

Einfluss textiler Parameter auf das Drapierverhalten von flächigen technischen Textilien

Masterarbeit

verfasst von

Thomas Gregor Weisser

erstellt am

Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen

Department Kunststofftechnik

Montanuniversität Leoben



**VERARBEITUNG VON
VERBUNDWERKSTOFFEN**

Betreuung: Dipl. -Ing. Harald Grössing

Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

Leoben, im März 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

11.03.2014



Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.- Ing. Harald Grössing, da er sehr gute Rahmenbedingungen für die Durchführung dieser Arbeit geschaffen hat und mir bei allen Fragen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Ich danke dem Christian Doppler Labor für hocheffiziente Composite Verarbeitung sowie der Firma FACC für die Finanzierung meiner Arbeit und die Bereitstellung der Versuchsmaterialien.

Weiters danke ich Stephanie Schindlegger für die tatkräftige Hilfe bei allen Anliegen im CAD Bereich sowie Markus Weninger und Georg Hirzberger für die Unterstützung bei der Anfertigung der Zuschnitte und bei den Drapierversuchen.

Ich danke auch allen übrigen Mitarbeitern des Lehrstuhls, die mich sehr freundlich aufgenommen haben und mir die Arbeit zu einer sehr angenehmen Zeit gemacht haben.

Mein großer Dank gilt natürlich auch meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mich auch währenddessen immer unterstützt haben.

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit sind Drapierversuche mit fünf Carbonfasertextilien (Gewebe und gewirkte Gelege (NCF)) an vier unterschiedlich gekrümmten U-Profilen mit Einfach-, Doppel- und Dreifachkrümmung durchgeführt worden.

Zur Beurteilung der Versuche wurde ein Bewertungssystem entworfen, welches einerseits die faltenfreie Textilanpassung an das Profil, andererseits aber auch die Auswirkungen der Drapierung auf die mechanischen Eigenschaften (Fadenorientierung, Faservolumengehalt, etc.) beinhalten sollte.

Nach diesem Bewertungsschema konnten alle vier Profile erfolgreich drapiert werden. Dieser Umstand ist vor allem dem Köpergewebe geschuldet, welches neben guter Verformung auch an drei Profilen eine gute Faserorientierung im Krümmungsbereich erzielte. Als limitierender Aspekt ist eine hohe Neigung zum Ausfransen anzuführen. Mit dem Leinwandgewebe konnte infolge geringer Verformbarkeit nur das Profil 1 positiv drapiert werden.

Aufgrund der Bildung zu großer Falten konnten die NCFs abgesehen von Profil 1 nur ein positives Resultat erreichen. An Profil 3 erhielt das NCF (0/90) eine gute Bewertung durch sehr geringen Faserverlust und eine geringe lokale Abweichung der Faserorientierung zur Faltenvermeidung. Weitere positive Drapierresultate mit NCFs konnten nur durch eine flächen- und krümmungsgerechte Herstellung der Preforms erreicht werden, was jedoch nur durch eine erhöhte Faserdurchtrennung erreicht werden konnte.

Bei den Versuchen wurde festgestellt, dass die Drapierweise und die Art der Textilfixierung am Profil sehr wichtig sind. Nur durch die richtige Vorgehensweise, welche für Gewebe und NCFs unterschiedlich ist, können die Krümmungen der Profile ohne Materialschädigung gemeistert werden und die maximal möglichen Verformungen der Textilien ausgenützt werden.

Abstract

Draping experiments with five carbon fiber textiles (Woven and Non Crimped Fabrics) on four U-profiles with different curvature (Single-, Double- and Triple-Curvature) were carried out.

An evaluation system was developed to analyze the correct adjustment of the textiles to the curvature of the profiles. The influence of draping on the fiber orientation and fiber volume fracture was taken into consideration as well. Due to this evaluation system, a quantitative rating of the draping experiments and the comparison of the results was possible.

Thanks to the twill weave, it was possible to drape all four profiles successfully. A good adjustment to all different curvatures and good fiber orientation on three profiles are the main reasons of the positive results. The loss of rovings had a bad influence on all draping results of this fabric. Apart of profile 1, there were no further positive results by using the plain weave because of very low deformation ability.

Due to the formation of wrinkles, only one positive result was achieved with the NCF's apart of profile 1. The NCF (0/90) could be draped well on profile 3 with little loss of rovings and some local deviation of the desired fiber orientation. The rest of the NCF's could only be draped successfully by using a different preform, which takes the radius and the curved area into account. The necessity of cutting through a large amount of fibers is a major drawback of this modified preform.

To achieve good draping characteristics without harming the textiles, it is of the utmost importance to follow certain draping procedures depending on the different textile types. NCF's have to be draped differently than woven fabrics. It is also important to fix the textiles in a proper way to leave them unharmed during distortion.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	5
1.1	Nachfrage nach Faserverbundwerkstoffen	5
1.2	Preformprozess.....	6
1.3	Zielsetzung dieser Arbeit.....	6
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Preformverfahren	8
2.1.1	Einleitung.....	8
2.1.2	Grundlagen.....	9
2.1.3	Unterschiedliche Preformverfahren	10
2.1.4	Automatisierung der Preformverfahren.....	11
2.2	Drapiervorgang	14
2.2.1	Definition und Einleitung.....	14
2.2.2	Einfluss der Scherung	15
2.2.3	Einfluss von ebenen (Zug-) Spannungen auf das Textilverhalten	18
2.2.4	Einfluss des Biegeverhaltens	19
2.3	Textile Halbzeuge	20
2.3.1	Grundlegende Eigenschaften der Fasern.....	20
2.3.2	Einteilung der flächigen Textilien	22
2.4	Gewebe.....	22
2.4.1	Definition	22
2.4.2	Schematische Darstellung.....	23
2.4.3	Bindungsarten	24
2.4.4	Gewebeparameter.....	27

2.4.5	Gewebeeigenschaften.....	28
2.5	Gelege	29
2.5.1	Definition	29
2.5.2	Benennung der Gelege	30
2.5.3	Bindungsarten der Wirkfäden	31
2.5.4	Einflussparameter von Gelegen	32
2.5.5	Einfluss des Stitching auf den Trellis Effekt von Multiaxialgelegen.....	33
2.5.6	Eigenschaften von Gelegen	34
3	Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen.....	35
4	Experimentelles.....	36
4.1	Verwendete Materialien	36
4.1.1	Verwendete Gewebe	36
4.1.2	Verwendete Multiaxialgelege.....	36
4.2	Versuchsaufbau	37
4.3	Versuchsdurchführung	39
4.3.1	Herstellung der Preform	39
4.3.2	Drapiervorgang.....	41
4.3.3	Bewertung der Drapierung	42
4.3.4	Durchführung des Cantilever Tests	45
4.4	Verwendete Geräte & Programme.....	47
5	Ergebnisse & Diskussion	48
5.1	Beurteilung der Drapierqualität	48
5.1.1	Falten	49
5.1.2	Detektierte Schädigungen der Textilien.....	51
5.1.3	Fadenorientierung	57

5.1.4	Ausfransen	58
5.1.5	Benotungssystem der Drapierqualität.....	58
5.2	Bewertung der Drapierversuche	59
5.2.1	Bewertung der Versuche an Profil 1	59
5.2.2	Bewertung der Versuche an Profil 2	60
5.2.3	Bewertung der Versuche an Profil 3	61
5.2.4	Bewertung der Versuche an Profil 4	62
5.3	Ergebnisse der Drapierungen	63
5.3.1	Analyse der Drapierresultate der Gewebe.....	64
5.3.2	Analyse der Drapierresultate der Gelege (NCF).....	71
5.4	Einfluss der Drapierweise auf die Ergebnisse	75
5.4.1	Drapierweise der NCF	75
5.4.2	Drapierweise des Köpergewebe.....	78
5.5	Analyse der Flächenänderungen bei den Profilen 1, 2 und 3.....	79
5.6	Änderung der Preformgeometrie.....	85
5.7	Bestimmung der textilen Biegesteifigkeit nach Cantilever	89
6	Zusammenfassung.....	93
7	Literatur.....	95
8	Verwendete Symbole und Abkürzungen	99
9	Abbildungsverzeichnis	100
10	Tabellenverzeichnis	103
11	Anhang.....	104
11.1	Aufnahmen zu Profil 2.....	104

11.2	Aufnahmen zu Profil 3.....	105
11.3	Aufnahmen zu Profil 4.....	108

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Nachfrage nach Faserverbundwerkstoffen

Aufgrund zahlreicher ökologischer und ökonomischer Faktoren wie steigender Energie- oder Rohstoffpreise besteht ein weltweites Streben nach Energieeffizienz. In vielen Industriesparten ist in den letzten Jahrzehnten eine hohe Nachfrage nach Faserverbundwerkstoffen aufgekommen, insbesondere nach Carbonfaserverbundkunststoffen. So ist z.B.: die Luftfahrtindustrie durch steigende Rohölpreise sowie strenger werdende ökologische Anforderungen (CO₂-Ausstoss) gezwungen, in immer größerem Maße auf industriellen Leichtbau zu setzen. Der Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau und Roland Berger Strategic Consultants kamen in einer gemeinsamen Studie zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2020 jährliche Produktionssteigerungsraten von bis zu zwanzig Prozent zu erwarten sind [1–3].

Eine essentielle Voraussetzung für die genannten Wachstumsraten ist die Reduzierung der Herstellungskosten. Trotz hoher Material-, Materiallagerungs- und Fertigungskosten werden Faserverbundbauteile nach wie vor zu einem großen Teil in Prepreg - Autoklav Bauweise gefertigt. Aufgrund dieser ökonomischen Bedingungen hat sich der Fokus in letzter Zeit bereits auf die Verwendung von Harzinjektions- und Infusionssystemen mit trockenen Verstärkungsmaterialien (Preforms) verlagert, welche zunehmend an Bedeutung gewinnen [2–5].

1.2 Preformprozess

Unter der Bezeichnung Preform ist eine endkonturnahe Geometrie aus Verstärkungsfasern zu verstehen, welche anschließend mit Harz durchtränkt und zu einem Bauteil ausgehärtet wird. Ist die Automatisierung der Injektionsverfahren schon sehr fortgeschritten, so ist die Herstellung trockener Vorformlinge noch stark von manuellen Tätigkeiten abhängig. Aus diesem Grund stellt die automatische Preform-Herstellung von Faserverbundbauteilen noch eine große Herausforderung dar, da die Kosten dieses Prozessschrittes einen erheblichen Anteil an den gesamten Produktionskosten haben. Die im Moment eingesetzten Preformverfahren sind aufgrund fehlender Automatisierungsmöglichkeiten und unzureichender Reproduzierbarkeit der hergestellten Preforms außerhalb der Luftfahrtindustrie in der Regel nicht wirtschaftlich [1, 4, 5].

Eines der Hauptprobleme der Preformherstellung scheint die unzureichende Fähigkeit trockene Verstärkungsmaterialien beanspruchungsgerecht zu komplexen Bauteilgeometrien zu verformen. Während dieser Umformung werden die Verstärkungstextilien teilweise beschädigt [6] oder die notwendige Fadenorientierung geht verloren, was zur Schwächung der strukturmechanischen Eigenschaften führt. Diese Schwächung muss mit zusätzlichen Fadenlagen ausgeglichen werden, was sich negativ auf die Kosten und den Leichtbaueffekt der Bauteile auswirkt [1, 4–7].

1.3 Zielsetzung dieser Arbeit

Am Anfang der Arbeit soll sich in einer theoretischen Grundlagenrecherche ein umfassendes Wissen über die bestehenden Preformverfahren und deren Grad der Automatisierung verschafft werden. Anschließend wird näher auf die sequentiellen Preformverfahren und die Verwendung von flächigen technischen Textilien

eingegangen, wobei der Fokus vor allem auf gewebte und gewirkte Verstärkungsmaterialien liegt. Von diesen beiden Textilarten sollen all jene Parameter erfasst werden, welchen ein Einfluss auf die Drapierbarkeit zugeschrieben wird.

Im Zuge des experimentellen Teils dieser Arbeit werden fünf technische Textilien an vier unterschiedlich gekrümmten Profilen drapiert. Diese Versuche sollen Aufschluss geben über die Reaktion der beiden Textilarten, wenn es zu komplexen Geometrien umgeformt wird und die Ursachen für etwaige Unterschiede im Materialverhalten erkenntlich machen. In dieser Hinsicht findet eine Analyse der Versuche auf eine gute Anpassung an die Profilform statt. Weiters sollen auch die Auswirkungen der Drapierung auf die Fadenorientierung und den Faservolumengehalt berücksichtigt werden, da diese beiden Aspekte von unerlässlicher Wichtigkeit für Bauteile aus Faserverbundkunststoffen im Sinne des Leichtbaus sind.

Um die Versuche untereinander vergleichen zu können, soll ein Bewertungssystem entwickelt werden, welches quantitative Aussagen über die Resultate zulässt. Auf diese Weise soll ermittelt werden, welche der Textilien für welche Profile geeignet sind und welche Parameter für die unterschiedlichen Resultate verantwortlich sind.

Um den Einfluss der Biegesteifigkeit auf das Drapierverhalten zu prüfen, wurde die Biegesteifigkeit aller verwendeten Textilien mithilfe des Verfahrens nach Cantilever ermittelt und anschließend mit den Drapierresultaten analysiert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Preformverfahren

2.1.1 Einleitung

Die Faserformation eines Faserverbundbauteils bestimmt nicht nur dessen Eigenschaften, vielmehr steht die Art und Form der Bereitstellung dieses Fasergerüsts in enger Wechselwirkung mit einer geeigneten Prozesstechnik zur Bauteilherstellung. Die Faserformation bestimmt somit die Art und Reihenfolge der Prozessschritte. Unter einer Preform versteht man eine noch nicht imprägnierte Faserstruktur, welche anschließend in einem Verarbeitungsverfahren (z.B.: Harzinjektion- oder Harzinfusionsverfahren) mit einer Matrix zu imprägnieren und in ein konsolidiertes Bauteil zu überführen ist. Die Anforderungen an die Verstärkungsstruktur lauten wie folgt [8]:

- Darstellung komplexer Geometrien,
- Hohe Faservolumengehalte,
- Kurze Taktzeiten, geringe Werkzeug- und Stückkosten,
- Hohe Qualität bei gleichzeitiger Reproduzierbarkeit und
- Einsatz der Fasern im Sinne optimierter Strukturmechanik.

Um eine problemlose Konsolidierung des Vorformlings zu gewährleisten und eine Veränderung der textilen Geometrie zu verhindern, richtet sich die Qualität einer Preform auch nach folgenden Kriterien, welche in der Herstellung zusätzlich zu beachten sind [8]:

- Schiebefestigkeit der Verstärkungsstruktur,
- Sicherung der Faserbündel vor Ausfransen im Randbereich,

- Dimensionstoleranz,
- Biegesteifigkeit der Preform und
- Verformungsverhalten der Geometrie nach dem Preformprozess („Springback“)

Um all diese Voraussetzungen erfüllen zu können, muss jeder einzelne Schritt des Herstellungsprozesses aufeinander abgestimmt sein. Die Auswahl einer geeigneten Preformtechnik besitzt hierbei eine Schlüsselrolle, da diese die Einhaltung der genannten Anforderungen gewährleisten muss und somit für die Qualität des Vorformlings und schlussendlich des ganzen Bauteils verantwortlich ist [8].

2.1.2 Grundlagen

Für die folgenden theoretischen Erläuterungen ist es notwendig, einige Begriffe einzuführen [8]:

- 3D-Struktur: „Volumenbildende Anordnung von wenigstens drei oder mehr Fadensystemen oder Fadenvorzugsrichtungen, in die kein rechtwinkeliges Koordinatensystem so gelegt werden kann, dass eine der drei Achsen senkrecht zu allen Fadensystemen oder senkrecht zu allen Vorzugsrichtungen des textilen Körpers steht“.
- 3D-Geometrie: Volumenbildende Ausdehnung des textilen Körpers ohne die vorherige Einwirkung umformender Maßnahmen, so dass ein Volumen durch die Textilstruktur (selbst) gebildet oder von ihr umschlossen wird, unabhängig von der Anzahl der Fadensysteme und der durch sie gebildeten Struktur.
- Preform: Preform oder Vorform ist ein der Bauteilgeometrie entsprechendes Verstärkungsgebilde vor der Imprägnierung/Konsolidierung. Eine Preform kann sowohl eine 3D-Struktur als auch eine 3D-Geometrie sein. Eine Preform besteht mindestens aus einem, meist aus mehreren Einzelteilen

(Sub-Preforms). Im Idealfall besteht eine Preform aus einem Teil, welches ausschließlich durch Einzelfasern gebildet wird.

- Sub-Preform: Als Sub-Preform werden individuelle Halbzeuge, also zugeschnittene textile Flächengebilde bezeichnet. Sub-Preforms stellen somit die einfachste Entwicklungsform einer Preform dar.

2.1.3 Unterschiedliche Preformverfahren

Um eine geeignete Preformtechnologie für ein spezifisches Bauteil auswählen zu können, müssen zunächst die anwendungsspezifischen Eigenschaften des herzustellenden Vorformlings quantifiziert werden. Dies sind folgende Aspekte [1, 8]:

- Faserorientierung und Art der Fasern,
- Faseranteile in den Raumrichtungen,
- Komplexitätsgrad und
- Geometrieigenschaften des zu realisierenden Bauteils.

Die Herstellung von trockenen Vorformlingen ist allgemein in zwei unterschiedliche Verfahrensarten gegliedert [1, 8]:

- Direkte Preformverfahren und
- Sequentielle Preformverfahren.

Die direkte Preformherstellung beinhaltet Methoden, welche die Herstellung von dreidimensionalen Vorformlingen direkt aus den Fasern und etwaigen Hilfsstoffen ermöglichen. Aus den Rovings wird in einem Verfahrensschritt eine bauteilnahe Geometrie erzeugt. In diesem einstufigen Verfahren besteht die Preform aus einem einzigen Stück (Integralbauweise). Als Beispiele für diese Preformverfahren sind das 3D-Weben, das 3D-Flechten und das „Tailored Fibre Placement“ zu nennen [1, 8].

In der sequentiellen Preformherstellung wird die Herstellung des Vorformlings in mehrere Schritte und teilweise auch in mehrere Subpreforms (Differentialbauweise) unterteilt. Aus einer ein-, zwei, oder auch dreidimensionalen Verstärkungsstruktur erfolgt der Zuschnitt der gewünschten Geometrie, der Lagenaufbau und die Drapierung getrennt voneinander. Bei dieser Art von Preformherstellung findet eine Unterscheidung zwischen der Binder Umformtechnik und der klassischen Konfektionstechnik statt [1, 8].

In der Binder Umformtechnik kommt ein Bindemittel zur Anwendung, welche die drapierten Fadenlagen in der finalen Strukturgeometrie relativ zueinander fixiert. Dieser Binder kann in fester oder flüssiger Form eingebracht werden, wobei ein wesentlicher Auswahlfaktor des Binders die Kompatibilität zur Polymermatrix darstellt [1, 8].

Die Preformherstellung mittels Konfektionstechnik bedient sich zur Fixierung des Lagenpaketes und der Strukturgeometrie der Nähtechnik. Unter Verwendung dieser Hilfsnähte lassen sich maßgeschneiderte Preforms mit sehr guten mechanischen Eigenschaften, guter Endkonturgenauigkeit und Reproduzierbarkeit herstellen. Durch die Fixierung der Verstärkungslagen mit Hilfe von Nähfäden kann es jedoch zu einer Schädigung der Rovings kommen, was sich negativ auf die mechanischen „in-plane“ Eigenschaften der Faserverbundbauteile auswirken kann [1, 8].

2.1.4 Automatisierung der Preformverfahren

Die Automatisierung der Preformverfahren ist ein essentieller Punkt für eine wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundwerkstoffen, da die Preformherstellung mit den derzeit eingesetzten Verfahren über die Hälfte der gesamten Produktionskosten verursacht [1, 2, 5].

Einige neu entwickelte direkte Preformverfahren (3D-Weben, Flechten, Wickeln, Tailored Fiber Placement, etc.) weisen schon einen hohen Grad an Automatisierung auf, doch sind diese Herstellungsmethoden oftmals Restriktionen im Bereich der Fadenorientierung, der Bauteilgröße, der Bauteilgeometrie oder der Fertigungszeiten unterworfen [4].

Im Bereich der sequentiellen Preformfertigung ist der Automatisierungsgrad noch sehr gering. Um einen erhöhten Einsatz von Automationstechnologien überhaupt erst zu ermöglichen, ist es notwendig, reproduzierbare (Sub-)Preforms zu fertigen, welche in ihrer Struktur fixiert sind und sich in ihrer Faserorientierung auch nicht mehr verschieben lassen. Dieser Bedarf brachte einige vielversprechende Ansätze wie die sogenannten „Tailored Reinforcements“ hervor. Vor dem Zuschnitt der flächigen Textilien werden die Schnittkonturen durch eine Naht gesichert. Dies verbessert die Schnittqualität und verhindert ein Ausfransen an den Rändern der Textilien. Der Einfluss der Nähte auf die mechanischen und permeablen Eigenschaften der Verstärkungsfasern war und ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Arbeiten. Auch einige Arbeiten über den Einfluss dieser Nähte auf die Verformbarkeit der Textilien sind verfügbar, wobei die Überzeugung erkennbar ist, dass die meisten bekannten Nahtarten die Verformung hemmen und die Drapierbarkeit der flächigen Textilien reduzieren [5, 8–11].

Der Drapiervorgang selbst ist auch Gegenstand zahlreicher Forschungen. Dabei liegt der Fokus aber noch nicht auf der Automatisierung des Prozesses, sondern auf einer wirklichkeitsnahen Modellierung und Simulation der textilen Verformungsmechanismen. Aufgrund des biegeweichen, anisotropen Materialverhaltens von textilen Halbzeugen ist die Entwicklung materialgerechter Simulationsmodelle sehr anspruchsvoll. Erschwerend kommt noch hinzu dass Gewebe und Gelege, welche vor allem als textile Halbzeuge eingesetzt werden, sich in der Drapierbarkeit sehr stark unterscheiden [1, 5, 8].

Insofern verwundert es nicht, dass weltweit zahlreiche Forschungsprojekte und Studien laufen, welche eine hochautomatisierte, effiziente Serienfertigung von komplexen Bauteilen zum Ziel haben [2–5, 12–14].

Ein von Grieser et al. [15] bereits realisiertes Projekt der sequentiellen Preformherstellung mit hohem Automatisierungsgrad ist das sogenannte Kontinuierliche Profil Preforming System (Continuous Profile Preforming System). Mithilfe der Nähetechnik wird in diesem Herstellungsverfahren ein I-Träger aus Carbonfasergelege hergestellt. Diese Anlage ist in vier Bereiche gegliedert, welche die folgenden Aufgaben automatisiert durchführt:

- Materialeinzug,
- Formgebung durch Falten des Textils,
- Vernähen und
- Zuschnitt der gewünschten Preformlänge

Der Materialeinzug leitet die textilen Grundwerkstoffe (Gewebe oder Gelege möglich) zur formgebenden Station, an der die Textilien durch geeignete Faltapparate in die gewünschte Form gebracht werden und mithilfe der Nähetechnik in dieser Form fixiert werden. Die Formgebung mit einem flächigen Textil stellt in diesem Fall kein Problem dar, da das Profil nur eine einfache Krümmung verlangt und aus diesem Grund keine komplexe Textildrapierung erforderlich ist. Des Weiteren ist auch eine Schneideeinheit in der Produktionslinie integriert, welche die Länge des Profils regelt [15].

2.2 Drapiervorgang

2.2.1 Definition und Einleitung

Unter Drapieren ist die Anpassung eines flächigen, zweidimensionalen Textils in eine dreidimensionale Form unter Einwirkung der Schwerkraft oder anderer äußerer Kräfte zu verstehen. Je nach Komplexität der räumlichen Geometrie kann diese Formänderung zu Einbußen der mechanischen Eigenschaften wie auch zu Schwierigkeiten in der Verarbeitung führen [16–18]:

- Durch das Auftreten von Falten, Knicken und irreversiblen Schädigungen des Textils
- Durch die Möglichkeit zu einer lokalen Änderung der Faserorientierung, des Faservolumengehalts und zu einem Dickenunterschied des Textils.

Das mechanische Verhalten von Textilien unterscheidet sich deutlich von monolithischen Werkstoffen. Der inhomogene Aufbau der aus unterschiedlichen Faser- und Garnarten (Erklärung dieser Begriffe folgt in Abschnitt 2.3.1) hergestellten Verstärkungsstrukturen verleiht diesen einen anisotropen, lokal variierenden Verhaltenscharakter. Aber auch bei Verwendung von annähernd gleichen Fasern bewirken die unterschiedlichen Flächenbildungstechnologien (Weben, Wirken, Stricken, etc.) ein unterschiedliches Werkstoffverhalten [1].

Die Verformung textiler Verstärkungsstrukturen ist durch komplexe mechanische Vorgänge bedingt, welche die Vorhersage des Umformungsverhaltens erschweren. Die folgend angeführten Faktoren wird der höchste Einfluss auf das Textilverhalten beigemessen, wobei eine einzelne Betrachtung der Kriterien unzulässig ist, da diese sich untereinander beeinflussen [19–24] :

- Scherung in der Textilebene (Trellis Effekt),
- Spannungen in der Textilebene (in plane tension),
- Biegeverformung (out of plane bending) und
- Faserverrutschen (Fiber slippage)

2.2.2 Einfluss der Scherung

In vielen wissenschaftlichen Arbeiten wird die Scherung als der wichtigste mechanische Einflussfaktor auf das Drapierverhalten bezeichnet und ist auch die meist erforschte Textileigenschaft. In Abbildung 1 ist das Verformungsverhalten durch Scherung schematisch dargestellt. [18, 19, 21, 23].

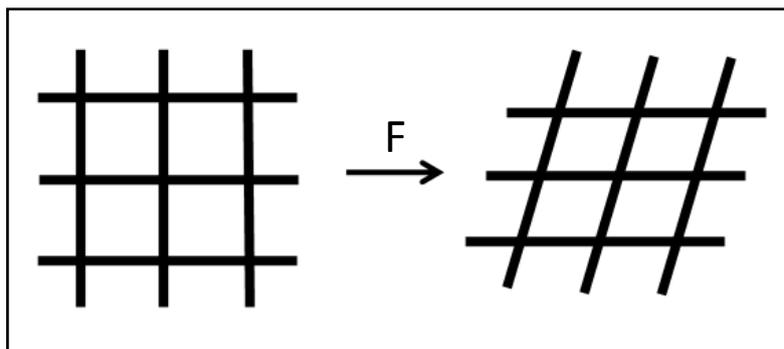


Abbildung 1: Textilverformung durch reine Scherung

Scherung setzt ein, sobald die Richtung der Kraft, welche am Textil anliegt, nicht mit der Richtung der Fasern übereinstimmt. Dies passiert oftmals, wenn ein 2D-Textil über eine doppelt gekrümmte 3D-Form drapiert wird. Die Kett- und Schussfäden, welche am Anfang in einem gewissen Winkel zueinander liegen, beginnen sich zu verschieben (Abbildung 1). Diese Bewegungen gehen soweit bis die Fasern und die Krafrichtung übereinstimmen oder die Fäden im Textil alle soweit komprimiert und zueinander verschoben sind, dass sie sich gegenseitig „hemmen“. An diesem Punkt beginnt die Scherkraft sehr stark zu steigen und die

Verschiebung der Fasern zueinander hat einen maximalen Winkel erreicht, welcher als Grenzwinkel oder „locking angle“ bezeichnet wird. Da keine weitere Bewegung in der Ebene möglich ist, beginnt das Textil Falten zu bilden. Dieser Schervorgang wird oftmals auch als „Trellis Effekt“ bezeichnet [1, 21].

Der Grenzwinkel wird als der wichtigste Parameter der Textilverformung und der Faltenbildung angesehen. Nichtsdestotrotz müssen auch die „out of plane“ Biegeeigenschaften des Textils und die in den Fäden vorherrschende (Zug-) Spannung beachtet werden, da auch diese Aspekte Einfluss auf die Faltenbildung besitzen [1, 19, 21].

Zur experimentellen Bestimmung des Grenzwinkels finden hauptsächlich zwei Prüfmethoden Anwendung [19, 21, 23]:

- Schrägzugversuch (Bias extension test)
- Scherrahmenversuch (Picture frame test)

Die Proben des Schrägzugversuchs bestehen aus $\pm 45^\circ$ Lagen, welche unter Zug belastet werden. Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsdurchführung. Infolge der Zugbelastung entstehen im Textil drei Zonen, welche unterschiedliche Verformungen aufweisen [19]:

- Zone C: In diesem Bereich sind alle Fäden (Kett- und Schussrichtung) an ihren Enden lose und nur durch ihre Einarbeitung im Textil (Ondulationen, Stitching, etc.) befestigt. Aufgrund dessen wird der Zustand dieser Fasern als spannungsfrei angenommen und es herrscht in dieser Zone reine Scherung vor.
- Zone B: In Zone B besitzt eine Fadenart ein festes, eingeklemmtes Ende und eine Fadenart freie, lose Fadenende. In diesem Bereich werden genau halbierte Werte der Scherdehnung wie in Zone C gemessen.
- Zone A: Dieser Bereich des Textils bleibt aufgrund der Einklemmung von Kett- und Schussfäden unverformt.

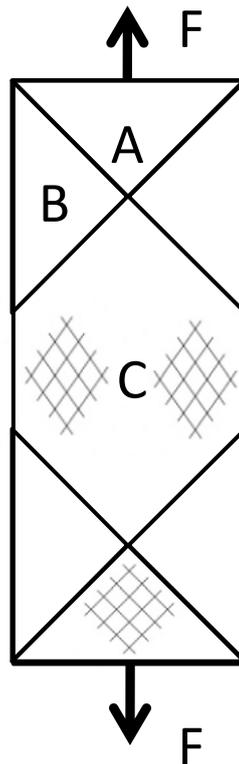


Abbildung 2: Schema des Schrägzugversuchs (Biaxial extension test)

Für die Ermittlung der Scherparameter findet nur die Scherverformung in Bereich C Beachtung. Während der Versuchsdurchführung werden der auftretende Verformungswinkel und die aufgebrachte Scherkraft gemessen. Eine Möglichkeit zur Ermittlung des Grenzwinkels ist optischer Natur. Mithilfe von Lichtschranken werden Falten ab einer Höhe von 3 mm senkrecht zur Fläche detektiert und der zu diesem Moment resultierende Scherwinkel als „Locking angle“ notiert [1].

Der Scherrahmenversuch, welcher in Abbildung 3 dargestellt ist, ist eine weitere, oftmals verwendete Versuchsart zur Bestimmung des Grenzwinkels. In einem quadratischen Rahmen ist eine Textilprobe eingespannt. Eine Kraft, welche diagonal über das Flächengebilde angelegt wird, verzieht den anfangs quadratischen Versuchsaufbau zu einem Parallelogramm. Dieser Versuchsaufbau soll eine reine Scherung im Textil hervorrufen [19].

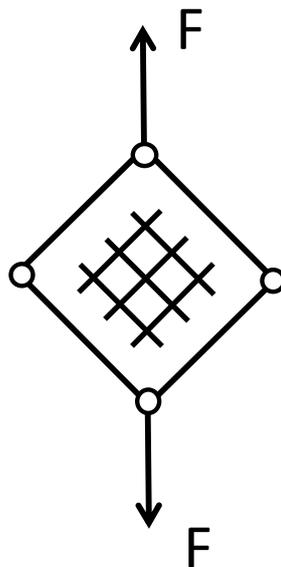


Abbildung 3: Schema des Scherrahmenversuches (Picture frame test)

2.2.3 Einfluss von ebenen (Zug-) Spannungen auf das Textilverhalten

Launay et al. [19] sowie Willems et al. [23] konnten bei unterschiedlichen Experimenten feststellen, dass die Resultate des Schrägzugversuchs und des Scherrahmenversuches sich wesentlich voneinander unterschieden. Die gemessenen Scherkräfte bei den Scherrahmenversuchen waren deutlich höher als jene, welche beim Schrägzugversuch gemessen wurden [19, 23].

Die Ursachen dieses Unterschiedes liegen in der unterschiedlichen Probengröße und in den Spannungen, welche durch den Scherrahmen ins Gewebe eingebracht werden. Picture Frame Tests mit gemessenen eingeleiteten Zugspannungen, ergaben Unterschiede im Scherverhalten der Textilien. Dabei war festzustellen, dass bei Erhöhung der Spannungen im Textil die Faltenbildung erst bei höheren Scherwinkeln einsetzte. Wurden die Spannungen im Scherrahmen durch eine optimierte Textilaufhängung jedoch gegen Null reduziert, so glichen sich die Resultate an jene des Schrägzugversuches an [19, 21–23].

2.2.4 Einfluss des Biegeverhaltens

Der Biegesteifigkeit wird in einigen wissenschaftlichen Arbeiten bedeutender Einfluss auf die Drapierbarkeit eingeräumt. Das Biegeverhalten von Textilien ist ein komplexer makroskopischer mechanischer Vorgang, welchem hoher Einfluss auf die „Out-of-plane“ Eigenschaften von Textilien und der Bildung von Falten beigemessen wird. Dabei ist die Biegesteifigkeit vom Fasermaterial und der verwendeten Garnkonstruktion abhängig. Auch die textile Flächenkonstruktion beeinflusst diesen Kennwert maßgeblich [1, 20].

Zur Bestimmung der Biegesteifigkeit kommt neben einigen anderen Methoden vor allem der „Cantilever Test“ zum Einsatz, dessen Parameter und Ablauf in den Normen DIN 53362 (ASTM D1388) festgelegt sind. Die Probe, welche auf eine Breite von 30 mm genormt ist, wird über einen Winkel von 41,5° unter Einfluss der Schwerkraft gebogen und die Länge der Probe bis zum Anschlag gemessen. Über die Gleichungen der linear elastischen Mechanik kann so die Biegesteifigkeit berechnet werden. Der Winkel von 41,5° ist zweckmäßig gewählt, da so die Gleichung zur Berechnung der Biegesteifigkeit eine sehr leichte Form annimmt [1, 20, 25, 26].

Der Versuchsaufbau dieser Testmethode ist in Kapitel 4.3.4 bildlich dargestellt. Die Berechnung der Biegesteifigkeit des Textils aus der gemessenen Überhanglänge erfolgt wie in (1) dargestellt [26].

$$B = F_L * \left(\frac{l_{\ddot{u}}}{2}\right)^3 \quad (1)$$

B Biegesteifigkeit [mN*cm]

$l_{\ddot{u}}$ Überhanglänge der Probe [cm]

F_L Längenbezogene Gewichtskraft in Abhängigkeit des
Flächengewichts [mN / cm]

Die längenbezogene Gewichtskraft berechnet sich wie in (2) angegeben [26].

$$F_L = g * \frac{m}{l} \tag{2}$$

g Erdbeschleunigung [m/s²]
 m Masse der Probe [g]
 l Länge der Probe [cm]

Die manuelle Bedienung der Prüfgeräte und die persönliche visuelle Bestimmung der Überhanglänge setzen die Messungen subjektiven Einflüssen aus, weswegen auf diese Weise keine repräsentativen Resultate zustande kommen. Die gemessene Überhanglänge fließt kubisch in die Berechnung der Biegesteifigkeit ein, weswegen eine sehr exakte Messung von Nöten ist. Ein weiterer Kritikpunkt ist die Vernachlässigung des Deformationsvorganges, weshalb ein mögliches nicht linear-elastisches Biegeverhalten nicht beachtet wird. Aus diesem Grund gibt es zahlreiche Anstrengungen, exaktere Testmethoden zur Bestimmung der Biegesteifigkeit zu finden [1, 20].

2.3 Textile Halbzeuge

2.3.1 Grundlegende Eigenschaften der Fasern

Textile Halbzeuge sind aus Fasern bzw. Fasergarnen aufgebaut. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Eigenschaften der Fasern beeinflussen die Verformbarkeit wie auch die mechanischen Eigenschaften der Textilien.

- Fasermaterial

Die Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffes sind von den Zug-, Druck- und Schubeigenschaften des Fasermaterials abhängig.

- Filamentgeometrie

Der Filamentdurchmesser ist vom Fasermaterial und Herstellungsprozess abhängig. Er variiert zwischen 5 und 12 μm .

- Filamentpackungsdichte

Die Verteilung der Filamente in einem Faserbündel beeinflusst die Imprägnierungseigenschaften der Fasern. Sie ist vom Garntyp abhängig.

- Garntyp

Garne bestehen aus einer gewissen Anzahl an kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Fasern, die in der Regel mittels Drehung formschlüssig oder mittels Hilfsstoffen stoffschlüssig zusammengefügt werden.

Für Faserverbunde kommen vor allem ungedrehte Garne aus parallel zusammengefassten endlosen Einzelfilamenten zur Anwendung, da diese die besten Eigenschaftswerte und höchsten Faseranteile mit sich bringen. Solche Garne werden „Rovings“ (bis 24 000 Einzelfilamente) oder „heavy tows“ (24 000 bis 500 000 Einzelfilamente) genannt.

- Garngrösse bzw. Garnfeinheit

Garne werden durch ihre Masse oder durch die Anzahl der Filamente charakterisiert. Ein Titer entspricht in diesem Zusammenhang der Masse eines Fadens in Gramm bei einer Länge von 1000 m. Die Einheit ist tex.

Die Charakterisierung von Glasfasern erfolgt historisch bedingt in tex. Kohlenstofffasern werden hingegen durch die Anzahl der Filamente im Roving, der sogenannten K-Zahl (K für Kilo = 1000 Filamente) bestimmt [1, 8, 27, 28].

2.3.2 Einteilung der flächigen Textilien

Zu den textilen Flächengebilden gehört eine große Anzahl an Konstruktionen, welche technologieabhängig verschiedene Komplexitäten aufweisen. Folgend eine Auswahl der wichtigsten flächigen Textilarten, welche für Anwendungen im Faserverbundbereich vorkommen [1]:

- Gewebe,
- Maschenwaren (Gestricke und Gewirke),
- Geflechte,
- Vliesstoffe,
- Nähwirkstoffe (Gewirkte Gelege) und
- Dreidimensionale Textilkonstruktionen.

Da in dieser Arbeit nur Gewebe und gewirkte Gelege zur Anwendung kommen, erfahren die restlichen Flächengebilde keine weiteren Erläuterungen.

2.4 Gewebe

Ein sehr wichtiges Textil zur Verstärkung von Kunststoffen ist das Gewebe. Es zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität im Materialeinsatz, Strukturvielfalt und Artikelwechsel aus. Deswegen finden Gewebe in großem Umfang Anwendung für technische Textilien und Halbzeuge für Faserverbundwerkstoffe [1].

2.4.1 Definition

Der Aufbau von konventionellen 2D-Geweben erfolgt aus mindestens zwei Fadensystemen, welche sich rechtwinkelig kreuzen. Die Fäden in Produktionsrichtung werden als Kettfäden und die querverlaufenden Rovings als

Schussfäden bezeichnet. Die Verkreuzung der Kettgarne mit den Schussfäden schafft die Verbindung der beiden Fadensysteme und erzeugt auf diese Weise das flächige Textil. Durch unterschiedliches Anheben der Kettfäden beim Schusseintrag ergeben sich verschiedene Arten der Fadenkreuzung, die als Bindung bezeichnet wird. Die Anordnung dieser Webpunkte hat Einfluss auf das Drapierverhalten, die Permeabilitätscharakteristik des Gewebes sowie die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils [1, 8, 27].

2.4.2 Schematische Darstellung

Die Darstellung eines Gewebes wird meist vereinfacht durch Farbfelder in einem Karo-Raster dargestellt (Abbildung 4). Die einzelnen Felder repräsentieren die Kreuzungspunkte der Kett- und Schussfäden. Ein ausgefülltes Feld bedeutet, dass an diesem Bindungspunkt der Kettfaden, welcher in vertikale Richtung verläuft, über dem Schussfaden (horizontal verlaufend) liegt, was als Kettfadenhochgang bezeichnet wird. Die Darstellung beginnt in der linken unteren Ecke, was der Kreuzung des ersten Kett- und Schussfadens entspricht. Die schematische Darstellung einer Bindung wird als Patrone bezeichnet. Aufgrund der bei Geweben auftretenden systematischen Wiederholungen ist die Abbildung des Bindungsrapports ausreichend [1].

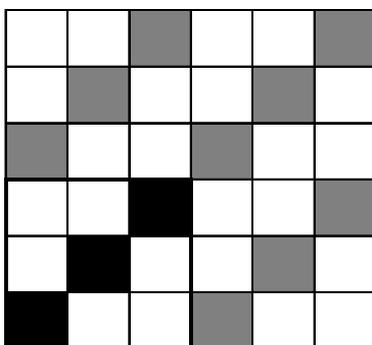


Abbildung 4: Bindungspatrone eines Gewebes mit 4 Rapporten

2.4.3 Bindungsarten

Da es eine beinahe unbegrenzte Zahl an Möglichkeiten gibt, die Kettfäden mit den Schussfäden in Verbindung zu bringen, gibt es bei den Geweben eine grundlegende Einteilung in vier Arten von Bindungen [1]:

- Grundbindungen
- Erweiterte Bindungen
- Abgeleitete Bindungen
- Jacquardbindungen

Es existieren drei Grundbindungen, welche als Leinwand-, Köper- und Atlasbindung bezeichnet werden. Bei allen Grundbindungen gilt, dass der Rapport in Kett- und Schussrichtung gleich groß ist. Für die Mehrheit der Anwendungen in Faserverbundwerkstoffen reichen diese Grundbindungen aus. Bei speziellen Einsatzgebieten kann es jedoch auch zu komplexeren Bindungen kommen [1].

Die Leinwandbindung, welche in Abbildung 5 dargestellt wird, ist die einfachste Form des Gewebes. Ein Schussfaden läuft abwechselnd über bzw. unter einem Kettfaden hindurch. Aus diesem Grund ist das Leinwandgewebe jenes Gewebe mit der höchsten Anzahl an Ondulationen oder Kreuzungspunkten pro Flächeneinheit [1, 8].

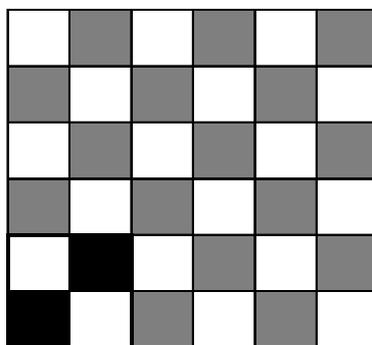


Abbildung 5: Leinwandbindung (9 Rapporte)

Die Köperbindung ist durch diagonale Streifen im Gewebemuster erkennbar. Der Rapport eines Köpergewebes besteht aus mindestens drei Kett- und drei Schussfäden. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, läuft ein Schussfaden über zwei Kettfäden bevor er unter einem hindurchläuft. Diese Form des Köpergewebes wird Schussköper mit Z- Grad genannt. Durch Spiegelung und Negieren (Umdrehen des Gewebes) lassen sich noch drei weitere Köpergewebe bilden [1]:

- Schussköper mit S-Grat,
- Kettköper mit Z-Grat und
- Kettköper mit S-Grat.

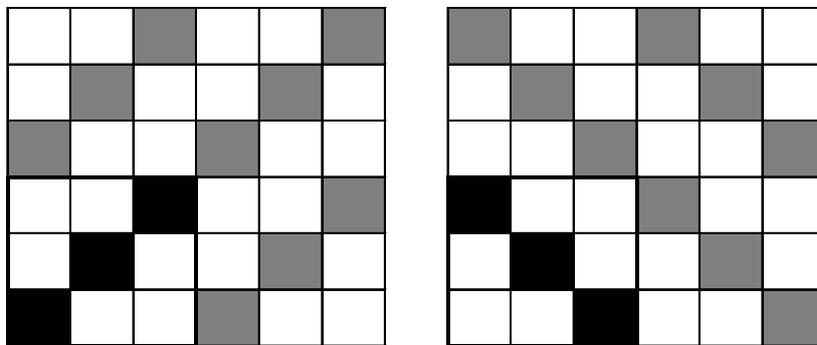


Abbildung 6: Schussköperbindung mit Z-Grat (linkes Karo) und mit S-Grat (rechtes Karo)

Die Atlasbindung wird in dieser Arbeit nicht erläutert, da kein Gewebe dieser Bindungsart zur Anwendung kommt.

Erweiterte Bindungen entstehen durch Einfügen oder Entfernen von Kettfadenhochgängen bei den Grundbindungen. Innerhalb einer Bindung darf jedoch nur eine Variante zur Anwendung kommen. Für die Leinwandbindung gibt es keine Erweiterung. Abbildung 7 zeigt eine um einen Kettfadenhochgang erweiterte S-Köperbindung.

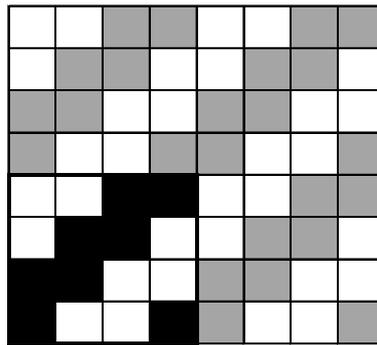


Abbildung 7: Erweiterte Körperbindung (4 Rapporte)

Abgeleitete Bindungen entstehen durch die Weiterentwicklung von Grund- oder Erweiterten Bindungen. Abbildung 8 zeigt zwei Beispiele für abgeleitete Leinwand- und Körperbindungen.

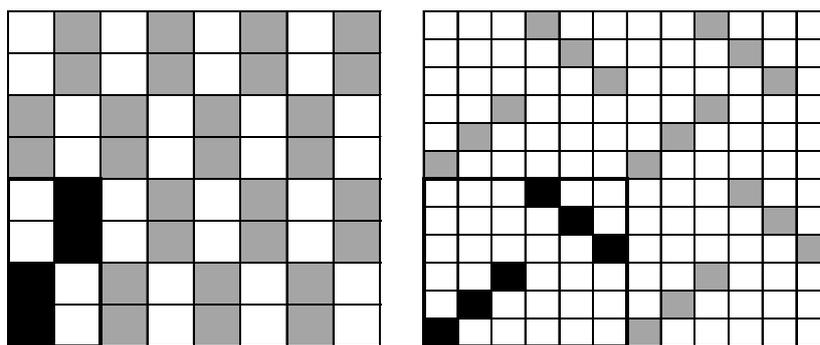


Abbildung 8: Abgeleitete Leinwandbindung (linkes Raster) und Kreuzkörperbindung (rechtes Raster)

Auf Jaquardwebmaschinen kann jeder Faden einzeln und unabhängig von den anderen Kettfäden gehoben oder gesenkt werden. Daraus resultiert eine unbegrenzte Mustervielfalt an Jaquardbindungen[1].

Die Gewebe mit abgeleiteten Bindungen und mit Jaquardbindungen werden jedoch nicht näher erläutert, da sie im experimentellen Teil keine Anwendung finden.

2.4.4 Gewebeparameter

Neben dem eingesetzten Fasermaterial haben folgende Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften eines Gewebes [1, 29]:

- Einarbeitung (Crimp)
- Bindungsart
- Gewebedichte

Unter Einarbeitung (Crimp) ist das Verhältnis der Länge eines ins Gewebe eingearbeiteten Fadens zu dessen Länge im gestreckten Zustand zu verstehen. Es gibt sowohl eine Einarbeitung in Kettfäden als auch in Schussfäden, wobei sich diese beiden untereinander beeinflussen. Liegt der Kettfaden komplett gestreckt vor, so spricht man von Einarbeitung in Schussrichtung, da nur der Schussfaden gekrümmt wird. Auch eine vollständige Einarbeitung in Ketttrichtung ist möglich, wobei normalerweise eine ausgewogene Einarbeitung in Kett- und Schussrichtung erfolgt. Durch die Einstellungsmöglichkeiten der Webmaschine (Kett- und Schussfadenzugkraft) kann die Einarbeitung richtungsabhängig variiert werden.

Je höher der Crimp ist, desto höher ist die Verschiebefestigkeit des Gewebes, doch desto stärker reduzieren sich die mechanischen Eigenschaften. Cherif [1] hat aufgezeigt, dass sich die Bruchkraft eines Rovings bei fünf Prozent Crimp schon um 40% reduziert. Bei einer Einarbeitung von 10% reduziert sich die Bruchkraft um beinahe 60%. Auch der Elastizitätsmodul sinkt mit steigendem Crimp [1, 29].

Der Crimp beeinflusst auch das Verformungsverhalten von Geweben. Das Zugspannungsverhalten von Geweben ist sehr speziell, da die Ondulationen schon bei sehr geringen Spannungen zu Nichtlinearitäten führen. Diese Unregelmäßigkeiten werden umso größer, je größer der Crimp eines Gewebes ist. Aufgrund der Präsenz von Kett- und Schussfäden ist das Spannungsbild ein biaxiales Phänomen. In einem Gewebe mit unausgewogener Einarbeitung beeinflusst die Fadenrichtung mit den steiferen (gestreckteren) Fäden das

Verhalten der Fadenrichtung mit den weniger steifen Fasern wesentlich, nicht jedoch umgekehrt [21].

Die Wahl der Bindungsart besitzt einen Einfluss auf die Einarbeitung des Gewebes. Je höher die Bindepunktdichte, desto mehr Ondulationen weisen die Fasern auf. So hat ein Leinwandgewebe eine wesentlich höhere Strukturdehnung als ein Gewebe mit geringer Bindepunktdichte (Gewebe mit Köperbindung). Dadurch ist im Vergleich zu anderen Bindungen die Verschiebefestigkeit oder Formbeständigkeit von Leinwandgewebe höher und die Neigung zum Ausfransen geringer [1, 8].

Die Gewebedichte wird für Kett- wie auch für Schussfäden in der Anzahl der Fäden pro cm angegeben. Es gilt, je mehr Fäden pro Längeneinheit verwendet werden, desto höher wird die Verschiebefestigkeit und desto geringer wird die Verformbarkeit [1].

2.4.5 Gewebeeigenschaften

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der Gewebe mit den drei Grundbindungsarten [1].

Tabelle 1: Wichtigsten Eigenschaften der drei Grundgewebearten (3 = gering; 1 = hoch)

	Leinwand	Atlas	Köper
Strukturdeformation	1	2	3
Schiebefestigkeit	1	2	3
Einzelfadenauszugskraft	1	2	3
Biegefestigkeit	1	2	3
Permeabilität	3	2	1
Drapierbarkeit	3	2	1
Handhabung	1	2	3
Mechanische Eigenschaften	3	2	1

Zur Ermittlung der Drapierfähigkeit von Geweben eignen sich neben der Scherung auch die Schiebefestigkeit und die Fadenauszugskraft. Die Schiebefestigkeit ist jene Kraft, welche aufgewendet werden muss um einen Faden im Gewebe senkrecht zu seiner Längsachse zu verschieben. Die Fadenauszugskraft ist jene Kraft, welche erforderlich ist, einen Faden parallel aus seinem Textil herauszuziehen. Die Schiebefestigkeit und die Fadenauszugskraft beeinflussen sich gegenseitig, doch für einen Vergleich muss auch die Art der Bindung herangezogen werden. Je höher diese beiden Kenngrößen sind, desto schwerer ist das Gewebe zu drapieren [1].

2.5 Gelege

2.5.1 Definition

Der Begriff Gelege bezeichnet ein durch Stoff oder Formschluss fixiertes Flächengebilde, welches aus einer oder mehreren Lagen paralleler und gestreckter Fäden besteht. Dabei können die Fadenlagen auch verschieden orientiert und unterschiedliche Fadendichten aufweisen. Ein Nähwirkstoff ist ein durch maschenförmiges Einbinden von Wirkfäden fixiertes Gelege [1]. In der

Praxis sind für den Begriff Nähwirkstoff auch die Bezeichnungen Multiaxialgelege oder verwirktes Gelege üblich, woraus ersichtlich werden soll das diese Nähwirkstoffe eine Unterart der Gelege sind. Im Englischen ist die Bezeichnung „Non Crimp Fabric“ (NCF) in Abgrenzung zu den Geweben gebräuchlich [1, 8, 27].

2.5.2 Benennung der Gelege

Die Bezeichnung der Multiaxialgelege (NCF) erfolgt nach der Ausrichtung der Fadenlagen [1]:

- Einaxiales Gelege mit einer oder mehreren Fadenlagen in einer Richtung (1D-Struktur)
- Biaxiales Gelege mit zwei oder mehr Fadenlagen in zwei Richtungen in einer Ebene (2D-Struktur)
- Multiaxiale Gelege mit mehr als zwei Fadenlagen in mehr als zwei Richtungen in einer Ebene (2D-Struktur)
- Multiaxiale Gelege mit mehr als zwei Fadenlagen in mehr als zwei Richtungen mit Wirkfäden als Verstärkungsfäden (3D-Struktur)

Die Angabe der Fadenorientierung der einzelnen Lagen erfolgt in der Regel in der Form $[\alpha/\beta/\gamma]$ und in Abhängigkeit der Produktionsrichtung, welche als x- Richtung bzw. als 0° Lage bezeichnet wird. Die Querrichtung zur Produktion ist die y-Achse und die Stapelfolge als z-Richtung. Eine Fadenlage, welche von der x-Richtung (0° Lage) abweicht und in die positive y-Richtung zeigt, erhält ein positives Vorzeichen (+), sonst ein negatives (-). In diesem Sinn wird ein fünfflagiges multiaxiales Gelege, wie es in Abbildung 9 zu sehen ist, in der Form (0/90/+45/90/-45) gekennzeichnet [1].

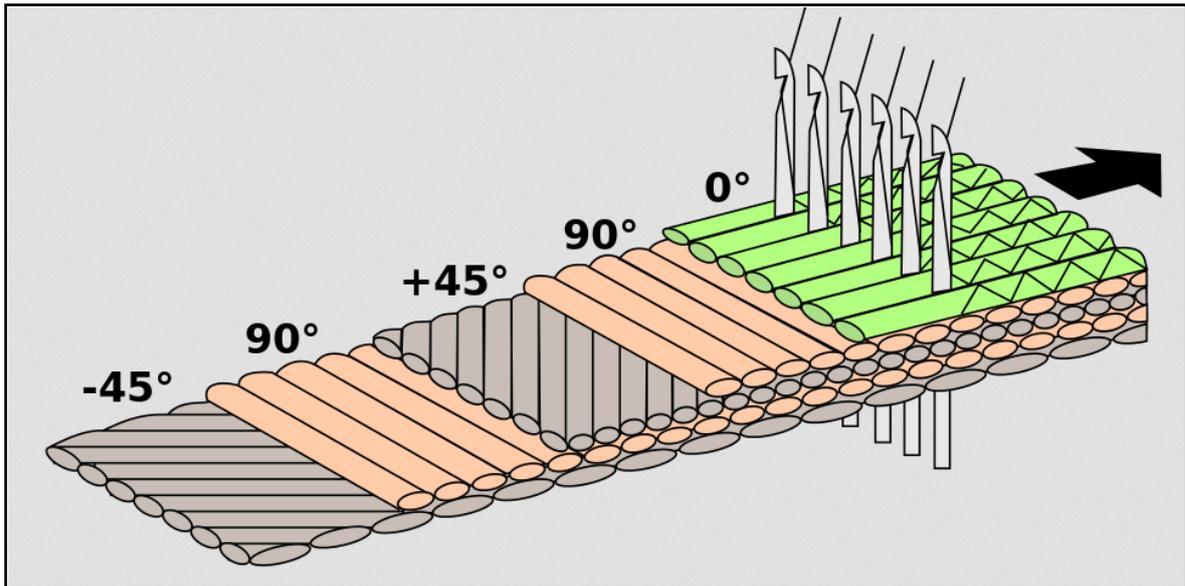


Abbildung 9: Multiaxialgelege mit fünf Lagen [30]

2.5.3 Bindungsarten der Wirkfäden

Werden die Verstärkungsfäden in Geweben durch Ondulationen miteinander verbunden, so sind es bei gewirkten Gelegen Maschenfädensysteme, welche die Fasern in den einzelnen Lagen aneinander binden und auch die Lagen untereinander zusammenhalten. Die Art, Form und Anordnung der Maschen wird als Bindung bezeichnet. Hierfür gibt es eine riesige Auswahl an Möglichkeiten zur Maschenbildung, wobei zwischen zwei Arten unterschieden wird [1, 8]:

- Grundbindungen (Franse, Trikot, Tuch, etc)
- Kombinierte Bindungen

Da in dieser Arbeit ausschließlich Textilien verwendet werden, welche mit der Grundbindung Franse ausgestattet sind, wird hier auf eine ausführliche Erläuterung der weiteren Maschenbildungsformen verzichtet.

Die Fransenbindung ist die einfachste aller Grundbindungen. Im Gegensatz zu den übrigen Grundbindungen besteht bei der Fransenbindung keine Querverbindung zu den anderen Maschenstäbchen. Aus diesem Grund erfolgt ohne den Einsatz von Hilfsfäden in Querrichtung auch kein Aufbau eines Wirkflächengebildes. Insofern wird diese Bindungsart nur gemeinsam mit anderen Bindungselementen (wie z.B.: Verstärkungsfäden) oder zur Verbindung von Fadenlagen verwendet [1].

2.5.4 Einflussparameter von Gelegen

Es gibt eine Vielzahl an Parametern, welche einen Einfluss auf die Eigenschaften der Gelege enthalten. Die vollständige Erläuterung würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Insofern wird eine Beschränkung auf die wichtigsten Parameter vorgenommen [1]:

- Materialzuführung im Herstellungsprozess,
- Anordnung der Fadenlagen und der Wirkfäden,
- Auswahl einer geeigneten Maschenbindung,
- Anordnung von zusätzlichen Materialien,
- Abzug, Nachbehandlung und Speicherung des Geleges.

Die Materialzuführung im Herstellungsprozess beinhaltet Aspekte wie die Fadenmenge und die Zuführungsgeschwindigkeit sowie die Fadenspannung der Wirkfäden. Weiters auch die Spannungen, welche in den Kett- und Schussfäden während der Herstellung vorherrschen [1].

Ein wichtiger Aspekt ist auch die Form der Abbindung. Eine maschengerechte Abbindung bedeutet, dass der Wirkfaden genau im Zwischenraum der Garne einsticht und somit die Kett- und Schussfäden schadlos in die Maschen eingebunden werden. Eine nicht-maschengerechte Abbindung bedeutet das

Anstechen des Fadenmaterials durch die Durchstechschiebernadeln und eine Schädigung des Rovings [1].

2.5.5 Einfluss des Stitching auf den Trellis Effekt von Multiaxialgelegen

Die Einleitung des Trellis Effektes bei Gelegen ist komplexer als bei Geweben. Obwohl bei Gelegen keine Ondulationen der Fasern vorhanden sind, bringen die Maschen der Wirkfäden andere Charakteristiken in die Drapierbarkeit ein. Das Verformungsverhalten von gewirkten Gelegen wird bei Modellierungs und Simulationsversuchen in drei Aspekte unterteilt [31]:

- Effekte der Wirkfäden
- Effekte der Fadenlagen
- Interaktionen zwischen den Verstärkungsfäden und den Wirkfäden

Für eine korrekte Modellierung sind alle drei Aspekte von Bedeutung, wobei den Effekten der Wirkfäden der meiste Einfluss eingeräumt wird. Unter diesen Effekten sind die Wirkfadenspannung und die Wirkfadenreibung zu verstehen.

Die Wirkfadenspannung wird als der wichtigste Parameter angesehen. Wird ein NCF geschert, so werden jene Bereiche der Wirkfäden, welche nicht parallel zu den Fadenlagen verlaufen entweder gestreckt oder gestaucht. Je nach Bindungsart und verwendeter Wirkfadenzuführungsgeschwindigkeit liegt der Wirkfaden mehr oder weniger gespannt im Verstärkungstextil vor. Dies beeinflusst die Beweglichkeit der Fadenlagen zueinander und beeinflusst somit die Scherverformung [31, 32].

Experimente haben gezeigt, dass zwei gleiche NCFs (selbe Fadenlagen, selbe Maschenbindung) sehr unterschiedliches Verformungsverhalten haben, wenn die Wirkfäden unterschiedliche Dehnungseigenschaften besitzen und mit unterschiedlicher Spannung im Gelege eingearbeitet sind [33].

Auch die Richtung des Stitching ist von Bedeutung. Bei Schrägzugversuchen an Gelegen mit $\pm 45^\circ$ Lagen, konnte nachgewiesen werden, dass die Proben mit querverlaufenden Wirkfäden wesentlich geringere Scherkräfte hervorriefen als jene Proben, deren Wirkfäden mit der Verformungsrichtung übereinstimmten [32].

2.5.6 Eigenschaften von Gelegen

Die wesentlichen Vorteile der Gelege liegen in ihrer hochproduktiven Herstellung, der Einstellmöglichkeit der Winkel, unter denen die einzelnen Fadenlagen zueinander angeordnet werden können sowie vielfältigen Kombinationen im Lagenaufbau. Ein weiterer Vorteil gegenüber den Geweben ist das Fehlen von Ondulationen, wodurch die mechanischen Eigenschaften der Fasern besser ausgenutzt werden [1, 8, 27, 31].

Die Verwendung hochfester Wirkfäden wie z.B. Glas- oder Aramidfilamentgarne erzeugen eine signifikante Verbesserung der Delaminationsfestigkeit gegenüber UD-Prepregs. Auch weitere Eigenschaften wie die Schadenstoleranz, die Bruchzähigkeit und die Druck- und Zugfestigkeit nach Schlagbeanspruchung werden durch den Einsatz von den in Dickenrichtung liegenden hochfesten Fäden gesteigert [1, 9].

Die Wirkfäden und die ordentliche Maschenabbindung haben auch einen Einfluss auf die in-plane Eigenschaften der Textilien. So können die Wirkfäden an jenen Stellen, an welchen sie die Textillagen durchdringen, zu Fasereinschnürungen (Ondulationen) an den Textiloberflächen und zu Verschiebungen der Fäden führen. Diese Effekte führen in den anschließenden Herstellungsprozessen zu weiteren Defekten (Luft einschließen, Harzanreicherung), welche die mechanischen Eigenschaften vermindern [1, 34, 35].

3 Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Parameter aus den theoretischen Grundlagen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der wichtigsten Parameter aus den theoretischen Grundlagen

Preformverfahren	
Direkt	Sequentiell
Einstufig	Mehrstufig
Integralbauweise	Differentialbauweise
Rovings	Textilien aus Rovings
Textilien	
Gewebe	Gelege
Kett u. Schussfäden	Variable Lagenanordnung
	Variable Lagenzahl
Ondulierte Rovings	Gestreckte Rovings
Bindung durch Ondulationen	Bindung durch Stitching
Leinwand-, Köperbindung, etc.	Fransen, - Trikotbindung, etc.
Einarbeitung (Crimp)	Wirkfadenspannung
Garne	
Fasermaterial	
Garntyp ==> Rovings	
Garngrosse	
Drapierverhalten	
Scherung ==> Trellis Effekt ==> Grenzwinkel	
Spannungen im Textil	
Biegeverhalten	

4 Experimentelles

4.1 Verwendete Materialien

4.1.1 Verwendete Gewebe

Tabelle 3 weist die verwendeten Carbonfasergewebe der Firma SGL Carbon Group auf. Die Verwendung beschränkte sich auf ein Köpergewebe mit erweiterter Bindungart (2/2) und ein Leinwandgewebe mit Grundbindung. Die übrigen Gewebeparameter wie Garnfeinheit, Flächengewicht und Fadenanzahl sind für beide Gewebearten ident, sodass der Unterschied der beiden Gewebearten allein auf die Bindungsart beschränkt wird. In dieser Hinsicht lässt sich der reine Einfluss der Bindungsart auf die Drapierbarkeit feststellen.

Tabelle 3: Verwendete Gewebe

Bindung	Garnfeinheit (Kette / Schuss)	Flächengewicht [g/m²]	Fadenzahl (-/cm)
Köper 2/2	3 K / 3K	240	6
Leinwand	3 K / 3K	240	6

4.1.2 Verwendete Multiaxialgelege

Tabelle 4 gibt die verwendeten Multiaxialgelege der Firma Saertex GmbH an. Zwei biaxiale und ein triaxiales Gelege kamen zur Anwendung. Durch die unterschiedliche Lagenzahl tritt zwischen diesen Gelegen auch eine Differenz in den resultierenden Flächengewichten auf. So hat das NCF (-/+) ein deutlich geringeres Flächengewicht als das triaxiale Gelege (-/0/+). Das zweite biaxiale

NCF(0/90) besitzt durch die Verwendung unterschiedlicher Garnfeinheiten das gleiche Flächengewicht wie das NCF (-/0+), wobei die fehlende Fadenlage durch eine Verdoppelung der Garnfeinheit (von 24K zu 48K) in 0°-Richtung ausgeglichen wird.

Das Stitching ist hingegen bei allen drei Gelegen ident. Die Wirkbindungsart (Franse) sowie die Fadenmenge pro Fläche (14 g/m²) sind bei allen drei Textilien gleich.

Die in Tabelle 4 verwendete Abkürzung TFAW steht für „Total Fabric Areal Weight“ und gibt das gesamte Textilflächengewicht (Carbonfäden und Wirkfäden) an. Die Abkürzung TCAW steht für „Total Carbon Areal Weight“ und gibt das Textilflächengewicht nur der Kohlenstofffasern ohne Wirkfäden (Stitching) an.

Die Zeichen + und – stehen immer für +45° orientierte Lagen bzw. -45° orientierte Lagen.

Tabelle 4: Verwendete Gelege (NCF)

Materialien	Lagen	Garnfeinheit	TFAW [g/m²]	TCAW [g/m²]	Wirkbindung
BNCF - 24K IMS	-/0/+	24 K	596	582	Franse
BNCF - 24K IMS	-/+	24 K	402	388	Franse
BNCF - 24K IMS	0/90	48K/24 K	596	582	Franse

4.2 Versuchsaufbau

In Abbildung 10 ist die gesamte Drapierstation mit den vier verwendeten Profilen mit unterschiedlicher Krümmung dargestellt.

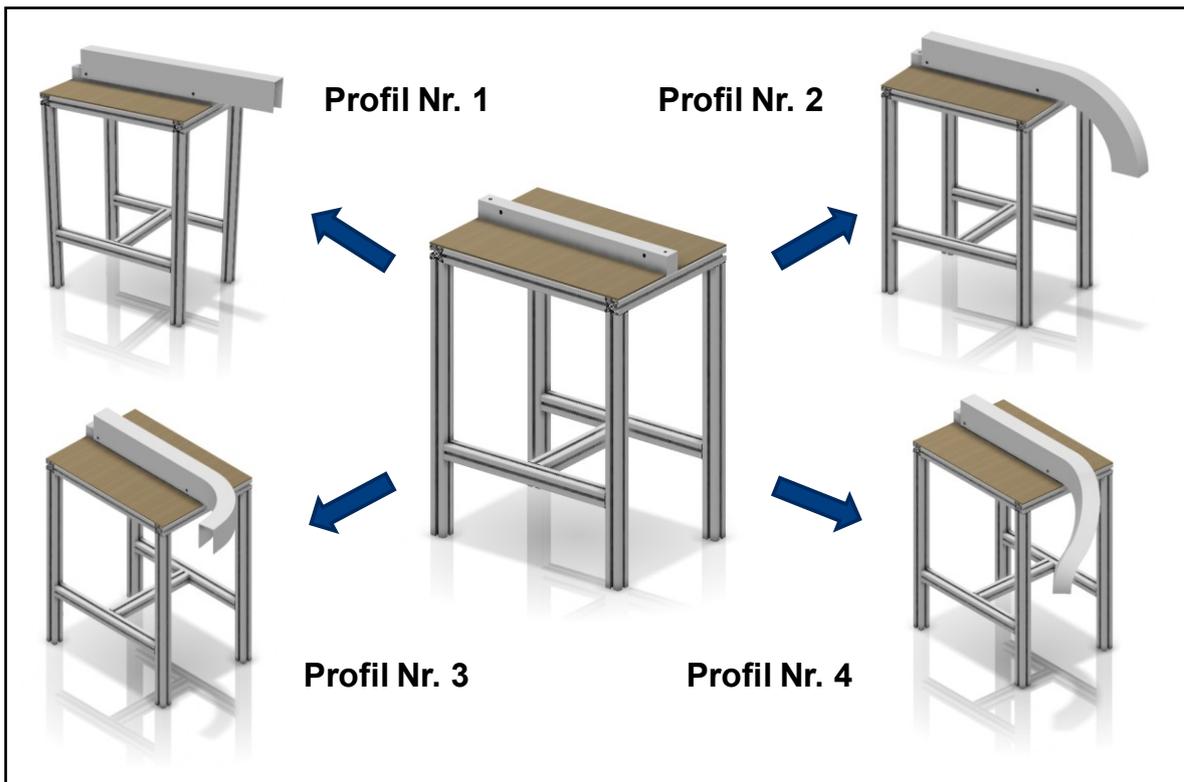


Abbildung 10: Modulare Drapierstation mit den Drapierprofilen

Im Querschnitt haben alle Profile die Form eines umgekehrten U's mit einer Deckfläche und zwei Seitenflächen. Die Deckfläche aller Profile besitzt eine Breite von 6 cm. Die (zu drapierende) Breite (oder die Höhe) der Seitenflächen beträgt bei den Profilen Nr. 1-3 ebenfalls 6 cm und 7,5 cm bei Profil Nr. 4. Die Längen der Profile und der einzelnen Profilflächen variieren abhängig von der Krümmung. Zur Realisierung der Versuche wurden die Formen mittels Schrauben auf der Drapierstation befestigt.

Das Profil Nr. 1 ist geradlinig und besitzt daher nur die Krümmung der umgekehrten U-Form.

Das Profil Nr. 2 ist vertikal nach unten gekrümmt, sodass die Oberseite des Profils eine konstante rechteckige Fläche enthält. Die Seitenflächen nehmen jedoch die Form eines Viertelkreises ein.

Das Profil Nr. 3 ist horizontal gekrümmt, wodurch die Seitenflächen rechteckig gekrümmte Formen annehmen und nur die Oberfläche des Profils die Form eines Viertelkreises einnimmt.

Das Profil Nr. 4 besitzt eine vertikale und horizontale Krümmung, sodass alle Seitenflächen des Profils Formen aufweisen, welche weder einem exakten Rechteck noch einem genauen Viertelkreis entsprechen.

4.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche gliederten sich in folgende Prozessschritte:

- Herstellung der Preform
- Durchführung der Drapierung
- Bewertung der Drapierung

4.3.1 Herstellung der Preform

In Abbildung 11 ist eine in den Versuchen verwendete Preform dargestellt. Diese Preform wurde mittels vollautomatisierter Schneidemaschine aus einem „Endlostextil“ herausgeschnitten. Es war auf eine ordentliche Einstellung des Cutters sowie eine ausreichende Schärfe des Schnittmessers zu achten um eine optimale Textilqualität zu erreichen und ein Ausfransen vor dem eigentlichen Drapiervorgang zu vermeiden.



Abbildung 11: Mittels CNC-Cutter vorkonfektionierte CF Preform aus Leinwandgewebe

In Tabelle 5 sind die genauen Maße der einzelnen Preforms für die jeweiligen Profile aufgelistet.

Tabelle 5: Maße der Preforms

Maße	Länge [cm]	Breite [cm]
Profil 1	60	18
Profil 2	100	18
Profil 3	100	18
Profil 4	100	21,5

Während des Zuschneidens der textilen Rechteckstücke wurde das zu drapierende Profil auf der Drapierstation befestigt und von allen Verunreinigungen mit geeignetem Reinigungsmaterial gesäubert, sodass die Drapierung mit Beendigung des Schnittvorganges sofort beginnen konnte.

4.3.2 Drapiervorgang

Nach Anfertigung einer einwandfreien Preform wurde diese vorsichtig vom Schneidetisch entnommen und zur modularen Drapierstation transportiert. Eine behutsame, textilgerechte Behandlung war (vor allem bei den Geweben) von hoher Wichtigkeit, um ein vorzeitiges Ausfransen zu verhindern. Aus diesem Grund wurden die textilen Proben auch nicht gefalten oder eingerollt, um Schädigungen und Qualitätsverluste vor den eigentlichen Drapierversuchen ausschließen zu können.

Im ersten Versuchsschritt wurde das rechteckige Textil auf die Deckfläche des geradlinigen Profilbereichs gelegt und dort mittels Magnet- und Federklemmen, welche in Abbildung 12 zu sehen sind. Um ein Verrutschen des Textils zu verhindern, war es von Nöten die Drapierung mit Hilfe einer zweiten Person durchzuführen oder zumindest zu beginnen, sodass einer die exakte Anbringung und der andere die Probenbefestigung durchführen konnte. Nach der Fixierung an der Deckfläche wurden die geradlinigen Seitenflächen durch Faltung des Textils belegt und fixiert.



Abbildung 12: Verwendete Magnet- und Federklemmen

Nach Drapierung des gesamten geradlinigen Gebiets ging (abgesehen von Profil 1) die Textilanpassung direkt mit dem sich anschließenden gekrümmten Bereich weiter. Mit der Drapierung wurde solange fortgefahren, bis das Textil dem Verlauf der Krümmung nicht mehr folgen konnte oder eine Falte aufwarf. Bei Auftreten einer Falte, wurde versucht diese durch Verschiebung, Drehung oder Streckung des Textils bestmöglich zu beseitigen.

Wenn eine vollständige Drapierung ohne Falten nicht möglich war und das Textil noch nicht wesentlich beschädigt war, dann wurde das gesamte Textil (auch der geradlinige Bereich) noch einmal vom Profil gelöst, und die Drapierung in unterschiedlicher Art und Weise neu begonnen.

Vor allem wurde der Beginn der Drapierung (Ort der Erstbefestigung) variiert. So wurde versucht die Probe zuerst an die gesamte Deckfläche (gekrümmt und ungekrümmt) zu haften und anschließend die Seitenflächen formtreu zu krümmen. Auch mit den beiden Seitenflächen des Profils (gekrümmt und ungekrümmt) wurde begonnen und anschließend mit der Deckfläche und der zweiten Seitenfläche fortgefahren. Verallgemeinernd kann gesagt werden, dass viele erdenkliche Möglichkeiten versucht wurden um eine formgerechte Anpassung des Textils zu erreichen.

4.3.3 Bewertung der Drapierung

Die Versuchsdurchführung wurde vom Zuschnitt bis zur vollendeten Drapierung laufend in einem Protokollbuch dokumentiert, wobei hier alle nennenswerten Ereignisse festgehalten wurden:

- Ergebnis des Textilzuschnitts
- Vorgehensweise der Drapierung,
- Auftretende Effekte während der Drapierung,
- Ergebnis der Drapierung,
- Faltenbildung (Ort und Größe),
- Versuch der Faltenentfernung und

- Erhaltung der Textilqualität (Schädigungen und Faserverlust).

Die Drapierversuche wurden auch per Foto bestmöglich festgehalten und anschließend detailliert analysiert. Auf diesem Weg konnte der Faserverlauf im Bereich der Krümmung genau veranschaulicht und überprüft werden (Abbildung 13), da dies (zumindest bei den Geweben) bei starker Scherverformung mit bloßem Auge nicht so einfach feststellbar ist. Auch der Faserverlust und die aufgetretenen Schäden wurden per Fotos belegt (Abbildung 14).

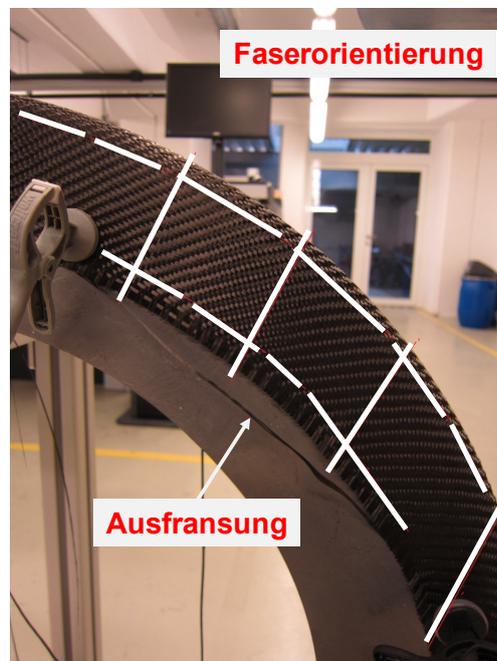


Abbildung 13: Veranschaulichung der Faserorientierung und der Ausfransung im Krümmungsbereichs

Zur exakten Ermittlung der Abweichung der Verstärkungsfäden von der Ideallage kam das in Abbildung 15 und Abbildung 16 gezeigte Computerprogramm zur Anwendung. Durch Einzeichnen geeigneter Hilfslinien wurden die Ideallinie des Faserverlaufs sowie der tatsächliche Faserverlauf verdeutlicht. Das Setzen zweier gelber und eines roten Kreuzes im Computerprogramm markierte den Winkel, welcher ermittelt werden sollte.

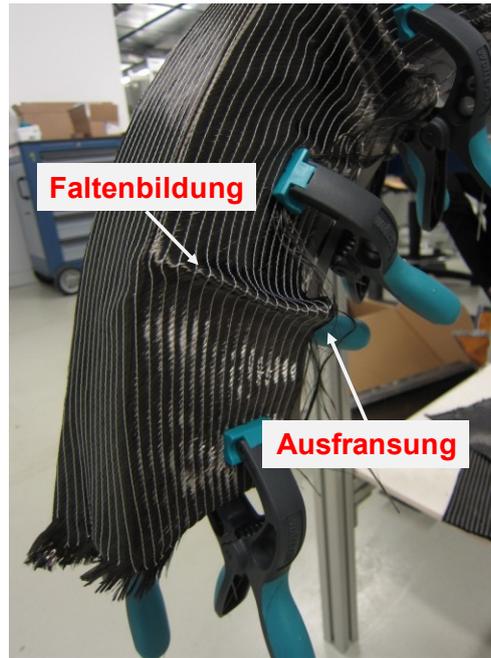


Abbildung 14: Dokumentation von Verformungen und Schäden

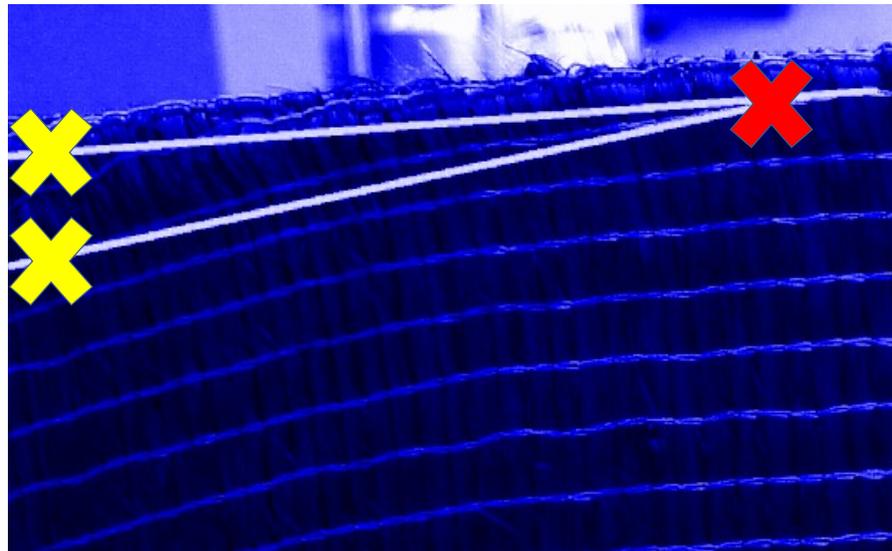


Abbildung 15: Ermittlung der Abweichung der Faserorientierung

Das Computerprogramm berechnete den zwischen den drei Kreuzen eingeschlossenen Winkel (angle), welcher in diesem Fall 7° ergab (Abbildung 16).

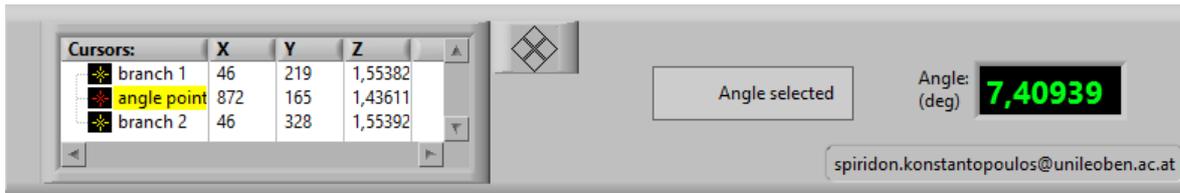


Abbildung 16: Winkel der Abweichung der Faserorientierung

4.3.4 Durchführung des Cantilever Tests

Die Durchführung der Biegesteifigkeitsprüfung nach dem Verfahren von Cantilever wurde an dem in Abbildung 17 gezeigten Versuchsprüfstand durchgeführt. Der Versuchsprüfstand wurde mit wenig reibendem Klebeband beschichtet, um eine Beschädigung der Proben während des Schiebens zu vermeiden. Die Absenkung des Prüfstandes beträgt wie in der DIN Norm vorgegeben $41,3^\circ$.



Abbildung 17: Versuchsprüfstand des Cantilever Tests

Nach Platzierung der Probe auf dem Prüfstand, erfolgte die kontinuierliche Verschiebung der Textilmuschleife mithilfe eines Schiebers über den Spalt, bis die Probe auf der schrägen Ebene auftraf (Abbildung 18). Anschließend wurde die

Länge der Verschiebung gemessen, was der Überhanglänge der Textilprobe gleichkommt. Die Überhanglänge wurde auf 0,5 mm genau bestimmt.



Abbildung 18: Auftreffen der Probe auf der Prüfstandsebene

Die Versuchsproben, deren genaue Maße in Tabelle 6 angegeben sind, wurden mit dem vollautomatischen Cutter hergestellt, wobei hier besonders auf eine hohe Konturqualität der Prüflinge geachtet wurde und zu stark ausfransende Proben aussortiert wurden. Trotz hoher Vorsichtsmaßnahmen konnte bei den Körperproben das Ausfransen nie vollständig verhindert werden. Die Zuschnitte wurden so angefertigt, dass die Länge der Proben parallel zur Produktionsrichtung (Kettfäden) der Textilien lag.

Tabelle 6: Abmaße der Cantilever Proben

Maße	Länge [cm]	Breite [cm]
Probe	30	3

Jeder Versuch wurde für jedes Material fünfmal wiederholt. Mit den gemessenen Resultaten der Überhanglängen und den Formeln (1) und (2) die Biegesteifigkeit berechnet. Aus den Biegesteifigkeiten wurde das arithmetische Mittel gebildet und diese Mittelwerte zur Analyse herangezogen.

4.4 Verwendete Geräte & Programme

Im Anschluss sind die verwendeten Geräte aufgelistet:

- CNC Schneidmaschine: G3 L-1600, Zünd Systemtechnik AG,
- Fotoapparat: Canon Ixus 310 HS, Canon,
- Winkelauswertung: Eigenentwicklung des Christian Doppler Labors,
- Drapierstation: Eigenentwicklung des Christian Doppler Labors,
- Cantileverprüfstation: Eigenentwicklung des Christian Doppler Labors.

5 Ergebnisse & Diskussion

5.1 Beurteilung der Drapierqualität

Nach Durchführung einer ersten Versuchsreihe trat die Frage nach einer qualitativen und quantitativen Bewertung der erfolgten Drapierungen auf. Da für die Drapierung keine genormten Vorgehensweisen oder Bewertungsregeln bestehen, begann die Suche nach einer geeigneten Beurteilung, welche die Qualität einer Drapierung wiedergibt und die Versuche auch untereinander vergleichbar macht. Die Bewertung soll berücksichtigen, dass die Brauchbarkeit einer Verformung eines zweidimensionalen Fasertextils aber nicht nur von der schadfreien Ausfüllung der 3D-Form abhängt, sondern auch von der benötigten Fadenlage und dem benötigten Faservolumengehalt.

In diesem Sinn wurde ein Bewertungsschema entwickelt, welche eine einwandfreie Verformung der Textilien wie auch die Erhaltung der bestmöglichen strukturmechanischen Eigenschaften der Textilien einschließt.

Die Bewertung der Qualität eines Drapierversuches wird in vier Kriterien unterteilt:

- Auftreten von Falten,
- Schädigungen des Textils,
- Gewünschte Fadenorientierung und
- Erhaltung des Faservolumengehalts (Ausfransen).

5.1.1 Falten

Das Merkmal Falten wird als das wichtigste Kriterium angesehen, da diese zu vielen Problemen führen, welche die drapierte Preform unbrauchbar machen. Zuerst stören Falten den Faserverlauf und senken somit die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Ein weiterer, essentieller Aspekt ist die Drapierung von weiteren Textilschichten, denn bei realen Bauteilen werden mehr als eine Lage benötigt. Durch das Auftreten von Falten würde sich die Bauteilgeometrie unvorhersehbar für die folgenden Schichten ändern, was für einen automatisierten und reproduzierbaren Preformprozess inakzeptabel wäre. Aus diesem Grund ist eine faltenfreie Anpassung an die Geometrie eine unerlässliche Bedingung. Abbildung 19 zeigt eine während der Drapierung aufgetretene Falte.



Abbildung 19: Faltenbildung während der Drapierung an einem NCF (-/0/+)

In dieser Hinsicht wird die ganze Drapierung als gescheitert angesehen, wenn dieses Kriterium zu keinem positiven Abschluss kommt. Eine negative Beurteilung erfolgt, sobald die Falte eine Höhe von 3 mm übersteigt. Die Marke drei mm wurde in Anlehnung an den Picture Frame Test und den Bias extension Test gewählt, bei welchen Falten ab dieser Größe detektiert werden. Dieser Grenzwert macht insofern auch für dieses Bewertungssystem Sinn, da in den Versuchen Textilaufwerfungen dieser Größe mittels Magnetklemmen „niedergedrückt“ werden konnten (Abbildung 20). Größere Falten konnten nur mehr verschoben werden und waren somit irreversibel.

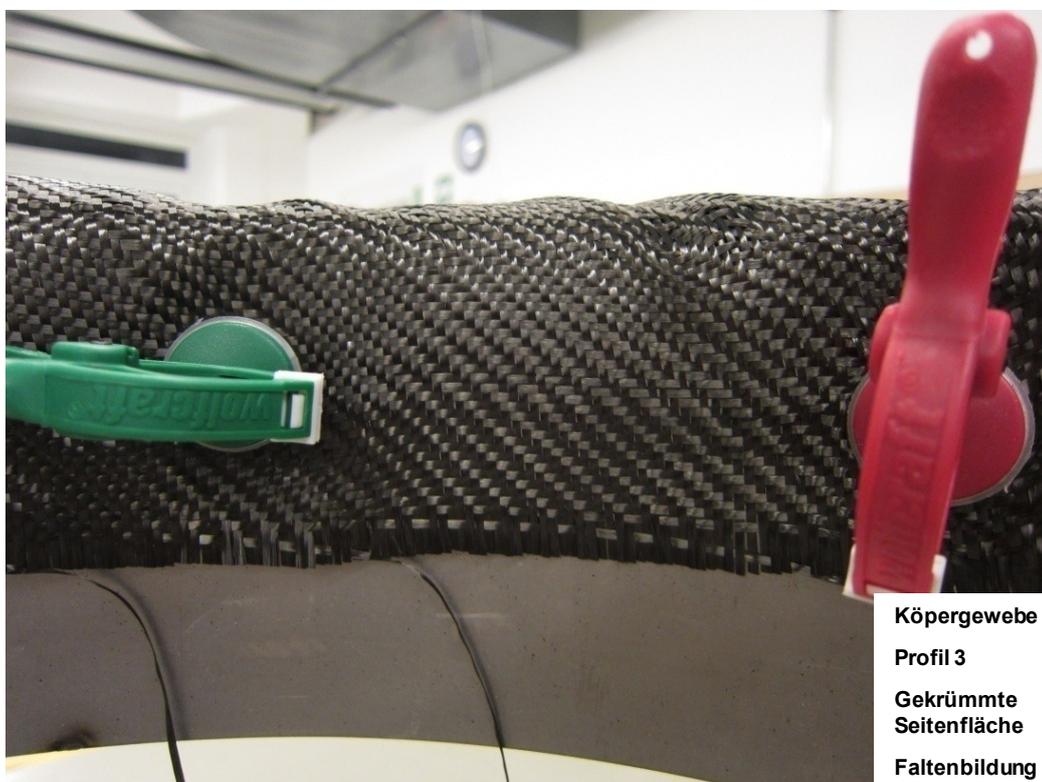


Abbildung 20: *Reversible Faltenbildung an einem Körpergewebe*

5.1.2 Detektierte Schädigungen der Textilien

Bei den Drapierversuchen traten Schädigungen an den Textilien auf, welche in vier unterschiedliche Schadensarten unterteilt wurden:

- Faserschlaufen,
- Faserausbruch,
- Faserlücken und
- Stitchingschäden.

Als schwerwiegendste Art von Schädigung werden die Faserschlaufen angesehen. Wie in Abbildung 21 und Abbildung 22 zu sehen, ziehen sich Rovings aus den Stitching-Fäden heraus und bilden irreversible Schlaufen, welche die Fadenorientierung negativ beeinflussen.

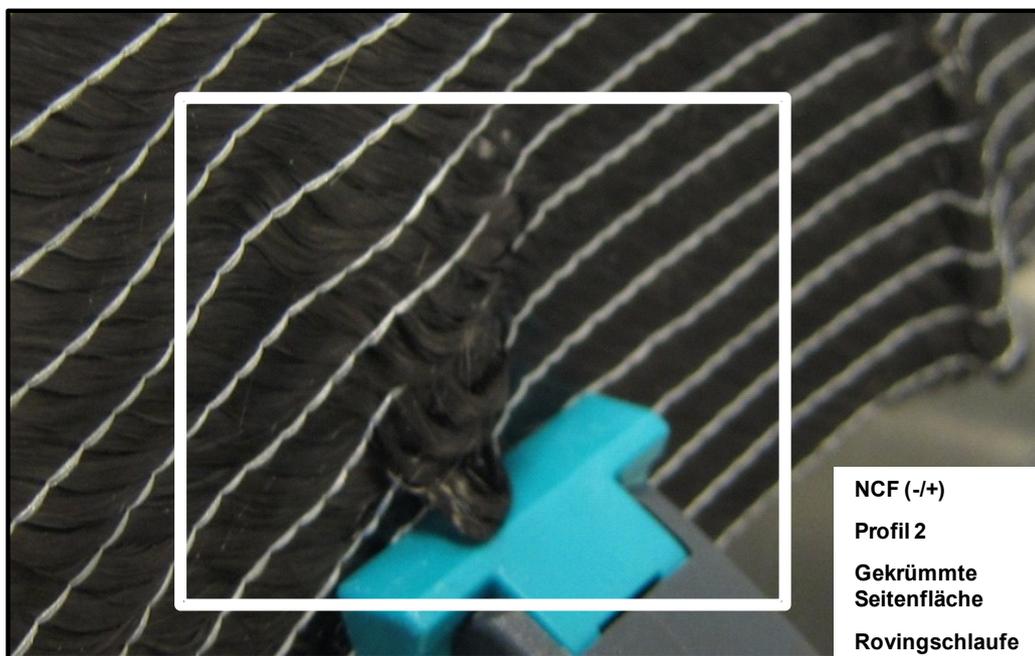


Abbildung 21: Während der Drapierung aufgetretene Rovingschlaufen an einem NCF (-/+)



Abbildung 22: Während der Drapierung aufgetretene Rovingschlaufen an einer Falte (NCF (-/0/+))

Nach Analyse der Fotoaufnahmen wurde festgestellt, dass diese Art von Schädigung vor allem in der Nähe von Falten und/oder Federklemmen aufzufinden war. Die Klemmen fixieren die Textilien zu stark und nehmen den Rovings die Möglichkeit auf nicht bewältigbare Verformungen mit dementsprechender Bewegung (Eigenrotation, Ausbiegen aus der Drapierung) zu antworten. Die Fäden können der Krümmung des Textils nicht mehr folgen und winden sich aus dem Stitching heraus, was in den meisten Fällen zu einer irreversiblen Schädigung des Textils führt.

Bei (alleiniger) Verwendung von Magneten wurden diese Faserschlaufen nicht beobachtet. Bei starker Textilbeanspruchung während des Drapiervorgangs verschoben sich diese Fixierungskörper mit dem Textil. Das Textil selbst blieb hingegen zerstörungsfrei.

In Abbildung 23 ist eine Schadensart zu sehen, welche als Faserausbruch benannt wurde. Einzelne Faserteile trennen sich aus den Rovings heraus und bilden kleine Faserschlaufen. In Abbildung 24 sind Rovings zu sehen, an welchen ein vollständiger Rovingbruch vorliegt. Die Ursache dieser Schädigung ist im Herstellungsprozess der Gelege begründet, denn in Abbildung 25 ist zu erkennen, dass der Wirk- bzw. Stitchingfaden mitten durch den Roving hindurchgeht und diesen beschädigt. Sobald das Textil verformt wird, kommen diese beschädigten Fäden aus der Textilebene heraus und werden deutlich sichtbar. Beim Versuch Falten aus dem Textil zu „streichen“, wurde diese Schadensart auch oftmals beobachtet. Infolgedessen wurde diese Art der Textilglättung unterlassen.



Abbildung 23: *Faserausbruch an einem NCF (0/90)*

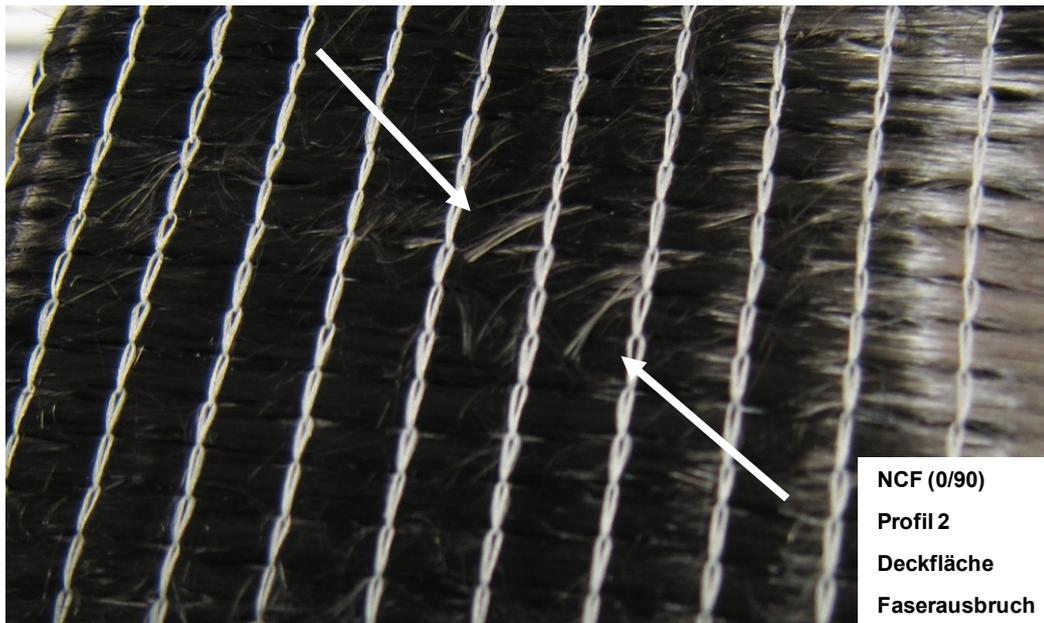


Abbildung 24: Faserausbruch mit vollständigem Rovingbruch an einem NCF (0/90)

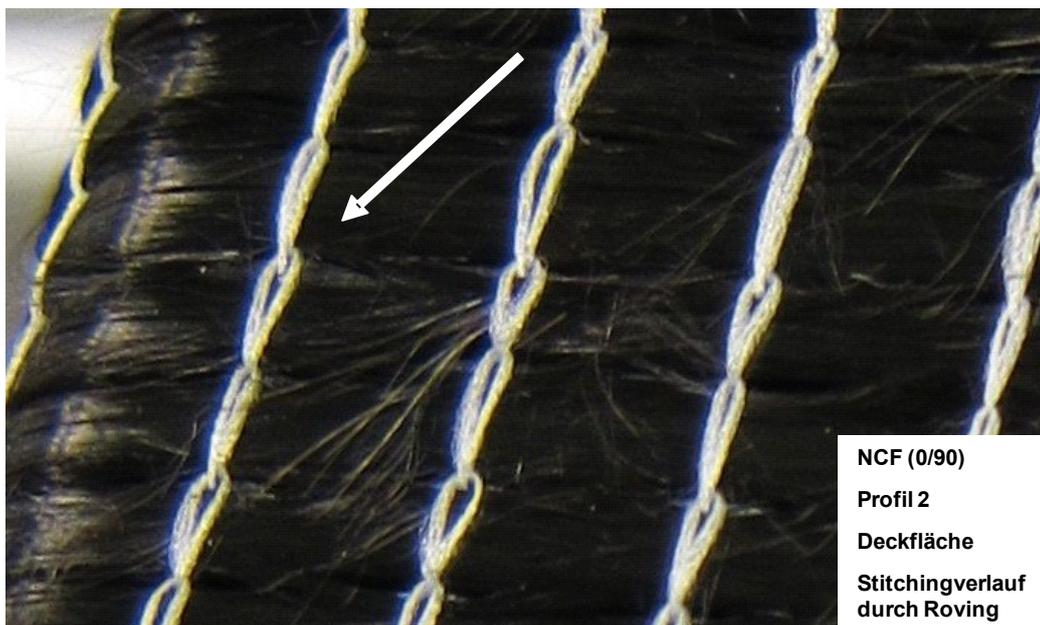


Abbildung 25: Stitchingverlauf durch Roving an einem NCF (0/90)

Rovinglücken entstanden manchmal durch Strecken des Textils im Zuge des Drapiervorgangs. Die Schädigung des Rovings (Abbildung 26) erfolgte jedoch nicht in Folge der Streckung des Textils, sondern wie die Faserausbrüche

während des Wirkprozesses. In der Umgebung der Faserlücke sind einige Faserausbrüche zu sehen, was die Begründung einer schlechten Textilherstellung bestätigt.

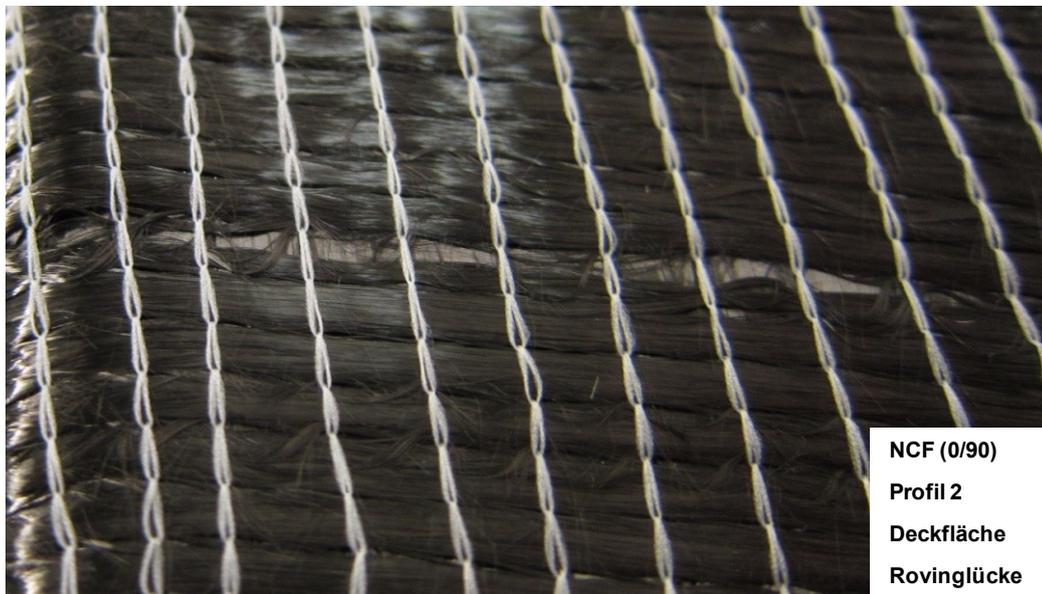


Abbildung 26: Rovinglücke mit Rovingbeschädigung an einem NCF (0/90)

Bei Stitching Schäden traten zwei unterschiedliche Ausprägungen auf. Entweder wurde der Stitching Faden (mitsamt den Rovings) beschädigt (Abbildung 27) oder die Wirkfäden beschädigten die Rovings durch Einschnürung und Verzug (Abbildung 28). Auch bei diesen Schädigungen wird den Federklemmen entscheidender Einfluss beigemessen.

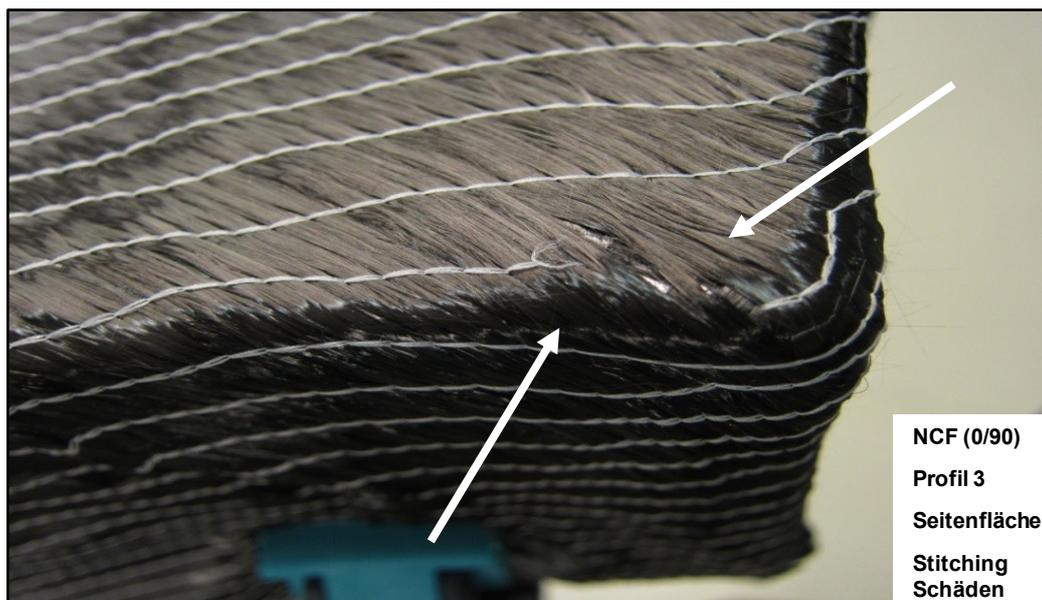


Abbildung 27: *Stitching Schaden*

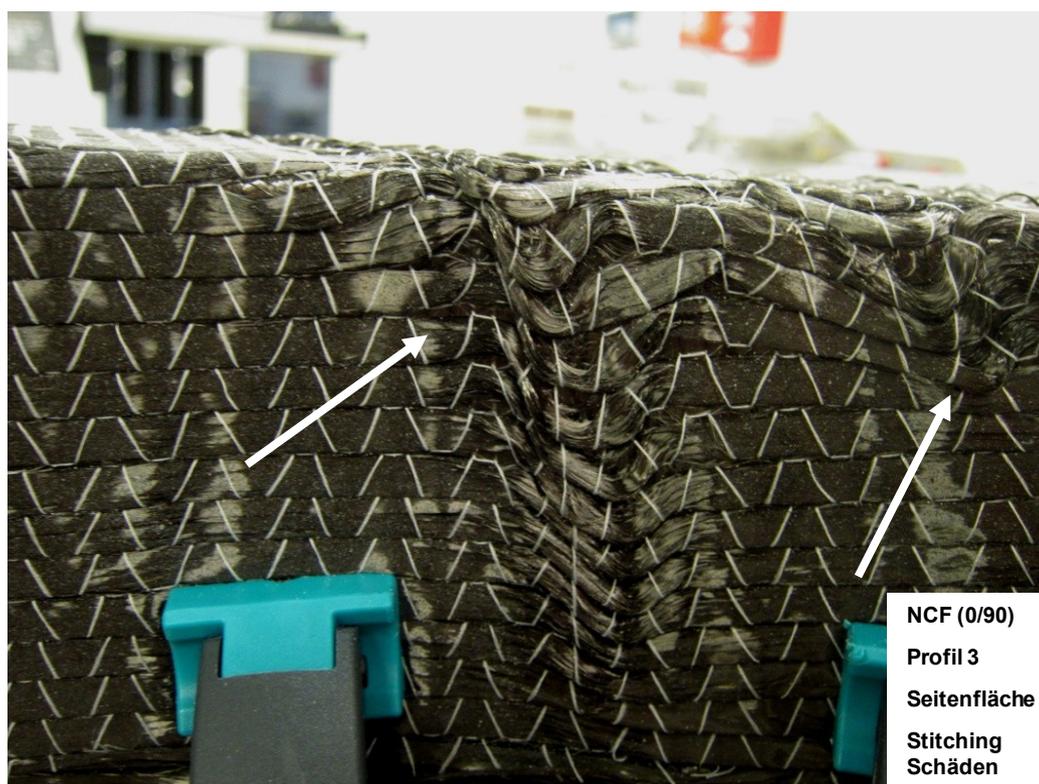


Abbildung 28: *Beschädigung der Rovings durch die Stitchingfäden*

Durch zunehmende experimentelle Erfahrung konnte die Anzahl der Schäden deutlich reduziert werden. Auf die Verwendung von Federklemmen wurde verzichtet und auch die Faserausbrüche (Faserbrüche) und Faserlücken, welche vor allem an NCF (0/90) beobachtet wurden, reduzierten sich sehr, sobald auf das Ausstreichen von Falten und das Strecken von Textilien besser geachtet wurde. (Eine genaue Analyse der Vermeidung von Schäden sowie die dafür erforderlichen Drapiermethoden werden in diesem Abschnitt nicht angegeben. In Kapitel 5.4 wird jedoch ausführlich auf die erworbenen Erkenntnisse der erfolgreichen Drapierarten von Geweben und Gelegen eingegangen.)

Insofern kann dieses Kriterium auch als Maß für einen behutsamen, textilgerechten Umgang mit den Materialien angesehen werden. Die Benotung erfolgt nach positiv oder negativ. Wenn an einem drapierten Textil keine der genannten Schäden zu erkennen sind, wird dieses Kriterium positiv bewertet.

5.1.3 Fadenorientierung

Die Erhaltung der Fadenorientierung ist ein weiterer Aspekt der Beurteilung. Da die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Faserverstärkung vor allem in Faserrichtung gegeben sind, ist ein Abweichen der Fadenorientierung zu vermeiden. In diesem Sinn wurde ein Notenschlüssel erstellt, welcher wie folgt lautet:

Sehr Gut	= 0° – 5° Abweichung,
Gut	= 5° - 10° Abweichung,
Befriedigend	= 10° - 15° Abweichung und
Nicht genügend	= > 15° Abweichung.

5.1.4 Ausfransen

Wie die Fadenlage ist auch das Faservolumen von essentieller Bedeutung, da es sich direkt auf die strukturmechanischen Eigenschaften auswirkt. Mit jedem Roving, welcher während des Preformprozesses aus den Textilien verloren geht, sinkt der Faservolumengehalt und somit auch die Festigkeiten und E-Modul des finalen Bauteils. Ähnlich zur Faserorientierung wird auch hier eine Unterteilung in vier Noten durchgeführt:

- Sehr gut** = 0 – 3 Rovings,
- Gut** = 4 – 6 Rovings,
- Befriedigend** = 7 – 9 Rovings und
- Nicht genügend** = >10 Rovings.

5.1.5 Benotungssystem der Drapierqualität

Die Benotung einer Drapierung erfolgt in folgenden Schritten:

1. Faltenbildung

- Ja → Nicht genügend
- Nein → Nächstes Kriterium

2. Schäden

- Ja → Nicht genügend
- Nein → Nächstes Kriterium

3. Fadenorientierung

Messung der Fadenorientierung

Notenvergabe laut Notenschlüssel

4. Faservolumen (Ausfransen)

Zählung des Rovingverlustes

Notenvergabe laut Notenschlüssel

5. Gesamtnote

Bei positivem Abschluss aller Kriterien wurde eine Gesamtnote gebildet, welche sich aus dem arithmetischen Mittel der Noten der Fadenorientierung und dem Faservolumen erschließt.

Tabelle 7: Bewertungsgrundlage anhand eines Benotungssystems

Notensystem	
1	Sehr gut
2	Gut
3	Befriedigend
4	Nicht genügend

5.2 Bewertung der Drapierversuche

5.2.1 Bewertung der Versuche an Profil 1

Tabelle 8 weist die Bewertungen der Drapierversuche an Profil 1 auf. Aufgrund der geradlinigen Form des Profils warf keines der Materialien Falten. Bei sorgfältiger,

textilgerechter Verformung waren auch keine Schädigungen oder Faserverluste zu bemerken, sodass alle Bewertungen mit sehr guten Noten erfolgten.

Tabelle 8: Bewertung der Versuche an Profil 1

	NCF			Gewebe	
	-/0/+	+/-	0/90	Köper	Leinwand
Falten	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Schädigungen	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Faserorientierung	1	1	1	1	1
Ausfransen	1	1	1	1	1
Gesamtnote	1	1	1	1	1

5.2.2 Bewertung der Versuche an Profil 2

Tabelle 9 beinhaltet die Drapierresultate an Profil 2. Abgesehen von Köpergewebe konnte kein Material faltenfrei auf dieses Profil aufgeförmrt werden, wodurch die negativen Beurteilungen zustande kamen. Das Köpergewebe konnte eine sehr gute Faserorientierung (0°-Abweichung der Kettfäden) vorweisen, erzielte aber eine hohen Rovingverlust (sieben Rovings). In diesem Sinn erfolgte die Benotung gut.

Tabelle 9: Bewertung der Versuche an Profil 2

	NCF			Gewebe	
	-/0/+	+/-	0/90	Köper	Leinwand
Falten	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Schädigungen	-	-	-	Nein	-
Faserorientierung	-	-	-	1	-
Ausfransen	-	-	-	3	-
Gesamtnote	4	4	4	2	4

5.2.3 Bewertung der Versuche an Profil 3

In Tabelle 10 sind die Benotungen des Profil 3 angegeben. Neben dem Köpergewebe konnte an diesem Profil auch mit dem NCF (0/90) eine positive Beurteilung erreicht werden. Die weiteren Textilien warfen auch an dieser Versuchsform zu große Falten, sodass eine positive Beurteilung nicht möglich war.

Das beste Ergebnis an diesem Profil erreichte das NCF (0/90). Ein geringer Faserverlust (ein Roving) brachte in diesem Aspekt eine sehr gute Note ein. Auch die Faserorientierung war in weiten Teilen sehr gut, doch nur am Ende des Krümmungsbereichs erfolgte eine Abweichung um 7° , wodurch die Benotung Gut erfolgte. Der sich daraus ergebende Mittelwert 1,5 wurde zur Gesamtnote Gut (2) aufgerundet.

Das Köpergewebe erzielte an dieser Form eine (gerade noch) befriedigende Note. Wie auch bei den anderen Profilen musste am Köpergewebe einiger Verlust an Rovings hingenommen werden, was in diesem Bereich mit Befriedigend benotet wurde. Die Faserorientierung war hier aber das größere Problem. Im Gegensatz zur inneren Seitenfläche, welche eine sehr gute Faserorientierung zeigte, ging die Ausrichtung der Verstärkungsfäden an der Deckfläche im Krümmungsbereich teilweise verloren. Im letzten Viertel der gekrümmten Deckfläche betrug der Verlust der Faserorientierung der Kettfäden zwischen 22° am Innenrand und 12° am äußeren Rand der Deckfläche, was eigentlich eine negative Beurteilung zur Folge hätte. Da jedoch die Schussfäden ihre Faserausrichtung in Richtung der Kettfäden änderten, glichen diese Rovings den Orientierungsverlust der Kettfäden teilweise aus und es erfolgte die Benotung Befriedigend, was auch zur Gesamtnote Befriedigend führte.

Tabelle 10: Bewertung der Versuche an Profil 3

	NCF			Gewebe	
	-/0/+	+/-	0/90	Köper	Leinwand
Falten	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
Schädigungen	-	-	Nein	Nein	-
Faserorientierung	-	-	2	3	-
Ausfransen	-	-	1	3	-
Gesamtnote	4	4	2	3	4

5.2.4 Bewertung der Versuche an Profil 4

In Tabelle 11 sind die Drapierbewertungen für alle Textilien an Profil 4 enthalten. Ähnlich wie bei Profil 2 konnte an dieser Form nur das Köpergewebe positiv angepasst werden.

Trotz zusätzlicher Krümmung konnte an dieser Form eine gute Gesamtnote erreicht werden. Die Faserorientierung wurde mit Sehr gut benotet, da die Kettfäden sich dem gesamten Krümmungsverlauf sowohl an der Deckflächen als auch an den Seitenflächen ohne Abweichungen folgten. Der Verlust von sieben Rovings führte zur Note Befriedigend bei diesem Kriterium.

Tabelle 11: Bewertung der Versuche an Profil 4

	NCF			Gewebe	
	-/0/+	+/-	0/90	Köper	Leinwand
Falten	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Schädigungen	-	-	-	Nein	-
Faserorientierung	-	-	-	1	-
Ausfransen	-	-	-	3	-
Gesamtnote	4	4	4	2	4

5.3 Ergebnisse der Drapierungen

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Drapierungen aller Materialien an allen Profilen zusammengefasst. Aus der Tabelle geht hervor, dass alle Profile von zumindest einem Material nach den entwickelten Bewertungskriterien erfolgreich drapiert werden konnte.

Tabelle 12: Ergebnisse der Drapierversuche

	NCF			Gewebe	
	-/0/+	-/+	0/90	Leinwand	Köper
Profil 1	1	1	1	1	1
Profil 2	4	4	4	4	2
Profil 3	4	4	2	4	3
Profil 4	4	4	4	4	2

Profil 1 konnte von allen Materialien (Gewebe und NCF's) sehr gut ummantelt werden.

Bei den Profilen 2 und 4 konnte abgesehen vom Köpergewebe kein Material die Kriterien für eine positive Drapierung erfüllen. Die weiteren Textilien schlugen im Krümmungsbereich so große Falten, dass eine negative Benotung vollzogen werden musste.

Für das Profil 3 gab es zwei positive Resultate. Neben dem Köpergewebe konnte auch das NCF (0/90) ohne Falten und Schädigungen über das Profil drapiert werden. Aufgrund der besseren Note ist die Anwendung des Geleges bei diesem Profil zu bevorzugen. An diesem Profil gilt es hervorzuheben, dass sowohl das NCF (0/90) wie auch das Köpergewebe im Bereich der Krümmung einen Verlust in der Faserorientierung hinnehmen mussten.

Das Köpergewebe konnte alle Profile erfolgreich „ummanteln“. Bei allen Versuchen mit diesem Gewebe kam eine hohe Neigung zum Ausfransen zutage,

was durch die geringe Anzahl an Ondulationen erklärbar ist. Die befriedigende Note von Profil 3 kam durch bereichsweise Verluste der Faserorientierung zustande. Im Gegensatz dazu konnte an den Profilen 2 und 4 sehr gute Noten im Bereich der Faserorientierung erzielt werden.

Die NCFs konnten abgesehen von Profil 1 nur ein positives Resultat realisieren. Ein interessanter Aspekt ist, dass das NCF (0/90) ein doppelt gekrümmtes Profil gut drapieren konnte, an Profil 2 jedoch ein Nicht genügend aufgrund zu hoher Faltenbildung erzielte, wobei dieses Profil eine ähnliche doppelt gekrümmte Form besitzt.

Die übrigen Gelege warfen an den Profilen 2, 3 und 4 zu große Falten auf, was eine negative Beurteilung nach sich zog.

Bei Vergleich der Fadenlage aller Textilien kann festgestellt werden, dass nur Textilien mit 0/90 Ausrichtung (NCF wie auch Gewebe) positive Ergebnisse an mehrfach gekrümmten Profilen erzielten und kein Gelege mit (-/+)-Lagen die Krümmung positiv bewältigen konnte. Die schräge Anordnung der Lagen ließ keine faltenfreie Drapierung im Krümmungsbereich zu.

5.3.1 Analyse der Drapierresultate der Gewebe

Mit steigender Drapiererfahrung konnte das Köpergewebe an allen Profilen erfolgreich aufgeförmert werden. Die Noten, welche (abgesehen von Profil 1) zwischen 2 und 3 liegen, wurden durch eine hohe Neigung zum Ausfransen gedrückt, was in Abbildung 29 zu erkennen ist. Aufgrund der geringen Ondulationspunkte zwischen Kett- und Schussfäden lösten sich die Rovings an den Rändern einfacher als beim Leinwandgewebe. Hierfür war es sehr wichtig, schon bei der Herstellung der Preform auf genaue Einstellungen des Cutters und ordentlich geschärfte Schneidklingen zu achten, um einen ersten Verlust von Verstärkungsfäden während der Konfektionierung zu vermeiden.

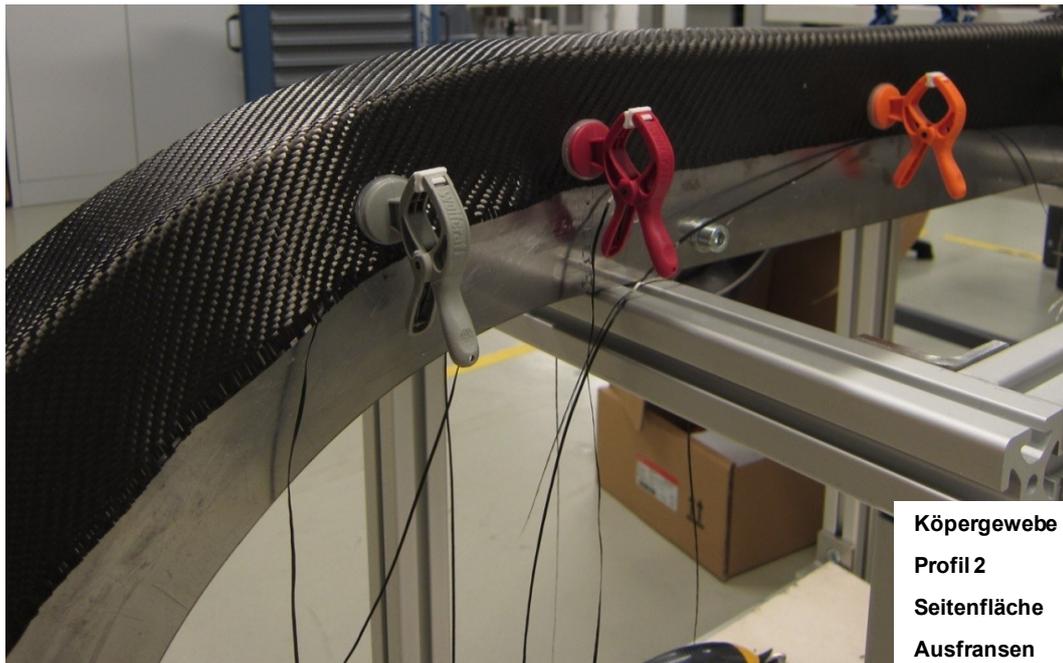


Abbildung 29: Ausfransen während der Drapierung von Körpergewebe an Profil 2

Konnte während des Zuschnitts der Preform ein Verlust von Rovings verhindert werden, so wurde bei sorgfältiger Handhabung des Textils das Ausfransen auf die Textilverformung im gekrümmten Bereich begrenzt. Im Krümmungsbereich gelang bei keinem Versuch eine vollständige Erhaltung des gesamten Textils. Durch den einsetzenden Trellis Effekt im Krümmungsbereich folgte immer eine Abstoßung (Hinausschieben) von Rovings an den Rändern. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen einen Vergleich des Ausfransens zwischen gekrümmtem und ungekrümmtem Bereich. In der ersten Abbildung ist zu sehen, dass im ungekrümmten Bereich eine gute Preform zur Anwendung kam und in diesem Bereich keine Rovings verloren gingen. In der zweiten Abbildung ist der gekrümmte Bereich zu sehen. Es ist gut ersichtlich, dass dort die äußeren Kettfäden aus dem Gewebe verloren gehen.

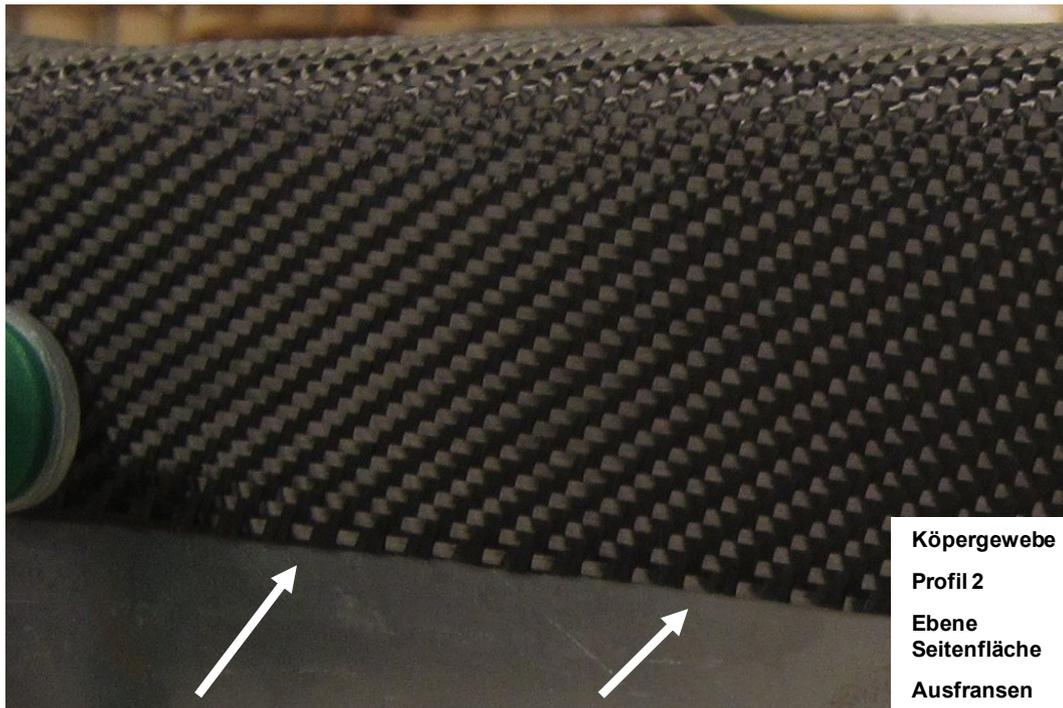


Abbildung 30: Köpergewebe im ungekrümmten Bereich des Profil 2 ohne Ausfransen

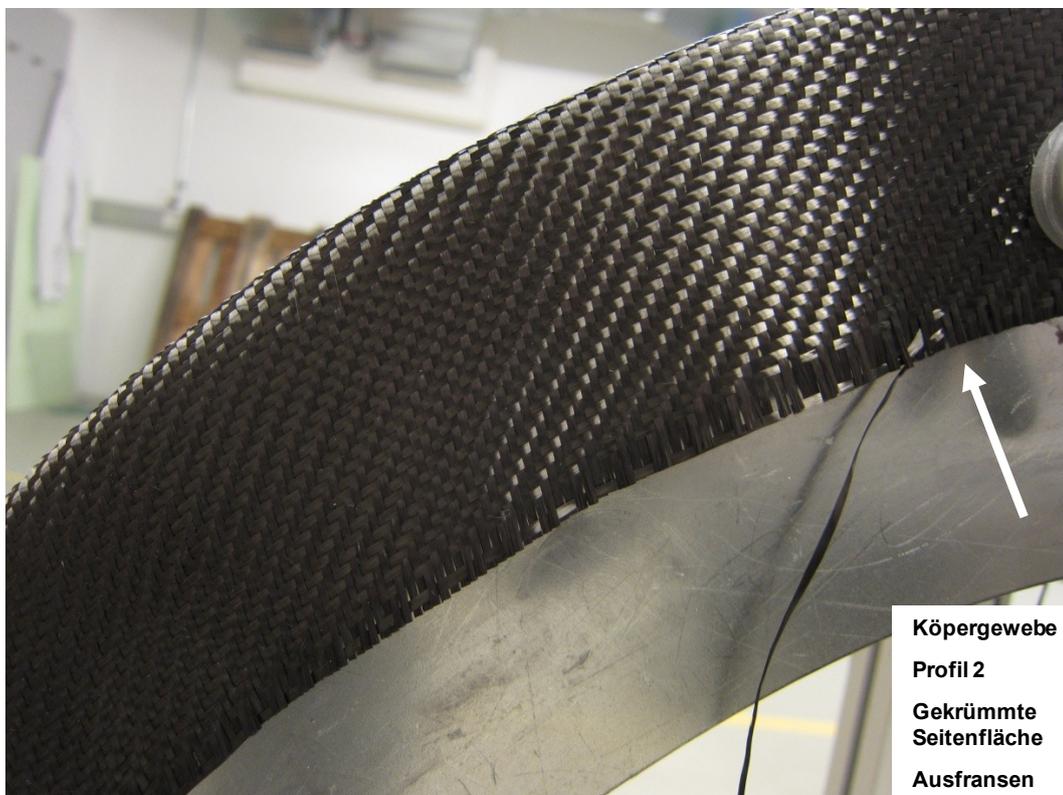


Abbildung 31: Ausfransen im gekrümmten Bereich des Profil 2 (Köpergewebe)

Die Fadenorientierung des Köpergewebes an Profil 1, 2 und 4 war sehr gut. Abbildung 32 zeigt das Köpergewebe an Profil 2. Die eingezeichneten roten Linien verdeutlichen den Faserverlauf entlang der Krümmung in Kett- und Schussrichtung. So ist erkennbar, dass die Kettfäden dem Verlauf der Krümmung über die gesamte Länge optimal folgen. Nur die Schussfäden weichen im unteren Bereich etwas vom Fadenverlauf ab. Dies ist jedoch ein Aspekt des Trellis Effektes, welcher nicht zu verhindern ist, denn durch diese Abweichung kann die Bildung einer Falte verhindert werden.

Die Abbildungen zu den Resultaten des Köpergewebes an Profil 4 sind im Anhang dargestellt.

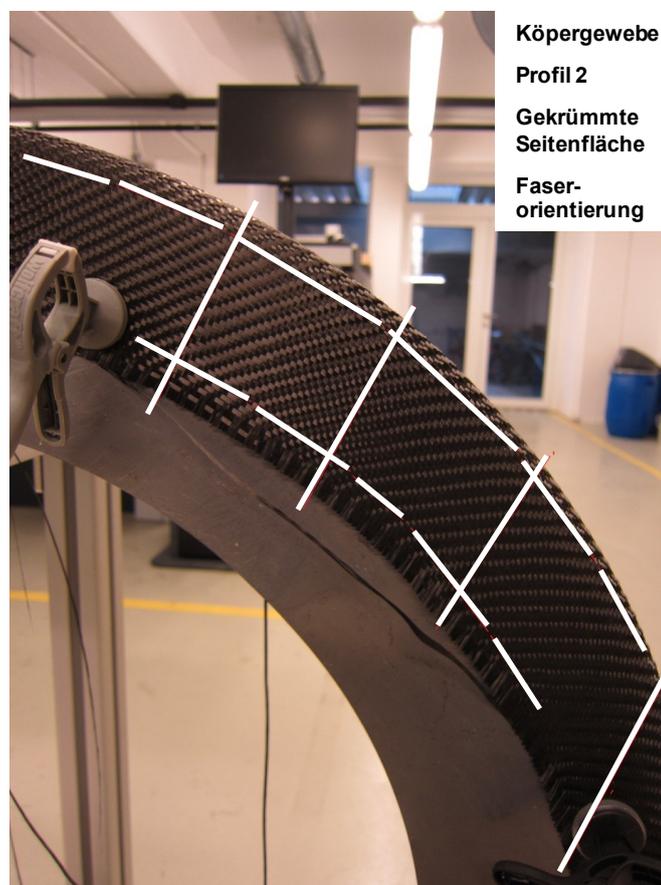


Abbildung 32: Faserverlauf von Kett- und Schussfäden des Köpergewebes

An Profil 2 kam es im letzten Viertel des gekrümmten Bereichs zu einem Verlust der Fadenorientierung. An der Deckfläche kam es zu einer Abweichung der

Fadenorientierung der Kett und Schussfäden, wie es in Abbildung 33 veranschaulicht ist. Aus dem geradlinigen Bereich kommend folgen die Kettfäden dem Verlauf der Formbiegung ohne Abweichung, bis im letzten Bereich die Fadenorientierung nach außen „abdriftet“. Dies ist die Ursache für die schlechtere Benotung des Köpergewebes an Profil 3. Die Ausrichtung der Schussfäden (Rote Linien quer zum Profilverlauf) ist über den gesamten Krümmungsbereich konstant. Weitere Abbildungen, insbesondere zum Resultat des Köpergewebes an Profil 4, sind im Anhang dargestellt.

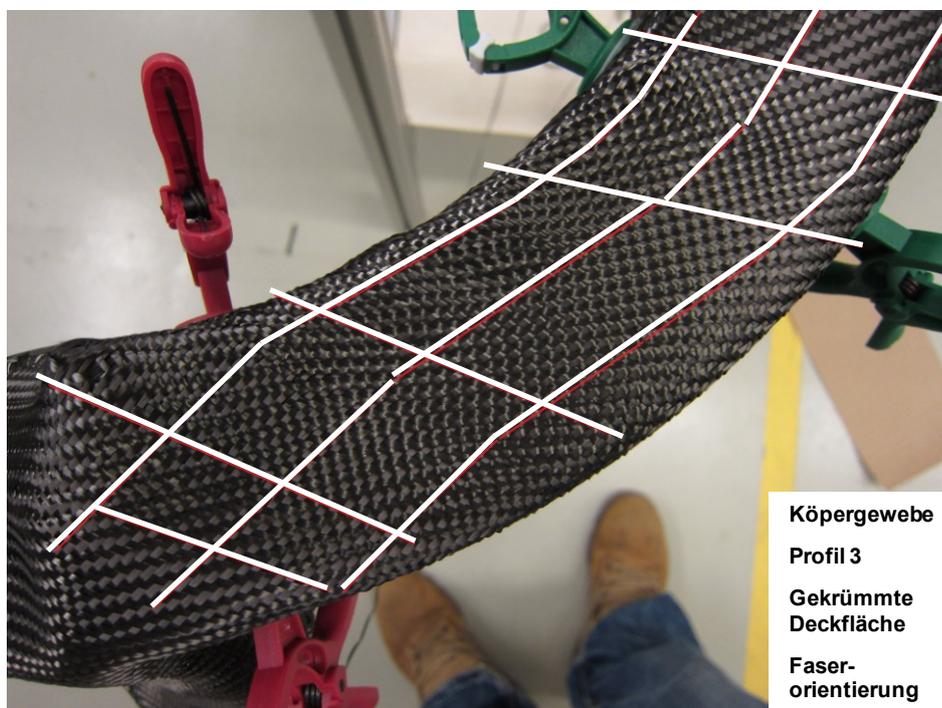


Abbildung 33: Verlust der Fadenorientierung von Köpergewebe an Profil 3

Im Gegensatz zum Köpergewebe konnte das Leinwandgewebe abgesehen von Profil 1 keines der Profile formgemäß abbilden. Die Ursache für das Scheitern war immer die Bildung von großen Falten wie Abbildung 34 zeigt.



Abbildung 34: Faltenbildung am Leinwandgewebe an Profil 2

Der Hauptfaktor für die besseren Resultate des Köpergewebes ist die Bindungsart. Die geringere Anzahl an Kreuzungspunkten und die gratartige Anordnung der Ondulationen im Köperstil gibt dem Gewebe wesentlich mehr Bewegungsfreiraum und ermöglicht bei Scherverformung einen höheren Grenzwinkel. Denn wie in Abbildung 35 zu sehen ist, wird beim Leinwandgewebe schon bei geringer Scherung des Textils eine Falte aufgeworfen. Die symmetrische Anordnung der Bindungspunkte sowie die hohe Anzahl der Ondulationen behindern das Gewebe an der Verformung. Das Köpergewebe zeigt im unteren Krümmungsbereich in Abbildung 36 schon eine deutlich höhere Scherverformung und lässt sich immer noch faltenfrei drapieren.

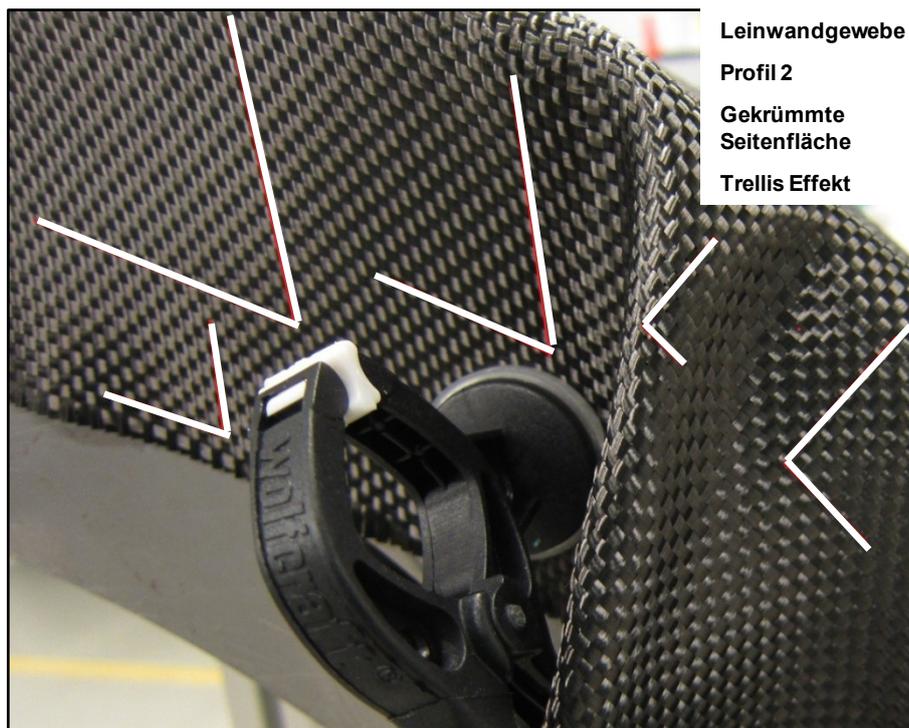


Abbildung 35: Trellis Effekt im Bereich der Faltenbildung bei Leinwandgewebe an Profil 2

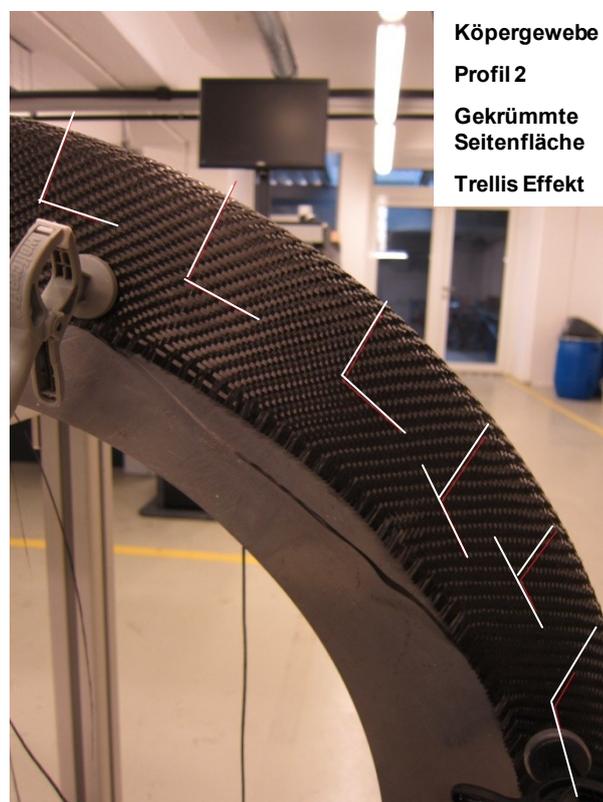


Abbildung 36: Trellis Effekt am Köpergewebe an Profil 2

5.3.2 Analyse der Drapierresultate der Gelege (NCF)

Abgesehen von Profil 1 gab es bei den NCF's nur ein positives Resultat (NCF (0/90); Profil 3). Die negativen Beurteilungen erfolgten bei allen Gelegen aufgrund von Faltenbildung. Als Beispiel sei in Abbildung 37 das NCF (-/0/+) auf Profil 4 angeführt. (Weitere Abbildungen zu den Resultaten der übrigen NCF's auf den restlichen Profilen sind im Anhang zu finden.)

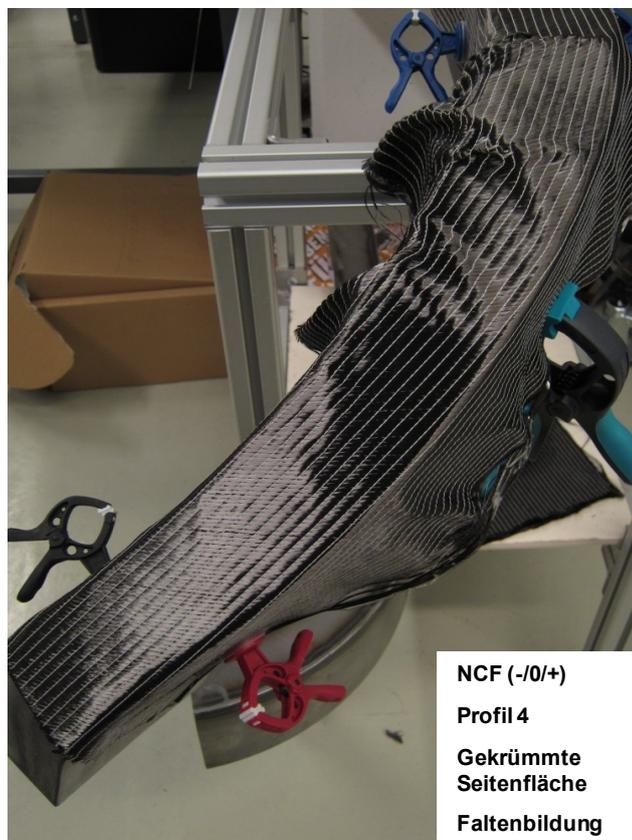


Abbildung 37: NCF (-/0/+) auf Profil 4

In Abbildung 38 ist das positive Resultat des NCF (0/90) zu sehen, welches auf Profil 3 eine faltenfreie Preform ohne Schäden lieferte.

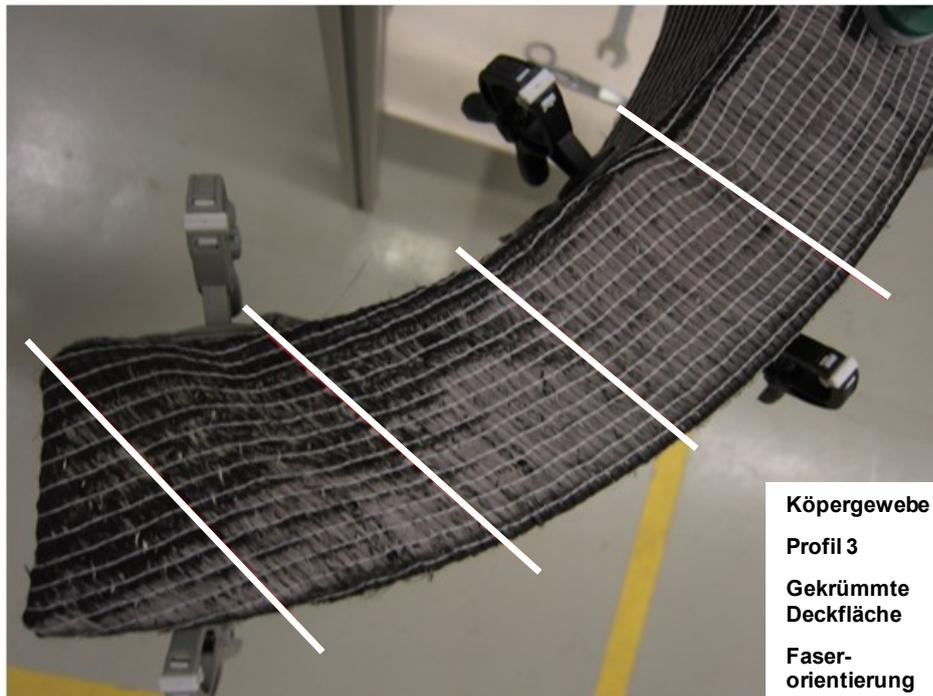


Abbildung 38: NCF (0/90) auf der Deckfläche von Profil 3

Die Qualität der Drapierung wurde nur durch Abweichungen der Faserorientierung im letzten Bereich der Krümmungslänge gedrückt, weswegen die Benotung Gut erfolgte. Im Gegensatz zu den Geweben (im speziellen Körpergewebe) zeigten die NCF's eine gute Handhabung und sehr gute Eigenschaften beim Ausfransen. Abbildung 39 zeigt das Ausfransen und die Fadenorientierung (detailliert in Abbildung 40). Anhand des Stitching-Verlaufs und der eingefügten Hilfslinien ist zu erkennen, dass die Fadenorientierung am Ende etwas abgleitet. Dies war jedoch nicht zu verhindern, da sonst auf der inneren Seitenfläche eine Falte entstanden wäre, welche die gesamte Note ins Negative gedrückt hätte.

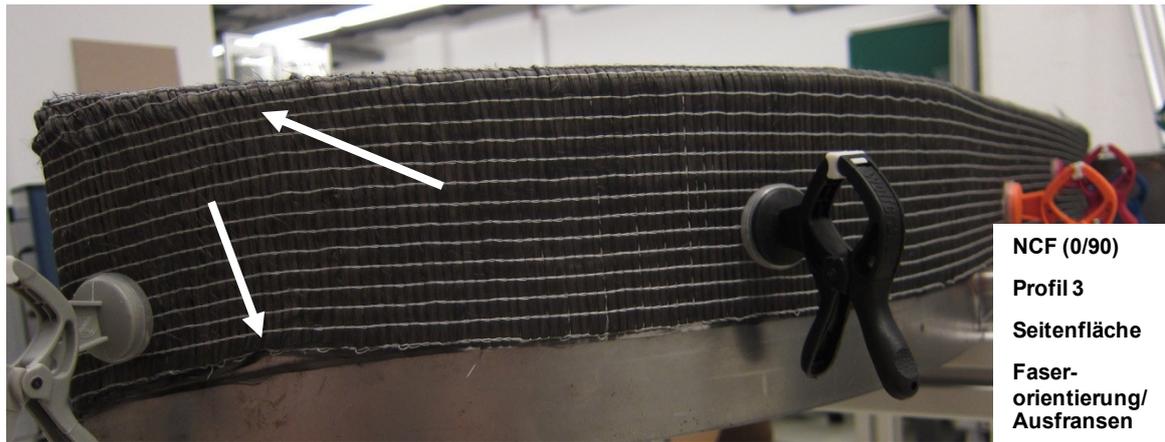


Abbildung 39: Ausfransen und Fadenorientierung des NCF (0/90) an Profil 3

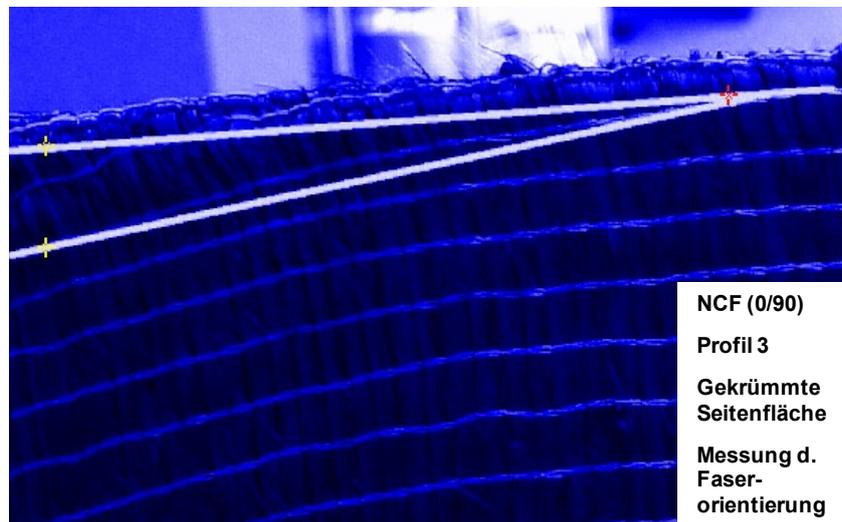


Abbildung 40: Verlust der Fadenorientierung von NCF (0/90) im Detail

Bei NCF (-/+) konnte auch der Einfluss der Stitching Richtung untersucht werden, da sich bei Drehung des Textils um 90° die Fadenorientierung nicht verändert. Aus diesem Grund wurden Proben angefertigt, bei welchen die Wirknaht entweder quer oder entlang der Preformlänge verlief.

Die Resultate, welche in Abbildung 41 und Abbildung 42 zu sehen sind, waren jedoch für beide Drapierungen negativ aufgrund der Bildung zu großer Falten. Die Größe der Falten war bei beiden Versuchen relativ ähnlich, wie in Abbildung 41

und Abbildung 42 zu erkennen ist. Insofern konnte kein Einfluss der Nahrichtung festgestellt werden. (Weitere Abbildungen sind im Anhang dargestellt.)

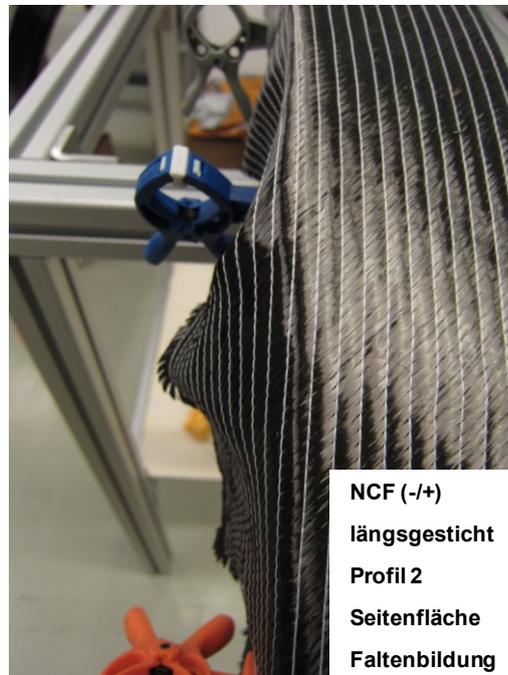


Abbildung 41: NCF (-/+) längsgesticht



Abbildung 42: NCF (-/+) quergesticht auf Profil 2

5.4 Einfluss der Drapierweise auf die Ergebnisse

5.4.1 Drapierweise der NCF

Der positive Abschluss der Drapierung von NCF (0/90) auf Profil 3 war erst nach mehreren Versuchen erfolgt. Dies hat zwei Gründe:

- Art und Verlauf der Drapierung und
- Art der Textilfixierung.

Unter Art und Verlauf der Drapierung ist die genaue Vorgehensweise bei der Textilverformung zu verstehen: An welcher Stelle wird das Textil zuerst aufgelegt, wird das Textil schon teilweise fixiert, wo wird das Textil befestigt? Bei Profil 3 wurden zwei unterschiedliche Arten der Drapierung versucht:

- Methode I: Befestigung des Textils an der äußeren Seitenfläche im gekrümmten und ungekrümmten Bereich und anschließende Drapierung nach Innen (Abbildung 43)
- Methode II: Befestigung des Textils an der gesamten inneren Seitenfläche und anschließende Drapierung nach Außen

Bei den Versuchen nach Methode I (Befestigung außen) wurden auf der Innenseite Falten aufgeworfen, welche erst durch „Wegstreichen“ und „Strecken“ teilweise entfernt werden konnten. Dieses Wegstreichen hatte jedoch zum Nachteil, dass das Textil oftmals Schäden durch Faserausbrüche und Faserlücken erlitt.



Abbildung 43: *Drapiermethode I: Von Außen nach Innen*

Die Methode II brachte jedoch das Ergebnis zustande, welches auch in Tabelle 12 angegeben ist. Der Vorteil dieser Methode ist, dass von Anfang an keine Falten auftreten, da das Textil unter (Zug-) Spannung auf die breitere Außenfläche gekrümmt wird. Auch die Notwendigkeit zur Nachbearbeitung am Textil reduziert sich beträchtlich, was die Gefahr von Textilschädigungen minimiert und eine höhere Textilqualität zur Folge hat. Durch das Wegfallen der Nachbearbeitung begrenzt sich der Drapiervorgang auf einige einfache Prozessschritte, was auch eine automatische Drapierung im Bereich des Möglichen erscheinen lässt.

Ein weiterer essentieller Faktor bei Methode II ist die Art der Fixierung. Beim Umklappen der Preform von der Innenfläche auf die Deck- und Außenfläche verschob und verzog sich das ganze Textil. In der ersten Versuchsreihe kamen noch Federklammern zur Anwendung, welche die Textilien mit hoher Kraft an die Innenseite des Profils pressten und somit keine Textilbewegungen mehr zuließen. Dies führte oftmals zu Schädigungen der Textilien, welche in Abbildung 44 und

Abbildung 45 dargestellt sind. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Preforms bis zur finalen Verformung noch nicht zu stark an das Profil zu heften. Die Magnetklemmen sind für diese Aufgabe besser geeignet, denn diese bewegen sich mit den Textilien mit und lassen diese unbeschadet.



Abbildung 44: Rovinglücke und Rovingbeschädigung

Abschließend wird hier festgehalten, dass beim NCF (0/90) die Drapierung unter Zugspannung positive Auswirkungen auf die Drapierbarkeit zeigte. Doch müssen bei dieser Drapierweise mögliche Schädigungen der Gelege beachtet werden. Insofern ist es notwendig, die Richtung und die Größe der angelegten Spannungen textiltgerecht zu wählen.



Abbildung 45: Rovingschädigung durch Klemmenbefestigung am NCF (0/90)

5.4.2 Drapierweise des Köpergewebe

Im Gegensatz zu den NCF's konnte für das Köpergewebe relativ rasch eine erfolgreiche Drapierweise entwickelt werden. Die Vorgehensweise war prinzipiell genau entgegengesetzt zur Drapiermethode der NCF's. Begonnen wurde mit der Flächenbedeckung an jenen Stellen, welche die wenigste Verformung benötigten (geradliniges Stück). Anschließend folgten die Bereiche mit steigendem Trellis Effekt. Die Drapierung der Fläche, welche die höchste Scherverformung benötigte, erfolgte zum Schluss. Insofern wurden Falten aus dem Gewebe „ausgearbeitet“.

Bei Profil 2 wurde das Textil auf der gesamten Deckfläche aufgelegt und fixiert. Durch einfache Faltung des Gewebes wurden anschließend die geradlinigen Seitenflächen belegt, von wo aus behutsam der Trellis Effekt über den gekrümmten Verlauf der Seitenflächen eingeleitet wurde.

Bei Profil 3 wurde zuerst die größere Außenfläche drapiert, anschließend die gekrümmte Deckfläche und zuletzt die Innenfläche.

Die Drapierung von Profil 4 erfolgte ähnlich zur Drapierweise von Profil 3. Das Gewebe wurde auf die Deckfläche im geradlinigen Bereich gelegt, und anschließend die Außenseite des Profils drapiert, da dort der geringste Trellis Effekt von Nöten war. Danach kam die Textilanpassung auf der Deckfläche an die Reihe und zuletzt die Innenseite des Profils. An der Innenseite im gekrümmten Bereich kam es immer zur Bildung einer Falte, welche durch Nachbesserung an der Deck- und Innenfläche aus der Krümmung in den geradlinigen Bereich verschoben wurde und dort beseitigt werden konnte. Durch diese Vorgehensweise konnte eine sehr gute Anpassung an das Profil 4 erreicht werden.

5.5 Analyse der Flächenänderungen bei den Profilen 1, 2 und 3

Durch die Verformung eines zweidimensionalen Textils in eine dreidimensionale Geometrie, ist es notwendig, die Form und Größe der Flächen im Krümmungsbereich zu kennen. In dieser Hinsicht wird hier eine Flächenanalyse der Profile 1, 2 und 3 angeführt.

Bei Profil 1 ist die Geometrie des umgekehrten U-Profils geradlinig. Aus diesem Grund haben alle drei Mantelflächen (zwei Seitenflächen und eine Deckfläche) eine rechteckige Form, wobei auch alle drei Flächen die gleiche Größe aufweisen und die Drapierung mit einer rechteckigen Preform passend ist.

Bei den Profilen 2 und 3 ist dies jedoch anders. Die zusätzliche Krümmung in vertikale bzw. horizontale Richtung ändert im gebogenen Bereich die Mantelflächen der Profile.

Durch die vertikale Krümmung des Profil 2 ändert sich die Gestalt der zwei Seitenflächen von einem Rechteck zu einem Viertelkreis. In diesem Fall ändert sich natürlich auch die Größe der Fläche. Die Seitenflächen (im Bereich der Krümmung) besitzen eine 10% geringere Fläche als die Deckfläche. Bei Erstellung einer einzigen rechtwinkligen Preform, deren Länge auf die Deckfläche angepasst ist, stehen für alle Mantelflächen gleich große Textilflächen zur

Verfügung, weswegen es an den gekrümmten Seitenflächen entweder zu einer Verschiebung aus dem Krümmungsbereich oder zu einer Kompression (Verdichtung) des Textils kommen muss.

Bei Profil 3 (horizontale Krümmung des U-Profiles) ändert sich die ursprüngliche Form etwas anders. Die Fläche der Deckseite ändert sich zu einem Viertelkreis und die zwei Seitenflächen bleiben (gebogene) Rechtecke, wobei die Beiden unterschiedlich groß sind. So ist die Fläche der rechtwinkligen Innenseite um 27% kleiner als die Außenseite.

Tabelle 13: Änderung der Flächen im Bereich der Krümmung

	Profil 2	Profil 3
Ra [cm]	30,0	21,0
Ri [cm]	24,0	15,0
La [cm]	47,1	32,0
Li [cm]	37,7	23,5
Aa [cm ²]	254,5	192,0
Ai [cm ²]		141,0
Adf [cm ²]	282,7	170,6
ΔA [cm ²]	28,3	51,0
ΔA [%]	10,0	26,6

Für das Köpergewebe ist es aufgrund des Trellis-Effektes möglich, diesen Flächenunterschied auszugleichen, denn bei Verschiebung der Fasern untereinander ändert sich auch die Fläche. Bei reiner Scherung eines quadratischen Stückes Gewebe ändert das Textil die Form zu einem Parallelogramm. Bei einer Seitenlänge von 6 cm und einem Grenzwinkel von 45° würde sich die Fläche des Parallelogramms im Vergleich zum Quadrat um ca. 30 % reduzieren. Wenn mitberücksichtigt wird, dass die Rovings sich während der Scherung auch enger aneinander schieben, dann wird die Fläche noch weiter reduziert.

Tabelle 14: Flächenänderung durch den Trellis Effekt

	Quadrat	Parallelogramm
s [cm]	6	6
A [cm ²]	36	25,5
ΔA [%]	29,3	

In Abbildung 46 ist mit roten Linien gekennzeichnet, wie stark sich der Trellis Effekt mit zunehmender Krümmungslänge ausprägt. Dadurch kann sich das vormals rechteckige Gewebestück (beinahe) optimal an die Geometrie- und Flächenänderung des Profil 2 anpassen.

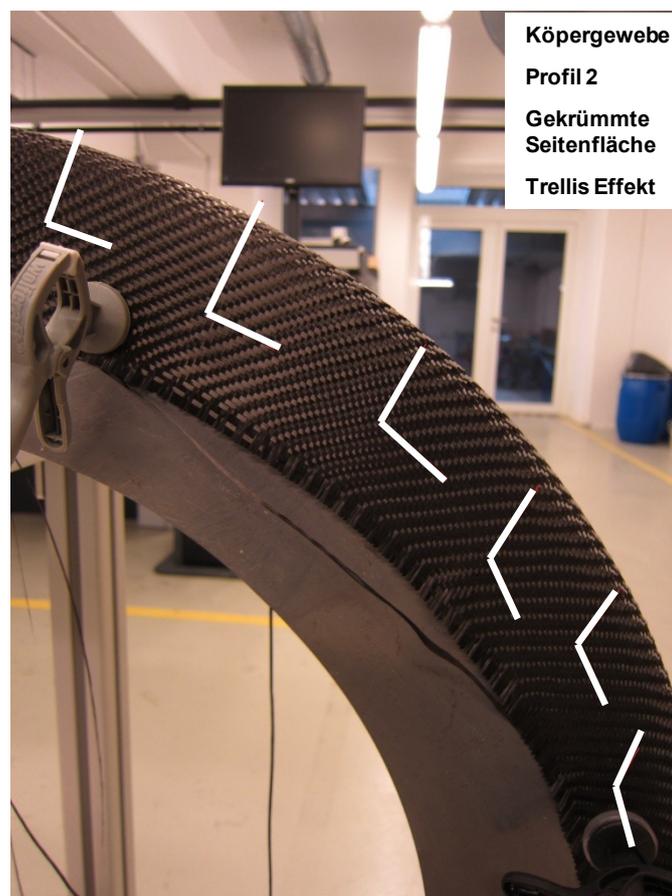


Abbildung 46: Trellis Effekt über die Krümmungslänge des Profil 2 (Körpergewebe)

Für das NCF (0/90) konnte während der Drapierung an Profil 3 ein ähnlicher Effekt beobachtet werden. Der Flächenunterschied zwischen Innen- und Außenseite wurde durch die (in Abschnitt 5.4) beschriebene Drapiermethode II „automatisch“ korrigiert. Nach der Befestigung des Textils an der Innenseite mittels Magneten erfolgte die Drapierung über den restlichen Profilbereich (Deck- und Außenfläche). Das Textil wurde zuerst im Krümmungsbereich umgebogen, wobei sich daraufhin das Textil im geradlinigen Bereich verzog, wie Abbildung 47 zeigt.

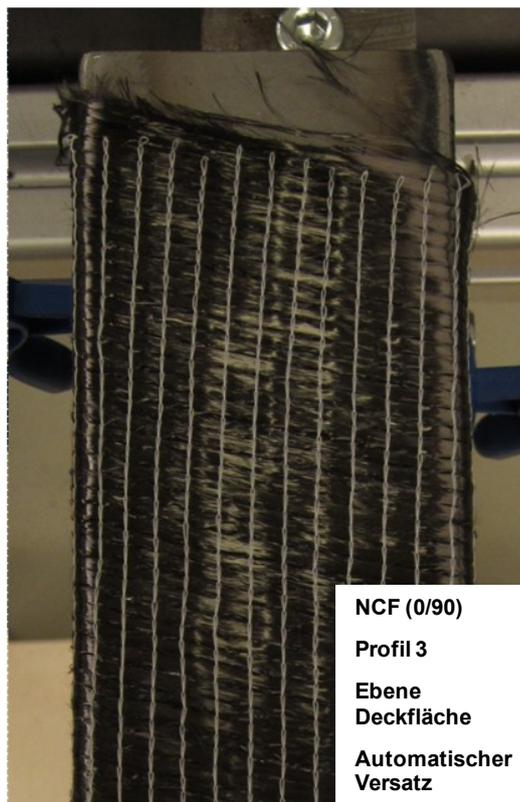


Abbildung 47: Automatischer Versatz des NCF (0/90)

In Abbildung 48 und Abbildung 49 ist zu erkennen, dass die Parallelrichtung der 90° Lagen über die gesamte Länge der gekrümmten Deckfläche zur Erhaltung der rechteckigen Fläche bestehen bleibt. Insofern konnte der Flächenunterschied zwischen Innen und Außenseite des Profils dadurch ausgeglichen werden, dass am Anfang und am Ende der Krümmung ein Versatz der 90° Lage in Kauf genommen wurde. Dieser Umstand ermöglichte eine faltenfreie Drapierung ohne Schädigungen des Textils. Auch die Fadenorientierung des gesamten Textils war

durchwegs positiv, denn die 0°Lage (mit doppelter Rovingdicke) hatte bis auf den Bereich am Krümmungsende immer einen optimalen Faserverlauf (Abbildung 50), was für gute strukturmechanischen Eigenschaften sorgen sollte.

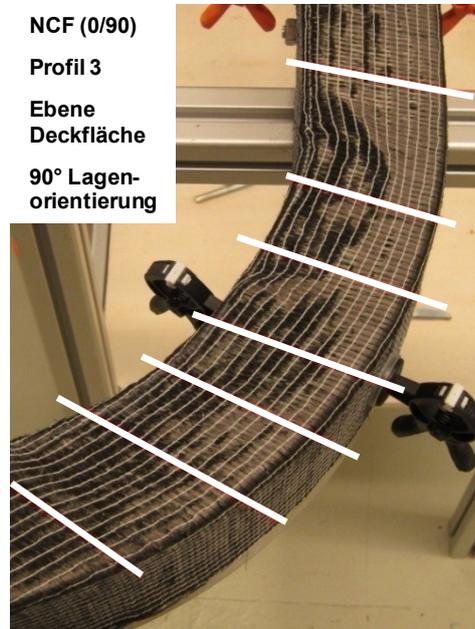


Abbildung 48: Fadenorientierung der 90° Lage am Beginn der Krümmung

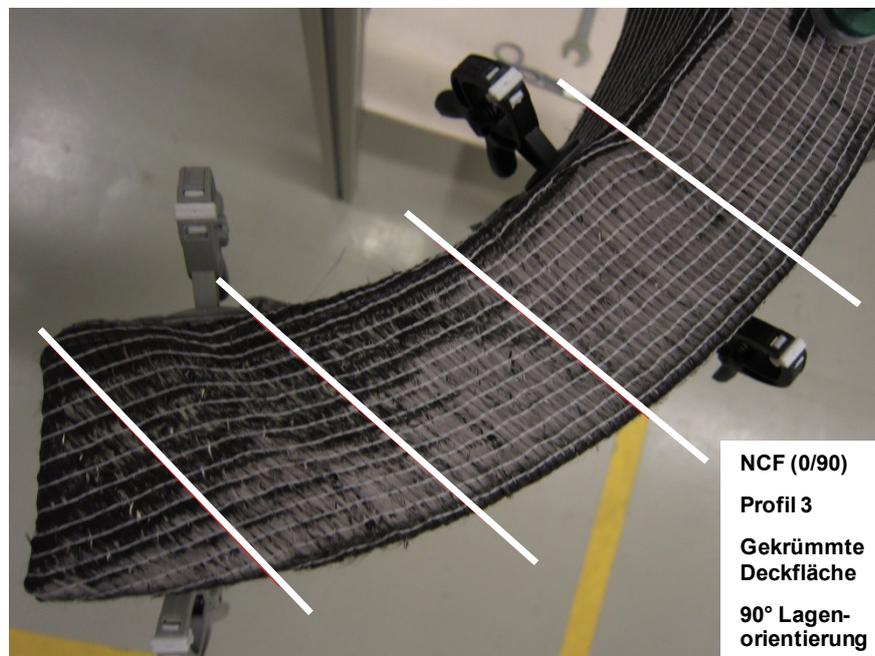


Abbildung 49: Fadenorientierung der 90° Lage am gekrümmten Ende



Abbildung 50: Verlust der Faserorientierung am Ende des Krümmungsbereichs

Mehr Versatz konnte ohne Beschädigung des Textils nicht erreicht werden. Die Ursache für dies ist im Stitching zu suchen. Eine etwas geringere Spannung der Wirkfäden könnte eine noch bessere Fadenorientierung ermöglichen.

Interessanterweise ist der maximale Flächenunterschied bei Profil 3 bedeutend größer als bei Profil 2, dennoch konnte Profil 2 mit dem NCF (0/90) nicht erfolgreich drapiert werden. Für dieses Profil konnte während der Durchführung der Experimente keine Drapierweise gefunden werden, welche wie bei Profil 3 einen Erfolg „automatisch“ herbeigeführt hat. Durch Versatz der Seitenflächen (Abbildung 51) könnten möglicherweise die NCFs (0/90) und (-/+) auf dieses Profil ohne Falten drapiert werden. Vor allem das NCF (-/+) mit querverlaufender Naht sollte so ein positives Resultat erreichen.

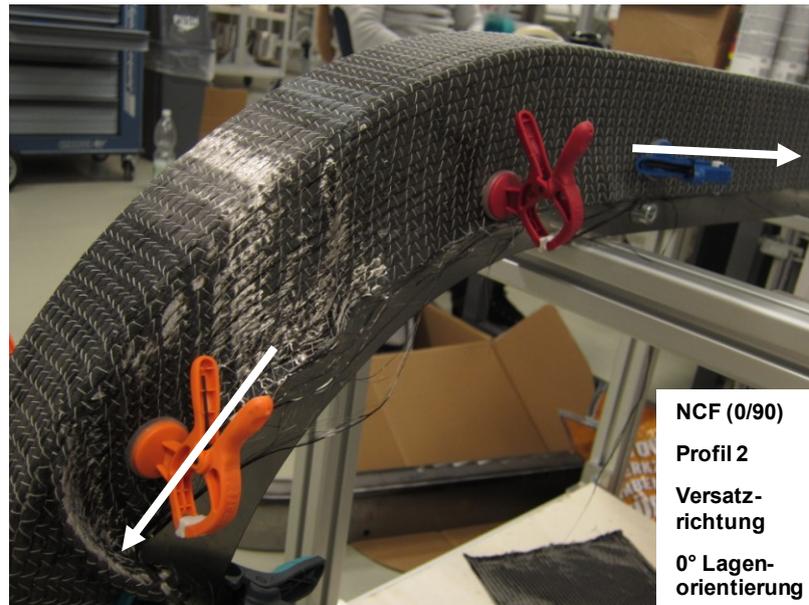


Abbildung 51: Richtung des Versatzes an Profil 2

5.6 Änderung der Preformgeometrie

Für eine erfolgreiche Drapierung des Profil 2 mit triaxialem NCF musste eine neue Gestalt der Preform erdacht werden. Abbildung 52 zeigt eine entworfene Geometrie der Preform für das Profil 2. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Rechtecken wurde bei dieser Form auf einen flächen- und krümmungsgerechten Zuschnitt geachtet.



Abbildung 52: Flächengerechter Zuschnitt für das Profil 2 aus NCF (-/0/+)

Mit diesem Zuschnitt ließ sich das Profil 2 schnell, einfach und präzise drapieren. Die Drapierzeit sank um ein Vielfaches, da weder auf behutsame Weise ein formgerechter Trellis Effekt eingeleitet noch irgendeine spezielle Art der Drapierung angewandt werden musste.

Durch die genaue Anpassung der Flächen an das Profil erfolgte die Krümmung des Textils spannungsfrei, ohne Faserverlust und ohne Schädigungen wie Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen.

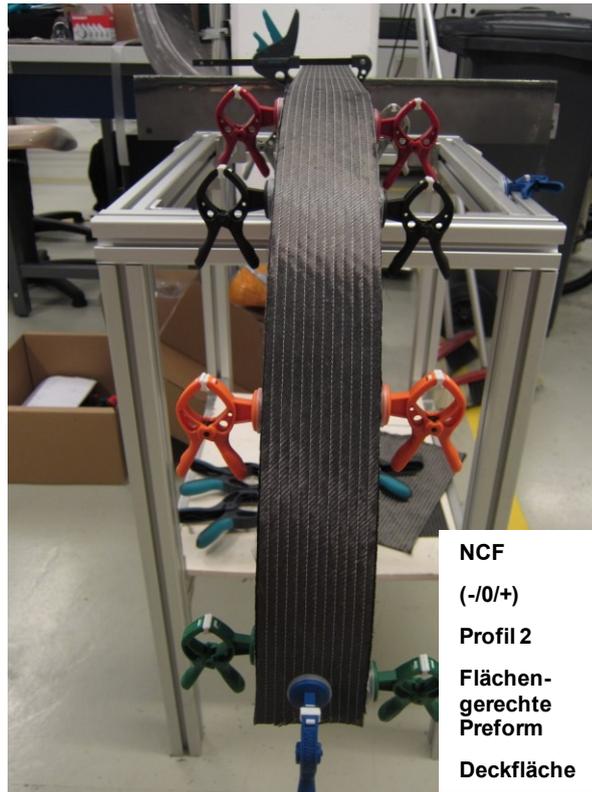


Abbildung 53: Drapierung mit flächengerechtem Zuschnitt eines NCF (-/0/+) an Profil 2

Mit dieser Art von Preform könnte auch schon an Aspekte wie Reproduzierbarkeit, Automation und Mehrschichtendrapierung gedacht werden. Durch die Vereinfachung der Drapiermethode wäre es ohne Probleme möglich einige Textilschichten zu stapeln und diese in einem Schritt auf das Profil aufzubringen. Im Hinblick auf eine gewünschte Automatisierung ist diese Art der Drapierung die Vielversprechendste, denn es sind nur einige, wenig komplexe Schritte notwendig um die Preformherstellung durchzuführen:

- Stapeln der benötigten Preformschichten
- Aufbringen der Preform auf die Deckschicht
- Fixierung der Deckfläche
- Genaue Anpassung an die Seitenflächen
- Fixierung der Seitenflächen

Bei allen anderen Drapiermethoden ist eine gleichzeitige Drapierung von mehreren Schichten nur schwer vorstellbar, da jede einzelne Schicht manuell genau an das Profil angepasst werden muss.



Abbildung 54: Drapierung mit flächengerechtem Zuschnitt eines NCF (-/0/+) an Profil 2

Ein schwerwiegender Nachteil dieser Preform ist die Durchtrennung der Fadenlagen, und somit der Verlust an durchgehender Faserverstärkung. An den Kanten im Krümmungsbereich ist kein durchgehender Faserverlauf mehr vorhanden und die Frage drängt sich auf, ob das Bauteil in diesem Bereich nicht entscheidend geschwächt wird. Insofern bedarf diese Methode der Preformherstellung noch eines zusätzlichen Prozessschrittes zur Stärkung der gekrümmten Kanten und einer genauen Analyse der mechanischen Eigenschaften. Ein Lösungsansatz könnte der Einsatz der Nähetechnik sein.

Zwei weitere negative Punkte dieser Preformgeometrie sind ein erhöhter Verschnitt sowie der Verlust der Fadenorientierung an den Seitenflächen im gekrümmten Bereich. Durch den gebogenen Zuschnitt geht dort die Fadenorientierung verloren und es kommt zu einer hohen Vergrößerung der benötigten textilen Fläche, was zu erhöhten Materialkosten führen würde. Insofern müsste hier angedacht werden, die Preform auf drei Teile aufzuteilen wie in Abbildung 55 angedeutet. So könnte die Faserorientierung in den gebogenen Seitenflächen optimiert und der Ausschuss minimiert werden. Neue Nachteile wären allerdings weitere Fadendurchtrennungen und ein deutlich erhöhter Aufwand für die Preformherstellung.

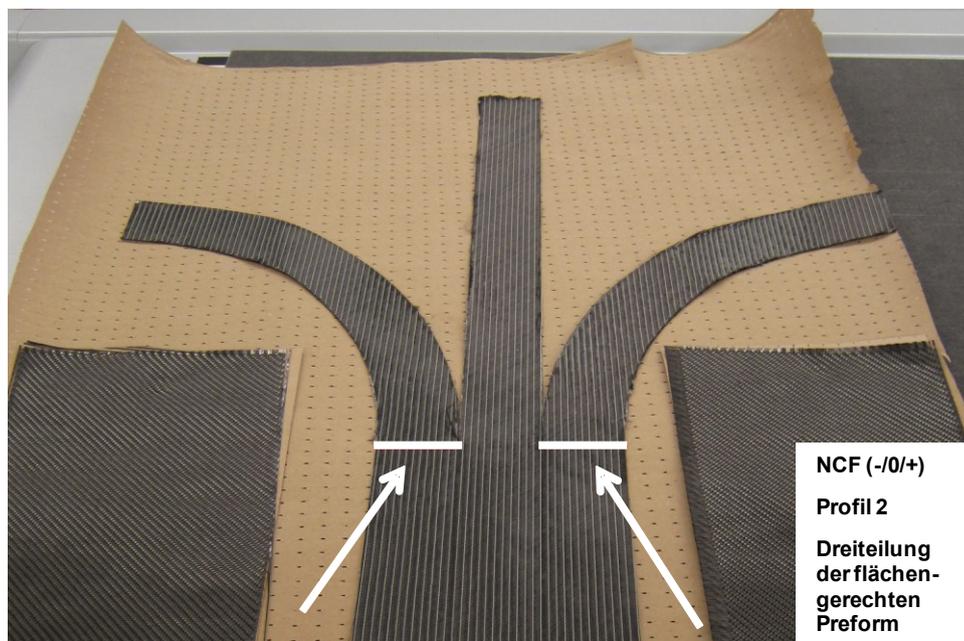


Abbildung 55: Dreiteilung der Preform

5.7 Bestimmung der textilen Biegesteifigkeit nach Cantilever

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Biegesteifigkeit der verwendeten Textilien mit dem Verfahren nach Cantilever bestimmt. In Tabelle 15 sind die gemessenen Überhanglängen sowie die durchschnittliche Überhanglänge $\bar{\delta}$ der einzelnen

Textilien angegeben. Weiters beinhaltet die Tabelle auch die Standardabweichung σ der einzelnen Resultate. Für das Gelege (-/+) wurde die Überhanglänge zweimal mit unterschiedlicher Nahtrichtung gemessen:

- Stitching parallel zur Versuchsrichtung (-/+)_{II} und
- Stitching quer zur Versuchsrichtung (-/+)_L.

Tabelle 15: Gemessene Überhanglängen

Lü [cm]	(+/0/-)	(-/+) _{II}	(-/+) _L	(0/90)	Köper	Leinwand
1	15,5	11,0	9,5	20,5	7,5	12,0
2	16,5	11,0	9,5	21,0	9,5	11,5
3	16,5	11,0	9,5	20,0	10,0	11,5
4	16,0	11,5	10,0	20,5	11,5	12,0
5	16,5	11,5	9,5	20,5	10,0	11,5
ø [cm]	16,2	11,2	9,6	20,5	9,7	11,7
σ [cm]	0,4	0,3	0,2	0,4	1,4	0,3
σ [%]	2,8	2,4	2,3	1,7	14,9	2,3

In Tabelle 16 sind die Biegesteifigkeiten der einzelnen Materialien und der einzelnen Versuche angegeben, welche mit den Formeln (2) und (3) berechnet wurden. Die Tabelle beinhaltet auch die durchschnittliche Biegesteifigkeit sowie die Standardabweichung (absolut und prozentuell) der jeweiligen textilen Biegesteifigkeiten.

Tabelle 16: Resultate der Biegesteifigkeiten nach der Cantilever Methode

B [mN*cm ²]	(+/0/-)	(-/+) _{II}	(-/+) _L	(0/90)	Köper	Leinwand
1	816,5	265,4	171,0	1888,9	37,2	344,5
2	984,9	265,4	171,0	2030,5	75,7	303,2
3	984,9	265,4	171,0	1754,0	88,3	303,2
4	898,1	303,2	199,4	1888,9	134,3	344,5
5	984,9	303,2	171,0	1888,9	88,3	303,2
ø [mN*cm ²]	933,9	280,5	176,6	1890,2	84,8	319,8
σ [mN*cm ²]	75,6	20,7	12,7	97,8	34,7	22,6
σ [%]	8,1	7,4	7,2	5,2	40,9	7,1

In Abbildung 56 sind die Resultate der durchschnittlichen Biegesteifigkeit sowie die Standardabweichung der unterschiedlichen Textilien bildlich dargestellt. Das NCF (0/90) weist die mit Abstand höchste Biegesteifigkeit auf, was aufgrund der 0°- Lage mit doppelter Garnfeinheit nicht verwundert. Auch das Gelege (-/0/+) mit dem gleichen Flächengewicht wie das NCF (0/90) besitzt eine viel höhere Biegesteifigkeit als die restlichen Textilien. Das NCF (-/+) mit dem Nahtverlauf in Probenrichtung weist eine beinahe doppelt so hohe Biegesteifigkeit auf als die Proben mit querverlaufender Nahtrichtung.

Die hohe Standardabweichung der Biegesteifigkeiten des Köpergewebes resultiert aus der geringen Qualität der Versuchsproben. Vor und während der Versuchsdurchführung fransten diese Proben aus, wodurch reproduzierbare Versuche mit diesem Material nicht möglich waren.

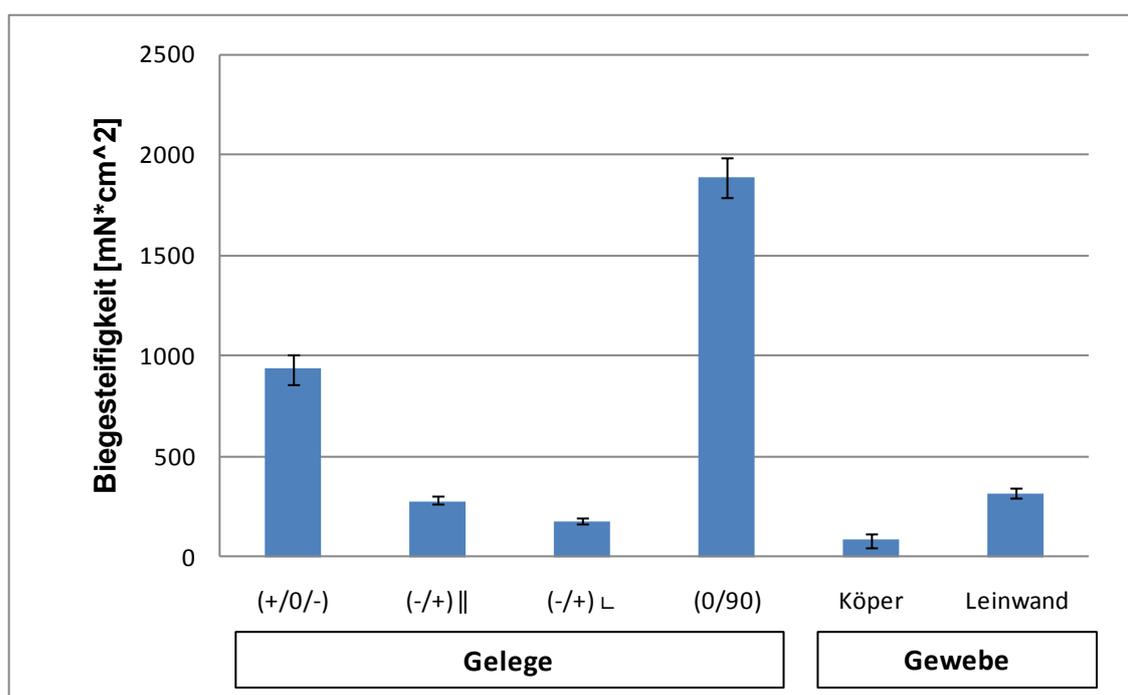


Abbildung 56: Resultate der Biegesteifigkeit mittels Cantilevertest

Ein eindeutiger Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Drapierbarkeit von Textilien kann nicht festgestellt werden, denn es kann keine direkte Verbindung zwischen

den Resultaten der Drapierungen und der Biegesteifigkeit der Textilien erkannt werden.

Obwohl das NCF (0/90) eine deutlich höhere Biegesteifigkeit als das NCF (-/0/+) aufweist, zeigte das (0/90) Gelege aber mit zwei positiven Drapierungen bessere Resultate als das triaxiale Gelege (1 positives Ergebnis). Auch das NCF (-/+) mit vielfach geringeren Biegesteifigkeiten zeigten nur ein positives Drapierresultat.

Die (-/+) Gelege mit unterschiedlichem Wirkfadenverlauf besitzen zwar unterschiedliche Biegesteifigkeiten, zeigten aber sehr ähnliche Drapierresultate. Keines der beiden Textilien konnte eine doppelt gekrümmte Form ohne Falten drapieren. Die Größe der aufgetretenen Falten war bei beiden Textilien relativ ähnlich.

Einzig bei den Geweben konnte das Köpergewebe mit geringerer Biegesteifigkeit deutlich bessere Ergebnisse erzielen als das Leinwandgewebe. Auch unter Einbeziehung der hohen Standardabweichung ist die Biegesteifigkeit dieses Gewebes um ein Vielfaches geringer als jene des Leinwandgewebes. Dieser Aspekt ist auch nachvollziehbar, da die höhere Anzahl an Ondulationen die unterschiedlichen Textilfäden besser aneinander bindet und dem Leinwandgewebe somit eine höhere Steifigkeit verleiht.

Für eine genauere Analyse des Biegeverhaltens der Textilien könnte eine vom Biegemoment abhängige Biegesteifigkeit ermittelt werden, um ein nicht linear elastisches Biegeverhalten der Textilien in die Ermittlung miteinzubeziehen.

6 Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Drapierfähigkeit von zwei Carbonfasergeweben (Köper- und Leinwandgewebe) und drei Carbonfasergelegen (NCF (-/0/+), (0/90), (-/+)) wurden Drapierversuche an vier unterschiedlich gekrümmten Profilen durchgeführt. Zur Bestimmung der Biegesteifigkeit der Textilien wurde der Versuch nach Cantilever durchgeführt.

Um die Versuche qualitativ und quantitativ beurteilen zu können und um diese untereinander auch vergleichbar zu machen, wurde am Beginn der Arbeit ein Beurteilungsschema entwickelt, welches sowohl eine schadlose, faltenfreie Anpassung des flächigen Textils an das 3D-Profil als auch die Auswirkungen der Drapierung auf die mechanischen Eigenschaften (Fadenorientierung, Faserverluste) berücksichtigen sollte.

Trotz strikter Auslegung des Bewertungssystems konnten alle Profile erfolgreich drapiert werden, wobei dies vor allem dem Köpergewebe zu verdanken ist. Ein gutes Verformungsverhalten aufgrund der geringen Anzahl an Kreuzungen und der schrägen Anordnung der Ondulationen ermöglichte diesem Gewebe, alle Krümmungen der Profile ohne Schädigung zu bewältigen und dabei auch an drei von vier Profilen eine sehr gute Faserorientierung zu erreichen. Negativ ist bei diesem Gewebe nur die hohe Neigung zum Ausfransen anzumerken.

Mit den NCFs konnte abgesehen von Profil 1 nur ein positives Resultat erzielt werden. Das NCF (0/90) erreichte eine gute Drapierung an Profil 3, wobei die Note Gut nur durch eine geringe lokale Abweichung der Faserorientierung gedrückt wurde.

Ein essentieller Aspekt bei der Drapierung ist ein behutsamer textilgerechter Umgang mit den Materialien und die richtige Drapierweise. Der Ort der ersten

Textilanbringung am Profil, die Art der Fixierung sowie ein bestimmtes Vorgehen bei der Krümmung des flächigen Textils sind für eine erfolgreiche Drapierung von hoher Bedeutung. Dabei ist diese Drapierweise für jedes Textil und jedes Profil unterschiedlich. Das erfolgreiche Resultat der NCF's wurde mit einer genau umgekehrten Drapiermethode des Köpergewebes erzielt.

Eine erfolgreiche Drapierung mit dem triaxialen NCF scheint nur mit der Herstellung von flächengerechten Preforms möglich zu sein, wobei die Krümmungsradien und die Größe der gekrümmten Flächen beim Zuschnitt berücksichtigt werden. Mit diesen Preforms gelang eine einfache, schnelle und reproduzierbare Drapierung ohne Falten und Ausfransen. Im Gegensatz zu allen anderen Drapierarten könnte mit diesen Zuschnitten eine gleichzeitige Drapierung von mehreren Textilschichten erfolgen. Auch eine Automatisierung der Drapierung scheint bei dieser Methode realisierbar zu sein. Ein schwerwiegender Nachteil dieser SpezialPreforms ist die Durchtrennung der Verstärkungsfasern entlang der Krümmungskanten, was möglicherweise eine unannehmbare Schwächung der mechanischen Eigenschaften des Bauteils mit sich bringen würde.

Die Ermittlung der Biegesteifigkeit der Textilien nach der Methode von Cantilever konnte keine besonderen Erkenntnisse liefern. Insbesondere bei den NCF's war kein Zusammenhang zwischen der textilen Biegesteifigkeit und den Drapierresultaten zu erkennen.

7 Literatur

- [1] Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften, Springer Verlag, Berlin, 2011.
- [2] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Arne, M.; Schulte, T.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Roland Berger Strategy Consultants; VDMA, 2012.
- [3] Schnabel, A.; Grundmann, T.; Kruse, F.; Gries, T.: Serienproduktion von Faserverbundkunststoffen: Automatisiertes textiles Preforming, In: *Lightweight Design* (2009) 3, S. 44–47.
- [4] Beier, U.: Kosteneffiziente Preformprozesskette für CFK-Strukturen, In: *Kunststofftechnik* (2009) 5, S. 279–98.
- [5] Ehinger, C. A.: Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen: Dissertation an der Technischen Universität München, München, 2012.
- [6] Schnabel, A.; Krieger, H.; Appel, L.; Gries, T.: Test stand for drapeability analysis of Non-Crimp Fabrics: *Sampe Proceedings 2013*, Long Beach, USA, 6-9 Mai 2013
- [7] Hancock, S. G.; Potter, K. D.: Inverse drape modelling—an investigation of the set of shapes that can be formed from continuous aligned woven fibre reinforcements, In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36 (2005) 7, S. 947–53.
- [8] Neitzel, M.; Mitschang, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004.
- [9] Mouritz, A. P.; Leong, K. H.; Herszberg, I.: A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites, In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (1997) 12, S. 979–91.
- [10] Molnár, P.; Ogale, A.; Lahr, R.; Mitschang, P.: Influence of drapability by using stitching technology to reduce fabric deformation and shear during thermoforming, In: *Composites Science and Technology* 67 (2007) 15-16, S. 3386–93.

- [11] Mitschang, P.; Weimer, C.: Komplexe-multitextile preforms: Potenziale der Nähetechnik, In: Kunststoffe 90 (2000) 4, S. 114–17.
- [12] Mills, A.: Automation of carbon fibre preform manufacture for affordable aerospace applications, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 32 (2001) 7, S. 955–62.
- [13] Weimer, C.; Preller, T.; Mitschang, P.; Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part I: edges, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (2000) 11, S. 1261–68.
- [14] Weimer, C.; Preller, T.; Mitschang, P.; Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part II: holes, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (2000) 11, S. 1269–77.
- [15] Grieser, T.; Rieber, G.; Mitschang, P.: Production of continuously formed high performance preforms for FRPC profiles: European Conference on Composite Materials, Venedig, Italien, 24 - Juni 2012.
- [16] Kenkare, N.; May-Plumlee, T.: Evaluation of drape characteristics in fabrics, In: International Journal of Clothing Science and Technology 17 (2005) 2, S. 109–23.
- [17] Mohammed, U.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (2000) 12, S. 1409–20.
- [18] Mohammed, U.; Lekakou, C.; Dong, L.; Bader, M. G.: Shear deformation and micromechanics of woven fabrics, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (2000) 4, S. 299–308.
- [19] Launay, J.; Hivet, G.; Duong, A. V.; Boisse, P.: Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements, In: Composites Science and Technology 68 (2008) 2, S. 506–15.
- [20] Bilbao, E. de; Soulat, D.; Hivet, G.; Gasser, A.: Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements, In: Experimental Mechanics 50 (2010) 3, S. 333–51.

- [21] Gereke, T.; Döbrich, O.; Hübner, M.; Cherif, C.: Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 46 (2013), S. 1–10.
- [22] Lomov, S. V.; Boisse, P.; Deluycker, E.; Morestin, F.; Vanclooster, K.; Vandepitte, D.; Verpoest, I.; Willems, A.: Full-field strain measurements in textile deformability studies, In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 39 (2008) 8, S. 1232–44.
- [23] Willems, A.; Lomov, S. V.; Verpoest, I.; Vandepitte, D.: Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements, In: Composites Science and Technology 68 (2008) 3-4, S. 807–19.
- [24] Page, J.; Wang, J.: Prediction of shear force and an analysis of yarn slippage for a plain-weave carbon fabric in a bias extension state, In: Composites Science and Technology 60 (2000) 7, S. 977–86.
- [25] Chen, Q.: Biegeeigenschaften von Rechts-Rechts-Gestricken, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2004.
- [26] DIN 53362: Prüfung von Kunststoff-Folien und von textilen Flächengebilden (außer Vliesstoffe), mit oder ohne Deckschicht aus Kunststoff Bestimmung der Biegesteifigkeit Verfahren nach Cantilever, Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [27] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen: Halbzeuge und Bauweisen, Springer Verlag, Berlin [u.a.], 1996.
- [28] Mersmann, C.: Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau, Apprimus Verlag, Aachen, 2012.
- [29] Rieber, G. M.: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe, Dissertation an der Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2011.
- [30] Gurit Holding AG. URL: www.gurit.com/files/documents/guide-to-composites-v5pdf.pdf. Abrufdatum 28.01.2014.
- [31] Wiggers, J.: Analysis of textile deformation during preforming for Liquid Composite Moulding: Dissertation an der University of Nottingham, Nottingham, Juli, 2007.
- [32] Lomov, S. V.: Non-Crimp Fabric Composites: Manufacturing, Properties And Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011.

- [33] Potter, K. D.: Influence of the detailed structure of two variants of non-crimped carbon fabric on the drape properties, In: *Advanced Composites Letters* (2002) Vol. 11, Nr. 6, S. 285–92.
- [34] Loendersloot, R.; Lomov, S. V.; Akkerman, R.; Verpoest, I.: Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part V: geometry of sheared biaxial fabrics, In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (2006) 1, S. 103–13.
- [35] Lomov, S. V.; Barburski, M.; Stoilova, T.; Verpoest, I.; Akkerman, R.; Loendersloot, R.; Thije, R.: Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 3: Biaxial tension, picture frame and compression tests of the preforms, In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36 (2005) 9, S. 1188–206.

8 Verwendete Symbole und Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
NCF	NonCrimpFabric	
B	Biegesteifigkeit	mN*cm
l_0	Überhanglänge der Probe	cm
F_L	Längenbezogene Gewichtskraft in Abhängigkeit des Flächengewichts	mN/cm
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
m	Masse der Probe	g
l	Länge der Probe	cm
Ra	Außenradius des Profils	cm
Ri	Innenradius des Profils	cm
La	Länge der gekrümmten Außenkante des Profils	cm
Li	Länge der gekrümmten Innenkante des Profils	cm
Aa	Flächeninhalt der äußeren Seitenfläche des Profils	cm ²
Ai	Flächeninhalt der inneren Seitenfläche des Profils	cm ²
Adf	Flächeninhalt der Deckfläche	cm ²
ΔA	Differenz der Flächeninhalte	cm ²
ΔA [%]	Differenz der Flächeninhalte in Prozent	%
s	Länge der Seitenkante (Quadrat, Parallelogramm)	cm

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Textilverformung durch reine Scherung	15
Abbildung 2:	Schema des Schrägzugversuchs (Biaxial extension test)	17
Abbildung 3:	Schema des Scherrahmenversuches (Picture frame test)	18
Abbildung 4:	Bindungspatrone eines Gewebes mit 4 Rapporten	23
Abbildung 5:	Leinwandbindung (9 Rapporte)	24
Abbildung 6:	Schusskörperbindung mit Z-Grat und mit S-Grat	25
Abbildung 7:	Erweiterte Körperbindung (4 Rapporte)	26
Abbildung 8:	Abgeleitete Leinwandbindung und Kreuzkörperbindung	26
Abbildung 9:	Multiaxialgelege mit fünf Lagen [29]	31
Abbildung 10:	Modulare Drapierstation mit den Drapierprofilen	38
Abbildung 11:	Mittels CNC-Cutter vorkonfektionierte CF Preform aus Leinwandgewebe	40
Abbildung 12:	Verwendete Magnet- und Federklemmen	41
Abbildung 13:	Dokumentation von Verformungen und Schäden	44
Abbildung 14:	Veranschaulichung der Faserorient. im Krümmungsbereichs	43
Abbildung 15:	Ermittlung der Abweichung der Faserorientierung	44
Abbildung 16:	Winkel der Abweichung der Faserorientierung	45
Abbildung 17:	Versuchsprüfstand des Cantilever Tests	45
Abbildung 18:	Auftreffen der Probe auf der Prüfstandsebene	46
Abbildung 19:	Faltenbildung während der Drapierung an einem NCF (-/0+)	49
Abbildung 20:	Reversible Faltenbildung an einem Körpergewebe	50
Abbildung 21:	Während der Drapierung aufgetretene Rovingschlaufen an einem NCF (-/+)	51
Abbildung 22:	Während der Drapierung aufgetretene Rovingschlaufen an einer Falte (NCF (-/0/+)	52
Abbildung 23:	Faserausbruch an einem NCF (0/90)	53
Abbildung 24:	Faserausbruch mit vollständigem Rovingbruch an NCF (0/90) ...	54
Abbildung 25:	Stitchingverlauf durch Roving an einem NCF (0/90)	54
Abbildung 26:	Rovinglücke mit Rovingbeschädigung an einem NCF (0/90)	55
Abbildung 27:	Stitching Schaden	56

Abbildung 28: Beschädigung der Rovings durch die Stitchingfäden	56
Abbildung 29: Ausfransen während der Drapierung von Köpergewebe an Profil 2	65
Abbildung 30: Köpergewebe im ungekrümmten Bereich des Profil 2 ohne Ausfransen	66
Abbildung 31: Ausfransen im gekrümmten Bereich des Profil 2 (Köpergewebe)	66
Abbildung 32: Faserverlauf von Kett-und Schussfäden des Köpergewebe.....	67
Abbildung 33: Verlust der Fadenorientierung an Profil 3.....	68
Abbildung 34: Faltenbildung am Leinwandgewebe	69
Abbildung 35: Trellis Effekt im Bereich der Faltenbildung beim Leinwandgewebe an Profil 2	70
Abbildung 36: Trellis Effekt am Köpergewebe an Profil 2	70
Abbildung 37: NCF (-/0/+) auf Profil 4	71
Abbildung 38: NCF (0/90) auf der Deckfläche von Profil 3	72
Abbildung 39: Ausfransen und Fadenorientierung des NCF (0/90) an Profil 3...	73
Abbildung 40: Verlust der Fadenorientierung von NCF (0/90) im Detail.....	73
Abbildung 41: NCF (-/+) längsgestitcht	74
Abbildung 42: NCF (-/+) quergestitcht auf Profil 2.....	74
Abbildung 43: Drapiermethode I: Von Außen nach Innen	76
Abbildung 44: Rovinglücke und Rovingbeschädigung.....	77
Abbildung 45: Rovingschädigung durch Klemmenbefestigung am NCF (0/90)..	78
Abbildung 47: Trellis Effekt über die Krümmungslänge des Profil 2.....	81
Abbildung 48: Automatischer Versatz des NCF (0/90).....	82
Abbildung 49: Fadenorientierung der 90° Lage am Beginn der Krümmung	83
Abbildung 50: Fadenorientierung der 90° Lage am gekrümmten Ende.....	83
Abbildung 51: Verlust der Faserorient. am Ende des Krümmungsbereichs	84
Abbildung 52: Richtung des Versatzes an Profil 2	85
Abbildung 53: Flächengerechter Zuschnitt für das Profil 2 aus NCF (-/0/+)	86
Abbildung 54: Drapierung mit flächengerechtem Zuschnitt eines NCF (-/0/+) an Profil 2	87
Abbildung 55: Drapierung mit flächengerechtem Zuschnitt eines NCF (-/0/+) an Profil 2	88

Abbildung 56:	Dreiteilung der Preform	89
Abbildung 57:	Resultate der Biegesteifigkeit mittels Cantilevertest.....	91
Abbildung 58:	Köpergewebe auf Profil 3	106
Abbildung 59:	Köpergewebe auf Profil 2-Textilverchiebungen	106
Abbildung 60:	Köpergewebe auf Profil 4: Trellis Effekt Innenseite	109
Abbildung 61:	Köpergewebe auf Profil 4: Innenseite.....	109
Abbildung 62:	Köpergewebe auf Profil 4: Deckfläche.....	110
Abbildung 63:	Quergestitchtes (-/+) auf Profil 2.....	104
Abbildung 64:	(-/+) Längsgestitcht.....	105
Abbildung 65:	(-/+) Profil 4: Außenfläche.....	111
Abbildung 66:	(-/+) Innenseite Profil 4	111
Abbildung 67:	(-/+) Profil 3.....	112
Abbildung 68:	(0/90) auf Profil 4	112
Abbildung 69:	Leinwandgewebe auf Profil 4.....	113
Abbildung 70:	Leinwandgewebe auf Profil 3.....	113
Abbildung 71:	(-/0/+) auf Profil 3.....	114

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtigsten Eigenschaften der drei Grundgewebearten (3 = gering; 1 = hoch).....	29
Tabelle 2: Zusammenfassung der wichtigsten Parameter aus den theoretischen Grundlagen.....	35
Tabelle 3: Verwendete Gewebe	36
Tabelle 4: Verwendete Gelege (NCF)	37
Tabelle 5: Maße der Preforms.....	40
Tabelle 6: Abmaße der Cantilever Proben	46
Tabelle 7: Bewertungsgrundlage anhand eines Benotungssystems	59
Tabelle 8: Bewertung der Versuche an Profil 1	60
Tabelle 9: Bewertung der Versuche an Profil 2	60
Tabelle 10: Bewertung der Versuche an Profil 3	62
Tabelle 11: Bewertung der Versuche an Profil 4	62
Tabelle 12: Ergebnisse der Drapierversuche	63
Tabelle 13: Änderung der Flächen im Bereich der Krümmung.....	80
Tabelle 14: Flächenänderung durch den Trellis Effekt	81
Tabelle 15: Gemessene Überhanglängen.....	90
Tabelle 16: Resultate der Biegesteifigkeiten nach der Cantilever Methode	90

11 Anhang

11.1 Aufnahmen zu Profil 2

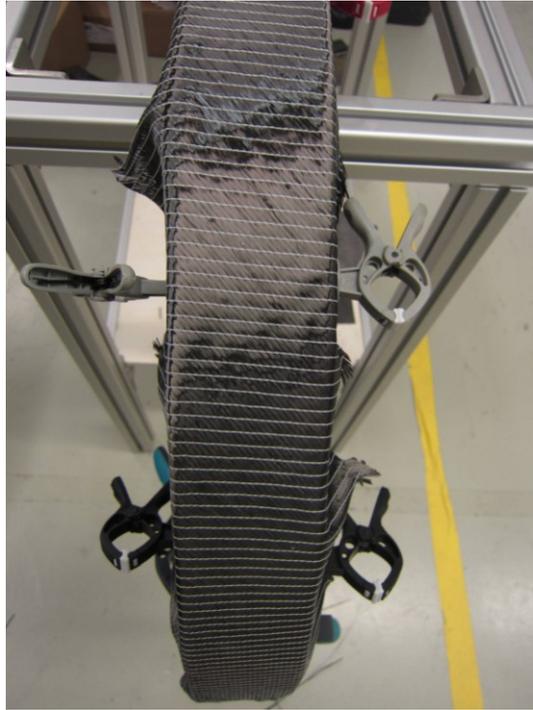


Abbildung 57: Quergestitchtes (-/+) auf Profil 2

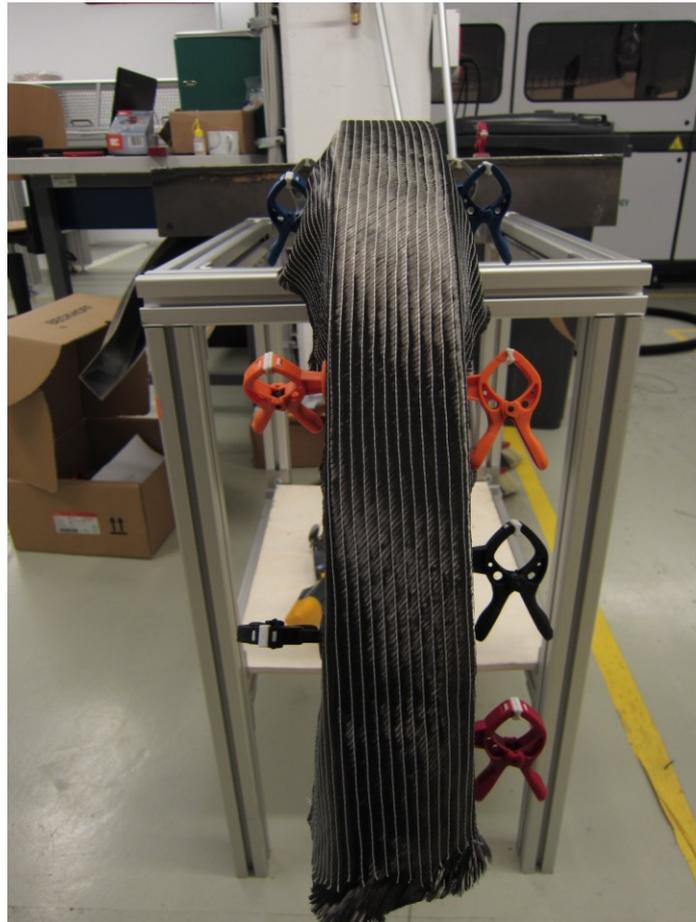


Abbildung 58: (-/+) Längsgesticht an Profil 2

11.2 Aufnahmen zu Profil 3



Abbildung 59: Körpergewebe auf Profil 3

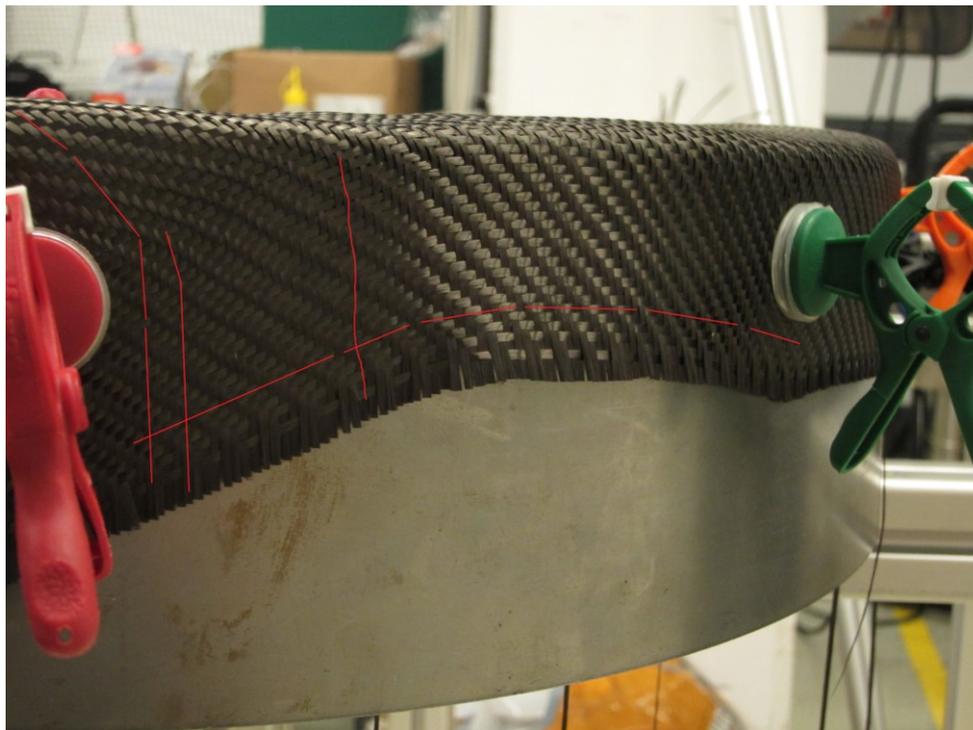


Abbildung 60: Körpergewebe auf Profil 2-Textilverschiebung

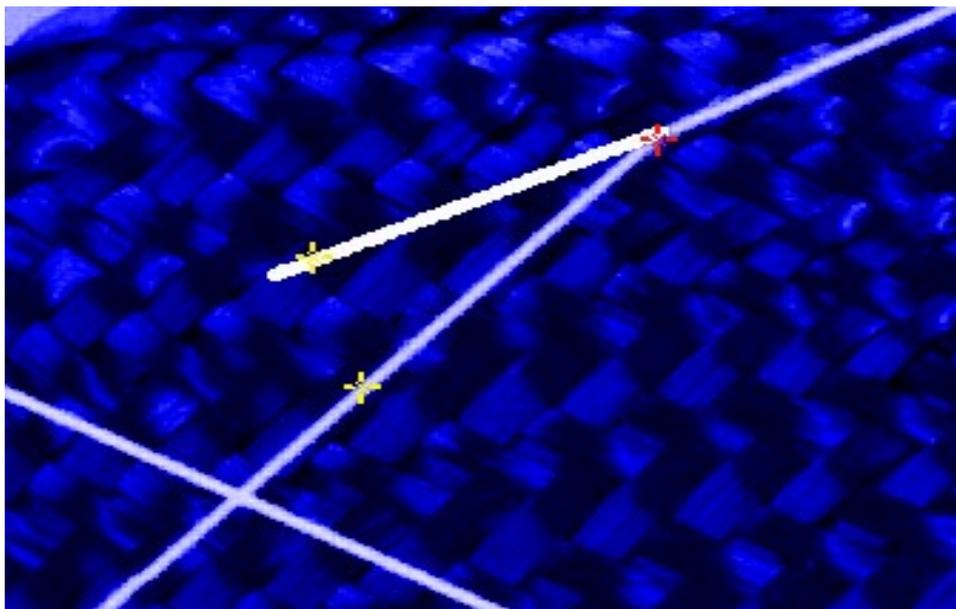


Abbildung 61: Köpergewebe auf der Deckfläche von Profil 2-Winkelmessung am inneren Krümmungsradius

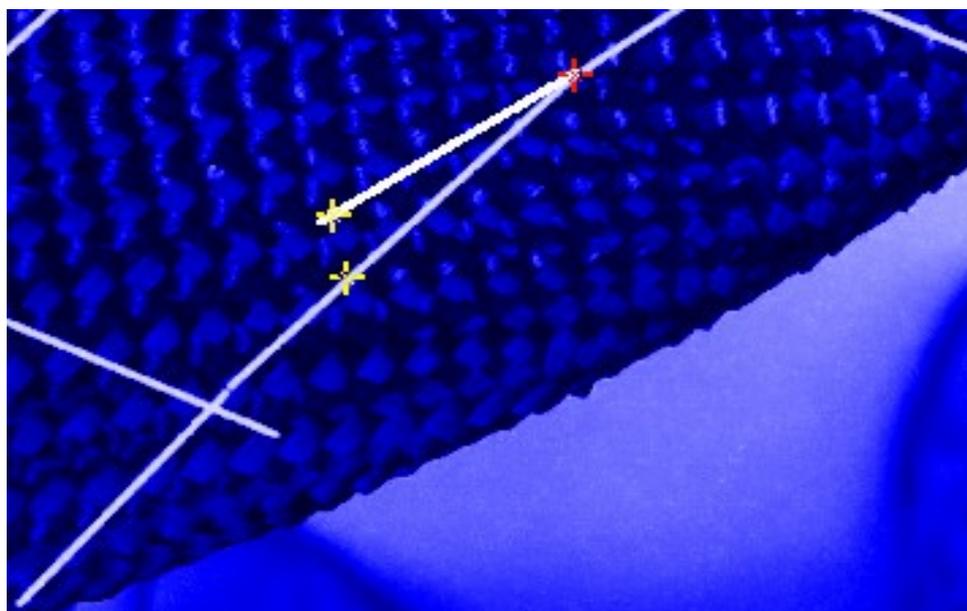


Abbildung 62: Köpergewebe auf der Deckfläche von Profil 2-Winkelmessung am äußeren Krümmungsradius

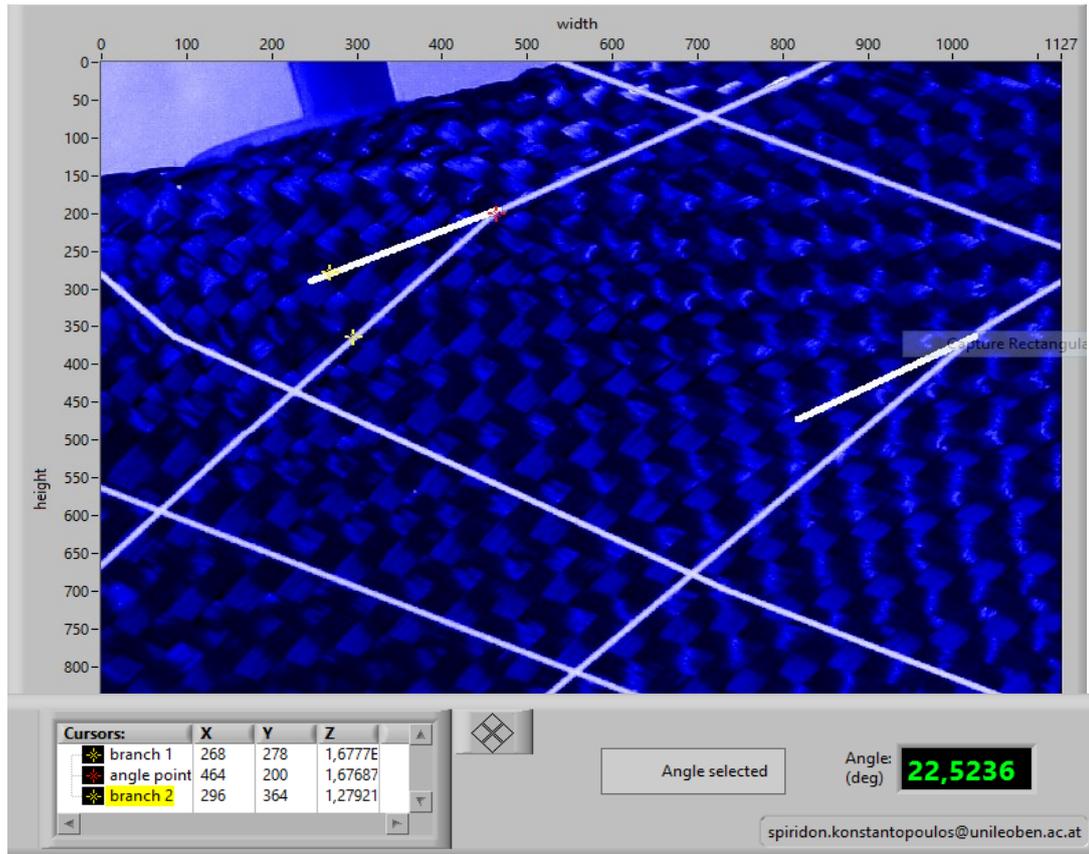


Abbildung 63: Köpergewebe auf der Deckfläche von Profil 2-Winkelmessung am inneren Krümmungsradius

11.3 Aufnahmen zu Profil 4



Abbildung 64: Köpergewebe auf Profil 4: Trellis Effekt Innenseite

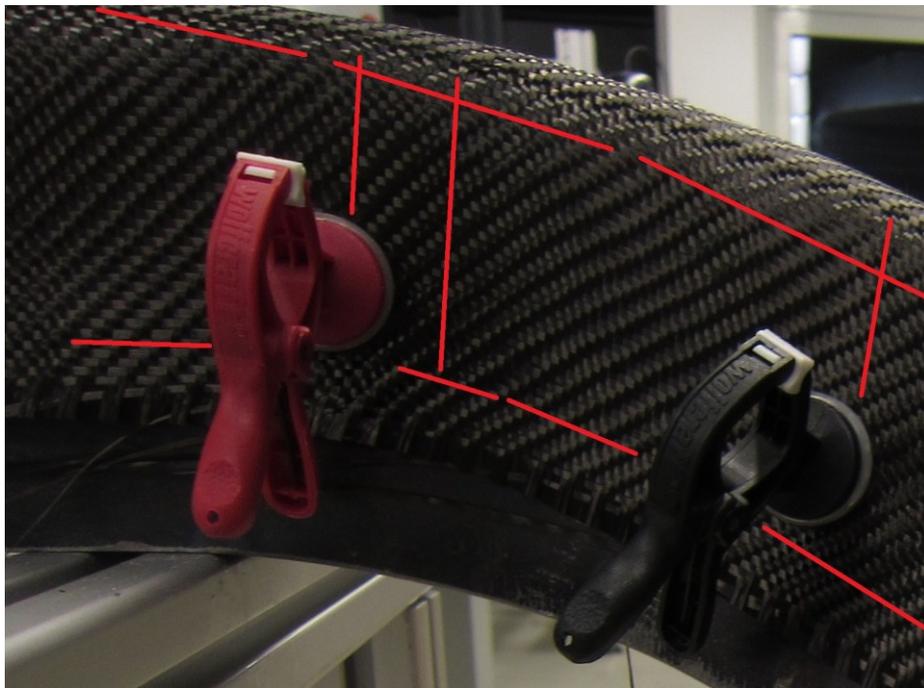


Abbildung 65: Köpergewebe auf Profil 4: Innenseite



Abbildung 66: Köpergewebe auf Profil 4: Deckfläche



Abbildung 67: Köpergewebe auf Profil 4: Äußere Seitenfläche



Abbildung 68: NCF (-/+) an der Außenfläche von Profil 4



Abbildung 69: NCF (-/+) an der Innenseite von Profil 4

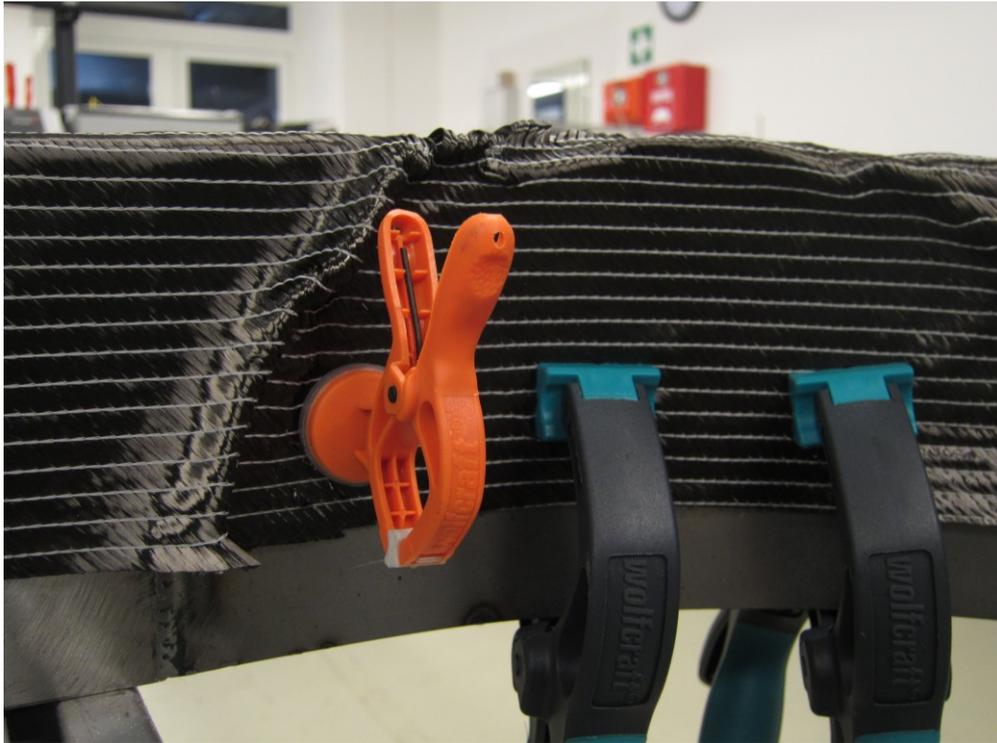


Abbildung 70: (-/+) Profil 3



Abbildung 71: (0/90) auf Profil 4



Abbildung 72: Leinwandgewebe auf Profil 4

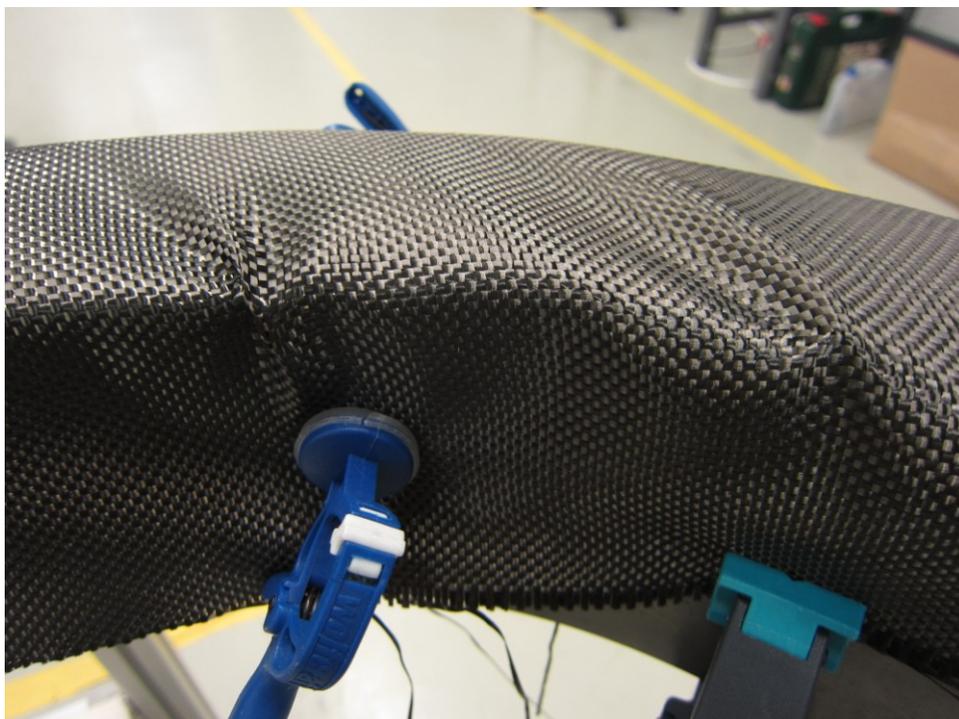


Abbildung 73: Leinwandgewebe auf Profil 3



Abbildung 74: $(-/0/+)$ auf Profil 3