen Belastungen auf textile Halbzeuge bei der Handhabung	34
Tabelle 5-1: Bewertungskriterien für die Erfassung von Handhabungseffekten bei der Durchführung der Prozessanalyse	53
Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Prozessschritte sowie der beobachteten Effekte in der Prozesskette zur Fertigung von Preforms.....	66
Tabelle 6-1: Versuchsmaterial	73
Tabelle A-1: Versuchsergebnisse Topografie, UD-Material	119
Tabelle A-2: Versuchsergebnisse Topografie, BIAX-Material	120
Tabelle A-3: Versuchsergebnisse Topografie, TRIAX-Material.....	121
Tabelle A-4: Versuchsergebnisse Druckdifferenz, UD-Material	122
Tabelle A-5: Versuchsergebnisse Druckdifferenz, BIAX-Material	123
Tabelle A-6: Versuchsergebnisse Druckdifferenz, TRIAX-Material.....	124
Tabelle A-7: Versuchsergebnisse Permeabilität, UD-Material	125
Tabelle A-8: Versuchsergebnisse Permeabilität, BIAX-Material	126
Tabelle A-9: Versuchsergebnisse Permeabilität, TRIAX-Material	127
Tabelle A-10: Durchflusszeiten für verschiedene Faserwinkel	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Handhabungseffekte beim Aufbau von Preforms aus trockenen textilen Halbzeugbahnen	2
Abbildung 1-2: Ansatz der integrierten Produktentwicklung für FKV im Preforming-Verfahren	3
Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2-1: Entstehungsort von Handhabungseffekten in der Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV angelehnt an Schürmann (vgl. [Schü07]).....	6
Abbildung 2-2: Prozesskette zur Herstellung von FKV im Harzinjektionsverfahren, angelehnt an Neitzel (vgl. [Neit04])	9
Abbildung 2-3: Aufbau der Faserstruktur durch sequenziellen Preformaufbau angelehnt an Neitzel (vgl. [Neit04])	10
Abbildung 2-4: Vier Sequenzen bei der Ablage einer UD-Bahn in ein gekrümmtes Formwerkzeug	12
Abbildung 2-5: Folgen von Druckstellen in der Textilrolle in einem orientierenden Versuch. Definierter Eindruck in der Textilrolle mittels Zug-/Druck-Prüfmaschine a), Ausgerollte Textilbahn mit Eindrücken b).....	14
Abbildung 2-6: Beispiel für eine typische Lagerung von Textilrollen auf einer Palette	15
Abbildung 2-7: Automatisierung der Herstellung von Gurten für Rotorblätter (vgl. [RoOT14])	17
Abbildung 3-1: Abnehmende Druckfestigkeit mit zunehmender Faserfehlorientierung nach Schürmann ([Schü07], S. 356)..	22
Abbildung 4-1: Zusammenhang zwischen prozessbedingter Handhabung und möglichen Defekten in Preforms	28
Abbildung 4-2: Erklärungsmodell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Handhabungen und Defekten in Preforms	29

Abbildung 4-3: Einordnung der Betrachtung der textilen Halbzeuge als Handhabungsgegenstand im Kontext des Erklärungsmodells.....	30
Abbildung 4-4: Einordnung der Betrachtung der Ereignisse und Belastungen im Kontext des Erklärungsmodells	33
Abbildung 4-5: Schematische Darstellung einer Textilbahn beim Umwickeln von der Halbzeugrolle auf einen Wickelkern....	35
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung von Greifspuren im textilen Halbzeug beim Heben einer Textilbahn durch Greifer	36
Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Lagerung von Halbzeugrollen auf einer Palette	36
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Verformung einer Textilbahn bei der Ablage in ein gekrümmtes Formwerkzeug	37
Abbildung 4-9: Einordnung der Betrachtung der Effekte im Kontext des Erklärungsmodells.....	38
Abbildung 4-10: Beispiele für Beulen im textilen Halbzeug.....	39
Abbildung 4-11: Klassifizierung von Falten nach der Form und dem Öffnungswinkel nach Burg ([Burg01]).....	40
Abbildung 4-12: Beispiele für Falten im textilen Halbzeug	41
Abbildung 4-13: Druckstelle a) längs der Fasern und b) quer zu den Fasern	42
Abbildung 4-14: Unsaubere Schnittkante	42
Abbildung 4-15: Auswirkung der Schnittkante auf die Fasern. a) Schnittkante senkrecht zu den Fasern b) Schnittkante parallel zu den Fasern.....	43
Abbildung 4-16: Ausfransen der Faserkante.....	43
Abbildung 4-17: Herausgezogener Roving.....	44
Abbildung 4-18: Einordnung der Betrachtung der Imperfektionen im Kontext des Erklärungsmodells	44

Abbildung 4-19: Soll- und Ist-Faserorientierung in FKV nach Moser (vgl. [Mose92]).....	46
Abbildung 4-20: Roving-/Faserwelligkeit beim Lagenaufbau eines Preforms	47
Abbildung 4-21: Fehlerhafter Zuschnitt.....	48
Abbildung 4-22: Verunreinigungen im textilen Aufbau eines Preforms, a) Heftnadel zum Fixieren des Preforms, b) Schnittreste (Rovingverschnitt).....	50
Abbildung 5-1: Systemgrenze für die Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV.....	52
Abbildung 5-2: Zustandsänderung des Handhabungsgegenstands in der Prozesskette (Textile Bahn, Textilrolle, Textilrollen- Ladungsträger, Zuschnitt, Preform)	53
Abbildung 5-3 Gesamtübersicht der Preforming-Prozesskette (Ergebnis der Prozessanalyse)	54
Abbildung 5-4: Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Textilproduktion .	55
Abbildung 5-5: Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Logistik	58
Abbildung 5-6: Handhabungsbedingte Ereignisse im Preformaufbau	60
Abbildung 5-7: Handhabungseffekte bei der automatisierten Handhabung textiler Halbzeuge beim Preforming	62
Abbildung 5-8: Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Verdichtung.....	63
Abbildung 5-9: Beispiel für den Harzflussverlauf in einem verdichteten Preform.....	64
Abbildung 6-1: Methodische Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung	68
Abbildung 6-2: a) Prinzipskizze des Lichtschnittverfahrens angelehnt an Bauer (vgl. [Baue03]), b) Versuchsanordnung	69
Abbildung 6-3: Beispiel der Topografie der Beule einer umgeformten UD- Textilprobe mit einer Eindringtiefe von 25 mm.....	70

Abbildung 6-4: a) Anordnung von Anguss und Entlüftung in der Textilprobe, b) Messbereich (50 mm) für die Auswertung der Permeabilität	71
Abbildung 6-5: Ableitung des realen Fließfrontverlaufs durch numerische Berechnung.....	73
Abbildung 6-6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.....	74
Abbildung 6-7: Versuchsvorrichtung mit Stempelvorrichtung und den eingesetzten Messgeräten.....	75
Abbildung 6-8: a) Schematische Darstellung des Vakuumaufbaus für die Durchführung der Versuche, b, c) Umsetzung bei der Versuchsdurchführung	76
Abbildung 6-9: Zuschnitt der Textilproben aus einer Textilrolle.....	77
Abbildung 6-10: Versuchspläne Versuchsreihe 1 (,Faserausrichtung‘) und Versuchsreihe 2 (,Beule‘)	79
Abbildung 6-11: Versuchsablauf	80
Abbildung 6-12: Unterschiedliche Zustände der Textilproben im Versuchsablauf.....	82
Abbildung 6-13: Beispielhafte Darstellung einer Falte (b1, 2), die sich aus einer zuvor eingebrachten Beule (a1, 2) durch das Vakuumziehen gebildet hat.....	83
Abbildung 6-14: Gap-Bildung vor und nach der Evakuierung der verformten Textilprobe	84
Abbildung 6-15: Entwicklung der Falten in Abhängigkeit der Eindringtiefe des Stempels (Handhabungseffekt) für die UD-Textilproben (Eindringtiefen von 10 mm bis 45 mm)	85
Abbildung 6-16: Darstellung der Faltenbildung bei steigender Handhabungsbelastung (UD-Textilproben) für die Stempel-Eindringtiefen von 10 mm bis 45 mm	87
Abbildung 6-17: Entwicklung der Falten in Abhängigkeit der Stempel-Eindringtiefe für BIAX-Textilproben (Eindringtiefen von 10 mm bis 35 mm)	88

Abbildung 6-18: Darstellung der Faltenbildung bei steigender Handhabungsbelastung (BIAX-Textilproben) für die Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm	89
Abbildung 6-19: Entwicklung der Falten in Abhängigkeit der Stempel-Eindrucktiefe (TRIAX-Textilproben) für Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm.....	90
Abbildung 6-20: Darstellung der Faltenbildung bei steigender Handhabungsbelastung (TRIAX-Textilproben) für die Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm	91
Abbildung 6-21: Transformation einer Beule zu einer Falte durch das Vakuumziehen bei unterschiedlichen Beulentiefen und unterschiedlichen Materialien (UD, BIAX, TRIAX)	92
Abbildung 6-22: Durchträngung einer evakuierten Textilprobe (UD, Eindrucktiefe 30 mm) in drei Sequenzen (Original Bild a1 bis a3, binarisierte Darstellung b1 bis b3).....	94
Abbildung 6-23: Ansicht unterschiedlicher Textilproben ($a = 0^\circ$, $b = 45^\circ$, $c = 75^\circ$ und $d = 90^\circ$) während der Infusion.....	95
Abbildung 6-24: Durchträngungsverhalten von UD bei unterschiedlicher verschiedener Faserorientierung	96
Abbildung 6-25: Permeabilitäten bei verschiedener Faserorientierung.....	97
Abbildung 6-26: Fließfrontverlauf der unbeschädigten UD-Textilprobe.....	98
Abbildung 6-27: Fließfrontverlauf der UD-Textilprobe bei einer Eindrucktiefe von 30 mm.....	99
Abbildung 6-28: Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität der UD-Textilproben	100
Abbildung 6-29: Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität der BIAX-Textilproben	101
Abbildung 6-30: Beispiel des Fließfrontverlaufs im BIAX-Textil bei einer Stempel-Eindrucktiefe von 35 mm	102
Abbildung 6-31: Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität der TRIAX-Textilproben.....	103

Abbildung 6-32: Fließfrontverlauf im TRIAX-Textil bei einer Eindrucktiefe von 25 mm.....	104
Abbildung 6-33: Permeabilität bei unterschiedlichen Stempel-Eindrucktiefen und unterschiedlichen Materialien (UD, BIAx, TRIAX).....	105
Abbildung 7-1: Einordnung der Erkenntnisse aus dieser Arbeit in den Ansatz der integrierten Produktentwicklung für FKV im Prefforming-Verfahren	110
Abbildung A-1: Maximale Höhen der Beulen für die verschiedenen Gelegearten bei unterschiedlichen Handhabungsbelastungen.....	129
Abbildung A-2: Exemplarische Darstellung einer umgeformten Textilprobe vor und nach der Evakuierung (Material: UD-Textil; Eindrucktiefe: 20 mm)	130
Abbildung A-3: Exemplarische Darstellung einer umgeformten Textilprobe vor und nach der Evakuierung (Material: BIAx-Textil; Eindrucktiefe: 10 mm)	131
Abbildung A-4: Exemplarische Darstellung einer umgeformten Textilprobe vor und nach der Evakuierung (Material: TRIAX-Textil; Eindrucktiefe: 10 mm)	132
Abbildung A-5: Gerade Falte in x-Richtung.....	133
Abbildung A-6: Sichelförmige Falte.....	133
Abbildung A-7: L-förmige Falte	134
Abbildung A-8: Falte in Form eines T-Trägers	134
Abbildung A-9: Zwei sichelförmige Falten – fast kreisförmig	134
Abbildung A- 10: Annähernd kreisförmig.....	135
Abbildung A-11: Kreisförmige Falte	135
Abbildung A-12: Beule, Falte und Fließfrontverlauf von UD bei einer Eindrucktiefe von 30 mm.....	136

Abbildung A-13: Beule, Falte und Fließfrontverlauf von BIAX bei einer
Eindrucktiefe von 35 mm..... 137

Abbildung A-14: Beule, Falte und Fließfrontverlauf von TRIAX bei einer
Eindrucktiefe von 25 mm..... 138

Abkürzungsverzeichnis

BIAX	Biaxiales Textil
BIK	Institut für integrierte Produktentwicklung, Universität Bremen
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
m	Masse
MAG	Multiaxialgelege
Preform	Textiler Vorformling
Preforming	Verfahren zur Herstellung eines Preforms
Prepreg	Pre-impregnated composite fibres (Vorimprägnierte Fasern)
RTM	Resin Transfer Moulding
t	Zeit
TRIAX	Triaxiales Textil
UD	Unidirektionales Textil
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding
WEA	Windenergieanlage

1 Einleitung

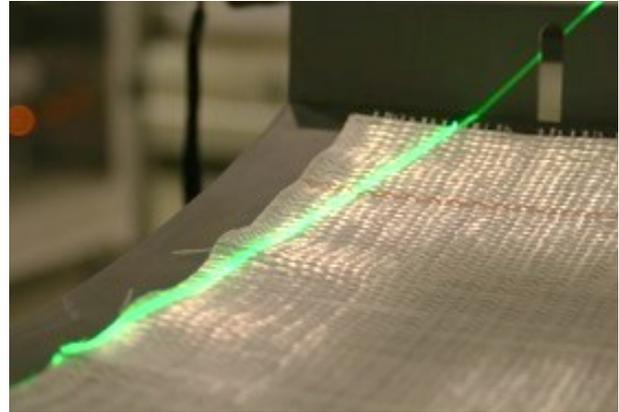
1.1 Motivation

Textile Halbzeuge erfahren in der gesamten Prozesskette des Preformings, beginnend mit der Textilherstellung, über den Transport, bis zum textilen Lagenaufbau, zahlreiche Handhabungsprozesse. Durch die biegeweiche Charakteristik textiler Halbzeuge führen die vielseitigen Belastungen in Handhabungsprozessen zu unausweichlichen Handhabungseffekten. Diese Effekte können zu Imperfektionen im Preform und somit zu Defekten im Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) führen. In Abbildung 1-1 sind beispielhaft Handhabungseffekte in textilen Halbzeugen während des Lagenaufbaus dargestellt. Die Entwicklung von Automatisierungslösungen für Handhabungsprozesse bei der Herstellung von Preforms aus textilen Halbzeugen führt zu zahlreichen technischen Herausforderungen. Neben dem schwer vorhersehbaren Materialverhalten steht die Frage nach der zulässigen Belastung des zu handhabenden Textils im Vordergrund. Für die Definition von Spezifikationen für automatisierte Handhabungssysteme müssen die zulässigen Belastungen für textile Halbzeuge bekannt sein. Erst dann können sinnvolle technische Lösungen erarbeitet werden. Dies ist ein Grund dafür, dass sich Automatisierungslösungen für die Handhabung textiler Halbzeuge in vielen Branchen noch nicht durchgesetzt haben, obwohl es hierfür zahlreiche technische Ansätze gibt. Durch zu hohe Anforderungen, die sich überwiegend am Flugzeugbau anlehnen, können beispielsweise im Rotorblattbau die Kostenziele für eine Automatisierung noch nicht erreicht werden. Wie stark textile Halbzeuge durch Handhabungsprozesse beansprucht werden dürfen, ohne dass Qualitätsmängel im späteren FKV hervorgerufen werden, stellt eine der wesentlichen Fragestellungen bei der Entwicklung von Automatisierungslösungen dar. Für die Entwicklungsphase von Automatisierungsansätzen ist die Kenntnis über zulässige Handhabungsbeanspruchungen von zentraler Bedeutung.

Insbesondere in der Windindustrie, in der überwiegend trockene Textilien verarbeitet werden, besteht die Notwendigkeit für kostengünstige Automatisierungsansätze. Derartige Ansätze sind geprägt durch einfache Steuerungssysteme und setzen, anders als aktuell für die manuelle Produktion spezifiziert, möglichst gleichbleibende Eingangsparameter der zu verarbeitenden Halbzeuge voraus. Ein Ausgleich von beispielsweise fehlerhaft gewickelten Textilrollen oder das nachträgliche Korrigieren von Lagerungsschäden (platt gedrückte Textilrollen oder Beulen etc.) kann nicht die Aufgabe dieser Automatisierung sein. Die für die Kompensation von Fehlern im Eingangsmaterial notwendige Sensorik und Aktorik sowie die Steuerungstechnik sind nur unter hohem technischen Aufwand realisierbar. Die für die industrielle Produktion erforderliche Prozesssicherheit kann aufgrund einer Vielzahl von schwer abschätzbaren Fehler-Szenarien kaum gewährleistet werden. Auch bei einer wirtschaftlichen Betrachtung

1 Einleitung

wäre ein derartig komplexes System in den seltensten Fällen sinnvoll einsetzbar. Grundsätzlich würde eine Reduzierung von zulässigen Anforderungen bei der Handhabung textiler Halbzeuge zu einfacheren und somit günstigeren Automatisierungslösungen führen.



a) Greifspuren bei der automatisierten Ablage von Textilbahnen in ein Formwerkzeug.

b) Beulenbildung beim Drapieren von Textilbahnen in ein gekrümmtes Formwerkzeug.

Abbildung 1-1: Handhabungseffekte beim Aufbau von Preforms aus trockenen textilen Halbzeugbahnen

Es müssen deshalb neue Wege bei der Konzipierung von Automatisierungsansätzen gegangen werden. Hierzu zählt eine enge Zusammenarbeit mit den Herstellern textiler Halbzeuge, die in den Entwicklungsprozess der Automatisierungstechnik eng eingebunden werden müssen. Das Ziel sollten stabile Eingangsparameter der zu verarbeitenden Halbzeuge sein, um so die Anzahl und die Komplexität der Handhabungsschritte bei der eigentlichen Preform-Produktion zu reduzieren. Je weniger das sehr empfindliche Halbzeug handhabungsbedingten Belastungen ausgesetzt ist, desto geringer ist der Einfluss auf die Qualität des FKV. Hierzu ist die Betrachtung der gesamten Prozesskette im Hinblick auf den Lebenszyklus textiler Halbzeuge von entscheidender Bedeutung. In Abbildung 1-2 ist ein Ansatz der integrierten Produktentwicklung skizziert, der die wesentlichen Bereiche der Prozessentwicklung, der Halbzeugherstellung sowie dem Produktdesign für das Preforming Verfahren berücksichtigt.

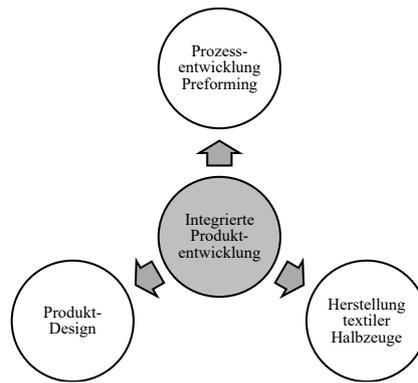


Abbildung 1-2: Ansatz der integrierten Produktentwicklung für FKV im Preforming-Verfahren

Die besonderen Handhabungseigenschaften von textilen Halbzeugen müssen im Herstellungsprozess der Textilien, im Produktdesign des FKV und in der Preforming-Prozessentwicklung berücksichtigt werden. Aktuell werden diese drei Teilbereiche aus Sicht der Handhabung gesondert betrachtet und haben sehr klar herausgebildete Systemgrenzen. Insbesondere die ungewissen zulässigen Handhabungsbelastungen stellen ein Problem bei der Prozessentwicklung automatisierter Preforming-Systeme dar.

An dieser Stelle setzt diese Arbeit an. Es wird angenommen, dass das Wissen über die auftretenden Handhabungseffekte in der gesamten Prozesskette Erkenntnisse über zulässige Handhabungsbelastungen im Preforming-Prozess liefern kann. Die Analyse der gesamten Preforming-Prozesskette unter der besonderen Beobachtung von Handhabungsprozessen soll qualitätsbezogene Einflussfaktoren identifizieren. Durch die Bewertung der Folgen von Handhabungseffekten in Preforms kann diese Arbeit einen Beitrag für die Definition von zulässigen Handhabungsbelastungen im Preforming-Prozess liefern.

1.2 Zielstellung

Das Ziel dieser Dissertation ist die Beurteilung der Einflüsse von Handhabungsprozessen auf die Qualität des Preforms. In diesem Kontext soll die allgemein formulierte Aussage, dass Handhabungseffekte Imperfektionen in textilen Halbzeugen hervorrufen und somit einen negativen Einfluss auf die Qualität des Preforms und des späteren FKV haben, differenziert betrachtet werden (vgl. [Schü07]). Die betrachteten Handhabungsprozesse finden über die gesamte Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV statt. Diese Prozesskette umfasst die Produktion der textilen Halbzeuge, die Lagerung und innerbetriebliche Logistik, den Transport, die Warenannahme, die Bereitstellung sowie den Preform-Aufbau und schließlich die Evakuierung des Formwerkzeugs, die Verdichtung des

Preforms sowie die Vakuuminfusion mit Kunststoffharz. Die betrachteten Handhabungsprozesse haben einen Einfluss auf den Zustand und die Eigenschaften der textilen Halbzeuge und können zu Qualitätsabweichungen im Preform und im Endprodukt, dem FKV, führen. Die hier gewählte Systemgrenze umfasst die Herstellung der textilen Halbzeuge beim Textilproduzenten, die Logistik zum FKV-Produzenten und schließlich den Preforming-Prozess mit dem Preform als Endprodukt. Der eigentliche FKV ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ausgehend von dieser Betrachtungsweise der Problemstellung werden die folgenden zentralen Fragestellungen formuliert:

1. Welche Spuren (Handhabungseffekte) hinterlassen Handhabungsprozesse in textilen Halbzeugen über die gesamte Preforming-Prozesskette?
2. Führen die durch Handhabungseffekte entstandenen Imperfektionen zu Defekten in Preforms?

1.3 Aufbau der Arbeit

Um den Einfluss von handhabungsbedingten Effekten auf die Qualität von Preforms zu ermitteln, wird zunächst ein Modell erarbeitet, auf dessen Grundlage der Zusammenhang zwischen Ereignissen in der Prozesskette und den daraus folgenden Imperfektionen definiert wird. Hierzu wird der Ansatz der Festigkeitslehre gewählt, bei dem ein Zusammenhang zwischen von außen auf einen Körper einwirkenden Belastungen und den daraus resultierenden inneren mechanischen Beanspruchungen betrachtet wird (vgl. [IsRH13]). Es wird angenommen, dass textile Halbzeuge in der gesamten Prozesskette zur Herstellung von FKV handhabungsbedingten Belastungen ausgesetzt sind. Diese Belastungen führen zu qualitätsbeeinflussenden Imperfektionen der textilen Faserstruktur im Preform. In Abbildung 1-3 ist der Aufbau der Arbeit dargestellt.

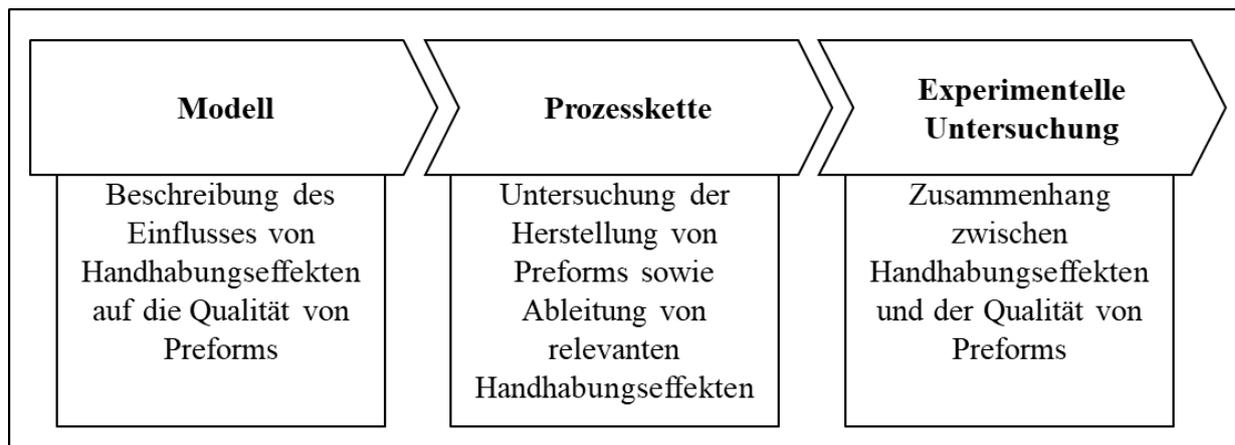


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit

Das unter dieser Annahme erarbeitete Modell zur Bewertung des Einflusses von Handhabungseffekten auf die Preformqualität soll anschließend auf eine reale

Prozesskette zur Fertigung von Preforms übertragen werden. Dabei sollen die Systemgrenzen so gewählt werden, dass alle relevanten Teilprozesse von der Textilproduktion bis hin zur Infusion einbezogen werden.

Durch die Prozessanalyse sollen der Entstehungsort und die Ausprägung von Handhabungseffekten in der Prozesskette zur Herstellung von Preforms dargestellt werden. Die methodische Grundlage bildet im Wesentlichen der Ansatz der Prozessanalyse nach Becker mit der Definition der Aufgabenstellung, der Eingrenzung des zu betrachteten Prozesses sowie der Ermittlung der relevanten Prozessmerkmale (vgl. [Beck05]). Die in dieser Arbeit durchzuführende Prozessanalyse soll den Weg des textilen Halbzeugs von der Textilproduktion bis hin zur FKV-Herstellung über räumlich getrennte Prozessteilnehmer verfolgen und zu einer zusammenhängenden Prozesskette zusammenfügen. Textile Halbzeuge werden durch zahlreiche Handhabungsprozesse beansprucht, die sichtbare und nicht sichtbare Handhabungseffekte hinterlassen. Das Ziel hierbei ist die Ermittlung qualitätsbeeinflussender Handhabungseffekte auf das textile Halbzeug, die einen möglichen Einfluss auf den späteren FKV ausüben. Auf dieser Grundlage soll ein transparentes Bild über mögliche Handhabungseffekte und deren Entstehungsort geschaffen werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Prozessanalyse sollen repräsentative Handhabungseffekte in einer experimentellen Analyse näher betrachtet werden. Durch eine Untersuchung quantitativer Parameter soll geprüft werden, ob es einen Zusammenhang zwischen Handhabungseffekten und der Qualität von Preforms gibt und wie stark dieser Effekt ausgeprägt ist. Hierzu sollen die beobachteten Effekte künstlich in Textilproben eingebracht und experimentell untersucht werden. Ein geeignetes Verfahren zur Untersuchung der Preformqualität stellt die Untersuchung der Permeabilität der textilen Struktur des Preforms dar. Imperfektionen in der textilen Struktur des Preforms wirken sich auf die Durchflusseigenschaften eines flüssigen Mediums aus (vgl. [Neit04]). Durch die Untersuchung der Permeabilität an Textilproben mithilfe künstlich erzeugter Imperfektionen soll der Einfluss von Handhabungseffekten auf die Preformqualität abgeleitet werden. Für die Erzeugung der Imperfektionen muss eine geeignete Versuchsvorrichtung entwickelt werden, die das Einbringen von Handhabungsbelastungen in die Textilproben parametrierbar und reproduzierbar ermöglicht. Zudem muss eine Methode zur Erfassung des Fließfrontverlaufs innerhalb der zu untersuchenden Textilprobe erarbeitet werden, um die Permeabilität berechnen zu können.

2 Handhabung textiler Halbzeuge bei der Herstellung von FKV aus Preforms

Die Qualität von FKV wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt. Neben der Qualität der wesentlichen Eingangsstoffe wie Faser und Matrix hat der Herstellungsprozess einen entscheidenden Einfluss auf die späteren Eigenschaften des Endprodukts. Die Gesamtqualität des FKV wird durch das gezielte Positionieren von Verstärkungsfasern und durch die anschließende Harzinfusion bestimmt. Die hierbei entstehenden Fehler können in den folgenden Prozessschritten nicht mehr korrigiert werden (vgl. [Neit04]).

Großflächige Strukturkomponenten aus FKV, wie Rotorblätter für Windenergieanlagen, werden überwiegend im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt (vgl. [KKMG16]). Trockene textile Halbzeuge werden zu Preforms aufgebaut und in Kombination mit Epoxidharz zu einem FKV-Bauteil überführt (vgl. [Neit04]). In dieser Arbeit wurde die Annahme getroffen, dass textile Halbzeuge auf dem Weg zum Preform durch zahlreiche Handhabungsprozesse beeinflusst werden. Diese Beeinflussung zieht sich durch die gesamte Prozesskette, von der Produktion der textilen Halbzeuge, über den Transport und die Warenannahme bis in den eigentlichen Produktionsprozess der FKV (Abbildung 2-1).

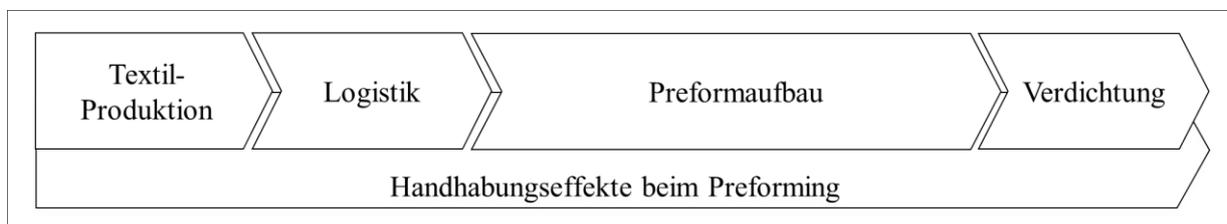


Abbildung 2-1: Entstehungsort von Handhabungseffekten in der Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV angelehnt an Schürmann (vgl. [Schü07])

Für eine ganzheitliche Betrachtung des Produktionsprozesses von Preforms müssen somit vorgelagerte sowie nachgelagerte Prozessschritte bei der Preform-Herstellung betrachtet werden. Angelehnt an Schürmann wurden die vorgelagerten Prozessschritte ‚Textilproduktion‘ und ‚Logistik‘ sowie die Hauptprozessschritte ‚Preformaufbau‘ und ‚Verdichtung‘ definiert. Der Preformaufbau beinhaltet die endkonturnahe Formgebung der Textilstruktur inklusive des Konturschnitts. Bei der Verdichtung findet die Evakuierung des Formwerkzeugs statt, wobei der Preform durch die dabei entstehende Flächenpressung belastet wird (vgl. [Schü07]).

Auffallend sind Beschädigungen an textilen Halbzeugen, die durch den Transport, durch die Verpackung sowie durch die Lagerung der Textilbahnen auf Rollen bzw.

Paletten hervorgerufen werden. Diese Textilfehler führen zu stark variierenden Eingangsparametern im späteren Herstellungsprozess (vgl. [RODT14]). Durch eine geringe Formstabilität textiler Halbzeuge entsteht zudem ein schwer vorhersehbares Materialverhalten (vgl. [Ohle13]).

Angelehnt an Neitzel sind die Faserorientierung, der Faservolumengehalt und die äußeren geometrischen Eigenschaften die wesentlichen Qualitätsparameter für Preforms (vgl. [Neit04]). Ergänzend dazu wird angelehnt an Flemming die Permeabilität als Qualitätsmerkmal von Preforms definiert (vgl. [F1ZR99]).

An dieser Stelle stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Evakuierung des Formwerkzeugs auf diese Parameter ausübt und inwieweit eine Kompensation von Textilfehlern stattfindet. Handhabungsprozesse ändern somit den Zustand der textilen Halbzeuge und führen dadurch zu Qualitätsabweichungen in den Preforms.

Zur Steigerung der Produktivität und zur Qualitätsverbesserung bei der Produktion von FKV werden automatisierte Produktionsprozesse entwickelt, die insbesondere in Hochlohnbranchen wie in der Luftfahrt oder im Automobilbau eingesetzt werden (vgl. [WMSK18]). Auch in der Windindustrie sind bereits automatisierte Fertigungsverfahren zur Herstellung von FKV im Preforming-Verfahren im Aufbau (vgl. [KKMG16]).

Das Preforming-Verfahren, in seinen unterschiedlichen Ausprägungsformen, wird vor allem dann eingesetzt, wenn durch Folgeprozesse ein kritischer Pfad vorgegeben wird. Der kritische Pfad an dieser Stelle wird überwiegend durch die Taktfrequenz von Folgeprozessen bestimmt. Hierdurch wird die Art des Preforming-Verfahrens, ob automatisiert oder manuell, maßgeblich vorgegeben (vgl. [Neit04]). Durch automatisierte Verfahren bei der Herstellung von textilen Preforms kann eine höhere Produktionsleistung erzielt werden, die häufig durch den Quotienten aus Fasermasse (m) und Fertigungszeit (t) kg/h charakterisiert wird (vgl. [HeGF08]). Das besonders hohe Potenzial für den Einsatz des Preforming-Verfahrens mit trockenen Textilien liegt im multiaxialen Aufbau und dem daraus folgenden hohen Flächengewicht des Halbzeugs (vgl. [HeGF08]). Somit kann eine hohe Masse an FKV in einem Arbeitsschritt verarbeitet werden.

Ein besonderes Problem bei der automatisierten Herstellung von Preforms stellen die Anforderungen an die Genauigkeit der Handhabung der textilen Halbzeuge dar. In diesem Umfeld wurden am Institut für integrierte Produktentwicklung der Universität Bremen (BIK) in mehreren Forschungsvorhaben bereits Erfahrungen mit der Handhabung textiler Halbzeuge gesammelt. Dabei stellt die Bewertung der Qualität des produzierten Preforms eine besondere Herausforderung dar (vgl. [WeMü08]). Die Preform-Qualität wird anhand von außen sichtbaren Merkmalen beurteilt, zu denen die geometrischen Abmessungen der äußeren Lagen eines Preforms zählen. Aufwendiger stellt sich die Beurteilung des inneren Aufbaus des

Preforms dar, insbesondere nach der Umformung (vgl. [Ohle13], [Mien13]). In dieser Arbeit soll die Sicht innerhalb der Textilstruktur durch die empirische Untersuchung der Permeabilität erfolgen.

2.1 Begriffsdefinition Preforming

Angetrieben durch branchenbedingte Qualitätsanforderungen haben sich unterschiedliche Preforming-Verfahren in der industriellen Anwendung herausgebildet. Die auf einem langen Erfahrungsschatz basierenden Methoden stellen häufig einen wesentlichen unternehmerischen Wettbewerbsvorsprung dar.

Die als Mehrphasenwerkstoffe bezeichneten FKV besitzen in einen Matrixwerkstoff eingebettete Verstärkungsfasern, die in Form von Kurz- oder Endlosfasern gerichtet oder ungerichtet vorliegen (vgl. [FlZR96]). Im Vergleich zu Produkten aus klassischen quasi-isotropen Werkstoffen wie Aluminium oder Stahl nimmt das Herstellungsverfahren bei Verbundwerkstoffen einen maßgeblichen Einfluss auf die endgültigen Produkteigenschaften. Die Qualität eines Produkts aus FKV hängt entsprechend von der Qualität der Halbzeuge sowie der des Fertigungsprozesses ab (vgl. [FlRo03]).

Die in der Industrie angewendeten Harzinjektionsverfahren unterscheiden sich durch die Methodik des Imprägnierens. Die Imprägnierung wird nach Neitzel als Durchströmung einer trockenen Faserstruktur mit einem inkompressiblen Fluid bezeichnet (vgl. [Neit04]). Die Imprägnierung der trockenen Preforms mit dem Matrixwerkstoff kann in zwei wesentliche Harzinjektions-Prinzipien unterteilt werden, das RTM (Resin Transfer Moulding) und das VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) (vgl. [Neit04]).

Im Gegensatz zu beispielsweise Prepregs oder Organoblechen werden trockene Textilstrukturen aus Multiaxialgelegen erst während des Produktionsverfahrens mit einem Matrixwerkstoff imprägniert (vgl. [FlZR99]). Als Preformverfahren (auch Preforming genannt) wird der Prozess bezeichnet, bei dem ein Vorprodukt aus technischen Fasern für den Zweck der Weiterverarbeitung zum FKV hergestellt wird (vgl. [FlZR99]). Da die Werkstoffgruppe der FKV eine hohe Dynamik im Hinblick auf neue Materialien sowie Fertigungsverfahren erfährt, decken diese Begriffe ein breites Spektrum an Fertigungsverfahren ab. Es kann zwischen dem direkten und dem sequenziellen Preforming unterschieden werden. Während bei der ‚direkten Preformherstellung‘ (z. B. Flechten, Tailored Fiber Placement, Faserspritzen) die 3D-Geometrie direkt aus den Fasern hergestellt wird, werden bei der ‚sequenziellen Preformherstellung‘ mehrere Prozessschritte benötigt (vgl. [Neit04]). Die ursprüngliche Motivation für das Preforming basiert auf der Trennung von Arbeitsschritten mit dem Ziel der Reduzierung von Formbelegungszeiten. Hierdurch

entsteht ein hohes Potenzial für die Reduzierung von Produktionskosten, da somit die Anzahl von Formwerkzeugen minimiert werden kann. Im Produktionsprozess für FKV muss eine Faserstruktur mit einem Matrix-Werkstoff in einer bestimmten Reihenfolge und zu einem definierten Zeitpunkt verbunden werden. Durch die Fertigung von Vorprodukten kann ein derartiger Produktionsprozess deutlich leistungsfähiger gestaltet werden (vgl. [FlZR96]). In Abbildung 2-2 ist eine allgemeine Prozesskette zur Herstellung von FKV im Harzinjektionsverfahren dargestellt. Die Prozesskette ist über die Systemgrenzen der Halbzeuherstellung sowie der Produktion des FKV hinaus aufgebrochen und in die wesentlichen Bereiche ‚Faser‘, ‚Kunststoff‘ und ‚Faser-Kunststoff-Verbund‘ gegliedert.

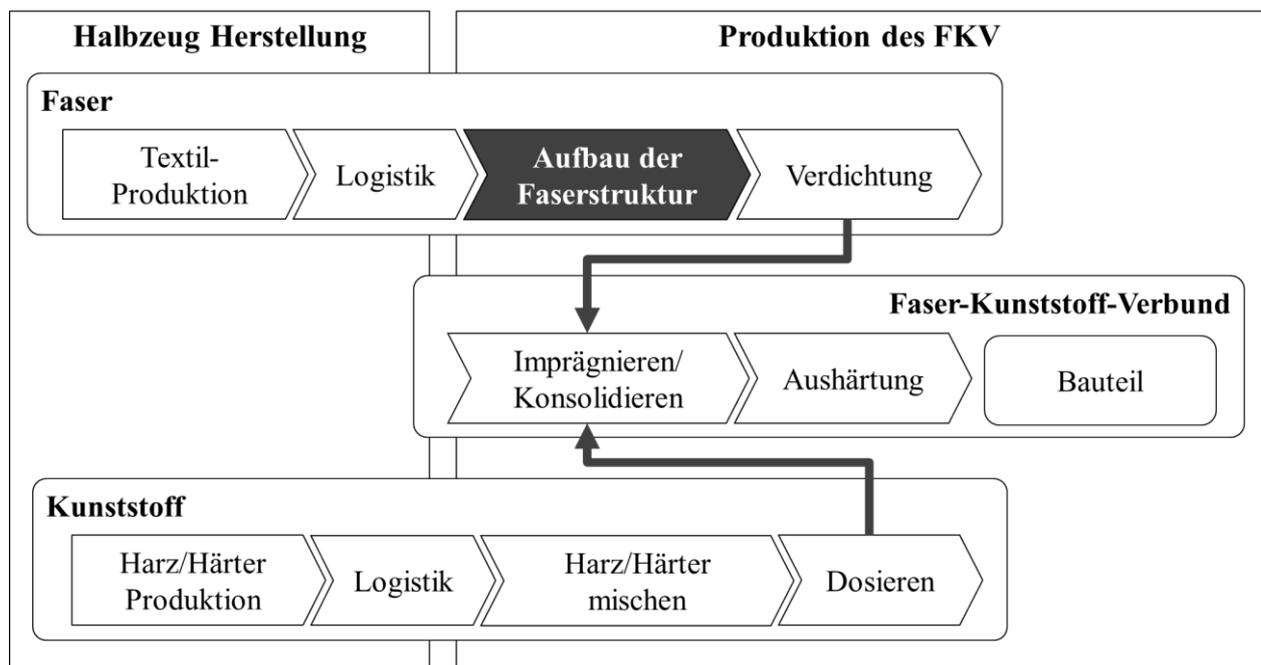


Abbildung 2-2: Prozesskette zur Herstellung von FKV im Harzinjektionsverfahren, angelehnt an Neitzel (vgl. [Neit04])

Der Prozessschritt ‚Aufbau der Faserstruktur‘ stellt eine eigenständige Prozesskette dar, in der ein Preform erzeugt wird (siehe Abbildung 2-3). Der Fokus dieser Arbeit liegt bei der sequenziellen Fertigungsweise von Preforms. Neitzel beschreibt die sequenzielle Preformherstellung als eine endkonturnahe Faserstruktur, die durch den schichtweisen Lageraufbau einzelner textiler Halbzeuge erzeugt wird (vgl. [Neit04]).

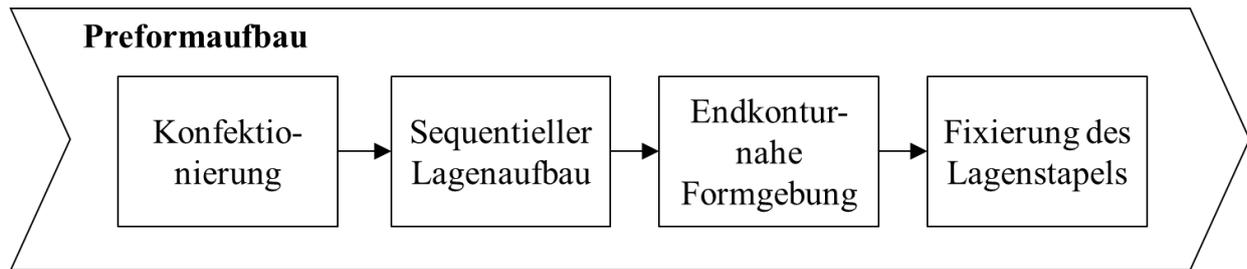


Abbildung 2-3: Aufbau der Faserstruktur durch sequenziellen Preformaufbau angelehnt an Neitzel (vgl. [Neit04])

Zur Verbesserung der Formstabilität werden Preforms durch Binder fixiert. Die sequenzielle Preformherstellung, bei der aus verschiedenen Zuschnitten lagenweise ein Preform aufgebaut wird, lässt sich auch mit den Funktionen der Montage nach der VDI-Richtlinie 2860 beschreiben (vgl. [Vdi90]). Das Montieren beinhaltet das Fügen, Handhaben, Kontrollieren und Justieren sowie die Sonderoperationen (vgl. [Zhao08], [Ehin12], [LoWi12]). Der Aufbau der Faserstruktur im sequenziellen Preformingverfahren entspricht dem Handhaben und dem Fügen. Im Zusammenhang mit dem Aufbau einer endkonturnahen Faserstruktur ist die Fixierung der Faserstruktur von besonderer Relevanz. Durch den Prozess des Fügens technischer Textilien sollen die Position und Orientierung der Verstärkungsfasern für den weiteren Herstellungsprozess verbunden werden (vgl. [Neit04]).

In dieser Arbeit wird unter einem Preform eine endkonturnahen, nicht imprägnierte, trockene Faserstruktur mit für die jeweilige Anwendung optimierter Faserausrichtung verstanden (vgl. [Neit04], [FlZR99]). Die vorgefertigte Faserstruktur stellt ein Vorprodukt im Prozess zur Herstellung eines FKV dar. Flemming definiert bereits einzelne multiaxiale Fasergelege (Multiaxialgelege, MAG) als Preforms und verweist zugleich auf mögliche Begriffsüberschneidungen in diesem Themenfeld (vgl. [FlZR96]). Multiaxialgelege sind schichtweise angeordnete Faserbündel (auch Roving genannt) mit einer definierten Faserorientierung. Weit verbreitet sind Multiaxialgelege mit einer unidirektionalen (UD), biaxialen (BIAX) oder triaxialen (TRIAX) Faseranordnung. Der Aufbau der Faserstruktur endet mit der Fixierung des im Preforming-Prozess erzeugten Lagenstapels. Wie in Tabelle 2-1 dargestellt, können unterschiedliche Preform-Arten entsprechend des Lagenstapels differenziert werden (vgl. [FlZR96]).

Tabelle 2-1: Preform-Arten angelehnt an Flemming (vgl. [FIZR96])

Preform-Art	Anwendung
Multiaxial-Lage	Eine multiaxiale Textillage (UD, BIAx, TRIAX etc.) stellt bereits einen Preform dar. Diese kann in Folgeschritten umgeformt und fixiert werden.
Looser Lagenstapel	Ein sequenziell aufgebauter Lagenstapel aus textilen Multiaxiallagen, der nicht fixiert ist. Häufig angewendet auf Preformträgern, die im Anschluss einfach umgeformt werden.
Fixierter Lagenstapel	Ein sequenziell aufgebauter Lagenstapel. Die Fixierung erfolgt mittels thermoplastischer Binder, Nähfäden oder durch mechanische Klemmung.
Umgeformter Lagenstapel	Die Umformung erfolgt aus einem Lagenstapel mittels Umformwerkzeug oder verformbaren Preformträger.

2.2 Materialverhalten bei der Handhabung

Die automatisierte Handhabung textiler Halbzeuge für den Aufbau der Faserstruktur im Preforming-Prozess führt aufgrund des schwer vorhersehbaren Verhaltens des zu handhabenden Halbzeugs zu zahlreichen Problemen. Insbesondere die biegeweiche Charakteristik textiler Halbzeuge ist abhängig vom Aufbau des textilen Halbzeugs (UD, BIAx, TRIAX), von der Bindung sowie vom Flächengewicht (vgl. [ChMM17]).

In Abbildung 2-4 ist beispielhaft ein Handhabungsprozess aus zwei Perspektiven dargestellt. Eine ebene Textilbahn wird automatisiert in ein Formwerkzeug mit gekrümmter Formgeometrie abgewickelt. Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Zustände des zu handhabenden Textils aus Perspektive A (a1 bis a4) und Perspektive B (b1 bis b4).

Für die Entwicklung von Automatisierungslösungen für die Handhabung technischer Textilien führt diese Materialcharakteristik zu Herausforderungen, insbesondere bei der Materialführung. Für die Festlegung der Anordnung von Sensorik sowie für die Konzipierung der Aktorik ist ein hoher Kenntnisstand des Materialverhaltens notwendig. Geeignete Ansätze für die analytische Vorhersage des Handhabungsverhaltens technischer Textilien befinden sich zurzeit noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase (vgl. [KrGS18], [ECGJ18], [Chri18]).

2 Handhabung textiler Halbzeuge bei der Herstellung von FKV aus Preforms

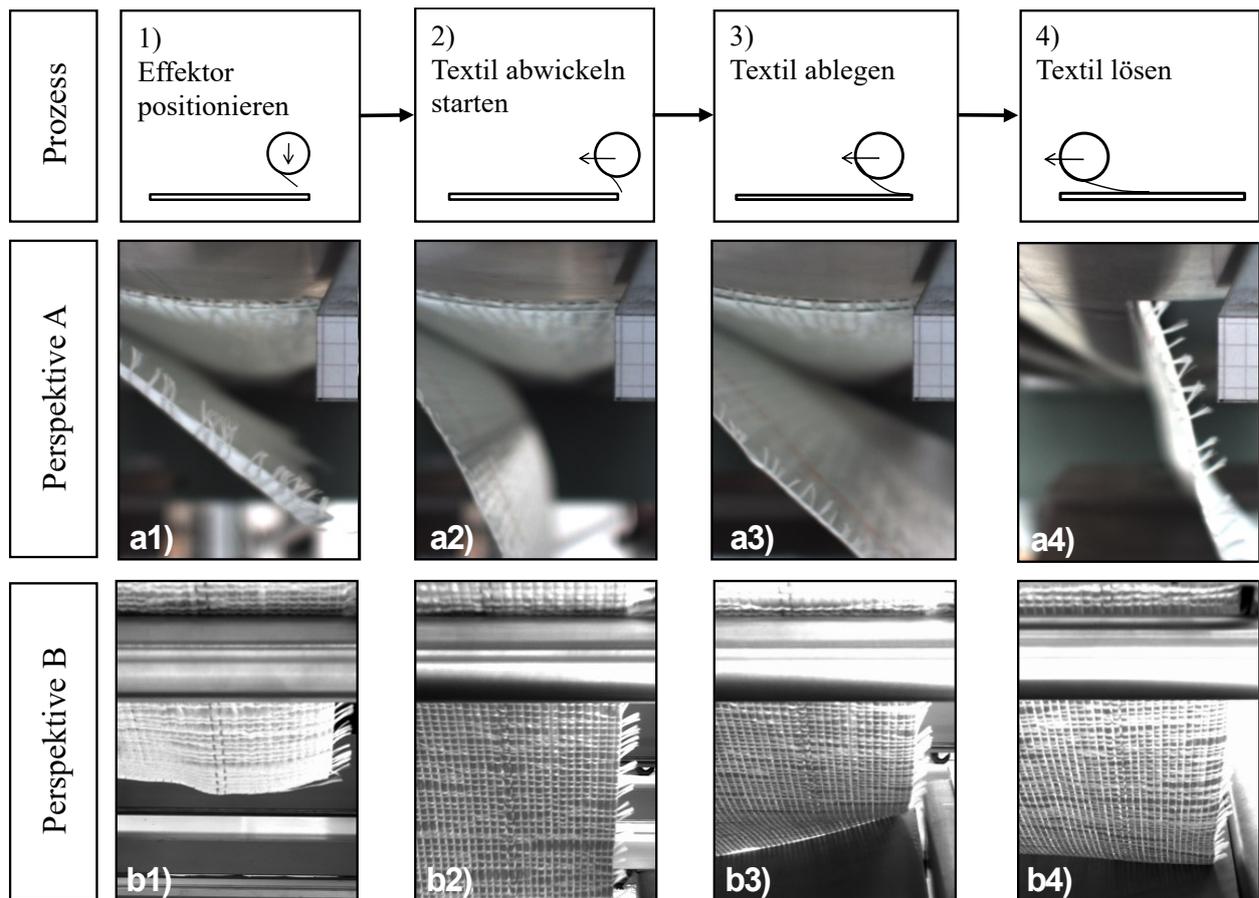


Abbildung 2-4: Vier Sequenzen bei der Ablage einer UD-Bahn in ein gekrümmtes Formwerkzeug

Das textile Halbzeug als Eingangsmaterial ist für automatisierte Verfahren herausfordernd. Eine hohe Drapierfähigkeit, die für stark gekrümmte Bauteile notwendig ist, führt zu einem eher biegeweichen Materialverhalten. Diese Eigenschaft wiederum stellt ein schwer vorhersagbares Ablageverhalten bei einem automatisierten Prozess dar (vgl. [FTRS14]). Textile Halbzeuge werden als Bahnware auf eine zylindrische Hülse gewickelt (vgl. [Din600]). Beim Aufwickeln der Textilbahnen können Abweichungen in der Wickelqualität beobachtet werden, die höher sind als die erforderlichen Ablagetoleranzen der Textilbahnen im Preform. Damit die Ablagetoleranzen für die Faserstruktur eingehalten werden, muss der automatisierte Ablageprozess durch aufwendige Aktorik erweitert werden. Besonders häufig zu beobachten sind unterschiedliche Durchmesser der Pappkerne, die variierende Position der Textilbahn auf dem Pappkern sowie schief aufgewickelte Textilbahnen (vgl. [RODT14]).

2.3 Ungewissheit über die zulässige Beanspruchung von Textilien

Die Beanspruchung durch unterschiedliche Krafteinwirkung während des automatisierten Handhabungsprozesses bewirkt unvermeidbare Handhabungseffekte im textilen Halbzeug. Eine zentrale Fragestellung bei der Entwicklung automatisierter Handhabungsmechanismen ergibt sich aus der zulässigen Beanspruchung textiler Halbzeuge beim Produktionsprozess. Aktuell finden sich hierzu nur wenige belastbare Aussagen in der Literatur und in der Praxis. Die Handhabungskonzepte berücksichtigen überwiegend technisch umsetzbare Prinzipien und weniger die zulässigen Materialbelastungen. Eine Bewertung findet anschließend am hergestellten Preform statt. Auch hier wird die Qualität des abgelegten textilen Aufbaus auf der Grundlage der äußerlich sichtbaren geometrischen Eigenschaften beurteilt. Greifer zum Halten und Positionieren der Textilbahn hinterlassen, je nach Wirkprinzip, Verformungen. Die Prozessanforderungen erfordern oftmals nur einseitig wirkende Greifsysteme wie Saug- oder Nadelgreifer. Diese hinterlassenen Greifspuren werden beispielsweise als sphärische Einprägung (Beule) auf der textilen Oberfläche sichtbar.

Für die Entwicklung automatisierter Handhabungsvorrichtungen fehlen Erkenntnisse, nach denen beurteilt werden kann, welche Beanspruchungen während des Handhabungsprozesses für das textile Halbzeug zulässig sind. Hierzu müssten die Folgen der Beanspruchung auf die Qualität der Faserstruktur bzw. der Preforms sowie die daraus folgende Qualität des endgültigen FKV dargestellt werden. Die aktuellen Forschungsfragen beschäftigen sich zwar intensiv mit Fehlstellen in FKV, die auf Produktionsfehler zurückzuführen sind, die Untersuchungen berücksichtigen jedoch nur selten Parameter, die sich aus der Handhabung der technischen Textilien im Preforming-Prozess ergeben.

In einem orientierenden Versuch wurde die Auswirkung von Eindrücken in Textilrollen nachgebildet, um die Folgen für die textile Bahn zu untersuchen. Mittels einer Zug-/Druckmaschine wurde ein Stempel mit einer definierten Last auf eine Halbzeugrolle gedrückt. Deutlich zu erkennen sind Druckstellen in der abgewickelten Textilbahn (Abbildung 2-5).

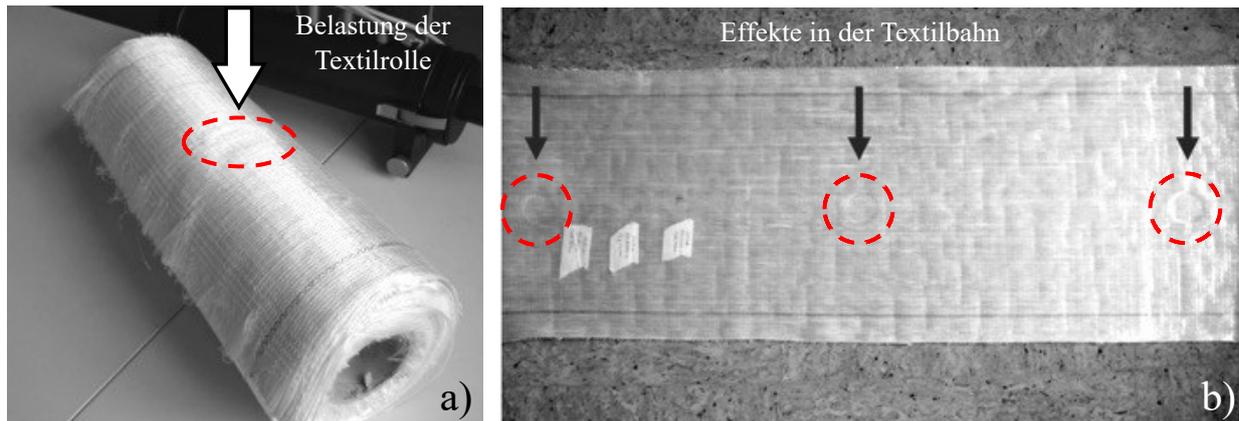


Abbildung 2-5: Folgen von Druckstellen in der Textilrolle in einem orientierenden Versuch. Definiertes Eindringen in der Textilrolle mittels Zug-/Druck-Prüfmaschine a), Ausgerollte Textilbahn mit Eindrücken b)

Bereits das Umspulen von Multiaxialgelegen von der Halbzeugrolle auf einen Wickelkern führt zu einer Scherbeanspruchung innerhalb des Geleges. Die durch diese prozessbedingte Maßnahme hervorgerufenen Belastungen im textilen Halbzeug sind weitestgehend unbekannt. Mindestradien für das Aufwickeln von Kohlenstoff-Faser-Gelegen auf Wickelkerne beziehen sich auf die Belastung der Kohlenstoff-Fasern und auf die daraus möglichen Faserbrüche. Die Scherbelastungen innerhalb des Geleges, also zwischen den Rovings und der Bindung, werden nicht betrachtet. Das Umspulen der Textilbahn von der Halbzeugrolle auf einen Wickelkern und das anschließende Abwickeln bei der Ablage der Textilbahn in ein Formwerkzeug ist prozesstechnisch unumgänglich. Die mechanischen Belastungen innerhalb des Textils gleichen prinzipiell dem Drapieren und können entsprechend auch durch Drapiermechanismen beschrieben werden (vgl. [Erma07]). Die aktuelle Auseinandersetzung in Forschung und in Entwicklung beschäftigt sich allerdings bislang selten mit Drapiermechanismen im Kontext automatisierter Prozesse. Weitere Erkenntnisse über den Einfluss von Umspulvorgängen auf die Eigenschaften von Multiaxialgelegen wären jedoch auch relevant für die Konzipierung und Entwicklung automatisierter Handhabungsvorrichtungen.

Ein weiteres Problem stellt die Ablagegenauigkeit, also die Beurteilung der schichtweise aus Textillagen aufgetragenen Faserstruktur, dar. Auch hier werden häufig die Maßstäbe aus der Luftfahrt herangezogen, die sich an der Verarbeitung von Prepregs orientieren. Die Beschaffenheit eines bereits gehandhabten textilen Halbzeugs lässt eine Qualitätsbeurteilung mit den Maßstäben für die Prepregverarbeitung nur eingeschränkt zu. Anders als Prepreg-Halbzeuge besitzt ein Gelege keine klar definierbaren Kanten, an denen eine Positionsgenauigkeit eindeutig bestimmt werden kann. Beispielsweise besitzen Multiaxialgelege produktionsbedingt keine eindeutige Bahnkante. Branchenüblich wird von ‚Borsten‘

oder ‚Pinseln‘ gesprochen, bei denen es sich um Rovings handelt, die nicht in Längsrichtung der Textilbahn (0° -Richtung) liegen (vgl. [Erma07]). Die Borsten liegen entsprechend der Faserorientierung über dem ersten Roving in 0° -Richtung. Die Länge der Borsten relativ zum ersten Roving in 0° -Richtung ist nicht weiter spezifiziert und ist für einen manuellen Handhabungsprozess von untergeordneter Relevanz. Für die Bewertung der Ablagegenauigkeit, sowohl bei der Prozesssteuerung als auch bei der Qualitätsbeurteilung, sind die Borsten ein Problem. Es stellt sich hierbei die Frage, an welcher Stelle die Länge und die Geometrie eines Zuschnitts gemessen werden soll. Auch ein in ein mehrfach gekrümmtes Formwerkzeug drapiertes Textil besitzt keine gerade Kante mehr, an der die aktuell angewendeten Qualitätsmaßstäbe greifen. Für eine automatisierte Messung müssten auch hier neue Bewertungskriterien festgelegt werden.



Abbildung 2-6: Beispiel für eine typische Lagerung von Textilrollen auf einer Palette

Die Lagerung und der Transport von Halbzeug-Rollen erfolgt üblicherweise auf Paletten, die in mehreren Lagen gestapelt werden. Das Eigengewicht der Rollen hinterlässt Abdrücke insbesondere in den unten liegenden Rollen. Zudem werden Quetschungen beobachtet, die zu einer Unrundheit der Rollen führen. Die durch die Lagerung, die Verpackung und den Transport verursachten Beschädigungen in textilen Halbzeugen verbleiben in der Faserstruktur bzw. im Preform und können nur sehr aufwendig durch den automatisierten Prozess korrigiert werden. Zudem ist die Erkennung derartiger Schäden durch ein automatisiertes System aufwendig und erfordert geeignete Sensorsysteme.

Um das Innere der Faserstruktur zu beurteilen, fehlen im Moment geeignete Messmethoden. Insbesondere Glasfasern, die nichtleitend sind, lassen sich nur schwer mittels Induktion oder Thermografie überprüfen. Optische Messverfahren können nur die Oberfläche der obersten Textillage beurteilen. So verbleiben die durch Handhabungsprozesse verursachten Defekte oftmals unbemerkt in der Faserstruktur und werden in das Endprodukt, den FKV, eingebettet. Dadurch wird die Qualität des FKV verschlechtert.

2.4 Herausforderungen für die Automatisierung der Handhabung von Textilien

Der Aufbau der Faserstruktur durch das sequenzielle Aufschichten und Drapieren einzelner Faserlagen wird aktuell aufgrund der schwer beherrschbaren Materialeigenschaften und mehrfach gekrümmten Bauteilgeometrien überwiegend in manuellen Prozessen durchgeführt (vgl. [KKMG16]). Mit den stetig wachsenden Qualitätsansprüchen an die Produkte steigt der Bedarf nach präzisen und reproduzierbaren automatisierten Verfahren. In der Industrie und in der Forschung finden aktuell zahlreiche Entwicklungen zur Automatisierung von Handhabungsprozessen für trockene technische Textilien statt. Hier liegt der Schwerpunkt auf dem eigentlichen Herstellen des Preforms, also auf der endkonturnahen Faserstruktur vor dem Imprägnieren. Während für die Handhabung von vorimprägnierten Faserhalbzeugen bereits seit Jahrzehnten industriereife Automatisierungslösungen im Einsatz sind, steht die Handhabung trockener Textilien noch überwiegend in der Entwicklungsphase.

In der Luftfahrtindustrie, die einen sehr hohen Anteil an FKV verarbeitet, werden überwiegend Prepreg-Materialien mittels Tapelegern verarbeitet (vgl. [Jecm13a]). Die Problematik der biegeweichen Handhabung spielt dabei eine untergeordnete Rolle. In der Windindustrie hingegen werden überwiegend trockene Textilien eingesetzt. Erste Automatisierungsansätze werden bereits bei der Gurt-Produktion industriell umgesetzt. Hierbei werden die Textilbahnen schichtweise in ein gering gekrümmtes Formwerkzeug gelegt. In der Automobilindustrie wird für die Produktion von CFK-Bauteilen (beispielsweise in der ‚BMW i3‘-Produktion) auf die automatisierte Verarbeitung von trockenen Textilien im RTM-Verfahren gesetzt (vgl. [WMSK18]). Hier werden aus langen Bahnen mehrschichtige ebene Preforms hergestellt und in Kontur geschnitten. Diese Preforms haben kleine Dimensionen und werden durch Pressen in die Endkontur gebracht (vgl. [Jecm13b]). Auch am BIK wurden zahlreiche Forschungsvorhaben zur automatisierten Handhabung von Textilien im Produktionsprozess von Preforms durchgeführt. Dazu zählen die Vorhaben „preblade“ (vgl. [WeMü08]), „LAR“ (vgl. [RoOT14]) oder „mapretec“ (vgl. [Ohle13]). In diesen Vorhaben wurden verschiedene Möglichkeiten zur

2 Handhabung textiler Halbzeuge bei der Herstellung von FKV aus Preforms

automatisierten Herstellung von Preforms aufgezeigt und unter industriellen Bedingungen getestet.

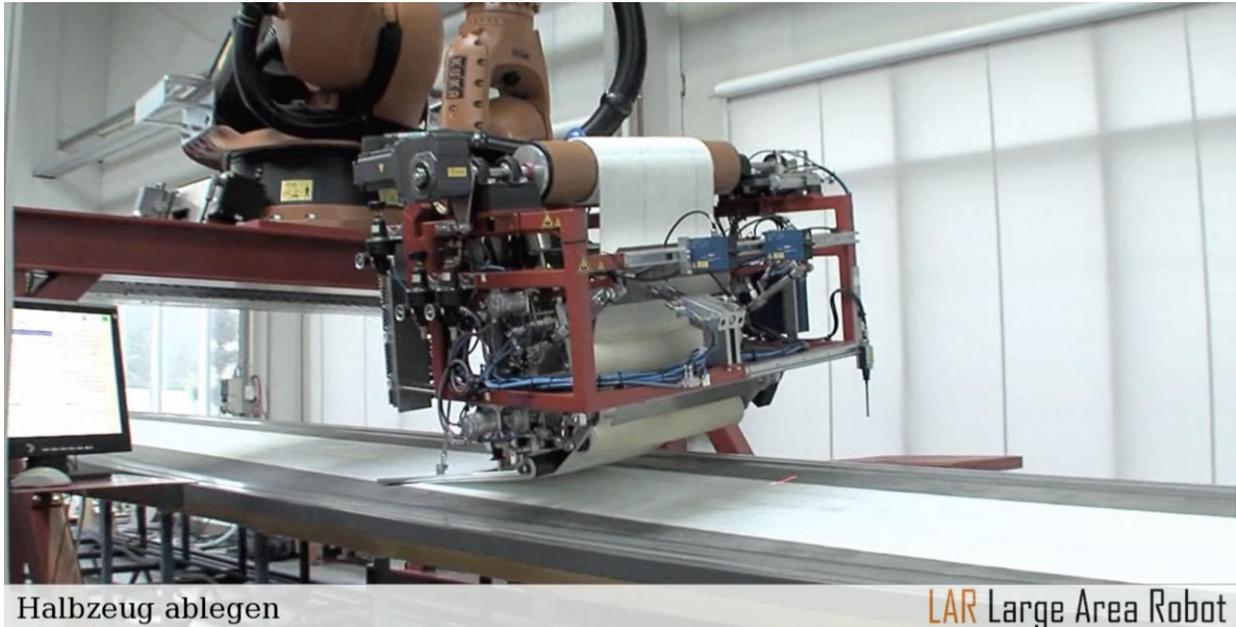


Abbildung 2-7: Automatisierung der Herstellung von Gurten für Rotorblätter (vgl. [RoOT14])

Neben der Kenntnis über prozessbedingte Qualitätsabweichungen stellt die Prozesssteuerung einen hohen Aufwand für automatisierte Ansätze dar. Hierbei sind speziell für FKV geeignete Sensoren und Prüfstrategien notwendig. Für die Prozessführung ergeben sich zudem Anforderungen an die Position und den Zustand des Materials sowie an die Position des Formwerkzeugs.

3 Stand der Forschung

3.1 Ansätze zur Systematisierung der Handhabung beim Preforming

Die besonderen Materialeigenschaften von trockenen textilen Halbzeugen führen zu Herausforderungen bei der Handhabung und bei der Herstellung von Preforms. Textile Halbzeuge als Handhabungsgegenstand besitzen überwiegend biegeschlaffe Eigenschaften. Diese erschweren die positions- und richtungsgenaue Ablage der Textilbahnen (vgl. [BiHS08]). Der Aufbau der Faserstruktur von Preforms durch das sequenzielle Aufschichten und Drapieren einzelner Faserlagen wird aktuell aufgrund der schwer beherrschbaren Textilien und der mehrfach gekrümmten Bauteilgeometrien überwiegend in manuellen Prozessen durchgeführt.

Bevor die textilen Halbzeuge den eigentlichen Prozess zum Preformaufbau beim FKV-Hersteller erreichen, erfahren sie zahlreiche handhabungsbedingte Belastungen. Diese vorgelagerten Handhabungsprozesse sind im Wesentlichen auf innerbetriebliche Logistikprozesse beim Halbzeug-Hersteller, auf die Zwischenlagerung, auf den Transport vom Halbzeug-Hersteller zum FKV-Hersteller sowie auf die Warenannahme zurückzuführen. Textilhersteller erweitern deshalb die vorgegebenen Normen für den sicheren Transport von Rollenwaren um die besonderen Anforderungen der textilen Halbzeuge. Die Handhabung der Halbzeuge lässt sich wie folgt differenzieren:

- Handhabung vorkonfektionierter Textilzuschnitte
- Handhabung von Textilbahnen

Handhabung vorkonfektionierter Textilzuschnitte

Erste Ansätze zum ‚Pick and Place‘ brachten die Forschungsprojekte „Maschinenteknik und Handhabungstechnologie zur Herstellung großer Faserverbundbauteile“ (Kurztitel: PRO-CFK Laufzeit: 01.07.2003–31.12.2006; vgl. [Stra10]) oder „Einsatz von Mikrosystemtechnik für das automatisierte Konfektionieren von trockenen CF-Textilien“ (Kurztitel: CFKTex, Laufzeit: 01.12.2007–30.11.2010). Hierbei wurde ein textiler Zuschnitt gegriffen, transportiert und an eine definierte Position gelegt. Des Weiteren wurden Effektoren zum Vereinzeln von Textilien aus einem Stapel entwickelt. Es bestand die Herausforderung, eine einzelne Lage des Textilstapels zu greifen. In diesen Projekten wurden auch unterschiedliche Greif-Prinzipien getestet, um auf der einen Seite eine sichere Handhabung zu gewährleisten und auf der anderen Seite das textile Halbzeug so wenig wie möglich zu beschädigen. Gut geeignet dafür sind Unterdruck- sowie Nadelgreifer (vgl. [RFOT17]). Die Herausforderung ergibt sich durch die schwierige Vorhersage des Materialverhaltens beim Greifen, Heben und

Umformen. Zudem spielt die Geometrie des Formwerkzeugs bzw. des Endprodukts eine wesentliche Rolle. Während kleine und vor allem wenig gekrümmte Formwerkzeuge (ca. 2 x 2 m) verhältnismäßig einfach belegt werden können, stellt sich die Situation bei stark gekrümmten Bauteilen, wie bei Rotorblättern für Windenergieanlagen, deutlich schwieriger dar.

Ein möglicher Ansatz besteht darin, das Greifsystem durch mechanische Kinematik zu erweitern. Das textile Halbzeug wird dabei gegriffen und im Effektor entsprechend der Zielgeometrie vorgeformt. Dieser Ansatz wurde beispielsweise im Forschungsprojekt „AutoPreforms – Automatisierte und wirtschaftliche Herstellung textiler Preforms zur Produktion von Faserverbundbauteilen“ (Kurztitel: AutoPreforms, Laufzeit: 01.06.2005–31.05.2007; vgl. [HeGF08]) oder im Verbundprojekt „Ökoeffiziente neue Werkstoffe und angepasste Fertigungstechnologien für Faserverbundwerkstoffe in Windkraftanlagen“ (Laufzeit: 01.07.2008–30.06.2011) verfolgt (vgl. [FeGr10]). Mit dem „3D Composite Handling System“ der Firma Broetje Automation wurde ein System vorgestellt, das eine formadaptive Anpassung eines ebenen Textils an ein dreidimensionales Formwerkzeug ermöglicht (vgl. [Rein16]).

Handhabung von Textilbahnen

Anders als beim ‚Pick and Place‘ werden bei diesem Ansatz textile Halbzeuge als aufgewickelte Textilbahnen verarbeitet. Das Textil wird direkt von der Halbzeugrolle gefördert und auf einen Preformträger oder ein Formwerkzeug abgelegt. Eine weitere Ausbaustufe dieser Technologie betrifft die kontinuierliche Ablage mit integrierter Drapierung. Hierbei können die Textilbahnen in einem vorgeschalteten Prozessschritt konfektioniert und auf einen Wickelkern im Endeffektor gespeichert werden. Dies ermöglicht die Konstruktion eines schlankeren Effektorsystems und umgeht die Problematik des Verschnittmanagements am Effektor. Im Forschungsvorhaben „preblade“ („Einführung eines teilautomatisierten Preforming-Verfahrens für die reproduzierbare Fertigung von Rotorblättern für Windenergieanlagen“) wurden Textilbahnen auf einen ebenen Preformträger automatisiert abgelegt (vgl. [WeMü08]). Das Forschungsprojekt „Large Area Robot“ (Kurztitel: LAR, Laufzeit: 01.04.2009–31.03.2011) ging einen Schritt weiter (vgl. [RoOT14]). In diesem Projekt wurden Textilbahnen für die Rotorblatt-Gurte automatisiert in ein gekrümmtes Formwerkzeug abgelegt und drapiert (vgl. [ORSF13]). Die Firma Broetje Automation hat eine automatisierte Preformingzelle für die Herstellung von Bauteilen im RTM-Verfahren entwickelt (vgl. [Rein13]). Ein weiterer Ansatz wurde durch das Projekt „mapretec“ verfolgt. In diesem Verbundprojekt wurde ein Verfahren entwickelt, in dem ein großflächiger, ebener Lagenaufbau in einem Arbeitsschritt automatisiert zu einem endkonturnahen Preform umgeformt wird. Die

Ablage von vorkonfektionierten Textilien erfolgt automatisiert durch einen Endeffektor. Die Umformung wird lediglich durch die Verformung des Preformträgers realisiert (vgl. [ORSF15]). Die Vielfalt der verschiedenen Lösungsansätze zeigt auch die Komplexität des Prozesses zur Handhabung textiler Halbzeuge und zur Herstellung von Preforms.

Drapiermechanismen nach Ermani

Deutlich stärker wird die Handhabung im Zusammenhang mit der eigentlichen Preform-Herstellung und vor allem mit der endkonturnahen Formgebung der Preforms in der Literatur und in der Praxis betrachtet. Als Drapierung wird die Formänderung von zweidimensionalen Textilien und Fasermaterialien durch Einwirkung der Schwerkraft oder anderer äußerer Kräfte bei der Anpassung an eine vorgegebene dreidimensionale Geometrie bezeichnet (vgl. [Erma07]). Ermani liefert eine differenzierte Betrachtung der Drapierung, wodurch lokale Änderungen der Faserorientierung hervorgerufen werden. Hierdurch werden wiederum die Durchflusseigenschaften hinsichtlich der Imprägnierung mit dem Matrixmaterial sowie die mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils beeinflusst (vgl. [Erma07]). Ermani liefert zudem eine Übersicht über mögliche Deformationsmechanismen, die durch das Drapieren in textilen Halbzeugen hervorgerufen werden. Unterschieden wird hierbei zwischen den Drapiermoden Trellis-Effekt, Faserstreckung, Faltenbildung und Faserdehnung sowie der Verschiebung von Fasern (vgl. [Erma07]). Die Drapierung steht ebenfalls im Fokus weiterer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die das Ziel verfolgen, die Auswirkungen des Herstellungsprozesses auf die Qualität des endgültigen FKV zu beurteilen. Darüber hinaus wird eine bessere Vorhersagbarkeit des Materialverhaltens beim Drapieren angestrebt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse werden als Grundlage für Drapiersimulationen genutzt (vgl. [Finc14]).

3.2 Ansätze zur Bewertung des Einflusses des Preforms auf die Qualität des FKV

Damit FKV im hochbelasteten Einsatz die gewünschten Eigenschaften besitzen, muss ein fehlerfreier Werkstoff bestehend aus dem Verbund von Faserstruktur und der Matrix vorliegen (vgl. [FlRo03]). Von einer hohen Qualität von textilen Halbzeugen kann dann gesprochen werden, wenn die Fasern des Halbzeugs in ideal gestreckter Form vorliegen und das Halbzeug frei von Beschädigungen und Beeinträchtigungen durch äußere Einflüsse ist. Bereits durch kleine mechanische Belastungen kann sich die Qualität durch eine Veränderung der Faserstruktur verschlechtern (vgl. [Schü07]).

Der Anspruch eines fehlerfreien Werkstoffs lässt sich in der Realität jedoch nicht umsetzen, sodass die Definition eines fehlerfreien Werkstoffs über die zulässig tolerierbaren Abweichungen bestimmt wird. Diese unterscheiden sich je nach Anwendungsbereich und Branche. Prinzipiell gilt, dass Fehler im Werkstoff das Tragverhalten des Bauteils nicht beeinträchtigen dürfen und nicht zu einer Ausweitung des Schadens führen dürfen (vgl. [FlRo03]). Die rechnerisch ermittelten Festigkeitswerte von FKV, die sich aus den Festigkeiten der Fasern ergeben, werden praktisch nicht erreicht (vgl. [Schü07]). Entsprechend müssen die berechneten Werte durch Erfahrungswerte korrigiert werden. Dagegen sind die im Strukturbereich eingesetzten klassischen metallischen Werkstoffe wie Aluminium oder Stahl bezüglich des Schadensverhaltens weitestgehend bekannt (vgl. [FlRo03]).

Deshalb sind Kenntnisse über die Kausalität mit Bezug auf die Beeinträchtigung des Werkstoffs durch Schäden und über die daraus folgenden Schadenstoleranz besonders wichtig. Hierzu haben sich in den letzten Jahren zahlreiche analytische und experimentelle Ansätze zur Bestimmung der Schadenstoleranz von FKV herausgebildet. Eine geminderte Schadenstoleranz von FKV kann auf Vorschädigungen der Fasern zurückgeführt werden. Diese werden durch den Verarbeitungsprozess und die Anzahl der Verarbeitungsstufen beeinflusst (vgl. [Schü07]). Somit können schädigende Effekte durch Handhabungsprozesse bei der Herstellung von Preforms entstehen. Auch der Aufbau der textilen Halbzeuge kann zu ungleichmäßiger Belastung der Fasern im FKV-Bauteil führen. Einzelne Faserbündel erhalten bauartbedingt unterschiedliche Ausrichtungen und Vorspannungen, sodass nicht alle Fasern die aufgebrachten Lasten gleichermaßen tragen. Entsprechend beginnt der Versagensprozess an den höchstbelasteten Faserbündeln. Darüber hinaus spielen die Grenzfläche zwischen Harz und Faser und die daraus resultierenden Haftungsverhältnisse eine entscheidende Rolle für die Qualität des FKV. Das Kraftübertragungsverhalten wird von der Art und dem Ausmaß der Faseroberflächenvorbehandlung sowie durch die aufgebrachte Schlichte bestimmt. Die Schlichte verhält sich im Produktionsprozess äußerst sensibel und kann durch äußere Einflüsse, wie UV-Strahlung oder Verschmutzungen, beschädigt werden. Auch Handhabungsprozesse können einen negativen Einfluss auf die Schlichte haben und dadurch einen großen Einfluss auf die Qualität des FKV ausüben (vgl. [Schü07]).

Einfluss von Faserfehlorientierung auf die Qualität des FKV

Die Bedeutung der Faserorientierung und entsprechend die einer qualitativ hochwertigen Faserstruktur auf die Festigkeit des FKV werden in Abbildung 3-1 beschrieben. Hierbei wird die abnehmende Druckfestigkeit mit zunehmender Faserfehlorientierung dargestellt. Deutlich sichtbar ist die Empfindlichkeit der

FKV-Struktur bei geringen Fehlorientierungswinkeln und die daraus folgende Verringerung der Festigkeit. Hieraus kann eine starke Abhängigkeit von der Fertigungsqualität abgeleitet werden. Demnach müssten Fasern unter Zugspannung abgelegt und gehalten werden, um annähernd die rechnerisch möglichen Festigkeiten zu erreichen (vgl. [Schü07]).

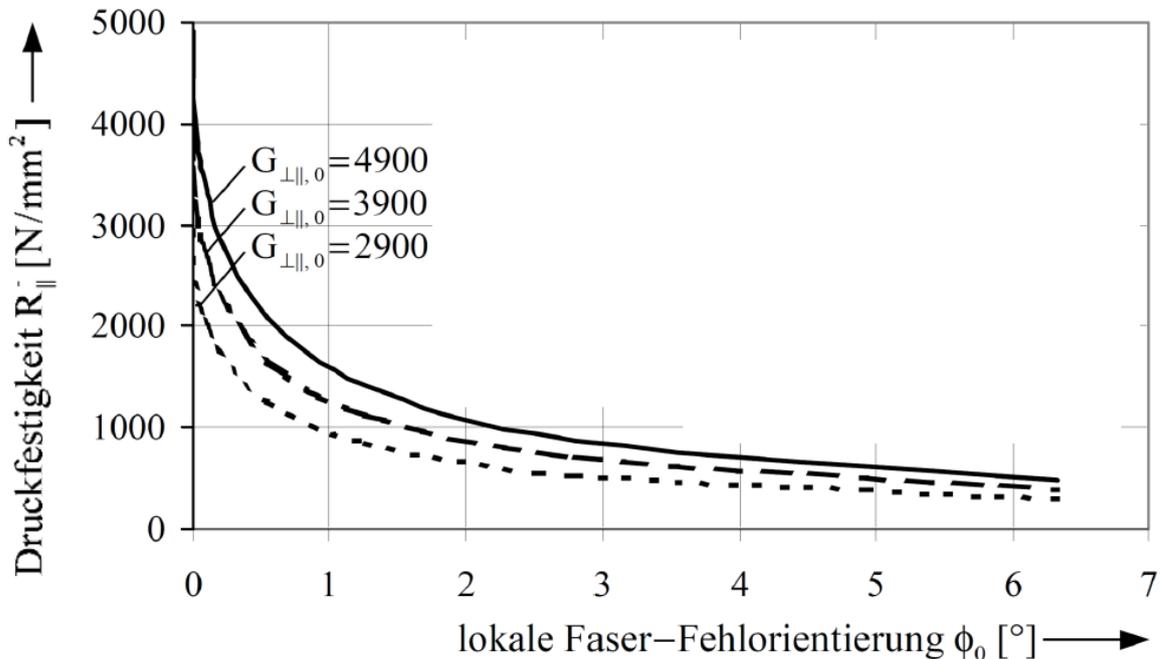


Abbildung 3-1: Abnehmende Druckfestigkeit mit zunehmender Faserfehlorientierung nach Schürmann ([Schü07], S. 356)

Faserfehlorientierungen werden auch als Ondulationen bezeichnet. Als Ondulation wird die Veränderung der Faserausrichtung aus der idealen Lage beschrieben. Diese Faserfehlorientierungen können durch Zug- oder Druckbelastungen rechtwinklig zur Faserausrichtung entstehen und führen zu Verdrehungen, Verkrümmungen oder zu Wellen in der Textilstruktur. Dieser Effekt ist insbesondere bei der Handhabung von textilen Halbzeugen zu beobachten. Hierdurch weichen die Fasern von der ideal-gestreckten Faserlage ab und führen damit zu einem Festigkeitsverlust des späteren FKV (vgl. [Schü07]).

Einfluss von Faserbeschädigungen auf die Qualität des FKV

Beschädigungen der Faserstruktur können zum Versagen eines FKV führen. *Schürmann* unterscheidet drei Versagensarten von FKV: Faserbruch, Zwischenfaserbruch sowie Delamination. Faserbeschädigungen können sowohl auf die Nutzungsphase als auch bereits auf die Produktion des FKV zurückzuführen

sein. Als Faserbruch wird das plötzliche gemeinsame Zerreißen oder Brechen von mehreren Fasern bezeichnet. Es gilt als eine der „nicht tolerierbaren Versagensformen“ und tritt hauptsächlich bei faserparalleler Beanspruchung auf (vgl. [Schü07], S. 345 f.). Beim Zwischenfaserbruch kommt es zum Riss an der Grenzfläche zwischen Matrix und Faser. Delamination tritt bei hohen Spannungen zwischen den einzelnen Faserschichten auf und kann die Folge von Fehlern im Produktionsprozess des FKV sein. Wird beispielsweise beim Vakuuminfusionsverfahren das Faserhalbzeug unzureichend durchtränkt, so bleiben trockene Stellen im Laminat, wodurch keine Verbindung zwischen den Schichten besteht. Zu einer Beschädigung oder zu einem Bruch von Fasern kann es bei zu großen Umlenkwinkeln oder bei einer Biegung bei der Faserführung kommen. Besonders steife Fasern sind anfällig für Schäden durch das Brechen oder Einreißen von Einzelfasern (vgl. [Schü07]).

Auch Umweltbelastungen können zu Faserbeschädigungen führen, die insbesondere die auf den Fasern aufgebrachte Schlichte betreffen. Die Faserschlichte ist sowohl temperatur- als auch feuchteempfindlich. Durch die Lagerung kann sich Kondenswasser auf den oberen Faserlagen bilden und damit die Matrixbindung verschlechtern. Ebenfalls ist die Belastung der Halbzeuge durch UV-Strahlung und Staub zu beachten. Schäden durch Überlagerung können durch das übermäßig lange Lagern der Gelege entstehen. Die Schlichte reagiert im Laufe der Zeit mit Sauerstoff und verliert dadurch ihre haftungsverbessernden Eigenschaften. Darüber hinaus sollten die Halbzeuge nicht in Kontakt mit der menschlichen Haut bzw. in Kontakt mit Fetten und Ölen kommen (vgl. [Schü07], [En1300]).

Einfluss von Harzflusseigenschaften auf die Qualität von FKV

Die Qualität eines FKV zeichnet sich neben der Faserausrichtung durch eine gleichmäßige und ganzheitliche Verteilung der Kunststoffmatrix innerhalb der Faserstruktur aus. In Infusionsprozessen wird die Kunststoffmatrix im fluiden Zustand verarbeitet. Das Fließverhalten des Fluids wird durch die Durchlässigkeit bzw. die Porosität der Faserstruktur bestimmt. Die Porosität kann im Bauteil aufgrund von Wandstärkeänderungen, Überlappungen von Faserlagen oder durch Textilfehler wie Zuschnittfehler, Positionsfehler der Textillagen, Falten oder Textilbeschädigungen variieren. Zonen mit großer Porosität können durch Imperfektionen in der textilen Struktur des Preforms entstehen. Diese Zonen weisen einen geringen Fließwiderstand auf und werden vom Harz bevorzugt durchflossen. Auch in Randzonen, in denen der Preform die Kavität des Formwerkzeugs (RTM) oder die Kavität unter dem Vakuumsack nicht vollständig ausfüllt, entsteht ein Spalt, in dem das Harz schneller fließt. Dieses Phänomen wird auch als „Racetracking“ beschrieben (vgl. [HsAd04], [DHGA03]). Durch die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten des Harzes, die sich durch unterschiedliche Porositäten in

der textilen Struktur und durch Spalten im Randbereich der Kavität bilden, fließt das Harz ungleichmäßig bis zur Entlüftung. Dadurch kann Luft in der Kavität eingeschlossen werden, sodass die vollständige Imprägnierung des Preforms bzw. der Fasern mit der Harzmatrix verhindert wird. Somit können Textilfehler sowie Form- und Lageabweichungen des Preforms den Harzfluss empfindlich beeinflussen (vgl. [FlZR99].)

Bei textilen Halbzeugen mit hoher Permeabilität in Flächenrichtung (x- und y-Richtung) sorgen Gassen zwischen den Rovings für eine schnelle Harzverteilung. Die Harzverteilung in die Tiefe des Textils bzw. des Preforms wird durch Gassen um die Binderfäden verbessert. Eine hohe Anzahl an Einstichen durch Binderfäden führt somit zu einer besseren Harzverteilung des Preforms (vgl. [RiBM16]).

Die Permeabilität ist ein Kennwert der Faserstruktur und beschreibt die Durchlässigkeit eines porösen Mediums gegenüber einer viskosen Flüssigkeit (vgl. [FlZR99]). Sie leitet sich aus dem Gesetz von Darcy ab und ist unabhängig vom durchströmten Medium (vgl. [FlZR99], S. 246). Die Porosität entspricht dem Harzvolumenanteil im Laminat bzw. des Bauteils, also dem Anteil der Kavität, der bei der Injektion mit Harz gefüllt wird (vgl. [FlZR99]). Die Viskosität des Matrixwerkstoffs gilt bei Infusions- bzw. Injektionsprozessen als nahezu konstant. Die Faserorientierung sowie der Faser-Volumen-Gehalt wirken sich stark auf die Fließeigenschaften des Harzes im Infusionsprozess aus (vgl. [Stöv04]). Mit der Verbesserung von Harzflusseigenschaften in Preforms und somit mit der Steigerung der Qualität von FKV beschäftigen sich auch die Untersuchungen von Rimmel. Hierbei wird ein Zusammenhang zwischen der Porengröße zwischen den Fasern und der Permeabilität aufgestellt (vgl. [RiBM16], [RiMM18]).

3.3 Ansätze zur Bewertung von Handhabungseinflüssen in Preforms

Die Qualität von FKV wird durch die Qualität der einzelnen Eingangswerkstoffe, der Fasern und der Kunststoffmatrix sowie durch die Eigenschaften des Produktionsprozesses bestimmt. Einflussfaktoren auf die Qualität von FKV sind der Faservolumengehalt, die Art der Verstärkungsfasern sowie die Eigenschaften der Kunststoffmatrix. Das im Vergleich zu metallischen Werkstoffen anisotrope Materialverhalten des Verbunds muss bereits in der Konstruktionsphase des Produktes berücksichtigt werden. Die Aufgabe der Kunststoffmatrix besteht darin, die Bindung zwischen den Verstärkungsfasern zu schaffen und die Krafteinleitung in die Verstärkungsfasern zu gewährleisten. Die Kunststoffmatrix sichert zudem den Verbund gegen äußere Einflüsse wie Chemikalien, UV-Strahlen oder Temperaturschwankungen. Bei der Qualitätssicherung von textilen Halbzeugen kann auf eine Reihe von individuellen Normen abhängig von der Halbzeugart zurückgegriffen werden. Aufgrund der besonders hohen Anforderungen an die

3 Stand der Forschung

Produktqualität hat die Mehrheit dieser Normen ihren Ursprung in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Im Rahmen dieser Arbeit ist die DIN 13473 (1–3) von besonderer Bedeutung (vgl. [En1300]). Sie umfasst die Spezifikationen von Multiaxialgelegen. Einige der wesentlichen physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Physikalische Eigenschaften und Prüfverfahren von Multiaxialgelegen nach EN 13473-1 (vgl. [En1300])

<i>Eigenschaft</i>	<i>Prüfung nach</i>
Glühverlust	ISO 1887
Schlichteanteil	EN ISO 10548
Feuchtegehalt	EN ISO 3344
Filamentdurchmesser	ISO 1888
Flächenbezogene Masse	ISO 3374
Länge und Breite	ISO 5025
Warendicke	ISO 4603
Mechanische Lamineigenschaften	EN ISO 527-4

In der industriellen Praxis findet die Qualitätssicherung bei der Wareneingangsprüfung, bei der Zwischen- oder Endprüfung sowie bei der Abnahmeprüfung beim Empfänger statt (vgl. [GeKo07], S. 110). Von der eigentlichen Wareneingangsprüfung, die sich vorwiegend mit logistischen Hilfsmitteln und äußeren Merkmalen der Verpackung beschäftigt, lässt sich die Rohstoffeingangsprüfung unterscheiden (vgl. [Wann09]). Die Aufgabe der Rohstoffeingangsprüfung ist die Überprüfung von materialbezogenen Eigenschaften (vgl. [Wort96]). Es wird also sichergestellt, dass die gelieferten Materialien den geforderten Qualitätseigenschaften entsprechen. Ein wichtiger Teilbereich der Rohstoffeingangsprüfung ist ebenfalls die Prüfung auf eine einheitliche Qualität der gelieferten Chargen (vgl. [Wort96]).

Die Erfassung der Fasereigenschaften des Preforms ist in der praktischen Anwendung äußerst kompliziert. In der aktuellen Anwendung befinden sich bildgebende Verfahren, die nur die Oberfläche des Preforms bzw. des textilen Halbzeugs erfassen und auswerten (vgl. [Mien13]). Eine Erfassung der Fasereigenschaften innerhalb eines umgeformten Preforms erfordert aufwendige Qualitätsprüfungsverfahren sowie mit sensorischen Fasern ausgestattete textile Halbzeuge (vgl. [Ohle13]). Deshalb erfolgt die Beurteilung der Preformqualität überwiegend über die Beurteilung der äußeren Formeigenschaften des Preforms.

Sicherheitsrelevante Komponenten müssen eine vorhersehbare Restfestigkeit im Schadensfall besitzen. Diese Eigenschaft ist ein besonderer Vorteil von FKV, sofern

diese fehlerfrei hergestellt werden. Das Versagens- und das Degradationsverhalten von FKV, hervorgerufen durch herstellungsbedingte Produktionsfehler, wurden bereits ansatzweise erforscht. Es gilt, herstellungsbedingte Fehler zu definieren und zu erfassen sowie deren Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von FKV zu untersuchen. In diesem Umfeld wurden unterschiedliche nationale und internationale Forschungsvorhaben durchgeführt, in denen der Zusammenhang zwischen Produktionsverfahren und der Qualität von fertigen FKV betrachtet wurde (vgl. [Stöv04], [Endr03], [Hors10], [ChCC01], [McBr95], [PoSa08]). Auch im Bereich der Untersuchung der Faserausrichtung für die Überwachung von Produktionsprozessen sind bereits Forschungsvorhaben erfolgt (vgl. [Mien09], [KoBG07]).

Die geometrischen Abmessungen trockener Textilien sowie deren Fasereigenschaften werden laut Wortberg als Qualitätsparameter für Preforms abgeleitet (vgl. [Wort96]). Arnold et al. beschreiben die Permeabilität als Einflussfaktor für eine schnellere Zykluszeit in der Produktion von FKV (vgl. [ArUa12]). Einen interessanten Ansatz liefern die Untersuchungen der TU Braunschweig, die sich mit ‚Effects of Defects‘-Untersuchungen im Zusammenhang mit FKV beschäftigen. Der Fokus liegt auf dem RTM-Verfahren und der Herstellung von Rohren im Wickelverfahren, in die gezielte Imperfektionen in Form von Faser- und Matrixfehlern eingebracht werden. In diesem Vorhaben liegt der Schwerpunkt auf der experimentellen Untersuchung der Dauerfestigkeit der Endprodukte (vgl. [FBMH19]).

Die von Brökel durchgeführte Arbeit beschäftigt sich mit Faserwelligkeit und dem Entwurf einer neuen Werkstoffkombination. Die Fasern sollen sich bei Belastung definiert strecken und dadurch den Verbund bei großer Dehnung versteifen. Brökel unterscheidet die Faserwelligkeit nach einer zweidimensionalen und nach einer dreidimensionalen Umlenkung (vgl. [Brök07]).

Schmidt et al. beschreiben den komplexen Zusammenhang zwischen der Faserrichtung und dem Versagensverhalten von FKV. Dabei werden die Effekte lokaler Faserwelligkeiten auf den Schadensmechanismus von FKV in einer experimentellen Untersuchung von biaxial gewickelten Probekörpern untersucht (vgl. [SRHB12]).

3.4 Forschungsbedarf

Der aktuelle Stand der Forschung bietet wenige Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen handhabungsbedingten Fehlstellen und der Qualität von Preforms. Zahlreiche Arbeiten setzten sich zwar mit der Qualität des fertigen FKV auseinander, bieten jedoch weniger Anhaltspunkte für die Bewertung der Qualität

des Zwischenprodukts, des Preforms bzw. der textilen Faserstruktur. Dieses Zwischenprodukt hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Folgeprozesse, die Verdichtung und die Infusion, sodass die Kenntnis der Qualität des Preforms wichtige Aufschlüsse über die Qualität des Endproduktes, des FKV, liefern kann. Die Beurteilung der Qualität der Faserstruktur im Preform ist durch äußere Messverfahren kaum möglich. Zwar gibt es auch hier Ansätze, durch beispielsweise Thermografie, Wirbelstromverfahren oder Sensorfasern in den Preform zu schauen. Diese Messprinzipien bauen jedoch auf leitenden Materialien auf und sind z. B. für trockene Glasfaser-Preforms nicht anwendbar.

Aktuell können nur bildverarbeitende Messverfahren eingesetzt werden, die die Textilstruktur bzw. die Preform-Oberfläche von der sichtbaren Seite erfassen können. Werden Vakuuminfusionsverfahren betrachtet, wird deutlich, dass nur eine Preform-Seite für ein Messsystem sichtbar ist. Deshalb können nur indirekt Schlüsse über die Qualität des Preforms über die Beurteilung der Oberfläche gezogen werden.

Die Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen die durch Handhabungsprozesse verursachten Effekte in Preforms und deren Auswirkung auf die Qualität des späteren FKV könnten von hoher Bedeutung für die Qualitätssicherung der gesamten Prozesskette sein. Zudem hätte dies auch einen Einfluss auf die Entwicklung von Automatisierungslösungen für die Verarbeitung von technischen Textilien. Die Kenntnis über zulässige Beanspruchungen der textilen Halbzeuge bei der Handhabung mittels automatisierter Effektoren würde sich auf die Automatisierungskosten positiv auswirken. Der Nachweis über höhere zulässige Belastungen der textilen Halbzeuge im Handhabungsprozess würde einfachere Automatisierungslösungen ermöglichen.

4 Erklärungsmodell für die Entstehung von Defekten in Preforms

4.1 Handhabung als Ursache für Defekte in Preforms

Um den Einfluss von handhabungsbedingten Effekten auf die Qualität von Preforms zu ermitteln, wird zunächst ein Modell erarbeitet, auf dessen Grundlage der Zusammenhang zwischen Ereignissen in der Prozesskette und den daraus folgenden Imperfektionen definiert wird. Hierzu wird der Ansatz der Festigkeitslehre gewählt, bei dem ein Zusammenhang zwischen von außen auf einen Körper einwirkenden Belastungen und den daraus resultierenden inneren mechanischen Beanspruchungen betrachtet wird. In Abbildung 4-1 wird der Zusammenhang zwischen prozessbedingter Handhabung und möglichen Defekten in Preforms dargestellt. Textile Halbzeuge werden in der Prozesskette zur Herstellung von Preforms in zahlreichen Handhabungsoperationen manipuliert. Die einzelnen Manipulationen stellen Ereignisse in der betrachteten Prozesskette dar. Die Ereignisse führen wiederum zu mechanischen Belastungen in den zu handhabenden Textilien. Als Folge von äußeren Belastungen entstehen sichtbare Effekte in den textilen Halbzeugen. Die handhabungsbedingten Belastungen können zu qualitätsbeeinflussenden Imperfektionen im Preform und damit auch im späteren FKV führen.

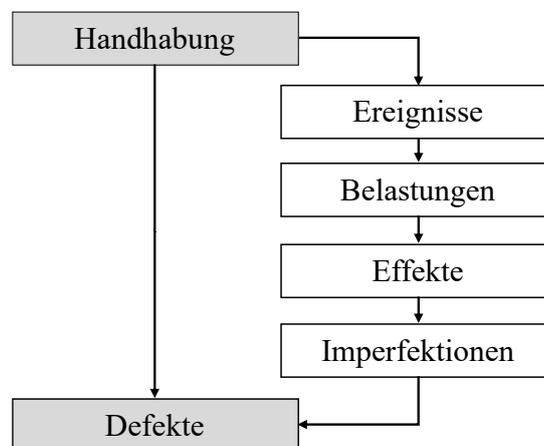


Abbildung 4-1: Zusammenhang zwischen prozessbedingter Handhabung und möglichen Defekten in Preforms

Das unter dieser Annahme erarbeitete Modell zur Bewertung des Einflusses von Handhabungseffekten auf die Preform-Qualität wird anschließend auf eine reale Prozesskette zur Fertigung von Preforms übertragen. Dabei sollen die Systemgrenzen so gewählt werden, dass alle relevanten Teilprozesse, von der Textilproduktion bis hin zur Infusion, einbezogen werden. Aufbauend darauf wird in einer experimentellen Untersuchung der Einfluss von repräsentativen Effekten auf die Qualität des Preforms ermittelt.

4 Erklärungsmodell für die Entstehung von Defekten in Preforms

In der Prozesskette zur Fertigung von Preforms finden zahlreiche handhabungsbedingte Ereignisse statt, die einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Qualität des späteren Preforms und auf die des Endproduktes haben. Diese Ereignisse führen zu einer Belastung des Textils, die durch unterschiedliche Krafterwirkungen beschrieben werden kann. Durch die handhabungsbedingten Belastungen werden Effekte im Textil optisch sichtbar. Im Textilinnern werden durch die handhabungsbedingten Belastungen Faserabweichungen sowie Fehlstellen hervorgerufen, die den späteren Evakuations- sowie Injektionsprozess beeinflussen. Die durch Handhabungsbeanspruchung erzeugten Belastungen können somit zu Imperfektionen im Textil bzw. im Preform führen. Der Grad der Imperfektion wird durch das Überschreiten der für das Produkt definierten Toleranzen bestimmt. Durch die Bewertung der Imperfektionen in der Faserstruktur durch Qualitätstoleranzen werden schließlich Defekte im Preform definiert. In Abbildung 4-2 wird der Ansatz zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Handhabung und den Defekten im Preform ganzheitlich dargestellt.

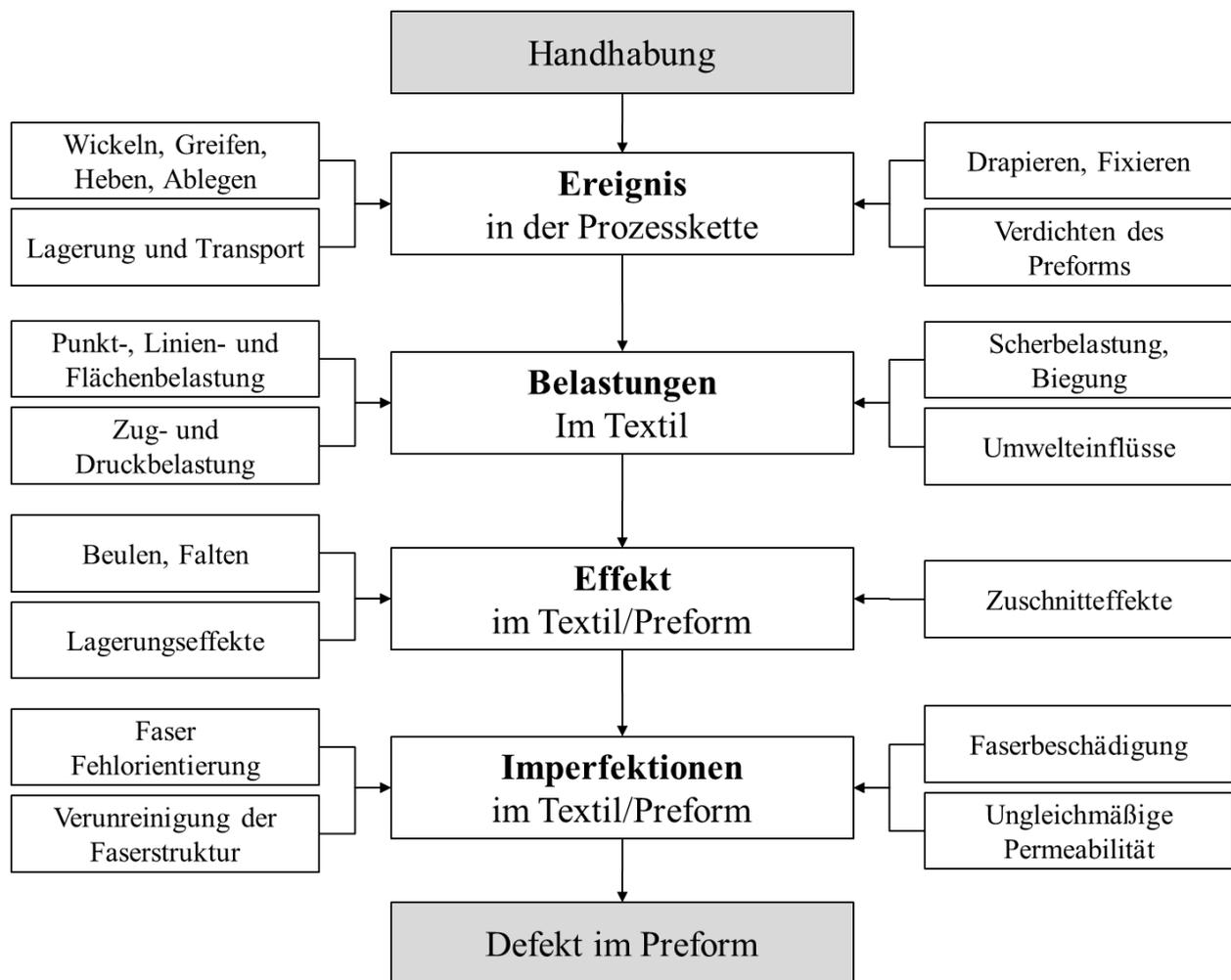


Abbildung 4-2: Erklärungsmodell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Handhabungen und Defekten in Preforms

4.2 Textile Halbzeuge als Handhabungsgegenstand

Im Folgenden soll das textile Halbzeug als Handhabungsgegenstand betrachtet werden, der im Laufe der Prozesskette zum Preform unterschiedliche Zustände annimmt. Diese unterschiedlichen Zustände haben einen entscheidenden Einfluss auf die Handhabbarkeit und die daraus resultierenden Belastungen, die auf das textile Halbzeug ausgeübt werden. In Abbildung 4-3 wird diese Betrachtung im Kontext des Erklärungsmodells zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Handhabung und den Defekten im Preform dargestellt.

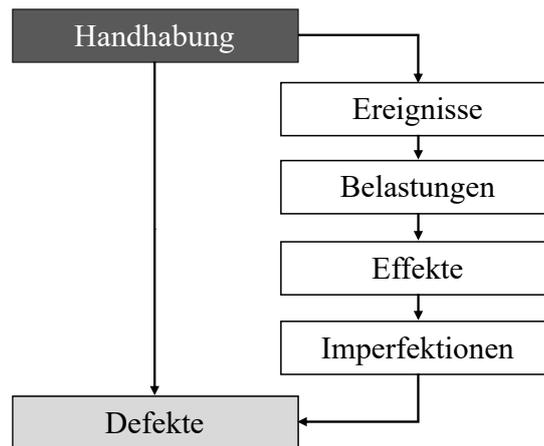


Abbildung 4-3: Einordnung der Betrachtung der textilen Halbzeuge als Handhabungsgegenstand im Kontext des Erklärungsmodells

Beim Preforming werden verschiedene textile Strukturen eingesetzt, die sich durch ihre Biegeeigenschaft, Luftdurchlässigkeit und Faserorientierung unterscheiden (vgl. [Jens02]). Das zu handhabende Material liegt in den verschiedenen Phasen der Prozesskette in unterschiedlichen Zuständen vor. Das textile Halbzeug als Handhabungsgegenstand kann in der Preforming-Prozesskette folgende Zustände einnehmen:

- Multiaxialgelege/Textilbahn
- Rollenware
- Packungseinheit
- Preform

Textile Bahnware

Multiaxialgelege bestehen aus schichtweise gestreckt abgelegten und untereinander vernähten Rovinglagen (vgl. [FlZR99], S. 223). Hierbei können unidirektionale und multiaxiale Fasergelege unterschieden werden. Unidirektionale Fasergelege bestehen aus überwiegend parallel angeordneten Rovings, die durch Schuss- oder Nähfäden zusammengehalten werden (vgl. [FlZR96], S. 54). Die besondere

Eigenschaft von Multiaxialgelegen ist die frei wählbare Faserorientierung der einzelnen Faserlagen. Multiaxiale und vernähte Fasergelege können auch als Preforms bzw. „Preformlinge“ bezeichnet werden (vgl. [FIZR96], S. 57.). Die besondere Eigenschaft von Multiaxialgelegen aus der Perspektive der Handhabung ist ihre Biegeweichheit oder Biegeschlaffheit. Diese Materialcharakteristik stellt eine entscheidende Herausforderung an die Handhabung textiler Bahnware in der Preforming-Prozesskette dar. Die Art der Vernähung hat einen direkten Einfluss auf die Handhabungs- und Drapiereigenschaften sowie auf den Fließwiderstand. Locker vernähte Multiaxialgelege weisen eine hohe Biegeweichheit und somit eine hohe Drapierfähigkeit auf. Diese Eigenschaft ist insbesondere bei der Überführung bzw. Formgebung der ebenen Textilbahn in die Bauteilkontur gewünscht. Allerdings wirkt sich die lockere Vernähung negativ auf die Fließeigenschaften des Preforms aus (vgl. [FIZR99], S. 223). Das Nähgarn schafft Gassen zwischen den gestreckt angeordneten Rovings und beeinflusst die Fließeigenschaften bei der Harzinfusion. Dieser Zielkonflikt wird durch die Handhabungseigenschaften der textilen Bahnen bei vorgeschalteten Prozessschritten, wie beim Zuschnitt und beim schichtweisen Aufbau, erweitert. Für diese Prozessschritte wäre, anders als beim Drapieren, eine hohe Biegesteifigkeit der Textilbahnen wünschenswert. Üblicherweise werden Bahnen in einer Breite von 100 Zoll (ca. 2,5 Meter) auf Textilanlagen hergestellt. Anschließend werden die Textilbahnen zu Textilrollen aufgewickelt.

Textile Rollenware

Nach der Herstellung der Gelege beim Produzenten der textilen Halbzeuge liegen die Halbzeuge in Form von Rollenware vor (vgl. [LEMS12]). Die Rollenware setzt sich aus einer zylindrischen Wickelhülse (Pappkern) und einer um die Wickelhülse gewickelten textilen Bahn zusammen (vgl. [Din600]). Die Größe der Hülsen ist hierbei von der Art und der Menge des Fasermaterials abhängig. Beispielsweise sind Glasfasern wegen ihrer geringeren Fasersteifigkeit flexibler und deshalb weniger bruchanfällig im Vergleich zu Kohlefasern. Aus diesem Grund ist bei Glasfaser-Gelegen eine Wickelhülse mit kleinerem Durchmesser ($D = 90 \text{ mm}$) als bei Kohlefasergelegen ($D = 300 \text{ mm}$) üblich (vgl. [Schü07]).

Ladungsträger für textile Halbzeuge

Für die beschädigungsfreie Lagerung und für den Transport textiler Halbzeuge wird eine Vielzahl unterschiedlicher Ladungsträger verwendet. Die Auswahl der Ladungsträger wird von der Größe und den Materialeigenschaften der verwendeten Fasern beeinflusst. Die zuvor auf Rollen gewickelte Bahnware wird zu Packeinheiten auf Paletten oder speziellen Gestellen zusammengestellt. Die

Anforderungen an Ladungsträger leiten sich sowohl aus den Normen für den Transport von Rollenware als auch aus den Erfahrungswerten der Halbzeug-Hersteller ab (vgl. [Vdi313]). Aufgrund der Vielzahl verschiedener Ladungsträger für textile Halbzeuge ist ein hoher Platzbedarf für die Lagerung und den Transport erforderlich. Zudem werden einige Ladungsträger einmalig verwendet und anschließend entsorgt, andere wiederum werden wiederverwendet. Dies führt zu einem hohen organisatorischen Aufwand für die Logistik.

Eine bestimmte Menge an zuvor einzeln verpackten Textilrollen wird auf einer Flächenpalette gestapelt und mit möglichst wenig Druck häufig ebenfalls mit Folie oder Packband an der Palette befestigt. Zur Stabilisierung befinden sich unterhalb der Rolle formschlüssige Styropor- oder Pappkanten (vgl. [Vdi200]). Die Abmessungen der Palette werden durch die Abmessungen der zu transportierenden Textilrollen vorgegeben. Ein Überstehen der Rollen über den Ladungsträger muss aufgrund der Beschädigungsgefahr vermieden werden (vgl. [Schü07]). Paletten mit Aufsätzen oder Ansteckrahmen eignen sich besonders gut zum Transport von nicht stapelfähigem Gut. Sie schützen vor Beschädigungen durch Umfallen, Herabfallen oder anderen mechanischen Einflüssen mittels einer aufgesteckten Holzumrahmung. Der Transport mit Aufsätzen kommt im Rahmen der textilen Halbzeuge unter anderem bei bereits zugeschnittenen Halbzeugen aus Kohlefasern zum Einsatz. Diese sind aufgrund hoher Preise bei gleichzeitig großer Anfälligkeit für mechanische Schäden besonders zu schützen. Abgesichert sind sie untereinander durch formschlüssige Abstandshalter und zwischenliegende Pappen (vgl. [Vdi200]). Neben der Verpackung auf Paletten können einzelne Textilrollen in speziellen Vorrichtungen hängend transportiert werden. So werden mechanische Einflüsse durch das Eigengewicht und durch den Kontakt zum Ladungsträger verhindert. Das Gebilde wird wiederum durch eine Kartenhülle geschützt. Die Rollendimensionen sind hierbei durch das Eigengewicht und der damit verbundenen Gefahr des Durchbiegens der Rolle begrenzt. Ein Nachteil dieses Transports ist die Abfallmenge im Verhältnis zur Warenmenge. Diese Ladungsträger werden überwiegend für hochpreisige Kohlenstoff-Faser-Textilien verwendet und führen zu einer kleineren Packungsdichte im Transport (vgl. [Schü07]).

Vermehrt angeboten werden auch sogenannte ‚Kits‘, bei denen der Halbzeug-Produzent einen Teil der Wertschöpfungskette der eigentlichen FKV-Produktion übernimmt. Dabei handelt es sich um die Vorkonfektionierung von Textilien, die entsprechend einem Legeplan für den Aufbau der Faserstruktur des FKV zugeschnitten und einzeln auf Wickelkerne aufgewickelt werden (vgl. [RODT14]).

4.3 Ereignisse und Belastungen in der Preforming-Prozesskette

Die Teilprozessschritte in der Preforming-Prozesskette, die eine Handhabung des textilen Halbzeugs zur Folge haben, werden in dieser Arbeit als Ereignisse beschrieben. Diese Ereignisse haben eine Belastung auf das zu handhabende Textil zur Folge. In Abbildung 4-4 wird diese Betrachtung im Kontext des Erklärungsmodells zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Handhabung und den Defekten im Preform dargestellt.

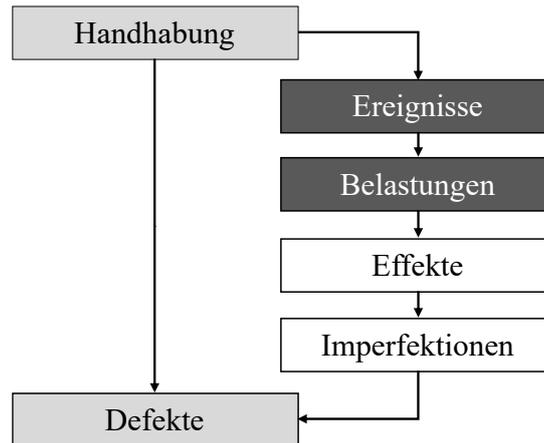


Abbildung 4-4: Einordnung der Betrachtung der Ereignisse und Belastungen im Kontext des Erklärungsmodells

Belastungen auf das textile Halbzeug, die durch Ereignisse in den Handhabungsprozessen hervorgerufen werden, haben einen Einfluss auf die Faserstruktur im Inneren des Textils. Üblicherweise konzentriert sich die Betrachtung von Belastungen auf den Formgebungs- bzw. auf den Drapierprozess. Allerdings erfolgen in der gesamten Prozesskette zur Fertigung von Preforms zwangsläufig mechanische Belastungen, die auf die Handhabung der textilen Halbzeuge im Produktions- und Logistikprozess zurückzuführen sind. Zudem sind die textilen Halbzeuge verschiedenen Umweltbelastungen ausgesetzt. In Tabelle 4-1 werden die wesentlichen Belastungen, die auf die textilen Halbzeuge bei deren Handhabung wirken, aufgelistet.

Tabelle 4-1: Auflistung der wesentlichen Belastungen auf textile Halbzeuge bei der Handhabung

<i>Belastung</i>	<i>Beschreibung</i>
Punktlast	Punktlast (Textil + Rolle) (DIN 53885)
Flächenlast	Flächenlast (Textil + Rolle) (DIN ISO 11093-9)
Linienlast	Linienlast (Rolle)
Zugbelastung	Wickeln/Umspulen
Druckbelastung	Drapieren
Scherbelastung/Biegung	Roving beim Wickeln
	Roving beim Drapieren
Umweltbelastungen	Temperatur
	Luftfeuchtigkeit
	UV-Strahlen
	Staub und Schmutz (z. B. auch Öle und Fette)
	Überlagerung/Lagerzeit

Im Folgenden werden die wesentlichen Ereignisse in der Prozesskette zur Fertigung von Preforms dargestellt, bei denen handhabungsbedingte Belastungen sichtbare Effekte im Preform hervorrufen. Die Teilprozesse, bei denen das textile Halbzeug oder der Preform unausweichlich einer Handhabung unterliegt, werden in diesem Ansatz als ‚Ereignisse‘ definiert. Dazu zählen beispielsweise das Wickeln oder Greifen von textilen Bahnen sowie das Lagern oder Transportieren von Halbzeugrollen.

Auf- und Abwickeln von Textilbahnen

Textile Halbzeuge werden als Bahnware hergestellt und müssen zu transportablen Losgrößen auf Kerne gewickelt werden. Dieser Prozess erfolgt kontinuierlich bei der Produktion von Multiaxialgelegten mittels Textilmaschinen. Bereits dieser Prozess hat einen Einfluss auf die Faserstruktur in der Textilbahn, da hier das Textil aus der Ebene in eine gekrümmte Geometrie gebracht wird. Für die Einordnung der dabei erfolgenden Effekte ist es notwendig, diesen Prozessschritt innerhalb der Systemgrenzen der Prozessbetrachtung einzubeziehen. Eine weitere Möglichkeit des Wickelns findet beim Vorkonfektionieren bzw. beim Zuschnitt von Textilbahnen in vorbestimmte, der späteren Bauteilgeometrie entsprechenden

Einzellagen statt. Auch hier wird das Textil zunächst von der Rolle abgewickelt. Schließlich werden auch vorkonfektionierte Kontur-Bahnen zu Transport- bzw. zu Lagerzwecken wieder aufgewickelt. Das Wickeln als Prozessschritt findet ebenfalls am Ende der Prozesskette zur Fertigung von Preforms statt. Beim Ablegen des textilen Zuschnitts wird das Textil von der Rolle abgewickelt und in ein Formwerkzeug oder in einen Preform-Träger abgelegt. Der Schritt des Wickelns erfolgt dabei noch vor dem eigentlichen Drapieren des Textils in die dreidimensionale Endkontur und muss von diesem differenziert werden.

Der Prozess des Auf- bzw. Abwickelns stellt einen Handhabungsprozess dar, der bereits in einem frühen Stadium der Entstehung eines Preforms das textile Halbzeug beansprucht und somit als Einflussfaktor auf die Qualität des Preforms und des späteren FKV gilt. Hier findet eine Beanspruchung der textilen Bahn statt, die mit dem Drapieren vergleichbar ist. Das Textil wird vom aufgewickelten Zustand in einen ebenen Zustand umgeformt. Dabei kommt es zu Verschiebungen in der Textilstruktur. Die textile Bahn wird auf Biegung und Scherung belastet.

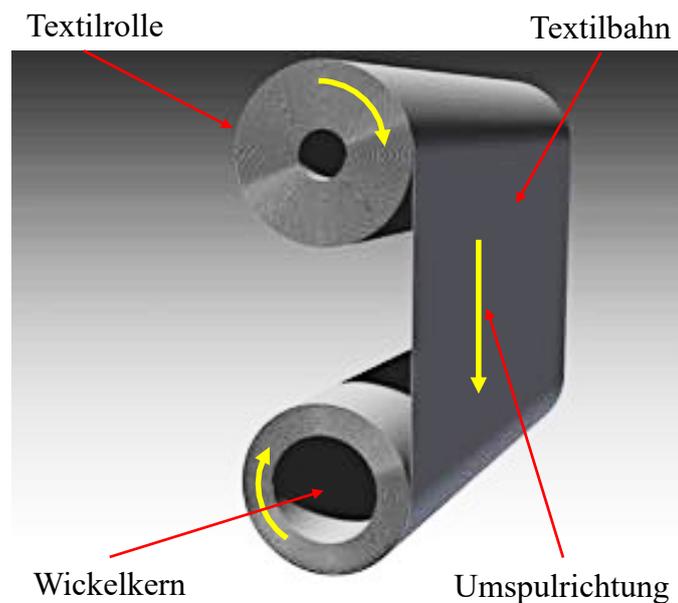


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung einer Textilbahn beim Umwickeln von der Halbzeugrolle auf einen Wickelkern

Greifen textiler Bahnen

Das Greifen und das Heben eines Textils durch punkt- oder linienförmige Greifer führen je nach Gewicht des Textils zu einer erhöhten Beanspruchung in den nicht gegriffenen Bereichen. Das Textil wird entsprechend der eigenen Gewichtskraft auf

Zug und Scherung beansprucht. Das eigentliche Greifen hinterlässt, je nach Greifprinzip, ebenfalls Greifspuren im Textil.

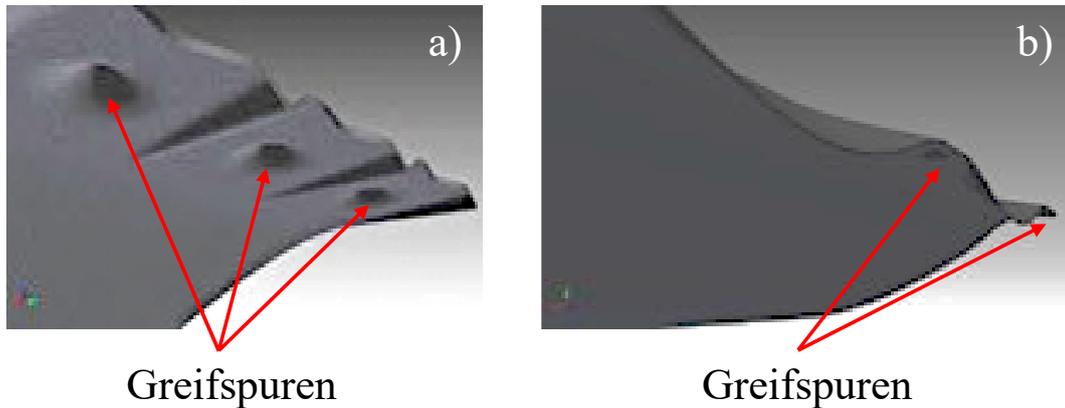


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung von Greifspuren im textilen Halbzeug beim Heben einer Textilbahn durch Greifer

Lagerung und Transport von Halbzeugrollen

In der Prozesskette zur Fertigung von Preforms werden innerbetriebliche und außerbetriebliche Transporte unterschieden. Mit den innerbetrieblichen Transporten werden Bewegungen innerhalb der betriebseigenen Hallen und Prozessen bezeichnet. Zum außerbetrieblichen Transport zählt der LKW-Transport vom Halbzeug-Hersteller zum Halbzeug-Verarbeiter (vgl. [HeHU11]). Das Lagern ist im eigentlichen Sinne kein Handhabungsprozess, führt jedoch auch zu einer Belastung des Textils durch die Gewichtskraft. Entsprechend wird das Lagern als beeinflussender Handhabungsprozess betrachtet. Unter der Lagerung wird der Prozess der Aufbewahrung von Halbzeugen bezeichnet. Die Halbzeuge werden auf dem Weg von der Fertigung zum eigentlichen Verarbeitungsprozess mehrfach in Zwischenlagern aufbewahrt.

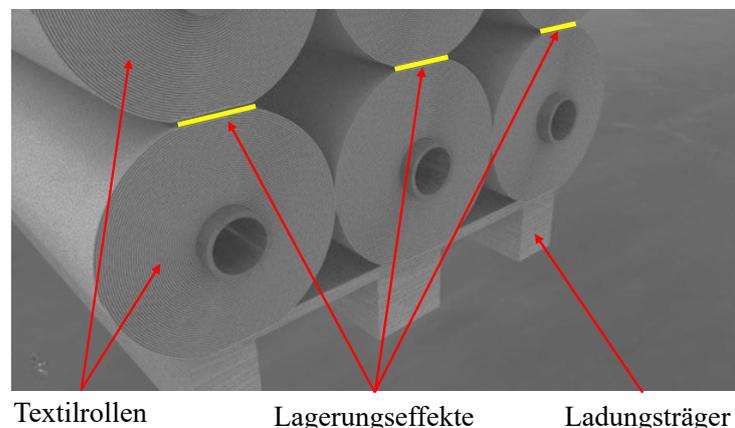


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Lagerung von Halbzeugrollen auf einer Palette

Ablegen von Textilbahnen

Beim Ablegen werden Umspuleeffekte sowie Drapiereffekte sichtbar. In der ebenen Ablage wird das Textil auf Biegung belastet und Fasern werden gegeneinander verschoben. Bei der Ablage in eine mehrfach gekrümmte Form kommt es aufgrund eines axialen Versatzes bzw. eines Winkels zwischen der Materialachse und der Ablageebene zu einer Scherbelastung im Textil. Zudem wirkt die Gewichtskraft des Textils als Verstärkung des Schereffektes. Bei der Ablage in die schiefe Ebene ohne Winkelversatz zwischen Materialachse und Ablageebene führt die Gewichtskraft des Textils ebenfalls zu einer Scherbelastung (siehe Abbildung 4-8).

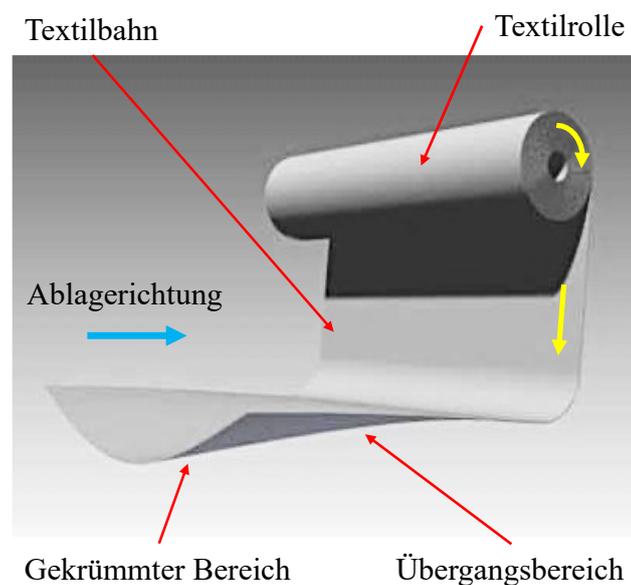


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der Verformung einer Textilbahn bei der Ablage in ein gekrümmtes Formwerkzeug

Drapieren

Geometrisch betrachtet lässt sich eine abzuwickelnde Fläche durch Biegung, ohne Dehnung oder Stauchung, auf eine ebene Fläche ausbreiten. Diese Flächen werden als einfach gekrümmt bezeichnet, da eine der beiden Hauptkrümmungen verschwindet (vgl. [Kuhn08]). Das Drapieren eines ebenen Textilschnittes in eine einfach gekrümmte Form ist ohne das Auftreten des Trellis-Effekts möglich, da dieser Vorgang lediglich eine Umkehrung der beschriebenen Abwicklung ist (vgl. [Erma07]). Der Winkel der Verstärkungsfasern zueinander ändert sich in diesem Fall nicht. Doppelt gekrümmte Flächen sind nicht abwickelbar. Das Drapieren eines Textilschnittes in eine doppelt gekrümmte Form bewirkt neben der Biegeverformung eine Schubverformung des Textils und kann eine Faltenbildung verursachen (vgl. [Glae14]).

Fixieren

Das Fixieren der textilen Lagen kann je nach Methode zu lokalen Beanspruchungen im Textil führen. Der Effekt ist mit dem Greifen mittels einzelner Greifer vergleichbar. Allerdings liegt das Textil bereits im Formwerkzeug bzw. auf einem Lagenstapel, sodass durch Reibung die lokalen Zugeffekte gemindert werden. Das Aktivieren des Binders kann dazu führen, dass die textile Lage angedrückt werden muss, sodass es zu einer flächigen Druckbeanspruchung des Textils sowie des textilen Lagenstapels kommt.

4.4 Effekte in der Preform-Struktur durch Handhabungsbelastungen

Die zuvor beschriebenen Handhabungsbelastungen hinterlassen optisch sichtbare Spuren im textilen Halbzeug, die in dieser Betrachtung als Effekte bezeichnet werden. In diesem Kapitel sollen zunächst die möglichen Effekte systematisiert und beschrieben werden. Aus diesen Effekten können mögliche Imperfektionen entstehen, die im Anschluss an dieses Kapitel beschrieben werden. In Abbildung 4-9 wird diese Betrachtung im Kontext des Erklärungsmodells zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Handhabung und den Defekten im Preform dargestellt.

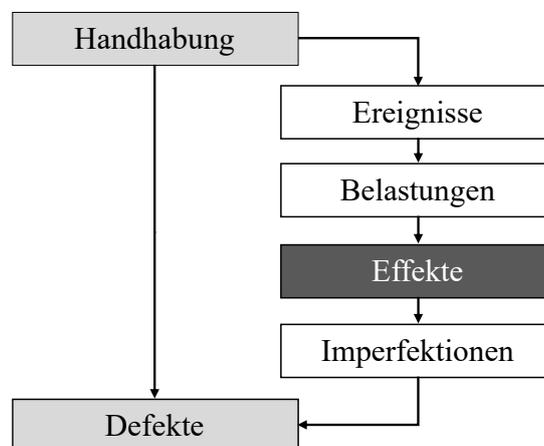


Abbildung 4-9: Einordnung der Betrachtung der Effekte im Kontext des Erklärungsmodells

4.4.1 Auslenkung aus der Textilebene

Beulen

Beim Aufbau von Preforms werden oft Beulen in textilen Halbzeugen aufgrund der biegeweichen Materialeigenschaften beobachtet. Als Beulen wird das Ausweichen einer Struktur quer zur wirkenden Last bezeichnet, sobald ein kritisches Lastniveau erreicht ist (vgl. [Ball07]). In der DIN 1993-1-7 sind Beulen ebenfalls als ein Stabilitätsversagen von plattenförmigen Bauteilen aufgrund von Druck- oder Zugspannungen beschrieben (vgl. [En00]).

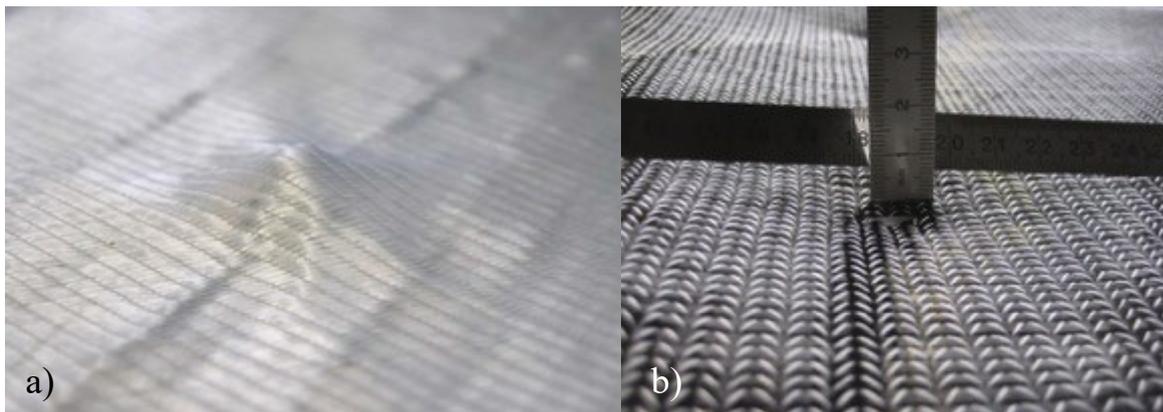
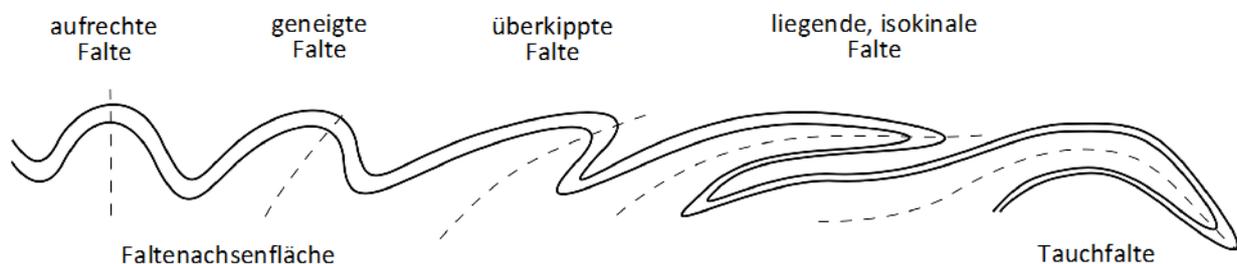


Abbildung 4-10: Beispiele für Beulen im textilen Halbzeug

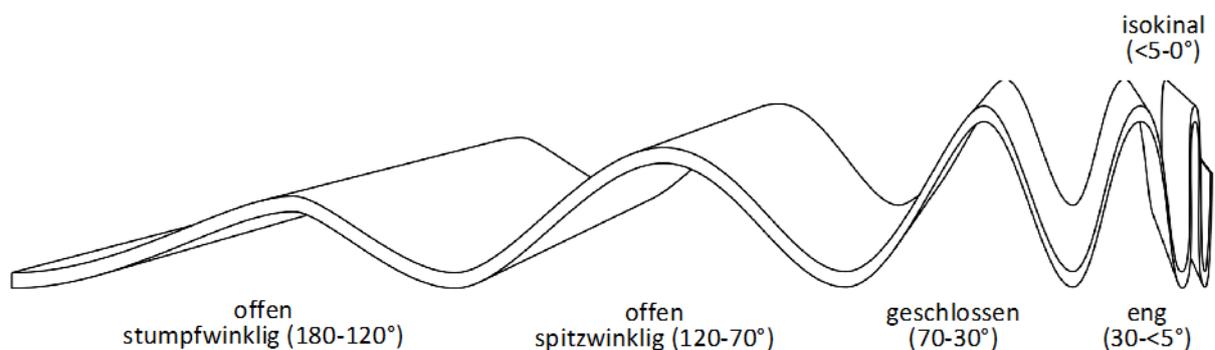
Beulen entstehen häufig an doppelgekrümmten Formen, wo die Druckspannung aufgrund der Geometrie von mehreren Seiten auf das Textil wirkt. Unter Zugspannung tritt der Effekt auf, sobald eine Kraft auf die Oberfläche des Halbzeugs einwirkt. Im Preforming-Prozess ist dies überall der Fall, wo das Halbzeug in der Form befestigt wird oder mit Händen und Füßen Kraft auf dessen Oberfläche ausgeübt wird. Nach Brökel neigen feine Gelege (250 g/m^2) eher zum Beulen als steife Gelege (1000 g/m^2). Die steifen Gelege sind kaum zu verformen und strecken sich teilweise wieder zurück in ihre Ausgangsform. Eine Beule hat keine fest definierte und genormte Form oder Geometrie, kann jedoch über verschiedene Parameter klassifiziert werden. Die auffälligsten Merkmale sind die Abmessung in x- und y-Richtung sowie die Tiefe der Beule. Andere Faktoren sind der Öffnungswinkel und der Winkel der Faserauslenkung. Die Fasern werden bei Beulen nicht nur in z-Richtung, sondern auch in x- und y-Richtung ausgelenkt. Je nach Bindertyp muss es nicht zwangsläufig zu einer Auslenkung in der Ebene kommen, sondern zur Vergrößerung des Abstandes der einzelnen Rovings. In Bereichen mit Beulenbildung kommt es zudem zu einer Einschnürung des Halbzeugs (vgl. [Brök07]).

Falten

Falten werden in der Textilindustrie als nicht gewollte Verformung beschrieben und bilden somit einen instabilen Zustand, den es zu vermeiden gilt (vgl. [Szim07]). Dieser Effekt lässt sich durch ein Ausweichen des Textils in die z-Richtung beschreiben (vgl. [Ball07]). Als Ursachen für das Entstehen von Falten werden in der Literatur häufig Schubspannung und Scherung genannt. Ab einer zu großen Scherdeformation blockieren die Fasern und es kommt zu Schubspannungen. Scherung tritt häufig beim Drapieren der Textilien in die Form auf, bei dem es zu einer Veränderung des Faserwinkels kommt. Die kritischen Werte wie der des Blockierwinkels, bei dem es zur Faltenbildung kommt, hängen stark vom Textil und dessen Bindungsart ab (vgl. [Ohle13]).



Quantitative Klassifizierung von Falten nach der Form



Quantitative Klassifizierung von Falten nach dem Öffnungswinkel

Abbildung 4-11: Klassifizierung von Falten nach der Form und dem Öffnungswinkel nach Burg ([Burg01])

Falten können in unterschiedlichen Formen vorliegen und verschiedene Charakterisierungsmerkmale haben. Abbildung 4-11 zeigt Falten mit verschiedenen Öffnungswinkeln. Je größer der Öffnungswinkel, desto stärker ist auch die Faserorientierung gestört (vgl. [Burg01]). Zur Faltenbildung kommt es, wenn

innerhalb eines textilen Halbzeugs hohe Schubspannungen infolge plastischer Verformung auftreten. Diese Faltenbildung wird in der Festigkeitslehre auch als Schubbeulen bezeichnet. Im Unterschied zu anderen Materialien können Faltungen bei Textilien in zwei orthogonalen Richtungen gleichzeitig auftreten, was bei anderen Materialien nicht möglich ist, da bei Faltungen in einer Richtung immer eine Versteifung eintritt und somit die Faltung in einer zweiten Richtung beeinträchtigt wird (vgl. [Erma07]). Eine Falte stellt eine Imperfektion dar, die im späteren Laminataufbau zu einer Schwächung des Bauteils führen kann. Bei der Aneinanderreihung von mehreren Falten im Halbzeug wird diese dabei auftretende Imperfektion auch als Welle bezeichnet. Wellen führen aufgrund der Auslenkung zu einer Verkürzung des Halbzeugs in dessen äußeren Abmessungen. Entstehungsgründe für Wellen können Spannungen im Halbzeug sein, die durch die Fixierung entstehen. Weitere Ursachen für die Bildung von Wellen, ähnlich der Faltenentstehung, sind ein Überschreiten des Blockierwinkels beim Drapieren und das Auftreten von Schubspannung durch äußere Einwirkungen (vgl. [Erma07]).

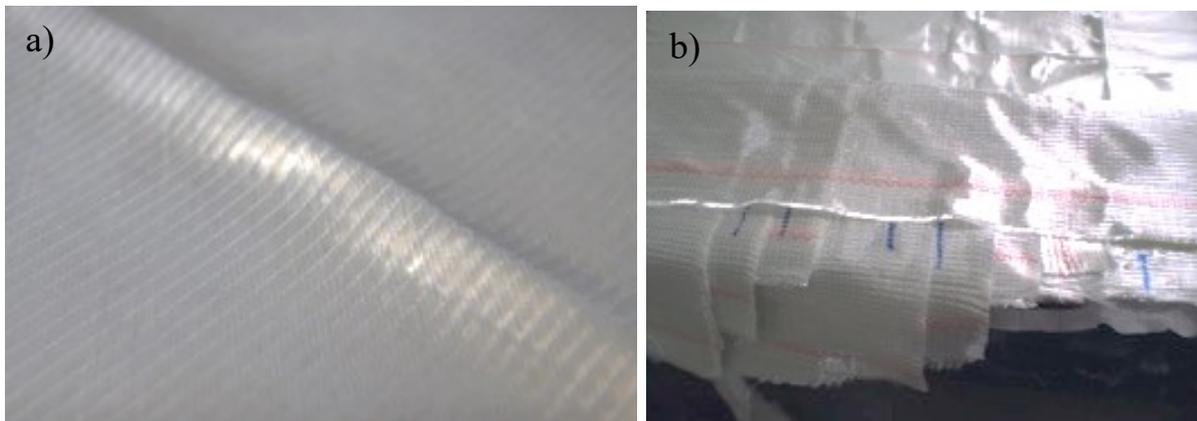


Abbildung 4-12: Beispiele für Falten im textilen Halbzeug

Druckstellen im textilen Halbzeug

Druckstellen entstehen durch Druckbeanspruchung der Faserhalbzeuge senkrecht zur Faserachse. Dabei kommt es zu einer lokal begrenzten Faserfehlorientierung sowie zu einer Rovingkompression. Eindrücke entstehen durch das Einwirken von Flächenbelastung durch beispielsweise das Eigengewicht der Textilrolle bei der Lagerung oder beim Transport (siehe Abbildung 4-13).

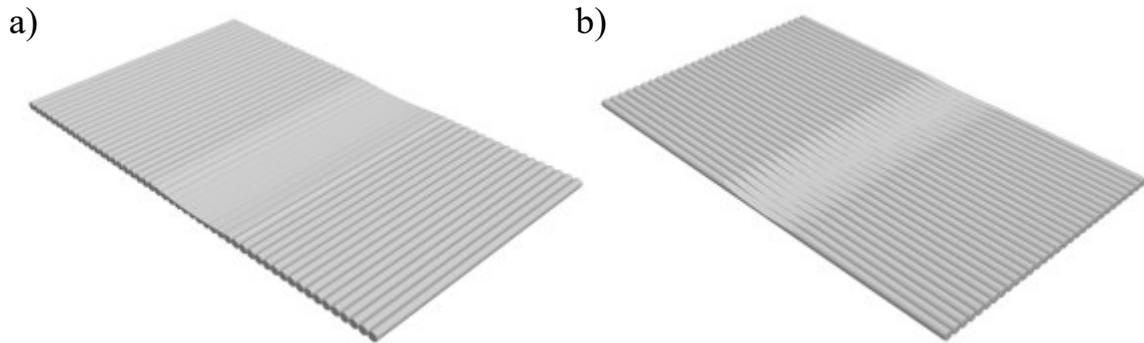


Abbildung 4-13: Druckstelle a) längs der Fasern und b) quer zu den Fasern

4.4.2 Äußere Formabweichungen

Unsaubere Schnittkante

Eine unsaubere Schnittkante kann als Formabweichung im Sinne einer nicht erreichten Geradheit aufgefasst werden. Jedoch ist die Schnittkantenqualität genauer zu betrachten, da diese unter anderem vom gewählten Zuschnittprinzip abhängt.

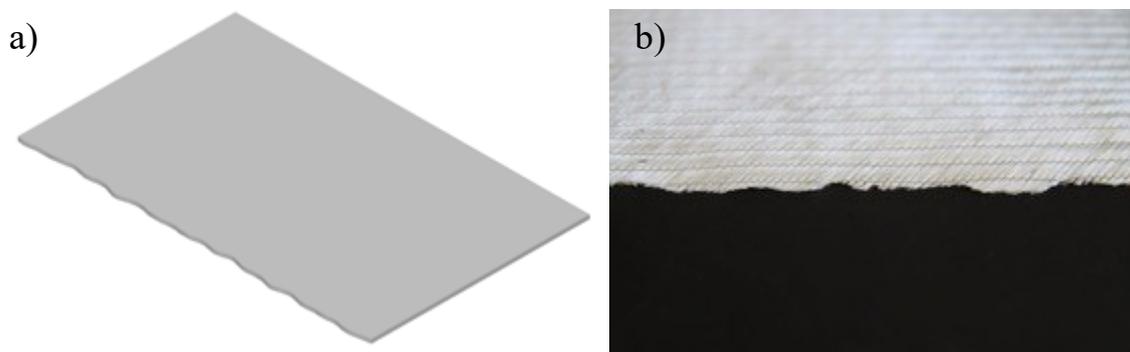


Abbildung 4-14: Unsaubere Schnittkante

Je nachdem, welche Orientierung die Fasern zur Schnittkante haben, kann eine Abweichung des Zuschnitts von der idealen Schnittkante unterschiedliche Auswirkungen haben. Liegen die Fasern senkrecht zur Schnittkante, so werden die Fasern in ihrer Länge verändert, wie in Abbildung 4-15 a) zu sehen ist. Liegen die Fasern dagegen parallel zur Schnittkante, so bedeutet ein Abweichen von der idealen Schnittkante eine Durchtrennung der Fasern, wie Abbildung 4-15 b) zeigt.

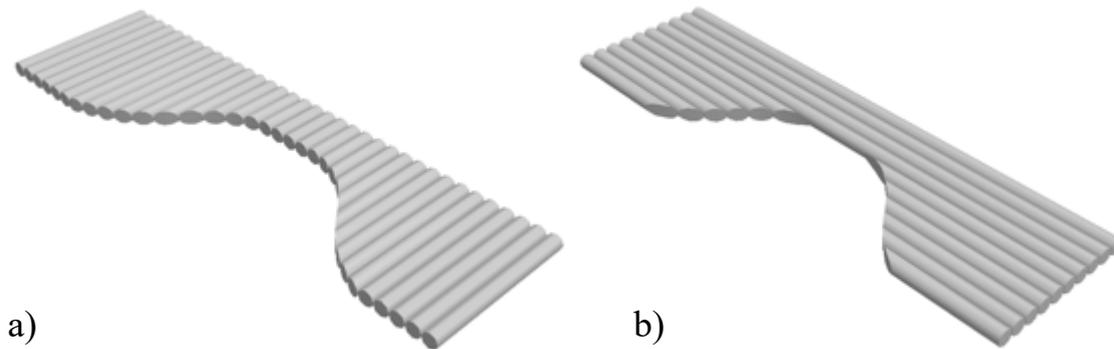


Abbildung 4-15: Auswirkung der Schnittkante auf die Fasern. a) Schnittkante senkrecht zu den Fasern b) Schnittkante parallel zu den Fasern

Ausfransen der Bahnkante (Pinsel-Effekt)

Beim Ausfransen werden die Fasern an der Halbzeugkante ausgelenkt und liegen dann am Rand nicht mehr in gestreckter Form vor, wie in Abbildung 4-16 zu sehen ist. Einen Schutz vor Ausfransen kann eine verfestigte Randzone geben. Bei der automatisierten Verarbeitung von textilen Halbzeugen stellt der ‚Pinsel-Effekt‘ eine besondere Herausforderung dar. Besonders die Positionierung von Textilmustern wird durch den undefinierten Randbereich erschwert.

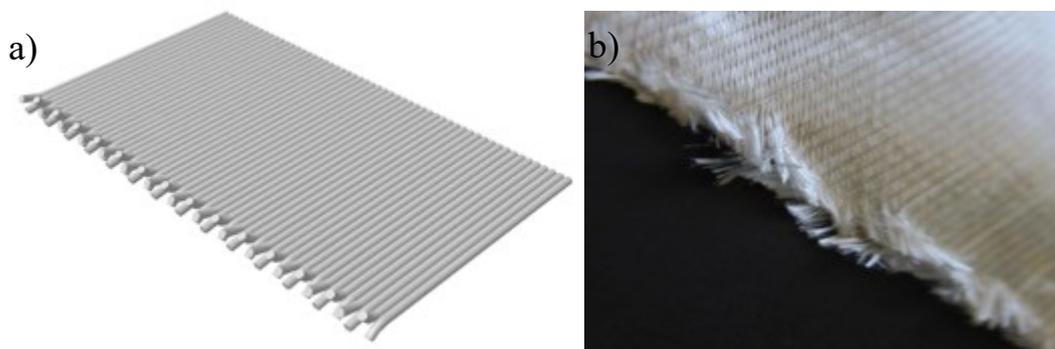


Abbildung 4-16: Ausfransen der Faserkante

Herausgezogene Faser

Wirken Zugkräfte einseitig auf eine Faser im textilen Halbzeug, so kann diese herausgezogen werden. Beim Herausziehen findet eine Verschiebung der Faser längs der Faserachse statt. Entweder werden nur einzelne Fasern aus dem Roving gezogen oder aber der gesamte Roving. Das Herausziehen von Fasern kann während der Handhabung oder der Verarbeitung von Faserhalbzeugen vorkommen. So kann

es beim Vernähprozess von Preforms vorkommen, dass der Nähfaden durch Reibhaftung Fasern herauszieht. Auch beim Zuschneiden von textilen Halbzeugen können Fasern herausgezogen werden. Eine herausgezogene Faser bedeutet eine Abweichung der Faserkante von der gewünschten Geometrie und darüber hinaus ein Fehlen der Faser im FKV. Dieser Fehler wird in Abbildung 4-17 anhand eines herausgezogenen Rovings dargestellt.

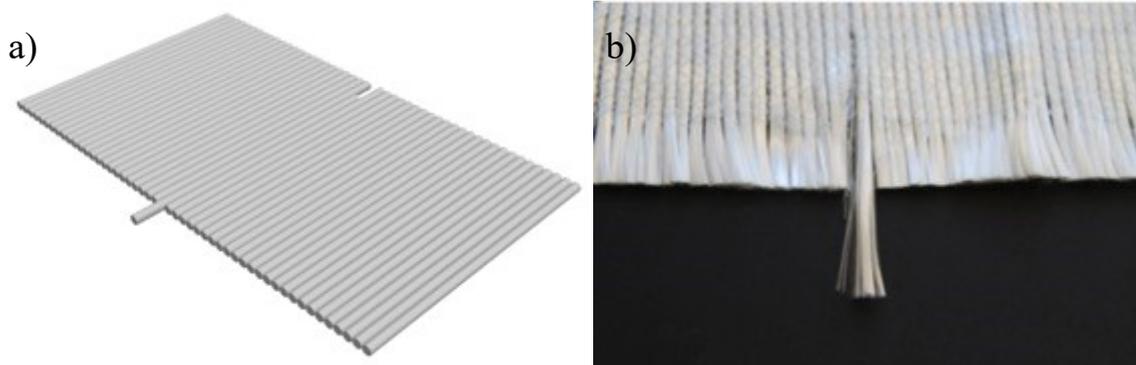


Abbildung 4-17: Herausgezogener Roving

4.5 Imperfektionen im Preform

Eine Imperfektion im Preform kann prinzipiell nur dann identifiziert werden, sofern eine Abweichung von Konstruktions- bzw. Fertigungstoleranzen vorliegt. Diese Toleranzen beziehen sich im Wesentlichen auf Form- und Lagetoleranzen des Preforms. Erst bei einer Abweichung kann von einem Defekt gesprochen werden. In Abbildung 4-18 wird diese Betrachtung im Kontext des Erklärungsmodells zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Handhabung und den Defekten im Preform dargestellt.

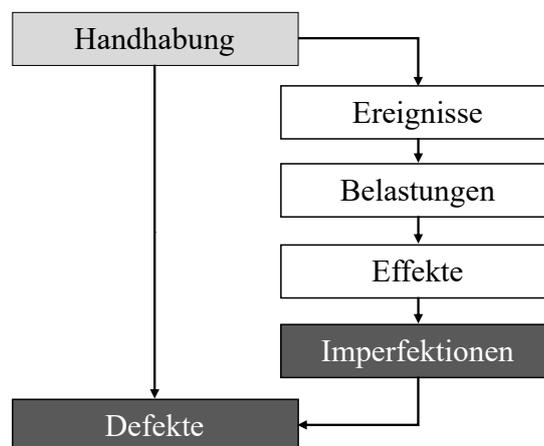


Abbildung 4-18: Einordnung der Betrachtung der Imperfektionen im Kontext des Erklärungsmodells

Lokale Änderungen der Faseranordnung und des Faservolumengehalts haben einen direkten Einfluss auf die Permeabilität des Preforms. Eine lokal unterschiedliche Permeabilität resultiert in unterschiedlichen Harzflusseigenschaften und kann zu Lufteinschlüssen oder trockenen Stellen im FKV führen. Bei einer geringen Umformung bzw. Drapierung des Textils entstehen zunächst Gaps zwischen den Rovings. Bei größerer Umformung können sich zusätzlich durch die Zug- und Druckbeanspruchung Schlaufen oder Falten im Textil bilden. Die anschließende Verdichtung des Textilaufbaus durch ein Formwerkzeug oder durch die Vakuumfolie kann oberflächlich betrachtet zu einer Kompensation der Fehlstellen führen. Diese Fehlstellen haben jedoch einen Einfluss auf die Tränkbarkeit des Preforms. Bei Rovinganhäufungen können sich beim Injizieren trockene Stellen im Laminat bilden. Roving-Gaps führen wiederum zu Harzanhäufungen. Darüber hinaus führen Faserfehlorientierungen zu einer unvorhersehbaren Ausbreitung der Harzfront. Wird diese Thematik aus dem Blickwinkel der Drapierfähigkeit von Textilien betrachtet, so sind die zuvor betrachteten Effekte gewünscht. Nur so kann ein textiles Halbzeug eine mehrfach gekrümmte Formgeometrie annehmen. Häufig werden dabei auch die Drapierparameter der textilen Halbzeuge an die Komplexität der gewünschten Endkontur angepasst. Die in dieser Arbeit betrachteten Effekte fokussieren sich auf nichtvorhersehbare Imperfektionen, die sich durch die Handhabung in der gesamten Prozesskette ergeben.

Imperfektionen in der Preform-Struktur

Eine Imperfektion im textilen Halbzeug beschreibt einen von idealen Eigenschaften abweichenden Zustand. Ob die Imperfektion einen für das Produkt qualitativen Mangel oder einen Defekt bedeutet, kann nur durch einen Maßstab und durch die dazugehörigen Toleranzen bzw. Qualitätskennzahlen bestimmt werden. Die geforderten Toleranzen sind produktspezifisch und deshalb nicht pauschal anwendbar.

Durch die zahlreichen Handhabungsprozesse bei der Herstellung von Preforms lassen sich Imperfektionen in der textilen Faserstruktur zwangsläufig nicht vermeiden. Zum einen entstehen Imperfektionen durch das eigentliche Drapieren, d. h. durch das Überführen der textilen Halbzeuge aus der 2D-Ebene in die dreidimensionale endkonturnahe Bauteilgeometrie. Zum anderen können Imperfektionen der textilen Struktur durch Handhabungsprozesse in der vorgelagerten Prozesskette durch beispielsweise Hebe-, Lager- oder Transportprozesse entstehen. Selbst das Auf- und Abwickeln eines Textils führen zu einer Scherbelastung der Faserstruktur. Deshalb müssen die durch Handhabungsprozesse hervorgerufenen Imperfektionen in der Prozesskette vermieden werden, damit das spätere FKV-Produkt die höchstmögliche Qualität

aufweist. Hierzu ist es zunächst notwendig, einen Überblick über die wesentlichen Imperfektionen zu erhalten.

In der Literatur werden Imperfektionen der textilen Faserstruktur in unterschiedlicher Art behandelt. Tendenziell liegt die Perspektive bei der Betrachtung von Imperfektionen auf dem Endprodukt, dem FKV. Hier werden Defekte im FKV, die auf fehlerhafte Faserstrukturen zurückzuführen sind, am deutlichsten. Auch das Untersuchen und das Prüfen der Qualität des FKV sind durch Messverfahren wie Ultraschall oder Thermografie einfacher als bei nicht imprägnierten, trockenen Preforms. In dieser Arbeit werden die folgenden wesentlichen Imperfektionen unterschieden:

- Faserfehlorientierung
- Faserbeschädigung
- Verunreinigung der Faserstruktur
- Ungleichmäßige Permeabilität

4.5.1 Faserfehlorientierung

Faserwelligkeit/Ondulation

Die in Belastungsrichtung liegenden Fasern nehmen den Hauptteil der Kräfte im Faserverbund auf. Voraussetzung für diese Annahme ist eine gestreckte Verteilung der Fasern in der Matrix. Nicht gestreckte Fasern bilden einen Defekt, der als Faserwelligkeit oder Ondulation bezeichnet wird und oftmals eine Steifigkeits- und Druckfestigkeitsreduzierung zur Folge hat. Der Defekt der Faserwelligkeit befindet sich meist in der Laminebene und wird daher auch als zweidimensionale Umlenkung bezeichnet. Abbildung 4-19 zeigt die gewünschte (Soll) und die tatsächliche (Ist) Faserorientierung in einem FKV (vgl. [Mose92]).

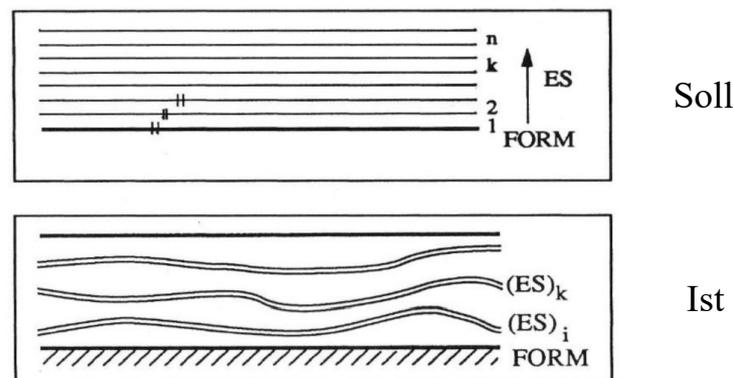


Abbildung 4-19: Soll- und Ist-Faserorientierung in FKV nach Moser (vgl. [Mose92])

Faserwelligkeit kann verschiedene Ursachen haben. Cox et al. beschäftigen sich beispielsweise mit dem Überlappen und dem Auseinanderdrücken der Fasern beim Ablegen des Halbzeugs in eine mehrfach gekrümmte Form (vgl. [CoCF97]). Ondulationen können ebenfalls beim Anpressen des ebenen Halbzeugs in die Form entstehen. Ein weiterer Grund für Faserwelligkeit ist die Änderung des Querschnittes der Fasern. Die einzelnen Fasern haben über die Länge keinen konstanten Querschnitt, sodass es vereinzelt zu unterschiedlichen Faserabständen kommen kann (vgl. [CoCF97]). Wiederholt entstehen Ondulationen ebenso während der Handhabung, beispielsweise beim Platzieren des Halbzeugs mit der Hand in die Form. Dabei liegt die eine Hälfte des Halbzeugs in der Form, die andere Hälfte wird unter manueller Krafteinwirkung ausgerichtet. Die dabei entstehende Ondulation verteilt sich auf die komplette Textillage. Faserwelligkeit kann sowohl einzeln als auch regelmäßig vorliegen. Eine einzeln vorliegende Faserwelligkeit entsteht beispielsweise durch die Fixierung des Halbzeugs in der Form (vgl. [Brök07]). In Abbildung 4-20 wird beispielhaft die Roving- und Faserwelligkeit in Folge der Handhabung beim Lagenaufbau dargestellt.

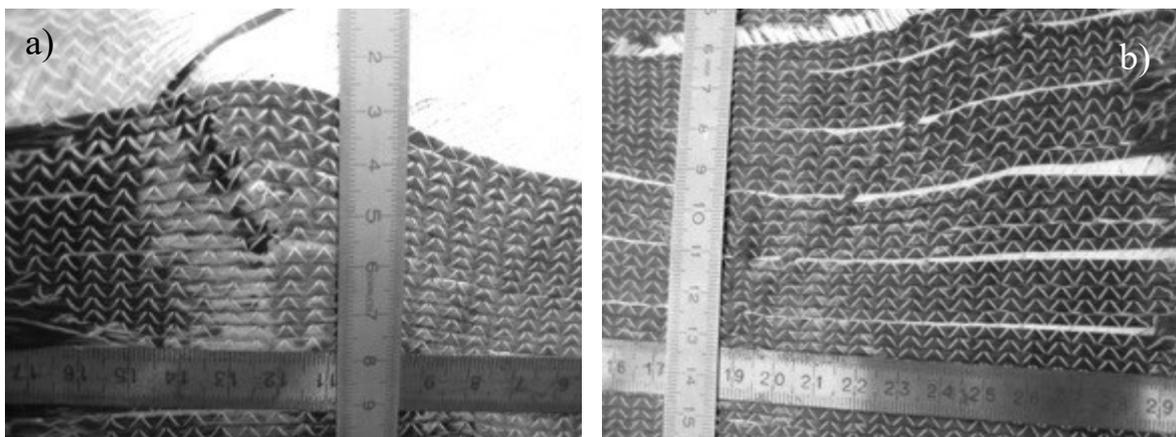


Abbildung 4-20: Roving-/Faserwelligkeit beim Lagenaufbau eines Preforms

Faserfehlorientierung durch Lagenverschiebung

Die Lagenverschiebung, auch Zwischengleiten genannt, wird bei der Umformung eines textilen Lagenstapels zu einem endkonturnahen Preform beobachtet (vgl. [Sköc13]). Hierbei wirken Reibkräfte zwischen den einzelnen Lagen und müssen bei einer Umformung des Stapels in eine 3D-Kontur überwunden werden. Das Umformen kann zu einer unkontrollierten Lagenverschiebung führen, wodurch es zu einer Faserfehlorientierung kommen kann. Das Ausmaß der Lagenverschiebung ist abhängig von der Geometrie der Halbzeuge, der Rovingausrichtung, dem Reibungskoeffizienten zwischen den einzelnen Halbzeuglagen sowie der Endkontur (vgl. [Ohle13]).

Schlaufenbildung

Ein weiterer möglicher Textilfehler ist die Schlaufenbildung. In der Prozesskette kann es zu Zug- und Druckbeanspruchungen im Textil kommen, aus der eine Schlaufenbildung des Rovings resultieren kann. Die Verstärkungsfasern, die sich auf der Druckseite befinden, werden beim Drapieren von einer Druckspannung beaufschlagt. Damit diese Druckspannung abgebaut werden kann, erfolgt ein Ausknicken der einzelnen Rovings aus den Verstärkungslagen. Das Ausknicken von Rovings bzw. die Schlaufenbildung kann durch den Abstand der Wirkfadenmaschen bei multiaxialen Gelegen beeinflusst werden (vgl. [Erma07]).

Faserbündelschlupf

Eine weitere Faserfehlerorientierung wird durch den Faserbündelschlupf, der auch Rovingverschiebung genannt wird, beschrieben. Durch Handhabungsprozesse wirken lokal größere Zugkräfte auf die Halbzeuge und somit auf einzelne Rovings. Damit wirkt die Belastung auf eine geringe Anzahl von Rovings. Hierdurch werden die Rovings entlang der Längsachse verschoben, sofern die belastenden Kräfte größer sind als die Reibkräfte zwischen den einzelnen Faserbündeln und den Wirkflächen (vgl. [Ohl13]).

Form- und Maßabweichungen

Fehlerhaft zugeschnittene Textillagen führen zu Form- und Maßabweichungen in Preforms (siehe Abbildung 4-21). Dies führt zu falsch angeordneten oder orientierten Faserbahnen sowie zu kurzen Fasern. Ein weiterer Grund für eine Form- oder Maßabweichung kann eine falsche Lageposition der Textillage im Preform sein.

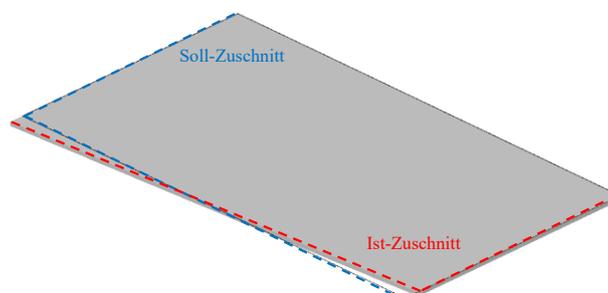


Abbildung 4-21: Fehlerhafter Zuschnitt

Fehlerhafter Binder

Textile Binderfäden oder auch chemische Binder werden verwendet, um der textilen Struktur zwischen den einzelnen Textillagen Halt zu geben. Ein Defekt des Binders kann durch Handhabungsprozesse sowie bei der Herstellung des Halbzeugs entstehen. Durch eine fehlende oder defekte Naht bzw. durch das Versagen des chemischen Binders kann es zum Verrutschen oder Herausziehen von Faserbündeln aus dem Halbzeug kommen. Das Verrutschen der Faser hat häufig eine Winkeländerung der Faser zur Folge, womit die Faserorientierung gestört ist.

4.5.2 Faserbeschädigung

Rovingkompression

Die Rovingkompression stellt eine Deformation des Rovingquerschnitts in Folge äußerer Belastung senkrecht zur Textilebene dar. Vereinfacht dargestellt hat ein Roving in seinem Ausgangszustand einen linsenförmigen Querschnitt. Durch eine Kompression kommt es zu einer Änderung des Querschnitts. Wird die maximale Rovingkompression überschritten, wölbt sich das Textil auf. Die Rovingkompression kann zu einer Beeinträchtigung des Harzflusses im Infusionsprozess führen (vgl. [Sköc13]).

Scherung und Streckung im Textil

Durch das Drapieren von Multiaxialgelegen in eine dreidimensionale Endkontur kommt es zur Scherung und zur Streckung von Faserbündeln bzw. einzelner Fasern. Die Scherung beginnt, sobald die angreifenden Zugkräfte nicht dieselbe Hauptrichtung besitzen wie die Verstärkungsfasern. Die Scherung mit einer bestimmten Winkeländerung verläuft so lange, bis die Verstärkungsfasern in Richtung der angreifenden Kraft liegen oder bis ein maximaler Scherwinkel erreicht ist. Wird der maximale Winkel erreicht, kommt es bei weiterer Krafteinleitung zur Faltenbildung. Neben der Scherung gilt auch die Streckung als eine wesentliche Deformation der textilen Halbzeuge in Folge der Drapierung. Das Drapieren eines Geleges in eine dreidimensionale Geometrie führt zu einer Flächenänderung der Textillage. Infolgedessen wirkt eine Zugbelastung auf die Faserbündel und es kommt zu einer Faserstreckung. Bei der Streckung von Faserbündeln werden zudem Faserkrümmungen durch Zugbelastungen verändert. Eine Überlagerung beider Effekte (Scherung und Streckung) tritt prinzipiell bei jeder dreidimensionalen Umformung auf (vgl. [Erma07]).

Faserbeschädigung durch Rovingbiegung

Insbesondere bei auf Rollen gewickelten Textilbahnen kommt es zwangsläufig zur Rovingbiegung. Durch die Biegung des Rovings über seinen zulässigen Biegeradius kann es zum Bruch einzelner Filamente im Roving kommen. Dies beeinflusst auch den Durchmesser des zulässigen Wickelkerns. So müssen beispielsweise Kohlenstofffaser-Textilien auf größeren Wickelkernen ($D = 300 \text{ mm}$) gewickelt werden als Glasfaser-Textilien ($D = 90 \text{ mm}$). Wird ein textiles Halbzeug zu einem dreidimensionalen Preform geformt, kommt es ebenfalls zu einer Biegung des Rovings aufgrund seines Eigengewichtes. Diese Biegung tritt so lange auf, wie die Gegenkraft der Werkzeugform wirkt (vgl. [Sköc13]).

Verunreinigungen der textilen Faserstruktur

Verunreinigung oder Verschmutzung im ursprünglichen Sinne beschreibt eine Beeinflussung durch Fremdstoffe, die sich in oder auf einer Stoffmenge befinden. Bei der Herstellung von Preforms liegen die häufigsten Verschmutzungen jedoch nicht in Form eines Fremdstoffs vor, sondern in Form von Faserresten (vgl. [Mien13]). Ebenfalls zu beobachten sind Fremdstoffe, die auf das Fixieren von Faserlagen durch mechanische Verbinder zurückzuführen sind. Abhängig von der Größe der Verunreinigung kann es zu einer Faserfehlorientierung, zu Faserbeschädigungen sowie zu Harzansammlungen an den verunreinigten Stellen kommen. Die Verunreinigungen können ebenfalls den Prozess der Harztränkung negativ beeinflussen und zu Lufteinschlüssen sowie zu trockenen Stellen im Laminat führen. Die textilen Halbzeuge erfahren innerhalb der gesamten Prozesskette der Preform-Fertigung zahlreiche Handhabungsprozesse und daraus resultierende Verunreinigungen. Textile Halbzeuge können auch durch chemische Belastungen beschädigt werden (vgl. [Wort96]).

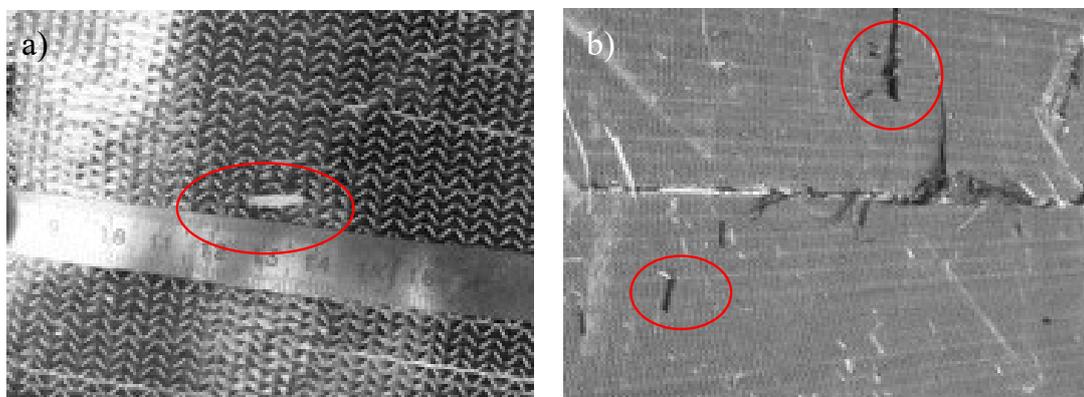


Abbildung 4-22: Verunreinigungen im textilen Aufbau eines Preforms, a) Heftnadel zum Fixieren des Preforms, b) Schnittreste (Rovingverschnitt)

5 Analyse von handhabungsbedingten Ereignissen in der Prozesskette

5.1 Motivation und Bezug zum Erklärungsmodell

Um den Einfluss der Handhabung auf die Qualität von Preforms zu ermitteln, muss der Prozess, den der Preform und seine Vorstufen durchlaufen, vollständig analysiert werden. Wie in Kapitel 4 beschrieben, werden textile Halbzeuge durch zahlreiche Handhabungsprozesse beansprucht, die sichtbare und nicht sichtbare Handhabungseffekte hinterlassen. Die methodische Grundlage bildet im Wesentlichen der Ansatz der Prozessanalyse nach *Becker* mit dem Fokus auf die Definition der Aufgabenstellung, mit der Eingrenzung des zu betrachteten Prozesses sowie mit der Ermittlung der relevanten Prozessmerkmale (vgl. [Beck05]). Die in dieser Arbeit durchgeführte Prozessanalyse verfolgt den Ansatz, den Weg des textilen Halbzeugs von der Textilproduktion bis hin zur FKV-Herstellung über räumlich getrennte Prozessteilnehmer zu verfolgen und zu einer zusammenhängenden Prozesskette zusammenzufügen.

Das Ziel hierbei ist die Ermittlung qualitätsbeeinflussender Handhabungseffekte auf das textile Halbzeug, die einen möglichen Einfluss auf den späteren FKV ausüben. Auf dieser Grundlage soll ein transparentes Bild geschaffen werden, welche Handhabungseffekte an welchem Ort auftreten. Repräsentative Handhabungseffekte sollen im Anschluss daran in einer experimentellen Untersuchung näher betrachtet werden. Durch eine Untersuchung quantitativer Parameter soll geprüft werden, ob es einen Zusammenhang zwischen Handhabungseffekten und der Qualität von Preforms gibt und wie stark dieser Effekt ausgeprägt ist.

5.2 Prozesskette zur Fertigung von Preforms für FKV

Zunächst ist es notwendig, die gesamte Preform-Prozesskette zu erfassen, und zwar so, dass die üblichen Schnittstellen, die durch die Abgrenzung der Prozessteilnehmer definiert werden, aufgebrochen werden. Entsprechend einer für die Windindustrie marktüblichen Lieferkette für FKV können die Prozessteilnehmer in drei wesentliche Gruppen untergliedert werden: Textilproduzent, Logistik sowie FKV-Produzent. Somit sind die Systemgrenzen dieser Prozessanalyse durch die Textilproduktion zum einen und die Preform-Produktion zum anderen definiert (Abbildung 5-1).

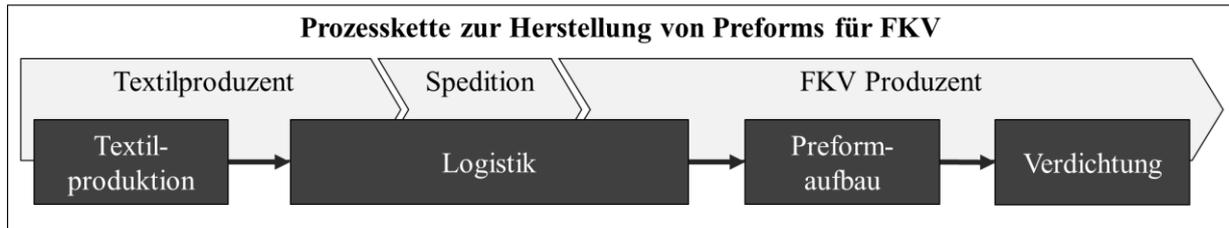


Abbildung 5-1: Systemgrenze für die Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV

Die Prozessanalyse wird am Beispiel der Produktion von Rotorblättern für Windenergieanlagen durchgeführt, da hier das Preforming mit trockenen Textilhalbzeugen zum Standardprozess gehört (vgl. [KKMG16]). Aufbauend darauf soll die gesamte Preform-Prozesskette unter dem Gesichtspunkt qualitätsbeeinflussender Ereignisse, die speziell durch Handhabungsprozesse hervorgerufen werden, untersucht werden. Da sich dieser Gesamtprozess auf verschiedene Prozessteilnehmer verteilt, wurden einzelne Prozessanalysen durchgeführt. Bedingt durch unterschiedliche Zugänge zu prozess- und qualitätsrelevanten Informationen der einzelnen Prozessteilnehmer unterliegt die in dieser Arbeit erzeugte Prozesskette einer unterschiedlichen Tiefe. Zudem steht die Prozesserfassung nicht in zeitlich sequenziellem Bezug. Es werden die folgenden handhabungsbedingten Ereignisse in der Prozesskette erfasst:

Wickeln	Drapieren
Greifen	Fixieren
Lagerung	Verdichten

Für eine qualitative Bewertung der Auswirkungen der Ereignisse in der Prozesskette zur Herstellung von Preforms werden die folgenden Bewertungskriterien herangezogen. Diese Kriterien verstehen sich als rein qualitative Kriterien und zeichnen sich durch optisch sichtbare Merkmale aus.

Tabelle 5-1: Bewertungskriterien für die Erfassung von Handhabungseffekten bei der Durchführung der Prozessanalyse

<i>Textilfehler</i>	<i>Optische Merkmale</i>
Faserfehlorientierung	- Auslenkung aus der Textilebene (Falten, Beulen) - Faserverschiebung - Wicklungsqualität Bahnware auf dem Wickelkern
Faserdefekt	- Beschädigung der Textilbahn/-rolle - Zustand der Verpackung der Halbzeugrollen
Faserverschmutzung	- Verschmutzung der Textilbahn/-rolle

Bei der Prozessanalyse soll die Prozesskette in Bezug auf die genannten Kriterien beleuchtet werden und so einen qualitativen Gesamtüberblick über die Ereignisse und deren mögliche Folgen für die Qualität des Preforms auf seinem Weg von der Entstehung der Textilbahn bis zum verdichteten Preform abbilden. Zudem soll die Prozesskette unter den besonderen Randbedingungen der Preformherstellung erstmalig sichtbar gemacht werden. Die gesamte Prozesskette durchstößt die Systemgrenzen verschiedener räumlich voneinander getrennter Prozessteilnehmer, wobei der Halbzeug-Zustand des zu handhabenden Textils zwischen Textilbahn, Textilrolle sowie Packungseinheit variiert (Abbildung 5-2).

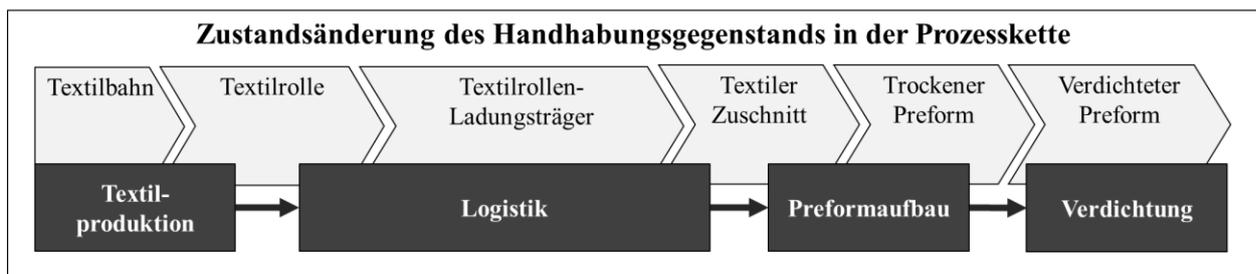


Abbildung 5-2: Zustandsänderung des Handhabungsgegenstands in der Prozesskette (Textile Bahn, Textilrolle, Textilrollen-Ladungsträger, Zuschnitt, Preform)

Die Bewertungskriterien werden auf optisch sichtbare Merkmale reduziert, die in allen Halbzeug-Zuständen sowie bei allen Prozessteilnehmern erfassbar sind. Auf dieser Grundlage kann anschließend in Erfahrung gebracht werden, in welchen Teilprozessschritten das Textil handhabungsbedingten Belastungen ausgesetzt wird. Hierdurch können mögliche Folgen auf die Qualität des Preforms abgeleitet werden.

In Abbildung 5-3 ist die gesamte Prozesskette zur Preformherstellung dargestellt, die auf der Grundlage der Prozessanalyse entstanden ist.

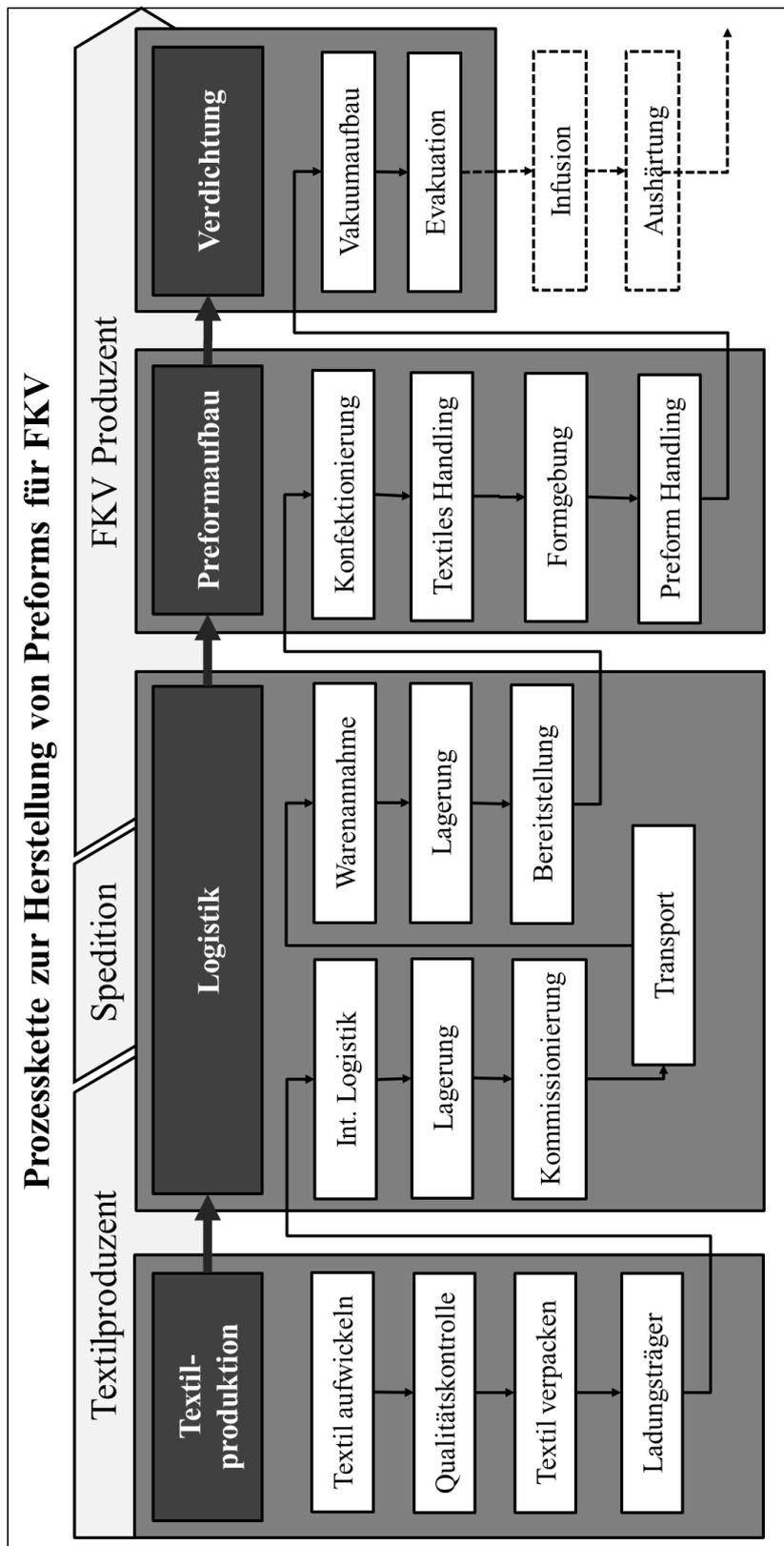


Abbildung 5-3 Gesamtübersicht der Preforming-Prozesskette (Ergebnis der Prozessanalyse)

Im Folgenden werden die einzelnen Teilprozesse der in Abbildung 5-3 dargestellten Prozesskette unter handhabungsrelevanten Bewertungskriterien analysiert. Ziel dieser Analyse ist es, herauszufinden, welche handhabungsbedingten Belastungen ein textiles Halbzeug auf seinem Weg zum Preform bzw. zum fertigen FKV-Produkt erfährt. Gemäß dem in Kapitel 4 vorgestellten Ansatz zur Bewertung des Einflusses von Handhabungseffekten werden zunächst die Bewertungskriterien für die Analyse der Prozesskette ermittelt. Anschließend werden die in Kapitel 4.1 definierten handhabungsbedingten Ereignisse in den Teilprozessen bei den räumlich getrennten Prozessteilnehmern analysiert und auf ihre Relevanz für die Qualität von FKV bewertet. Diese Bewertung dient als Grundlage für die in Kapitel 6 folgende experimentelle Untersuchung der für diese Prozesskette repräsentativen Handhabungseffekte.

5.2.1 Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Textilproduktion

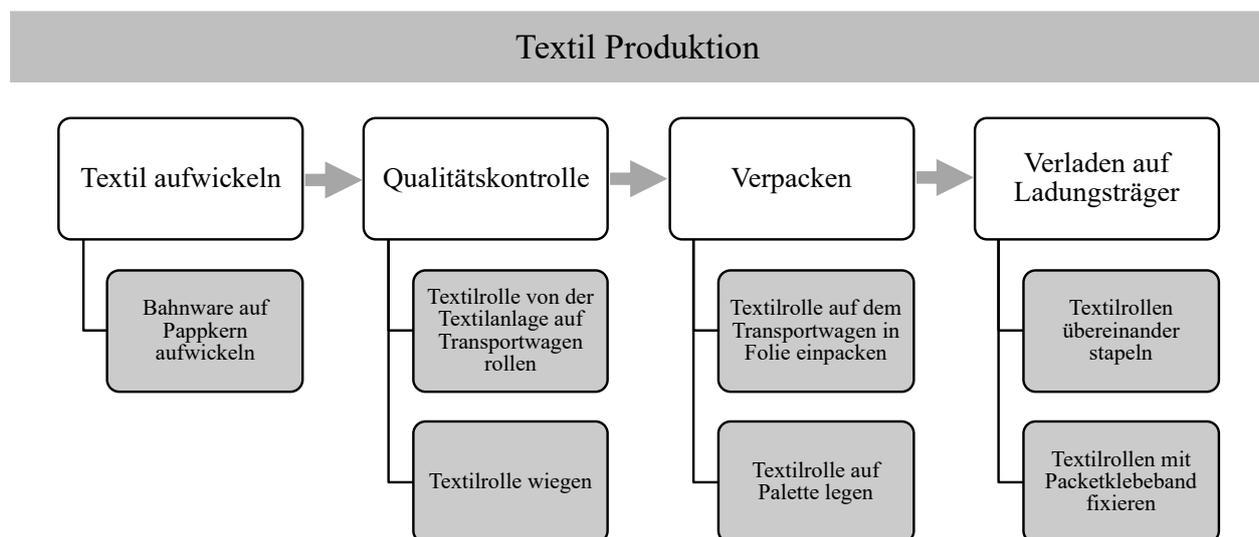


Abbildung 5-4: Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Textilproduktion

Textil aufwickeln

Die Produktion textiler Halbzeuge erfolgt mittels Textilanlagen, wobei die Halbzeuge als Endlos-Bahnware hergestellt werden. Die Bahnware besteht aus Multiaxialgelegen, die je nach Spezifikation unterschiedliche Faserorientierungen beinhalten und mit einem Binderfaden vernäht werden. Die hergestellten Bahnen werden unmittelbar nach der Produktion auf einen Pappkern aufgewickelt und verlassen den Produktionsprozess als Textilrolle. Die Textilbahnen werden bereits im Produktionsprozess durch das Aufwickeln des Multiaxialgeleges gebogen. Das

Biegen des Multiaxialgeleges führt zu einer Verschiebung sowie zu einer Scherbelastung der Rovings innerhalb des Geleges. Die so eingeleiteten Scherbelastungen führen bereits zu leichten Faserfehlorientierungen. Darüber hinaus kann es zu sichtbaren Wicklungseffekten, den sogenannten Teleskopierfehlern, beim Aufwickeln der Textilbahnen kommen. Dieser Effekt kann auch bei der späteren Verarbeitung des Textils zu einer Faserfehlorientierung führen. Wird die schief aufgewickelte Bahn ohne Korrekturen abgewickelt, so werden die Wicklungseffekte direkt ins Bauteil übertragen. Die Faserfehlorientierungen, die beim Aufwickeln der Bahnen entstehen, können somit direkt in den Preform übertragen werden.

Qualitätskontrolle

Nach dem Herstellungs- und Aufwickelprozess liegen die textilen Halbzeuge nicht mehr als Bahnware, sondern als auf Rollen gewickelte Bahnen vor. Die Textilrollen werden unter Zuhilfenahme eines Hubwagens aus der Textilanlage auf einen Rollenwagen überführt. Dabei wird die Textilrolle durch einen Werker manuell von der Textilanlage auf den Hubwagen gerollt. Die durch diesen Handhabungsprozess einwirkenden Belastungen hinterlassen leichte, flächige Eindrücke in der Textilrolle. Im Anschluss daran wird die Textilrolle im Rahmen der Qualitätssicherung gewogen und entsprechend etikettiert.

Verpackung der Textilrollen

Die gewogenen Textilrollen werden einzeln mit Folie verpackt. Bei der Verpackung werden die Textilrollen auf verschiedene Arten beansprucht. Bevor die Textilrollen mit einer Verpackungsfolie umwickelt werden, erfolgt ein manueller Prozess des Greifens und des Anhebens. Das Greifen entspricht einer punktförmigen Belastung. Durch das Anheben wirkt insbesondere die Gewichtskraft der Rolle. Beim Absetzen folgt eine flächige Belastung auf der Kontaktseite zwischen der Rolle und dem Untergrund.

Verladung auf Ladungsträger

Die verpackten Textilrollen werden auf einen Ladungsträger verladen und gestapelt. In der Regel werden Glasfaser-Textilrollen auf Paletten transportiert. Die Textilrollen werden nacheinander unter Zuhilfenahme einer Hubvorrichtung manuell auf eine Palette gerollt. Die erste Schicht der Palette wird durch eine

Schutzschicht aus Pappe belegt. Je nach Art der Stapelung der Textilrollen auf der Palette kommt zwischen einer Rollenebene eine weitere Schutzschicht aus Pappe hinzu. Die Sicherung der Textilrollen auf Paletten erfolgt durch Keile, die das Verrutschen und das Wegrollen der Textilrollen beim Transport verhindern sollen. Zudem wird der Rollenstapel auf der Palette geschichtet. Dabei kann es zu Beschädigungen des Textils durch Werkzeuge während des Anbringens von Schutzvorrichtungen kommen. Die Flächenbelastung zwischen der untersten Textilrolle und den Textilrollen untereinander werden durch die Linienbelastungen durch die Sicherungskeile verstärkt. Diese Belastungen führen zu Handhabungseffekten, die sich in Form von lokalen Verformungen an den Textilrollen widerspiegeln. Je nach Ausprägung dieser lokalen Verformungen kommt es zu Faserfehlorientierungen, Faserbeschädigungen sowie zu Textilfehlern.

5.2.2 Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Logistik

Der Logistikprozess umfasst Handhabungsprozesse, die beim inner- und außerbetrieblichen Transport der textilen Halbzeuge erfolgen. Die hier betrachteten Handhabungsprozesse finden sowohl innerhalb des Produzenten der Textilhalbzeuge und innerhalb des FKV-Produzenten als auch zwischen den beiden Prozessteilnehmern statt.

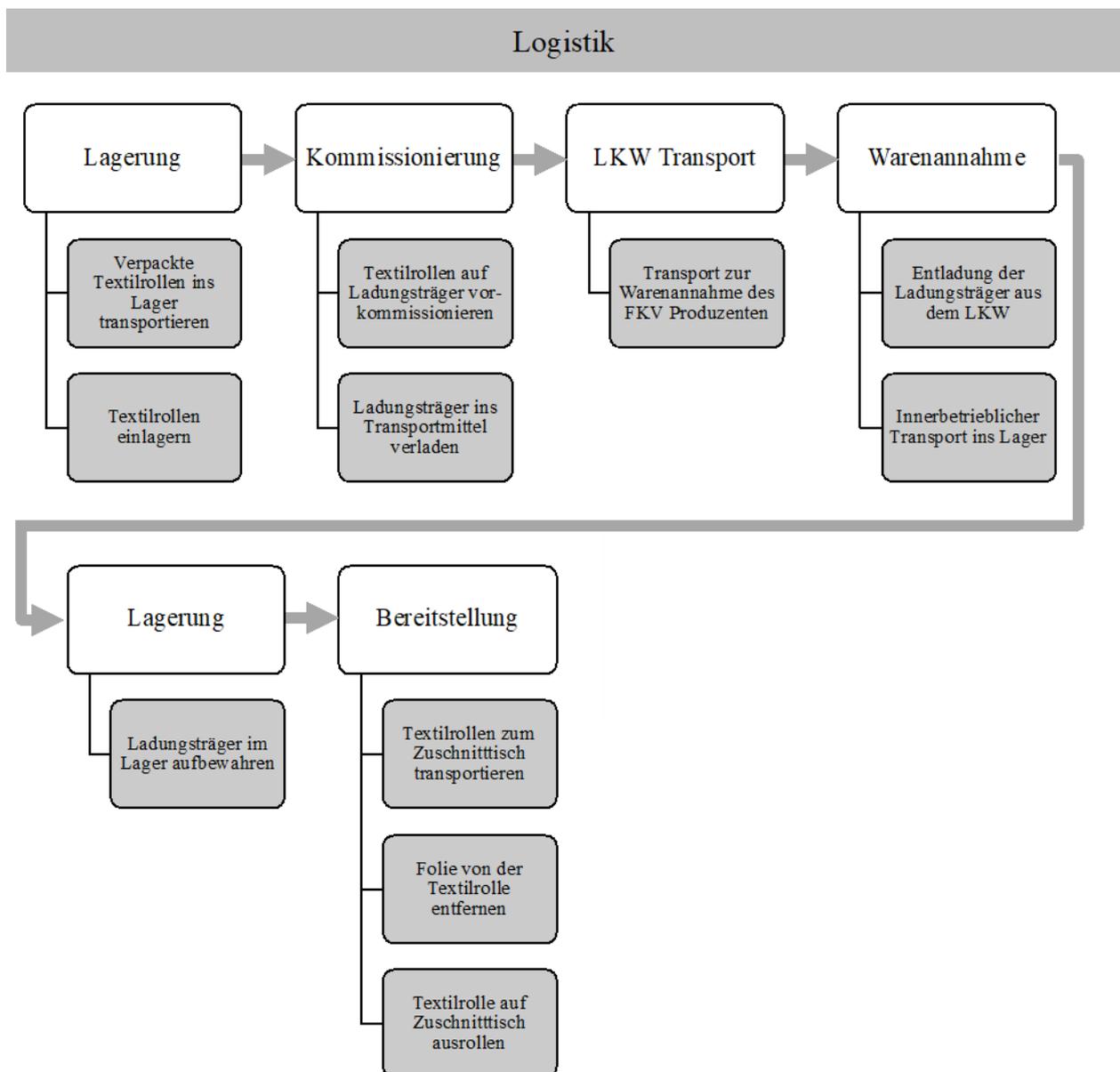


Abbildung 5-5: Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Logistik

Lagerung und Kommissionierung beim Textilproduzenten

Aufseiten des Textilproduzenten werden die zu Packeinheiten vorkonfektionierten Halbzeuge überwiegend mittels Gabelstapler vom Produktionsort zu einem Zwischenlager transportiert. Hierbei kann es zu Erschütterungen der auf Paletten gestapelten Halbzeugrollen kommen. Durch das Ein- und Auslagern der Paletten im Hochregallager kann es ebenfalls zu Beschädigungen des Verpackungsmaterials und damit auch zu Beschädigungen des textilen Halbzeugs kommen.

LKW-Transport

Die zu transportierenden Halbzeuge werden innerhalb des Ladungsträgers vor mechanischen Belastungen wie Verrutschen, Umkippen und Auseinanderfallen sowie vor klimatischen Belastungen geschützt. Beim LKW-Transport sind besonders die Erschütterungen und Kollisionen der zu transportierenden Ware zu beobachten. Erschütterungen sind kurze Stöße unterschiedlicher Stärke, die auf die Ladungsträger einwirken. Sie treten durch das Auf- und Abladen der Ware, das Überfahren von Unebenheiten auf der Strecke sowie bei Bremsmanövern auf. Als Kollisionen werden Kontakte zwischen unterschiedlichen Ladungsträgern beim Transport oder zwischen einem Ladungsträger und einem anderen Hindernis bezeichnet. Aufgrund unterschiedlicher Packmaße der Ladungsträger, die sich im Wesentlichen durch variierende Kundenanforderungen auszeichnen, kann die Ware während des Transportprozesses auf der Ladungsfläche unkontrolliert in Bewegung geraten. Dabei besteht die Möglichkeit der Beschädigung der Halbzeuge durch punktuelle oder flächige Belastungen. Bei Stückguttransporten, bei denen der LKW nicht vollständig beladen wird, können die Ladungsträger häufiger bewegt werden. Der LKW-Transport stellt einen wesentlichen Einflussfaktor für die in dieser Arbeit betrachteten handhabungsbedingten Ereignisse dar. Die Aussagen zu den Ereignissen in diesem Prozessschritt basieren auf Annahmen, die sich auf den Vergleich zwischen Eingangs- und Ausgangszuständen der zu transportierenden Ware stützen. Ereignisse, die während des LKW-Transports auftreten, wurden in dieser Arbeit nicht untersucht.

Warenannahme beim FKV-Produzenten

Die nach dem Transport aus dem LKW entladene Ladungsträger werden bei der Warenannahme auf von außen sichtbare Beschädigungen kontrolliert. Hierbei können Schiefstellungen sowie das Übertagen der Ladung über den Ladungsträger hinaus auf qualitative Mängel hinweisen. Die Kontrollen erfolgen komplett manuell durch Sichtkontrollen eines Mitarbeiters des Wareneingangs.

5 Analyse von handhabungsbedingten Ereignissen in der Prozesskette

Die Qualitätssicherung überprüft bei der Lieferung jeder neuen Charge einmalig die Materialkennwerte der gelieferten Gelege. Im betrachteten Prozess werden insbesondere die flächenbezogene Masse und die Permeabilität der Halbzeuge überprüft. Durch Tränkungsversuche mit dem Matrixwerkstoff werden die Halbzeugproben auf das Einhalten der erforderlichen Eigenschaften und Kennwerte getestet. Nach der Qualitätsprüfung in der Warenannahme werden die Ladungsträger in ein Zwischenlager beim FKV-Produzenten transportiert bzw. für die weitere Produktion bereitgestellt.

5.2.3 Handhabungsbedingte Ereignisse im Preformaufbau

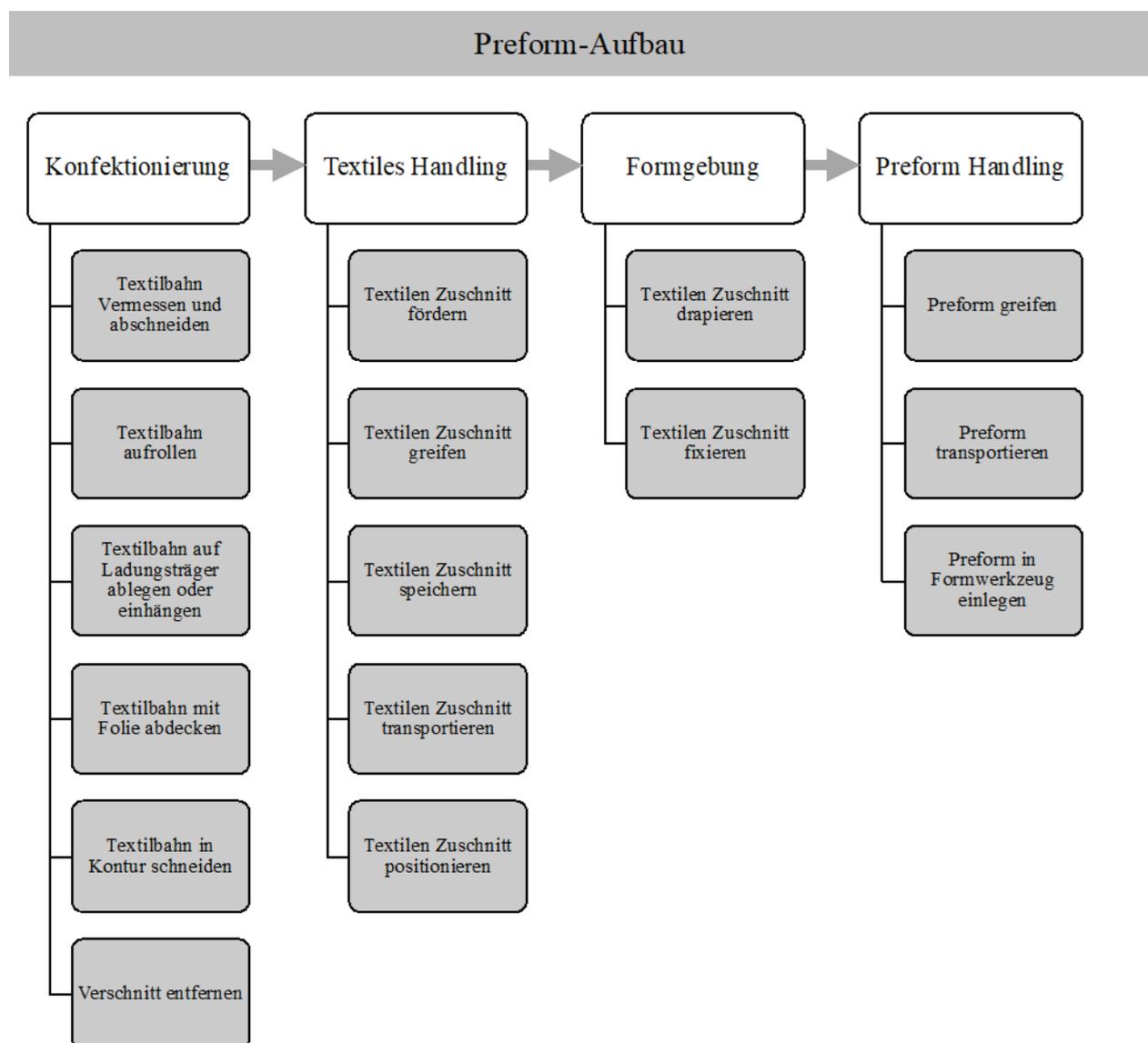


Abbildung 5-6: Handhabungsbedingte Ereignisse im Preformaufbau

Konfektionierung/Zuschnitt

Die bereitgestellten Textilrollen werden dem FKV-Produktionsprozess zugeführt. Hier können im Wesentlichen zwei verschiedene Vorgehensweisen unterschieden werden. Zum einen werden einzelne textile Zuschnitte vorkonfektioniert und erneut für die Weiterverarbeitung zwischengespeichert. Zum anderen werden die Textilbahnen direkt von der Textilrolle in ein Formwerkzeug ausgerollt und in Kontur geschnitten. In beiden Fällen werden die ausgerollten Textilbahnen einer Qualitätskontrolle unterzogen. Mögliche Fehlstellen sind beispielsweise Schnitte und Risse, Verschmutzungen oder gebrochene und herausstehende Fasern.

Umspulen/Abwickeln

Hier findet eine Beanspruchung der textilen Bahn statt, die mit dem Drapieren vergleichbar ist. Das Textil wird vom aufgewickelten Zustand in einen ebenen Zustand umgeformt. Dabei kommt es zu Verschiebungen in der Textilstruktur. Die textile Bahn wird auf Biegung und Scherung belastet.

Speichern

Die textilen Bahnen müssen für die Handhabung in transportierbaren Dimensionen gespeichert werden. Bei textilen Bahnen hat sich das Wickeln auf einem runden Kern bewährt. Hierbei wirken dieselben Kräfte wie beim Umspulen. Zudem wirkt die Gewichtskraft der textilen Bahn. Die Textilien drücken sich durch ihre Gewichtskraft nieder. Bei der anschließenden Ablage wird die textile Bahn abgewickelt. Hierbei findet eine Beanspruchung aus Zug, Druck und Scherung auf das Textil statt.

Ablage der textilen Halbzeuge

Beim Ablegen werden Umspuleffekte sowie Drapiereffekte sichtbar. In der ebenen Ablage wird das Textil auf Biegung belastet. Bei der Ablage in eine gekrümmte Form kommt es aufgrund eines axialen Versatzes bzw. eines Winkels zwischen der Materialachse und der Ablageebene zu einer Scherbelastung im Textil. Zudem wirkt die Gewichtskraft des Textils und verstärkt den Schereffekt. Bei der Ablage auf eine schiefe Ebene ohne Winkelversatz zwischen Materialachse und Ablageebene führt die Gewichtskraft des Textils zu einer Scherbelastung.

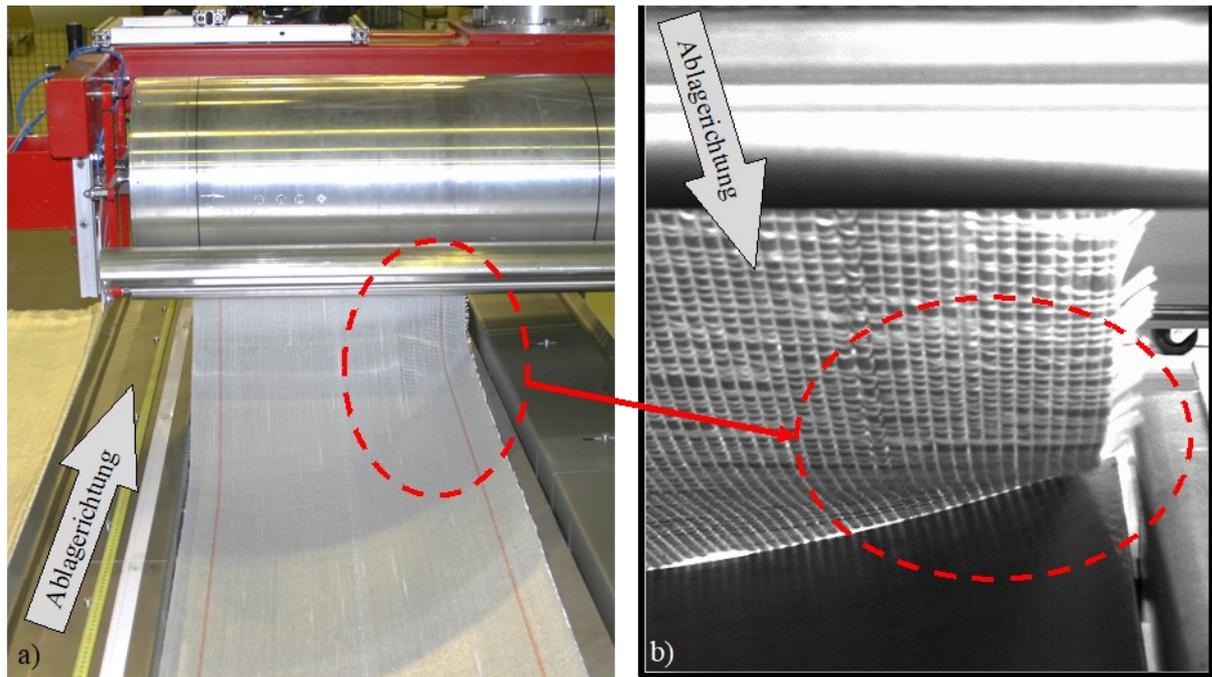


Abbildung 5-7: Handhabungseffekte bei der automatisierten Handhabung textiler Halbzeuge beim Preforming

Formgebung

Beim Drapieren wird das Textil aus einer zweidimensionalen in eine dreidimensionale Geometrie überführt. Hierbei können zahlreiche Effekte beobachtet werden. Die textile Bahn kann sich beim Drapieren plastisch verformen, sodass ihre Fläche nach dem Drapieren zunimmt. Dabei kommt es zu einer Verschiebung der Fasern. Hier wirken insbesondere Scher- und Zugkräfte auf das Textil. Falsch orientierte und verschobene Faserhalbzeuglagen können auf unzulässige Toleranzabweichungen bezüglich Maß- und Winkelabweichung des Preforms und bezüglich der Zuschnitte des Faserhalbzeugs zurückgeführt werden. Die Abweichungen an den Zuschnitten können durch Fehler im Zuschnittprozess zustande kommen. Falten in Faserhalbzeuglagen sind ungewollte Verformungen, die durch Schub- und Druckspannungen beim Drapieren und Ablegen entstehen können. Werden beim Aufbau des Preforms die Faserhalbzeuglagen nicht straffgezogen, können sich im Preformaufbau ebenfalls Falten bilden. Falten verschlechtern die Permeabilität des Faserhalbzeugs, wodurch trockene Stellen und Lufteinschlüsse im FKV entstehen können. Außerdem bedeuten sie eine Ondulation der Fasern, weshalb keine optimale Kraftübertragung gewährleistet werden kann. Aus diesen Gründen wirken sich Falten negativ auf die Qualität des FKV aus.

Fixieren

Das Fixieren der textilen Lagen kann, je nach Methode, zu lokalen Beanspruchungen im Textil führen. Das Textil liegt im Formwerkzeug bzw. auf einem Lagenstapel, sodass durch Reibung die lokalen Zugeffekte gemindert werden. Das Aktivieren des Binders kann dazu führen, dass die textile Lage angedrückt werden muss und es zu einer flächigen Druckbeanspruchung des Textils sowie des textilen Lagenstapels kommt.

Preform-Handling

Von Preform-Handling wird dann gesprochen, sofern ein bereits geschichteter textiler Lagenstapel als Ganzes gehandhabt werden soll. Ebenso kann es vorkommen, dass ein bereits korrekt aufgebauter Preform durch äußere Krafteinwirkung interlaminar verschoben wird, wobei sich die Faserhalbzeuglagen relativ zueinander verschieben. Die interlaminare Verschiebung kann unter Umständen auch bei der Vakuuminfusion in stark gekrümmten Bereichen der Werkzeugform auftreten. Dabei können die Faserhalbzeuglagen durch das fließende Harz und durch das Zusammendrücken des Schichtenaufbaus durch das Vakuum verschoben werden. Die Form- und Maßabweichung des Faserhalbzeugs können einen Einfluss auf die Vakuuminfusion haben, wobei eine Änderung des Faservolumengehaltes auftreten kann (vgl. [F1ZR96]).

5.2.4 Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Verdichtung

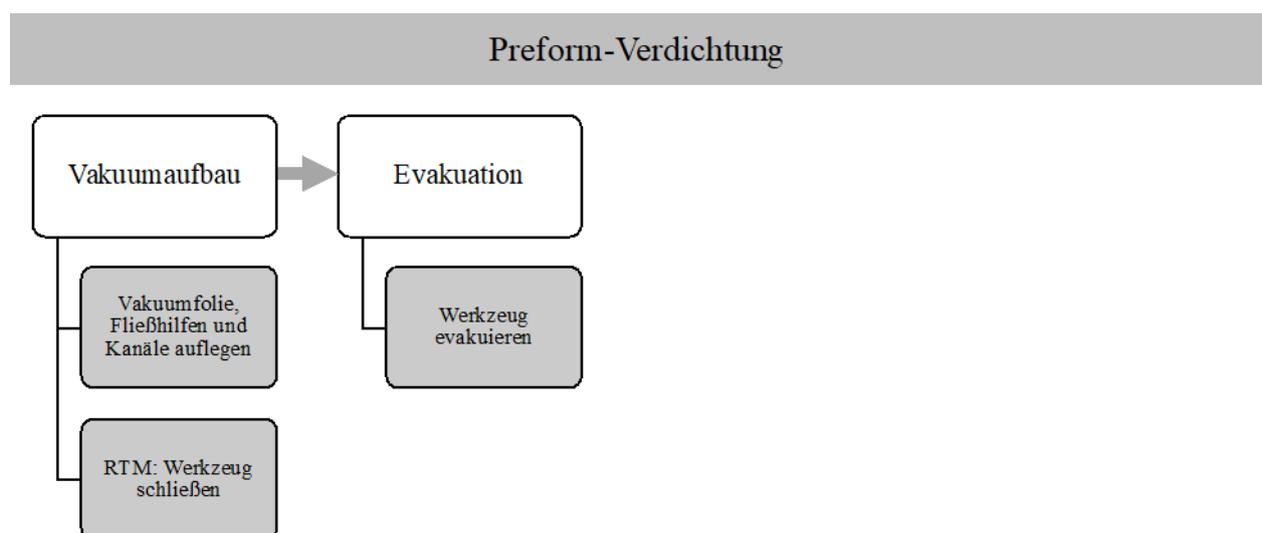


Abbildung 5-8: Handhabungsbedingte Ereignisse bei der Verdichtung

Einfluss der Faserorientierung auf den Harzfluss

Bei der Vakuuminfusion hat die Orientierung der Fasern einen großen Einfluss auf die Fließrichtung des Harzes. Die Zwischenräume zwischen den Fasern und den Rovings dienen dem Harz als Fließkanäle. So kann z. B. durch Falten eine Verschiebung der Harzfließfront verursacht werden. Die Permeabilität des Faserhalbzeugs hängt davon ab, wie dicht die Rovings und die Fasern zusammen liegen. Wenn die Faserhalbzeuglagen unterschiedliche Materialdichten aufweisen, z. B. aufgrund von Druckstellen und Eindrücken, werden Stellen mit höherer Materialdichte schlechter durchtränkt. Das kann zu trockenen Stellen im FKV führen. Liegen die Faserhalbzeuglagen nicht eben aufeinander, z. B. aufgrund von Umwurf, Falten oder Welligkeit, so können sich in den Hohlräumen ‚Harznester‘ bilden. Bei der Vakuuminfusion kommt es vor, dass das fließende Harz eine Verschiebung der Fasern bewirkt. Die verschobenen Fasern können die Fließrichtung des Harzes ändern und dadurch Einfluss auf den Faservolumengehalt nehmen (vgl. [Neit04]). In Abbildung 5-9 wird beispielhaft die Durchtränkung eines verdichteten Preforms mit Kunststoffharz dargestellt.

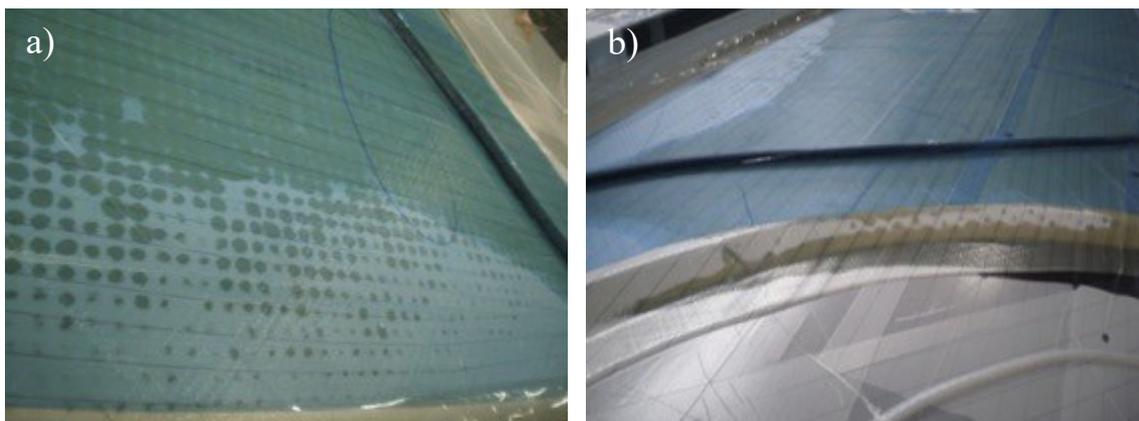


Abbildung 5-9: Beispiel für den Harzflussverlauf in einem verdichteten Preform

Fehlerhafter Vakuumaufbau

Einer der wichtigsten Parameter bei der Vakuuminfusion ist die Vakuumqualität. Die Vakuumqualität ist umso schlechter, je mehr Luft durch mangelhafte Abdichtung oder Beschädigungen der Vakuumfolie unter die Vakuumfolie gezogen wird. Eine schlechte Vakuumqualität führt dazu, dass die Flächenpressung auf den Preform und insbesondere auf die einzelnen Textillagen geringer ist als gefordert. Dies kann zu einem geringeren Faservolumengehalt und zu schlechteren Eigenschaften des FKV führen. Zusätzlich wird dadurch die Gefahr von Lufteinschlüssen erhöht.

Falsch angebrachte Harzkanäle

Trockene Stellen können ebenso entstehen, wenn die Anschlüsse für die Harzzufuhr und das Vakuum nicht korrekt angebracht sind. Infolgedessen verteilt sich die Fließfront des Harzes nicht gleichmäßig im Preform und das Harz erreicht die Vakuumananschlüsse, durch die das überschüssige Harz abgesaugt wird, bevor der gesamte Preform durchtränkt ist.

Evakuierung

Die Evakuierung, insbesondere bei Vakuuminfusionsverfahren, führt zu einer Kompaktierung des Lagenstapels. Der Lagenstapel wird durch die entstehende Druckdifferenz zwischen der Atmosphäre und dem evakuierten Bereich unter der Folie flächig zusammengepresst. Dies führt zu einer Glättung des Lagenstapels.

5.3 Auswertung der Prozessanalyse

Die gesamte Prozesskette wird in Tabelle 5-2 detailliert dargestellt. Die einzelnen Prozessschritte werden als eine zusammenhängende Prozesskette verstanden, in der die üblichen Systemgrenzen aufgebrochen wurden. So entstehen sinnvoll zusammenhängende Prozessgruppen wie ‚Textilproduktion‘, ‚Logistik‘, ‚Preformaufbau‘ und ‚Verdichtung‘. Die beobachteten Effekte werden in ‚Beule/Falte/Lagerungsplatten‘, ‚Beschädigung der Textilstruktur‘ sowie ‚Verschmutzung des Textils‘ klassifiziert. Jedem Prozessschritt werden die beobachteten Effekte zugeordnet. Dadurch entsteht eine Gesamtübersicht der vorkommenden Handhabungsereignisse in der gesamten Prozesskette.

Am häufigsten anzutreffen sind Handhabungseffekte, die sich in Form von Beulen, Falten sowie Lagerungsbeschädigungen widerspiegeln. Deshalb wird diese Kategorie der Handhabungseffekte bei der experimentellen Untersuchung in Kapitel 6 näher betrachtet.

5 Analyse von handhabungsbedingten Ereignissen in der Prozesskette

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Prozessschritte sowie der beobachteten Effekte in der Prozesskette zur Fertigung von Preforms

Nr.	Prozessschritt	Ereignis	Effekte				
			Beule/Falte/ Lagerungsplatten	Beschädigung der Textilstruktur	Verschmutzung des Textils		
1	Textil Produktion	Ware wird auf Rolle aufgewickelt	■				
2		Rolle von der Maschine auf Wagen gerollt	■				
3		Qualitätskontrolle	Rolle wird gewogen			■	
5		Verpacken	Rolle wird auf dem Wagen in Folie eingepackt	■			
6		Verladen auf Ladungsträger	Rolle wird auf Palette gelegt	■			
7			Rollen werden übereinander gestapelt	■			
8			Rollen werden mit Packetklebeband fixiert	■			
9		Logistik	Lagerung	verpackte Ware wird ins Lager gebracht	■	■	
10	Ware wird gelagert			■		■	
11	Kommissionierung		Ware wird vor-kommissioniert	■	■		
12			Ware wird ins Transportmittel verladen	■	■	■	
13	Transport		Transport von Zulieferer zu Warenannahme (LKW)	■	■	■	
14	Warenannahme		Warenentladung aus LKW	■	■		
15			Transport ins Lager	■	■		
16	Lagerung		Ladungsträger im Lager aufbewahren	■			
17	Bereitstellung		Transport zum Zuschnittstisch	■		■	
18			Folie von Gelegerolle entfernen		■	■	
19			Gelegerolle auf Zuschnittstisch ausrollen	■			
20	Preformaufbau		Konfektionierung	Gelegerolle nach Maß oder Vorlage zuschneiden	■	■	■
21				Zuschnitt aufrollen	■		■
22				Zuschnitt auf Ladungsträger ablegen oder einhängen	■	■	
23				Zuschnitte mit Folie abdecken		■	
24				Zuschnitt erzeugen	■	■	
25				Verschnitt entfernen			■
26			Textiles Handling	Zuschnitt fördern	■		
27				Zuschnitt greifen	■		
28		Zuschnitt speichern		■			
29		Zuschnitt transportieren		■			
30		Zuschnitt positionieren		■			
31	Formgebung	Zuschnitt / Textillage drapieren	■				
32		Zuschnitt fixieren (Binder)	■		■		
33	Preform Handling	Preform greifen	■				
34		Preform transportieren	■				
35		Preform einlegen	■				
36	Verdichtung	Vakuumaufbau	Werkzeug schließen	■	■		
37		Evakuierung	Werkzeug evakuieren	■			

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

6.1 Motivation

Wie aus der Prozessanalyse in Kapitel 5 hervorgeht, hinterlassen zahlreiche Handhabungsprozesse sichtbare Spuren an den textilen Halbzeugen. Am häufigsten zu beobachten sind sphärische Ausprägungen. Diese Effekte werden in dieser Arbeit auch als Beulen bzw. Dellen und Falten im textilen Halbzeug beschrieben und führen zu undefinierten Defekten im Preform. Insbesondere wenn sphärische Ausprägungen durch den Verdichtungsprozess in die Werkzeuggeometrie überführt werden, überlagern sich gleichzeitig mehrere Defekte wie Faserfehlorientierungen, Rovinganhäufungen sowie Roving-Gaps. Darüber hinaus ist die Faserausrichtung abhängig von der Belastungsart des Bauteils und ist daher nicht immer optimal für das Injektionsverfahren. In der folgenden experimentellen Untersuchung werden deshalb speziell sphärische Ausprägungen sowie Faserfehlorientierungen von textilen Halbzeugen betrachtet.

6.2 Versuchsplanung

6.2.1 Methoden und Material

Definition von Referenz-Handhabungseffekten

Aus den in der Prozessanalyse beobachteten Handhabungseffekten sollen parametrisierbare Referenz-Handhabungseffekte abgeleitet werden. Dabei handelt es sich um künstlich erzeugte Imperfektionen, die die wesentlichen Eigenschaften von realen Handhabungseffekten aufweisen. Durch eine parametrisch und reproduzierbar einstellbare Ausprägung der künstlich erzeugten Imperfektionen soll der Einfluss der Referenz-Handhabungseffekte auf die Qualität von Preforms untersucht werden. Die künstlich erzeugten Fehlstellen lassen sich somit auf zwei wesentliche Typen reduzieren:

- Faserausrichtung
- Beulen und Falten

In Abbildung 6-1 ist die methodische Vorgehensweise für die Planung der experimentellen Untersuchung dargestellt. Nachdem eine Textilprobe mit einer künstlich erzeugten Imperfektion versehen wird, sollen die von außen sichtbaren geometrischen Eigenschaften vermessen werden. Diese Vermessung soll berührungslos stattfinden, sodass die künstlich erzeugte Imperfektion nicht verändert wird. Anschließend sollen der Vakuumaufbau sowie die Vakuuminfusion mit Wasser als Ersatzmedium folgen. Während der Infusion soll die Fließfront

mittels Bildverarbeitung erfasst werden. Aufbauend auf den Messwerten soll die Permeabilität der entsprechenden Textilprobe berechnet werden. Schließlich soll der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Imperfektionen und der Permeabilität abgeleitet werden.

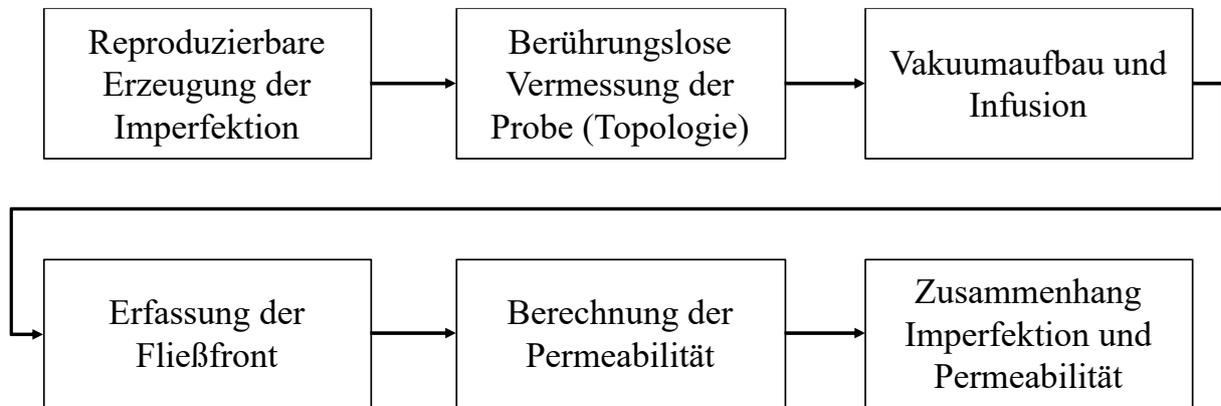


Abbildung 6-1: Methodische Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung

Experimentelle Bestimmung der Permeabilität

Die Permeabilität beschreibt die Tränkbarkeit der porösen Textilstruktur und kann als Qualitätsmerkmal eines Preforms genutzt werden (vgl. [Neit04]). Durch die Bestimmung der Permeabilität von imperfekten Preforms soll in dieser Arbeit der Einfluss von Handhabungseffekten auf die Qualität von Preforms abgeleitet werden. Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf der exakten Bestimmung des nominellen Wertes der Permeabilität liegt, dient die Permeabilität als Vergleichswert zwischen den verschiedenen mit Imperfektionen versehenen Textilproben.

Für die experimentelle Untersuchung eindimensionaler Formen hat sich die Permeabilitätsmessung durch Beobachtung der Fließfront bewährt (vgl. [FIZR99], S. 261). Da die Viskosität des Mediums in die Berechnung der Permeabilität nicht einfließt, können die Versuche auch mit Wasser anstelle eines Kunststoff-Harzes durchgeführt werden. Dies erleichtert den Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung. Die Berechnung der Permeabilität erfolgt über das Gesetz von D'Arcy und über die Massenerhaltung inkompressibler Fluide. Das Gesetz von D'Arcy ist für den eindimensionalen Fall gegeben, wenn der Volumenstrom und der Druckgradient über Strecke x bekannt sind (6-1) (vgl. [Neit04]).

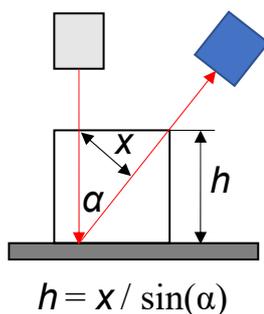
$$v_x = -\frac{1}{\eta} k_x \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6-1)$$

Topografische Erfassung der Oberfläche

Eine Erfassung von Qualitätseigenschaften innerhalb eines umgeformten Preforms erfordert sehr aufwendige Qualitätsprüfungsverfahren oder mit sensorischen Fasern ausgestattete textile Halbzeuge (vgl. [Ohle13]). Deutlich einfacher lassen sich bildgebende Verfahren anwenden, die allerdings nur die Oberfläche des Preforms bzw. des textilen Halbzeugs erfassen und auswerten (vgl. [Mien13]). Mittels dieser Verfahren erfolgt die Beurteilung der Preformqualität, überwiegend über die Beurteilung der äußeren Formeigenschaften einzelner Textillagen. Die innere Qualität der Preforms kann entsprechend durch die Qualität der Einzellagen abgeleitet werden.

In dieser Arbeit sollen bildgebende Verfahren zur Untersuchung der Qualitätseigenschaften von Preforms angewendet werden. Die Oberfläche der Textilprobe soll während der Versuche mehrmals mittels des Lichtschnittverfahrens optisch erfasst werden. Beim Verfahren werden mithilfe des Prinzips der Triangulation dreidimensionale Oberflächen erfasst. Eine Lichtlinie wird hierbei auf die Probe projiziert und das von der Oberfläche reflektierende Licht wird in einem Detektor abgebildet. Die Lichtlinie wird mittels eines senkrecht zur Oberfläche stehenden Lasers projiziert (siehe Abbildung 6-2). Als Detektor wird eine um den Triangulationswinkel α gedrehte Kamera verwendet. Ein Höhenversatz der Oberfläche hat ein Verschieben der Laserlinie um den Wert x zur Folge. Die gesuchte Oberflächenkoordinate h wird anschließend innerhalb eines Dreieckes mit bekanntem Winkel α und dem Wert x bestimmt. Um aus einzelnen Lichtschnitten die zu vermessende Kontur zu erhalten, wird die Sensoranordnung mit konstanter Geschwindigkeit mittels Portalroboter verfahren (vgl. [Baue03]; [GrFe14]).

Lichtquelle (1) Detektor (2)



a)



b)

Abbildung 6-2: a) Prinzipskizze des Lichtschnittverfahrens angelehnt an Bauer (vgl. [Baue03]), b) Versuchsanordnung

Die Einheit aus Kamera und Laser wird mit einem Portalroboter über die zu vermessende Oberfläche bewegt. Der Portalroboter fährt mit einer konstanten

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

Geschwindigkeit von 50 mm/s. Die Kamera nimmt dabei Bilder mit einer konstanten Bildrate von $10,5 \text{ s}^{-1}$ auf. Das hat zur Folge, dass alle 4,76 mm eine Laserlinie erfasst wird. Bei einer Probenlänge von 300 mm werden somit 64 Bilder aufgenommen. Um eine von der Rechnerleistung unabhängige und konstante Bildrate zu gewährleisten, wird mit der Kamera ein Video aufgenommen. Das Video wird anschließend numerisch in einzelne Bilder unterteilt.

Für konstante Lichtverhältnisse wird ein Abschirmkasten auf die Umgebung der Textilprobe installiert. Bei der Topografie der Beule unter der Vakuumfolie wird die Laserlinie teilweise von der Folie abgelenkt, was die spätere Oberflächenberechnung leicht verfälscht. Diese führt jedoch zu ausreichenden Ergebnissen für die Bewertung des Verformungsgrades. Die einzelnen Videobilder werden segmentiert und zu binären Bildern umgewandelt. Durch die Wahl eines geeigneten Schwellenwertes kann aus den einzelnen Bildern eine Höhenlinie der Probe erkannt werden. Nach dem Binarisieren entstehen teilweise Lücken in der Laserlinie, die auf Unebenheiten in der Texturbeschaffenheit zurückzuführen sind. Mithilfe einer Regression der Laserlinie kann dem entgegen gewirkt werden, wodurch ein durchgängiger Verlauf der Laserlinie erzeugt wird.

Die berechneten Höhenlinien werden im Anschluss in einer Matrix zusammengefasst und grafisch dargestellt. Für die Bewertung der Formeigenschaften der Textilproben vor und nach der Umformung sowie nach der Infusion werden die maximale Höhe, das Volumen sowie die bedeckte Fläche der Fehlstelle ermittelt. In Abbildung 6-3 wird beispielhaft eine erfasste und ausgewertete Topografie einer umgeformten Textilprobe dargestellt.

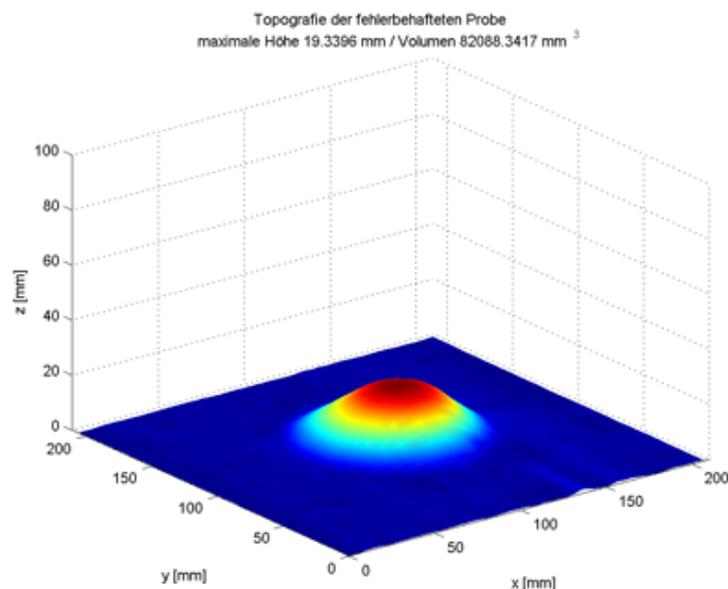


Abbildung 6-3: Beispiel der Topografie der Beule einer umgeformten UD-Textilprobe mit einer Eindringtiefe von 25 mm

Erfassung des Fließfrontverlaufs

Das Fließverhalten des Mediums während der Injektion wird ebenfalls mit einem bildgebenden Verfahren erfasst. Um eine Aussage über die Kontur der Fließfront zu einem bestimmten Zeitpunkt zu treffen, muss der Unterschied von Nass- und Trockengebiet klar zu erkennen sein. Die Fließfront wird durch das Umwandeln der Videodaten in einzelne binäre Bilder dargestellt. Im Rahmen einer Merkmalsextraktion kann der zeitliche Verlauf der Fließfront je Bild ausgewertet werden. Für die Erfassung des Fließfrontverlaufes muss die Kamera unterhalb der auf einer Glasplatte liegenden Textilprobe angeordnet werden. Durch geeignete Parameter und Filter können zwei klar voneinander trennbare Bereiche (Nass- und Trockengebiet) dargestellt werden. Durch einen weiteren Algorithmus wird sichergestellt, dass bereits erfasste Nassgebiete auch weiterhin als solche identifiziert werden. Folglich werden bei einer Durchtränkungszeit von 40 Sekunden ca. 400 Bilder pro Versuch erzeugt. Mittels der bekannten Bildrate sowie der Position der Fließfront je Bild wird der zeitliche Verlauf in einer Matrix zusammengefasst und in einer Grafik dargestellt. Für die Berechnung der Permeabilität muss die Zeit des Harzfrontverlaufs zwischen Anguss und Entlüftung gemessen werden. Hierfür wird ein mittlerer Streifen der Probe von 50 mm (100 Pixel) betrachtet (siehe Abbildung 6-4). Weiterhin wird die Zeitspanne der kompletten Durchtränkung der Probe ausgegeben. Im weiteren Verlauf wird zwischen der kompletten Durchtränkungszeit und der Durchtränkungszeit von Anguss zum Entlüftungsschlauch unterschieden.

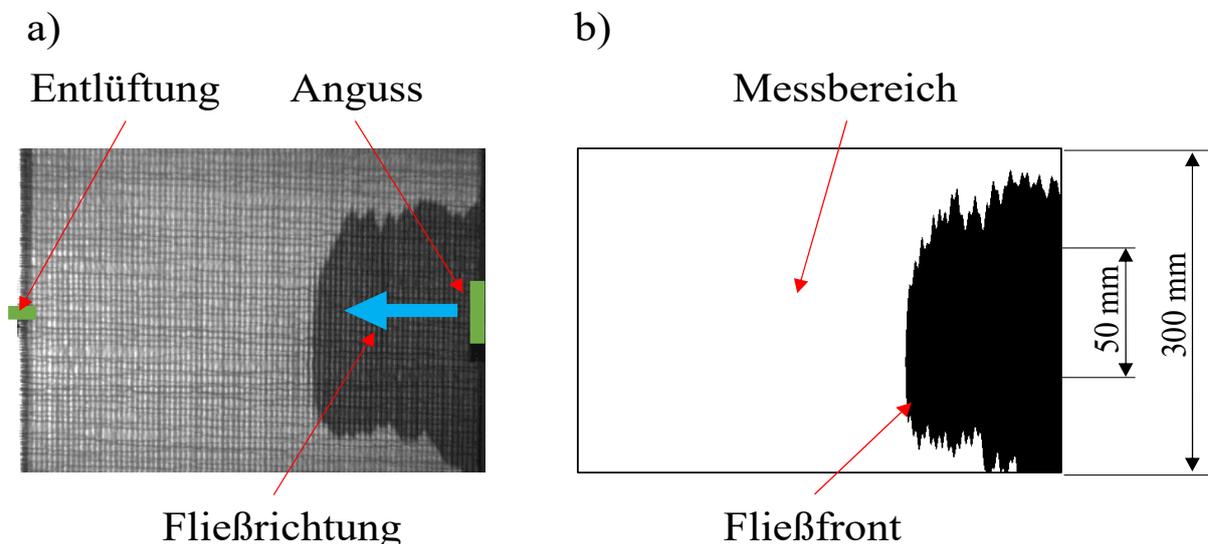


Abbildung 6-4: a) Anordnung von Anguss und Entlüftung in der Textilprobe, b) Messbereich (50 mm) für die Auswertung der Permeabilität

Erfassung des Druckgradienten

Die Bestimmung der Druckdifferenz, die für die Berechnung der Permeabilität notwendig ist, ergibt sich aus den folgenden Annahmen:

- Der erzeugte Unterdruck ist der Totaldruck p_{vor} vor dem Vakuumziehen am Entlüftungsschlauch.
- Die Druckdifferenz Δp_{vor} zwischen Anguss und Entlüftungsschlauch steht für die Güte des Vakuums unter der Folie.
- Der Totaldruck p_0 am Anguss ist größer oder gleich dem Totaldruck am Entlüftungsschlauch:

$$p_0 = p_{vor} + \Delta p_{vor} \quad (6-2)$$

- Mit diesem Druck kann der Injektionsdruck bestimmt werden, der das Fluid in die Kavität befördert. Dabei ist p_u der Umgebungsdruck, der mit 1032 mbar als konstant angenommen wird:

$$p_{I_{vor}} = p_u - p_0 \quad (6-3)$$

- Nach dem Vakuumziehen kann über den Totaldruck p_{nach} der Injektionsdruck berechnet werden:

$$p_{I_{nach}} = p_u - p_{nach} \quad (6-4)$$

- Der konstante Injektionsdruck resultiert aus dem Mittelwert der Injektionsdrücke vor und nach dem Vakuumziehen:

$$p_{I_{konst}} = \frac{p_{I_{vor}} + p_{I_{nach}}}{2} \quad (6-5)$$

In Vorversuchen wurden unterschiedliche Druckdifferenzen zwischen Anguss und Entlüftungsschlauch geprüft. Druckdifferenzen über 100 mbar führen zu einer nicht mehr linearen Fließfront. Das Medium fließt in der Mitte schneller als an den Randbereichen. Je größer die Druckdifferenz ist, desto mehr bestimmt der Kapillardruck den Fließfrontverlauf nach außen hin. Die hinteren Ecken werden bei steigendem Differenzdruck weniger oder gar nicht mehr durchtränkt. Für die Durchführung der Versuche wird deshalb eine Druckdifferenz von maximal 20 mbar zugelassen. Unter diesen Bedingungen wird der Injektionsdruck als konstant angenommen und wird gemäß (6-5) ermittelt.

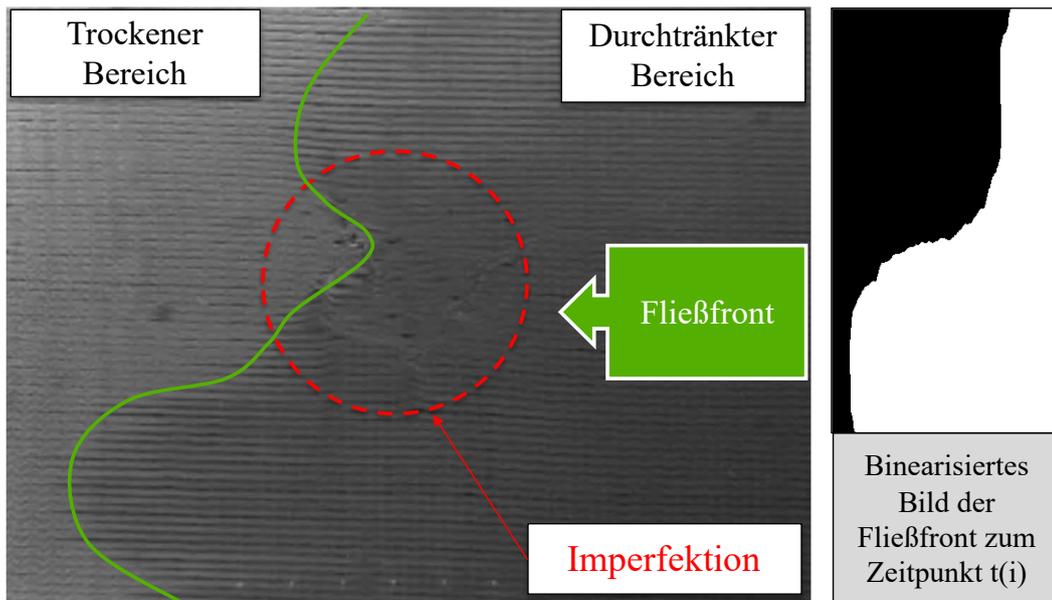


Abbildung 6-5: Ableitung des realen Fließfrontverlaufs durch numerische Berechnung

Versuchsmaterial

Für die Versuchsdurchführung werden die folgenden textilen Halbzeuge verwendet:

Tabelle 6-1: Versuchsmaterial

<i>Bezeichnung</i>		<i>Faserausrichtung</i>	<i>Flächengewicht</i>
UD	Unidirektionale Faserausrichtung	0°	ca. 1000 g/m ²
BIAX	Bidirektionale Faserausrichtung	0°/90°	ca. 1200 g/m ²
TRIAX	Tridirektionale Faserausrichtung	0°/+45°/-45°	ca. 1500 g/m ²

6.2.2 Versuchsvorrichtung zur Erzeugung künstlicher Imperfektionen in textilen Halbzeugen

Für die Durchführung der geplanten Untersuchung ist das gezielte und reproduzierbare Einbringen von den im Versuchsplan definierten Imperfektionen in die Textilprobe entscheidend. Die Textilprobe muss in ihren unterschiedlichen Zuständen messtechnisch erfasst und dokumentiert werden. Bei der geplanten Versuchsreihe sind die Vermessung des äußeren Zustands der Textilprobe sowie die Erfassung des Fließfrontverlaufs von besonderem Interesse. Die Versuchsvorrichtung soll in der Lage sein, eine als fehlerfrei definierte Textilprobe reproduzierbar zu verformen. Die Geometrie der künstlich erzeugten Imperfektion soll automatisiert erfasst und dokumentiert werden. Das mit der Imperfektion versehene Textil soll unter einer Vakuumfolie evakuiert und mit einem Medium getränkt werden. Anschließend soll der Fließfrontverlauf mit einem bildgebenden Verfahren erfasst und ausgewertet werden. Aus diesen Anforderungen resultiert das in Abbildung 6-6 dargestellte Grobkonzept der Versuchsanordnung.

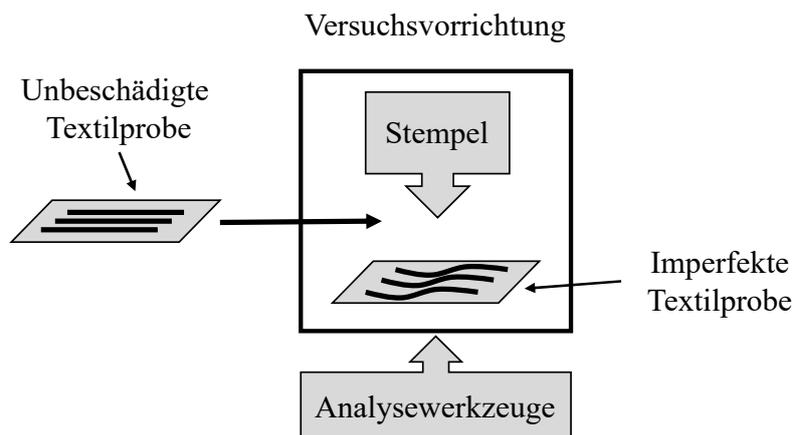


Abbildung 6-6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Für die Umsetzung der speziell für diese Versuchsreihe entwickelten Vorrichtung wurde der Arbeitsraum eines Portalroboters genutzt, der mit einer an der Z-Achse befestigten Stempelvorrichtung zur Umformung des Preforms ausgerüstet wurde (siehe Abbildung 6-7 a, b, c). Der Stempel hat die Form einer Halbkugel mit einem Durchmesser von 80 mm und dient zur gezielten Erzeugung des Referenz-Handhabungseffektes (Abbildung 6-7 d). Mithilfe von variablen Eindringtiefen, die durch den Einsatz des Portalroboters ermöglicht werden, können unterschiedlich große Imperfektionen in der Textilprobe realisiert werden.

Um äußere Einflüsse auf die Textilprobe zu vermeiden, wird die Probe nach dem Einbringen des Referenz-Handhabungseffekts mithilfe einer Umklappvorrichtung vom Modul auf eine Glasplatte geklappt (Abbildung 6-7 e). In dieser Position wird die Topografie des Referenz-Handhabungseffekts mittels Bildverarbeitung erfasst.

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

Anschließend wird der Vakuumaufbau mittels Vakuumfolie durchgeführt (Abbildung 6-7 f).

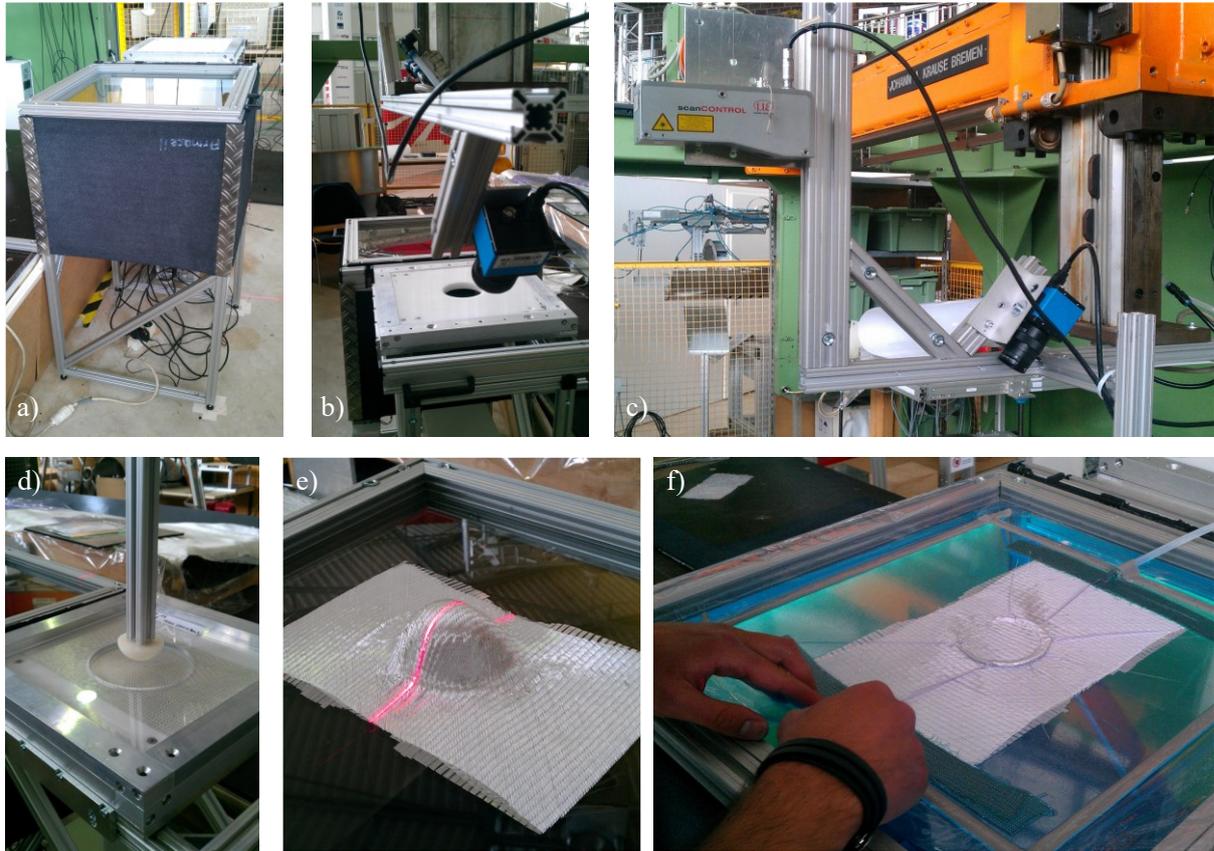


Abbildung 6-7: Versuchsvorrichtung mit Stempelvorrichtung und den eingesetzten Messgeräten

Um den Einfluss der Vakuumfolie auf die Ausprägung der imperfekten Textilprobe zu erfassen, wird die Textilprobe inklusive der Vakuumfolie erneut vermessen. Nach der Erfassung der Topografie wird die imperfekte Textilprobe mittels Vakuumfolie verdichtet und erneut vermessen. Die Vakuuminfusion erfolgt mittels Wasser. In Abbildung 6-8 ist schematisch der Vakuumaufbau für die Durchführung der Versuche dargestellt.

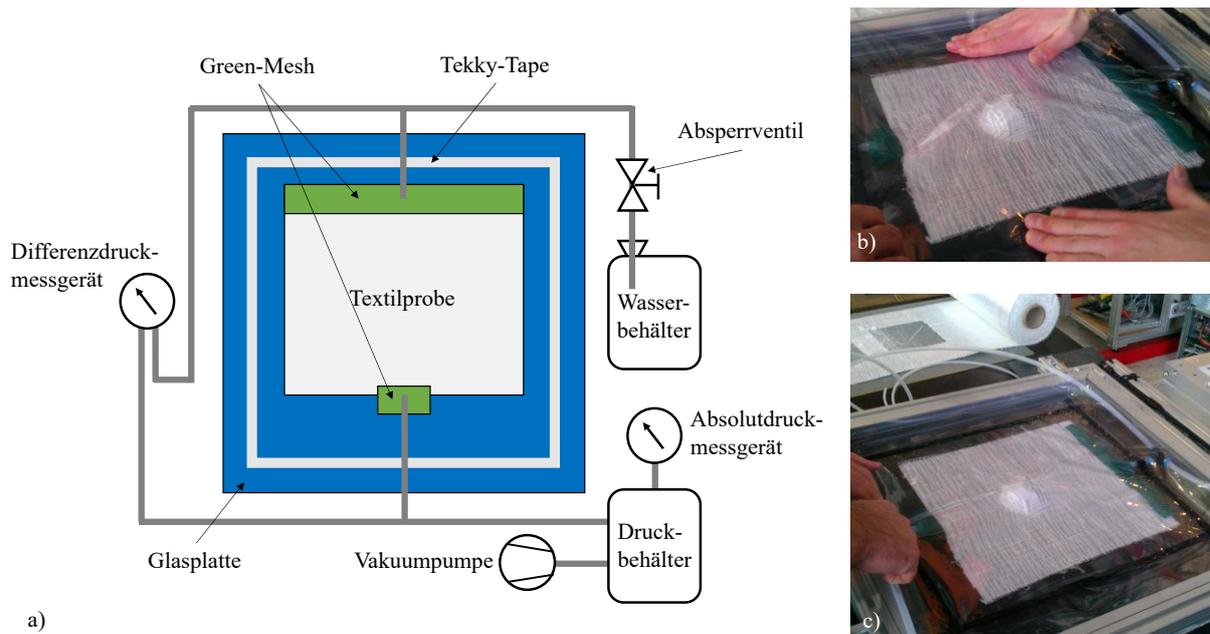


Abbildung 6-8: a) Schematische Darstellung des Vakuumaufbaus für die Durchführung der Versuche, b, c) Umsetzung bei der Versuchsdurchführung

Unterhalb der Glasplatte befindet sich ein Bilderfassungssystem, das die Fließfront des Wassers in der Textilprobe erfasst und dokumentiert. Nach der Vakuuminfusion wird die Topografie erneut erfasst, um eine mögliche geometrische Veränderung des Handhabungseffekts nach der Infusion zu ermitteln. Die erfassten Daten werden nach dem Versuch numerisch ausgewertet.

Versuchsplan

Die experimentelle Untersuchung der künstlich erzeugten Imperfektion im Preform kann prinzipiell in zwei unterschiedliche Versuchsreihen unterteilt werden. In einem ersten Schritt wird der Einfluss unterschiedlicher Faserausrichtungen auf die Permeabilität der Textilprobe untersucht. Da die Faserausrichtung am besten anhand einer Faserlage untersucht werden kann, werden die Versuche mit geeigneten UD-Textilproben durchgeführt. Im zweiten Schritt wird der Einfluss von künstlich erzeugten Imperfektionen auf die Permeabilität der Textilproben untersucht. Hierzu werden die Textilproben durch unterschiedliche Eindringtiefen des Stempels belastet. Anschließend wird die Permeabilität der definiert imperfekten Textilproben durch Erfassung des Harzflussverlaufs ermittelt und verglichen. Diese Versuchsreihe wird mit UD-, BIAx- sowie TRIAX-Textilproben durchgeführt.

Bei Versuchsreihe 1 (Faserausrichtung) wird nur der Faktor der Winkeländerung betrachtet. In Versuchsreihe 2 (Beule) liegt der Fokus auf zwei veränderlichen Faktoren, auf der Eindringtiefe des Stempels sowie auf den unterschiedlichen Gelegen. Alle drei Einflussgrößen sowie Faktoren sind Steuergrößen, die die Permeabilität des Preforms beeinflussen. Die Umgebungseinflüsse, wie die Umgebungstemperatur sowie der Umgebungsdruck, können zwar gemessen werden, können allerdings nur mit sehr hohem Aufwand verändert werden. Beide Einflussgrößen werden deshalb als Störgrößen betrachtet. Gleiches gilt für das Injektionsmedium. Die Temperatur des Mediums kann am Anfang des Prozesses zwar verändert werden, lässt sich allerdings während des Prozesses schwer konstant halten. Die Viskosität hängt direkt von der Temperatur ab und ist daher auch schwer zu kontrollieren. Daher werden Temperatur sowie Viskosität des injizierten Mediums ebenfalls als Störgrößen deklariert. Es handelt sich bei beiden Versuchsreihen um keinen standardisierten Versuch, bei dem die Methode der einfaktoriellen oder zweifaktoriellen Versuchsplanung ohne Einschränkungen Anwendung finden kann.

Ermittlung des Einflusses des Faserwinkels

Die Versuchsreihe zur Ermittlung des Einflusses des Faserwinkels auf den Fließfrontverlauf berücksichtigt einen veränderlichen Faktor. Die Faserausrichtung der Textilproben wird über einen Zuschnitt eines unidirektionalen Textils (UD) in unterschiedlichen Winkeln realisiert. Die Proben werden in den Winkeln 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° genommen. Die Referenzprobe wird in einem Winkel von 0° in Faserrichtung geschnitten.

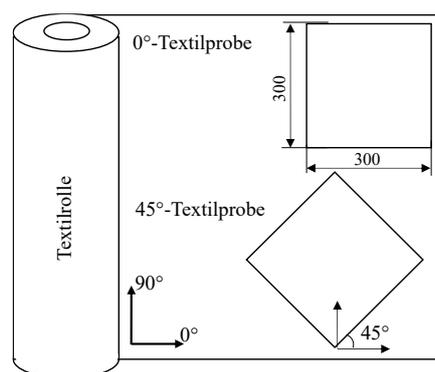


Abbildung 6-9: Zuschnitt der Textilproben aus einer Textilrolle

Ermittlung des Einflusses von sphärischen Ausprägungen

Im Rahmen der Vorversuche konnte die Entstehung einer Falte nach dem Vakuumziehen in Abhängigkeit der Eindringtiefe ermittelt werden. Dabei wurde die minimale Eindringtiefe gesucht, bei der nach dem Vakuumziehen noch eine Falte

entsteht. Die Auswertung der Vorversuchsreihe diene der Festlegung des Faktorstufenbereiches. Um die einzelnen Textilproben miteinander vergleichen zu können, beginnt der Faktorstufenbereich bei allen drei Gelegetypen (UD, BIAx, TRIAX) bei einer Eindringtiefe von 10 mm. Für BIAx und TRIAX wurden Eindringtiefen von 10 mm bis 35 mm und für UD Eindringtiefen von 10 mm bis 45 mm bestimmt. Hierbei wird zwar bei UD keine signifikante Veränderung zum unbeschädigten Preform auftreten, jedoch können die Messergebnisse mit derselben Achseinteilung dargelegt werden. Weiterhin wird der Stufenabstand auf 5 mm festgelegt. Der Abstand sollte ausreichend groß sein, um signifikante Unterschiede in den Fließfrontverläufen und Prozesszeiten zu erkennen. Es werden somit pro Fasergelege sechs Eindringtiefen untersucht. Mit den drei unterschiedlichen Gelegen ergibt sich daher eine Faktorstufenkombination von $m = 18$.

Um einen Bezugspunkt zum unbeschädigten Preform zu bekommen, werden auch unbeschädigte Textilproben als Referenz untersucht. Da das Materialverhalten nicht bekannt ist, kann der Faktorstufenbereich im Vorfeld nicht endgültig festgelegt werden. Treten am Ende des Faktorstufenbereiches bedeutsame Veränderungen im Materialverhalten auf, so werden noch weitere Faktorstufen hinzugefügt. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass aufschlussreiche Verhaltensmuster erkannt werden. Die Vorhersage außerhalb des Faktorstufenbereiches ist sehr ungewiss und soll somit stets vermieden werden.

6.2.3 Versuchsablauf

In Abbildung 6-10 ist der Versuchsplan beider Versuchsreihen dargestellt. Zusammenfassend können zwei Versuchsreihen unterschieden werden. Die Versuchsreihe „Beule“ beinhaltet mit ihren zwei Faktoren und fünf Realisierungen insgesamt 90 Einzelversuche, die es durchzuführen gilt. Hingegen beinhaltet die Versuchsreihe „Faserausrichtung“ bedingt durch einen Faktor nur 35 Einzelversuche. Der Versuchsumfang liegt inklusive Referenzversuchen bei insgesamt 150 Einzelversuchen.

Versuchsreihe 1 „Faserausrichtung“ 35 Einzelversuche		Versuchsreihe 2 „Beule“ 90 Einzelversuche			
<i>Faserausrichtung</i>	<i>UD</i>	<i>Eindrucktiefe</i>	<i>UD</i>	<i>BIAX</i>	<i>TRIAX</i>
90°	5	35 mm	5	5	5
75°	5	30 mm	5	5	5
60°	5	25 mm	5	5	5
45°	5	20 mm	5	5	5
30°	5	15 mm	5	5	5
15°	5	10 mm	5	5	5
0°	5	0 mm	5	5	5

Abbildung 6-10: Versuchspläne Versuchsreihe 1 (,Faserausrichtung‘) und Versuchsreihe 2 (,Beule‘)

Die in die Versuchsvorrichtung eingebrachte Textilprobe wird durch den Stempel in verschiedenen parametrischen Stufen verformt, um somit einen Handhabungseffekt zu simulieren. Anschließend wird die Probe mittels der Versuchsvorrichtung gewendet und die Verformung der Textilprobe wird geometrisch vermessen. Die verformte Probe wird mittels Vakuumaufbau evakuiert. Dabei wird die Veränderung der im Vorfeld eingebrachten Verformung beobachtet und dokumentiert.

Für die Durchführung der Versuche wird das Injektionsharz durch Wasser substituiert. Durch den Einsatz von Wasser als Ersatzmedium können insbesondere der Aufwand für die Versuche sowie der daraus folgende Abfall reduziert werden. Die unterschiedliche Viskosität von Wasser und Injektionsharz spielt bei der Bestimmung der Permeabilität eine untergeordnete Rolle. Zudem ist in dieser Arbeit der Vergleich zwischen unterschiedlich imperfekten Textilproben entscheidend und nicht die nominelle Permeabilität.

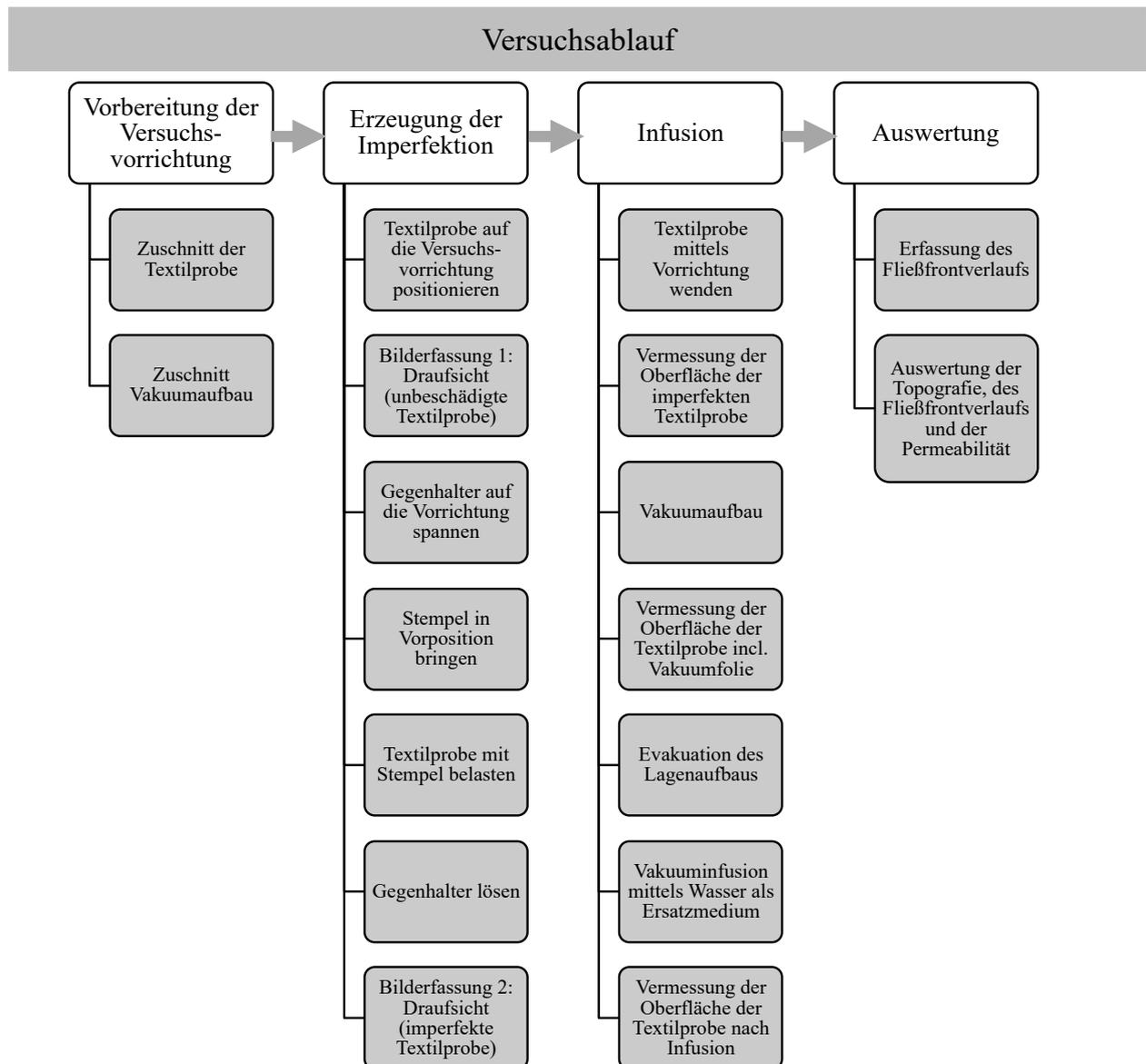


Abbildung 6-11: Versuchsablauf

6.3 Einfluss von Handhabungseffekten auf die Formeigenschaften von Preforms

Mithilfe der zuvor entwickelten Versuchssystematik und der dazugehörigen Auswertemethodik sollen nun die drei verschiedenen Materialtypen (UD, BIAx, TRIAX) experimentell untersucht werden. Grundlegend stellt sich die Frage, wie empfindlich ein textiles Halbzeug auf die durch Handhabungsprozesse eingeleiteten Belastungen reagiert. In diesem Versuch wird der Zusammenhang einer Prozesskette abgebildet, nämlich die Handhabung beim Preforming und die darauf folgende Vakuuminfusion. Nur die beiden Prozesse zusammenbetrachtet ergeben ein vollständiges Bild über den Zusammenhang zwischen der Handhabung und der

Qualität des Preforms. Die durch Handhabung entstehenden Effekte im Textil werden durch die Evakuierung des Formwerkzeugs teilweise kompensiert. Genau diesen Grenzwert, ab wann ein Handhabungseffekt nicht mehr kompensiert wird, gilt es, durch die folgende Analyse herauszustellen. Dabei werden nicht nur die von außen geometrisch messbaren Eigenschaften wie die Faltenhöhe berücksichtigt, sondern auch die innere Qualität der Textilstruktur, abgebildet durch die Permeabilität, wird gegenübergestellt. Hierfür werden mittels Versuchsvorrichtung künstliche Handhabungseffekte in die Textilproben eingeleitet. Anschließend werden die beschädigten Textilproben durch Vakuumziehen unter einer Vakuumfolie mit einer Flächenkraft belastet. Hier ist nun eine Transformation der Imperfektion 1 ‚Beule‘ zu einer Imperfektion 2 ‚Falte‘ zu erwarten. Beide Imperfektionen sollen geometrisch vermessen und gegenübergestellt werden. Anschließend soll die Permeabilität der imperfekten Textilprobe ermittelt werden.

Zu erwarten ist ebenfalls eine unterschiedliche Ausprägung des Faltenmusters, insbesondere im Vergleich der unterschiedlichen Testmaterialien. Hier ist es besonders interessant, zu erfahren, ob es Ähnlichkeiten bei der Faltenmusterentstehung gibt und inwieweit ein Faltenmuster Einfluss auf die Permeabilität der Textilprobe hat.

6.3.1 Effekte bei der Transformation von „Beule“ zur „Falte“

Durch den Einsatz der Versuchsvorrichtung wurden die jeweiligen Textilproben zweifach belastet. Jede Textilprobe wurde zunächst durch den Stempel punktuell und anschließend bei der Evakuierung flächig belastet. Dabei wurde eine Transformation vom Effekt „Beule“ zum Effekt „Falte“ beobachtet. Eine typische Transformation von einem unbelasteten Zustand über die Stempelbelastung bis hin zur Evakuierung ist in der Abbildung 6-12 dargestellt.

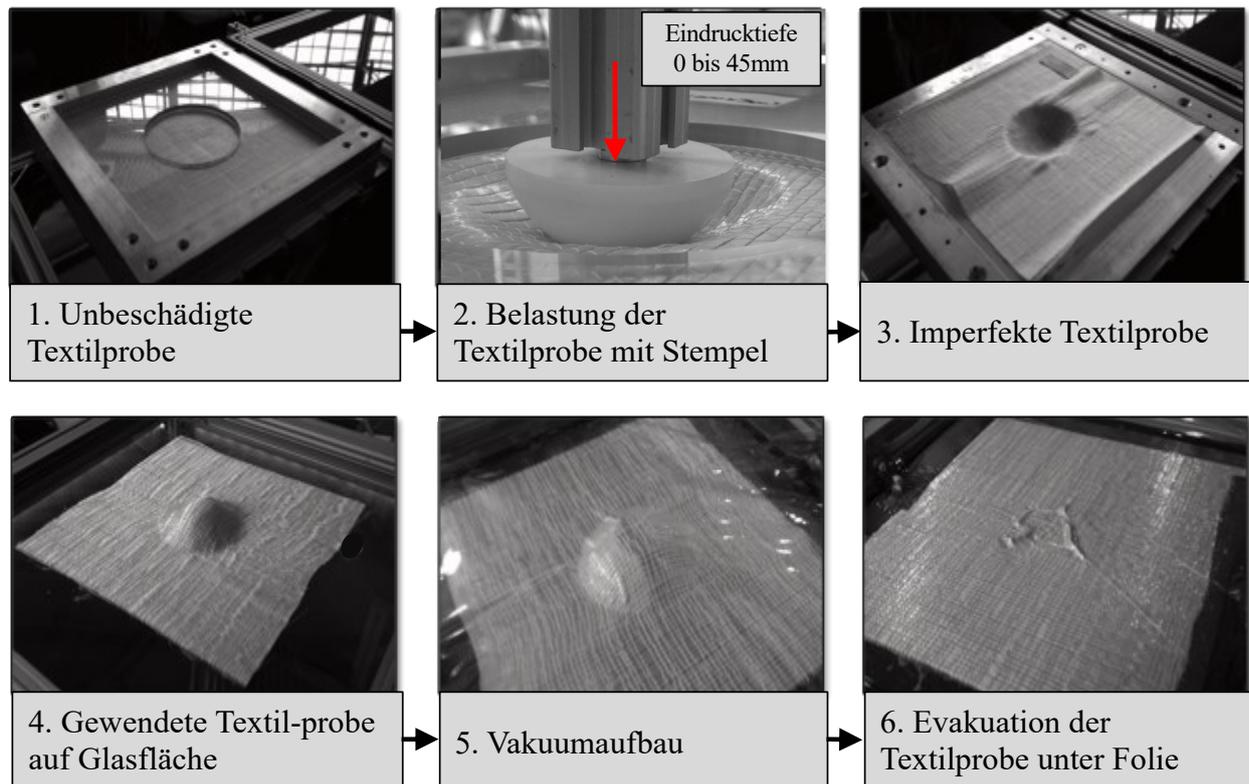


Abbildung 6-12: Unterschiedliche Zustände der Textilproben im Versuchsablauf

Die Textilprobe befindet sich im unverformten Ausgangszustand (1) in der Versuchsvorrichtung und wird mit einer transparenten Platte niedergehalten. Die Verformung der Fasergelege durch die Belastung mit dem Stempel (2) hat zur Folge, dass die Fasern sowohl plastisch als auch elastisch gedehnt werden. Durch die Eigenspannungen der Fasern entsteht beim Herausfahren des Stempels ein Verzug innerhalb der Fasergelege. Dieser Verzug hängt hauptsächlich vom Elastizitätsmodul und daher von der Steifigkeit der Fasergelege ab. Nach der Belastung der Textilprobe mit dem Stempel liegt die Textilprobe in einem umgeformten Zustand vor (3).

Deutlich zu beobachten sind neben der Verformung der Stempelfläche ebenfalls weitere Verformungen um die Stempelfläche herum, die auf verschiedene Textilmechanismen zurückzuführen sind. Mittels Wendemechanik der Versuchsvorrichtung wird die verformte Textilprobe auf eine Glasplatte mit der Verformung nach oben gewendet, ohne dass die Verformung selbst Schaden nimmt (4). In diesem Zustand wird die Textilprobe geometrisch mittels Lichtschnittverfahren vermessen. Anschließend wird der Vakuumaufbau auf die Textilprobe aufgebracht (5). Die Belastung der losen Vakuumfolie auf der umgeformten Textilprobe führt zu einem geringen Eindrücken des durch den Stempel verformten Bereichs. Auch in diesem Zustand wurde die Textilprobe geometrisch vermessen, um den Einfluss der Belastung der losen Vakuumfolie auf

die Textilprobe zu ermitteln. Schließlich wird der Vakuumaufbau evakuiert, was zu einer Verdichtung der Textilprobe durch die Flächenbelastung der Vakuumfolie führt (6). Je nach Ausprägung der durch den Stempel eingebrachten Verformung in der Textilprobe werden nach der Evakuierung Falten etc. in der Textilprobe beobachtet und geometrisch erfasst.

Die Textilprobe liegt in diesem Zustand nun bereit für den letzten Schritt, nämlich die Infusion mit Wasser als Ersatzmedium. Die durch die gezielt eingebrachten Belastungen hervorgerufenen Imperfektionen in der Textilprobe sollen nun durch die Auswertung der Permeabilität sichtbar gemacht werden.

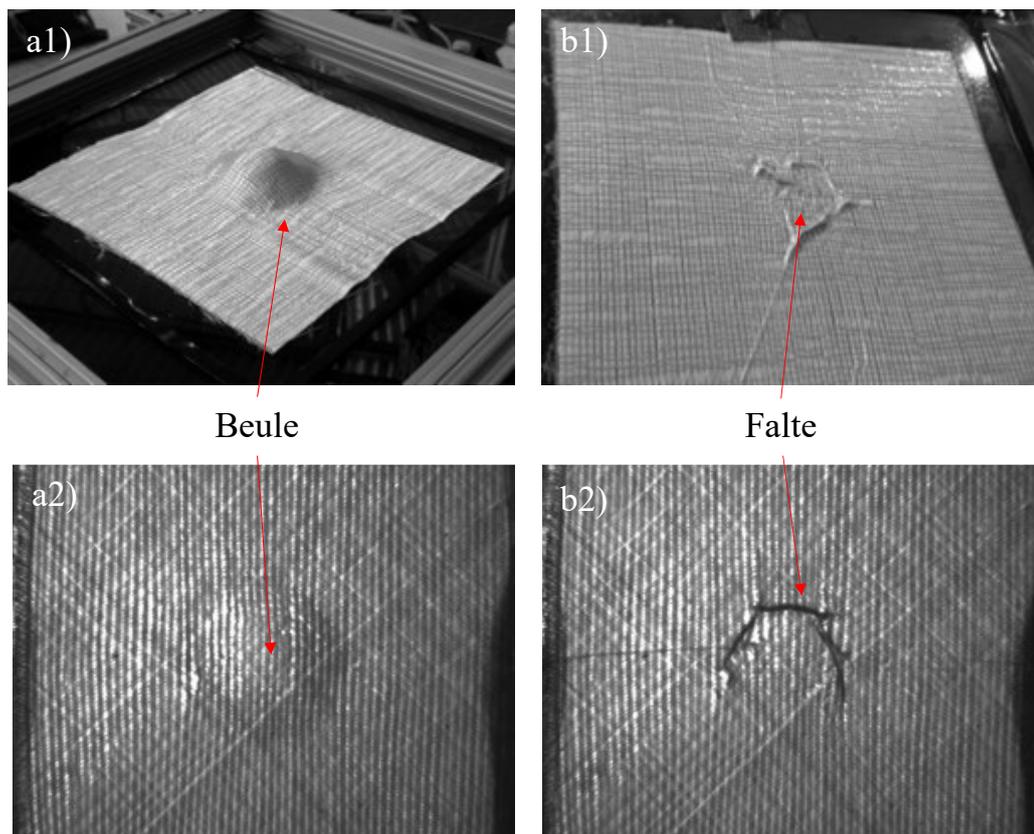


Abbildung 6-13: Beispielhafte Darstellung einer Falte (b1, 2), die sich aus einer zuvor eingebrachten Beule (a1, 2) durch das Vakuumziehen gebildet hat

Durch das Umformen des Textils in der Versuchsvorrichtung entsteht ein imperfekter Preform. Der Handhabungseffekt „Beule“ wird mit steigender Eindringtiefe entsprechend größer. Beim anschließenden Vakuumziehen wird die mit einer Imperfektion versehene Textilprobe erneut mittels Unterdruck zu einer Ebene umgeformt. Dabei entstehen neben äußerlich messbaren Falten auch zahlreiche Textilfehler. In Abbildung 6-14 sind die bei der Versuchsdurchführung beobachteten Textilfehler wie Gaps, Schlaufen und Falten dargestellt. Zu beobachten ist, dass die Faltenbildung bei einer bestimmten Eindringtiefe der Umformung reproduzierbar auftritt. Im Gegensatz dazu entstehen die Textilfehler

Schlaufen und Gaps deutlich zufälliger, wobei Schlaufen nach dem Vakuumziehen nur noch geringfügig sichtbar sind.

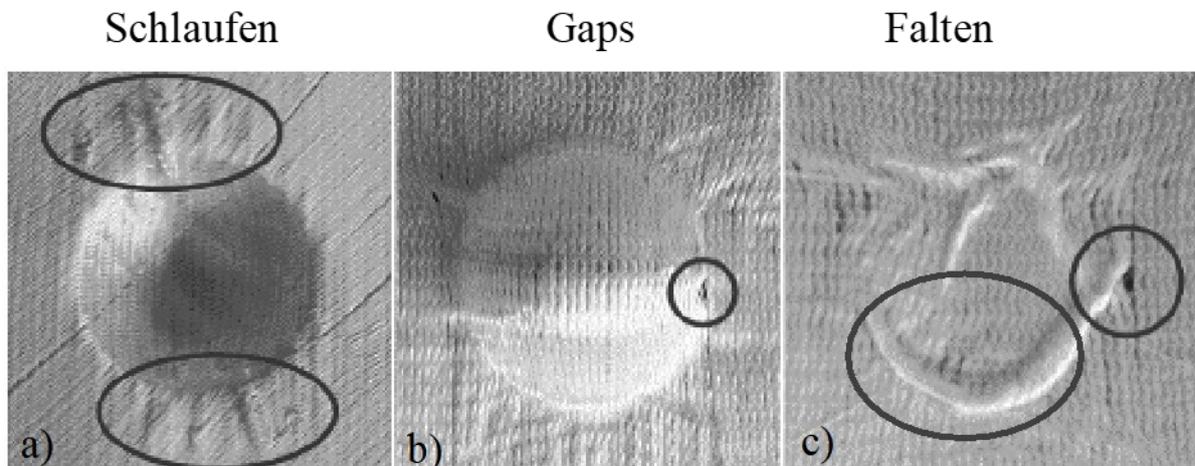


Abbildung 6-14: Gap-Bildung vor und nach der Evakuierung der verformten Textilprobe

6.3.2 Quantitative Bewertung der Transformation von Beule zu Falte

Da das entstehende Muster der Falte vollständig miteinbezogen werden soll, wird der Messbereich mit ca. 110 mm x 110 mm bezogen auf die Mitte der Textilprobe gewählt. Dies soll verhindern, dass außermittige Höhenunterschiede, die nicht auf die gezielt eingebrachte Imperfektion zurückzuführen sind, in die Messung einfließen. Je Textilprobe werden die Höhe und das Volumen der verschiedenen Zustände, die eine Probe im Versuchsverlauf annimmt, vermessen. Das bedeutet, dass jeweils eine Messung für die durch den Stempel eingebrachte Beule, die Beule unter Vakuumfolie und die Falte nach dem Vakuumziehen durchgeführt wird.

Nach der Beanspruchung der Textilprobe durch den Stempel ist eine leichte Entspannung in der Textilprobe zu beobachten. Dies spiegelt sich bei der Vermessung der gewendeten Textilprobe in einer leicht reduzierten Beulenhöhe wider. So führt beispielsweise die Eindringtiefe des Stempels von 25 mm zu einer gemessenen Beulenhöhe von ca. 20 mm. Wird anschließend die Vakuumfolie auf die Textilprobe gelegt, so reduziert sich die Beulenhöhe erneut entsprechend der Belastung der lose aufgelegten Folie. Nach der Evakuierung der imperfekten Textilprobe wird die Beule durch die einwirkende Flächenkraft geglättet.

Abhängig von der textilen Struktur des Probematerials (UD, BIAx, TRIAX) bilden sich unterschiedliche Grenzwerte für die Transformation aus der Beule zu einer Falte. Zudem ist die entstehende Faltengeometrie von der Textilstruktur und der

Stempelbelastung abhängig. Im Folgenden wird das Transformationsverhalten von der Beule zur Falte für die drei verschiedenen Materialien im Detail betrachtet.

Transformationsverhalten bei UD-Textilproben

Die UD-Textilproben wurden in einem Bereich von 10 mm bis 45 mm Stempel-Eindrucktiefe durch die Versuchsvorrichtung belastet. In Abbildung 6-15 werden die resultierenden Höhen der Beulen sowie der Falten gegenübergestellt.

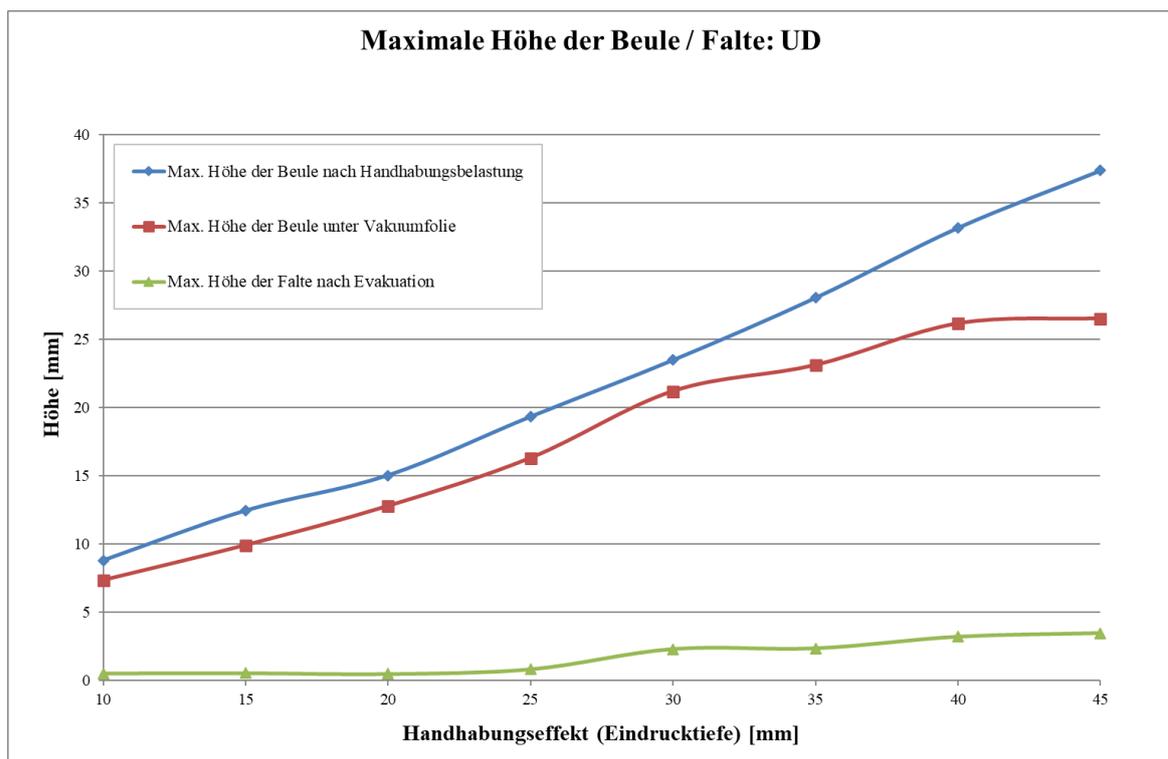


Abbildung 6-15: Entwicklung der Falten in Abhängigkeit der Eindrucktiefe des Stempels (Handhabungseffekt) für die UD-Textilproben (Eindrucktiefen von 10 mm bis 45 mm)

Ab der Stempel-Eindrucktiefe von 25 mm kann ein signifikanter Anstieg der resultierenden Faltenhöhe beobachtet werden. Bis zu einer Stempel-Eindrucktiefe von 25 mm werden die Beulen durch die anschließende Evakuierung weitestgehend kompensiert. Die Messvorrichtung ist auf die Identifikation von Unebenheiten in der Textilprobe im Messbereich kalibriert. Eventuelle Faserfehlorientierungen, die sich aus der Flächenbelastung der evakuierten Vakuumfolie ergeben, werden durch diese Messmethode nicht erfasst. Die möglichen Faserfehlorientierungen können sich jedoch bei der nachfolgenden Infusion bzw. bei der Berechnung der Permeabilität bemerkbar machen.

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

In Abbildung 6-16 sind die Draufsichten der jeweiligen Zustände der UD-Textilproben qualitativ gegenübergestellt. Im ersten Schritt ist der Eindruck der Textilprobe unmittelbar nach der Belastung mit dem Stempel dargestellt. Im zweiten Schritt ist dieselbe Probe gewendet dargestellt. Anschließend befindet sich die Textilprobe unter der Vakuumfolie. Im letzten Schritt wird die Textilprobe nach der Evakuierung dargestellt. Auf diese Art soll der Transformationsprozess der Textilprobe über die verschiedenen Stempel-Eindrucktiefen gegenübergestellt werden.

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

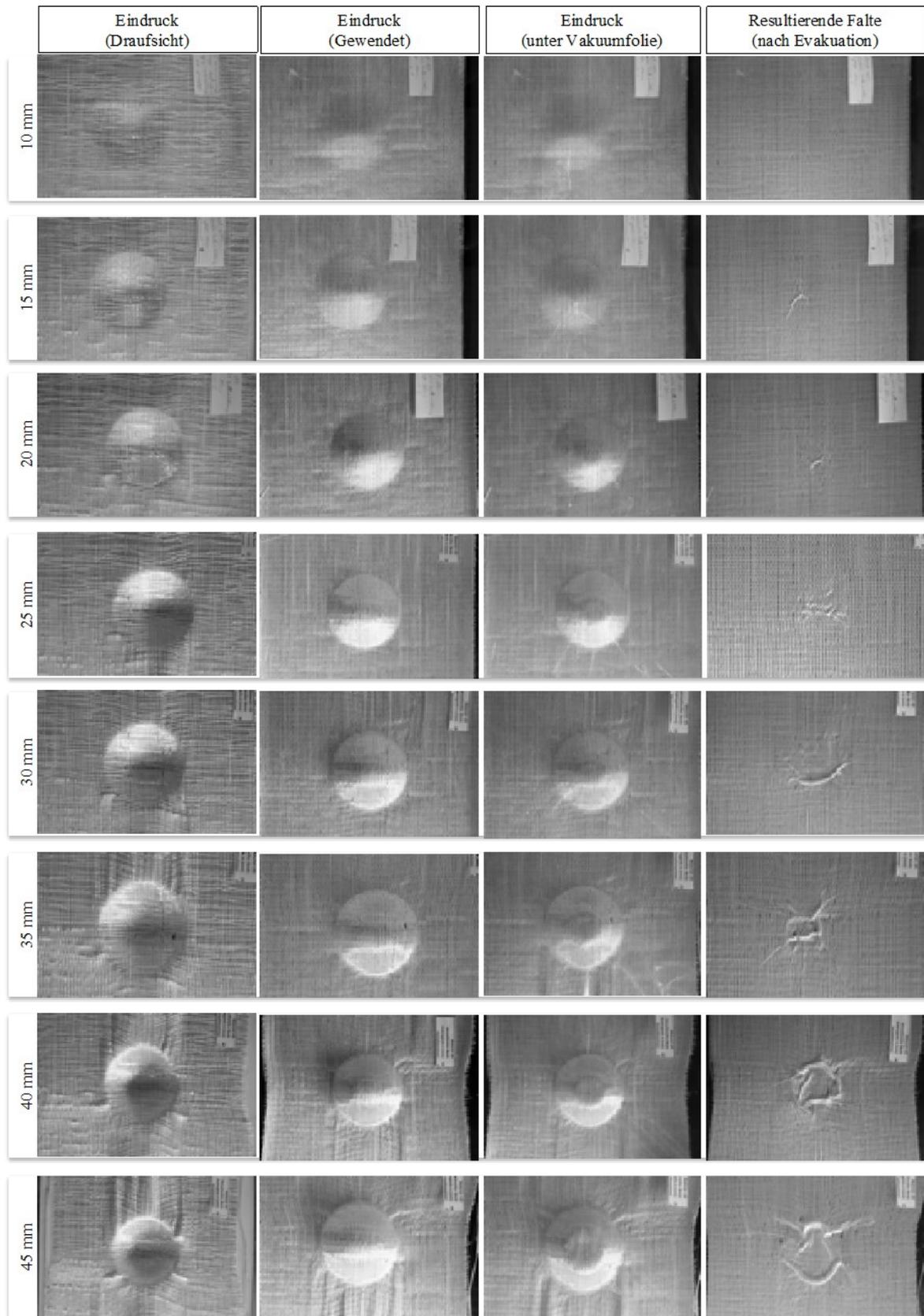


Abbildung 6-16: Darstellung der Faltenbildung bei steigender Handhabungsbelastung (UD-Textilproben) für die Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 45 mm

Transformationsverhalten bei BIAX-Textilproben

Die BIAX-Textilproben wurden in einem Bereich von 10 mm bis 35 mm Stempel-Eindrucktiefe belastet. In Abbildung 6-17 werden die resultierenden Höhen der Beulen sowie der Falten gegenübergestellt. Ähnlich wie beim UD-Textil ist ab einer Stempel-Eindrucktiefe von 25 mm ein signifikanter Anstieg der Faltenhöhe zu beobachten.

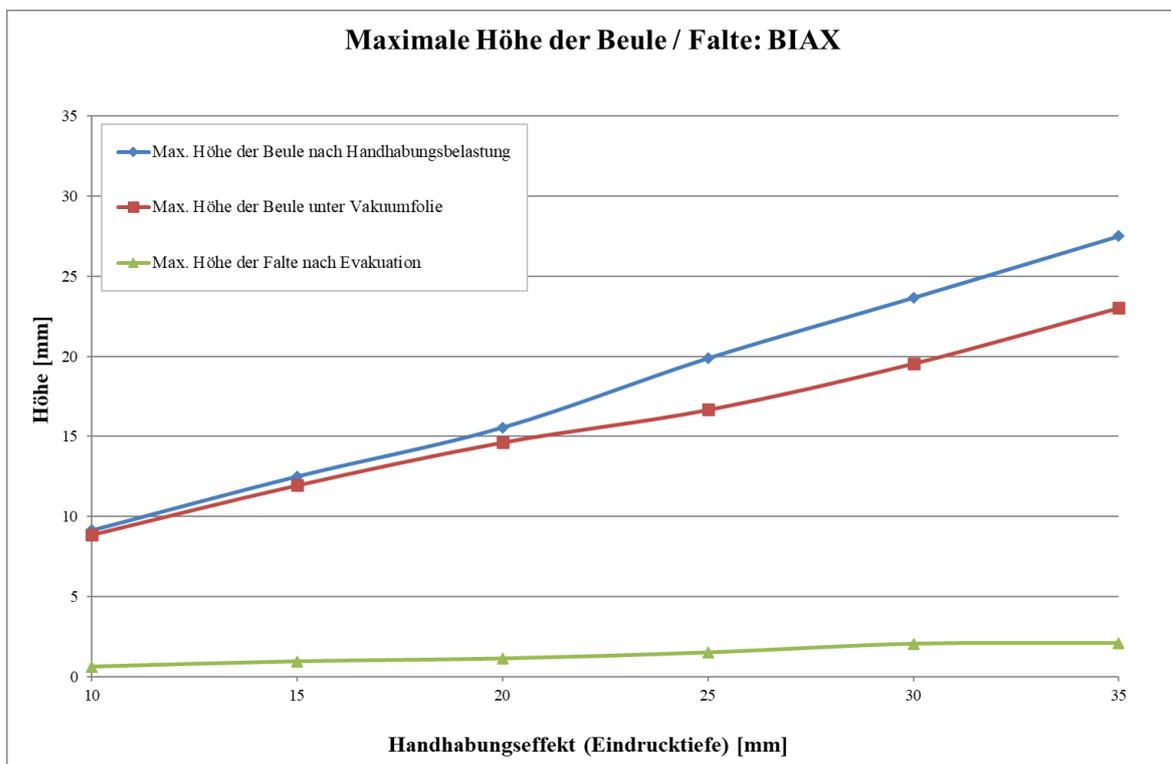


Abbildung 6-17: Entwicklung der Falten in Abhängigkeit der Stempel-Eindrucktiefe für BIAX-Textilproben (Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm)

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

In Abbildung 6-18 sind die Draufsichten der jeweiligen Zustände der BIAX-Textilproben qualitativ gegenübergestellt.

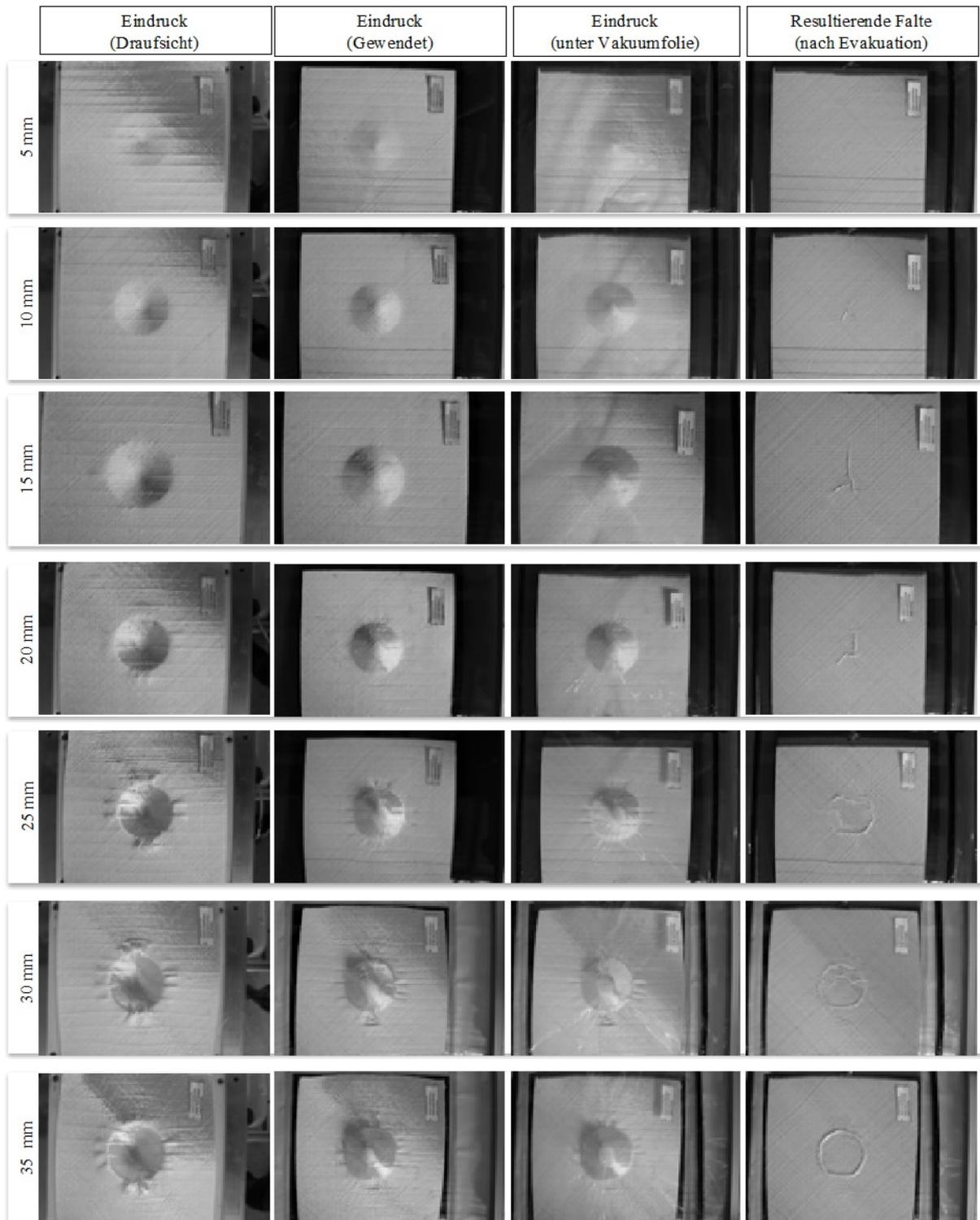


Abbildung 6-18: Darstellung der Faltenbildung bei steigender Handhabungsbelastung (BIAX-Textilproben) für die Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm

Transformationsverhalten bei TRIAX-Textilproben

Die TRIAX-Textilproben wurden in einem Bereich von 10 mm bis 35 mm Stempel-Eindrucktiefe durch die Versuchsvorrichtung belastet. In Abbildung 6-19 werden die resultierenden Höhen der Beulen sowie der Falten gegenübergestellt. Im Vergleich zu den UD- und BIAX-Textilproben ist bereits ab einer Stempel-Eindrucktiefe von 20 mm ein signifikanter Anstieg der Faltenhöhe zu beobachten.

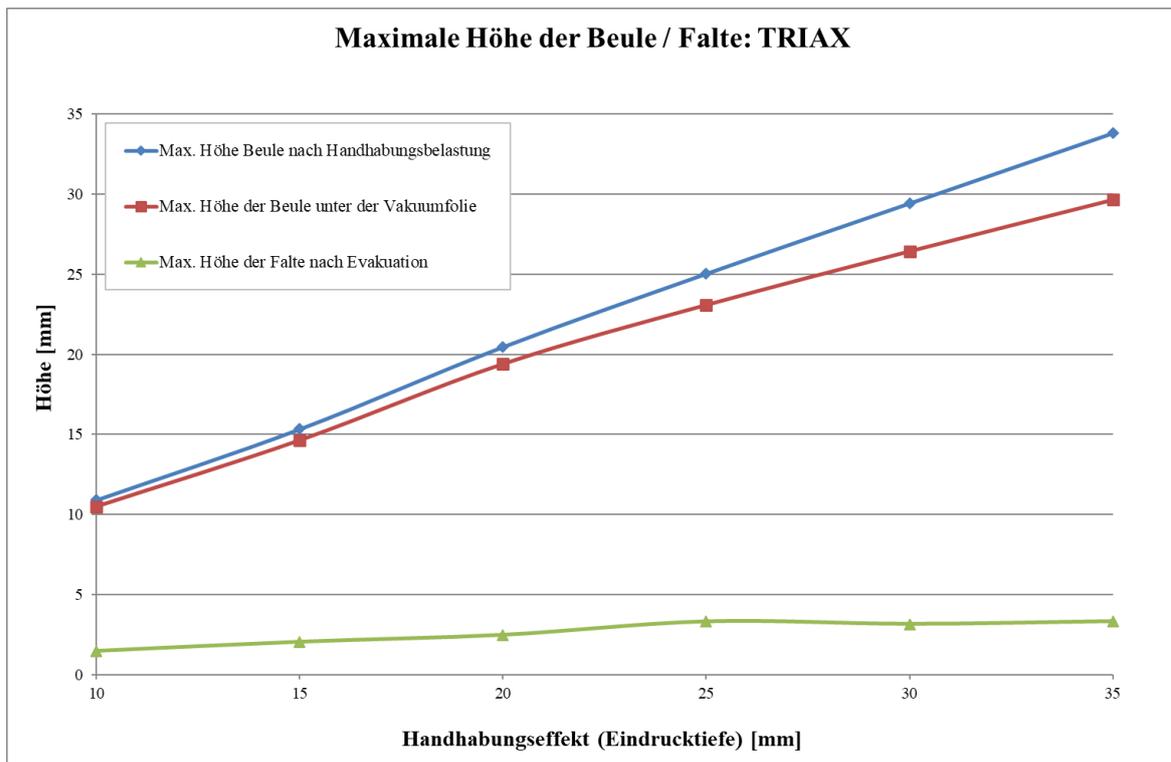


Abbildung 6-19: Entwicklung der Falten in Abhängigkeit der Stempel-Eindrucktiefe (TRIAX-Textilproben) für Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

In Abbildung 6-20 sind die Draufsichten der jeweiligen Zustände der TRIAX-Textilproben qualitativ gegenübergestellt.

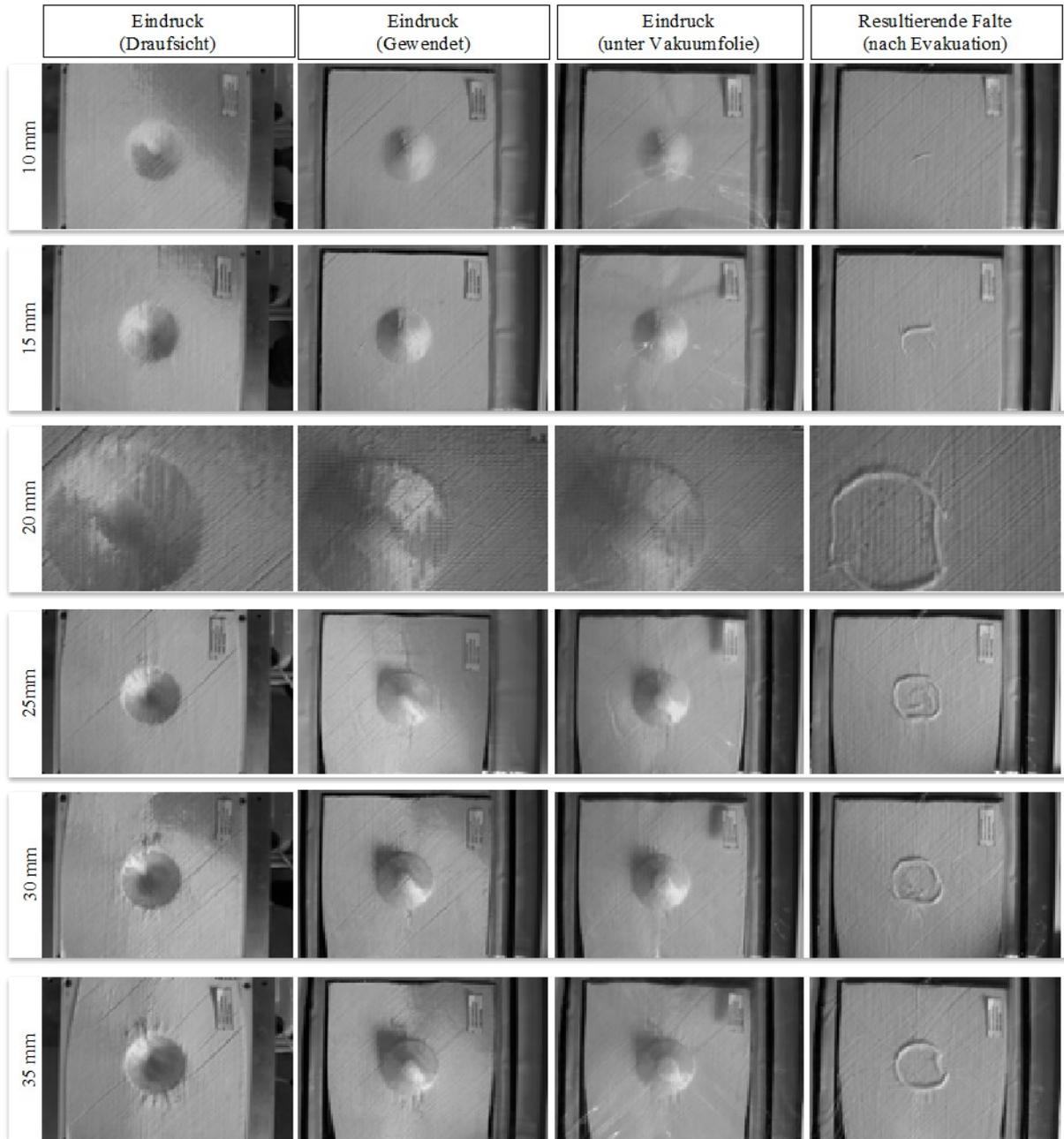


Abbildung 6-20: Darstellung der Faltenbildung bei steigender Handhabungsbelastung (TRIAX-Textilproben) für die Stempel-Eindrucktiefen von 10 mm bis 35 mm

6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Einbringung des Fehlers in Form einer Beule kommt es nach dem Vakuumziehen zur Faltenbildung innerhalb der Textilprobe. Die Höhen und die Flächen der Falten geben Aufschluss darüber, wie sich die verschiedenen Gelege verhalten. Die dreilagige Struktur von TRIAX führt zu einer stärker ausgeprägten Falte als das zweilagige BIAX und das einlagige UD. Die maximalen Höhen von BIAX sind bis zu einer Eindringtiefe von 25 mm auch entsprechend größer als die von UD. Bei den Eindringtiefen 30 mm und 35 mm ändert sich dieser Trend. An der Standardabweichung (Abbildung 6-21) wird jedoch deutlich, dass diese Werte höchstwahrscheinlich durch Ausreißer bestimmt sind und somit die Auswertung verfälschen. Im angewendeten Messbereich haben alle Graphen einen ähnlichen Verlauf. Sie steigen zunächst an und nähern sich dann dem jeweiligen maximalen Wert an. Bei UD ist dieses Verhalten allerdings nur bis zu einer Eindringtiefe von 35 mm zu beobachten. Höhere Eindringtiefen bewirken einen erneuten Anstieg im Graphen, wobei die Standardabweichungen höher sind.

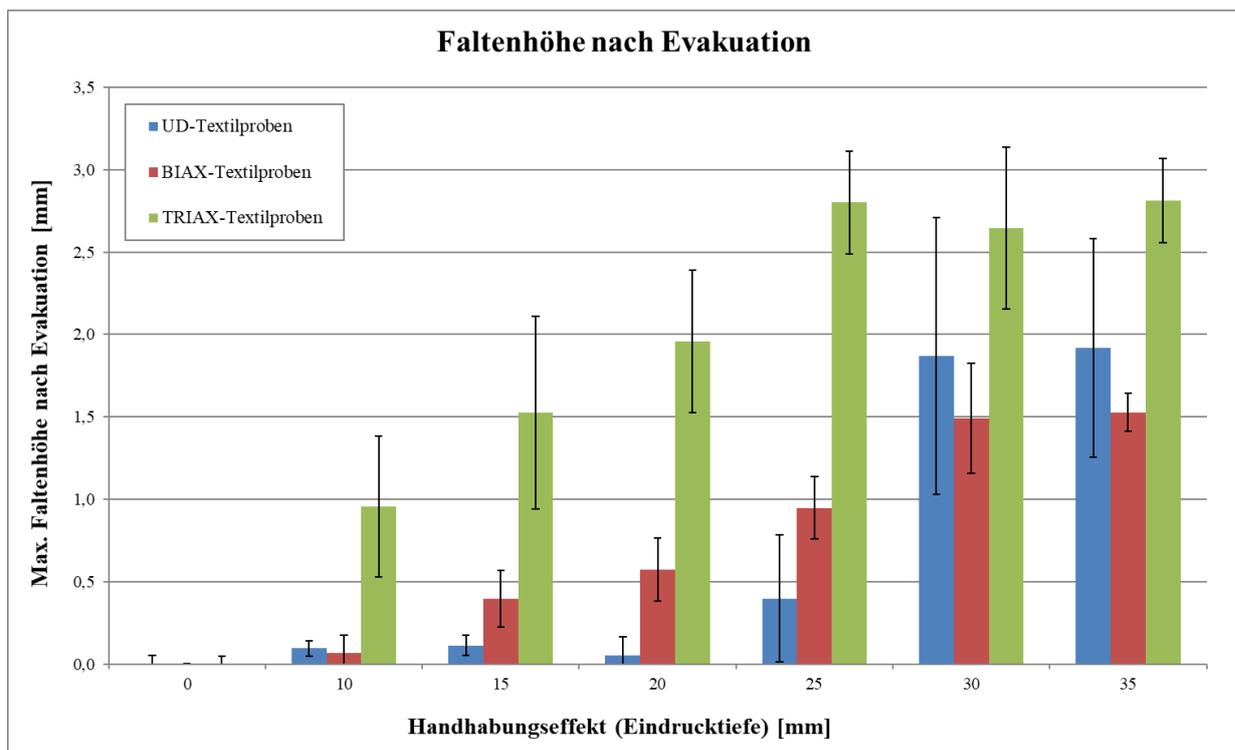


Abbildung 6-21: Transformation einer Beule zu einer Falte durch das Vakuumziehen bei unterschiedlichen Beulentiefen und unterschiedlichen Materialien (UD, BIAX, TRIAX)

Bei den BIAX- und TRIAX-Textilproben hat bereits eine geringe Umformung (10 mm) zu einer ersten Faltenbildung nach der Evakuierung unter der Vakuumfolie geführt. Im Vergleich dazu wurde an den UD-Textilproben eine Faltenbildung erst nach einer Belastung von 20 mm beobachtet. Bei einer geringen Stempel-

Eindrucktiefe von 5 mm verformen sich die Proben zurück in ihren Anfangszustand. Verantwortlich dafür ist die Faserstruktur der getesteten Textilien. Bei der mehrlagigen Struktur der BIAX- und TRIAX-Textilien bilden sich schon bei kleineren Eindrucktiefen Falten. Die Formen der Falten variieren bei kleineren Eindrucktiefen sehr stark.

Erst ab einer größeren Eindrucktiefe entsteht eine Falte in Form eines Kreises. Dies liegt an der Matrize und dem Eindruckstempel, die kreis- bzw. halbkugelförmig sind. Bei BIAX und TRIAX entsteht erst bei einer Eindrucktiefe von 25 mm die Kreisform. Bei UD entsteht erst bei einer höheren Eindrucktiefe diese Form. Die Versuche bis zu einer Eindrucktiefe von 45 mm ergeben jedoch Falten, die nur annähernd kreisförmig sind. Tendenziell kann das UD-Textil die Handhabungseffekte am besten kompensieren. Das bedeutet jedoch nur, dass sich Falten unter der evakuierten Vakuumfolie erst ab einer höheren Belastung bilden. Bei BIAX und TRIAX bilden sich messbare Abweichungen bereits bei vergleichsweise geringeren Beanspruchungen, bei BIAX ab ca. 15 mm, bei TRIAX bereits ab 10 mm.

Durch die nun folgende Untersuchung der Permeabilität der imperfekten Textilproben soll der Zusammenhang zwischen dem Handhabungseffekt bzw. der Handhabungsbelastung und dem Fließverhalten des Wassers als Ersatzmedium durch die Textilstruktur untersucht werden. Es ist zu erwarten, dass die äußerlich sichtbaren Falten einen Einfluss auf die Permeabilität aufweisen. Zu klären ist zudem, ob eventuell auch von außen nicht messbare Effekte auftreten und somit die Permeabilität beeinflussen.

6.4 Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität von Preforms

Nachdem das geometrische Transformationsverhalten der durch die Versuchsvorrichtung eingebrachten Beulen und der daraus folgenden Falten unter der Vakuumfolie betrachtet wurde, soll nachfolgend das Tränkungsverhalten der imperfekten Textilproben näher untersucht werden (Abbildung 6-22). Hierzu werden die evakuierten Textilproben mit Wasser als Ersatzmedium durchtränkt und der Fließfrontverlauf wird erfasst. Durch diese Untersuchung soll der Einfluss von gezielt eingebrachten Handhabungseffekten auf die Permeabilität der Textilprobe ermittelt werden. Die zu betrachtenden Handhabungseffekte sind Faserfehlorientierungen sowie Beulen und Falten. Durch diese Untersuchung soll festgestellt werden, ob sich Handhabungseffekte in der Permeabilität des Textils widerspiegeln und ob diese mit den zuvor betrachteten geometrischen Ausprägungen der Imperfektionen korrelieren.

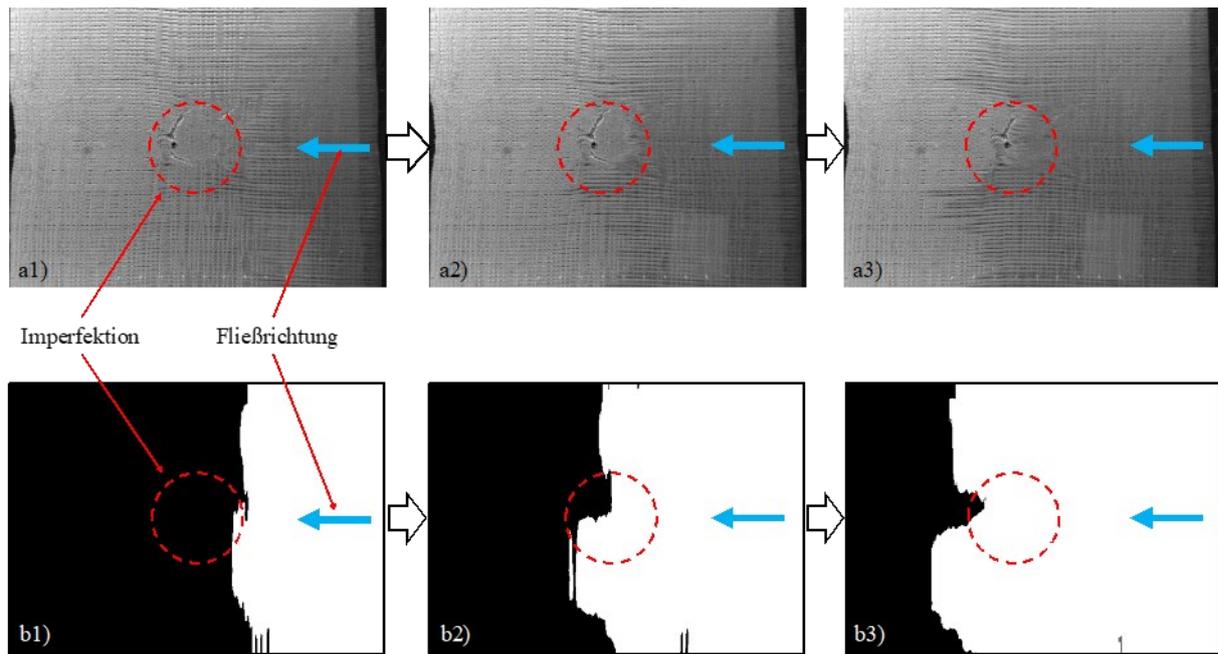


Abbildung 6-22: Durchtränkung einer evakuierten Textilprobe (UD, Eindringtiefe 30 mm) in drei Sequenzen (Original Bild a1 bis a3, binarisierte Darstellung b1 bis b3)

6.4.1 Einfluss der Faserfehlorientierung auf die Permeabilität von Preforms

Um den Einfluss der Faserausrichtung auf die Durchtränkung zu bestimmen, wurden die Proben in den Winkeln 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° geschnitten. Die Referenzprobe wird in einem Winkel von 0° in Faserrichtung belassen. Für jeden Winkel wurden gemäß des Versuchsplans fünf Versuche durchgeführt. In Abbildung 6-23 sind beispielhaft Textilproben mit Faserwinkeln von 0° , 45° , 75° und 90° dargestellt (a bis d). Zu erkennen sind die unterschiedlichen Fließfronten abhängig vom jeweiligen Faserwinkel. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, verlaufen bei den UD-Textilproben mit 0° -Faserausrichtung die Faserstränge parallel zum Druckgradienten in Richtung des Entlüftungsschlauches a). Deutlich zu erkennen ist auch der Fließfrontverlauf bei den im Winkel geschnittenen Textilproben 45° und 75° (b, c).

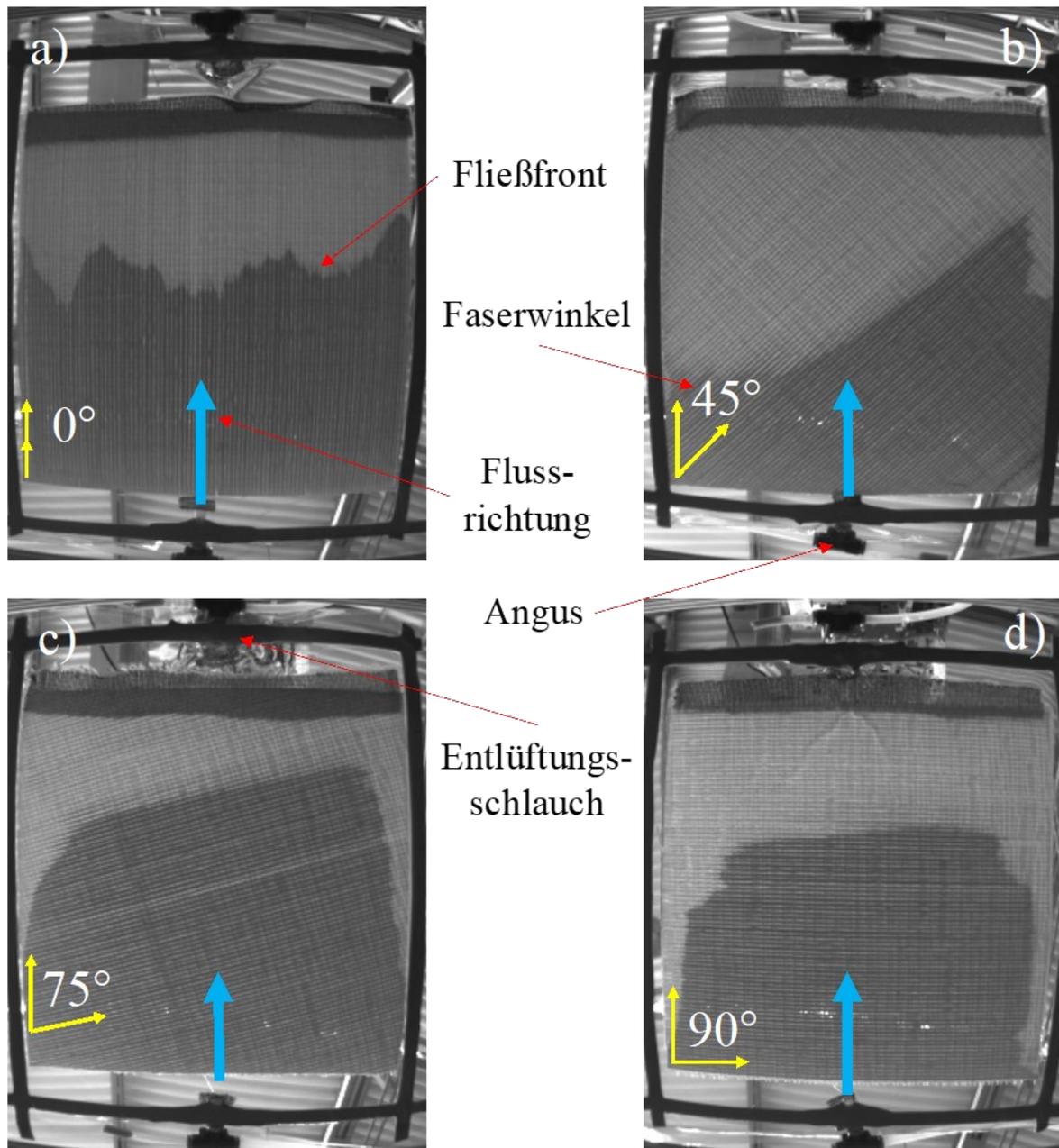


Abbildung 6-23: Ansicht unterschiedlicher Textilproben (a = 0°, b = 45°, c = 75° und d = 90°) während der Infusion

In Abbildung 6-24 werden die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Durchflusszeiten für die komplette Durchtränkung sowie die Durchflusszeiten von Anguss zum Entlüftungsschlauch dargestellt. Für die Berechnung der Durchtränkungszeit von Anguss zum Entlüftungsschlauch wird ein Bereich mittig der Probe verwendet.

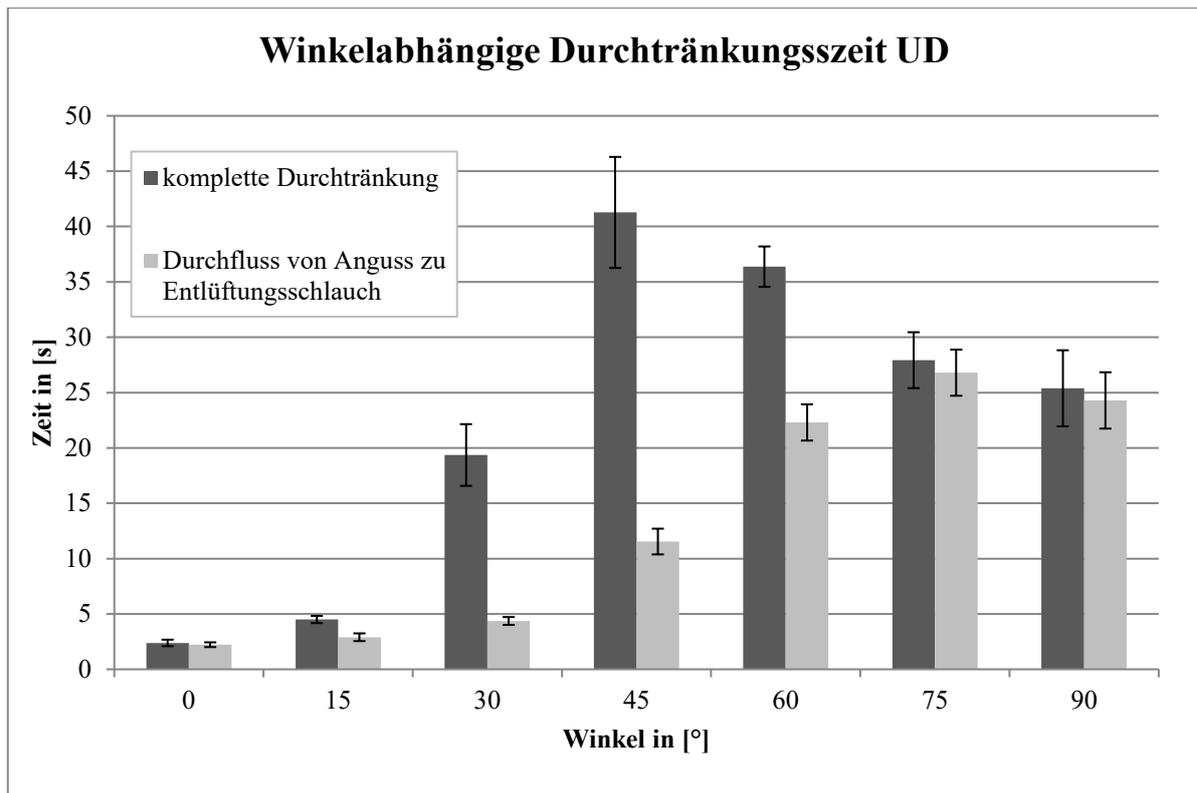


Abbildung 6-24: Durchtränkungsverhalten von UD bei unterschiedlicher verschiedener Faserorientierung

Die Durchflusszeiten von Anguss zu Entlüftungsschlauch steigen bei jeder Winkelvergrößerung bis 75° an, wohingegen die Durchflusszeiten für die komplette Durchtränkung zunächst stark bis 45° ansteigen, dann jedoch wieder bis 90° leicht abfallen. Bei den 45°-Proben ist eine besonders große Differenz zwischen der Durchtränkungszeit von Anguss zum Entlüftungsschlauch und der kompletten Durchtränkung zu beobachten. In diesem Fall benötigt das Fluid bedingt durch den Faserwinkel eine besonders lange Zeit, die Probe vollständig zu benetzen. Bei den Proben mit 90°-Faserausrichtung ergeben sich kürzere Durchtränkungszeiten von Anguss zum Entlüftungsschlauch als bei den 75°-Proben.

Neben unterschiedlicher Fließfronteigenschaften der jeweiligen Faserwinkel wurden auch Racetracking-Effekte bzw. Bypass-Strömungen beobachtet (vgl. [Zare18]). Das Fluid fließt nicht nur durch die Textilprobe, sondern ebenfalls an den Rändern der Probe vorbei. Ebenfalls auffällig bei den 75°- und 90°-Textilproben sind höhere Standardabweichungen als bei den kleineren Winkelauslenkungen. Der Trend der Durchtränkungszeiten kann also auch eine Folge der Streuung der Messwerte sein. Die Durchtränkungszeiten der kompletten Durchtränkung weichen bei einer Winkelauslenkung um 45° sehr stark von den Werten der Durchflusszeiten von Anguss zu Entlüftungsschlauch ab. Dies liegt am Unterdruck, der in den Ecken der Probe tendenziell geringer ist und durch die Faserausrichtung der Probe reduziert wird. Insbesondere fällt bei den 45°-

Textilproben auf, dass das Fluid in einer Ecke senkrecht auf die Faserstränge zufließt. In diesem Bereich wird der Fließfrontverlauf nicht mehr vom Unterdruck, sondern vielmehr vom Kapillardruck bestimmt. Da das Fluid aufgrund des Druckgradienten durch Unterdruck zum Entlüftungsschlauch gezogen wird, spielt der Racetracking-Effekt in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle. Die komplette Durchtränkung der Probe dauert in diesem Fall entsprechend lange. Die Standardabweichungen zeigen, dass die vollständige Durchtränkung einer hohen Streuung unterliegt, wodurch die auftretenden Einflüsse quantitativ, aber auch qualitativ nicht eindeutig differenziert werden können.

Permeabilität

Die Permeabilitäten werden in einem Bereich von ca. 50 mm mittig der Probe von Anguss zur Entlüftung berechnet und verhalten sich antiproportional zu den Durchflusszeiten. In Abbildung 6-25 sind die Permeabilitätswerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Permeabilität ausgehend von 0° kontinuierlich abfällt. Dieser Trend war nicht anders zu erwarten, da durch die Winkelveränderung ein Widerstand für die Fließfront entsteht. Ab einem Winkel von 60° verhalten sich die Permeabilitäten relativ konstant.

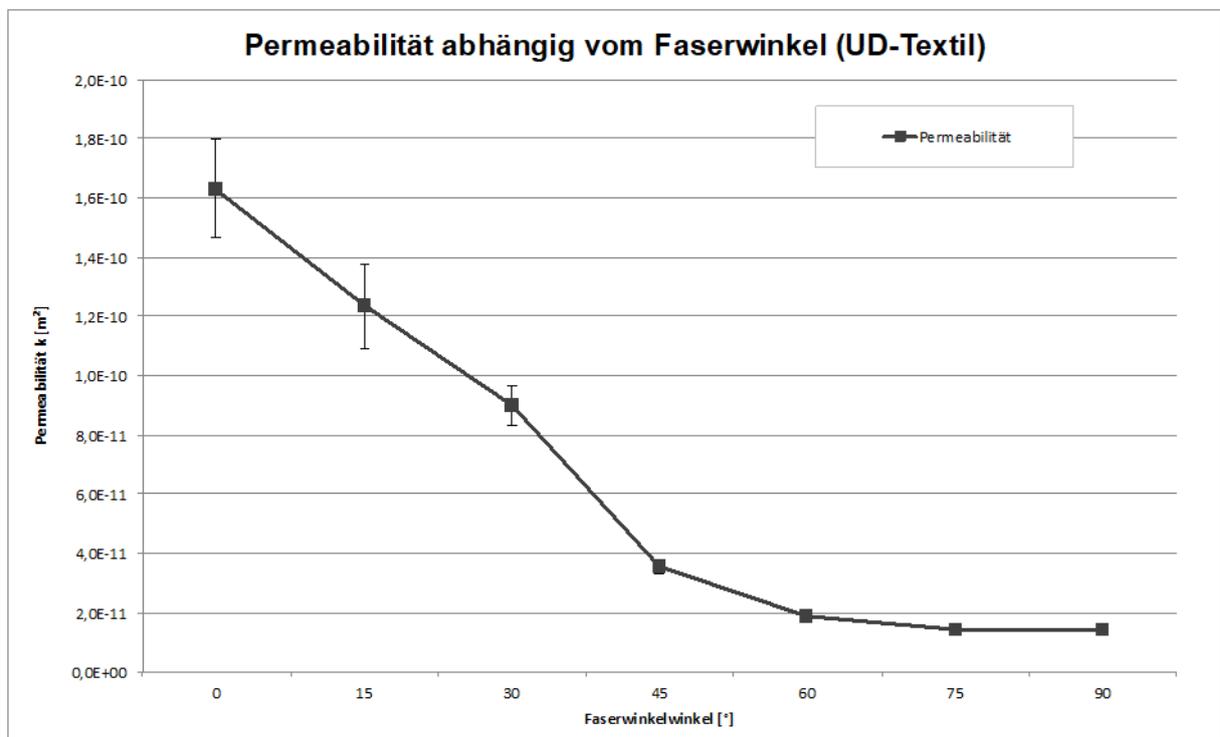


Abbildung 6-25: Permeabilitäten bei verschiedener Faserorientierung

Da die Standardabweichungen bei diesen Winkeln eher klein sind, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Winkelauslenkung ab einem Winkel von 60° nur noch minimal Auswirkung auf die Permeabilität hat.

6.4.2 Einfluss von Falten auf die Permeabilität in UD-Materialien

Darauffolgend wurde die Durchtränkbarkeit der mit Imperfektionen versehenen UD-Textilproben untersucht. Wie zuvor in der Betrachtung des geometrischen Transformationsverhaltens der UD-Textilproben von der Beule bis zur Falte wurde jede einzelne Probe im Anschluss der Umformung mit einem Fluid durchtränkt. Dabei ist auffällig, dass die Imperfektion in den UD-Textilproben tendenziell zu einer Erhöhung der Durchflusszeit des Fluids führen. Als Referenz wurde hierbei eine unbeschädigte UD-Textilprobe mit einer Faserausrichtung in 0° in Flussrichtung verwendet. In der Referenzprobe fließt das Fluid innerhalb von ca. zwei Sekunden von Anguss zum Entlüftungsschlauch. Im Verhältnis dazu wird die Fließgeschwindigkeit in den beschädigten UD-Textilproben mit zunehmender Eindringtiefe verlangsamt.

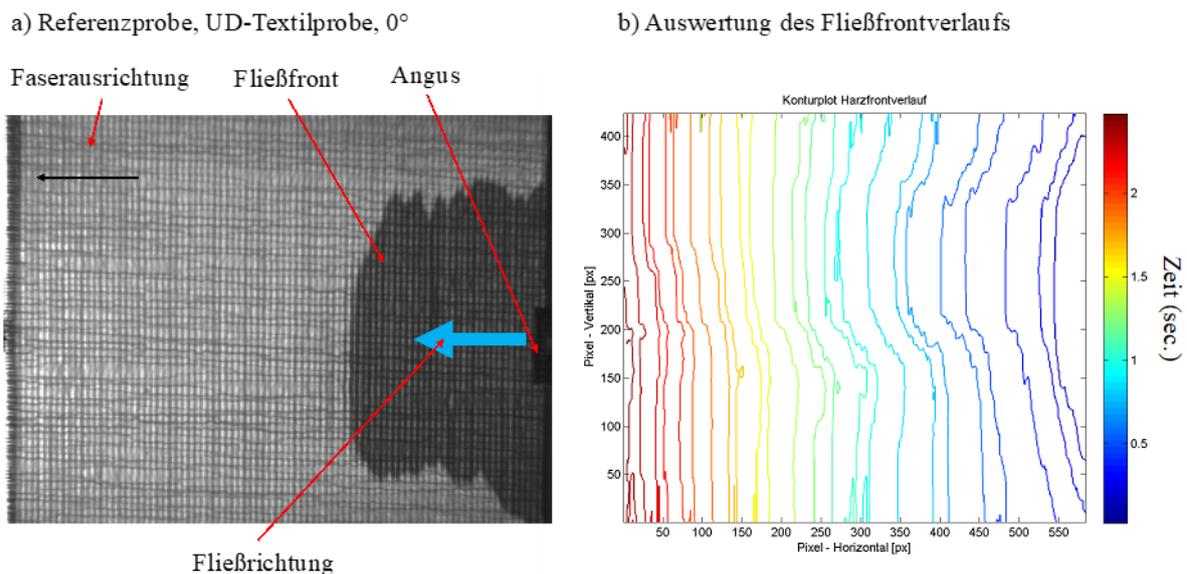


Abbildung 6-26: Fließfrontverlauf der unbeschädigten UD-Textilprobe

Anders als bei den Versuchen zur Faserorientierung verhalten sich die Durchflusszeiten bei kompletter Durchtränkung sowie bei der Durchtränkung von Anguss zu Entlüftungsschlauch ähnlich. Es kann kein Einfluss der Falte auf die Differenzen der Durchtränkungszeiten festgestellt werden. Durch die mittige Position der Angüsse dauert die komplette Durchtränkung der Probe allgemein länger als die Durchtränkung von Anguss zur Entlüftung.

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

Bei der Betrachtung der Durchflusszeiten der UD-Textilproben wirkt im Allgemeinen die Imperfektion (Falte) als Widerstand, den das Fluid überwinden muss. Eine Falte, die sich orthogonal zur Fließrichtung ausbildet, ist annähernd vergleichbar mit einer Winkeländerung um 90° . Die Auswertung der Versuche zur Faserorientierung zeigen, dass es bei zunehmendem Winkel zum Racetracking-Effekt kommt. Ein analoger Effekt tritt ebenfalls bei der Falte auf. Das Fluid nimmt den Weg des geringsten Widerstandes und fließt zunächst um die Falte herum.

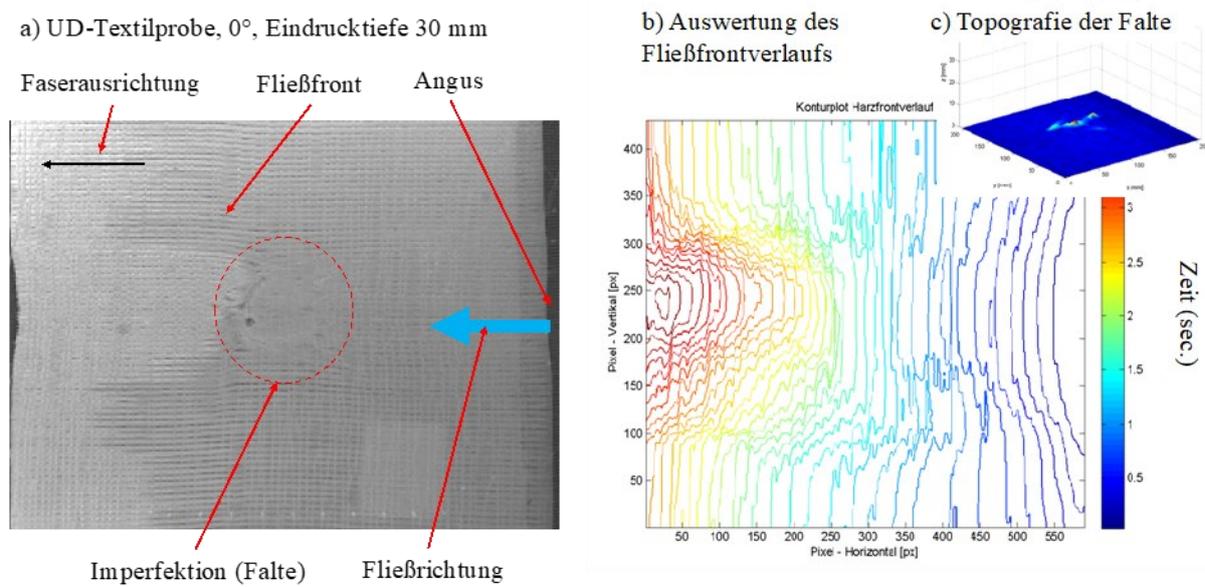


Abbildung 6-27: Fließfrontverlauf der UD-Textilprobe bei einer Eindringtiefe von 30 mm

In Abbildung 6-27 sind die Falte a) und der dazugehörige Fließfrontverlauf b) einer UD-Textilprobe bei einer Eindringtiefe von 30 mm dargestellt. Bei diesem Versuch verläuft die Falte senkrecht zur Fließrichtung und es ist zu erkennen, dass das Fluid in der Mitte abgebremst wird. Durch die geringe Viskosität von Wasser wird allerdings trotzdem die komplette Probe durchtränkt. Bei Medien mit höherer Viskosität kann es durch die Falte aber durchaus zu Lufteinschlüssen kommen, an denen keine Durchtränkung der Fasern gewährleistet werden kann.

In Abbildung 6-28 werden die Permeabilität sowie die Faltenhöhe in Bezug gesetzt. Ausgehend von der Referenztextilprobe ohne Beschädigung wird die Veränderung der Permeabilität in Prozent über die verschiedenen Stempel-Eindringtiefen dargestellt. Wie bereits in der Untersuchung der geometrischen Eigenschaften der Textilproben vor und nach dem Vakuumziehen wird ein signifikanter Anstieg der Faltenhöhe erst ab einer Stempel-Eindringtiefe von 25 mm sichtbar. Die Veränderung der Permeabilität ist jedoch schon deutlich früher, nämlich ab einer Stempel-Eindringtiefe von 15 mm zu erkennen. Die Imperfektionen im Inneren der Textilprobe, die nur schwer von außen messbar sind, haben offensichtlich einen starken Einfluss auf den Abfall der Permeabilität in den UD-Textilproben. Bis zur

höchsten Stempel-Eindrucktiefe von 45 mm fällt die Permeabilität um ca. 50 % ab und hat in diesem Bereich einen tendenziell linearen Verlauf. Zu erkennen ist ebenfalls ein ähnliches Verhalten im Bereich der Stempel-Eindrucktiefen von 30 mm und 35 mm. Die dabei resultierenden Faltenhöhen liegen bei ca. 2 mm. Entsprechend liegen die dazugehörigen Permeabilitäten auf ähnlichem Niveau.

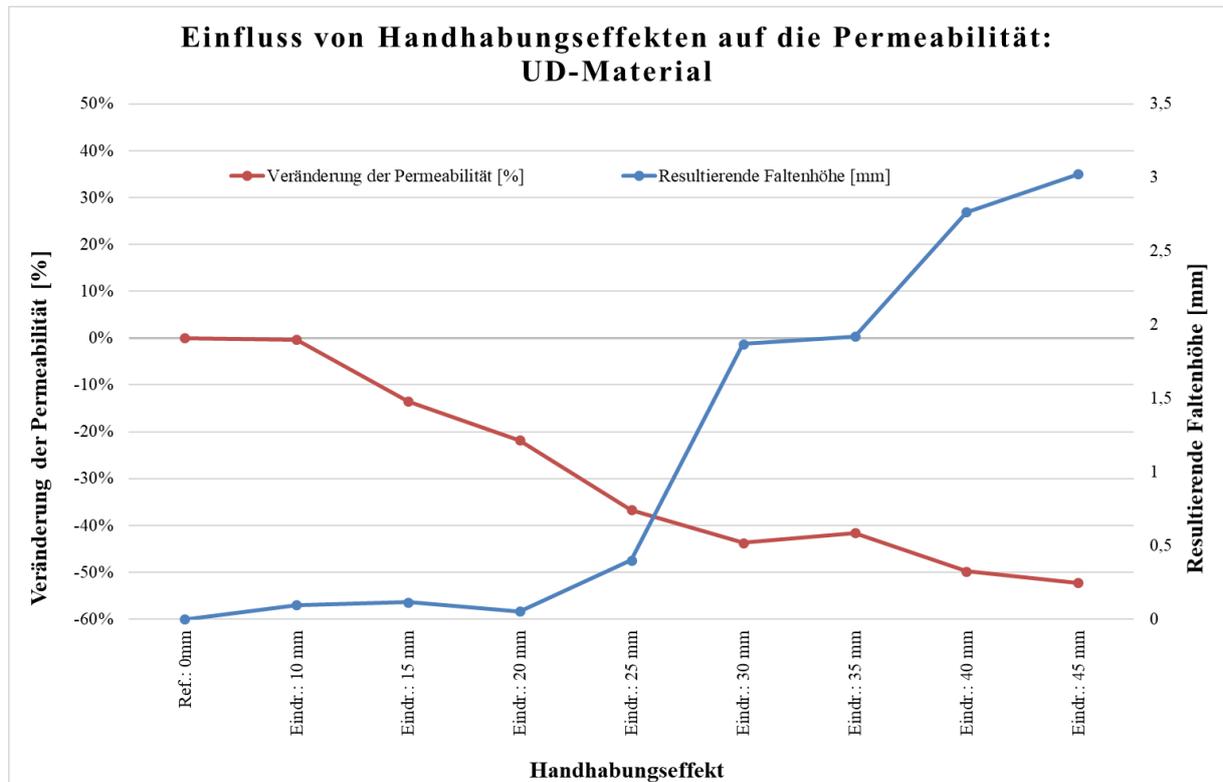


Abbildung 6-28: Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität der UD-Textilproben

6.4.3 Einfluss von Falten auf die Permeabilität in BIAX-Materialien

Die Untersuchung des Tränkungsverhaltens der BIAX-Textilproben erfolgte analog zu den Untersuchungen der UD-Proben. Als Referenz wurden hierbei unbeschädigte BIAX-Textilproben in derselben Faserausrichtung verwendet. Pro Stempel-Eindrucktiefe wurden jeweils fünf BIAX-Textilproben durchtränkt und ausgewertet. Verglichen mit den Untersuchungen der UD-Textilproben steigt die Permeabilität bei den BIAX-Textilproben tendenziell mit zunehmender Stempel-Eindrucktiefe. Bei näherer Betrachtung der Auswertung der Versuchsdaten ist eine Streuung um 0 % bis zu einer Stempel-Eindrucktiefe von 20 mm zu erkennen. Ab einer Stempel-Eindrucktiefe von 25 mm ist eine signifikante Steigerung der Permeabilität bis auf über 45 % bei der Eindrucktiefe von 35 mm zu erkennen.

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

Die durch die Stempel-Belastung resultierenden Falten sind bereits ab einer Stempel-Eindrucktiefe von 10 mm zu erkennen. Allerdings sind die Falten mit einer Höhe von unter 0,5 mm sehr gering. Auch die maximale Faltenhöhe von ca. 1,5 mm bei der Stempel-Eindrucktiefe von 35 mm fällt, verglichen mit den UD-Textilproben, sehr gering aus. Auffällig ist, dass bereits kleine Stempel-Eindrucktiefen eine messbare Steigerung der resultierenden Faltenhöhe ergeben.

Anhand dieser Auswertung wird deutlich, dass weitere Effekte innerhalb des Textils einen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen der Textilbelastung und der resultierenden Permeabilität haben müssen. Eine mögliche Erklärung könnte auf die Bildung von Gaps in Folge der Stempel-Belastung in der textilen Struktur zurückzuführen sein. Eine nähere Betrachtung dieses Zusammenhangs müsste in einer aufbauenden Untersuchung analysiert werden.

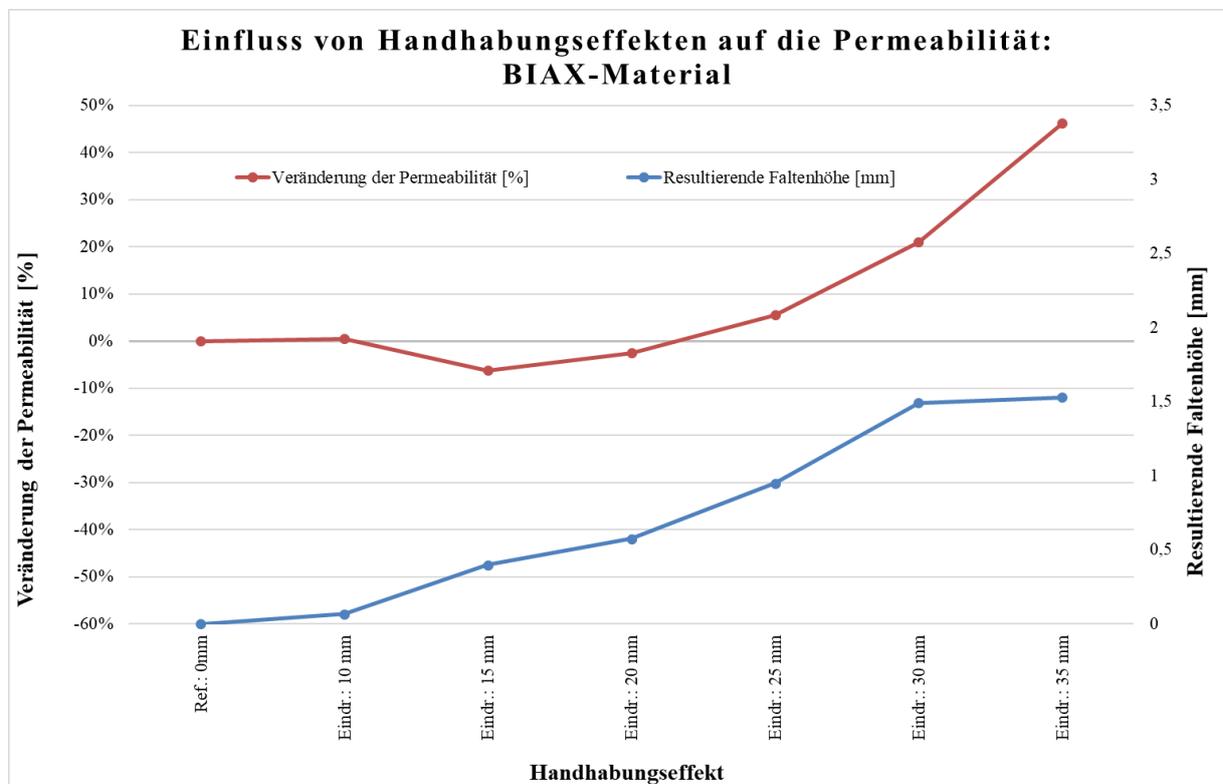


Abbildung 6-29: Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität der BIAX-Textilproben

In Abbildung 6-30 wird beispielhaft der Fließfrontverlauf einer BIAX-Textilprobe mit einer Stempel-Eindrucktiefe von 35 mm dargestellt. Es ist erkennbar, dass das Fluid beim Durchfließen des imperfekten Bereichs eine Beschleunigung in Folge eines geringeren Widerstands erfährt.

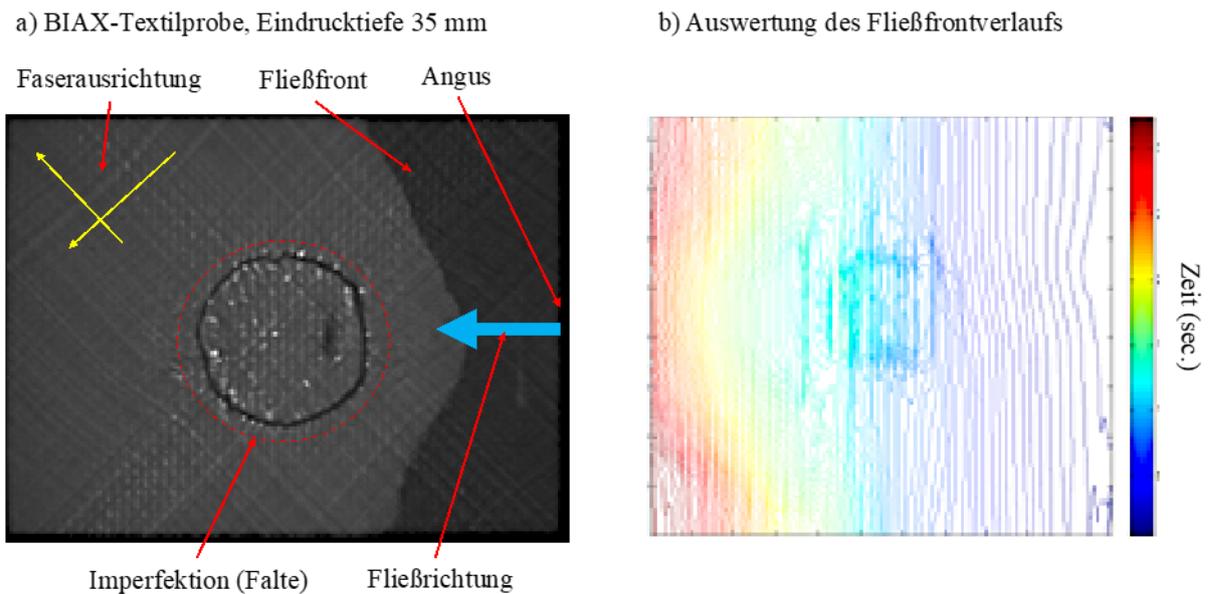


Abbildung 6-30: Beispiel des Fließfrontverlaufs im BIAX-Textil bei einer Stempel-Eindrucktiefe von 35 mm

6.4.4 Einfluss von Falten auf die Permeabilität in TRIAX-Materialien

Das Durchtränkungsverhalten von TRIAX verhält sich wiederum anders als das von UD und BIAX. Die durch die unterschiedlichen Eindrucktiefen hervorgerufenen Imperfektionen (Falten) haben im angewendeten Messbereich keinen signifikant erkennbaren Einfluss auf die Durchflusszeiten.

Wie in Abbildung 6-31 dargestellt, verhalten sich die aus den Durchflusszeiten abgeleiteten Permeabilitäten nahezu konstant und variieren ausgehend von der Referenz-Probe zwischen +20 % und -10 %. Die durch die unterschiedlichen Eindrucktiefen belasteten TRIAX-Textilproben weisen bereits bei einer Eindrucktiefe von 10 mm eine messbare Falte auf, die nahezu linear auf ca. 3 mm bei der Eindrucktiefe von 35 mm steigt. Allerdings ist durch die eingebrachte Imperfektion kein signifikanter Zusammenhang zur Veränderung der Permeabilität in den TRIAX-Textilproben zu erkennen. Dieses Material scheint verhältnismäßig unempfindlich für lokale Veränderungen in der Faserstruktur zu sein. Dies lässt sich möglicherweise damit erklären, dass eine Kompensation zwischen der Verdichtung der Faserstruktur und der gleichzeitigen Bildung von Gaps stattfindet. Das Fluid findet entsprechend im gleichen Maße seinen Weg durch die Textilstruktur, was sich in der geringen Variation der Permeabilität widerspiegelt.

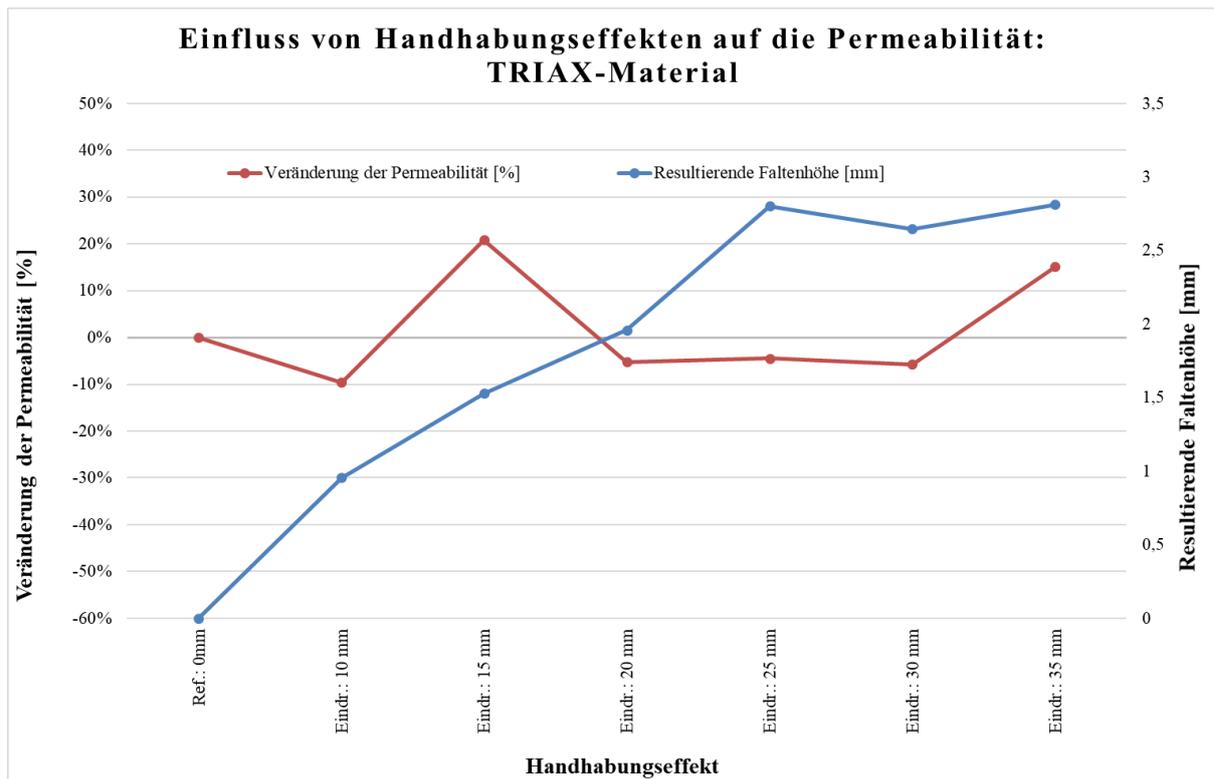


Abbildung 6-31: Einfluss von Handhabungseffekten auf die Permeabilität der TRIAX-Textilproben

In Abbildung 6-32 ist beispielhaft der Fließfrontverlauf einer TRIAX-Textilprobe mit einer Imperfektion, die durch eine Eindrucktiefe von 25 mm hervorgerufen wurde, dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine kreisförmige Faltenbildung in der Mitte der Textilprobe. Diese geometrisch stark ausgeprägte Fehlstelle übt jedoch keinen signifikant erkennbaren Einfluss auf die Durchtränkung der verwendeten TRIAX-Textilproben aus. Die Fließfront verläuft daher sehr linear.

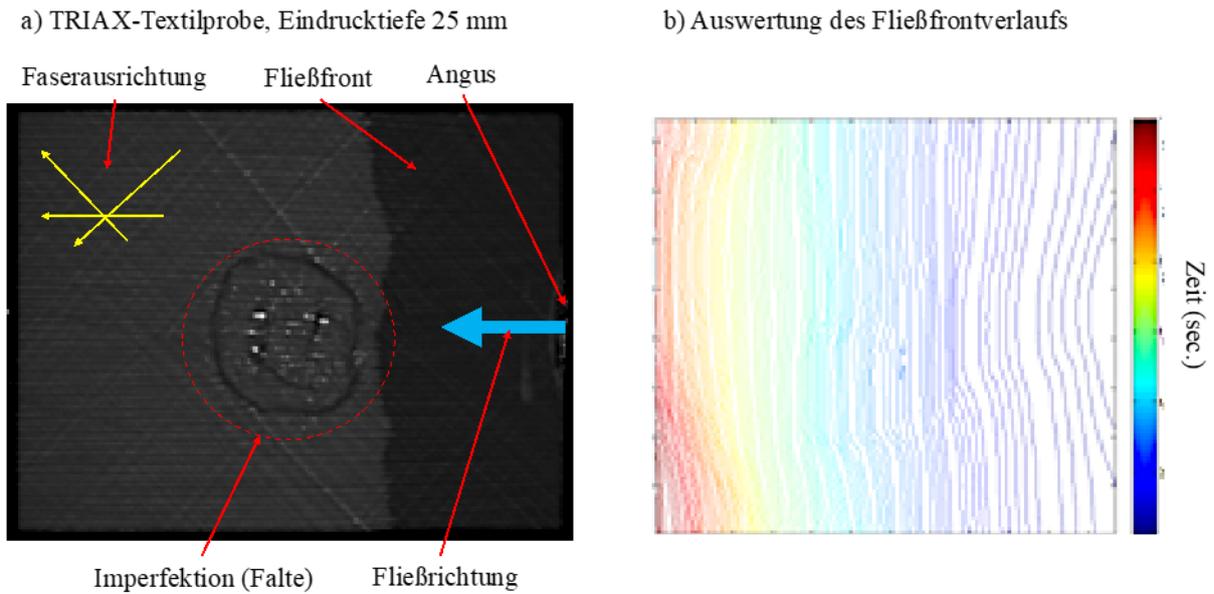


Abbildung 6-32: Fließfrontverlauf im TRIAX-Textil bei einer Eindringtiefe von 25 mm

6.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

In dieser experimentellen Untersuchung wurde der Zusammenhang zwischen realistischen Imperfektionen in der textilen Faserstruktur von Preforms und der daraus folgenden Veränderung der Durchflusseigenschaften aufgezeigt. Durch die gezielte und reproduzierbare Verwendung an die Realität angelehnter Imperfektionen, wie Faserfehlorientierung sowie Beulen und Falten, wurde die Empfindlichkeit von UD-, BIAx- und TRIAX-Textilproben gegenüber Handhabungseffekten untersucht.

Dieser Ansatz verfolgt die Idee, eine maximal zulässige tolerierbare Schädigung gegenüber Handhabungsbelastungen an textilen Halbzeugen im Preforming-Prozess zu ermitteln. Wie bereits aus theoretischen und praktischen Untersuchungen bekannt, besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen einer Faserwinkelveränderung und der daraus resultierenden Variation der Permeabilität. Imperfektionen innerhalb der UD-Textilproben führten zu einer bis zu fünfzigprozentigen Verringerung der Permeabilität bei einer maximalen Eindringtiefe von 45 mm. Dieser Trend ist nachvollziehbar, denn durch die Fehlstellen in Form einer Falte wird ein Widerstand erzeugt, der die Durchtränkbarkeit des Textils verschlechtert. Die Versuche zur Faserorientierung haben gezeigt, dass die Durchflusszeiten bei Abweichung der Lagen von 0° deutlich höher ausfallen.

6 Untersuchung von Handhabungseffekten

Der Verlauf der Permeabilität von UD entspricht den Erwartungen, wohingegen sich der Permeabilitätsverlauf von BIAX entgegengesetzt verhält. Die Permeabilität der BIAX-Textilproben steigt bei zunehmender Eindringtiefe. Dies liegt an der langsamen Durchflusszeit der BIAX-Textilproben mit der Faserausrichtung von $\pm 45^\circ$.

Bei den TRIAX-Textilproben ist die Permeabilität über der Eindringtiefe konstant. Die Durchflusszeiten von TRIAX liegen zwischen denen von UD und BIAX. Auffällig hierbei ist, dass sich die Fließgeschwindigkeit des Fluids im Bereich der Falte nicht auffällig anders gegenüber unbeschädigten Stellen der Textilprobe verhält. Die Analyse der TRIAX-Textilproben führt zu nicht eindeutigen Ergebnissen. Die Permeabilität variiert zwischen +20% und -10%, was auf die Struktur dieses Textils selbst zurückzuführen sein kann. Das Verhalten der Permeabilität könnte auf eine Überlagerung ähnlicher Effekte wie bei den Untersuchungen der UD- und BIAX-Proben zurückzuführen sein. Werden jeweils eine UD- und eine BIAX-Textilprobe zusammengelegt, so ergibt sich ein ähnlicher Lagenaufbau wie bei einer einzelnen TRIAX-Textilprobe. Anzumerken ist jedoch, dass eine Addition der Durchtränkungszeiten von UD und BIAX nicht dem Wert der Durchtränkungszeit von TRIAX entspricht.

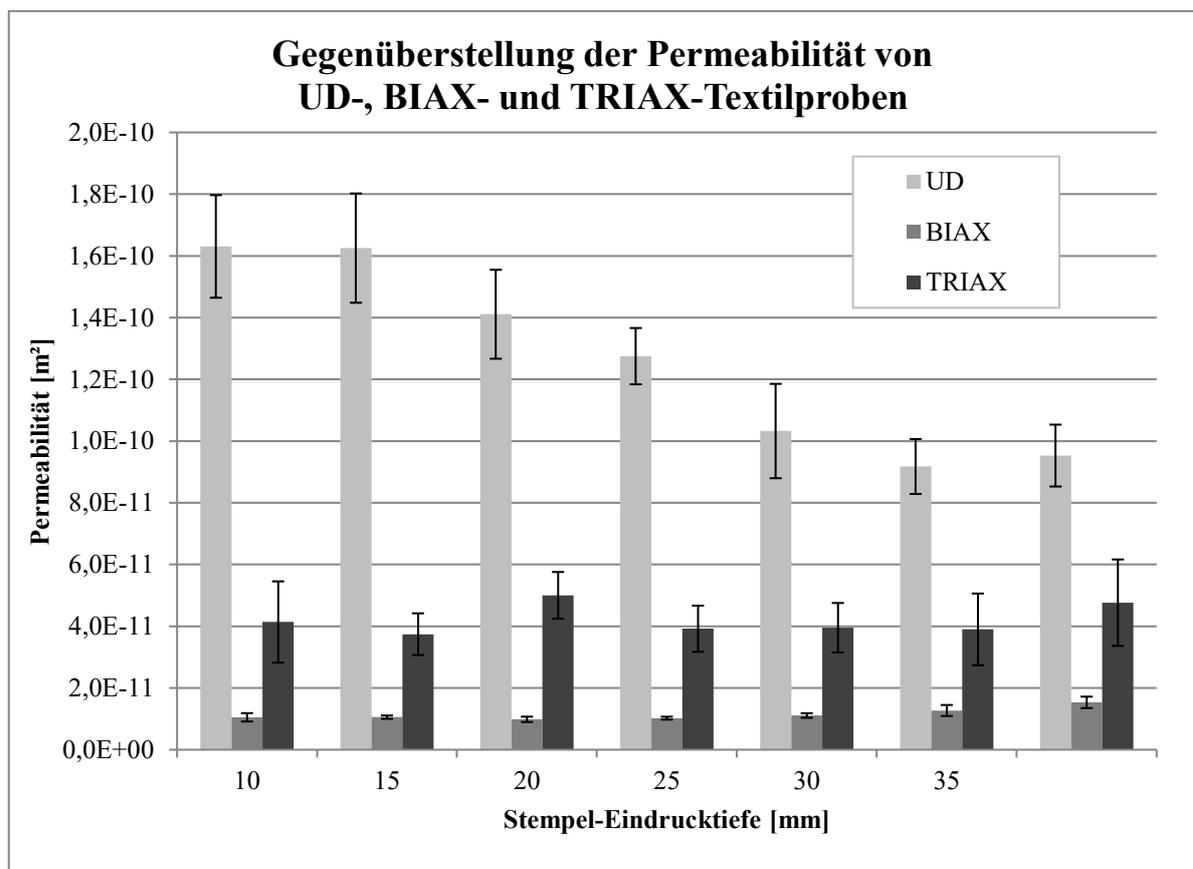


Abbildung 6-33: Permeabilität bei unterschiedlichen Stempel-Eindringtiefen und unterschiedlichen Materialien (UD, BIAX, TRIAX)

Abbildung 6-33 zeigt zusammenfassend den Vergleich der Permeabilitäten der verschiedenen Textilproben. Dabei hat UD die höchste, TRIAX eine deutlich geringere und BIAX die kleinste nominelle Permeabilität. Diese Unterschiede hängen von der Faserausrichtung der einzelnen Lagen ab. Bei UD fließt das Fluid entlang der Fasern in 0°-Richtung. Das gleiche geschieht bei TRIAX, wobei die untere und die obere Lage ein schnelleres Voranschreiten des Fluids verhindern. Bei Textilproben mit biaxialem Aufbau von $\pm 45^\circ$ benötigt das Fluid eine längere Durchflusszeit. Dieser Effekt konnte bereits bei den Versuchen zur Faserausrichtung beobachtet werden. Das Fluid benötigt die längste Durchflusszeit quer zur Faserausrichtung.

Die Auswertungen zeigen, dass es einen minimalen Geschwindigkeitsbereich des Fluids in x-Richtung gibt, bei dem die Falte keine Auswirkung auf die Durchtränkung hat. Dieser Geschwindigkeitsbereich ist abhängig vom Fasergelege sowie von der Viskosität des verwendeten Fluids. Die Faserstruktur von TRIAX hat die Eigenschaft, dass der Fließfrontverlauf von Wasser durch eine Fehlstelle weniger beeinflusst wird als bei den anderen beiden Materialtypen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Textile Halbzeuge erfahren in der gesamten Prozesskette des Preformings, beginnend mit der Textilherstellung, über den Transport, bis zur eigentlichen Preform-Herstellung, zahlreiche Handhabungsprozesse. Durch die biegeweiche Charakteristik textiler Halbzeuge führen die vielseitigen Belastungen in Handhabungsprozessen zu unausweichlichen Handhabungseffekten. Diese Effekte können zu Imperfektionen im Preform und somit zu Defekten im FKV führen.

Die Entwicklung von Automatisierungslösungen für Handhabungsprozesse bei der Herstellung von Preforms aus textilen Halbzeugen führt zu zahlreichen technischen Herausforderungen. Neben dem schwer vorhersehbaren Materialverhalten steht die Frage nach der zulässigen Belastung des zu handhabenden Textils im Vordergrund. Um die Spezifikationen für automatisierte Handhabungssysteme definieren zu können, müssen die zulässigen Belastungen für textile Halbzeuge bekannt sein. Erst dann können sinnvolle technische Lösungen erarbeitet werden. Deshalb ist eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Produktentstehungsprozesses notwendig, um die besonderen Handhabungseigenschaften textiler Halbzeuge sinnvoll zu berücksichtigen. In der aktuellen Produktentwicklung werden die Systemgrenzen zwischen dem Halbzeugproduzenten, dem Design sowie der Prozessentwicklung sehr klar abgegrenzt. Ein Ansatz bezogen auf die Methodik der integrierten Produktentwicklung, bei der alle relevanten Bereiche einbezogen werden, erscheint sinnvoll. Auf diesem Gedankenmodell setzte diese Arbeit auf und versuchte, aus Sicht der Prozessentwicklung die unvermeidlichen Handhabungseffekte in der Entstehung von Preforms zu untersuchen.

Die an diese Dissertation gestellte Zielstellung umfasste die Beurteilung des Einflusses von Handhabungsprozessen auf die Qualität des Preforms. Da die betrachteten Handhabungsprozesse über die gesamte Prozesskette zur Herstellung von Preforms für FKV stattfinden, sollte diese zunächst umfassend abgebildet werden. Diese Prozesskette umfasst die Produktion der textilen Halbzeuge, die Lagerung sowie die innerbetriebliche Logistik, den Transport, die Warenannahme, die Bereitstellung sowie den Preform-Aufbau und schließlich die Evakuierung des Formwerkzeugs, die Verdichtung des Preforms sowie die Vakuuminfusion mit einer Harz-Matrix. Ausgehend von dieser Betrachtungsweise der Problemstellung wurden die folgenden zentralen Fragestellungen formuliert, aus denen sich die Zielstellung und die Vorgehensweise für diese Dissertation ableitete:

1. Welche Spuren (Handhabungseffekte) hinterlassen Handhabungsprozesse in textilen Halbzeugen über die gesamte Preforming-Prozesskette?
2. Führen die durch Handhabungseffekte entstandenen Imperfektionen zu Defekten in Preforms?

Um den Einfluss von handhabungsbedingten Effekten auf die Qualität von Preforms qualitativ zu beschreiben, wurde ein Modell erarbeitet, das die Zusammenhänge zwischen Ereignissen in der Prozesskette und den Imperfektionen, die daraus hervorgehen können, widerspiegelt. Hierzu wurde der Ansatz der Festigkeitslehre gewählt, bei dem ein Zusammenhang zwischen von außen auf einen Körper einwirkenden Belastungen und den daraus resultierenden inneren mechanischen Beanspruchungen betrachtet wird. Es wurde angenommen, dass textile Halbzeuge in der gesamten Prozesskette zur Herstellung von FKV handhabungsbedingten Belastungen ausgesetzt sind. Diese Belastungen führen zu qualitätsbeeinflussenden Imperfektionen im Preform und damit auch im späteren FKV.

Das unter dieser Annahme erarbeitete Modell zur Bewertung des Einflusses von Handhabungseffekten auf die Preform-Qualität wurde anschließend auf eine reale Prozesskette zur Fertigung von Preforms übertragen. Dabei wurden die Systemgrenzen so gewählt, dass alle relevanten Teilprozesse, von der Textilproduktion bis hin zur Infusion, einbezogen wurden. Darüber hinaus wurde in einer experimentellen Untersuchung der Einfluss von repräsentativen Effekten auf die Qualität des Preforms ermittelt. Die Prozesskette zur Fertigung von Preforms wurde erfasst und unter der besonderen Berücksichtigung von Handhabungskriterien analysiert.

Hierbei wurden zunächst der Herstellungs- und der Logistikprozess von Textilien bei einem Textilproduzenten untersucht. Der Fokus lag auf Handhabungsprozessen im Textilherstellungsprozess, auf der innerbetrieblichen Logistik, auf der Lagerung, auf der Verpackung und auf der Kommissionierung. Anschließend wurde der Transportprozess der Ladungsträger zu einem Rotorblatthersteller erfasst und die Warenannahme, die Qualitätsprüfung, die Vorkonfektionierung sowie der Preformaufbau wurden untersucht. Die einzelnen Prozessschritte wurden als eine zusammenhängende Prozesskette verstanden, bei der die üblichen Systemgrenzen aufgebrochen wurden. So entstanden sinnvoll zusammenhängende Prozessgruppen wie „Textilproduktion“, „Logistik“, „Preformaufbau“ und „Verdichtung“. Die beobachteten Ereignisse und Effekte wurden in „Beule/Falte/Lagerungsplatten“, „Beschädigung der Textilstruktur“ sowie „Verschmutzung des Textils“ klassifiziert. Am häufigsten anzutreffen sind Handhabungseffekte, die sich in Form von Beulen, Falten sowie Lagerungsbeschädigungen widerspiegeln. Deshalb wurde diese Kategorie der Handhabungseffekte bei der experimentellen Untersuchung näher betrachtet. Hierzu wurden eine Versuchsmethodik sowie eine geeignete Versuchsvorrichtung entwickelt, mit deren Hilfe parametrierbare und reproduzierbare Imperfektionen in textile Halbzeuge eingebracht werden können. Mithilfe von optischen Messverfahren konnten die verschiedenen Zustände sowie Transformationsverhalten von textilen Halbzeugen sichtbar gemacht werden. Durch die Erfassung des Fließfrontverlaufs wurde ein Zusammenhang zwischen Handhabungseffekten und der Qualität von Preforms aufgezeigt und anhand der Permeabilitätseigenschaften verdeutlicht.

Die zuvor aufgestellte These, dass Fehler im textilen Aufbau des Preforms, die durch Handhabung entstehen, einen Einfluss auf die Permeabilität der textilen Struktur von Preforms haben, konnte durch die experimentelle Untersuchung grundsätzlich bestätigt werden. Faserfehlorientierungen haben einen nahezu linearen Einfluss auf die Durchtränkungseigenschaften. Dieses Erkenntnis deckt sich im Wesentlichen mit den aus der Literatur bekannten Theorien. Eine eingebrachte Beule wird durch die Evakuierung kompensiert. Ab einer bestimmten Beulengröße bildet sich jedoch unter der Vakuumfolie eine Falte. Je nach Eindringtiefe und abhängig vom untersuchten Material entsteht eine Vielzahl an unterschiedlichen Faltenmustern. Eine Systematisierung dieser Faltenmuster wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, wäre jedoch ein interessanter Forschungsgegenstand, um Fehlerbilder zu klassifizieren.

Die Form der Falte hat zahlreiche sich überlagernde Defektformen im Inneren der Textilstruktur zur Folge. Über die resultierende Höhe der Falte lässt sich dennoch ein Zusammenhang zwischen dem Handhabungseffekt und der Permeabilität aufzeigen. Im untersuchten UD-Material führen die Imperfektionen zu einer Verringerung der Permeabilität. Im BIAX-Material führen die Imperfektionen zu einer Erhöhung der Permeabilität. Durch die Falten entstehen zusätzliche Kanäle im Textil, sodass das Medium den Weg des leichtesten Widerstands geht und somit um die Fehlstelle fließt. Beim untersuchten TRIAX-Material ist kein derart signifikanter Zusammenhang zur Veränderung der Permeabilität zu erkennen. Dieses Material scheint unempfindlich auf lokale Veränderungen in der Faserstruktur zu reagieren. Dieses lässt sich möglicherweise damit erklären, dass eine Kompensation zwischen der Verdichtung der Faserstruktur und der gleichzeitigen Bildung von Zwischenräumen stattfindet. Das Fluid findet entsprechend im gleichen Maße seinen Weg durch die Textilstruktur, was sich in der vergleichsweise kleinen Veränderung der Permeabilität widerspiegelt.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit sollen im Folgenden mit dem anfangs skizzierten Ansatz zur integrierten Produktentwicklung für FKV im Preforming-Verfahren in Bezug gesetzt werden (Abbildung 7-1). Wie in der Prozessanalyse dargestellt, wurden die Systemgrenzen des Herstellungsprozesses von Preforms bewusst aufgelöst. Ein ähnlicher Ansatz müsste im Sinne einer integrierten Produktentwicklung für die Bereiche Prozessentwicklung, Herstellung textiler Halbzeuge sowie Produktdesign erfolgen.

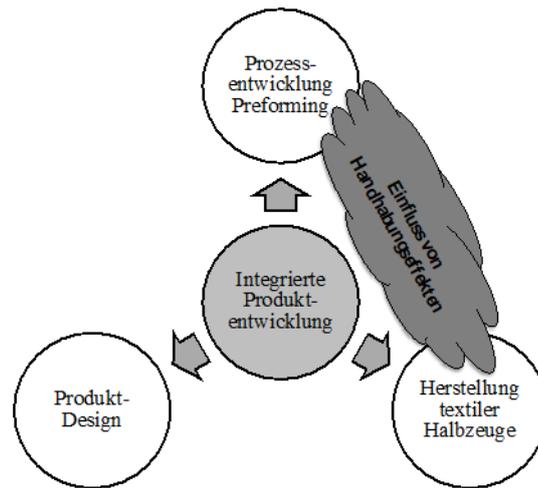


Abbildung 7-1: Einordnung der Erkenntnisse aus dieser Arbeit in den Ansatz der integrierten Produktentwicklung für FKV im Preforming-Verfahren

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen auf, dass es einen starken Zusammenhang zwischen Handhabungsbelastungen und der Qualität von Preforms gibt. Das Thema Handhabungsbelastungen und die daraus folgenden Einflüsse auf die Textilstruktur betreffen alle Bereiche der Produktentwicklung, vom Design, über die Prozessentwicklung bis hin zur Halbzeugherstellung. Trotzdem findet aktuell kein geeigneter Kommunikationsfluss zwischen diesen Disziplinen statt. Das Wissen über zulässige Handhabungsbeanspruchung textiler Halbzeuge im Entstehungsprozess bis zum Preform könnte Vorteile für die Optimierung des Produktentstehungsprozesses liefern.

Definierte Standards können, bezogen auf zulässige Handhabungsbelastungen, einen positiven Einfluss auf Prozesskosten bewirken, insofern die Produktionsprozesse entsprechend der Spezifikationen gestaltet sind. Hierdurch könnte bereits in einem sehr frühen Stadium der Prozessentwicklung auf Wissen zurückgegriffen werden, um beispielsweise die Auswahl von geeigneten Greifsystemen zu optimieren. Auf der anderen Seite würde das Wissen über die Prozessbelastungen auf die Auswahl eines geeigneten Materials im Produktdesign Einfluss nehmen.

Eine wesentliche Aufgabe des Konstruktionsprozesses von Bauteilen aus FKV ist die Vorhersage von Festigkeiten. Die Berechnungen von Festigkeitswerten der zu entwickelnden Bauteile basieren auf Erfahrungswerten bzw. werden durch Simulationen ermittelt. Die Simulationstools nutzen dabei real ermittelte Materialkennwerte und arbeiten überwiegend unter der Annahme optimaler Randbedingungen. Defekte in Halbzeugen können nur schwer berücksichtigt werden. Wie in dieser Arbeit dargestellt, lassen sich im Preforming-Prozess handhabungsbedingte Imperfektionen nicht vermeiden. Deshalb sollten

Handhabungseffekte bereits im Produktdesign sowie bei der Auswahl von Materialien berücksichtigt werden. Die in dieser Arbeit beobachteten Imperfektionen haben eine große Nähe zu den in der Literatur und Praxis bereits umfänglich systematisierten Drapiereffekten (vgl. [Erma07]). Die Auswahl eines geeigneten textilen Halbzeugs erfolgt aktuell unter der Berücksichtigung von Drapiereigenschaften des Halbzeugs sowie unter der Auswahl des Harzes entsprechend der spezifischen Harzflusseigenschaften. Die Empfindlichkeit eines textilen Halbzeugs im Hinblick auf Handhabungsbelastungen im späteren Produktionsprozess findet dabei weniger Beachtung. Aktuell wird der Ansatz verfolgt, die Drapierfähigkeiten von textilen Halbzeugen in Form von Kennwerten auszudrücken. Diese Systematisierung sollte um die Belastbarkeit textiler Halbzeuge durch Handhabungsmanipulationen erweitert werden.

Der Ansatz der integrierten Produktentwicklung für FKV im Preforming-Verfahren berücksichtigt ebenfalls die Ebene der Halbzeug-Produktion. Neben der Reduktion von Handhabungseffekten durch die Optimierung von Betriebsprozessen ist eine stärkere Einbindung in den Produktentwicklungsprozess notwendig. Besonders für den Einsatz von automatisierten Produktionsverfahren müssen die Materialeigenschaften konstante Eingangsgrößen besitzen. Zudem sollten der Einsatzzweck der Halbzeuge und die daraus folgenden Qualitätsanforderungen für die Herstellung der Halbzeuge berücksichtigt werden. Diese Wechselwirkung sollte aufgebrochen werden, um mögliche Potenziale, die sich für die Optimierung des Produktentwicklungsprozesses ergeben, zu erkunden.

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Handhabung und der Qualität von Preforms wurde deutlich, dass für eine vollständige Aussage die Permeabilität als Qualitätsmerkmal eingeschränkte Ergebnisse liefert. Insbesondere bei der Untersuchung der TRIAX-Textilproben werden Effekte vermutet, die durch Einbeziehung weiterer Qualitätsparameter näher betrachtet werden sollten. Hier würde es sich anbieten, den Einfluss von handhabungsbedingten Fehlstellen auf die Festigkeit von fertigen FKV zu untersuchen. Die imperfekten Textilproben könnten mit Harz benetzt werden und anschließend könnten die Versagenseigenschaften mittels Zugversuchen ermittelt werden. So würden auch optisch nicht erkennbare Imperfektionen anhand von Festigkeitswerten der dazugehörigen FKV-Proben sichtbar gemacht werden. Gleichzeitig könnte auch der Einfluss der Harzmatrix als Fließmedium einbezogen werden. Schließlich liefert der Versuchsaufbau selbst einen Optimierungsbedarf. Durch den Einsatz einer wiederverwendbaren Membran anstatt der verwendeten Vakuumfolie ließen sich die Versuche deutlich schneller und reproduzierbarer durchführen.

Referenzen

- [ArUa12] ARNOLD, MATTHIAS ; U.A.: Permeabilität als Schlüsselparameter für kurze Zykluszeiten. In: *Kunststoffe* Bd. 3/2012 (2012), S. 44–48
- [Ball07] BALLHAUSE, DIRK: *Diskrete Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Gewebemembranen*. Stuttgart: Inst. für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, 2007 — ISBN 978-3-930683-91-8
- [Baue03] BAUER, NORBERT: *Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik*: Fraunhofer-Allianz Vision, 2003 — ISBN 978-3-8167-6297-3
- [Beck05] BECKER, TORSTEN: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin: Springer, 2005 — ISBN 3-540-28552-0
- [BiHS08] BIERMANN, DIRK ; HUFENBACH, WERNER ; SELIGER, GÜNTHER: *Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe, Untersuchung zum Forschungs- und Handlungsbedarf*. Dresden: Progressmedia Verl. & Werbeagentur, 2008 — ISBN 978-3-00-026217-3
- [Brök07] BRÖKEL, JAN: *Untersuchungen zum Einfluss gezielt nicht geradlinig eingebrachter Faserverstärkungen auf die mechanischen Eigenschaften einer nachgiebigen Polymermatrix*, Rostock, 2007
- [Burg01] BURG, JEAN-PIERRE: *Einführung in die Strukturgeologie: Grundkurs 2001*: ETH Zurich, 2001
- [ChCC01] CHEN, B. ; CHENG, A.H.-D ; CHOU, T. W.: A nonlinear compaction model for fibrous preforms *Composites*, A 32, 701-707 (2001)
- [ChMM17] CHRIST, MIRKO ; MIENE, ANDREA ; MÖRSCHER, ULRICH: Measurement and Analysis of Drapeability Effects of Warp-Knit NCF with a Standardised, Automated Testing Device. In: *Applied Composite Materials* Bd. 24 (2017), Nr. 4, S. 803–820
- [Chri18] CHRIST, MIRKO: Definition und Quantifizierung der Drapierbarkeit von multiaxialen Gelegen durch die Vermessung von Einzeleffekten, Universität Bremen (2018). — Accepted: 2020-03-09T14:47:51Z
- [CoCF97] COX, COMPOSITES BRIAN ; COX, BRIAN N. ; FLANAGAN, GERRY: Handbook of Analytical Methods for Textile. In: *NASA CR-4750*, 1997

- [DHGA03] DEVILLARD, MATHIEU ; HSIAO, KUANG-TING ; GOKCE, ALI ; ADVANI, SURESH G.: On-Line Characterization of Bulk Permeability and Race-Tracking During the Filling Stage in Resin Transfer Molding Process. In: *Journal of Composite Materials* Bd. 37 (2003), Nr. 17, S. 1525–1541
- [Din600] *DIN 64905:1991-03, Zylindrische Hülsen für textile Flächengebilde* : Beuth Verlag GmbH
- [ECGJ18] ENDRUWEIT, ANDREAS ; CHOONG, GABRIEL Y. H. ; GHOSE, SAYATA ; JOHNSON, BRICE A. ; YOUNKIN, DOUGLAS R. ; WARRIOR, NICHOLAS A. ; DE FOCATIIS, DAVIDE S. A.: Characterisation of tack for uni-directional prepreg tape employing a continuous application-and-peel test method. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 114 (2018), S. 295–306
- [Ehin12] EHINGER, CLAUDIA ANNA: *Automatisierte Montage von Faserverbund- Vorformlingen* : Herbert Utz Verlag, 2012 — ISBN 978-3-8316-4233-5
- [En00] EN 1993-1-7:2007: *EN 1993-1-7:2007 + AC:2009: Design of steel structures - Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading*. URL <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-1993-1-7/134178115>. - abgerufen am 2018-04-17
- [En1300] EN 13473-1, Spezifikation für Multiaxialgelegte Teil: 1 Bezeichnung, Europäische Norm
- [Endr03] ENDRUWEIT, ANDREAS: Investigation of the Influence of Local Inhomogeneities in the Textile Permeability on the Resin Flow in Liquid Composites Moulding Process., Swiss Federal Institute of Technology Zurich (2003)
- [Erma07] ERMANNI, PAOLO: *Composites Technologien*. Zürich : ETH, 2007
- [FBMH19] FERNÁNDEZ, DANIEL ; BEGEMANN, BENJAMIN ; MIDDENDORF, PETER ; HORST, PETER: Investigation of the buckling and load-bearing behaviour of selectively stitched stiffened CFRP panels under multiaxial loading. In: *CEAS Aeronautical Journal* Bd. 10 (2019), Nr. 3, S. 703–717
- [FeGr10] FERENCZ, A. ; GREB, C.: *Ökoeffiziente neue Werkstoffe und angepasste Fertigungstechnologien für Faserverbundwerkstoffe in Windenergieanlagen*, 2010
- [Finc14] FINCKH, HERMANN: Hochaufgelöste Computertomographie – wichtiger Bestandteil der numerischen Simulation. In: SIEBENPFEIFFER, W. (Hrsg.): *Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*, ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2014 — ISBN 978-3-658-04025-3, S. 134–141

- [FIRo03] FLEMMING, MANFRED ; ROTH, SIEGFRIED: *Faserverbundbauweisen: Eigenschaften ; mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte*. Berlin u.a. : Springer, 2003 — ISBN 3-540-00636-2
- [FIZR96] FLEMMING, MANFRED ; ZIEGMANN, GERHARD ; ROTH, SIEGFRIED: *Faserverbundbauweisen: Halbzeuge Und Bauweisen* : Springer DE, 1996 — ISBN 978-3-540-60616-1
- [FIZR99] FLEMMING, MANFRED ; ZIEGMANN, GERHARD ; ROTH, SIEGFRIED: *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Berlin : Springer, 1999 — ISBN 3-540-61659-4
- [FTRS14] FRANKE, JAN ; THOBEN, KLAUS-DIETER ; ROLBIECKI, MARTIN ; SCHMOHL, TIM ; OHLENDORF, JAN-HENDRIK ; ISCHTSCHUK, LARS: Binderapplikation für biegeeweiche Materialien. In: *MaschinenMarkt* (2014)
- [GeKo07] GEIGER, WALTER ; KOTTE, WILLI: *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven* : Springer-Verlag, 2007. — Google-Books-ID: bTsgBAAAQBAJ — ISBN 978-3-8348-9429-8
- [Glae14] GLAESER, GEORG,: *Geometrie und ihre Anwendungen in Kunst, Natur und Technik*. Berlin, Heidelberg : Springer Spektrum, 2014 — ISBN 9783642418525 364241852X
- [GrFe14] GROTE, KARL-HEINRICH ; FELDHOUSEN, JÖRG: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau* : Springer-Verlag, 2014 — ISBN 978-3-642-38891-0
- [HeGF08] HENNING, K. ; GRIES, T. ; FLACHSKAMPF, P.: AutoPreforms-Gemeinsamer Abschlussbericht – Wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Hilfe automatisiert hergestellter textiler Preforms, Aachen (2008)
- [HeHU11] HEISERICH, OTTO-ERNST ; HELBIG, KLAUS ; ULLMANN, WERNER: *Logistik: Eine praxisorientierte Einführung*. 4. Aufl. : Gabler Verlag, 2011 — ISBN 978-3-8349-1852-9
- [Hors10] HORST, P.: Einfluss von Defekten auf das Werkstoffverhalten von faserverstärkten Kunststoffen (Effects of Defects –DFG-Paketantrag PAK 267) (2010)
- [HsAd04] HSIAO, KUANG-TING ; ADVANI, SURESH G.: Flow sensing and control strategies to address race-tracking disturbances in resin transfer molding. Part I: design and algorithm development, Composites Part A: applied science and manufacturing (2004)

- [IsRH13] ISSLER, LOTHAR ; RUOß, HANS ; HÄFELE, PETER: *Festigkeitslehre - Grundlagen* : Springer-Verlag, 2013 — ISBN 978-3-662-11739-2
- [Jecm13a] JEC magazine no. 80 Bd. 80 (2013)
- [Jecm13b] JEC magazine no. 82 Bd. 82 (2013)
- [Jens02] JENSEN, LARS: Maschinen Markt - Im eisigen Griff Gefriergreifer ermöglichen das automatisierte Handhaben technischer Textilien ohne Beschädigung der Oberfläche Bd. 51/52 (2002), S. 30–32
- [KKMG16] KRUSE, FELIX ; KUEHN, ALEXANDRA ; MAHRHOLZ, THORSTEN ; GROHMANN, YANNIS ; STOFFERS, NIELS: Automatisierte Fertigung von Rotorblättern für Windenergieanlagen: Mobile Direktfaserablage. In: *Lightweight Design* Bd. 9 (2016), S. 46–53
- [KoBG07] KOCHMANN, MARKUS ; BÄUMER, RALF ; GHORBEL, LOTFI: Online-Faserorientierungsmessung im Fliesherstellungsprozess.
- [KrGS18] KRIEGER, HELGA ; GRIES, THOMAS ; STAPLETON, SCOTT E.: Shear and drape behavior of non-crimp fabrics based on stitching geometry. In: *International Journal of Material Forming* Bd. 11 (2018), Nr. 5, S. 593–605
- [Kuhn08] KÜHNEL, WOLFGANG: *Differentialgeometrie Kurven-Flächen-Mannigfaltigkeiten*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008 — ISBN 9783834894533 3834894532 9783834804112 3834804118
- [LEMS12] LÄSSIG, RALPH ; EISENHUT, MARTIN ; MATHIAS, ARNE ; SCHULTE, ROLF T. ; PETERS, FRANK ; KÜHMANN, THORSTEN ; WALDMANN, THOMAS ; BEGEMANN, WALTER: *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen (Roland Berger)* : VDMA, 2012
- [LoWi12] LOTTER, BRUNO ; WIENDAHL, HANS-PETER: *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin : Springer, 2012 — ISBN 978-3-642-29061-9
- [McBr95] MCGUINNESSA, G.B. ; BRADAIGH, C.M.O.: Effect of preform shape on buckling of quasi-isotropic thermoplastic composite laminates during sheet forming Composites Manufacturing. In: . Bd. 6, 1995, S. 269–280
- [Mien09] MIENE, ANDREA: Genau in die Textur geschaut,. In: *Kunststoffe* Bd. 5 (2009)
- [Mien13] MIENE, ANDREA: Die digitale Bildanalyse zur Qualitätssicherung und

Fehlerbewertung in der Prozesskette, Faserinstitut (2013)

[Mose92] MOSER, KURT: *Faser-Kunststoff -Verbund Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*. Düsseldorf : VDI, 1992 — ISBN 3-18-401187-9

[Neit04] NEITZEL, MANFRED: *Handbuch Verbundwerkstoffe* : Hanser Verlag, 2004 — ISBN 978-3-446-22041-6

[Ohle13] OHLENDORF, JAN-HENDRIK: *Untersuchung der mehrlagigen Umformung von Fasergelegen zur Herstellung von Faserverbundstrukturen*. Aachen : Mainz, 2013 — ISBN 978-3-86130-957-4

[ORSF13] OHLENDORF, JAN-HENDRIK ; ROLBIECKI, MARTIN ; SCHMOHL, TIM ; FRANKE, JAN ; THOBEN, KLAUS-DIETER ; ISCHTSCHUK, LARS: Innovationen in der Handhabungs- und Textiltechnik zur Rotorblattfertigung. In: *Lightweight Design* Bd. 6 (2013), Nr. 5, S. 50–57

[ORSF15] OHLENDORF, JAN-H. ; ROLBIECKI, MARTIN ; SCHMOHL, TIM ; FRANKE, JAN ; ISCHTSCHUK, LARS: *mapretec - ein Verfahren zur preform-Herstellung durch ebene Ablage für ein räumliches Bauteil als Basis einer automatisierten Prozesskette zur Rotorblattfertigung*. Bd. 79 : Mainz, 2015 — ISBN 978-3-95886-019-3

[PoSa08] POTLURI, P. ; SAGAR, T.V.: Compaction modelling of textile preforms for composite structures. In: *Composite Structures* Bd. 86 (2008), Nr. 1–3, S. 177–185

[Rein13] REINHOLD, RAPHAEL: Preforms serienmäßig aus der Fertigungszelle. In: *MaschinenMarkt* (2013)

[Rein16] REINHOLD, RAPHAEL: *Fully Automated Series Production of 3D-Parts with the Composite Preforming Cell* (SAE Technical Paper Nr. 2016-01–2113). Warrendale, PA : SAE International, 2016

[RFOT17] RICHRATH, MARVIN ; FRANKE, JAN ; OHLENDORF, JAN-HENDRIK ; THOBEN, KLAUS-DIETER: Effektor für die automatisierte Direktablage von Textilien in der Rotorblattfertigung. In: *Lightweight Design* Bd. 10 (2017), Nr. 5, S. 48–53

[RiBM16] RIMMEL, OLIVER ; BECKER, DAVID ; MITSCHANG, PETER: Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement. In: *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science* Bd. 2 (2016), Nr. 3–4, S. 93–102

[RiMM18] RIMMEL, OLIVER ; MAY, DAVID ; MITSCHANG, PETER: Impact of stitching on permeability and mechanical properties of preforms manufactured by

dry fiber placement. In: *Polymer Composites* (2018)

[RODT14] ROLBIECKI, DIPL-WIRT-ING MARTIN ; OHLENDORF, DR-ING JAN-HENDRIK ; DECKER, DR-ING ANDRÉ ; THOBEN, PROF DR-ING HABIL KLAUS-DIETER ; ISCHTSCHUK, DIPL-ING (FH) LARS: Intelligente Materialbereitstellung zur automatisierten Herstellung textiler Preforms. In: *Lightweight Design* Bd. 7 (2014), Nr. 2, S. 42–49

[RoOT14] ROLBIECKI, MARTIN ; OHLENDORF, JAN-HENDRIK ; THOBEN, KLAUS-DIETER: Einsatz virtueller und experimenteller Methoden im Produktentwicklungsprozess von Effektoren für technische Textilien. In: *KT 2014*. Aachen, 2014, S. 23–32

[Schü07] SCHÜRMAN, HELMUT: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2., bearb. und erw. Aufl. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2007 — ISBN 3-540-72189-4

[Sköc13] SKÖCK-HARTMANN, BRITTA ANNETTE: *Prüfverfahren für das Umformen von Multiaxialgelegten für Strukturbauteile* : Shaker, 2013 — ISBN 978-3-8440-2064-9

[SRHB12] SCHMIDT, F. ; RHEINFURTH, M. ; HORST, P. ; BUSSE, G.: Effects of local fibre waviness on damage mechanisms and fatigue behaviour of biaxially loaded tube specimens. In: *Composites Science and Technology* Bd. 72 (2012), Nr. 10, S. 1075–1082

[Stöv04] STÖVEN, TIMO: *Beitrag zur Ermittlung der Permeabilität von flächigen Faserhalbzeugen*. Kaiserslautern : Inst. für Verbundwerkstoffe, 2004 — ISBN 3-934930-41-7

[Stra10] STRAßER, GERHARD: Automatisierte Handhabung konturvarianter, textiler Halbzeuge für die Faserverbundproduktion. In: *Fachveranstaltung „Handhabungstechnik – Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen“ iwB-Anwenderzentrum Augsburg* (2010)

[Szim07] SZIMMAT, F.: *Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin* : Fraunhofer-IRB-Verlag, 2007 — ISBN 978-3-8167-7424-2

[Vdi90] VDI 2860: *Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole* : VDI, 1990

[Vdi200] *VDI 2700 - Ladungssicherung auf Straßenfahrzeugen*

- [Vdi313] VDI 3968 Blatt 1 - Sicherung von Ladeeinheiten - Anforderungsprofil, 2013
- [Wann09] WANNENWETSCH, HELMUT: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion* : Springer-Verlag, 2009. — Google-Books-ID: uBMjBAAAQBAJ — ISBN 978-3-540-89773-6
- [WeMü08] WEIGEL, LARS ; MÜLLER, DIETER H.: *BIK preblade : gemeinsamer technischer Abschlussbericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte Verbundprojekt „preblade“ ; Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2005 bis 31.12.2007*. Bremen : BIK, 2008
- [WMSK18] WITTEN, ELMAR ; MATHES, VOLKER ; SAUER, MICHAEL ; KÜHNEL, MICHAEL: *Composites-Marktbericht 2018, Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (Berichtsreihe)* : AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 2018. — publisher: Carbon Composites e.V.
- [Wort96] WORTBERG, JOHANNES: *Qualitätssicherung in der Kunststoffverarbeitung: Rohstoff-, Prozeß- und Produktqualität* : C. Hanser, 1996 — ISBN 978-3-446-17133-6
- [Zare18] ZAREMBA, SWEN: *Bypassströmungen im Füllprozess textiler Strukturen: Charakterisierung, Abbildung und Optimierung*, TU München, 2018
- [Zhao08] ZHAO, NUOPING: *Nähen als Montageverfahren textiler Preforms und Wirkungen der Nähte auf lokale mechanische Eigenschaften thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe*, TU Dresden, 2008

Anhang

Tabelle A-1: Versuchsergebnisse Topografie, UD-Material

Material	Nr.	Eindrucktiefe	Topografie									Prozentanteil _Gesamtfläche	Prozentanteil _Ausschnitt
			Beule			Falte			Vakuüm				
			Volumen	Volumen	Volumen	maximale Höhe	maximale Höhe	maximale Höhe	maximale Höhe-nur Mitte	Fläche der Falte	in [%]		
in [mm]	in [mm ²]	in [mm ²]	in [mm ²]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm ²]	in [%]	in [%]			
UD	1	0	-	-	15426,96	-	-	0,81	0,42	0,00	0,00	0,00	
UD	2	0	-	-	16918,51	-	-	0,88	0,47	4,19	0,01	0,03	
UD	3	0	-	-	13898,96	-	-	0,82	0,38	0,00	0,00	0,00	
UD	4	0	-	-	16282,05	-	-	0,87	0,49	9,77	0,02	0,08	
UD	5	0	-	-	18758,96	-	-	0,95	0,51	55,80	0,12	0,44	
UD	Mittelwert	0	-	-	16257,09	-	-	0,87	0,45	13,95	0,03	0,11	
UD	Stbw.	0	-	-	1799,12	-	-	0,06	0,05	23,74	0,05	0,19	
UD	1	10	45566,35	44509,45	19731,70	8,74	7,37	1,02	0,60	732,42	1,62	5,82	
UD	2	10	50318,30	46402,65	19213,42	9,02	7,38	1,01	0,54	347,38	0,77	2,76	
UD	3	10	48769,65	44227,75	18048,82	8,88	7,89	0,96	0,48	93,47	0,21	0,74	
UD	4	10	46669,99	44283,15	18254,87	8,57	7,34	0,98	0,55	235,77	0,52	1,87	
UD	5	10	48955,77	43839,82	18640,51	8,81	6,84	0,96	0,58	431,08	0,98	3,29	
UD	Mittelwert	10	48056,01	44652,56	18777,86	8,81	7,36	0,99	0,55	368,02	0,82	2,90	
UD	Stbw.	10	1907,63	1007,57	693,44	0,17	0,37	0,03	0,05	239,82	0,53	1,90	
UD	1	15	52593,54	49014,57	19052,55	12,49	8,03	1,01	0,56	400,39	0,89	3,18	
UD	2	15	64147,84	56899,71	19719,62	12,57	10,64	0,99	0,56	611,05	1,35	4,85	
UD	3	15	58164,42	56171,64	19815,17	12,34	10,14	1,01	0,67	505,02	1,12	4,01	
UD	4	15	64942,16	57362,82	18329,82	12,50	10,01	0,96	0,53	226,00	0,50	1,80	
UD	5	15	62056,65	59111,49	17531,64	12,40	10,82	0,98	0,51	167,41	0,37	1,33	
UD	Mittelwert	15	60380,93	55712,05	18889,76	12,46	9,93	0,99	0,57	381,98	0,85	3,03	
UD	Stbw.	15	5083,28	3897,41	965,60	0,09	1,11	0,02	0,06	185,96	0,41	1,48	
UD	1	20	64681,41	57576,07	7774,38	14,93	12,84	0,65	0,65	76,73	0,18	0,61	
UD	2	20	64879,90	59851,64	9520,79	14,91	13,74	0,60	0,60	55,80	0,13	0,44	
UD	3	20	63815,21	57461,59	8615,82	15,02	12,74	0,43	0,43	0,00	0,00	0,00	
UD	4	20	67247,46	56299,46	8684,13	15,34	12,15	0,40	0,38	0,00	0,00	0,00	
UD	5	20	63871,88	58216,81	9784,51	15,05	12,54	0,48	0,48	8,37	0,02	0,07	
UD	Mittelwert	20	64899,17	57881,11	8875,93	15,05	12,80	0,51	0,51	28,18	0,07	0,22	
UD	Stbw.	20	1395,76	1300,61	799,88	0,17	0,59	0,11	0,11	35,71	0,08	0,28	
UD	1	25	83354,11	75665,89	10767,95	19,47	16,25	1,14	1,14	419,92	0,97	3,34	
UD	2	25	81776,84	72628,73	8623,29	19,27	16,07	1,36	1,36	364,12	0,84	2,89	
UD	3	25	81234,30	72941,83	9583,59	19,63	16,85	0,69	0,69	302,73	0,70	2,40	
UD	4	25	82990,47	76695,80	7770,81	19,03	16,02	0,40	0,40	0,00	0,00	0,00	
UD	5	25	82088,34	76464,78	8199,29	19,34	16,42	0,67	0,67	167,41	0,39	1,33	
UD	Mittelwert	25	82288,81	74879,40	8988,99	19,35	16,32	0,85	0,85	250,84	0,58	1,99	
UD	Stbw.	25	871,99	1952,62	1199,96	0,22	0,33	0,39	0,39	168,82	0,39	1,34	
UD	1	30	102733,18	94477,55	8879,94	23,99	21,82	2,52	2,52	789,62	1,83	6,27	
UD	2	30	104311,16	95170,73	8282,98	23,83	20,53	2,57	2,57	916,57	2,12	7,28	
UD	3	30	102062,48	96398,44	9650,44	22,82	20,13	3,47	3,47	994,70	2,30	7,90	
UD	4	30	98626,66	86451,57	11044,57	23,78	22,95	1,80	1,80	864,96	2,00	6,87	
UD	5	30	99883,54	94564,40	12103,10	23,05	20,65	1,27	1,27	683,59	1,58	5,43	
UD	Mittelwert	30	101523,40	93412,54	9992,21	23,50	21,22	2,32	2,32	849,89	1,97	6,75	
UD	Stbw.	30	2269,69	3966,20	1568,34	0,52	1,16	0,84	0,84	119,30	0,28	0,95	
UD	1	35	125207,27	111736,58	12561,51	27,82	22,43	1,87	1,87	1711,77	3,96	13,60	
UD	2	35	126862,09	122484,74	13186,41	27,59	20,72	1,69	1,69	1775,95	4,11	14,11	
UD	3	35	127350,30	113491,97	12463,54	28,20	23,50	3,20	3,20	1834,54	4,25	14,57	
UD	4	35	124865,68	114841,26	12812,25	28,10	24,02	2,19	2,19	1989,40	4,60	15,80	
UD	5	35	127328,68	132760,77	9491,71	28,59	24,97	2,92	2,92	1954,52	4,52	15,53	
UD	Mittelwert	35	126322,80	119063,06	12103,08	28,06	23,13	2,37	2,37	1853,24	4,29	14,72	
UD	Stbw.	35	1196,45	8687,25	1486,26	0,38	1,63	0,66	0,66	117,40	0,27	0,93	
UD	1	40	145738,48	129066,08	18473,67	32,57	26,46	3,42	3,42	4810,27	11,13	38,21	
UD	2	40	147054,75	127783,27	9759,17	34,33	25,28	2,46	2,46	2653,46	6,14	21,08	
UD	3	40	149836,11	132625,35	9597,94	32,82	26,04	3,70	3,70	2546,04	5,89	20,22	
UD	4	40	147140,67	140897,02	11279,29	33,83	26,89	3,73	3,73	3147,32	7,28	25,00	
UD	5	40	138283,06	142390,18	9259,79	32,42	26,21	2,79	2,79	2101,00	4,86	16,69	
UD	Mittelwert	40	145610,62	134552,38	11673,97	33,19	26,18	3,22	3,22	3051,62	7,06	24,24	
UD	Stbw.	40	4358,64	6732,75	3879,31	0,84	0,60	0,57	0,57	1051,17	2,43	8,35	
UD	1	45	184520,89	143169,10	11646,32	37,62	25,96	5,10	5,10	3267,30	7,56	25,95	
UD	2	45	176385,26	160717,63	11765,52	37,28	25,58	3,19	3,19	3032,92	7,02	24,09	
UD	3	45	164819,79	141513,21	10428,43	37,79	27,53	2,90	2,90	2825,06	6,54	22,44	
UD	4	45	169714,03	137646,18	11736,82	37,01	24,04	2,98	2,98	3041,29	7,04	24,16	
UD	5	45	172270,66	157083,97	11774,69	37,25	29,63	3,22	3,22	3189,17	7,38	25,33	
UD	Mittelwert	45	173542,13	148026,02	11470,36	37,39	26,55	3,48	3,48	3071,15	7,11	24,39	
UD	Stbw.	45	7432,48	10208,71	584,66	0,31	2,12	0,91	0,91	169,79	0,39	1,35	

Tabelle A-2: Versuchsergebnisse Topografie, BIAX-Material

			Topografie											
			Beule			Folie			Vakuum					
Material	Nr.	Eindrucktiefe	Volumen			maximale Höhe			maximale Höhe		Fläche der Falte		Prozentanteil	
			in [mm ³]	in [mm ³]	in [mm ³]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	Höhe-nur Mitte	in [mm ²]	Gesamtfläche	Ausschnitt		
-	-	in [mm]	in [mm ³]	in [mm ³]	in [mm ³]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm ²]	in [%]	in [%]	
BIAX	1	0	17340,06	-	17350,94	1,28	-	1,10	0,56	4,19	0,01	0,03		
BIAX	2	0	25928,27	-	18486,27	1,48	-	0,93	0,55	0,00	0,00	0,00		
BIAX	3	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
BIAX	4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
BIAX	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
BIAX	Mittelwert	0	21634,17	-	17918,61	1,38	-	1,02	0,55	2,09	0,00	0,02		
BIAX	Stbw.	0	6072,79	-	802,80	0,14	-	0,12	0,01	2,96	0,01	0,02		
BIAX	1	10	49600,66	47306,86	12174,45	9,26	9,05	0,74	0,74	136,72	0,32	1,09		
BIAX	2	10	46625,22	46432,24	12921,19	9,42	9,26	0,57	0,57	20,93	0,05	0,17		
BIAX	3	10	48399,49	43710,39	12475,31	9,20	8,69	0,71	0,71	106,03	0,25	0,84		
BIAX	4	10	46902,45	46290,62	12656,48	8,93	8,73	0,60	0,60	13,95	0,03	0,11		
BIAX	5	10	42456,97	40700,06	11521,02	8,88	8,58	0,48	0,48	0,00	0,00	0,00		
BIAX	Mittelwert	10	46796,96	44888,03	12349,69	9,14	8,86	0,62	0,62	55,52	0,13	0,44		
BIAX	Stbw.	10	2706,70	2698,54	537,10	0,23	0,28	0,11	0,11	61,55	0,14	0,49		
BIAX	1	15	60455,41	59884,49	12980,88	12,75	12,43	1,24	1,24	352,96	0,82	2,80		
BIAX	2	15	56293,39	62192,42	11616,49	12,27	12,01	0,84	0,84	496,65	1,15	3,95		
BIAX	3	15	55604,16	57204,07	12705,38	12,51	11,99	0,89	0,89	217,63	0,50	1,73		
BIAX	4	15	53724,22	55549,86	12303,96	12,27	11,67	0,84	0,84	252,51	0,58	2,01		
BIAX	5	15	62166,66	56361,39	13493,65	12,72	11,68	0,94	0,94	315,29	0,73	2,50		
BIAX	Mittelwert	15	57648,77	58238,45	12620,07	12,51	11,95	0,95	0,95	327,01	0,76	2,60		
BIAX	Stbw.	15	3525,20	2746,14	708,47	0,23	0,31	0,17	0,17	108,52	0,25	0,86		
BIAX	1	20	76089,04	71188,05	13256,72	15,42	14,32	1,37	1,37	640,35	1,48	5,09		
BIAX	2	20	71825,29	68265,95	11911,33	15,32	14,17	1,04	1,04	604,07	1,40	4,80		
BIAX	3	20	73145,78	62821,24	12327,00	15,32	14,44	0,88	0,88	258,09	0,60	2,05		
BIAX	4	20	74072,40	69215,02	12996,64	15,94	15,06	1,24	1,24	641,74	1,49	5,10		
BIAX	5	20	75118,01	71908,73	14198,09	15,79	15,17	1,10	1,10	290,18	0,67	2,30		
BIAX	Mittelwert	20	74050,10	68679,80	12937,96	15,56	14,63	1,13	1,13	486,89	1,13	3,87		
BIAX	Stbw.	20	1663,26	3588,10	883,21	0,29	0,45	0,19	0,19	195,13	0,45	1,55		
BIAX	1	25	95771,75	84456,74	11424,24	19,87	16,54	1,28	1,28	1109,10	2,51	8,46		
BIAX	2	25	103470,01	93415,34	10785,28	20,10	17,37	1,48	1,48	1270,93	2,88	9,69		
BIAX	3	25	91656,38	82679,49	10712,12	19,25	15,73	1,41	1,41	1065,85	2,41	8,13		
BIAX	4	25	103470,01	81231,54	13371,57	20,10	16,90	1,78	1,78	1732,70	3,92	13,21		
BIAX	5	25	101239,18	87306,33	15079,01	20,08	16,81	1,55	1,55	1477,40	3,34	11,27		
BIAX	Mittelwert	25	99121,47	85817,89	12274,44	19,88	16,67	1,50	1,50	1331,19	3,01	10,15		
BIAX	Stbw.	25	5226,20	4813,35	1900,70	0,37	0,61	0,19	0,19	276,56	0,63	2,11		
BIAX	1	30	129836,57	105219,53	14856,00	24,03	18,97	1,77	1,77	1994,98	4,51	15,21		
BIAX	2	30	127403,59	106637,32	14175,20	23,96	20,98	2,12	2,12	1869,42	4,23	14,26		
BIAX	3	30	124221,93	104360,51	15381,21	23,30	18,97	1,73	1,73	1911,27	4,32	14,57		
BIAX	4	30	121536,34	103331,06	14489,87	23,43	18,80	2,56	2,56	2770,65	6,27	21,13		
BIAX	5	30	118188,23	101069,03	14055,18	23,59	20,06	2,62	2,05	1859,65	4,21	14,18		
BIAX	Mittelwert	30	124237,33	104123,49	14591,49	23,66	19,56	2,16	2,04	2081,19	4,71	15,87		
BIAX	Stbw.	30	4616,92	2093,71	539,65	0,32	0,94	0,42	0,33	389,10	0,88	2,97		
BIAX	1	35	141495,43	122073,14	14877,88	27,89	23,67	2,22	2,22	2121,93	4,80	16,18		
BIAX	2	35	142821,06	114277,67	14631,62	27,56	24,45	2,05	2,05	2356,31	5,33	17,97		
BIAX	3	35	141638,01	119291,10	13081,24	27,31	23,19	2,14	2,14	2059,15	4,66	15,70		
BIAX	4	35	140088,28	120070,16	13076,98	27,52	22,26	1,91	1,91	2257,25	5,11	17,21		
BIAX	5	35	141309,77	114856,84	11409,63	27,25	21,57	2,09	2,09	1785,71	4,04	13,62		
BIAX	Mittelwert	35	141470,51	118113,78	13415,47	27,51	23,03	2,08	2,08	2116,07	4,79	16,14		
BIAX	Stbw.	35	973,27	3399,02	1402,44	0,25	1,14	0,12	0,12	217,98	0,49	1,66		

Tabelle A-3: Versuchsergebnisse Topografie, TRIAX-Material

			Topografie									
			-	Folie	Vakuum	-	Folie	Vakuum	Vakuum			
			Beule						Falte			
Material	Nr.	Eindrucktiefe	Volumen	Volumen	Volumen	maximale Höhe	maximale Höhe	maximale Höhe	maximale Höhe-nur Mitte	Fläche der Falte	Prozentanteil _Gesamtfläche	Prozentanteil _Ausschnitt
-	-	in [mm]	in [mm³]	in [mm³]	in [mm³]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm]	in [mm²]	in [%]	in [%]
TRIAX	1	0	20945,66	-	17664,90	1,21	-	0,92	0,48	0,00	0,00	0,00
TRIAX	2	0	21260,64	-	19622,82	1,15	-	1,00	0,55	439,45	0,97	3,49
TRIAX	3	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TRIAX	4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TRIAX	5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TRIAX	Mittelwert	0	21103,15	-	18643,86	1,18	-	0,96	0,52	219,73	0,49	1,75
TRIAX	Stbw.	0	222,73	-	1384,46	0,04	-	0,06	0,05	310,74	0,69	2,47
TRIAX	1	10	47808,64	42225,98	12610,26	10,87	10,53	0,90	0,90	270,65	0,61	2,06
TRIAX	2	10	45342,91	42000,56	13467,99	10,79	10,33	1,95	1,95	583,15	1,32	4,45
TRIAX	3	10	46071,86	42984,09	13231,30	10,92	10,55	1,83	1,83	436,66	0,99	3,33
TRIAX	4	10	47826,82	44929,38	13298,39	10,83	10,40	1,38	1,38	379,46	0,86	2,89
TRIAX	5	10	50987,39	49896,83	12031,47	11,09	10,70	1,30	1,30	404,58	0,92	3,09
TRIAX	Mittelwert	10	47607,52	44407,37	12927,88	10,90	10,50	1,47	1,47	414,90	0,94	3,16
TRIAX	Stbw.	10	2179,38	3278,09	596,97	0,12	0,14	0,43	0,43	112,86	0,26	0,86
TRIAX	1	15	64974,45	62557,73	12161,81	15,28	14,99	2,89	2,89	997,49	2,26	7,61
TRIAX	2	15	61903,39	60637,72	13502,51	15,19	14,54	1,92	1,92	775,67	1,76	5,91
TRIAX	3	15	66133,51	63155,83	13028,67	15,48	15,15	2,29	2,29	904,02	2,05	6,89
TRIAX	4	15	63255,48	56218,19	12688,29	15,38	14,26	1,78	1,78	758,93	1,72	5,79
TRIAX	5	15	64588,43	58682,99	12233,06	15,32	14,24	1,34	1,34	629,19	1,42	4,80
TRIAX	Mittelwert	15	64171,05	60250,49	12722,87	15,33	14,64	2,04	2,04	813,06	1,84	6,20
TRIAX	Stbw.	15	1631,83	2856,17	560,64	0,11	0,42	0,58	0,58	141,80	0,32	1,08
TRIAX	1	20	85208,73	79973,82	14211,87	20,50	19,45	2,26	2,26	1498,33	3,47	11,90
TRIAX	2	20	86338,50	83622,92	20078,08	20,46	19,29	2,25	2,25	1674,11	3,87	13,30
TRIAX	3	20	83665,00	80526,17	20948,56	20,27	19,15	3,11	3,11	2392,58	5,54	19,00
TRIAX	4	20	87020,89	87554,70	17257,30	20,57	19,83	2,05	2,05	1607,14	3,72	12,77
TRIAX	5	20	89799,71	84035,19	17617,81	20,51	19,28	2,71	2,71	1477,40	3,42	11,74
TRIAX	Mittelwert	20	86406,56	83142,56	18022,72	20,46	19,40	2,48	2,48	1729,91	4,00	13,74
TRIAX	Stbw.	20	2282,90	3057,00	2648,46	0,11	0,26	0,43	0,43	379,05	0,88	3,01
TRIAX	1	25	111869,28	102520,14	19996,86	25,25	23,37	2,99	2,99	2744,14	6,35	21,80
TRIAX	2	25	108365,73	101832,34	19310,33	24,78	23,22	3,01	3,01	2565,57	5,94	20,38
TRIAX	3	25	106339,02	96843,31	17665,80	25,16	23,21	3,72	3,72	2184,71	5,06	17,35
TRIAX	4	25	108175,66	95176,95	18536,60	25,14	22,87	3,45	3,45	2396,76	5,55	19,04
TRIAX	5	25	108766,20	100790,16	18926,77	24,84	22,72	3,43	3,43	2767,86	6,40	21,99
TRIAX	Mittelwert	25	108703,18	99432,58	18887,27	25,03	23,08	3,32	3,32	2531,81	5,86	20,11
TRIAX	Stbw.	25	2000,60	3238,43	869,87	0,21	0,27	0,31	0,31	245,28	0,57	1,95
TRIAX	1	30	128947,72	116664,73	20949,27	29,38	26,96	3,91	3,91	3207,31	7,42	25,48
TRIAX	2	30	131483,22	118256,96	19755,40	29,59	26,89	3,37	3,37	2557,20	5,92	20,31
TRIAX	3	30	132216,75	116301,07	19257,47	28,99	24,68	2,94	2,94	2519,53	5,83	20,01
TRIAX	4	30	134943,84	118582,53	17443,93	29,73	27,10	2,67	2,67	2512,56	5,81	19,96
TRIAX	5	30	129631,80	118134,17	19721,69	29,44	26,51	2,91	2,91	2311,66	5,35	18,36
TRIAX	Mittelwert	30	131444,67	117587,89	19425,55	29,43	26,43	3,16	3,16	2621,65	6,07	20,82
TRIAX	Stbw.	30	2364,48	1029,99	1272,13	0,28	1,00	0,49	0,49	341,16	0,79	2,71
TRIAX	1	35	166040,81	132445,46	20460,92	33,72	28,76	3,75	3,75	3484,93	8,06	27,68
TRIAX	2	35	164050,20	150861,63	21891,25	34,15	29,83	3,31	3,31	3662,11	8,47	29,09
TRIAX	3	35	154660,19	136313,46	22185,40	33,52	29,32	3,34	3,34	3678,85	8,51	29,22
TRIAX	4	35	157401,47	132917,79	22214,80	34,02	30,81	3,14	3,14	3717,91	8,60	29,53
TRIAX	5	35	158940,27	132215,04	19943,45	33,62	29,50	3,10	3,10	3207,31	7,59	24,46
TRIAX	Mittelwert	35	160218,59	136950,68	21339,16	33,80	29,64	3,33	3,33	3550,22	8,25	28,00
TRIAX	Stbw.	35	4718,20	7951,54	1061,48	0,27	0,76	0,26	0,26	211,56	0,42	2,10

Tabelle A-4: Versuchsergebnisse Druckdifferenz, UD-Material

Material	Nr.	Eindringtiefe in [mm]	Durchtrankung		Druck				Absolutwerte vor und nach Vakuumziehen				
			komplette Durchtrankung in [s]	Durchfluss von Anguss zu Anguss in [s]	vor Vakuumzieh		nach Vakuumzieh		Differenz zw. Absolutwerten in [mbar]	$p_0 = p_{vor} + \Delta p_{vor}$ in [mbar]	Mittelwert zw. Absolutwerten in [mbar]	Druckdifferenz zw. Umgebungsdr. und Folie in [N/mm ²]	
					Absolutwert Druck unter Folie in [mbar]		Druckdifferenz von Anguss zu Anguss in [mbar]					in [mbar]	in [mbar]
UD	1	0	2,10	2,01	85	87	5	965	2	90	88,5	943,5	0,09435
UD	2	0	2,80	2,40	89	91	0	965	2	89	90	942	0,0942
UD	3	0	2,10	1,97	96	101	5	960	5	101	101	931	0,0931
UD	4	0	2,40	2,36	90	99	0	965	9	90	94,5	937,5	0,09375
UD	5	0	2,50	2,38	92	108	0	970	16	92	100	932	0,0932
UD	Mittelwert	0	2,38	2,22	90,40	97,20	2,00	965,00	6,80	92,40	94,80	937,20	0,09
UD	Stbw.	0	0,29	0,22	4,04	8,32	2,74	3,54	5,89	4,93	5,66	5,66	0,00
UD	1	10	2,70	2,63	88	95	0	970	7	88	91,5	940,5	0,09405
UD	2	10	2,50	2,27	88	105	0	930	17	88	96,5	935,5	0,09355
UD	3	10	3,60	2,43	94	95	0	960	1	94	94,5	937,5	0,09375
UD	4	10	2,30	2,06	93	100	0	950	7	93	96,5	935,5	0,09355
UD	5	10	2,30	2,05	94	102	0	965	8	94	98	934	0,0934
UD	Mittelwert	10	2,68	2,29	91,40	99,40	0,00	955,00	8,00	91,40	95,40	936,60	0,09
UD	Stbw.	10	0,54	0,25	3,13	4,39	0,00	15,81	5,74	3,13	2,51	2,51	0,00
UD	1	15	3,00	2,88	90	89	0	970	1	90	89,5	942,5	0,09425
UD	2	15	3,00	2,93	89	99	0	970	10	89	94	938	0,0938
UD	3	15	2,40	2,35	94	111	0	965	17	94	102,5	929,5	0,09295
UD	4	15	2,70	2,51	88	94	0	975	6	88	91	941	0,0941
UD	5	15	2,60	2,38	94	104	0	970	10	94	99	933	0,0933
UD	Mittelwert	15	2,74	2,61	91,00	99,40	0,00	970,00	8,80	91,00	95,20	936,80	0,09
UD	Stbw.	15	0,26	0,28	2,83	8,56	0,00	3,54	5,89	2,83	5,46	5,46	0,00
UD	1	20	4,50	3,30	98	102	20	960	4	118	110	922	0,0922
UD	2	20	2,80	2,61	106	124	20	975	18	126	125	907	0,0907
UD	3	20	3,10	2,93	105	115	20	940	10	125	120	912	0,0912
UD	4	20	2,90	2,64	106	114	20	965	8	126	120	912	0,0912
UD	5	20	3,20	3,14	106	115	20	960	9	126	120,5	911,5	0,09115
UD	Mittelwert	20	3,30	2,92	104,20	114,00	20,00	960,00	9,80	124,20	119,10	912,90	0,09
UD	Stbw.	20	0,69	0,30	3,49	7,84	0,00	12,75	5,12	3,49	5,50	5,50	0,00
UD	1	25	4,50	4,16	105	120	5	935	15	110	115	917	0,0917
UD	2	25	3,30	3,05	99	110	0	955	11	99	104,5	927,5	0,09275
UD	3	25	3,70	3,20	95	110	0	965	15	95	102,5	929,5	0,09295
UD	4	25	3,20	3,00	92	102	0	970	10	92	97	935	0,0935
UD	5	25	3,40	3,04	90	98	5	970	8	95	96,5	935,5	0,09355
UD	Mittelwert	25	3,62	3,29	96,20	108,00	2,00	959,00	11,80	98,20	103,10	928,90	0,09
UD	Stbw.	25	0,53	0,49	5,97	8,49	2,74	14,75	3,11	7,05	7,49	7,49	0,00
UD	1	30	4,53	3,46	100	116	0	935	16	100	108	924	0,0924
UD	2	30	3,84	3,54	99	103	5	930	4	104	103,5	928,5	0,09285
UD	3	30	4,16	3,54	96	110	5	925	14	101	105,5	926,5	0,09265
UD	4	30	4,03	3,50	97	107	0	925	10	97	102	930	0,093
UD	5	30	3,36	3,20	94	110	5	965	16	99	104,5	927,5	0,09275
UD	Mittelwert	30	3,98	3,45	97,20	109,20	3,00	936,00	12,00	100,20	104,70	927,30	0,09
UD	Stbw.	30	0,43	0,14	2,39	4,76	2,74	16,73	5,10	2,59	2,25	2,25	0,00
UD	1	35	3,89	3,46	119	130	0	935	11	119	124,5	907,5	0,09075
UD	2	35	4,20	3,59	108	116	0	945	8	108	112	920	0,092
UD	3	35	4,33	3,64	100	120	5	925	20	105	112,5	919,5	0,09195
UD	4	35	3,29	2,89	102	120	5	955	18	107	113,5	918,5	0,09185
UD	5	35	3,89	3,52	96	115	5	960	19	101	108	924	0,0924
UD	Mittelwert	35	3,92	3,42	105,00	120,20	3,00	944,00	15,20	108,00	114,10	917,90	0,09
UD	Stbw.	35	0,40	0,30	8,94	5,93	2,74	14,32	5,36	6,71	6,18	6,18	0,00
UD	1	40	3,91	3,60	98	105	5	945	7	103	104	928	0,0928
UD	2	40	4,90	4,11	97	112	0	925	15	97	104,5	927,5	0,09275
UD	3	40	4,82	4,25	96	110	0	965	14	96	103	929	0,0929
UD	4	40	4,46	3,50	96	111	0	955	15	96	103,5	928,5	0,09285
UD	5	40	4,26	3,41	94	108,5	0	950	14,5	94	101,25	930,75	0,093075
UD	Mittelwert	40	4,47	3,77	96,20	109,30	1,00	948,00	13,10	97,20	103,25	928,75	0,09
UD	Stbw.	40	0,41	0,38	1,48	2,73	2,24	14,83	3,44	3,42	1,25	1,25	0,00
UD	1	45	4,90	3,70	96	113,5	0	935	17,5	96	104,75	927,25	0,092725
UD	2	45	4,50	3,96	98	116	0	950	18	98	107	925	0,0925
UD	3	45	4,83	4,22	95	110,5	5	935	15,5	100	105,25	926,75	0,092675
UD	4	45	4,29	4,14	94	110	0	935	16	94	102	930	0,093
UD	5	45	5,42	4,73	85	103	0	940	18	85	94	938	0,0938
UD	Mittelwert	45	4,79	4,15	93,60	110,60	1,00	939,00	17,00	94,60	102,60	929,40	0,09
UD	Stbw.	45	0,43	0,38	5,03	4,89	2,24	6,52	1,17	5,81	5,13	5,13	0,00

Tabelle A-5: Versuchsergebnisse Druckdifferenz, BIAX-Material

			Druck													
			Durchtrankung		vor Vakuumzieh		nach Vakuumzieh		vor Vakuumzieh		nach Vakuumzieh		Absolutwerte vor und nach Vakuumziehen			
Material	Nr.	Eindrucktiefe	komplette Durchtrankung		Absolutwert Druck unter Folie		Druckdifferenz von Anguss zu Anguss		Differenz zw. Absolutwerten		$p_0 = p_{vor} + \Delta p_{vor}$	Mittelwert zw. Absolutwerten	Druckdifferenz zw. Umgebungsd. und Folie			
			in [mm]	in [s]	p_{vor} in [mbar]	p_{nach} in [mbar]	Δp_{vor} in [mbar]	Δp_{nach} in [mbar]	in [mbar]	in [mbar]			in [mbar]	in [N/mm ²]		
BIAX	1	0	40,50	39,91	115	114	5	960	1	120	117	915	0,0915			
BIAX	2	0	36,14	35,81	95	97	5	985	2	100	98,5	933,5	0,09335			
BIAX	3	0	50,42	49,24	83	84	0	950	1	83	83,5	948,5	0,09485			
BIAX	4	0	43,93	43,66	95	99	5	975	4	100	99,5	932,5	0,09325			
BIAX	5	0	33,44	32,85	92	90	5	960	2	97	93,5	938,5	0,09385			
BIAX	Mittelwert	0	40,88	40,29	96,00	96,80	4,00	966,00	2,00	100,00	98,40	933,60	0,09			
BIAX	Stbw.	0	6,67	6,46	11,70	11,30	2,24	13,87	1,22	13,21	12,18	12,18	0,00			
BIAX	1	10	37,60	36,74	106	107,5	5	935	1,5	111	109,25	922,75	0,092275			
BIAX	2	10	36,60	36,48	102	109	5	930	7	107	108	924	0,0924			
BIAX	3	10	38,20	34,83	102	108,5	5	935	6,5	107	107,75	924,25	0,092425			
BIAX	4	10	43,10	42,70	100	104,5	0	935	4,5	100	102,25	929,75	0,092975			
BIAX	5	10	41,00	40,63	98	105	5	935	7	103	104	928	0,0928			
BIAX	Mittelwert	10	39,30	38,28	101,60	106,90	4,00	934,00	5,30	105,60	106,25	925,75	0,09			
BIAX	Stbw.	10	2,68	3,26	2,97	2,04	2,24	2,24	2,36	4,22	2,97	2,97	0,00			
BIAX	1	15	47,50	40,17	101	105,5	5	935	4,5	106	105,75	926,25	0,092625			
BIAX	2	15	47,70	45,90	97	99	0	940	2	97	98	934	0,0934			
BIAX	3	15	41,40	39,72	97	102	5	940	5	102	102	930	0,093			
BIAX	4	15	42,20	40,75	99	104	5	950	5	104	104	928	0,0928			
BIAX	5	15	45,80	43,13	100	102,5	5	940	2,5	105	103,75	928,25	0,092825			
BIAX	Mittelwert	15	44,92	41,93	98,80	102,60	4,00	941,00	3,80	102,80	102,70	929,30	0,09			
BIAX	Stbw.	15	2,96	2,58	1,79	2,43	2,24	5,48	1,44	3,56	2,94	2,94	0,00			
BIAX	1	20	50,90	41,34	102	118,5	5	930	16,5	107	112,75	919,25	0,091925			
BIAX	2	20	42,90	39,62	95	112	0	945	17	95	103,5	928,5	0,09285			
BIAX	3	20	44,80	41,17	90	98	0	935	8	90	94	938	0,0938			
BIAX	4	20	48,50	39,73	92	108	0	935	16	92	100	932	0,0932			
BIAX	5	20	49,60	37,47	98	108	5	950	10	103	105,5	926,5	0,09265			
BIAX	Mittelwert	20	47,34	39,87	95,40	108,90	2,00	939,00	13,50	97,40	103,15	928,85	0,09			
BIAX	Stbw.	20	3,36	1,55	4,77	7,45	2,74	8,22	4,18	7,30	6,92	6,92	0,00			
BIAX	1	25	46,54	44,16	84	84	5	960	0	89	86,5	945,5	0,09455			
BIAX	2	25	40,56	40,04	83	84	5	965	1	88	86	946	0,0946			
BIAX	3	25	41,99	37,09	95	96	5	970	1	100	98	934	0,0934			
BIAX	4	25	40,50	36,66	83	88	10	950	5	93	90,5	941,5	0,09415			
BIAX	5	25	45,17	37,16	88	88	5	955	0	93	90,5	941,5	0,09415			
BIAX	Mittelwert	25	42,95	39,02	86,60	88,00	6,00	960,00	1,40	92,60	90,30	941,70	0,09			
BIAX	Stbw.	25	2,76	3,17	5,13	4,90	2,24	7,91	2,07	4,72	4,80	4,80	0,00			
BIAX	1	30	39,60	34,17	88	88,5	5	955	0,5	93	90,75	941,25	0,094125			
BIAX	2	30	45,77	43,57	100	98	5	955	2	105	101,5	930,5	0,09305			
BIAX	3	30	42,09	33,75	100	100	5	975	0	105	102,5	929,5	0,09295			
BIAX	4	30	34,13	29,11	104	118	5	990	14	109	113,5	918,5	0,09185			
BIAX	5	30	33,43	31,16	101	101	5	965	0	106	103,5	928,5	0,09285			
BIAX	Mittelwert	30	39,00	34,35	98,60	101,10	5,00	968,00	3,30	103,60	102,35	929,65	0,09			
BIAX	Stbw.	30	5,26	5,55	6,15	10,67	0,00	14,83	6,04	6,15	8,08	8,08	0,00			
BIAX	1	35	32,64	27,36	100	100	5	950	0	105	102,5	929,5	0,09295			
BIAX	2	35	38,61	32,44	102	102	5	950	0	107	104,5	927,5	0,09275			
BIAX	3	35	37,41	30,86	110	110	0	950	0	110	110	922	0,0922			
BIAX	4	35	29,75	23,10	99	98	0	965	1	99	98,5	933,5	0,09335			
BIAX	5	35	30,10	27,15	116	115	5	960	1	121	118	914	0,0914			
BIAX	Mittelwert	35	33,70	28,18	105,40	105,00	3,00	955,00	0,40	108,40	106,70	925,30	0,09			
BIAX	Stbw.	35	4,11	3,64	7,33	7,21	2,74	7,07	0,55	8,11	7,55	7,55	0,00			

Tabelle A-6: Versuchsergebnisse Druckdifferenz, TRIAX-Material

Material	Nr.	Eindringtiefe in [mm]	Durchtränkung		Druck				Absolutwerte vor und nach Vakuumziehen				
			komplette Durchtränkung in [s]	Durchfluss von Anguss zu Anguss in [s]	vor Vakuumziehh		nach Vakuumziehh		Differenz zw. Absolutwerten in [mbar]	$p_{10} = p_{100} + \Delta p_{100}$ in [mbar]	Mittelwert zw. Absolutwerten in [mbar]	Druckdifferenz zw. Umgebungsdr. und Folie	
					Absolutwert Druck unter Folie p_{100} in [mbar]	p_{10} in [mbar]	Δp_{100} in [mbar]	Δp_{10} in [mbar]				in [mbar]	in [N/mm ²]
TRIAX	1	0	12,28	11,67	100	117	0	955	17	100	108,5	923,5	0,09235
TRIAX	2	0	7,28	6,61	100	107	0	945	7	100	103,5	928,5	0,09285
TRIAX	3	0	9,07	8,54	99	112	5	940	13	104	108	924	0,0924
TRIAX	4	0	14,95	14,05	94	99	0	945	5	94	96,5	935,5	0,09355
TRIAX	5	0	12,56	11,99	93	97	0	935	4	93	95	937	0,0937
TRIAX	Mittelwert	0	11,23	10,57	97,20	106,40	1,00	944,00	9,20	98,20	102,30	929,70	0,09
TRIAX	Stbw.	0	3,04	2,96	3,42	8,47	2,24	7,42	5,59	4,60	6,31	6,31	0,00
TRIAX	1	10	9,17	8,38	94	98	0	950	4	94	96	936	0,0936
TRIAX	2	10	10,27	9,08	89	91	0	945	2	89	90	942	0,0942
TRIAX	3	10	12,56	12,04	109	108	5	960	1	114	111	921	0,0921
TRIAX	4	10	13,71	13,10	93	94	0	960	1	93	93,5	938,5	0,09385
TRIAX	5	10	11,16	11,07	110	110	0	945	0	110	110	922	0,0922
TRIAX	Mittelwert	10	11,37	10,74	99,00	100,20	1,00	952,00	1,60	100,00	100,10	931,90	0,09
TRIAX	Stbw.	10	1,80	1,98	9,77	8,44	2,24	7,58	1,52	11,20	9,74	9,74	0,00
TRIAX	1	15	8,87	8,59	97	99	0	955	2	97	98	934	0,0934
TRIAX	2	15	6,58	6,51	97	103	0	950	6	97	100	932	0,0932
TRIAX	3	15	11,16	9,94	99	98	0	950	1	99	98,5	933,5	0,09335
TRIAX	4	15	7,87	7,26	100	101	0	950	1	100	100,5	931,5	0,09315
TRIAX	5	15	9,87	9,11	105	106	0	950	1	105	105,5	926,5	0,09265
TRIAX	Mittelwert	15	8,87	8,28	99,60	101,40	0,00	951,00	2,20	99,60	100,50	931,50	0,09
TRIAX	Stbw.	15	1,77	1,39	3,29	3,21	0,00	2,24	2,17	3,29	2,98	2,98	0,00
TRIAX	1	20	13,85	11,80	104	103	0	945	1	104	103,5	928,5	0,09285
TRIAX	2	20	9,07	8,91	111	120	0	925	9	111	115,5	916,5	0,09165
TRIAX	3	20	9,07	8,48	106	110	0	960	4	106	108	924	0,0924
TRIAX	4	20	16,25	13,24	104	104	0	965	0	104	104	928	0,0928
TRIAX	5	20	14,05	11,56	92	92	0	940	0	92	92	940	0,094
TRIAX	Mittelwert	20	12,46	10,80	103,40	105,80	0,00	947,00	2,80	103,40	104,60	927,40	0,09
TRIAX	Stbw.	20	3,23	2,03	6,99	10,26	0,00	16,05	3,83	6,99	8,52	8,52	0,00
TRIAX	1	25	15,85	12,29	94	95	0	965	1	94	94,5	937,5	0,09375
TRIAX	2	25	14,95	12,33	105	105	5	960	0	110	107,5	924,5	0,09245
TRIAX	3	25	8,87	7,52	91	92	0	965	1	91	91,5	940,5	0,09405
TRIAX	4	25	12,56	9,19	100	98	0	970	2	100	99	933	0,0933
TRIAX	5	25	12,06	10,08	100	102	0	960	2	100	101	931	0,0931
TRIAX	Mittelwert	25	12,86	10,28	98,00	98,40	1,00	964,00	1,20	99,00	98,70	933,30	0,09
TRIAX	Stbw.	25	2,74	2,06	5,52	5,22	2,24	4,18	0,84	7,28	6,17	6,17	0,00
TRIAX	1	30	7,57	7,16	97	101	0	970	4	97	99	933	0,0933
TRIAX	2	30	9,37	9,01	125	130	0	950	5	125	127,5	904,5	0,09045
TRIAX	3	30	19,34	15,50	98	100	0	955	2	98	99	933	0,0933
TRIAX	4	30	16,84	12,37	98	108	0	940	10	98	103	929	0,0929
TRIAX	5	30	8,97	7,93	106	111	0	930	5	106	108,5	923,5	0,09235
TRIAX	Mittelwert	30	12,42	10,40	104,80	110,00	0,00	949,00	5,20	104,80	107,40	924,60	0,09
TRIAX	Stbw.	30	5,29	3,48	11,86	12,10	0,00	15,17	2,95	11,86	11,89	11,89	0,00
TRIAX	1	35	7,38	6,36	92	105	0	945	13	92	98,5	933,5	0,09335
TRIAX	2	35	10,47	10,07	100	108	10	905	8	110	109	923	0,0923
TRIAX	3	35	6,68	5,53	91	100	0	955	9	91	95,5	936,5	0,09365
TRIAX	4	35	9,47	8,86	104	104	5	960	0	109	106,5	925,5	0,09255
TRIAX	5	35	15,15	11,05	108	114	0	935	6	108	111	921	0,0921
TRIAX	Mittelwert	35	9,83	8,37	99,00	106,20	3,00	940,00	7,20	102,00	104,10	927,90	0,09
TRIAX	Stbw.	35	3,35	2,37	7,42	5,22	4,47	21,79	4,76	9,62	6,76	6,76	0,00

Tabelle A-7: Versuchsergebnisse Permeabilität, UD-Material

Material	Nr.	Eindrucktiefe in [mm]	Permeabilität			
			Konstantenmethode	Elementarmethode	Interpolationsmethode	Einpunktmethode
			in [mm ²]			
UD	1	0	0,000216	0,000217	0,000178	0,000189
UD	2	0	0,000191	0,000179	0,000150	0,000158
UD	3	0	0,000229	0,000173	0,000184	0,000194
UD	4	0	0,000188	0,000179	0,000149	0,000160
UD	5	0	0,000188	0,000161	0,000154	0,000162
UD	Mittelwert	0	0,000202	0,000182	0,000163	0,000173
UD	Stbw.	0	0,000019	0,000021	0,000017	0,000017
UD	1	10	0,000168	0,000163	0,000139	0,000147
UD	2	10	0,000194	0,000177	0,000162	0,000171
UD	3	10	0,000184	0,000242	0,000153	0,000159
UD	4	10	0,000217	0,000422	0,000180	0,000187
UD	5	10	0,000220	0,000187	0,000180	0,000188
UD	Mittelwert	10	0,000197	0,000238	0,000163	0,000170
UD	Stbw.	10	0,000022	0,000107	0,000018	0,000018
UD	1	15	0,000160	0,000141	0,000128	0,000134
UD	2	15	0,000151	0,000128	0,000124	0,000132
UD	3	15	0,000189	0,000141	0,000157	0,000165
UD	4	15	0,000166	0,000150	0,000144	0,000154
UD	5	15	0,000183	0,000158	0,000152	0,000162
UD	Mittelwert	15	0,000170	0,000143	0,000141	0,000149
UD	Stbw.	15	0,000016	0,000011	0,000014	0,000016
UD	1	20	0,000139	0,000114	0,000115	0,000121
UD	2	20	0,000170	0,000188	0,000136	0,000149
UD	3	20	0,000153	0,000150	0,000124	0,000134
UD	4	20	0,000170	0,000136	0,000137	0,000148
UD	5	20	0,000150	0,000134	0,000125	0,000129
UD	Mittelwert	20	0,000157	0,000144	0,000128	0,000136
UD	Stbw.	20	0,000014	0,000027	0,000009	0,000012
UD	1	25	0,000096	0,000818	0,000081	0,000093
UD	2	25	0,000141	0,000142	0,000110	0,000123
UD	3	25	0,000116	0,000104	0,000095	0,000114
UD	4	25	0,000148	0,000127	0,000119	0,000129
UD	5	25	0,000138	0,000178	0,000111	0,000124
UD	Mittelwert	25	0,000128	0,000274	0,000103	0,000116
UD	Stbw.	25	0,000021	0,000305	0,000015	0,000014
UD	1	30	0,000101	0,000092	0,000086	0,000108
UD	2	30	0,000110	0,000046	0,000095	0,000108
UD	3	30	0,000099	0,000132	0,000084	0,000103
UD	4	30	0,000107	0,000086	0,000088	0,000106
UD	5	30	0,000128	0,000162	0,000106	0,000119
UD	Mittelwert	30	0,000109	0,000104	0,000092	0,000109
UD	Stbw.	30	0,000012	0,000045	0,000009	0,000006
UD	1	35	0,000121	0,000082	0,000102	0,000115
UD	2	35	0,000096	0,000091	0,000084	0,000104
UD	3	35	0,000102	0,000095	0,000089	0,000105
UD	4	35	0,000127	0,000118	0,000109	0,000130
UD	5	35	0,000109	0,000080	0,000093	0,000109
UD	Mittelwert	35	0,000111	0,000093	0,000095	0,000112
UD	Stbw.	35	0,000013	0,000015	0,000010	0,000011
UD	1	40	0,000111	-0,000074	0,000094	0,000107
UD	2	40	0,000085	0,000072	0,000076	0,000093
UD	3	40	0,000088	0,000071	0,000075	0,000088
UD	4	40	0,000096	0,000058	0,000084	0,000105
UD	5	40	0,000093	0,000065	0,000080	0,000103
UD	Mittelwert	40	0,000095	0,000038	0,000082	0,000099
UD	Stbw.	40	0,000010	0,000063	0,000008	0,000008
UD	1	45	0,000095	0,000088	0,000082	0,000101
UD	2	45	0,000094	0,000071	0,000080	0,000094
UD	3	45	0,000087	0,000169	0,000073	0,000088
UD	4	45	0,000100	2621,400087	0,000083	0,000092
UD	5	45	0,000081	-0,000015	0,000070	0,000081
UD	Mittelwert	45	0,000092	524,280080	0,000078	0,000091
UD	Stbw.	45	0,000008	1172,325723	0,000006	0,000007

Tabelle A-8: Versuchsergebnisse Permeabilität, BIAX-Material

Material	Nr.	Eindrucktiefe in [mm]	Permeabilität			
			Konstantenmethode	Elementarmethode	Interpolationsmethode	Einpunktmethode
			in [mm ²]			
BIAX	1	0	0,000011	0,000009	0,000011	0,000011
BIAX	2	0	0,000012	0,000010	0,000011	0,000012
BIAX	3	0	0,000009	0,000007	0,000009	0,000009
BIAX	4	0	0,000010	0,000008	0,000010	0,000010
BIAX	5	0	0,000013	0,000011	0,000012	0,000013
BIAX	Mittelwert	0	0,000011	0,000009	0,000010	0,000011
BIAX	Stbw.	0	0,000002	0,000001	0,000001	0,000002
BIAX	1	10	0,000012	0,000010	0,000011	0,000011
BIAX	2	10	0,000011	0,000010	0,000011	0,000012
BIAX	3	10	0,000012	0,000011	0,000011	0,000012
BIAX	4	10	0,000010	0,000008	0,000010	0,000010
BIAX	5	10	0,000011	0,000009	0,000010	0,000010
BIAX	Mittelwert	10	0,000011	0,000010	0,000011	0,000011
BIAX	Stbw.	10	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
BIAX	1	15	0,000011	0,000012	0,000011	0,000011
BIAX	2	15	0,000009	0,000008	0,000009	0,000009
BIAX	3	15	0,000011	0,000010	0,000011	0,000011
BIAX	4	15	0,000010	0,000009	0,000010	0,000010
BIAX	5	15	0,000010	0,000009	0,000009	0,000010
BIAX	Mittelwert	15	0,000011	0,000010	0,000010	0,000010
BIAX	Stbw.	15	0,000001	0,000002	0,000001	0,000001
BIAX	1	20	0,000011	0,000006	0,000010	0,000010
BIAX	2	20	0,000011	0,000009	0,000010	0,000011
BIAX	3	20	0,000010	0,000009	0,000010	0,000010
BIAX	4	20	0,000011	0,000008	0,000011	0,000011
BIAX	5	20	0,000011	0,000010	0,000010	0,000011
BIAX	Mittelwert	20	0,000011	0,000008	0,000010	0,000011
BIAX	Stbw.	20	0,000000	0,000002	0,000000	0,000000
BIAX	1	25	0,000010	0,000008	0,000010	0,000010
BIAX	2	25	0,000011	0,000010	0,000011	0,000011
BIAX	3	25	0,000012	0,000012	0,000011	0,000011
BIAX	4	25	0,000012	0,000011	0,000012	0,000011
BIAX	5	25	0,000012	0,000010	0,000011	0,000011
BIAX	Mittelwert	25	0,000012	0,000010	0,000011	0,000011
BIAX	Stbw.	25	0,000001	0,000002	0,000001	0,000001
BIAX	1	30	0,000014	0,000003	0,000013	0,000012
BIAX	2	30	0,000011	0,000012	0,000010	0,000010
BIAX	3	30	0,000013	0,000013	0,000012	0,000012
BIAX	4	30	0,000016	0,000012	0,000015	0,000015
BIAX	5	30	0,000015	0,000012	0,000014	0,000014
BIAX	Mittelwert	30	0,000014	0,000010	0,000013	0,000013
BIAX	Stbw.	30	0,000002	0,000004	0,000002	0,000002
BIAX	1	35	0,000017	0,000016	0,000016	0,000015
BIAX	2	35	0,000014	0,000011	0,000013	0,000013
BIAX	3	35	0,000015	0,000014	0,000014	0,000014
BIAX	4	35	0,000020	0,000015	0,000018	0,000018
BIAX	5	35	0,000018	0,000020	0,000016	0,000016
BIAX	Mittelwert	35	0,000017	0,000015	0,000015	0,000015
BIAX	Stbw.	35	0,000002	0,000003	0,000002	0,000002

Tabelle A-9: Versuchsergebnisse Permeabilität, TRIAX-Material

Material	Nr.	Eindrucktiefe in [mm]	Permeabilität			
			Konstantenmethode	Elementarmethode	Interpolationsmethode	Einpunktmethode
			in [mm ²]			
TRIAX	1	0	0,000039	0,000030	0,000036	0,000036
TRIAX	2	0	0,000069	0,000054	0,000061	0,000062
TRIAX	3	0	0,000052	0,000042	0,000048	0,000049
TRIAX	4	0	0,000031	0,000025	0,000028	0,000029
TRIAX	5	0	0,000037	0,000030	0,000034	0,000035
TRIAX	Mittelwert	0	0,000045	0,000036	0,000041	0,000042
TRIAX	Stbw.	0	0,000015	0,000012	0,000013	0,000013
TRIAX	1	10	0,000052	0,000041	0,000046	0,000049
TRIAX	2	10	0,000048	0,000038	0,000043	0,000044
TRIAX	3	10	0,000037	0,000030	0,000034	0,000035
TRIAX	4	10	0,000033	0,000027	0,000031	0,000032
TRIAX	5	10	0,000035	0,000040	0,000032	0,000036
TRIAX	Mittelwert	10	0,000041	0,000035	0,000037	0,000039
TRIAX	Stbw.	10	0,000008	0,000006	0,000007	0,000007
TRIAX	1	15	0,000052	0,000042	0,000048	0,000049
TRIAX	2	15	0,000068	0,000055	0,000061	0,000062
TRIAX	3	15	0,000045	0,000037	0,000043	0,000042
TRIAX	4	15	0,000059	0,000048	0,000054	0,000056
TRIAX	5	15	0,000048	0,000039	0,000044	0,000046
TRIAX	Mittelwert	15	0,000054	0,000044	0,000050	0,000051
TRIAX	Stbw.	15	0,000009	0,000007	0,000008	0,000008
TRIAX	1	20	0,000039	0,000032	0,000037	0,000036
TRIAX	2	20	0,000049	0,000041	0,000045	0,000047
TRIAX	3	20	0,000052	0,000044	0,000049	0,000049
TRIAX	4	20	0,000033	0,000027	0,000031	0,000032
TRIAX	5	20	0,000037	0,000031	0,000035	0,000036
TRIAX	Mittelwert	20	0,000042	0,000035	0,000039	0,000040
TRIAX	Stbw.	20	0,000008	0,000007	0,000007	0,000008
TRIAX	1	25	0,000035	0,000029	0,000033	0,000034
TRIAX	2	25	0,000034	0,000029	0,000031	0,000033
TRIAX	3	25	0,000057	0,000047	0,000051	0,000053
TRIAX	4	25	0,000048	0,000039	0,000042	0,000044
TRIAX	5	25	0,000044	0,000036	0,000041	0,000041
TRIAX	Mittelwert	25	0,000043	0,000036	0,000040	0,000041
TRIAX	Stbw.	25	0,000010	0,000007	0,000008	0,000008
TRIAX	1	30	0,000060	0,000049	0,000052	0,000056
TRIAX	2	30	0,000048	0,000040	0,000043	0,000046
TRIAX	3	30	0,000027	0,000023	0,000024	0,000026
TRIAX	4	30	0,000033	0,000029	0,000030	0,000032
TRIAX	5	30	0,000053	0,000048	0,000046	0,000050
TRIAX	Mittelwert	30	0,000044	0,000038	0,000039	0,000042
TRIAX	Stbw.	30	0,000014	0,000011	0,000012	0,000012
TRIAX	1	35	0,000073	0,000059	0,000062	0,000063
TRIAX	2	35	0,000042	0,000038	0,000038	0,000041
TRIAX	3	35	0,000072	0,000075	0,000063	0,000071
TRIAX	4	35	0,000046	0,000041	0,000041	0,000045
TRIAX	5	35	0,000039	0,000033	0,000034	0,000036
TRIAX	Mittelwert	35	0,000055	0,000049	0,000048	0,000051
TRIAX	Stbw.	35	0,000017	0,000017	0,000014	0,000015

Tabelle A-10: Durchflusszeiten für verschiedene Faserwinkel

Durchflusszeiten				
Winkel in [°]	Zeit t in [s]			
	Komplette Durchtränkung		Durchfluss von Anguss zu Entlüftungsschlauch	
0	2,38	0,29	2,22	0,22
15	4,50	0,32	2,90	0,35
30	19,36	2,79	4,37	0,35
45	41,27	5,02	11,54	1,16
60	36,38	1,82	22,30	1,64
75	27,93	2,53	26,80	2,08
90	25,39	3,44	24,29	2,55

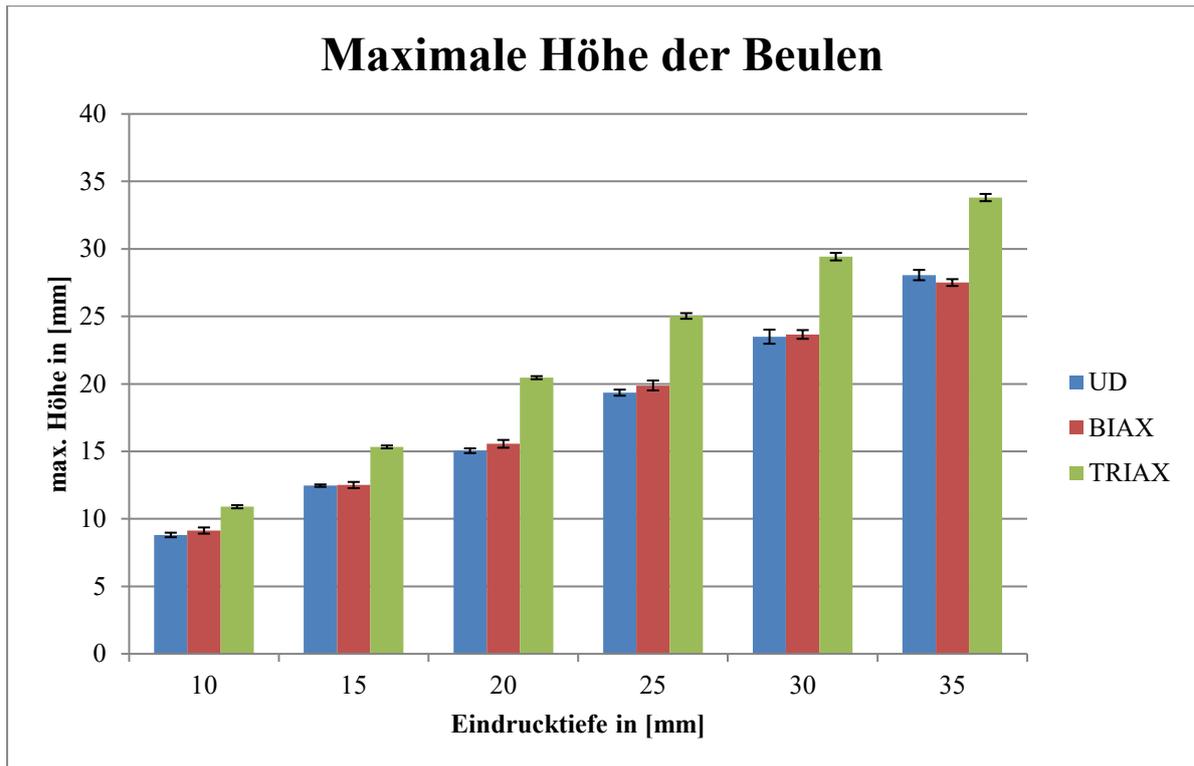


Abbildung A-1: Maximale Höhen der Beulen für die verschiedenen Gelegearten bei unterschiedlichen Handhabungsbelastungen

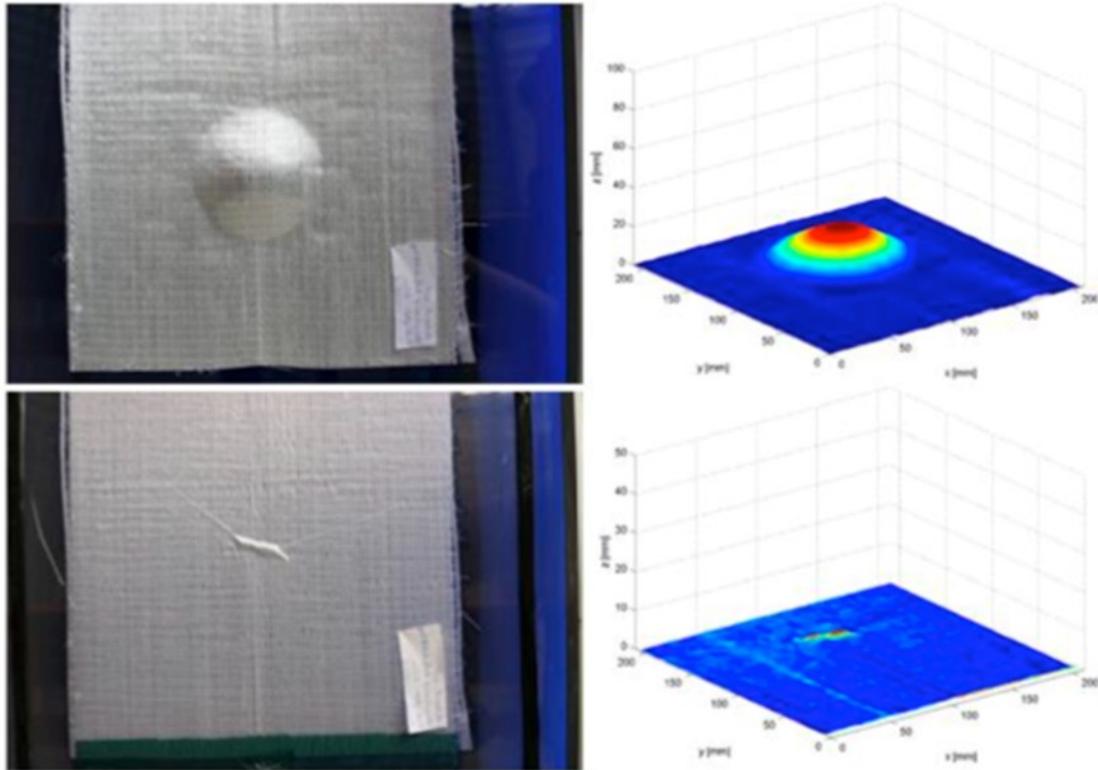


Abbildung A-2: Exemplarische Darstellung einer umgeformten Textilprobe vor und nach der Evakuierung (Material: UD-Textil; Eindringtiefe: 20 mm)

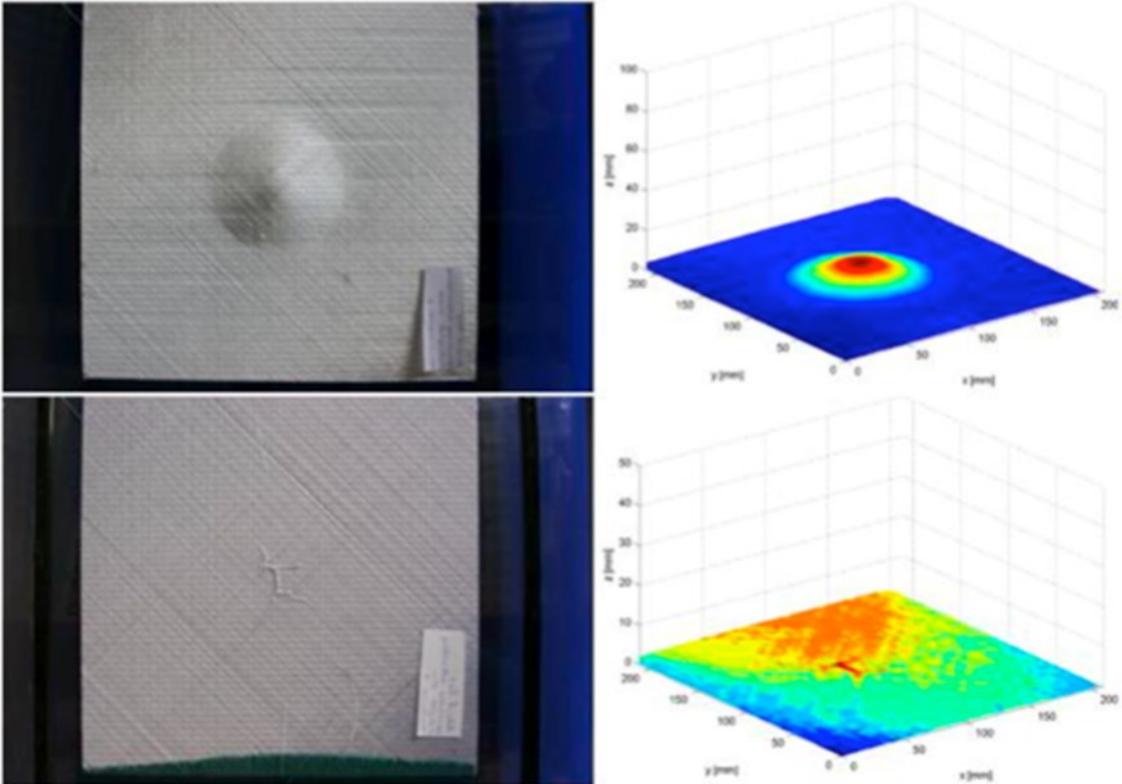


Abbildung A-3: Exemplarische Darstellung einer umgeformten Textilprobe vor und nach der Evakuierung (Material: BIAX-Textil; Eindringtiefe: 10 mm)

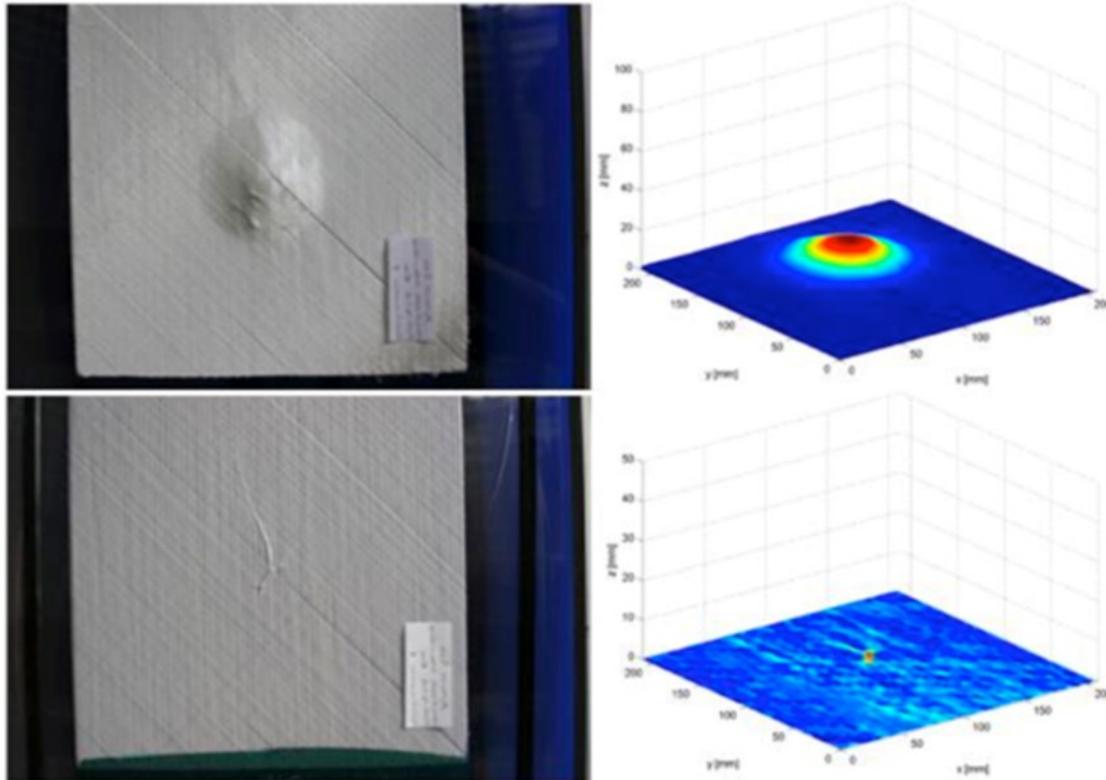


Abbildung A-4: Exemplarische Darstellung einer umgeformten Textilprobe vor und nach der Evakuierung (Material: TRIAX-Textil; Eindringtiefe: 10 mm)

Im Folgenden sind signifikante Faltengeometrien dargestellt. Auf der linken Seite befinden sich jeweils die Bilder, die mit der Spiegelreflexkamera aufgenommen wurden, und auf der rechten Seite finden sich die Auswertungen der Topografie der Falte durch Matlab.

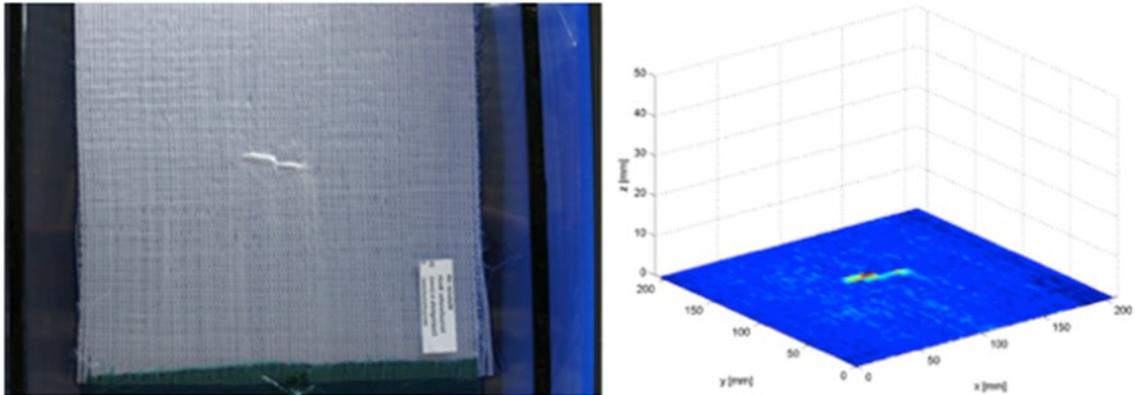


Abbildung A-5: Gerade Falte in x-Richtung

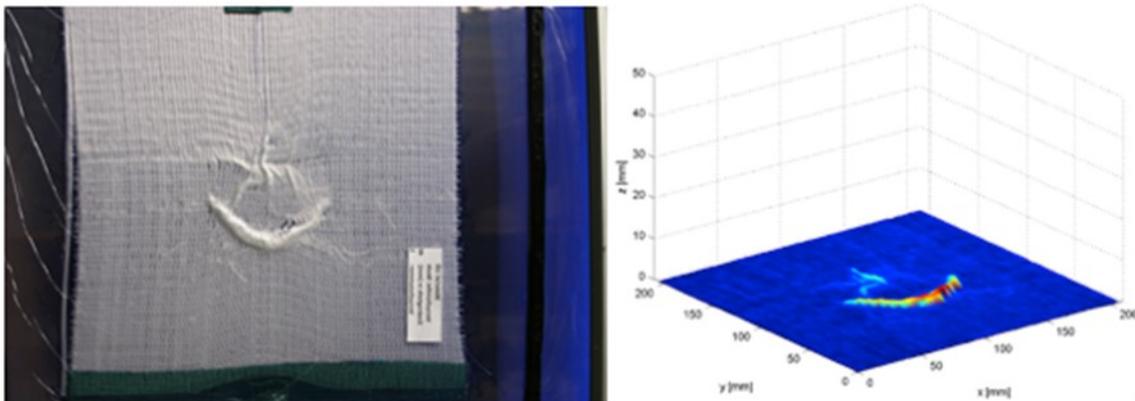


Abbildung A-6: Sichelförmige Falte

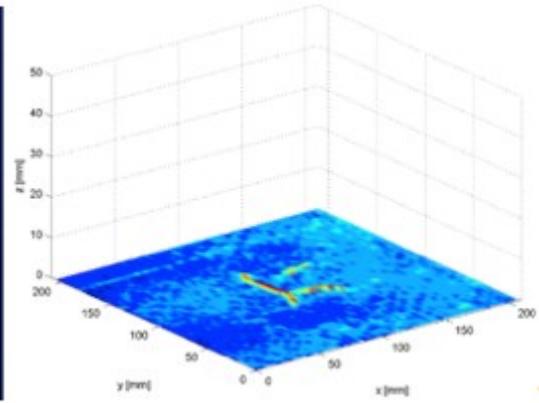
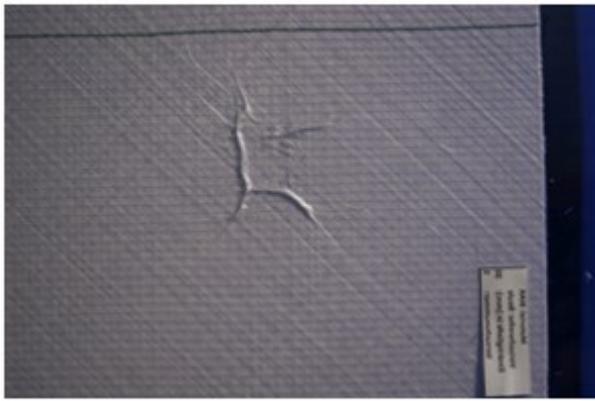


Abbildung A-7: L-förmige Falte

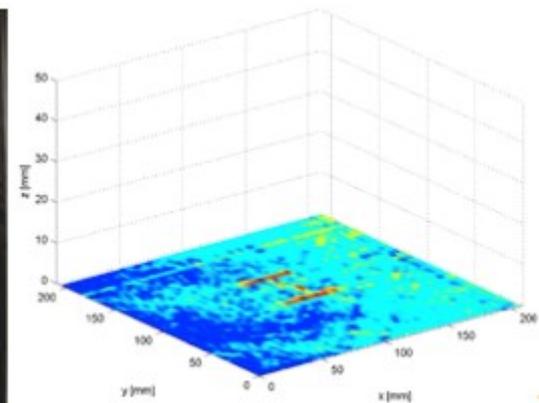


Abbildung A-8: Falte in Form eines T-Trägers

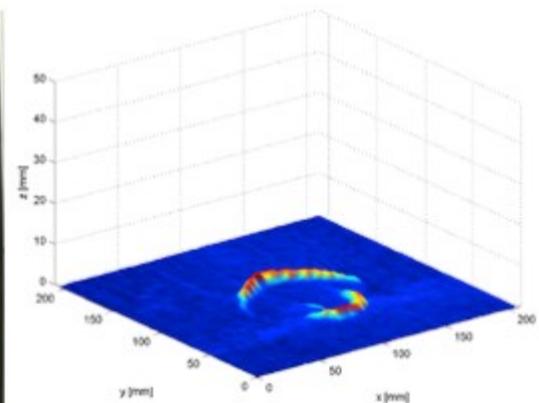


Abbildung A-9: Zwei sichelförmige Falten – fast kreisförmig

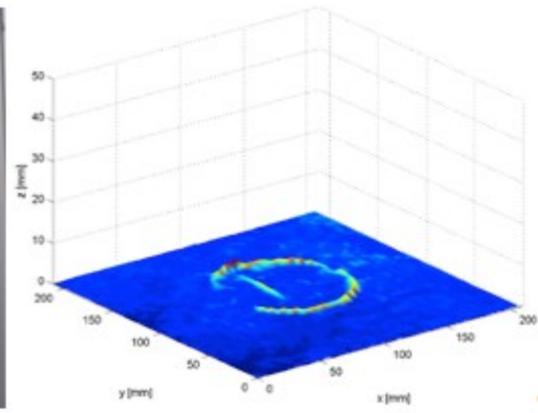


Abbildung A- 10: Annähernd kreisförmig

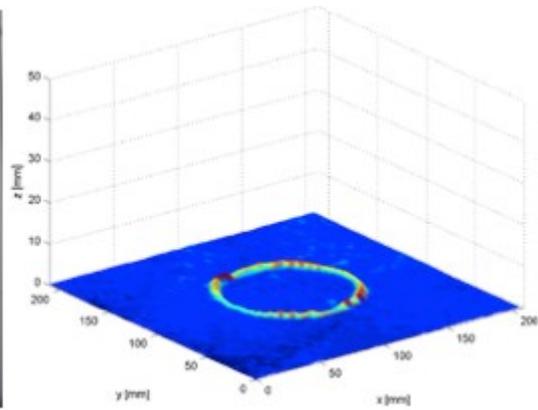


Abbildung A-11: Kreisförmige Falte

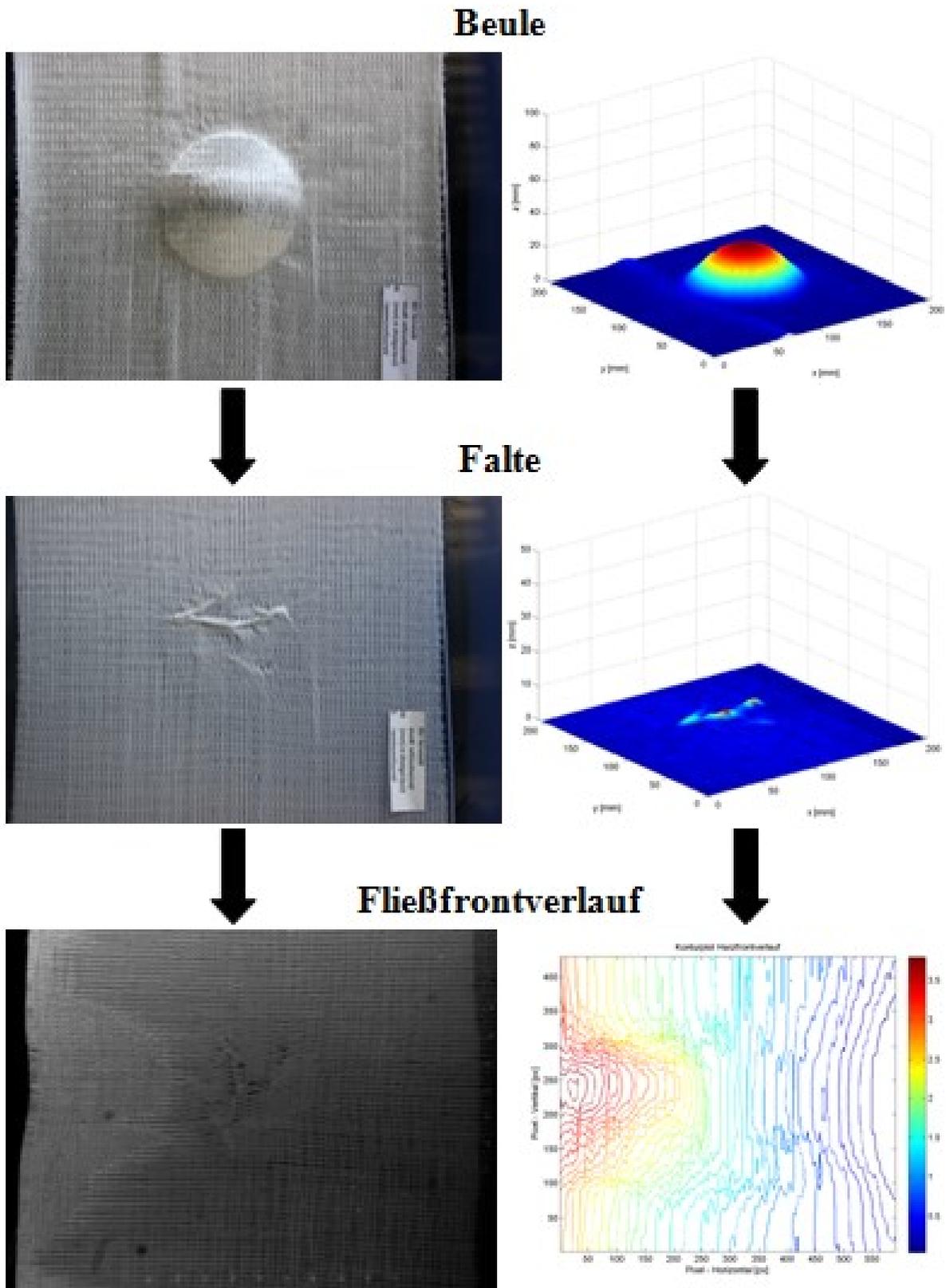
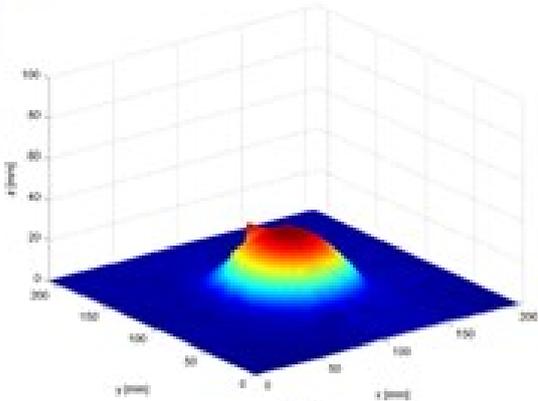
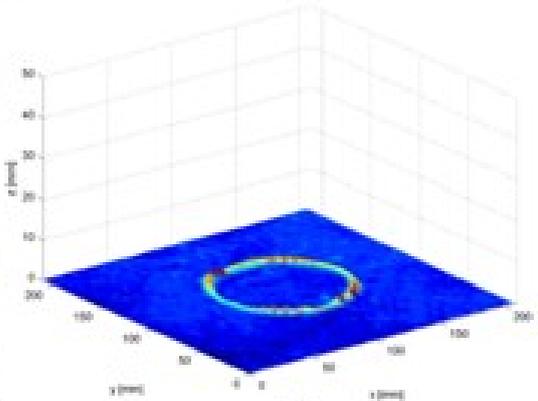


Abbildung A-12: Beule, Falte und Fließfrontverlauf von UD bei einer Eindringtiefe von 30 mm

Beule



Falte



Fließfrontverlauf

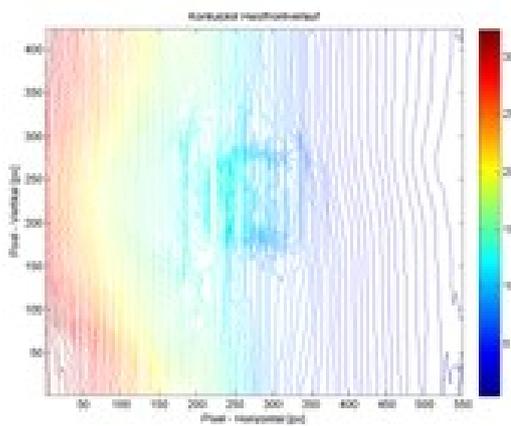
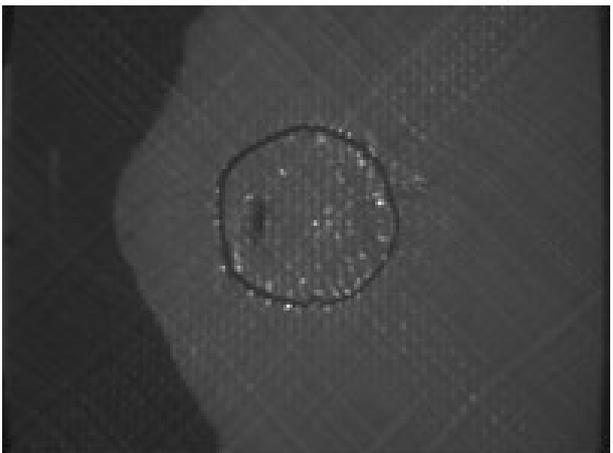


Abbildung A-13: Beule, Falte und Fließfrontverlauf von BIAX bei einer Eindringtiefe von 35 mm

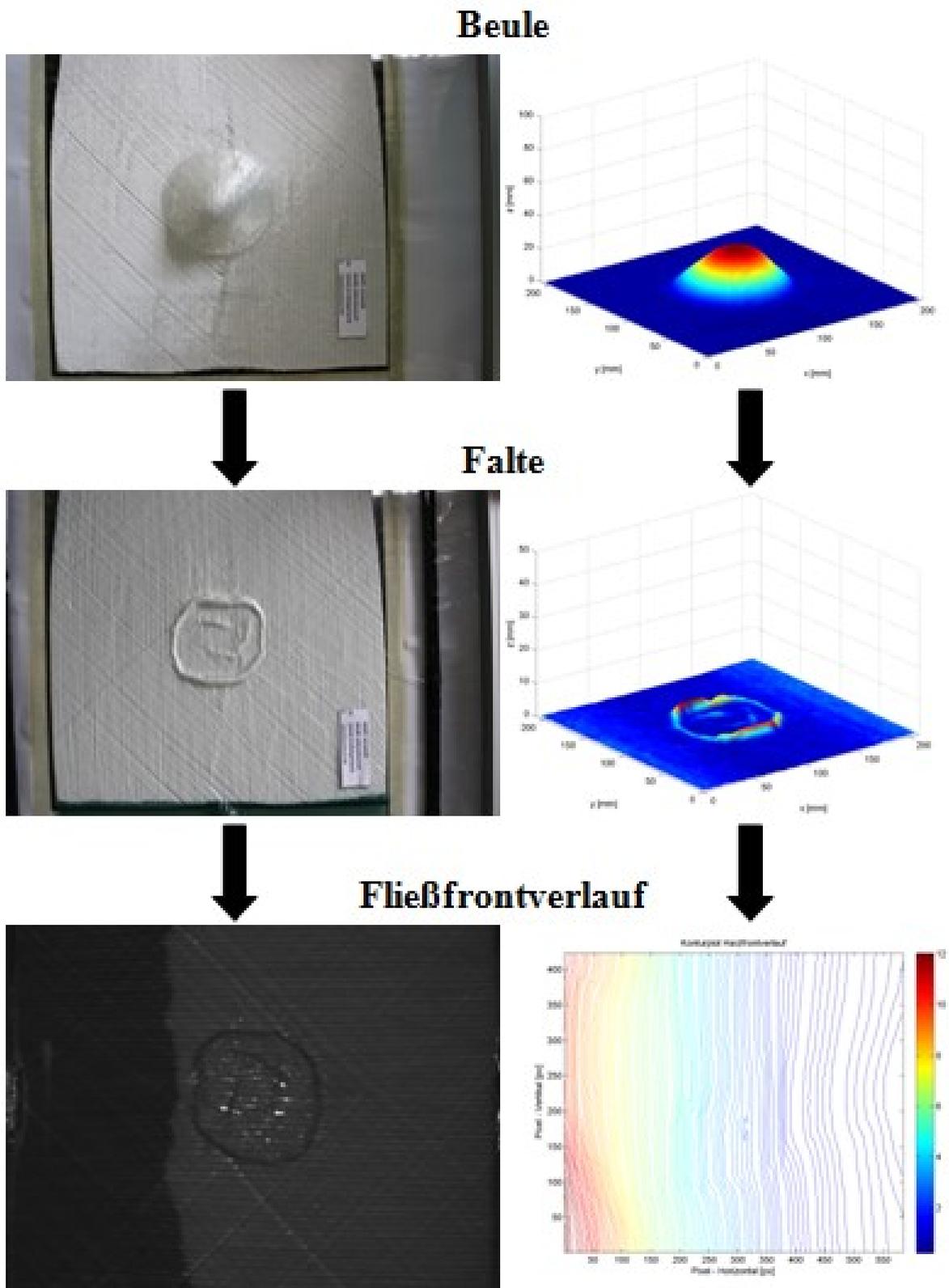


Abbildung A-14: Beule, Falte und Fließfrontverlauf von TRIAX bei einer Eindringtiefe von 25 mm

Studentische Arbeiten

In der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse enthalten, die im Rahmen der Betreuung folgender studentischer Arbeiten entstanden sind:

Bruß, Anne: *Ursachen für Schäden an Textilhalbzeugen im Logistikprozess für Faser-Kunststoff-Verbunde*, Bachelorarbeit, 04/2012

Chamoun, Michel: *Simulation eines automatisierten Fertigungsverfahrens für die Preform-Herstellung von Komponenten für Windenergieanlagen*, Bachelorarbeit, 02/2011

Chamoun, Michel; Kantner, Tobias; Malek, Mohammad: *Entwicklung eines Verfahrens zur Einbringung, Erfassung und Auswertung von Materialfehlern in Preforms*, Masterprojekt, 2013

Christ, Denis: *Optimierung von Ladungsträgern für die innerbetriebliche Logistik textiler Faserhalbzeuge*, Bachelorarbeit, 10/2012

Geilert, Philip: *Mobile Produktionseinrichtungen in der Faserverbund-Komponentenfertigung von Windenergieanlagen*, Bachelorarbeit, 05/2010

Gharbaoui, Jassin; Miesner, Eike; Richrath, Marvin: *Experimentelle Untersuchung von Handhabungseffekten in der Prozesskette zur Herstellung von textilen Preforms*, Masterprojekt, 2014

Härchen, Domenic: *Konstruktion einer Vorrichtung zur Untersuchung des Einflusses der Beulenbildung bei der textilen Handhabung*, Bachelorarbeit, 09/2012

Kammermann, Markus: *Konstruktion einer Vorrichtung zur Untersuchung des Einflusses von Faserschäden bei der textilen Handhabung*, Bachelorarbeit, 10/2012

Klatt, Sven-Hinrich: *Fertigungstechnologien und Marktanalyse für Leichtbaustrukturen in der maritimen Branche*, Studienarbeit, 12/2009

Rehberger, Max: *Anforderungen an den Zuschnitt textiler Bahnwaren in der Fertigung von Faserverbundstrukturen*, Bachelorarbeit, 09/2010

Scholl, Alexander: *Einfluss von Produktionsfehlern auf das Versagen von Rotorblättern*, Masterarbeit, 2013

Schröder Tjark: *Entwicklung eines Messverfahrens für die Untersuchung von Lagerungsfehlern textiler Halbzeugrollen*, Bachelorarbeit, 10/2010

Segelke, Marco: *Konzeptentwicklung einer Applikation für den Einsatz von Textilbindern*, Diplomarbeit, 05/2011

Socke, Christian: *Qualitätsparameter für die innerbetriebliche Logistik von textilen Faserhalbzeugen*, Bachelorarbeit, 10/2012

Stell, Arnold: *Beurteilung der automatisierten Ablage von textilen Halbzeugen in gekrümmte Formwerkzeuge*, Bachelorarbeit, 09/2010

Thesing, Hinrich: *Einfluss des Transportprozesses auf die Qualität von textilen Faserhalbzeugen*, Bachelorarbeit, 10/2012

Tschierschke, Maurice: *Einflussgrößen auf die Faserorientierung trockener Textilien*, Bachelorarbeit, 03/2011

Werther, Benjamin: *Konstruktion einer Vorrichtung zur Untersuchung der Auswirkung von Ondulationen bei der textilen Handhabung*, Bachelorarbeit, 10/2012