



Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites

**Hoch drapierbare, konturgetreue, variabelaxiale
Verstärkungstextilien für faserverstärkte Kunststoffe**

Charlotte M. Eisenhauer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

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

Die Dissertation wurde am 11.04.2017 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 10.07.2017 angenommen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich in dieser spannenden Phase meiner akademischen Laufbahn begleitet haben.

Zu besonderem Dank bin ich Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler verpflichtet. Dank ihm habe ich nach einer bereits industriell eingeschlagenen Karriere noch einmal den Entschluss gefasst, eine Promotion anzustreben. Ihn bei dem Aufbau des Lehrstuhls zu unterstützen hat mich persönlich und fachlich stark geprägt. Er war es auch, der mich mit meinem Projektpartner TEC-KNIT CreativCenter für Technische Textilien GmbH zusammengebracht hat. Vielen herzlichen Dank für die sehr bereichernden Jahre am Lehrstuhl.

Auch Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing.Chokri Cherif bin ich zu großem Dank verpflichtet. Er und seine Forschungsarbeiten haben mich bereits während meines Masterstudiengangs fachlich sehr begeistert. Die Möglichkeit bereits mehrfach auf der unter anderem von ihm ausgerichteten ITC Aachen Dresden vortragen zu dürfen, hat mich beruflich stark geprägt.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Wolfgang Hoeck, der mich durch seinen unerschöpflichen Erfindergeist fachlich stark vorangebracht hat, und mir immer ein offenes Ohr bei jeglicher Form von Gesprächsbedarf offeriert hat.

Danken möchte ich auch meinem ehemaligen Studenten und Projektpartner Benedikt Borchert.

Meinen Mitarbeiter, Kollegen und Studenten des Lehrstuhls für Carbon Composites danke ich für eine unvergessliche Zeit und ihre intensive Mitarbeit.

Eine herausragende Stellung in jeglicher Hinsicht nimmt meine Familie ein, ohne Ihre liebevolle Fürsorge wäre meine berufliche Karriere nicht zu dem geworden, was sie heute ist.

Besonders meinen Eltern bin ich unendlich dankbar, mich jederzeit in meinen Vorhaben persönlich und finanziell unterstützt zu haben.

Meinen beiden Schwestern Eve und Isabelle, sowie ihren Familien mit ihren fröhlichen Kindern danke ich von ganzem Herzen für den Ausgleich zu einer manchmal schwierigen Zeit. Freude, Liebe und Herzlichkeit waren durch meine beiden Patenkinder, Moritz und Leopold, ein stetiger Begleiter.

Übersicht

Faserverstärkte Kunststoffe aus kontinuierlichen Verstärkungsfasern finden zunehmend mehr Einsatz, nicht nur im Bereich der Luft- und Raumfahrt oder bei Sportwagen und Rennbooten, sondern auch in Großserienanwendungen. Hierzu zählen vor allem der Automobilbau und der Maschinenbau. Allerdings besteht in diesen Bereichen ein großer Kostendruck, vor allem die leichteren Hochleistungsbauteile aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen günstiger fertigen zu können als bisher. Dies führt zu der Entwicklungen eines hoch drapierbaren, konturgetreuen, variabelaxialen Verstärkungstextils für Strukturbauteile, sogenannten „Contour Composites – CoCo“. Ziel ist es dabei, ein Halbzeug mit hoher Produktionsrate zu fertigen, und zwar durch die simultane und automatisierte Ablage aller Verstärkungsmaterialien über die gesamte Bauteilbreite.

Neu entwickelte Ablegestrategien zur lokalen Erhöhung der Drapierbarkeit erfordern aber auch ein komplexeres Verständnis der Drapiermodi von Halbzeugen. An Hand von umfangreichen Drapierversuchen konnten Erkenntnisse über Drapiermodi bisherig eingesetzter Halbzeuge dazugewonnen und mit den Drapiermodi des neu entwickelten Halbzeuges verglichen werden. Diese Analyse erfolgte an einem neu entwickelten Drapierprüfstand, mit dem es möglich ist, unterschiedliche Halbzeuge, auch unter Temperatur, auf ihre Drapierbarkeit zu messen.

Die neue Fertigungstechnologie „CoCo“ eröffnet die Möglichkeit einer variabelaxialen Ablage von Verstärkungsfasern. Die Fasern können individuell gekrümmt auf einem Trägermaterial abgelegt werden. Dies führt zu einem Zuwachs an Freiheitsgraden. Allerdings setzt dies auch eine entsprechende Fertigungstechnologie sowie ein neues Anlagenkonzept voraus.

Es konnte ein detailliertes Drapier- und Fertigungskonzept für die Großserie ausgearbeitet werden. An Hand dieses Konzeptes wurden verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Stückzahlen von Bauteilen pro Jahr betrachtet und die Bauteilkosten entsprechend unter diversen Annahmen berechnet.

Abstract

Fiber-reinforced plastics out of continuous reinforcing fibers find more and more applications, not only in the area of aerospace or sports cars and racing boats, but also in high volume applications, especially in the automotive and industrial areas. However, in these fields high pressure concerning costs exist; it is especially necessary to reduce the production costs of the lightweight high-performance components out of carbon fiber reinforced plastics. This motivation leads to the development of a highly drapable, contoured, variable-axial reinforcing fabric, so called “Contour Composites – CoCo” for primary structural components. The aim is to produce fabrics with high production rates, while laying down simultaneously and automated all reinforcing material required along the width of the component.

The newly developed laying down strategies for locally higher drapability need deeper know-how about the complexity of draping mechanisms of textiles. According to extensive draping trials new findings about draping mechanisms of textiles used so far could be acknowledged and compared with the draping mechanisms of the newly developed textile. These trials were conducted on a newly developed draping equipment, with which it is possible to test the drapability of various textiles, even under high temperature.

The new production technology “CoCo” reveals the opportunity of a variable-axial placement of reinforcing fibers. These fibers can be placed with individual curvature onto a carrier, leading to a growth in degree of freedom. However, an according production technology and machinery concept is required for such a production.

Additionally, a detailed draping and manufacturing concept was developed. According to this manufacturing concept various scenarios with different units per year of components were calculated concerning production costs.

Inhaltsangabe

1.	Einleitung und Motivation	1
1.1.	Kostentreiber bei Automobilbauteilen.....	1
1.2.	Anforderungen an Halbzeuge in der Automobilindustrie	2
1.2.1.	Bedarf nach konturgetreuen Halbzeugen.....	3
1.2.2.	Bedarf nach hoch drapierfähigen Halbzeugen.....	4
1.2.3.	Bedarf nach lastpfadgerechten Bauteilen	5
1.3.	Motivation.....	7
2.	Anforderungskatalog und Aufgabenstellung.....	9
2.1.	Anforderungen an das Produkt „CoCo“ (Contoured Composites).....	9
2.2.	Themenstellung der Arbeit	12
3.	Grundlagen und Stand der Technik zu hoch drapierbaren, konturgetreuen, unidirektionalen, variabelaxialen Halbzeugen.....	15
3.1.	Endkonturnahe und konturgetreue Halbzeuge.....	15
3.2.	Unidirektionale und kraftflussgerechte Halbzeuge	17
3.3.	Fadenreserven für Drapierung	19
3.3.1.	Tailored Fiber Placement.....	19
3.3.2.	Kettenwirken.....	21
3.4.	Messung von Drapierbarkeit.....	23
3.4.1.	Formen mit Patrize und Niederhalter	25
3.4.2.	Formen mit Ober- und Unterwerkzeug.....	29
3.4.3.	Formen mit Unterwerkzeug und Diaphragmamembran	30
3.4.4.	Zusammenfassung der unterschiedlichen Typen von Drapierprüfständen....	31
4.	Textilentwicklung – Entwicklung von variabelaxialen Ablegestrategien.....	32
4.1.	Ablegestrategien zur variabelaxialen Gestaltung	32
4.2.	Bewertung der Bauteilkomplexität.....	33
4.3.	Geometrische Betrachtung des Bauteils	34
4.4.	Berechnung der Fadenreserven.....	36
4.4.1.	Berechnung der Rovinganzahl und -position	36
4.4.2.	Berechnung der Faserlängen.....	39
4.5.	Umsetzung der Fadenreserven.....	40
4.5.1.	Fadenreserven in z-Richtung	40
4.5.2.	Fadenreserven in x/y-Richtung.....	42
4.6.	Material- und Strukturtechnologie für die Fertigung von Contour Composites („CoCo“).....	44
4.6.1.	Trägermaterialien.....	44
4.6.1.1.	Materialauswahl.....	46
4.6.1.2.	Längungs- und Drapierverhalten	47
4.6.1.3.	Ablegeversuche.....	53
4.6.2.	Verstärkungsfasern	57

4.6.2.1.	Materialauswahl	57
4.6.2.2.	Ablegeversuche	57
5.	Entwicklung einer Versuchsanlage zur Herstellung des Halbzeuges „CoCo“	62
5.1.	Anforderungsprofil.....	62
5.2.	Prozessroutenanalyse	64
5.3.	Aufbau und Funktion der Anlage.....	66
5.4.	Herstellung lastpfadgerechter Verstärkungshalbzeuge	68
6.	Bestimmung der Drapierbarkeit.....	71
6.1.	Spezielle Drapiergeometrie	71
6.2.	Segmentierte Klemmung.....	73
6.3.	Temperierung	77
6.3.1.	Konzeptauswahl	78
6.3.2.	IR-Strahler	78
6.3.3.	Kontaktheizung	82
6.4.	Bewertungsparameter.....	82
6.4.1.	Optische Auswertung mit ProFactor	83
6.4.2.	Kraftaufnehmer	83
6.5.	Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“	85
7.	Drapieranalysen – 2D zu 3D.....	87
7.1.	Drapiermechanismen bei Textilien	87
7.1.1.	Drapiermechanismen durch Materialeinzug	87
7.1.2.	Drapiermechanismen durch Oberflächenvergrößerung	89
7.1.3.	Drapiermechanismen des Contour Composite („CoCo“)	90
7.2.	Drapierverhalten von Standardtextilien	91
7.2.1.	Halbzeugformen	91
7.2.2.	Allgemeine Deformationsmechanismen	91
7.2.2.1.	Faserdehnung und -streckung.....	91
7.2.2.2.	Fasergleiten	92
7.2.2.3.	Faser- und Textilbiegung	93
7.2.2.4.	Textilscherung.....	94
7.2.1.	Drapierfehler	95
7.2.1.1.	Gaps	96
7.2.1.2.	Wellen	96
7.2.1.3.	Schlaufen	97
7.2.1.4.	Mäander	97
7.2.2.	Materialprüfungen.....	98
7.2.2.1.	Scherprüfung – Picture-Frame-Test.....	99
7.2.3.	Drapierprüfungen am Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“	104
7.2.4.	Fazit der Drapieranalyse von Standard-Textilien.....	110
7.3.	Drapierverhalten und Deformationsmechanismen des Halbzeuges „CoCo“	111
7.3.1.1.	Versuchsdurchführung	111
7.3.1.1.	Versuchsauswertung.....	114
7.3.1.2.	Drapiermechanismen bei dem Halbzeug „CoCo“	115

7.3.1.3.	Drapiertfehler bei dem Halbzeug „CoCo“	115
7.4.	Fazit der Deformationsmechanismen bei Textilien	116
8.	Drapiertprozessroute – Konzept zur Umsetzung für Großserien	117
8.1.	Prozesskette „Von der Faser zum Bauteil“	117
8.2.	Detaillierung der Prozesskette	117
9.	Mechanische Eigenschaften	120
9.1.	Open Hole Tension – Versuche, allgemein	120
9.2.	Probenvorbereitung.....	120
9.3.	Versuchsdurchführung.....	122
9.4.	Auswertung und Ergebnisse der Versuche	123
9.5.	Vergleich der Ergebnisse mit anderen Technologien	125
9.6.	Bewertung der Charakterisierungsmethode.....	126
10.	Konzepte zur Serienproduktion von „CoCo“-Bauteilen.....	128
10.1.	Beschreibung des Herstellungsprozesses	128
10.1.	Bewertung der Technologiereife des entwickelten Verfahrens	129
10.2.	Herstellungs- und Vertriebskonzept	131
10.3.	Ermittlung der Anlagenressourcen, Personalkosten und Bauteilkosten	132
10.4.	Entwurf eines Hallen- und Anlagenlayouts	135
11.	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
11.1.	Zusammenfassung	137
11.2.	Ausblick.....	140
A.	Anhang.....	141
a.	Betreute Studienarbeiten.....	141
b.	Daten oder Bewertungsmatrizen.....	142
c.	Abbildungsverzeichnis	146
B.	Literaturverzeichnis	153

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AFP	Automated Fiber Placement
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATL	Automated Tape Laying
BIOTEX	Bionische Gestaltung und textile Fertigungsverfahren zur kostengünstigen Herstellung optimierter Faserverbundstrukturen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMW	Bayerische Motorenwerke
CAD	Computer Aided Design
CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
CFK	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff
CoCo	Contoured Composites
cP	Wärmekapazität
d	Durchmesser
DIN SPEC	Deutsches Institut für Normung, Spezifikation
E	electric
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EP	Epoxid
EP (Patent)	Europäisches Patent
F	Kraft
FEM	Finite Elemente Methode
FIBRE	FaserInstitut Bremen
FPP	Fiber Patch Preforming
FVG	Faservolumengehalt
FVK	faserverstärkte Kunststoffe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HTS	high tensile strength
IR	Infrarot
ITA	Institut für Textiltechnik Aachen
ITV	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
k	eintausend
K	Krümmungsebene
kJ	KiloJule
KU	Katholische Universität
kW	Kilowatt
LCC	Lehrstuhl für Carbon Composites
m	Meter

MAG	Multiaxiale Gelege
MAG-KV	Mutliaxialgelege mit Kettfadenversatz
Abkürzung	Bezeichnung
MATLAB	matrix laboratory
max	Maximum
min	Minimum
N	Newton
OEM	Original Equipment Manufacturer
OHT	Open Hole Tension
P	Heizleitung
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PID	Process Identifier
PP	Polypropylen
q	quer
Q	Wärmemenge
QI	quasi-isotrop
QS	Qualitätssicherung
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Moulding
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SF	Spreizfaktor
σ	Sigma (Spannung)
SOP	Start of Production
STL	Surface Tessellation Language
τ	Tau (Scherung)
tex	Garnstärke von Fasern
TFP	Tailored Fibre Placement
TP	Thermoplast / thermoplastisch
TU	technische Universität
UD	unidirektional
v_F	Faservolumengehalt
WO	World Intellectual Property Organization

1. Einleitung und Motivation

1.1. Kostentreiber bei Automobilbauteilen

Auf Grund von steigendem Umweltbewusstsein und Erhöhung der Energiekosten setzen Automobilhersteller darauf, immer effizientere Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, wie zum Beispiel Elektromotoren, zu bauen. Da allerdings die Energiespeicher für Elektromotoren schwerer sind als die der bisherigen Motoren, und zwar um einen Faktor 60, müssen die Fahrzeuge leichter gebaut werden. [48] Automobilhersteller, wie zum Beispiel BMW, setzen auf Elektromotoren in Kombination mit dem Einsatz von Leichtbauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK). Bereits für die nahe Zukunft wird prognostiziert, dass auch andere Automobilhersteller auf Grund einer strikteren Gesetzgebung hinsichtlich der Abgasregelung nachziehen werden. Ab dem Jahre 2020 soll der Abgasausstoß neu produzierter Fahrzeuge im Durchschnitt unter 95g CO₂/km liegen. [42, 53]

Derzeit sind die Produktionskosten für Fahrzeugteile aus leichten carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) noch relativ hoch. Für einen kosteneffizienten Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen mit der Intention, das Gewicht von automobilen Strukturbauteilen für die Massenproduktion drastisch zu verringern, und zwar um etwa 60 %, gegenüber Stahl und 25 % gegenüber Aluminium [49], bedarf es einer drastischen Senkung der Produktionskosten.

Die größten Kostentreiber in der Produktion von CFK-Bauteilen sind Prozesszeit, Materialkosten und die große Anzahl an benötigten Prozessschritten. Großes Investitions- und Kostensenkungspotential entlang der Prozesskette von faserverstärkten Kunststoffen wird vor allem bei den Herstellungsverfahren gesehen [1]. Aktuelle Entwicklungsfelder sind in diesem Bereich vor allem Automatisierung, Verfahrensoptimierung und neue Herstellungsverfahren, wie zum Beispiel endkonturnahe Vorformlinge, auch Preforms genannt, mittels Textiltechnik. Speziell im Bereich der Preformherstellung gibt es immenses Einsparpotential durch Automatisierung, Verringerung der Anzahl an Prozessschritten und Reduktion von Verschnitt [43]. In der aktuellen hochvolumigen Produktion von Strukturbauteilen aus kontinuierlicher Faserverstärkung, wie zum Beispiel beim i3 von BMW, sind die hauptsächlich eingesetzten Prozesse Pressformen, Ablage von Prepregs und Infusions- oder Injektionsverfahren von trockenen Halbzeugen.

Aus dem Stand der Technik sind zwei verschiedene Prozessrouten zur Preformherstellung bekannt: Das sequentielle Preforming und das direkte Preforming. Das sequentielle Preforming besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Prozessschritten, die je nach Hersteller leicht unterschiedlich gestaltet sein können. Gemeinsam haben diese leicht abweichenden Varianten die Herstellung einer textilen Rollenware aus den Verstärkungsfäden. Das auf eine bestimmte und konstante Breite hergestellte Textil wird dabei in einem darauffolgenden Prozess zugeschnitten. Textilizuschnitt, Preformbeschnitt, Handling, in Form von „Pick and Place“ oder „Pick and Drape“, und Stapeln, auch „Stacking“ genannt, kann hierbei in unterschiedlicher Reihenfolge geschehen. Während der gesamten Prozesskette entsteht bis zu 50 % an Verschnitt, vor allem bei der Textil-

produktion, beim Zuschneiden der einzelnen Lagen und beim Preformbeschnitt. [50] Beim direkten Preforming entfällt eine Vielzahl von Prozessschritten und die Halbzeugherstellung wird drastisch, auf einen Hauptprozessschritt, verkürzt. Die Herstellung einer endkonturnahen Preform erfolgt direkt aus den Verstärkungsfasern ohne aufwendigen Zuschnitt und mit weniger als 10 % Verschnitt [51], siehe Abbildung 1.1.

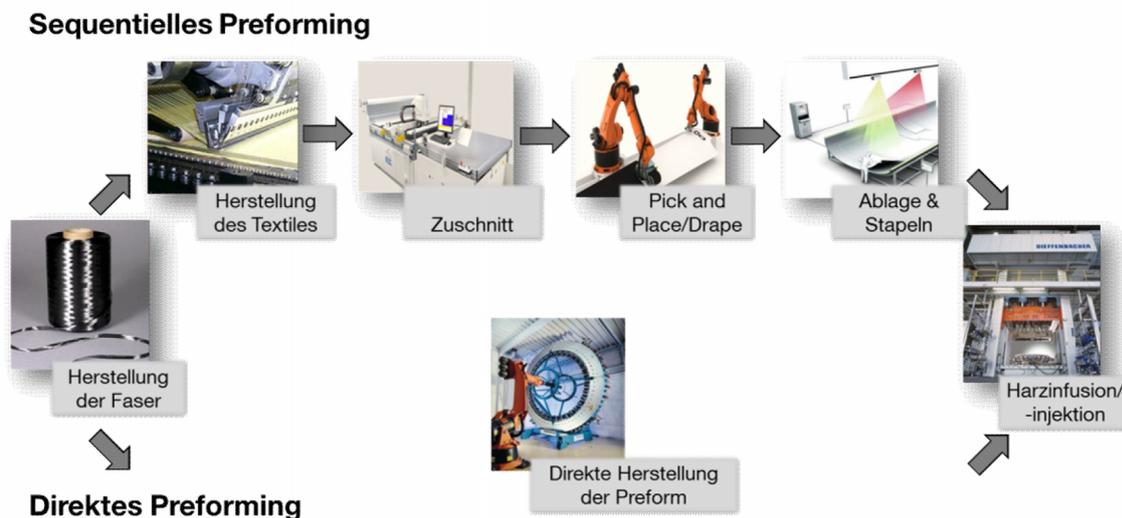


Abb. 1.1: Verschiedene Preforming-Prozessrouten zur Bauteilherstellung [2]

Allerdings gibt es noch nicht viele textile Technologien für das direkte Preforming, vor allem, wenn hohe Produktivität gefordert wird. Ein großer Nachteil des aktuellen Faserverbunddesigns und der Herstellungsstrategien ist die Verwendung von quasi-isotropen Laminaten, die die exzellenten mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung nicht vollständig ausnutzen. Dies führt zu höherem Bauteilgewicht, höherem Materialverbrauch und dadurch höheren Materialkosten. Zurzeit spiegeln die Materialkosten ungefähr 25 % der Bauteilkosten wider. Die anderen 75 % setzen sich aus Produktionskosten, u.a. Maschinen- und Werkzeugkosten, Lohnkosten und andere Kosten, wie Energieverbrauch, zusammen. [43]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass großes Potential zur Kostenreduzierung in der Optimierung der Herstellungstechnologien gesehen wird, das momentan zu intensiven Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten führt. Ein wichtiger Entwicklungsschwerpunkt ist die Herstellung von komplexen Strukturbauteilen aus trockenen Carbonfasertextilien unter Nutzung der anisotropen Eigenschaften der Carbonfasern und mit geringem Faserverschnitt.

1.2. Anforderungen an Halbzeuge in der Automobilindustrie

Faserverstärkte Kunststoffe auf der Basis von textilen Carbonfaserhalbzeugen, wie zum Beispiel Gewebe oder multiaxiale Gelege (MAG), werden unter anderem in der Automobilindustrie eingesetzt, um kostengünstig für die Großserie produzieren zu können. Das Ziel des neuentwickelten Halbzeugs für konturgetreue Faserverbundwerkstoffe

(„Contoured Composites - CoCo“) ist es, der Automobilindustrie verbesserte Halbzeuge zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen zu Verfügung zu stellen. Daher werden in den folgenden Kapiteln die Anforderungen aus der Automobilindustrie als Motivation betrachtet und auf die Anforderungen an das Halbzeug „CoCo“ übertragen.

1.2.1. Bedarf nach konturgetreuen Halbzeugen

Zur Herstellung des i3 und i8 benutzt BMW vorwiegend mit Pulver bebinderte MAG, die mit einer konstanten Breite produziert und zugeschnitten werden, was zu hohem Verschnitt führt, und mit der benötigten Stacking-Sequenz aufeinander gelegt werden, d.h. quasi-isotrop. Der Stack wird daraufhin aufgeheizt, um den Binder für den Zusammenhalt und die Stabilität der textilen Lagen zu aktivieren, und in die Bauteilgeometrie gepresst. Der endkonturnahe Stack wird daraufhin erneut zugeschnitten, um die finale Geometrie zu generieren, wie es in Abbildung 1.2 zu sehen ist.

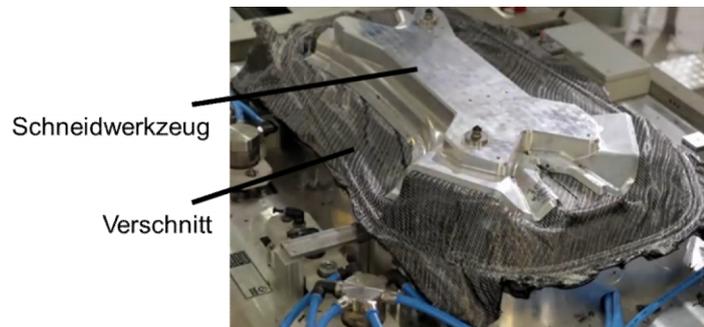


Abb. 1.2: Preformherstellung beim i3 [BMW]

Mehrere endkonturgetreue Preforms werden in einem Werkzeug zusammengesetzt und in einem Folgeschritt mit Harz injiziert. In Abbildung 1.3 ist zu sehen, dass neun Preforms, die unterschiedliche Orientierungen aufweisen, zu dem Seitenrahmen des i3 zusammengefügt werden.

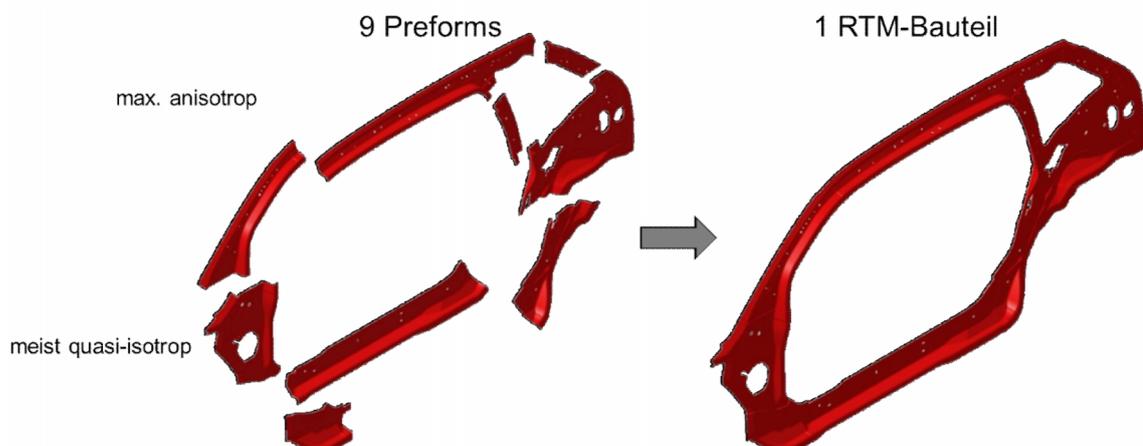


Abb. 1.3: Zusammensetzen von mehreren Preforms zu einem Bauteil [3]

1.2.2. Bedarf nach hoch drapierfähigen Halbzeugen

Eine weitere Herausforderung bei den aktuellen Textilien ist deren Drapierbarkeit. Der zweidimensionale Stack, bestehend aus mehreren textilen, miteinander verbundenen Lagen, muss in eine dreidimensionale Geometrie geformt werden. Hierbei entstehen auf Grund des textilen Aufbaus Verschiebungen im Textil, die zu Fehlern im Bauteil führen können. Speziell bei hohen Umformgraden muss das Textil zum Teil eingeschnitten werden, um die hohen Verformungen darstellen zu können. Diese Einschnitte, auch Darts genannt, verursachen eine Verringerung der mechanischen Eigenschaften in diesem Bereich, wie in Abbildung 1.4 zu sehen.

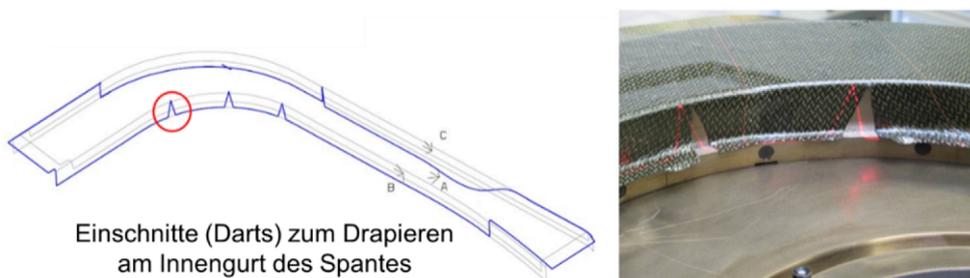


Abb. 1.4: Einschnitte zur Drapierung eines Helikopterspantes des NH90 [52]

Anders als in der Luftfahrt sind automobile Bauteile auf Grund von strikten Designanforderungen fein geteilt und normalerweise doppelt gekrümmt. Charakterisiert durch kleine Radien und scharfe Kanten, so genannten Kofferecken, werden die Bauteile eng verbaut [4], wie es in Abbildung 1.5 zu sehen ist.

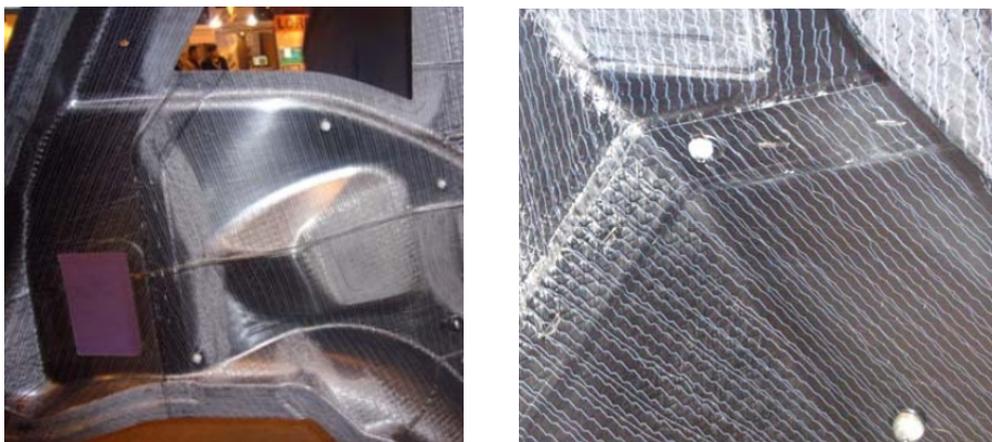


Abb. 1.5: Komplexe Geometrien im BMW i3 [5] am Beispiel des Seitenrahmens

Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die Drapierbarkeit der Halbzeuge. Ziel ist es, das Textil nicht einschneiden oder das Bauteil in mehrere Preforms einteilen zu müssen, sowie die Vermeidung von Steifigkeit und Festigkeit reduzierenden Stößen. In dem i3-Modell von BMW werden bereits einzelne unidirektionale Gelege eingesetzt, um das Blockieren der einzelnen Lagen zueinander zu minimieren und somit eine bessere Drapierbarkeit realisieren zu können.

1.2.3. Bedarf nach lastpfadgerechten Bauteilen

Hinsichtlich der Auslegung ist es wichtig, die richtige Faserorientierung an der richtigen Stelle einzusetzen. Einige Bauteile sind stark isotrop belastet, andere wiederum anisotrop. In einer Studie von Audi, siehe Abbildung 1.6, werden die Hauptspannungsrichtungen für alle relevanten Fahrzeug-Lastfälle, zum Beispiel Front-, Heck- und Seiten-Crash, überlagert, um die Belastungen Bauteil spezifisch zu simulieren. Viele flächige Bauteile, wie zum Beispiel das Dach, der Mitteltunnel, der Unterboden und einige Teile im Kofferraum, sind stark anisotrop belastet und haben hohe Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit.

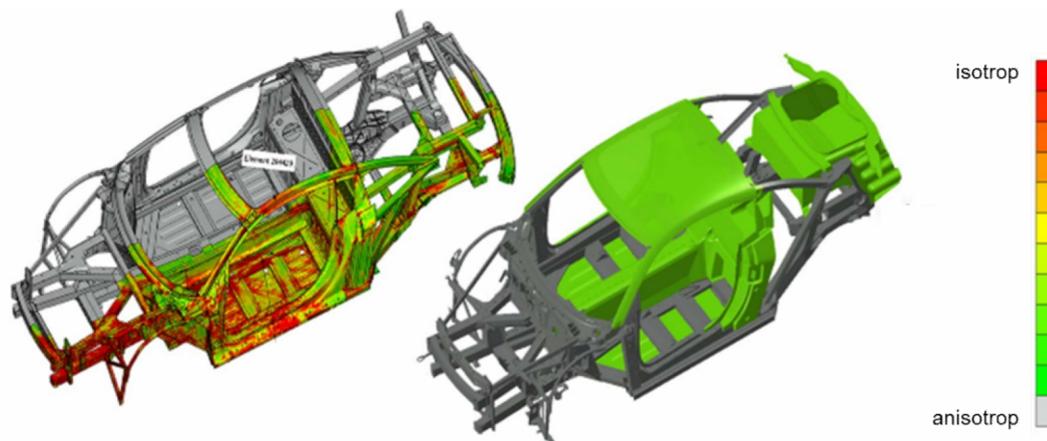


Abb. 1.6: Bauteilspezifische Simulation der Hauptspannungsrichtungen [Audi AG]

Herausforderungen, aber auch großes Potential, werden speziell in den anisotropen Bereichen gesehen, die momentan noch stark von Metallen dominiert werden. In diesen Bereichen kann mit einem anisotropen Design überflüssiges Bauteilgewicht eingespart werden, bei gleichbleibender oder höherer Steifigkeit. Um den mechanischen Anforderungen, vor allem hinsichtlich Steifigkeit, gerecht zu werden, sowie lokal die Steifigkeit variieren zu können, werden die Bauteile unterschiedlich designt, siehe Abbildung 1.7: Anpassung der Bauteildicke durch lokale Aufdickungen (a), Umsetzung von komplexen Geometrien durch Rippen (b), Einbringung von Zwischenmaterial zur Herstellung von Sandwichbauteilen, Einsatz von porösen Materialien zur Realisierung von extrem leichten Komponenten und zur Funktionsintegration, [5], durch kurvenförmigen Faserverlauf (c) und unterschiedliche Faservolumengehalte im Laminat (d). Der Werkstoff faserverstärkter Kunststoff (FVK) bringt zusätzlich den Vorteil der Anisotropie mit sich.

1 Einleitung und Motivation

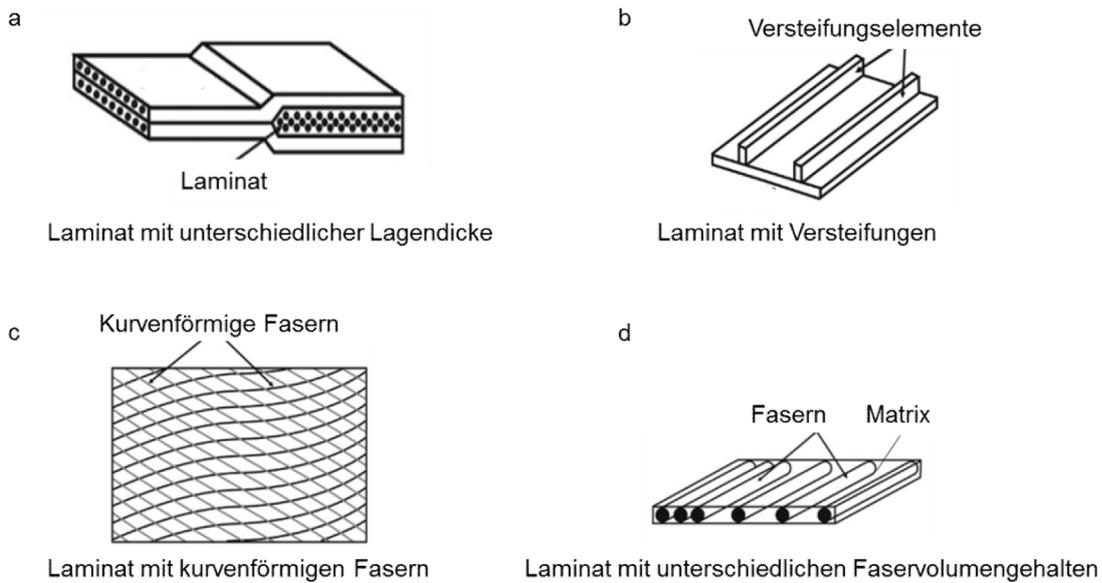


Abb. 1.7: Mechanismen zur Anpassung der Steifigkeit [65]

Zur Herstellung von lastpfadgerechten FVK, das heißt Bauteile in Annäherung an eine unidirektionale Hauptlastichtung, werden als Kompromiss zwischen unidirektionalen Lasten und guter Handhabung bereits erste Laminat mit 90 % unidirektionalen und 10 % quasi-isotropen (QI) Fasern gefertigt. [5] Dadurch nehmen die spezifische Steifigkeit sowie die spezifische Festigkeit gegenüber QI-Aufbauten stark zu, wie die Abbildung 1.8 das Szenario darstellt.

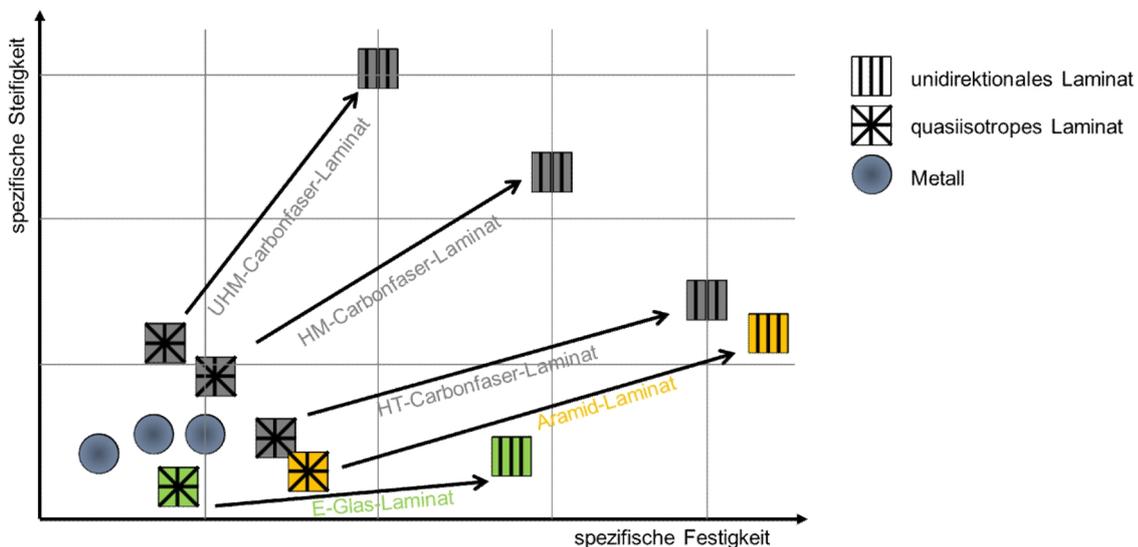


Abb. 1.8: Unterschiede in der Bauteilauslegung, QI vs. UD [5]

Abgesehen von der Bauteilauslegung der globalen Steifigkeit, sind typische Montageelemente, wie kreisförmige Aussparungen unterschiedlicher Durchmesser, steifigkeitsmindernd. Sie können durch Aufweitung der Faserbündel während der Drapierung oder ein nachträgliches Stanzen direkt im Werkzeug eingebracht werden. Dazu fahren im Fall der Aufweitung Nadeln bei der Werkzeugschließung vor und durchstoßen das Laminat unter seitlicher Verdrängung der Fasern. [6] Einfacher wäre die direkte Integra-

tion der Lochbohrung in der Preform. Ebenso gibt es Optimierungspotenzial bei dem aktuellen i3 von BMW, bei dem noch 32 von insgesamt 34 Carbonfaserverbundbauteilen mit einem quasi-isotropen Design aufgebaut sind. 13 der 34 Bauteile sind aus multi-axialen Gelegen, die mit einer konstanten Breite von bis zu drei Metern produziert werden, hergestellt. 2 der 34 Bauteile sind aus endkonturnahen Geflechtem gefertigt. Die Bauteile mit der entsprechenden Auslegung sind in Abbildung 1.9 abgebildet.

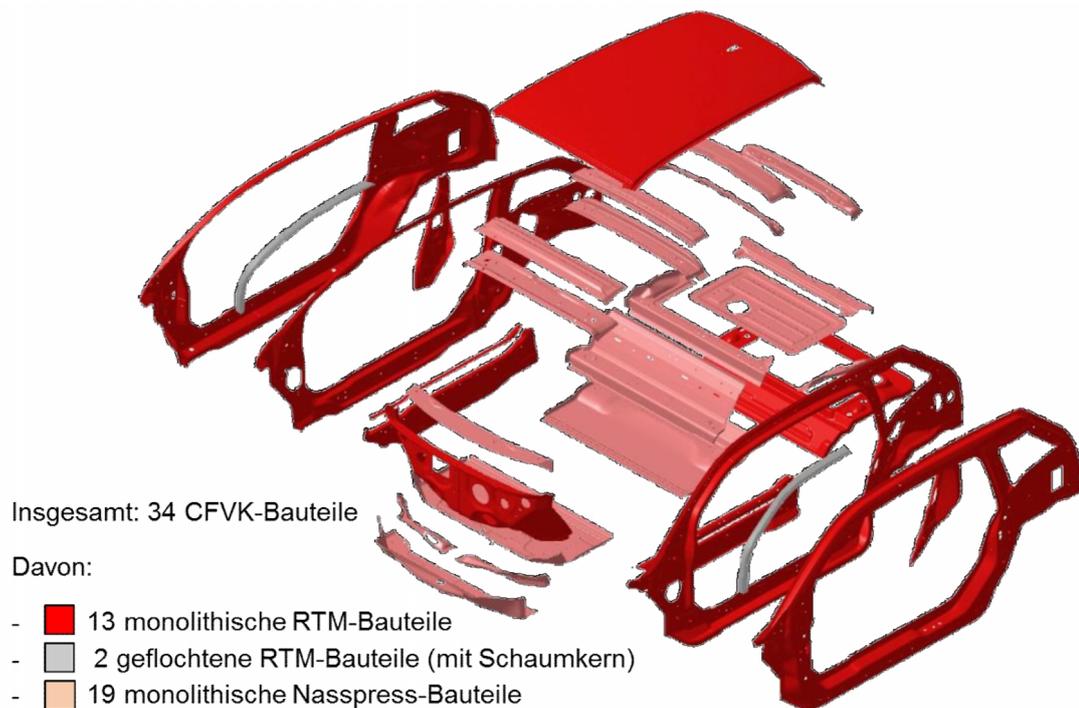


Abb. 1.9: BMW i3 - Unterteilung der Bauteile nach Design [3]

1.3. Motivation

Wie aus den oben erörterten Erörterungen zu entnehmen, wird viel Aufwand betrieben, um mit schnelleren Produktionsprozessen Bauteile mit höherer Reproduzierbarkeit, geringerem Gewicht, höherer Automatisierung, weniger Produktionsabfällen und entsprechend geringeren Kosten zu produzieren.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bereits erste Ansätze in Richtung anisotropen Designs, endkonturnahmen und drapierbaren Preforms umgesetzt werden, allerdings wird das Potenzial eines Bauteil-angepassten Designs noch nicht vollkommen ausgeschöpft. Die Haupttreiber sind die Reduktion der Materialkosten, Prozesskosten und des Bauteilgewichtes.

Aus den bereits dargelegten Anforderungen kann folgende Liste aufgestellt werden, die Automobilhersteller, wie BMW sich selbst und Zulieferern als Ziel setzen [3]:

- Verringerung der Materialkosten
 - Senkung des Rohmaterialpreises, z.B. Carbonfasern

- Reduzierung des Verschnitts in Form von Produktionsabfällen, z.B. Carbonfasern
- Verringerung der Prozesskosten – „richtiges“ Design
- Richtiger Prozess mit notwendigen Produkteigenschaften am richtigen Platz
- Optimierter Einsatz der Faserorientierung
- Weniger Prozessschritte
- Integration von zusätzlichen Funktionen in einem Bauteil, d.h. Verwendung von weniger Komponenten
- Optimierte Faserverbundeigenschaften
- Verbesserung der spezifischen Eigenschaften für spezielle Materialien und Prozesse, z.B. durch die Anpassung der Schlichte
- Verbesserung in der Vorhersage durch Simulation: Faserverbundeigenschaften sind die Brücke zwischen Design und Prozess, da sie während des Prozesses entstehen
- Sichere und stabile Prozesse; Qualitätssicherung
- Weitere Gewichtsreduktion durch geringere Streuung der Materialkennwerte [44]

2. Anforderungskatalog und Aufgabenstellung

2.1. Anforderungen an das Produkt „CoCo“ (Contoured Composites)

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Fertigungsvarianten im Bereich FVK hat die Firma MT Aerospace die Infrastruktur, inklusive Anlagen und Kühlung, Kosten für Material, Herstellungsprozesse und Wertschöpfung betrachtet. In der Bewertung der technischen Faktoren spielen vor allem beim Material die Verfügbarkeit, Lagerbedingungen, Verarbeitbarkeit und Fertigungszeit, und bei den Fertigungsprozessen der Automatisierungsgrad, Störanfälligkeit der Anlage und Prozesssicherheit eine Rolle. Arbeits- und Umweltschutz sind ebenfalls zu bewerten.

Abbildung 2.1 zeigt das Ergebnis der Bewertung für verschiedene Fertigungsverfahren von FVK. Infusionsverfahren unter Einsatz von konturgetreuen Halbzeugen und Verfahren unter der Verwendung von thermoplastischen Matrixsystemen schneiden wirtschaftlich und technisch am besten ab. Genau hier liegen auch die Stärken des neuentwickelten Halbzeuges: die konturgetreue Fertigung und der variable Einsatz von Infusionsverfahren mit duroplastischer Matrix oder der Verwendung einer thermoplastischen Matrix.

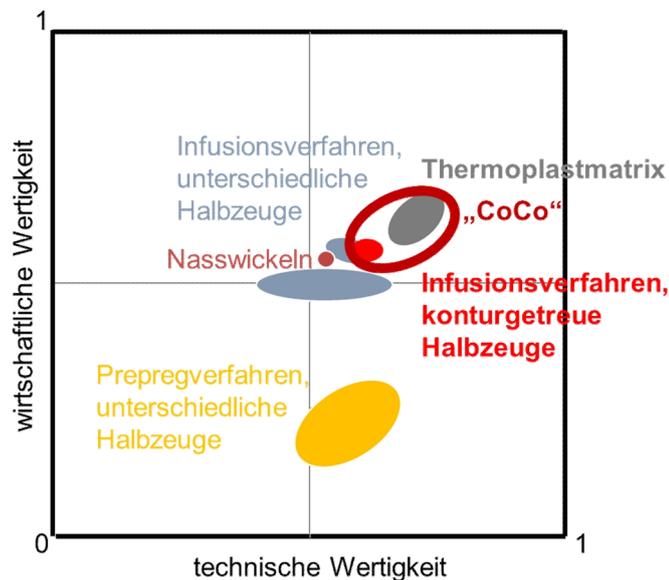


Abb. 2.1: Bewertung der Wertigkeiten von Fertigungsvarianten [7, überarbeitet Eisenhauer]

Mit der Neuentwicklung des Produktes „CoCo“ kann somit der Forderung nach Verringerung der Material- und Prozesskosten unter Verwendung von stabilen und automatisierten Prozessen zufriedenstellend entsprochen werden.

Von dem Ziel eines „richtigen“ Designs ist man bisher bei vielen Strukturbauteilen noch weit entfernt. Viele Faserverbundbauteile werden quasi-isotrop und nach dem

„black metal“-Design, das heißt stark an der metallischen Bauweise angelehnt, ausgelegt. Quasi-isotrope Materialien sind aus einzelnen Lagen aufgebaut, meist mit einer ausgewogenen Ausrichtung von 0° , 90° , $+45^\circ$ und -45° . Das Gesamtlaminat weist daher richtungsunabhängige Eigenschaften auf. Allerdings führt das auch zu einem Abfall des E-Moduls und der Festigkeit um bis zu 60 % im Vergleich zur Einzellagenschicht in Faserrichtung, wie es in Abbildung 2.2 zu sehen ist. Diese Erkenntnis führt immer mehr zu dem Ansatz, den anisotropen Charakter der Fasern zu nutzen und das Bauteil so auszulegen, dass die Fasern in Richtung der Hauptlasten liegen.

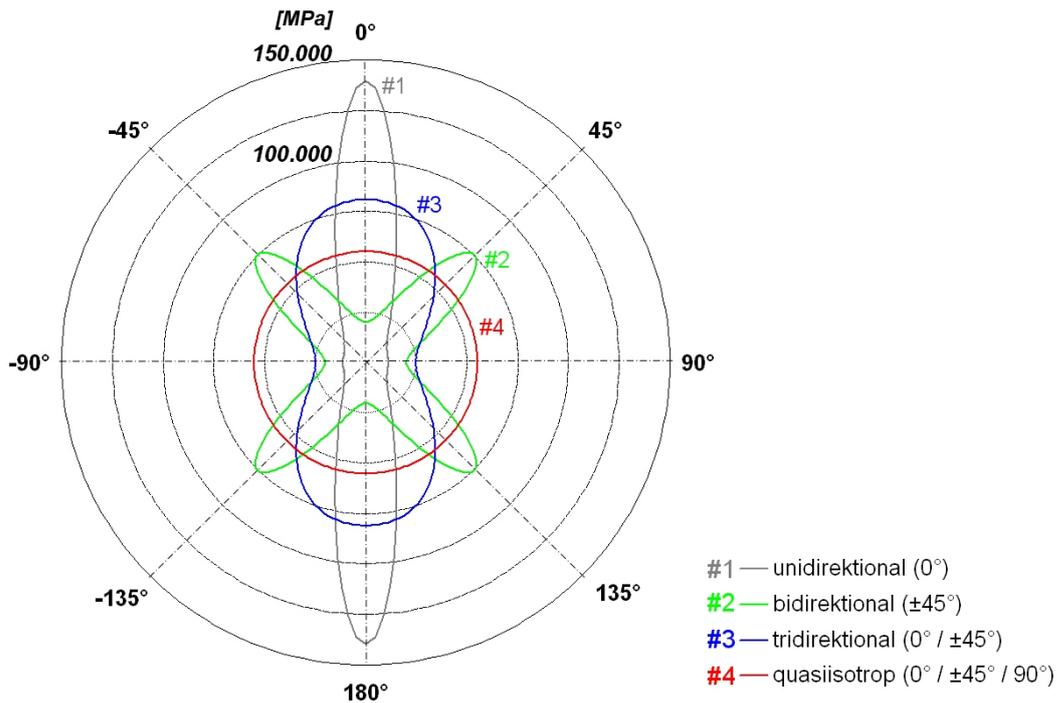


Abb. 2.2: Vergleich der E-Module unterschiedlicher CFK-Laminatarchitekturen ($\alpha = 60\%$) [8]

Diese Anforderung wird auch an das neue Material „CoCo“ gestellt, d.h. also eine lastpfadgerechte, anisotrope Fertigung von Bauteilen aus variabelaxialen Halbzeugen.

Zusätzlich spielt der Halbzeugverschnitt in der Preformfertigung eine immense Rolle bei dem sogenannten „product carbon footprint“, sowie den Bauteilkosten. Den Verschnitt zu verringern ist in der kompletten Faserverbundwelt ein dominantes Ziel.

Des Weiteren ist ein großer Zeit- und Kostenfaktor die Drapierbarkeit von Textilien. Zum einen muss meist iterativ und verbunden mit vielen Versuchen der Zuschnitt mittels FE-Simulation generiert werden. Die Lizenzen der Software-Tools sind oft kostspielig und die Programme noch nicht vollkommen ausgereift. Zudem entstehen während des Drapierprozesses Drapierfehler im Textil oder die Textilien müssen bereits vor der Drapierung eingeschnitten werden, um überhaupt drapiert werden zu können. Dadurch sinken die mechanischen Kennwerte, das Bauteilgewicht wird erhöht und somit steigen die Kosten. Ein neuer Ansatz ist die Bauteilherstellung aus hoch drapierbaren, konturgetreuen Halbzeugen, bei denen die Verstärkungsfasern den Hauptbelastungen folgen.

Die neue Textilentwicklung, die in dieser Arbeit beschrieben wird, zeigt großes Potential, die oben genannten Herausforderungen anzugehen.

Mögliche weitere Einsatzgebiete in der Automobilindustrie werden vor allem im Bereich der Verstärkung des Unterbodens und der B-Säule gesehen, wie hier an Hand von zwei Fahrzeugen von Audi gezeigt. In Abbildung 2.3 wird der Unterboden des Fahrzeuges mit lastpfadgerechter Verstärkung dargestellt.

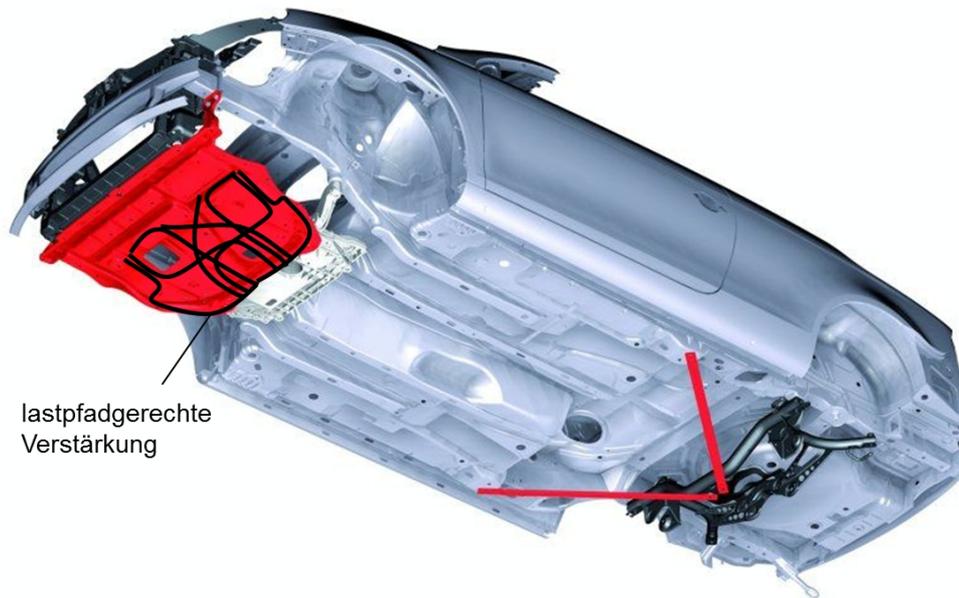


Abb. 2.3: Lastpfadgerechte Verstärkung des Unterbodens [WorldCarFans.com, überarbeitet von Eisenhauer]

Mit der neuen Textilherstellungstechnologie ist es möglich, ein erhöhtes Flächengewicht in den Bereichen der Sicherheitsgurtbefestigung der B-Säulenverstärkung zu erzeugen, sowie Fasern in den Schweller und die Dachstruktur auslaufen zu lassen, um eine gute Kraftübertragung von der B-Säule in die umliegenden Komponenten zu gewährleisten.

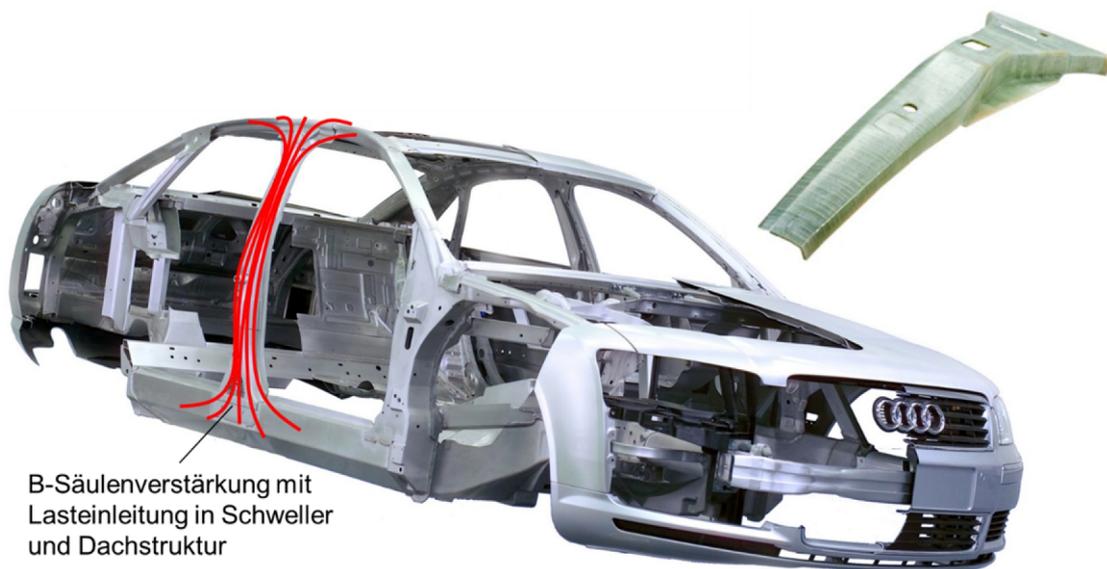


Abb. 2.4: Lastpfadgerechte B-Säule mit Lasteinleitung in Schweller und Dachstruktur [Audi, überarbeitet von Eisenhauer]

Zusammenfassend werden folgende Anforderungen an das Produkt „CoCo“ gestellt:

- Einfache Umsetzung eines lastpfadgerechten Designs
- Minimierung des Verschnitts
- Hoher Output
- Verringerung des Ausschusses auf Grund von weniger Drapierfehlern
- Einfache Generierung des Zuschnittes ohne teure Software
- Verringerung des Bauteilgewichtes
- Verringerung der gesamten Kosten

2.2. Themenstellung der Arbeit

Bestimmte Teile der Prozesskette haben, wie an den obigen Beispielen gezeigt, noch großes Entwicklungspotential. Einige dieser werden in dieser Arbeit aufgegriffen:

- Entwicklung von endkonturnahen Textilien für die Großserienfertigung (Kapitel 4)
 - Analyse von variabelaxialen Ablegestrategien für großserientaugliche lastpfadgerechte und komplexe Bauteile
 - Berechnungsmethoden zu benötigten Fadenreserven für Bauteile mit komplexer Geometrie
 - Versuche und Bewertung der Umsetzbarkeit von Fadenreserven
 - Untersuchungen der Faserablage mit verschiedenen Materialien an einer Versuchsanlage
- Prozessroutenanalyse und Bewertung der Versuchsanlage (Kapitel 5)
- Entwicklung eines Messsystems zur Bestimmung der Drapierbarkeit (Kapitel 6)
 - Evaluierung verschiedener Einflussparameter auf die Drapierbarkeit
 - Versuche zur Bestimmung der Drapierbarkeit von Textilien
- Material- und Prozessanalyse zur Drapierbarkeit von Textilien (Kapitel 7)
 - Versuchsdurchführung an Prüfständen zur Parameterbestimmung
 - Validierung der bestimmten Parameter, Effekte und Defekte am neu entwickelten Drapierprüfstand
 - Analyse des Drapierverhaltens von variabelaxialen Halbzeugen mit Fadenreserven

Die nachfolgende Abbildung 2.5 gibt einen Überblick über die Struktur der Arbeit.



Abb. 2.5: Gliederung und Methodik der Arbeit

Die Entwicklung eines kosteneffizienten und hoch technologisch ausgereiften Halbzeuges umfasst mehrere Entwicklungsthemen und wird an Hand der Methodik in Abbildung 2.6 erarbeitet und dargestellt.

Zum einen geht es um die Betrachtung und Entwicklung von Ablegestrategien, den Kern der Entwicklung des Textils. Daraus ergibt sich im gegenseitigen Abgleich zur Textilentwicklung die Entwicklung einer Versuchsanlage, mit der die gewünschten und entwickelten Ablegestrategien umgesetzt werden sollen. Zusätzlich umfasst diese auch die Entwicklung der Prozessroute, d.h. die Aufeinanderfolge der einzelnen Prozessschritte. Als Basis für die Entwicklung einer hohen Drapierbarkeit des Verstärkungstextils werden Drapieranalysen durchgeführt, die sich vor allem mit dem Drapierverhalten von unidirektionalen, variabelaxialen Verstärkungsmaterialien beschäftigt. Hierbei soll vor allem der Unterschied der verschiedenen Drapiermodi zwischen bisher eingesetzten UD-Materialien und dem neuentwickelten variabelaxialen Material betrachtet werden. Um die Drapierbarkeit von dem neu entwickelten Textil zu bestimmen und mit „Standard-Textilien“ zu vergleichen, wird ein Drapierprüfstand entwickelt. Als letzter Entwicklungsschritt wird ein vollständiges Drapierkonzept erarbeitet, das eine detaillierte

2 Anforderungskatalog und Aufgabenstellung

Drapierprozesskette beschreibt, wie es unter anderem in der Serie aussehen könnte. Die Validierung der bisherigen Entwicklungen wird an Hand von Versuchen an einem generischen Bauteil ausgeführt.

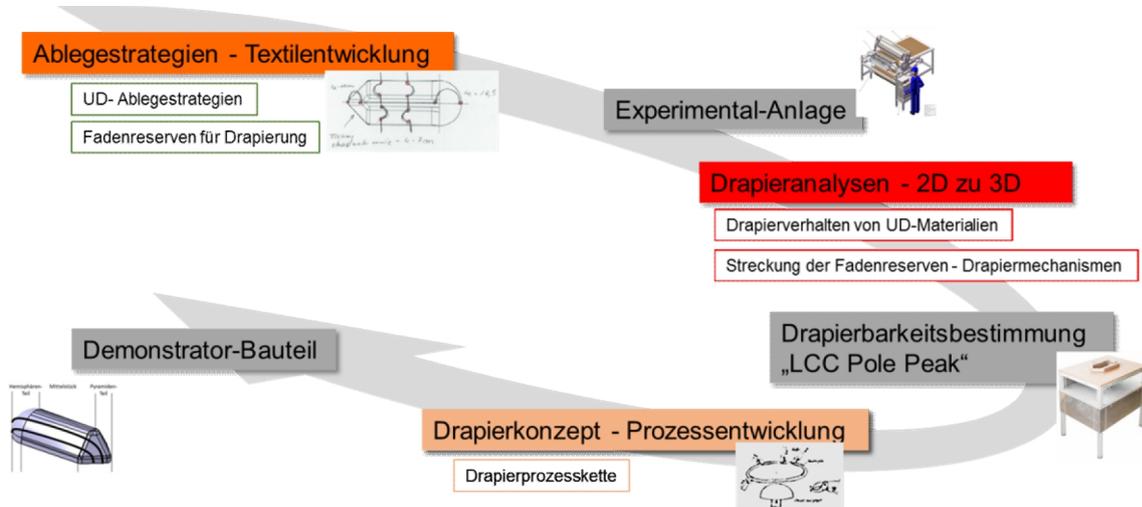


Abb. 2.6: Entwicklungsthemen

3. Grundlagen und Stand der Technik zu hoch drapierbaren, konturgetreuen, unidirektionalen, variabelaxialen Halbzeugen

Im Folgenden werden einige Beispiele für verschiedene Halbzeuge präsentiert, die endkonturnah oder konturgetreu sind, kraftflussgerecht oder auf Grund von Fadenreserven hoch drapierbar sind. Der Schwerpunkt wird auf den hoch drapierbaren Halbzeugen sowie Prüfständen zur Messung der Drapierbarkeit liegen.

3.1. Endkonturnahe und konturgetreue Halbzeuge

In dem folgenden Unterkapitel soll der aktuelle Stand der Technik und die Entwicklungen zu endkonturnahen und konturgetreuen Verstärkungstextilien dargestellt werden.

Auf Grund der Tatsache, dass es unendlich viele, auch nicht veröffentlichte Entwicklungen gibt, wird in dem Abschnitt kein Schwerpunkt auf die Vollständigkeit gelegt, sondern vielmehr verschiedene Textilien und Herstellungsmethoden vorgestellt, die in Patenten und in der allgemein zugänglichen Literatur beschrieben sind.

Endkonturnahe oder konturgetreue zweidimensionale Halbzeuge können unter anderem auf der Basis von aufgeschnittenen Geflechten, Litzen, partiell verstärkten Gelegen, partiell verstärkten Geweben, Geweben mit Teilschuss, aufgeschnittenen Wickellagen, Fiber Patch Preforming (FPP) und Tailored Fiber Placement (TFP) hergestellt werden. Einige dieser Halbzeuge sind zusätzlich auch kraftflussgerecht aufgebaut; auf diese wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen. Geflecht in Form von Litzen, aufgeschnittene Geflechte oder Wickellagen und Gewebe mit Teilschuss oder in Form von „Steered Weave“ sind zwar endkonturnah, werden im Preformprozess jedoch vorwiegend quasi-isotrop oder mit zwei Vorzugsrichtungen aufgebaut. [45] Dadurch wird der Vorteil der endkonturnahen Einzellagen wieder aufgehoben. Abbildung 3.1 zeigt endkonturnahes Gewebe mit Teilschuss. Die hier verwendeten Glasfaserrovings liegen in 90 °-Richtung vor.

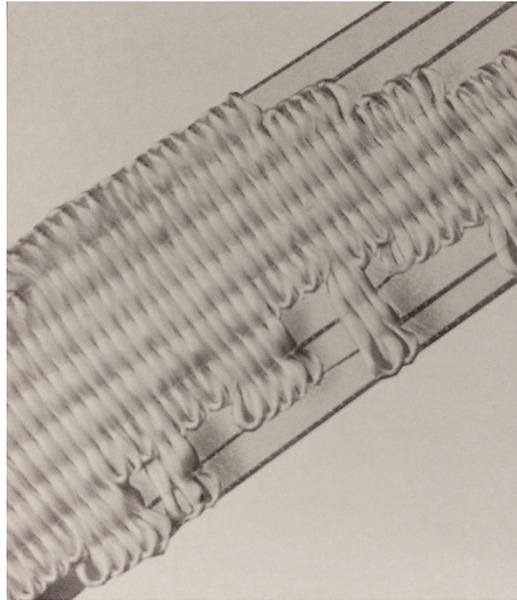


Abb. 3.1: Endkonturnahes Gewebe [Gerster TechTex]

Hier sei auch kurz die Technologie des Tapelegens zu erwähnen. Mit dieser Technologie können bereits mit Matrix getränkte Bändchen, auch Tapes genannt, mittels eines Roboterkopfes oder einer Portalanlage direkt in das Werkzeug abgelegt werden. Die Tapes werden endkonturnah ins Werkzeug positioniert, und können auch die Hauptlastpfade abbilden. Zu diesen Technologien gehören die etablierten Technologien Automated Fiber Placement (AFP) und Automated Taping (ATL).

Noch relativ neue Materialherstellungsprozesse sind FiberForge und das Compositence-Verfahren. Bei der FiberForge-Technologie werden unidirektionale thermoplastische Carbonfaser-Tapes mit einer starren Ablegstation zu einem sogenannten Tailored Blank abgelegt, das aus mehreren Lagen mit unterschiedlichen Faserorientierungen besteht, die punktuell miteinander verschweißt werden. [67]

Das Compositence-Verfahren bedient sich eines komplexen Roboterkopfes, der trockene, bebinderte oder thermoplastische Fasern, Rovings oder Tapes ablegt. Der Prozess ist fast verschnittfrei und die Fasern können in jeglichen Richtungen, den Lastpfaden folgend, abgelegt werden. Mit dem Verfahren können lastoptimierte Faserarchitekturen abgelegt oder maßgeschneiderte Halbzeuge hergestellt werden, wie in Abbildung 3.2 gezeigt. [46]



Abb. 3.2: Lastoptimierte Faserarchitektur und maßgeschneidertes Halbzeug [Compositence]

Durch Positionierung von bis zu vier übereinander separat ansteuerbaren Versatzeinheiten lässt sich zudem ein Verkreuzen einzelner Rovingscharen realisieren. Beispiele möglicher Ablagemuster sind in Abbildung 3.4 skizziert. Bedingt durch den Abstand zwischen dem Fadenaustritt und der Wirkstelle zur Fixierung der einzelnen Rovings muss jedoch eine prozesstechnisch bedingte Abweichung zwischen dem geplanten und tatsächlichen Ablagemuster mit berücksichtigt werden.

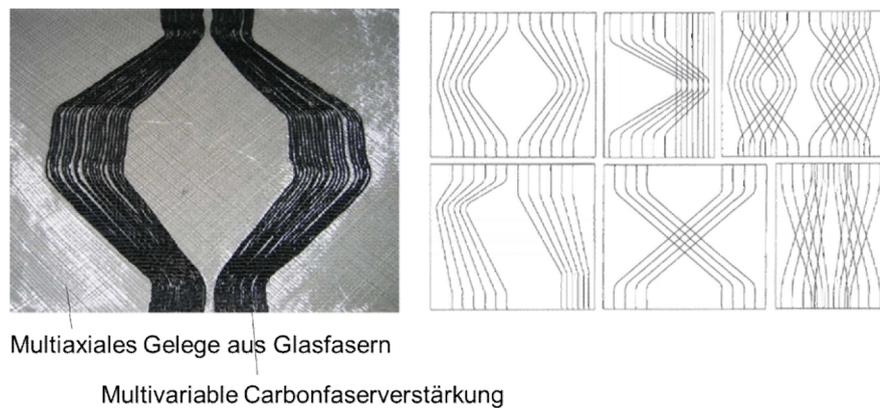


Abb. 3.4: Musterablage eines 24k-Kohlenstofffaserrovings auf einem Glasfasergrund (links), Beispiele unterschiedlicher realisierbarer Fadenablagemuster (rechts) [11]

Mit einer neu entwickelten Anlagentechnik, dem sogenannten „Open Reed Weaving“ der Firma Lindauer Dornier, ist es möglich, lastpfadgerechte Verstärkungsfasern mit auf ein $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe einzuweben, wobei die Verstärkungsfäden fast gestreckt an der Oberfläche des Gewebes liegen. In Abbildung 3.5 ist die Fertigung eines Gewebes auf einer „Open Reed Weaving“-Anlage zu sehen.

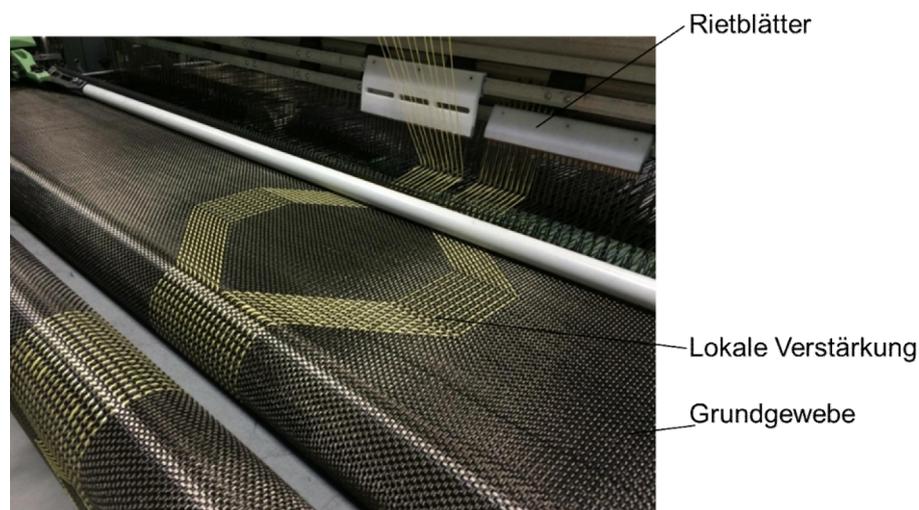


Abb. 3.5: Open Reed Weaving [93]

Besonders flexibel hinsichtlich der Ablage der Verstärkungsfäden ist das „Tailored Fiber Placement“, kurz TFP. Die Verstärkungsfasern werden einzeln auf ein Trägermaterial aufgesteckt und, wenn nötig, in einem Folgeprozess umgeformt. Ein speziell für das TFP-Verfahren entwickeltes Softwareprogramm optimiert Stichverteilungen und Pfadverläufe.



Abb. 3.6: EU-Projekt EMBROIDERY: topologisch optimierter Stuhl hergestellt mittels TFP-Technologie [94]

Die dritte Kategorie bedient sich weder textiltechnischer Methoden noch bedarf es eines Trägermaterials. Die Fasern werden direkt in die Form abgelegt. Hier kann Automated Fiber Placement (AFP), Automated Taping (ATL) und Fiber Patch Preforming (FPP) genannt werden. Bei diesen Prozessen führt meist ein Roboter mittels eines speziell designten Kopfes die Fasern entlang des vorgegebenen Pfades.

Ein Vergleich der Technologien TFP, AFP, FPP und multiaxialen Gelege mit Kettfadenversatz (MAG-KV) in [10] zeigt, dass ein maximaler Drehwinkel von 360° , das heißt die Ablage der Verstärkungsfasern in beliebiger Richtung, bei den Technologien TFP, AFP und FPP umgesetzt werden kann. Mit TFP können Radien von circa 5 mm, abhängig von Rovingtyp und Ablegebreite, mit FPP ca. 115 mm, abhängig von der Patchlänge und mit AFP 50-500 mm, abhängig von Rovingtyp und Anzahl der parallel abgelegten Fäden, realisiert werden. Allerdings sind diese Technologien stark in der Ablegegeschwindigkeit limitiert. Mit TFP können einzelne Rovings mit 3,6 m pro Minute abgelegt werden, mit FPP werden Tapes mit einer Breite von 20 mm mit 5 m pro Minute abgelegt und mit AFP können mehrere Fasern parallel mit 60 m pro Minute abgelegt werden. [12]

3.3. Fadenreserven für Drapierung

In dem Bereich der Einbringung von Fadenreserven sind in den letzten Jahren viele Patente eingereicht worden, von denen das Schutzrecht meist wieder erloschen ist. Besonders viel wurde in dem Bereich TFP, Stricken und Kettenwirken publiziert.

3.3.1. Tailored Fiber Placement

Tailored Fiber Placement ist ein bereits weit entwickeltes Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen. Diverse Bauteile werden mit dieser Technologie hergestellt. Die Verstärkungsfasern, die meist den Hauptspannungen folgen, werden mittels eines Stickkopfes auf einen Untergrund befestigt. Entweder wird für eine gute Drapierung ein dehnba-

rer Untergrund gewählt oder es werden Fadenreserven des Verstärkungsfadens mit integriert.

In dem europäischen Patent EP 0567845 B1 mit dem Titel "Formbares, multiaxiales Verstärkungsgebilde" und dem Publikationsdatum vom 28.10.1993, angemeldet vom Institut für Polymerforschung Dresden e.V., wird die Herstellung eines Verbundbauteils mit sphärischer Ausbuchtung beschrieben. Das Verstärkungstextil besteht aus einem dehnfähigen Trägermaterial, auf das Carbonfaserfilamentgarne aufgestickt werden. Die Verstärkungsfäden werden in leichtem Zick-Zack-Muster verlegt und nur an den Kreuzungs- und Scheitelpunkten mit dem Trägermaterial mittels eines Stickfadens verbunden. Beim Umformen dehnt sich das Trägermaterial, das zum Teil auch zur Faltenvermeidung eingeschnitten werden muss, und die Verstärkungsfäden werden straff gezogen. Dadurch entsteht ein umgeformtes Halbzeug mit geradlinigen Verstärkungsfäden. [13]

In Abbildung 3.7 ist das Verstärkungstextil in 2 D und das daraus umgeformte Bauteil dargestellt. Das Schutzrecht ist wegen Nichtzahlung der Jahresgebühr am 01.11.2003 erloschen.

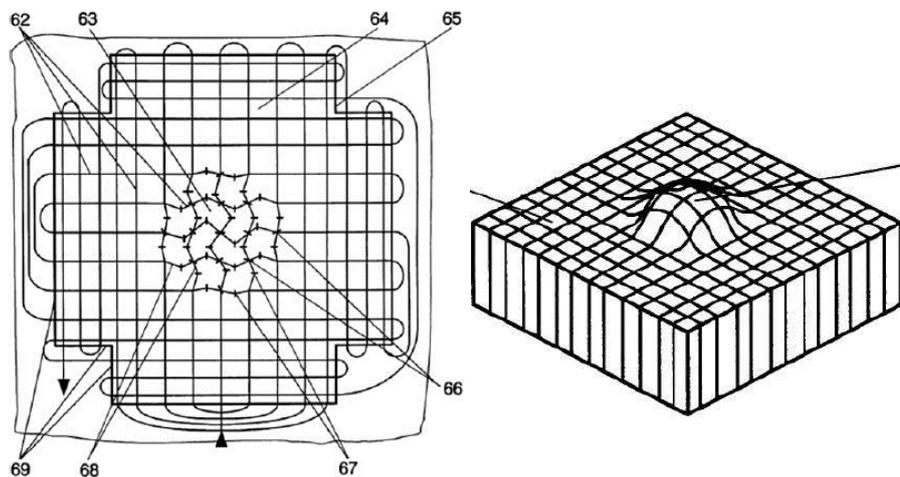


Abb. 3.7: Trägermaterial mit aufgestickten Verstärkungen (links) und umgeformtes Faserverbundbauteil (rechts) [13]

Eine andere Möglichkeit, Fadenreserven in einem Halbzeug zu realisieren, ist die Vorhaltung eines Fadenvorrates außerhalb der Bauteilkontur, wie im Patent EP 0 873 849 A3 mit dem Titel „Beanspruchungsgerechtes Verstärkungsgebilde“ vom Institut für Polymerforschung Dresden e.V. beschrieben. Das Patent wurde am 29.10.1998 publiziert und ist am 01.11.2002 erloschen. [14]

Das Aufbringen von Fasern in Wellenform wie im Patent EP 056 7845 [13] beschrieben braucht eine gewisse Fläche in der Ebene bei dichter Anordnung der Verstärkungsfasern. Daher wurde eine weitere Ablegestrategie entwickelt. Hierbei sind die Verstärkungsfasern, wie in Abbildung 3.8 zu sehen, teils fest auf dem Trägermaterial fixiert (5) und teils in Längsrichtung verschiebbar (6) durch die Bildung von Tunneln aus Stickfaserschleifen (8). Der Fadenvorrat (7) befindet sich meist außerhalb des Bauteils und ist

dort fixiert (9). Die Fixierung wird vor der Umformung gelöst und der Fadenvorrat wird zum Nachfließen während des Drapierprozesses freigegeben.

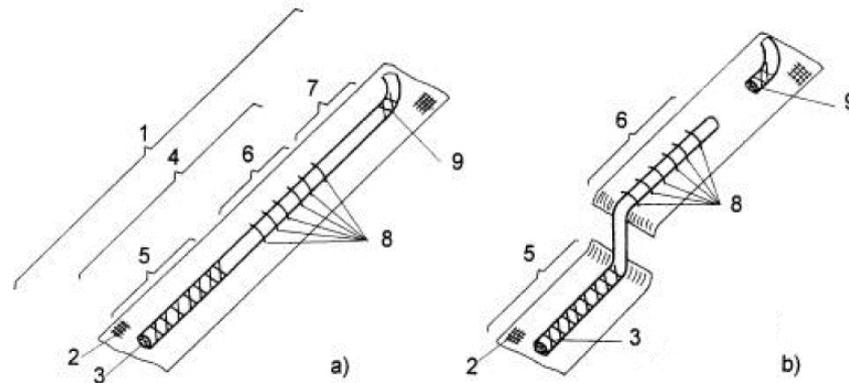


Abb. 3.8: Prinzip des Fadenvorrates außerhalb der Bauteilkontur [15]

In Abbildung 3.9 (rechts) wird ein Bauteil mit einem ebenen Deckel (10) und einer dazu parallelen Krempe (11) mittels des oben beschriebenen Herstellungsverfahrens in einem Schritt und beanspruchungsgerecht produziert, siehe Stickbild in Abbildung 3.9 (links), und dann zu dem hutartigen Bauteil umgeformt.

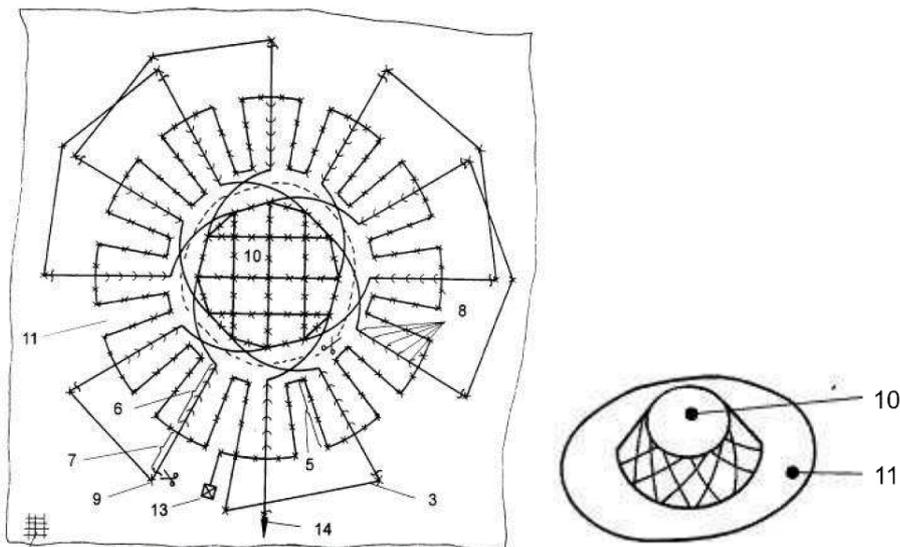


Abb. 3.9: Mittels TFP hergestelltes Halbzeug (links) und geformtes hutartiges Bauteil (rechts) [15]

Die hier beschriebenen Ansätze zeigen nur eine kleine Auswahl der Einbringungsmöglichkeiten von Fadenreserven mittels des TFP-Verfahrens.

3.3.2. Kettenwirken

Die Einbringung von Fadenreserven ist auch im Bereich von Kettenwirken bekannt. Im Folgenden sollen zwei Varianten als Beispiele beschrieben werden. Die Fadenreserven können entweder in Schuss- oder in Kettrichtung eingebracht werden. Die Firmen Olbo Textilwerke GmbH und Textilma AG haben das Patent EP 680 529 A [16] mit

dem Titel „Verfahren und Einrichtung zur Herstellung textiler netzartiger Flächengebilde“, das am 21.07.1994 veröffentlicht und am 01.07.2010 erloschen ist, eingereicht. In dem Patent wird beschrieben, wie Fadenreserven in Schussrichtung integriert und mittels Kettenwirken, Nähwirk- oder Häkelgallonverfahren, fixiert werden. Der Schussfaden kann zwischen den Maschen eine Schlaufe bilden. Diese Schlaufe streckt sich während des Drapierprozesses, wie es in Abbildung 3.10 zu sehen ist.

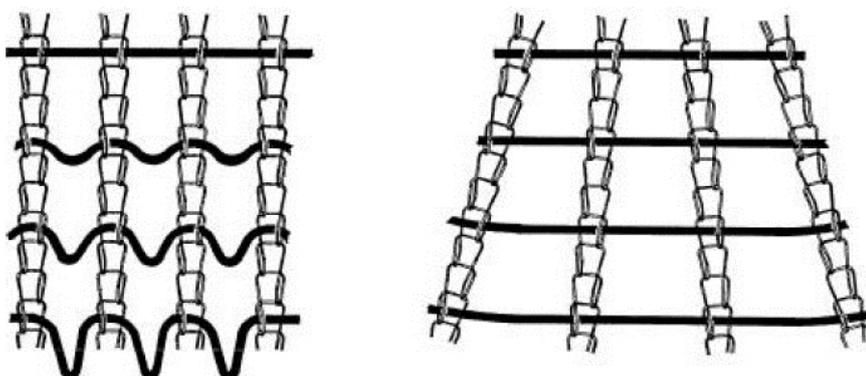


Abb. 3.10: Kettengewirk mit Fadenreserven vor (links) und nach (rechts) dem Drapieren [16]

Die Fadenreserven im Schussfaden werden, wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, durch die Absenkung eines Elements (13), das in senkrechter Richtung hoch und runter bewegt wird und in waagrechter Richtung verschiebbar ist, und der damit verbundenen Auslenkung des Fadens realisiert. Das Klemmsystem (8) hält die Fäden in Position bis der gesamte Faden mit Maschen fixiert ist.

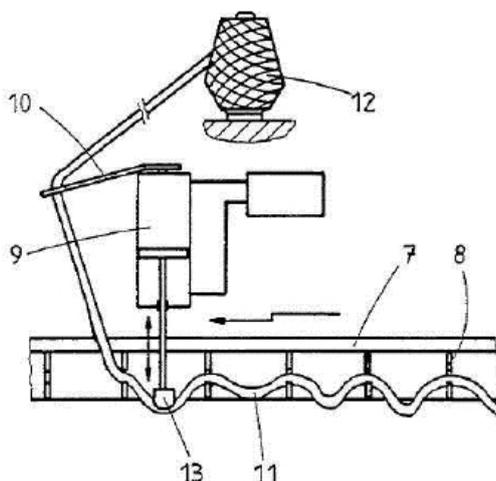


Abb. 3.11: System zur Einbringung der Fadenreserven [16]

In dem Patent EP 0 867 548 A3 „Textiles Gewirk als Verstärkungseinlage zur Herstellung dreidimensionaler faserverstärkter Gegenstände“ [17], das vom 01.10.1998 bis 01.10.2003 schutzrechtlich geschützt war, beschreibt der Anmelder Wolfgang Hoeck, Firma TEC-KNIT GmbH, die Herstellung eines tiefziehbaren Halbzeuges auf Basis der Kettenwirkerei. Verwendet werden Jacquard- oder Raschelmaschinen mit Einzelfadensteuerung. Die zusätzlichen Fäden werden in Kettfadenrichtung eingebracht, in Schussrichtung ausgelegt und von unterschiedlichen Maschenstäbchen entlang der Breite des

Textils fixiert. Ein Verstärkungsfaden kann auch über mehrere Maschen in Abzugsrichtung gespannt werden. Beide Formen der Einbringung von Fadenreserven werden in Abbildung 3.12 gezeigt.

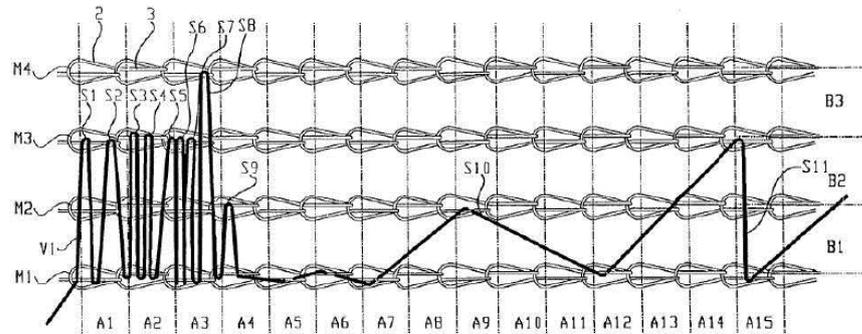


Abb. 3.12: System zur Einbringung der Fadenreserven [17]

Mit trigonometrischen Funktionen anhand des Schnittbildes kann die Länge der einzelnen Fadenreserven berechnet werden. [17] In Abbildung 3.13 wird eine Berechnung am Beispiel einer Halbkugel aufgezeigt. Mit einem Raster wird die Position des Verstärkungsrovings in Schuss- und Kettfadenrichtung abgebildet (rechts). Die Länge wird durch die Kombination der zweidimensionalen Fläche und der dreidimensionalen Oberfläche des Bauteils und demselben Raster trigonometrisch berechnet.

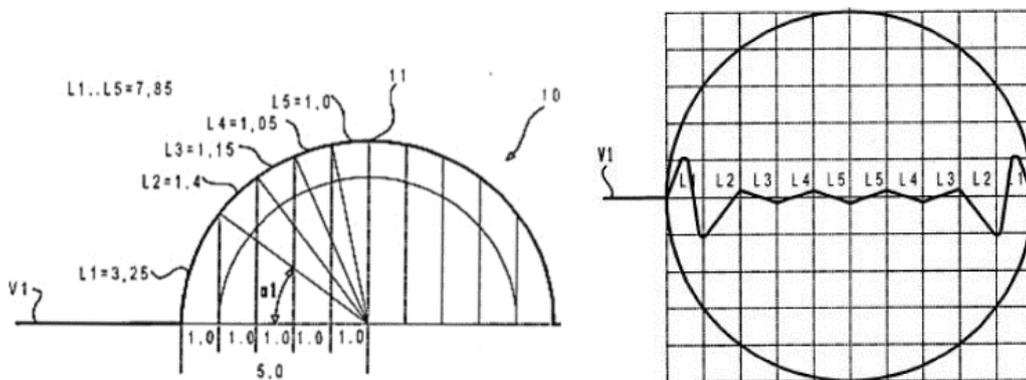


Abb. 3.13: Berechnung der Fadenreserven, am Beispiel einer Halbkugel [17]

Die hier beschriebenen Einbringungsmöglichkeiten von Fadenreserven sind voneinander sehr unterschiedlich und lassen sich an verschiedenen Textilmaschinen umsetzen. Allerdings wirkt sich die Einbringung der Fadenreserven nachteilig auf die Produktivität aus.

3.4. Messung von Drapierbarkeit

Zum Bestimmen der Drapierbarkeit von Halbzeugen gibt es drei Stufen. Auf der Faser-ebene werden Reibungsversuche durchgeführt. Es wird die Reibung der Fasern gegeneinander getestet. Ebenso kann das Textil auf Textil oder auf dem Material der Werkzeugoberfläche getestet werden, was eine Prüfung auf der Textilebene darstellt. In dieser Stufe wird das Textil auf Scherung (z.B. Picture Frame Test), Biegesteifigkeit (z.B.

Cantilever Test) und Zug mittels eines Streifenzugversuches und Fiber Pull out sowie Bias Extension [18, 72] und Kawabata-Versuch getestet. Die daraus gewonnenen Daten können für die Simulation des Textils im Umformprozess verwendet werden. Auf Bauteilebene wird oft ein Drapierprüfstand mit einer etwas komplexeren Form, z.B. eine Halbkugel oder ein Double dome, eingesetzt. Abbildung 3.14 zeigt die beschriebenen drei Stufen der Drapierbarkeitsbestimmung.

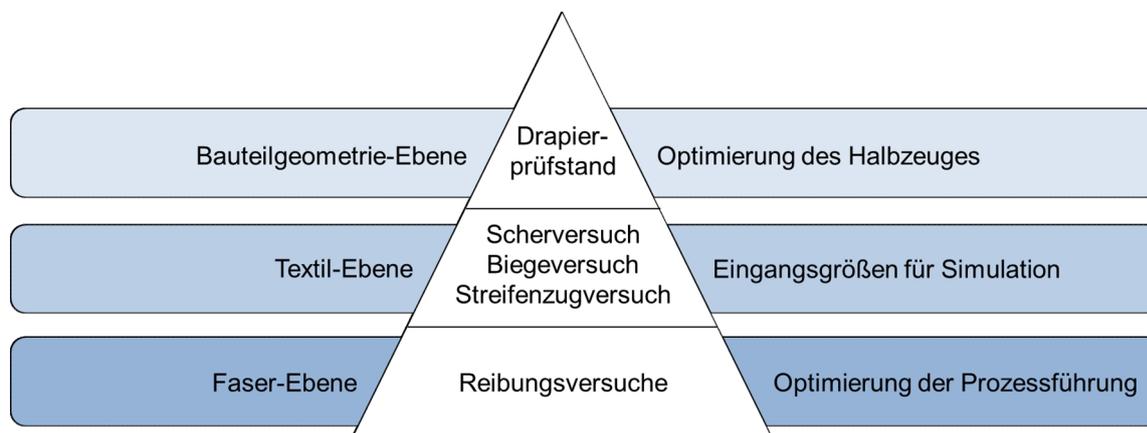


Abb. 3.14: 3 Stufen der Drapierbarkeitsbestimmung von Halbzeugen

In allen Stufen werden unterschiedliche Werte ermittelt, die für verschiedene Einsatzzwecke verwendet werden können.

Zur Optimierung des Textils mittels einer experimentellen Herangehensweise bietet sich ein Drapierprüfstand an mit einer Schikanenform, die bereits einige Formen eines reellen Bauteils aufweisen kann. Drapierprüfstände, das heißt Prüfgeräte zur Bestimmung der Drapierbarkeit von Halbzeugen auf Bauteilgeometrieebene, können auf unterschiedliche Weise kategorisiert werden. Im Folgenden werden die Prüfgeräte hinsichtlich des Verfahrens und der eingesetzten Werkzeuge eingeteilt. Hierzu gehört das Formen mit einem starren Werkzeug, z.B. in Form einer Patrize und einem Niederhalter, mit zwei starren Formen oder mit einer starren Form in Kombination mit einem flexiblen formgebenden Material, z.B. einer Membran.

In den folgenden Unterkapiteln werden beispielhaft einige Drapierprüfstände vorgestellt. An der Fülle der Prüfstände und deren unterschiedlichen Methodik und Aufbauten wird ersichtlich, dass es schwierig ist, den komplexen Drapierprozess mittels eines einzigen Gerätes abzubilden, beziehungsweise darzustellen. Bis dato gibt es keine Standards zum Prüfen der Drapierbarkeit. Wichtig sind daher hierbei vor allem die Eingangsparameter, die Art des zu betrachtenden Prozesses, z.B. Faserführung, und die Art der Auswertung.

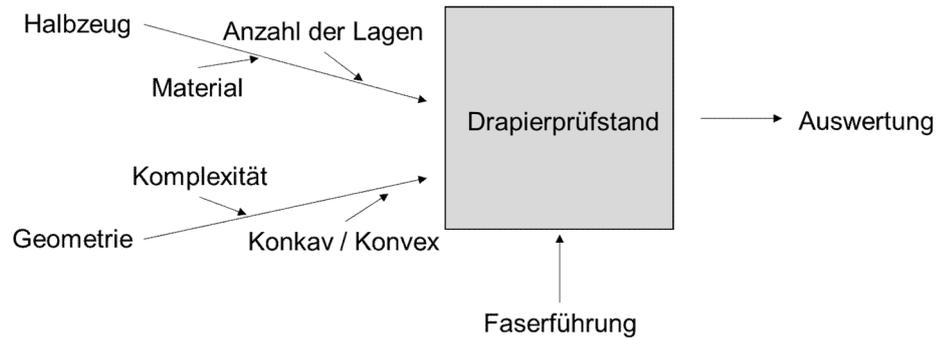


Abb. 3.15: Wichtige Parameter für Auswahl eines Drapierprüfstandes

In Abbildung 3.15 ist das Zusammenspiel der Parameter schemenhaft dargestellt. Das Material und die Anzahl der Lagen beim Halbzeug [77], sowie die Komplexität und die Art der Geometrie hinsichtlich Konkavität und Konvexität sind wichtige Eingangsparameter für den Drapierprüfstand. Die Faserführung bestimmt den Prozessablauf am Prüfstand. Wichtiger Ausgangsparameter ist die Auswertung, die auf verschiedene Weisen geschehen kann, zum Beispiel durch die Aufnahme der Drapierkraft [19], optische Auswertung [21] oder durch eine Verformung zeigende Lage [47].

3.4.1. Formen mit Patrize und Niederhalter

Die erste Art des Prüfstandformates ist die Verwendung einer Patrize und eines Niederhalters. Hierbei wird das zu prüfende Halbzeug mittels eines Niederhalters auf einer ebenen Fläche fixiert. Die ebene Fläche enthält eine Aussparung, durch die die Patrize, auch Drapierform genannt, hindurch bewegt werden kann. Die Patrize kann dieselbe Form der Innenkontur des Niederhalters haben oder auch eine andere annehmen. Oft wird für die Patrize eine Halbkugel oder Hemisphäre, ein Kegel oder ein Double Dome verwendet.

Nachteilig ist hierbei, dass nur konvexe Formen verwendet werden können. Ein großer Vorteil ist, dass das drapierte Halbzeug während und nach dem Drapiervorgang an Hand von Fehlerrückbildungen bewertet werden kann.

Die Universitäten aus Nottingham, Glasgow und Cranfield verfolgen einen sehr ähnlichen Ansatz. Das Halbzeug wird mittels eines Niederhalterpaares fixiert, das eine Aussparung entsprechend dem größten Durchmesser der halbkugelförmigen Drapierform besitzt. In Abbildung 3.16 wird das Prüfverfahren der University Nottingham und Glasgow skizziert.

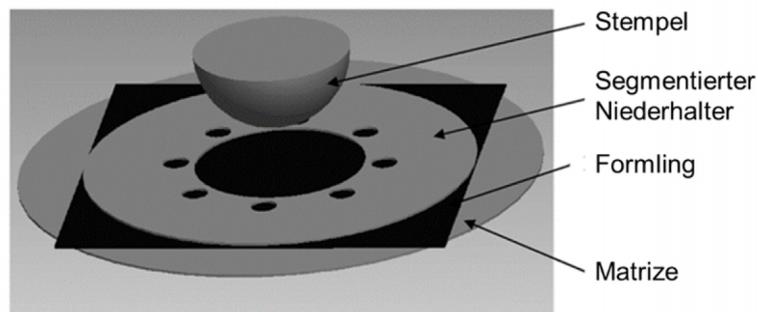


Abb. 3.16: Skizze des Drapierprüfstandes von University Nottingham und Glasgow [18]

In Abbildung 3.17 ist ein Foto des Prüfstandes der University Cranfield zu sehen. Das Textil wird mittels einer Aluminiumform fixiert und mit einem Ober- und Unterring, die auch als Niederhalter fungieren, geklemmt. Durch die Verschiebung der Traverse einer Zugprüfmaschine wird das Halbzeug über eine Form gedrückt.



Abb. 3.17: Drapierprüfstand von University Cranfield [19]

Die Université d'Orléans, Université de Lyon und EADS Innovation Works haben gemeinsam einen Prüfstand entwickelt, der eine Tetraederdrapierform enthält. Die Niederhalter sind nicht durchgängig ausgeführt, sondern sind nur aus einzelnen Segmenten aufgebaut. Diese werden so positioniert, dass das zu drapierende Textil, in Abbildung 3.18 ist ein Gewebe dargestellt, sich ohne oder nur mit wenig Drapierfehlern über die Drapierform spannt.

3 Grundlagen und Stand der Technik zu hoch drapierbaren, konturgetreuen, unidirektionalen, variabelaxialen Halbzeugen

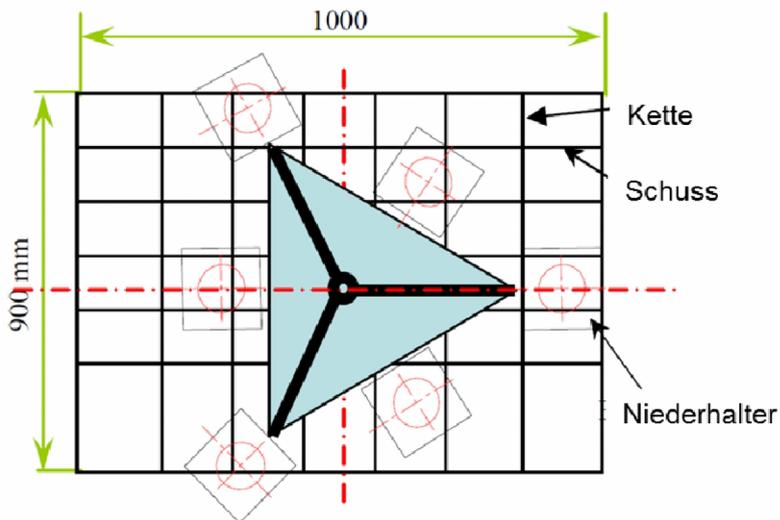


Abb. 3.18: Drapierprüfstand der Universität d’Orléans, Université de Lyon und EADS Innovation Works [20]

Der Prüfstand, siehe Abbildung 3.19, enthält eine Kamera als optisches Messsystem (A), eine hydraulische Verfahrenseinheit (C) und einen pneumatischen Niederhalter (B).

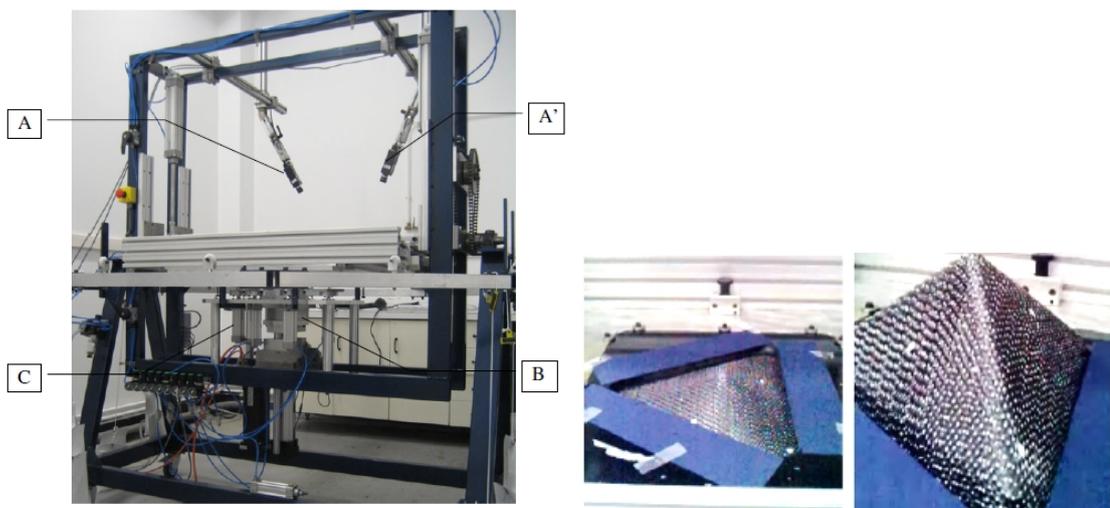


Abb. 3.19: Drapierprüfstand der Universität d’Orléans und Université de Lyon, Aufbau (links) und Drapierform mit Niederhalter (rechts) [21]

Auch das ITV Denkendorf hat einen Drapierprüfstand aufgebaut (Abbildung 3.20), mit dem speziell die Drapiersimulation auf Bauteilebene validiert wird.

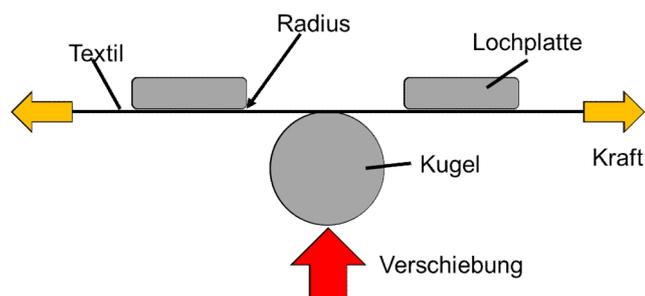


Abb. 3.20: Drapierprüfung am ITV

3 Grundlagen und Stand der Technik zu hoch drapierbaren, konturgetreuen, unidirektionalen, variabelaxialen Halbzeugen

Bei der Drapiersimulation werden das Textil, die Durchdrückform und der Niederhalter simuliert.

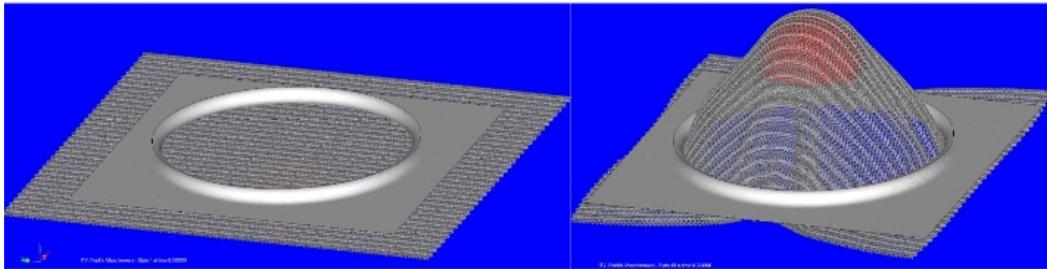


Abb. 3.21: Drapiersimulation am ITV Denkendorf [22]

Das ITA der RWTH Aachen hat ebenfalls Drapierprüfstände aufgebaut. Einer von ihnen arbeitet mit dem Prinzip der Patrizie in Kombination mit einem Niederhalter.

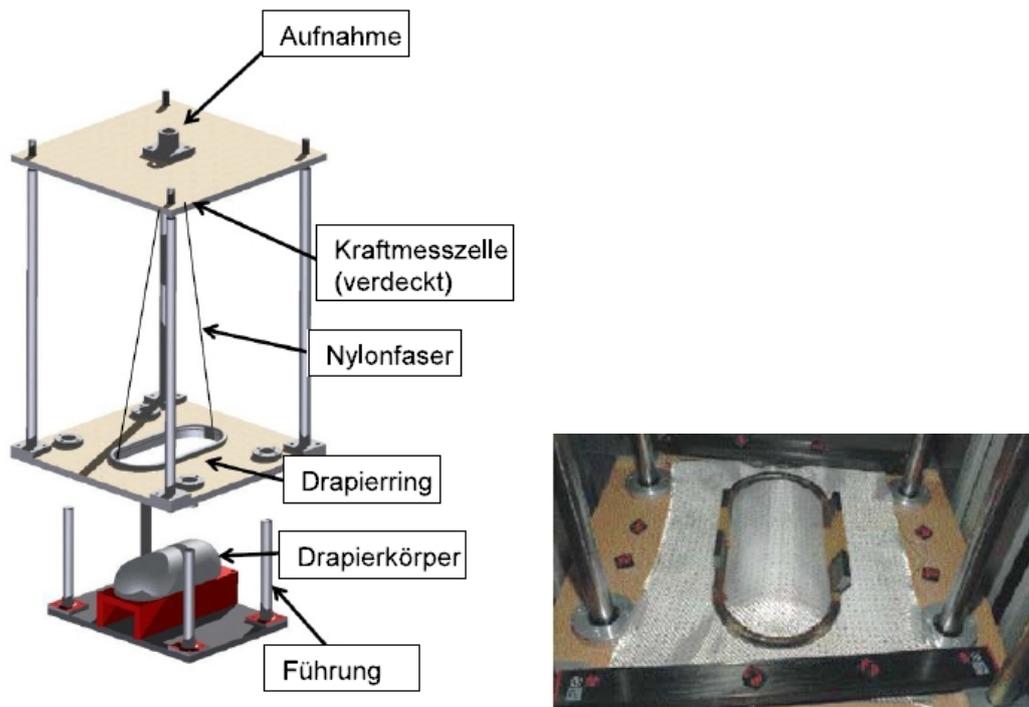


Abb. 3.22: ITA-Drapierprüfstand I [ITA RWTH Aachen]

Der einzige momentan kommerziell verfügbare Drapierprüfstand ist der DRAPETEST der Firma TexTechno. Die Grundidee des Drapierprüfstandes ist bei der Firma SAERTEX GmbH & Co. KG entstanden [23]. In einem öffentlich geförderten Projekt wurde der Prüfstand weiterentwickelt, mit einem Kamerasystem vom FIBRE Bremen ausgestattet und für einen kommerziell erhältlichen Prüfstand überarbeitet.

Aktuell bemüht sich die Firma TexTechno um eine Standardisierung des Prüfstandes in Form einer DIN SPEC.

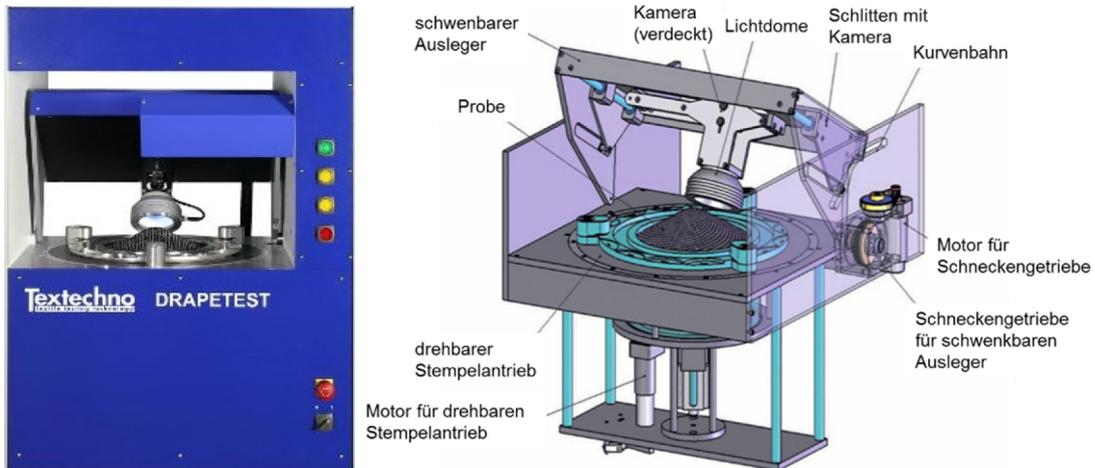


Abb. 3.23: Drapierprüfstand DRAPETEST [TexTechno] (links), detailliert [FIBRE] (rechts)

3.4.2. Formen mit Ober- und Unterwerkzeug

Das Verfahren mit einem Ober- und Unterwerkzeug entspricht eher dem Drapierprozess wie er in der Industrie, vor allem bei größeren Stückzahlen durchgeführt wird. Daher wird bei dieser Prüfung eher der reelle Drapierprozess widerspiegelt. Allerdings ist es in diesem Verfahren schwieriger, den drapierten Zustand des Textils zu beurteilen.

Die University of Surrey verwendet eine dicke Glasplatte als Oberwerkzeug, doch auch hierbei ist es schwer, die Faserwinkel und Drapierfehler exakt zu vermessen. Um beim Umformen und Entformen die Position des Textils ohne Verschiebungen und Springback zu sichern, werden Streifen eines doppelseitigen Klebandes auf der Form befestigt.

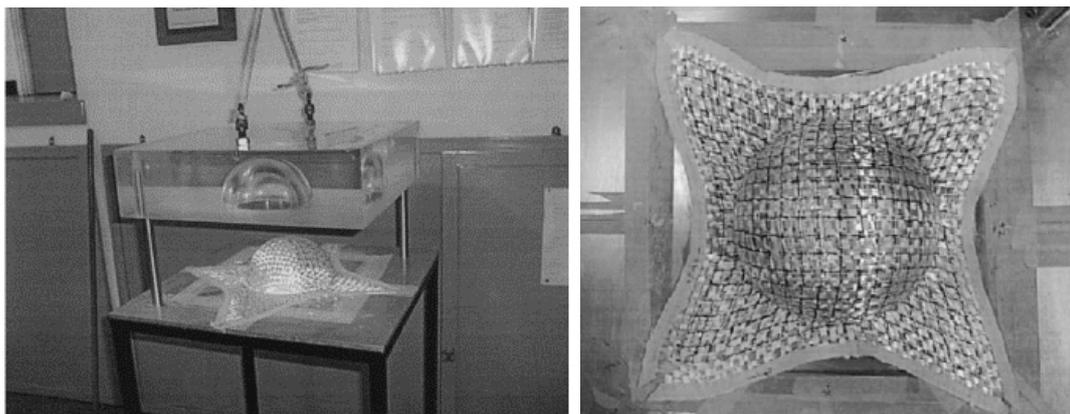


Abb. 3.24: Drapierprüfstand der University of Surrey [24]

Das ITA der RWTH Aachen hat bei einem ihrer Prüfstände ebenfalls das Prinzip der Ober- und Unterform gewählt, löst es aber einfacher mittels eines Drapiertisches, in dem eine adaptive Aussparung mit einer Adaptionplatte enthalten ist. Das Textil wird dadurch zwischen der unteren Platte und der Gegenform ohne zusätzliche Hilfsmittel fixiert.

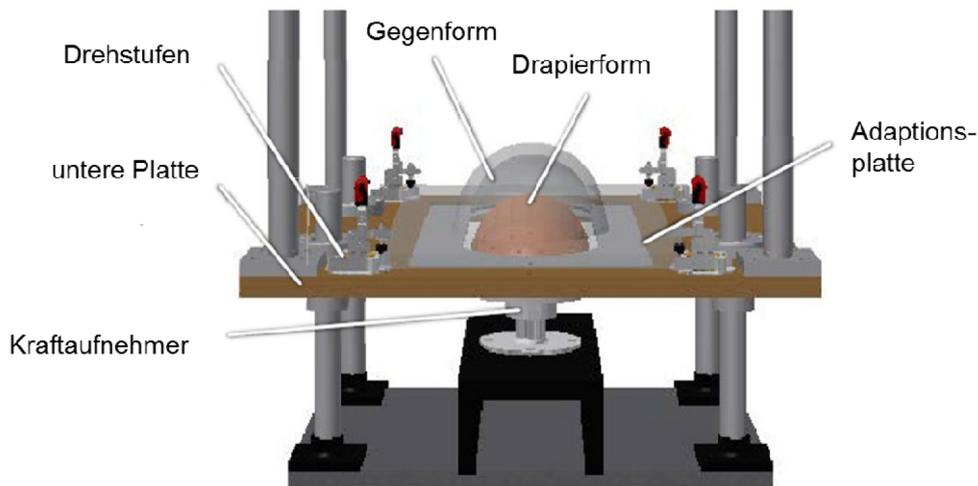


Abb. 3.25: ITA-Drapierteststand II [ITA RWTH Aachen]

Ein weiterer Prüfstand mit dieser Methode kann unter anderem auch bei der KU Leuven gefunden werden.



Abb. 3.26: Drapierteststand der KU Leuven [www.mtm.kuleuven.be]

3.4.3. Formen mit Unterwerkzeug und Diaphragmamembran

Das Umformen von Halbzeugen mit einem Unterwerkzeug und einer flexiblen Diaphragmamembran entspricht ebenfalls industriellen Prozessen, allerdings eher bekannt aus der Fertigung von kleineren Stückzahlen. Unterschieden wird zwischen Single- und Double-Diaphragmaverfahren. Bei dem prozessstabileren Verfahren, dem Double-Diaphragmaverfahren, wird die Preform zwischen zwei Membrane fixiert, so dass kein Verrutschen möglich ist. Allerdings muss der Off-set, hervorgerufen durch die Dicke der unteren Membran beim Werkzeug, mit eingeplant werden. Wie in Abbildung 3.27 schematisch gezeigt ist, werden die Membrane und die Preform mittels Vakuum über das Werkzeug gezogen. Schwierig bei diesem Verfahren ist das Ausformen speziell von kleinen konkaven Radien.

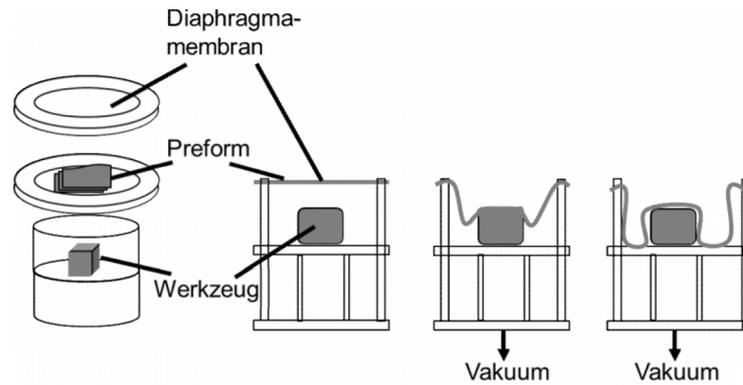


Abb. 3.27: Schematisch dargestellter Prüfstand mit Double-Diaphragma-Verfahren [25, überarbeitet Eisenhauer]

Ein großer Vorteil dieses Prüfverfahrens, wie es unter anderem an der TU Delft (Abbildung 3.28) angewandt wird, ist die Möglichkeit, die Preform direkt zu injizieren. Dadurch wird der Drapierzustand eingefroren und kann im Detail bewertet werden.

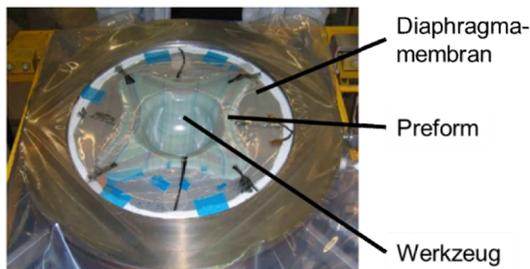


Abb. 3.28: Drapierprüfstand der TU Delft [26]

3.4.4. Zusammenfassung der unterschiedlichen Typen von Drapierprüfständen

Zusammenfassend kann zu den Drapierprüfständen gesagt werden, dass bisher jeder einzelne Prüfstand nur für einen bestimmten Zweck konstruiert und verwendet wird. Allerdings wäre eine Vereinheitlichung der Drapierprüfstände wünschenswert, um Drapiererergebnisse und Drapierprozesse auf einer wissenschaftlichen und kommerziellen Ebene vergleichen zu können.

4. Textilentwicklung – Entwicklung von variabelaxialen Ablegestrategien

Die Entwicklung des neuartigen hoch drapierbaren, konturgetreuen, variabelaxialen Verstärkungstextils bildet die Basis der Arbeit. Die Textilentwicklung fokussiert sich vor allem auf die Ablegestrategien, um die Anforderungen an das Textil erfüllen zu können (d.h. anisotrop, variabelaxial und konturgetreu) und trotzdem eine hohe Drapierbarkeit dieser UD-Lagen zu erreichen. Zudem muss für die Textilentwicklung das Bauteil betrachtet werden, was vor allem die Bauteilgeometrie und –komplexität betrifft.

Ziel ist es, die Faserablage auf einem Trägermaterial hinsichtlich der Bauteilkontur, den Lastpfaden und der Bauteilkomplexität, was die Einbringung von Fadenreserven beinhaltet, zu generieren. Die Berechnung und Umsetzung der Fadenreserven für erhöhte Drapierbarkeit ist hierbei der Hauptfokus bei der Entwicklung der Ablegestrategien.

4.1. Ablegestrategien zur variabelaxialen Gestaltung

Normalerweise wird eine 2 D Abwicklung, in der die Drapiermechanismen des Textils berücksichtigt werden, eines 3 D Bauteils durchgeführt, um somit den Zuschnitt zu generieren. Die Abbildung 4.1 illustriert die zwei unterschiedlichen Möglichkeiten zur Generierung des Zuschnittes. Im oberen Teil der Abbildung ist dargestellt, wie die Zuschnittsgenerierung bei der aus dem Stand der Technik bekannten Bauteilfertigung geschieht. Die Oberfläche des Bauteils, hier am Beispiel der generischen Form „Pole Peak“ dargestellt, wird mittels Simulation unter Berücksichtigung der Drapiereigenschaften des Textils in die 2 D-Ebene abgewickelt, woraus sich der Zuschnitt für das Textil ergibt. Die Abwicklung der Fläche kann auf zwei verschiedene Art und Weisen geschehen, zum einen mit einer FE-Modellierung oder mittels eines kinetischen Ansatzes. Beide Ansätze bedürfen einer Anzahl von Versuchen und Iterationsschritten. Im unteren Teil der Abbildung 4.1 wird der neue Ansatz zur Zuschnittsgenerierung des neu entwickelten Textils „CoCo – Contoured Composites“ illustriert.

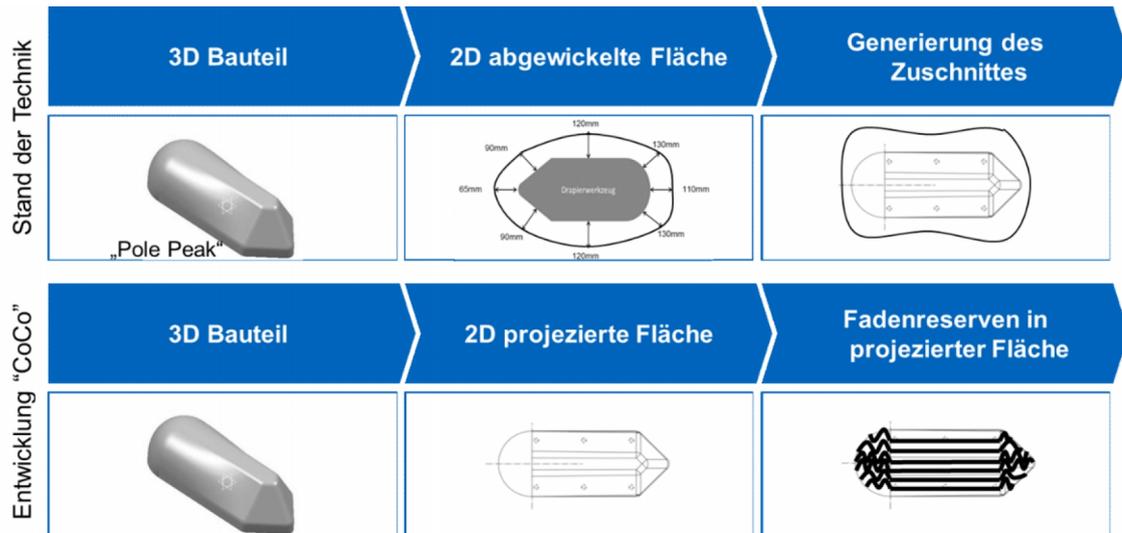


Abb. 4.1: Generierung des Zuschnittes, Stand der Technik im Vergleich zum Halbzeug „CoCo“

Bei der neu entwickelten Ablegestrategie zur Fertigung des Halbzeuges „CoCo“ entspricht der Zuschnitt der in 2 D projizierten Fläche des Bauteils, während kein zusätzliches Material von außen nachfließen muss. Die benötigte Faserlänge ist in Form von Fadenreserven in der projizierten Fläche enthalten. Die projizierte Fläche wird in CATIA erzeugt.

4.2. Bewertung der Bauteilkomplexität

Zur Umsetzung der Fadenreserven innerhalb der Bauteilgrundfläche muss zunächst die Bauteilgeometrie und die Komplexität beschrieben werden. Das Textil soll dem Bauteil entsprechend maßgeschneidert sein. Daher muss jedes Bauteil individuell betrachtet werden, so dass das Halbzeug entsprechend der Bauteilgeometrie und Topologie, Kontur und Lastpfade hergestellt werden kann. Schwerpunkt in dieser Arbeit ist die Betrachtung der Lastpfade hinsichtlich ihrer Umsetzung und werden daher frei gewählt.

Bei der Bewertung der Bauteilkomplexität sollen besonders die Bereiche identifiziert werden, bei denen die höchsten Umformgrade umgesetzt werden müssen. Es wird demnach keine vollständige Betrachtung der Bauteilkomplexität angestrebt. Zur Bestimmung der Bauteilkomplexität wird ein Ansatz gewählt, der mittels der Punktwolke in CATIA (Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application) der Firma Dassault Systèmes bestimmt werden kann. Die CAD (Computer Aided Design) Daten werden im STL (Surface Tessellation Language)-Format in Form einer Punktwolke dargestellt, siehe Abbildung 4.2. Im STL-Format wird die Oberfläche des 3 D-Bauteils mit Dreiecken beschrieben. Die Anzahl der Dreiecke mit den dazugehörigen Punkten erhöht sich in komplexeren Bereichen. Bei vergleichender Auswertung von Bauteilen muss die Darstellungsgenauigkeit identisch sein.

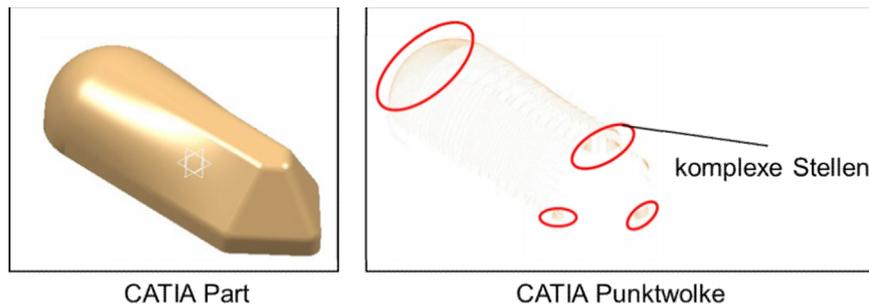


Abb. 4.2: Umwandlung eines CATIA Teils in eine Punktwolke zur Bestimmung der Bauteilkomplexität

In der STL-Darstellung werden die Bereiche mit höherer Komplexität sichtbar. Die Anzahl der Punkte gibt die lokale Bauteilkomplexität an. Aus der Komplexitätsanalyse ergeben sich die Bereiche im Bauteil mit hohen Umformgraden.

4.3. Geometrische Betrachtung des Bauteils

Bei der geometrischen Betrachtung des Bauteils lässt sich die Geometrie der 3D Oberfläche in die 2 D Grundfläche mit den entsprechenden Oberflächenlängungsverhältnis und Oberflächenverstreckungsverhältnis projizieren.

Zieh- oder Verstreckverhältnis sind ein gebräuchliches Maß zur Beurteilung der Thermoformbarkeit mit folgenden Parametern:

- Oberflächenverstreckverhältnis R_a
- Oberflächenlängungsverhältnis quer R_q
- Oberflächenlängungsverhältnis längs R_l

Aus der Literatur sind Oberflächenverstreckverhältnisse für einfache Geometrien bekannt, siehe Abbildung 4.3.

Form	Bild	Fläche	Oberflächenverstreckverhältnis R_a
Halbkugel		$2\pi R^2$	2
Zylinder		$\pi R^2 + 2\pi Rh$	$l + \frac{2h}{R}$
keilförmige Wanne		$2h + 2b[h^2 + (\frac{a}{2})^2]^{\frac{1}{2}}$	$\left(\frac{h}{b}\right) + [l + (\frac{2h}{a})^2]^{\frac{1}{2}}$
Pyramide		$(\frac{ab}{2})[l + (\frac{2h}{b})^2]^{\frac{1}{2}} + (\frac{ab}{2})[l + (\frac{2h}{a})^2]^{\frac{1}{2}}$	$(\frac{l}{2})[l + (\frac{2h}{b})^2]^{\frac{1}{2}} + (\frac{l}{2})[l + (\frac{2h}{a})^2]^{\frac{1}{2}}$

Abb. 4.3: Oberflächenverstreckverhältnis für einfache Geometrien [27], mit h=projizierte Höhe

Für die Bewertung der Drapierbarkeit wird eine generische Form entwickelt. Diese Drapierform „Pole Peak“ weist verschiedenen Geometrien auf, bestehend aus einem Hemisphären-Teil, einem Mittelstück und einem Pyramiden-Teil. Die Zusammensetzung aus den verschiedenen Bereichen führen zu unterschiedlichen Komplexitäten innerhalb der Drapierform.

Zusätzlich weisen die einzelnen Bereiche unterschiedliche Oberflächenlängen auf, die zu unterschiedlichen Oberflächenlängungsverhältnissen R zwischen der Oberflächenlänge in 3 D und der Grundflächenlänge in 2 D führen.

Aus den Ausgangs- und Preformlängen ergeben sich an Hand der folgenden Berechnung (Formel 1 und 2) die Oberflächenlängungsverhältnisse für die Form „Pole Peak“ [27]:

$$R_q = \frac{L_a}{L_p} = \frac{260 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 1,86 \quad (1)$$

$$R_l = \frac{L_a}{L_p} = \frac{474 \text{ mm}}{359 \text{ mm}} = 1,32 \quad (2)$$

Mit:

- R_q = Oberflächenlängungsverhältnis quer
- R_l = Oberflächenlängungsverhältnis längs
- L_a = Ausgangslänge
- L_p = Preformlänge

Oberflächenlängungsverhältnis	Länge Oberfläche [mm]	Länge Grundfläche [mm]	R
quer an Hemisphäre R_q	220	140	1,57
quer an Pyramide R_q	209	140	1,49
quer an Mittelstück R_q	208	140	1,49
längs R_l	434	359	1,21

Abb. 4.4: Drapierform „Pole Peak“ mit Oberflächenlängungsverhältnissen

Die Drapierform weist relativ hohe Oberflächenlängungsverhältnisse auf. Dies stellt eine Herausforderung beim Drapieren dar. Das größte Oberflächenlängungsverhältnis R befindet sich entlang der x-Achse am Übergang vom Mittelstück zur Hemisphäre, rot markiert in Abbildung 4.5.

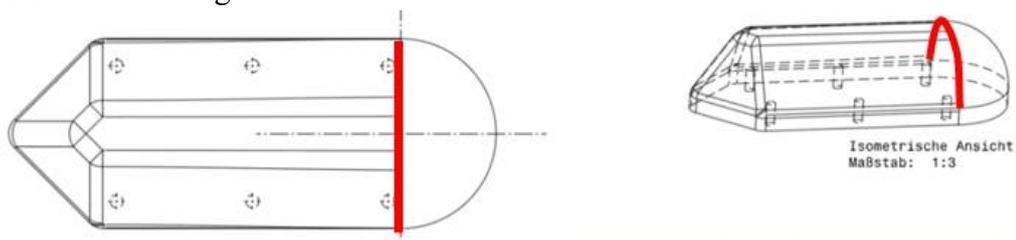


Abb. 4.5: Drapierform „Pole Peak“ mit Oberflächen- und Grundflächenlänge quer zur Hemisphäre

Wird die gesamte Geometrie betrachtet, so ergibt sich eine Oberflächenvergrößerung von ca. 200 %, wie es an Hand der Formel (3) berechnet wird. In der Automobilindustrie haben Bauteile eine Oberflächenvergrößerung um etwa 120 %. [95]

$$R_a = \frac{F_p}{F_a} = \frac{0,092 \text{ m}^2}{0,044 \text{ m}^2} = 2,09 \quad (3)$$

Mit:

R_a = Oberflächenverstreckungsverhältnis

F_a = Ausgangsfläche, Grundfläche

F_p = Preformfläche

4.4. Berechnung der Fadenreserven

Für die Herstellung des Halbzeuges ist es notwendig aus der geometrischen Betrachtung Anzahl, Länge und Position der Rovings für jedes Bauteil zu berechnen. Das Prinzip der Berechnung aller benötigten Daten wird an der generischen Form „Pole Peak“ gezeigt. Die Richtung der Lastpfade ist für diese Drapierform frei gewählt, und zwar longitudinal, d.h. in y-Richtung der Form. Da keine Hauptlastpfade identifiziert werden, soll die Form vollständig mit Rovings bedeckt werden.

Der Oberflächenlängungsfaktor R_a der projizierten Länge in 2 D zur Oberflächenlänge in 3 D der generischen Form ist am Übergang zur Hemisphäre in x-Richtung am größten. Die Oberflächenlänge beträgt hier 157 %, bei projizierter Länge von 140 mm und der Oberflächenlänge von 220 mm. Der senkrechte Sockel wird hierbei nicht betrachtet, da er nicht Teil der Struktur des generischen Bauteils ist. Daher ist die Anzahl der Rovings zur Bedeckung der Fläche entlang dieser Linie, in Abbildung 4.6 in rot dargestellt, ausschlaggebend für die Anzahl der zu verwendenden Rovings.

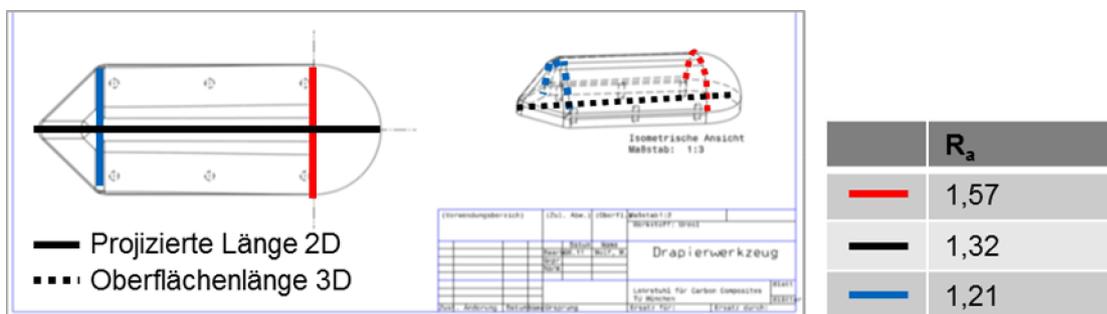


Abb. 4.6: Oberflächenvergrößerungsfaktor R_a der Form „Pole Peak“

4.4.1. Berechnung der Rovinganzahl und Rovingposition

Um die gesamte Form mit Rovings zu bedecken wird die Anzahl und Position der Rovings entlang der x-Achse unter Verwendung der Rovingbreite und des Achsenwinkels berechnet. In dem hier angeführten Beispiel wird ein 24k-Roving der Firma Toho Tenax verwendet. Die durchschnittliche Ablegebreite beträgt 7,2 mm. Daraus errechnen sich eine Anzahl von 30 Rovings und ein entsprechender Achsenwinkel von 6° zum Ursprung auf der halben Hemisphäre. Aus dem Achsenwinkel entlang des Umfanges der halben Hemisphäre lassen sich die Rovingpositionen auf der x-Achse berechnen, und zwar in Form von Intervallen. In Abbildung 4.7 ist skizziert, wie die Positionen auf der x-Achse berechnet werden.

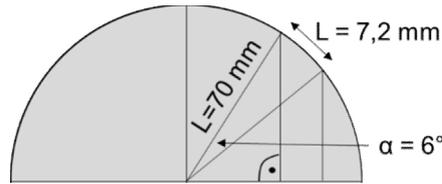


Abb. 4.7: Skizze zur Berechnung der Rovingposition auf der x-Achse

Zu der Berechnung wird folgende Formel (4) verwendet:

$$x(\alpha) = r \times \cos(\alpha \times a); a = 1 \dots n \quad (4)$$

Mit :

r = Radius

α = Achsenwinkel

a = Rovingnummer

Zur Positionierung der Rovings wird der Mittelpunkt jedes Intervalls herangezogen, die der Abbildung 4.8 zu entnehmen sind.

Rovingnummer	Position auf x-Achse (Mittelpunkt des Rovings)	Rovingnummer	Position auf x-Achse (Mittelpunkt des Rovings)
1	3,66	16	70,19
2	10,94	17	70,96
3	18,09	18	72,48
4	25,05	19	74,74
5	31,74	20	77,72
6	38,07	21	81,37
7	43,99	22	85,67
8	49,43	23	90,57
9	54,33	24	96,01
10	58,63	25	101,93
11	62,28	26	108,26
12	65,26	27	114,95
13	67,52	28	121,91
14	69,04	29	129,06
15	69,81	30	136,34

Abb. 4.8: Mittelpunkte der Rovings zur Positionierung auf x-Achse

Diese Intervalle, 30 an der Zahl, werden zeichnerisch auf die projizierte Fläche des Drapierwerkzeuges übertragen. Die Anzahl der Intervalle, das heißt die Anzahl an benötigten Rovings, in dem Bereich mit dem größten Oberflächenlängungsfaktor wird über die ganze Form beibehalten, außer an beiden Enden, wo die Rovings im Randbereich kürzer sind und somit entlang der x-Achse auslaufend weniger werden. Das Ergebnis ist für die generische Form „Pole Peak“ in Abbildung 4.9 gezeigt.

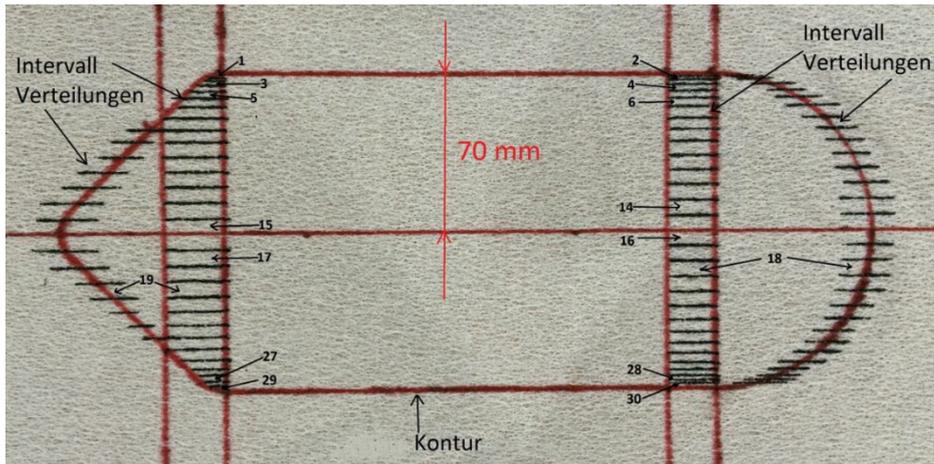


Abb. 4.9: Position der Intervalle auf der projizierten Fläche der Drapierform

Abhängig von den Hauptlastlinien können die Rovings nicht nur flächendeckend in eine Richtung verlaufen, sondern variabelaxial entlang der Hauptlastpfaden, und müssen somit nicht über die gesamte Fläche homogen verteilt sein, sondern nur an den Positionen, wo die Lasten auftreten.

Die Länge der projizierten Form in x-Richtung ist kleiner als die Oberfläche in 3 D, und zwar um einen Faktor von 1,57. Daher werden die 30 Rovings auf mehrere Lagen aufgeteilt, in dem Beispiel auf 3 Lagen. Die erste Lage enthält zum Beispiel die Rovings 1,4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, wie in Abbildung 4.10 dargestellt. Nach der Drapierung der drei Lagen rutschen die Rovings nebeneinander und bedecken die Oberfläche der Form vollständig.

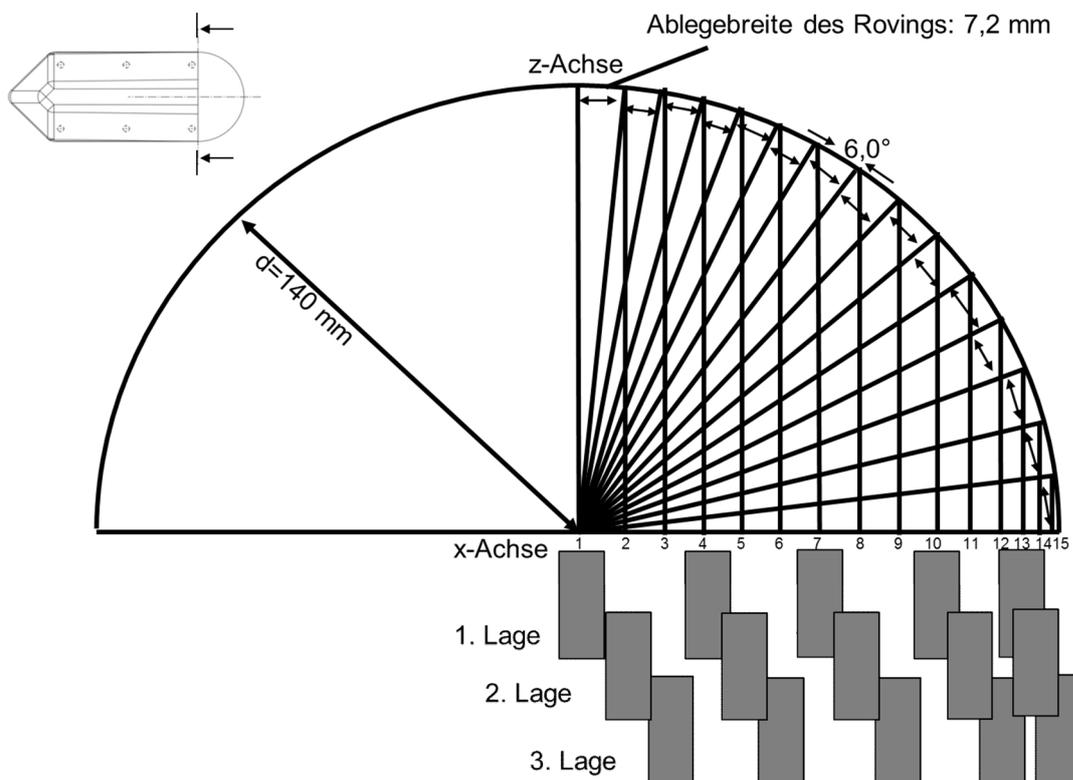


Abb. 4.10: Berechnung der Position der Verstärkungsfäden auf der x-Achse vom Bauteil

In der Abbildung 4.10 wird nur die Rovingposition der Hälfte der Rovings, die gebraucht werden, um die Oberfläche zu bedecken, gezeigt, da die Form „Pole Peak“ symmetrisch entlang der y-Achse ist.

4.4.2. Berechnung der Faserlängen

Zur Berechnung der Faserlänge wird aus dem 3 D-Modell in CATIA eine Punktwolke erstellt. Diese wird exportiert und in LS PrePost, ein von LSTC hoch entwickelter Pre- und Postprozessor, welcher kostenfrei durch DYNAMore erhältlich ist, importiert. Dort wird über eine Flächenrückführung die 3 D Geometrie und alle Punkte mit einem definierten Abstand angezeigt. Diese Punkte werden über eine Testdatei im ASCII-Format in MATLAB (matrix laboratory) der Firma MathWorks importiert. In MATLAB werden die Informationen über die Lage der Punkte auf der Projektion (x/y-Ebene) und auf der 3 D-Oberfläche (x/y/z-Ebene) errechnet. Das Prinzip der Berechnung ist in Form eines Abfolgediagramms in Abbildung 4.11 dargestellt.

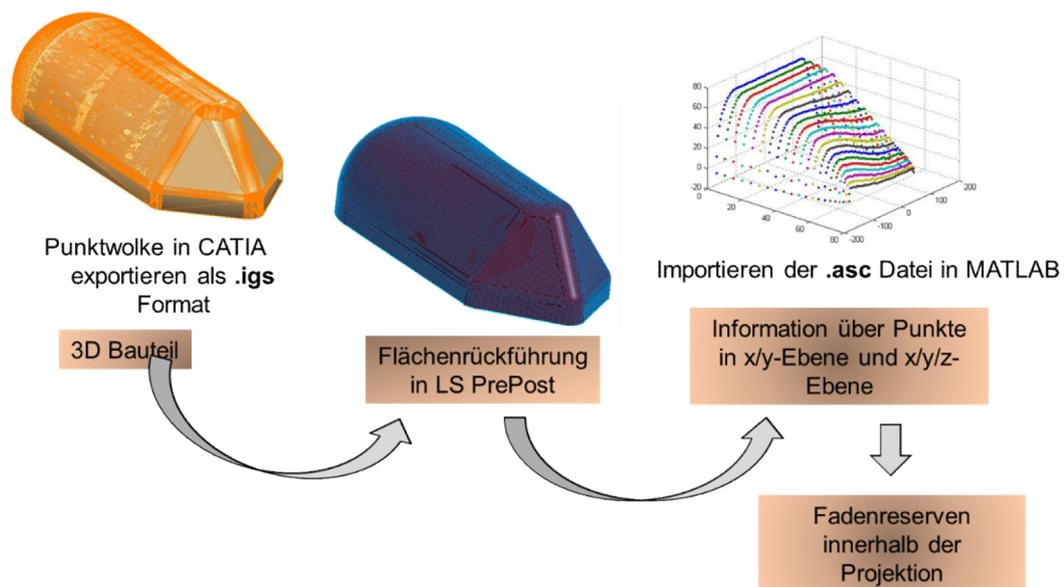


Abb. 4.11: Prinzip der Berechnung der Fadenreservenlängen

Mit der Punktwolke des 3 D Bauteils werden in MATLAB die individuellen Abstände zwischen allen Punkten in y- und z-Richtung für jeden einzelnen Roving entlang der x-Achse berechnet, die aufsummiert zur Rovinglänge führen, die gebraucht wird, um die Oberfläche nach dem Drapiervorgang zu bedecken. Abbildung 4.12 zeigt die einzelnen Rovinglängen in 3 D (oben) und in 2 D (unten).

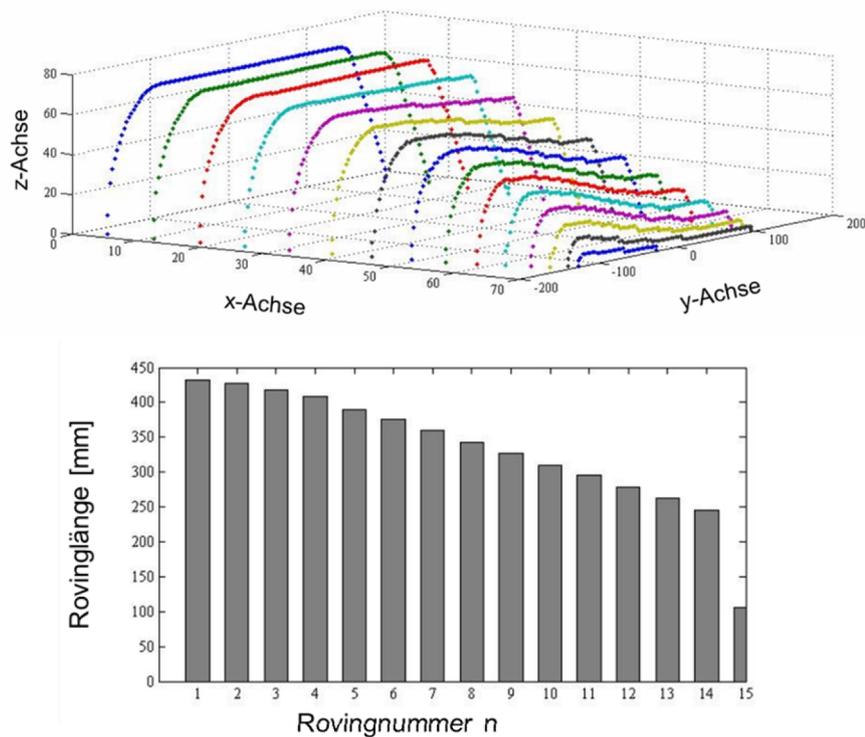


Abb. 4.12: Berechnete Rovinglängen mit Fadenreserven für die halbe Form „Pole Peak“

Des Weiteren müssen noch für die Umsetzung die Fixierungspunkte der Verstärkungsfäden auf dem Trägermaterial gewählt werden, die die Fadenreserven innerhalb der Grundfläche widerspiegeln. Die Anzahl und Anordnung dieser Punkte hängt stark mit der Bauteilkomplexität und dem eingesetzten Verstärkungsfaden und seiner Biegesteifigkeit zusammen. Die Fadenreserven werden in dem Bereich positioniert, wo sich hohe Umformgrade befinden.

4.5. Umsetzung der Fadenreserven

Die Fadenreserven, die zur Drapierung benötigt werden, können in zwei unterschiedlichen Ebenen umgesetzt werden, in z-Richtung sowie in x/y-Richtung. Beide Möglichkeiten werden in den folgenden Kapiteln auf ihre Umsetzbarkeit betrachtet. Die Bewertung findet an Hand des Materialverhaltens als auch an der Umsetzbarkeit mittels einer neu entwickelten Versuchsanlage statt.

4.5.1. Fadenreserven in z-Richtung

Die Umsetzbarkeit der Fadenreserven in z-Richtung hängt von der Biegesteifigkeit der Verstärkungsfasern ab. Zum einen spielen die Abstände der Fixierungspunkte eine Rolle. Je enger diese zueinander liegen umso stabiler ist der spätere Drapierprozess. In Abbildung 4.13 wird eine Halbkugel mit Fadenreserven in der z-Richtung umgesetzt. Die Fixierungspunkte liegen eng beieinander und sind mit einer geringen Höhe ausgeführt. Das rote Kreuz markiert den Pol der Halbkugel.

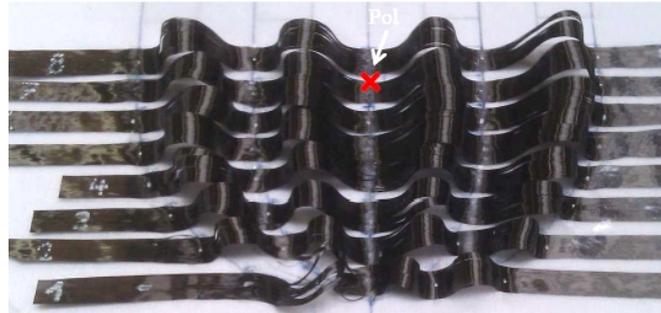


Abb. 4.13: Fadenreserven in z-Richtung mit engen Fixierungspunkten zur Drapierung einer Halbkugel

Zum anderen ist die Schlaufenhöhe ein Faktor, der betrachtet werden muss. Je höher diese ausfallen, umso mehr muss sich während des Drapierprozesses das Trägermaterial dehnen. Zusätzlich lassen sich hohe Schlaufen ab einer Höhe von 15 mm nicht reproduzierbar beim Umformen kontrollieren. Unterschiedliche Schlaufenhöhen sind in Abbildung 4.14 umgesetzt.



Abb. 4.14: Fadenreserven in z-Richtung mit unterschiedlichen Schlaufenhöhen zur Drapierung einer Halbkugel

Die Fadenreserven lassen sich mit Carbonfaserrovings sehr gut umsetzen und stabil drapieren, wie es in Abbildung 4.15 zu sehen ist.

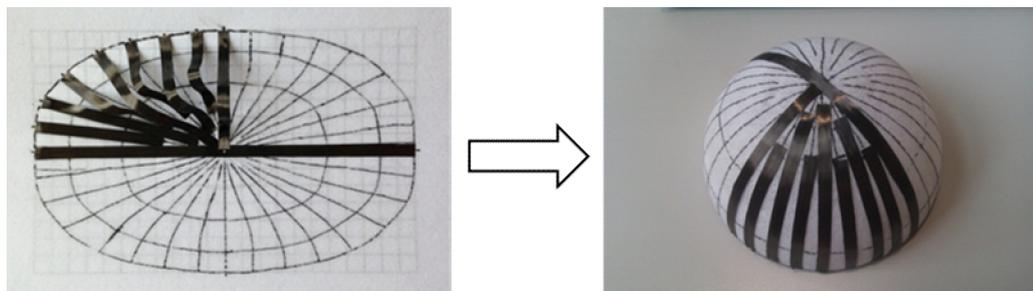


Abb. 4.15: Fadenreserven in z-Richtung zur Drapierung einer Halbkugel, radial verlaufende Verstärkungsfasern

Allerdings ist das Anlagenkonzept sehr komplex. Jeder Roving muss hierbei einzeln geführt werden, um den nötigen Vorschub für die Schlaufen in z-Richtung zu generieren.

Zusätzlich muss jeder Roving einzeln mit einem Heizschuh auf dem Trägermaterial fixiert werden, da sich die Fixierungspunkte nicht immer an derselben Längenposition entlang der Breite des Halbzeuges befinden.

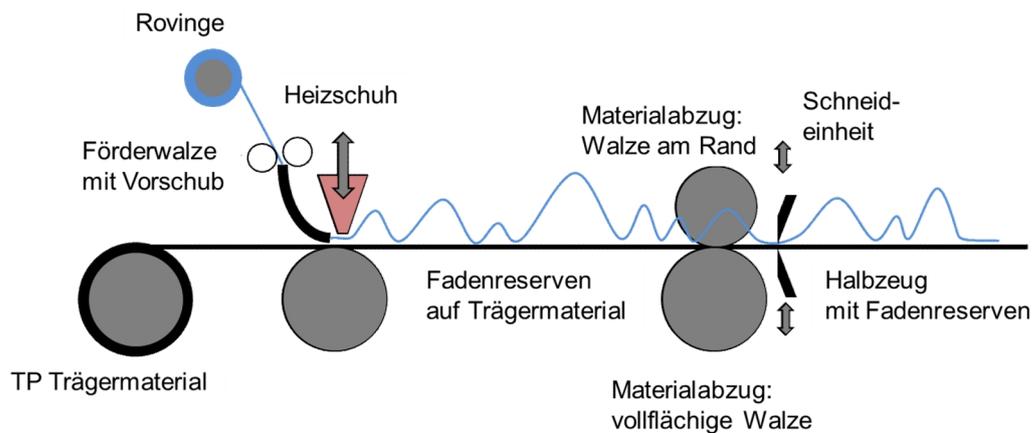


Abb. 4.16: Anlagenkonzept zur Umsetzung der Fadenreserven in z-Richtung

Somit verlangt dieses Anlagenkonzept viele Einzelteile, sowie eine recht komplexe Steuerung.

4.5.2. Fadenreserven in x/y-Richtung

Zur Umsetzung der Fadenreserven erweist sich die Ablage in x/y-Richtung erheblich einfacher. Zum Verpressen der Rovings mit dem Trägermaterial kann zunächst ein einfaches Walzenpaar verwendet werden. Die Umsetzung der Einbringung von Fadenreserven wird hier an Hand eines Beispiels dargestellt. In dem hier aufgezeigten Beispiel wird ein Carbon-Roving der Firma Toho Tenax Europe GmbH verwendet, HTS40 24k. Die Ablegebreite dieses Rovings beträgt im Durchschnitt 7,2 mm. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben werden die Anzahl und Längen der einzelnen Rovings berechnet. Zur vollen Bedeckung der generischen Form „Pole Peak“ werden dreißig Rovings benötigt. Diese Rovings lassen sich nicht alle gleichzeitig nebeneinander auf der ersten Lage des Trägermaterials wegen Platzmangels im undrapierten Zustand ablegen, da die projizierte Fläche kleiner ist als die dreidimensionale Oberfläche des Bauteils. Daher werden die Rovings gleichmäßig auf drei Lagen, wie in Abbildung 4.10 skizziert, aufgeteilt, mit jeweils zehn Rovings pro Lage.

Für erste Versuche werden die Rovings auf drei miteinander verbundene Lagen eines thermoplastischen Trägervlieses mit jeweils einem Flächengewicht von 6 g/m² der Firma Spunfab Ltd. mit einem Ultraschallschweißgerät befestigt und zur besseren Stabilisierung mit weiteren kleinen Stücken des Vlieses von oben thermisch verklebt. In Abbildung 4.17 werden aus den berechneten Rovinglängen (links) die drei Lagen (rechts) hergestellt.

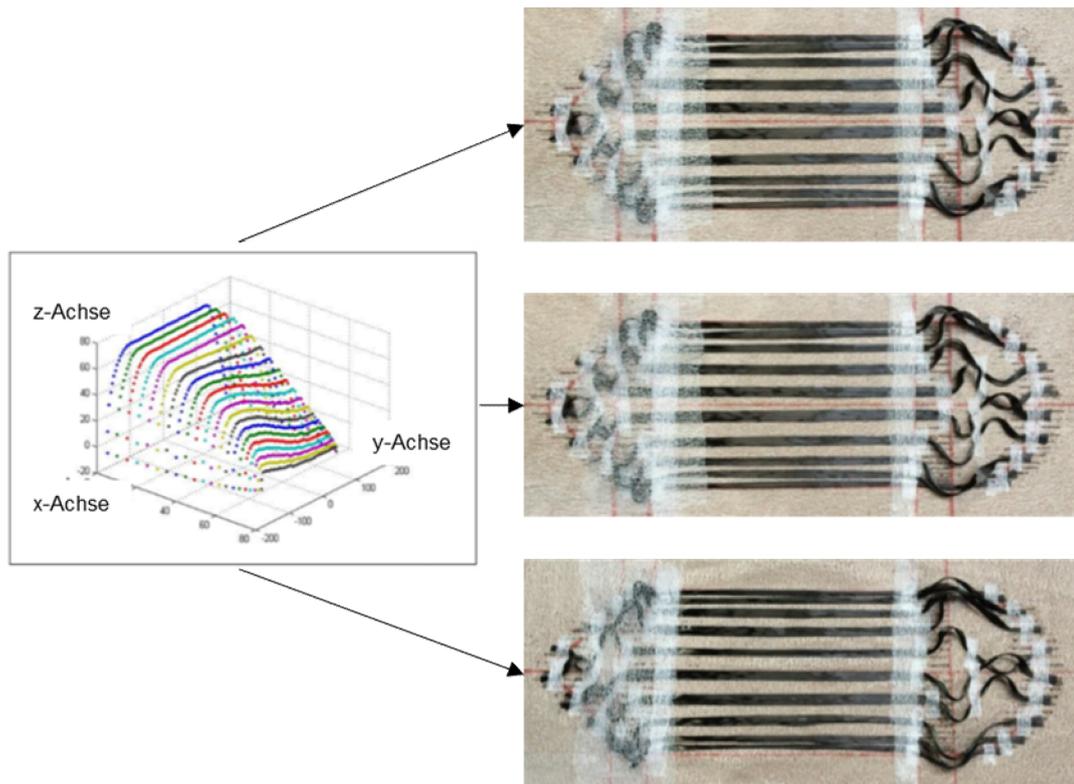


Abb. 4.17: Umsetzung der Fadenreserven in x/y-Richtung am Beispiel des „Pole Peaks“

Die drei Lagen aus Trägermaterial und Verstärkungsfasern werden als Stack in den Drapierprüfstand eingelegt, mit Niederhaltern fixiert und über die Drapierform „Pole Peak“ drapiert, wobei sich die Fadenreserven auf der Oberfläche gerade ausrichten und somit die Fadenschlaufen verschwinden. Das Anlagenkonzept wird hierbei wie folgt umgesetzt, siehe Abbildung 4.18.

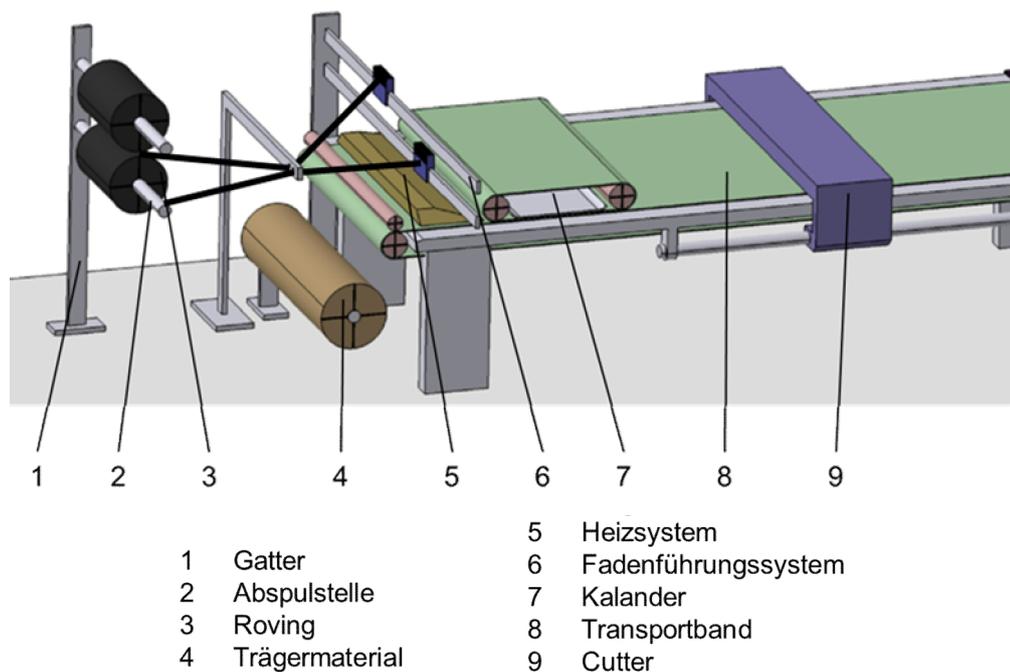


Abb. 4.18: Anlagenkonzept zur Umsetzung der Fadenreserven in x/y-Richtung [28]

Die Rovings werden von einem Gatter mit gebremsten Spulstellen abgezogen und mittels der Fadenführung auf das Trägermaterial, das von unten von einer Rolle abgezogen wird, positioniert. Auf Grund der Oberflächenerwärmung des thermoplastischen Trägermaterials bleiben die Verstärkungsfasern auf der Oberfläche kleben und werden durch den Kalandrierer miteinander verpresst. Dieses Konzept ist einfacher umzusetzen als die Ablage mit Fadenreserven in z-Richtung. Daher wird diese für die Konzipierung der Versuchsanlage ausgewählt.

4.6. Material- und Strukturtechnologie für die Fertigung von Contour Composites („CoCo“)

Das Halbzeug „CoCo“ setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen, dem Trägermaterial und den Verstärkungsfasern. Das Bauteil kann auf einer duroplastischen und thermoplastischen Matrix basieren. Ziel ist es, ein porenfreies Laminat mit gestreckten Fasern herzustellen.

4.6.1. Trägermaterialien

Das Trägermaterial hat mindestens zwei Aufgaben, und zwar die Verstärkungsfasern anzuheften und stabil durch die Anlage zu bringen. Im späteren Drapierprozess soll es keinen Störfaktor darstellen, das heißt, es muss alle Verformungen mitmachen. Zusätzlich kann das Trägermaterial bereits die Matrix, zum Teil oder vollständig, darstellen.

Daraus ergibt sich folgendes Anforderungsprofil:

- Stabilität während der Ablage, speziell in y-Richtung
- Hohe Dehnbarkeit; geometrieabhängig; Längung = ca. 150 % (SF = Spreizfaktor)
- Gute Drapierbarkeit ohne Faltenwurf
- Anhaftung der Fasern (bei Raumtemperatur oder erwärmt)

Abbildung 4.19 skizziert die Faserablage (schwarz) auf dem Trägermaterial (blau) innerhalb der Bauteilkontur (grau).

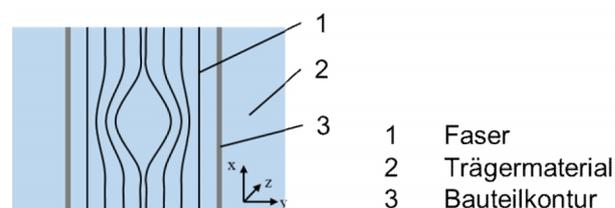


Abb. 4.19: Skizze der Faserablage auf dem Trägermaterial

Idealerweise ist das Trägermaterial bereits die Bauteilmatrix, das heißt aus duroplastischem oder thermoplastischem Material in Form eines Films oder einer Folie. Das Trä-

germaterial kann allerdings zunächst auch Matrix-unabhängig sein, das heißt es wird auf einem thermoplastischen Vlies abgelegt oder auf mit Pulver beschichtetem Textil. Vorversuche bei der Firma EMS Chemie zeigen, dass zur Anhaftung eines Carbonrovingings auf einem flächigen Textil mindestens 30 g/m² Pulver benötigt werden. Der Auftrag von 30 g/m² Pulver führt allerdings zu einer sehr steifen Schicht auf der Oberseite des Textils nach dem Ansintern, die stark brüchig ist. Dagegen führt die Anhaftung eines thermoplastischen Vlieses auf der Oberfläche eines Textils durch Kontakthitze zu einem flexibleren Textil. Daher wird bei den folgenden Versuchen lediglich das thermoplastische Vlies betrachtet. Für zusätzliche Erhöhung der Schadenstoleranz kann ein Glasvlies oder Glasgewirk eingebracht werden. Abhängig von der späteren Prozesskette wird das Trägermaterial wie folgt ausgewählt.

A. Matrix-unabhängig => thermoplastisches Vlies (Abbildung 4.20)

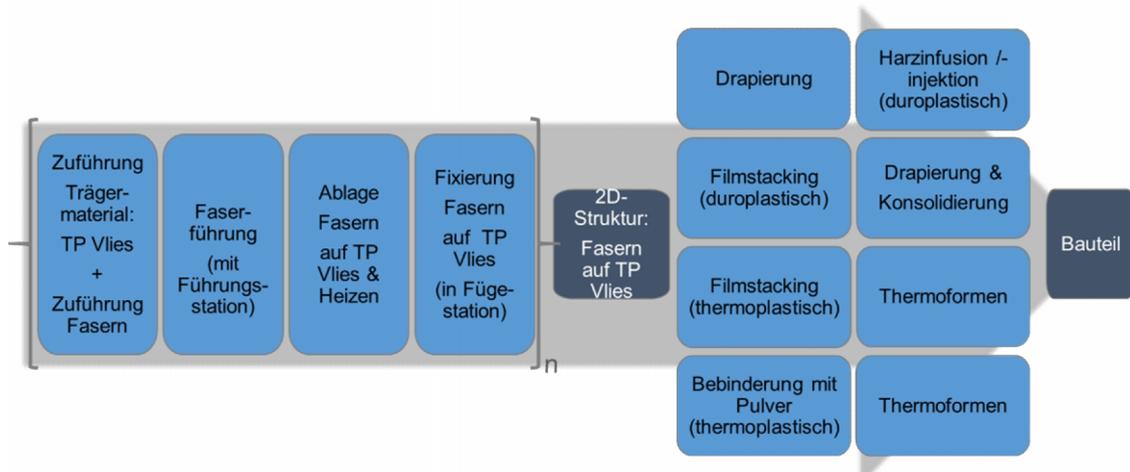


Abb. 4.20: Prozesskette der Faserablage bei unabhängiger Matrix

B. Duroplastische Matrix => duroplastischer Harzfilm (Abbildung 4.21)

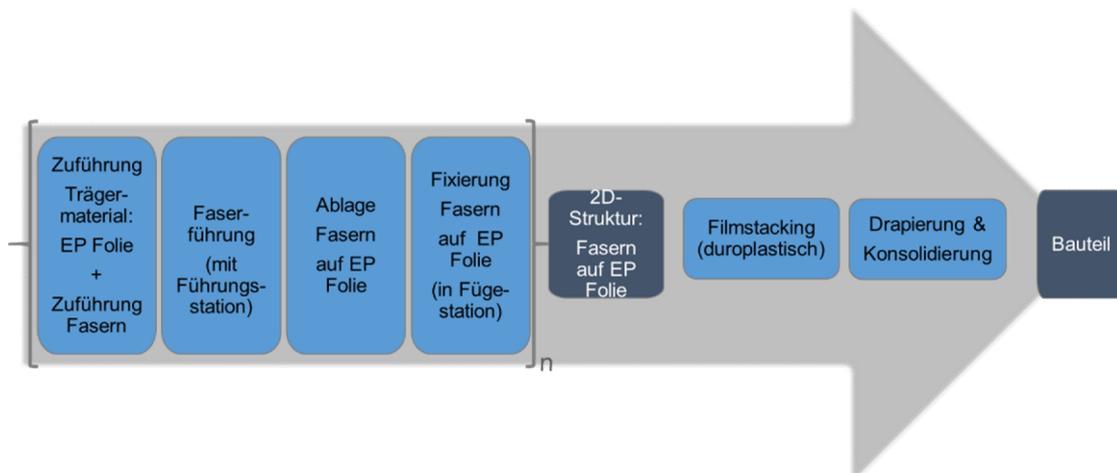


Abb. 4.21: Prozesskette der Faserablage bei duroplastischer Matrix

C. Thermoplastische Matrix: thermoplastische Folie (Abbildung 4.22)

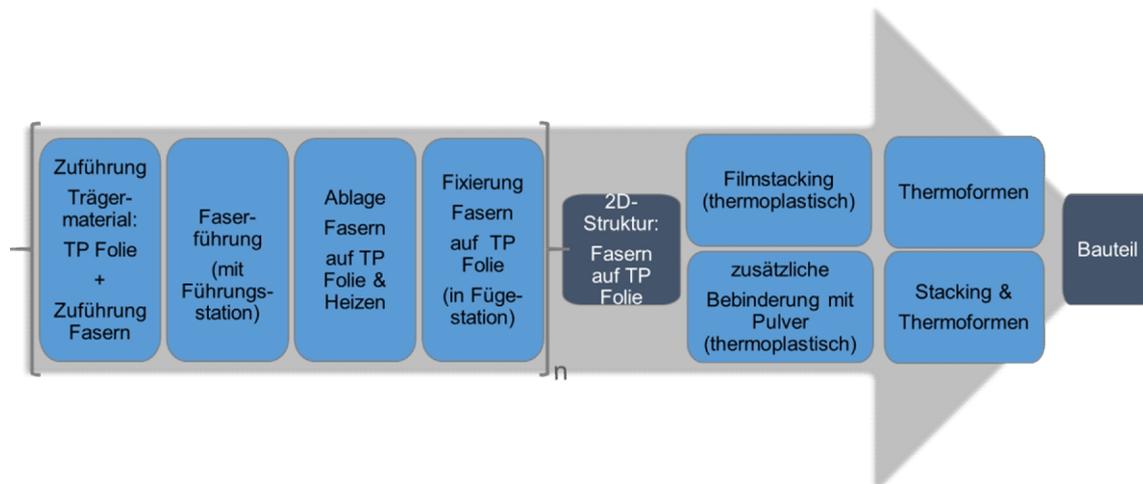


Abb. 4.22: Prozesskette der Faserablage bei thermoplastischer Matrix

Bei starken Umformgraden dehnt sich die thermoplastische Folie allerdings ungleichmäßig aus. Das Flächengewicht der thermoplastischen Folie ist über die gesamte Fläche konstant. Daher muss vor dem Thermoformen zum Teil zusätzlich lokal Matrix, zum Beispiel in Form eines Pulverbinders, aufgebracht werden, um einen ausgewogenen Faservolumengehalt zu erreichen.

4.6.1.1. Materialauswahl

In folgender Übersicht wird eine Auswahl der Materialkombinationen dargestellt, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Bei der Verwendung eines thermoplastischen Vlieses gibt es auf Grund der geringen Eigenfestigkeit des Vlieses verschiedenen Alternativen. Entweder müssen mehrere Vliese verpresst werden, ein Vlies mit einem hohen Flächengewicht oder die Kombination mit einem Glasfaservlies oder einem Glasfasergewirk eingesetzt werden. Bei dem Einsatz eines duroplastischen Harzfilms können Glasfaservliese und –gewirke zur Erhöhung der Schadenstoleranz mit eingebracht werden. Abbildung 4.23 stellt eine Übersicht der Materialkombinationen für Trägermaterialien dar.

TP Vlies	Glas-Vlies	EP Harz
	Glas-Gewirk	TP Film
EP Harzfilm	Glas-Vlies	TP Pulver
	Glas-Gewirk	
TP Folie	Glas-Vlies	TP Film
	Glas-Gewirk	TP Pulver
TP Folie mit Glasfaservlies		

Abb. 4.23: Übersicht der Materialkombinationen für Trägermaterial

4.6.1.2. Längungs- und Drapierverhalten

Zur Eignung als Trägermaterial der oben genannten Materialien und Materialkombinationen werden Versuche zum Längungsfaktor, sowie Drapierversuche am Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“ durchgeführt. Der Prüfstand wird in Kapitel 6 detailliert beschrieben. Die ausgewählten Materialien bieten einen guten Überblick über diverse Trägermaterialien und Materialkombinationen. Nachstehende Übersicht zeigt potentiellen Trägermaterialien, die auf ihr Längungsverhalten getestet werden (Abbildung 4.24), da das Trägermaterial während des Drapierprozesses von einem zweidimensionalen Zustand in eine dreidimensionale Form entsprechend gelängt wird.

Material	Hersteller	Bezeichnung	Flächengewicht
TP Vlies, 1 Lage	Spunfab	PA 1541	6 g/m ²
TP Vlies, 2 Lagen	Spunfab	PA 1541	12 g/m ²
TP Vlies, 3 Lagen	Spunfab	PA 1541	18 g/m ²
TP Folie	LANXESS	Versuchsmaterial	150 g/m ²
TP Folie	EMS Chemie	Versuchsmaterial	12 g/m ²
Glasfaser-Vlies	Saint-Gobain	1901605	30 g/m ²
Glasfaser-Gewirk, Kettrichtung	TEC-KNIT	6181-17	400 g/m ²
Glasfaser-Gewirk, Schussrichtung	TEC-KNIT	6181-17	400 g/m ²
Glasfaser-Vlies + TP Vlies	Saint-Gobain Spunfab	1901605	30 g/m ² + 6 g/m ²
Glasfaser-Vlies + TP Folie	Saint-Gobain EMS Chemie	1901605	30 g/m ² + 12 g/m ²
Glasfaser-Gewirk + TP Vlies	TEC-KNIT Spunfab	6181-17	400 g/m ² + 6 g/m ²
Glasfaser-Gewirk + TP Folie	TEC-KNIT EMS Chemie	6181-17	400 g/m ² + 12 g/m ²

Abb. 4.24: Versuchsmatrix zum Längungsverhalten des Trägermaterials

Für den Aufbau und Ablauf der Versuche wird ein eigenes Konzept entwickelt, da es hierfür keine Norm gibt. Zur Versuchsdurchführung (siehe Abbildung 4.25) wird das Trägermaterial mit einem Zuschnitt von 215 mm in der Breite und 270 mm in der Länge an zwei gegenüberliegenden Seiten geklemmt (Stadium 0). Eine Seite wird fixiert während die andere Seite gleichmäßig horizontal in x-Richtung weggezogen wird, bis zu einer Streckung auf 120 % (Stadium 1). Diese 120 % sind die in der Automobilindustrie gängigen Oberflächenvergrößerungen [95]. Zu diesem Zeitpunkt wird der Einsprung in y-Richtung gemessen. Danach wird das Material aus Abbildung 4.24 weiter gedehnt, bis zum Abbruchkriterium (Stadium 2). Dieses ist für jedes Material unterschiedlich und wird in der Auswertung beschrieben.

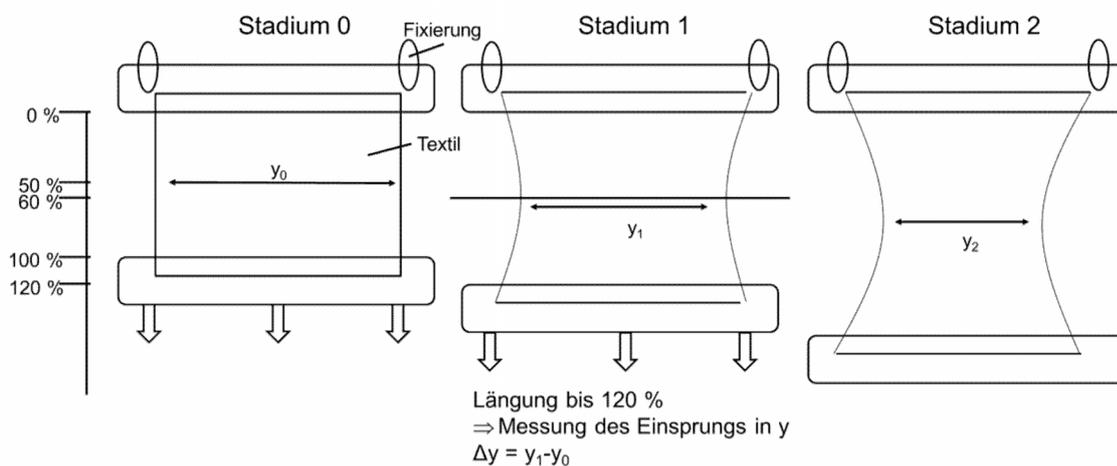


Abb. 4.25: Skizzierung der Versuchsdurchführung zum Längungsverhalten des Trägermaterials

Das thermoplastische Vlies lässt sich bis zu der 2,6-fachen Länge dehnen bis es reißt, weist allerdings eine starke Verjüngung in der Breite auf, bis zu 20 % der zugeschnittenen Breite. Je mehr Lagen miteinander verbunden getestet werden, umso mehr lässt sich das Vlies dehnen bevor es reißt. Auch die allgemeine Breite ist dann bei dem Längungsversuchen um etwa 10 % höher als bei einer Lage.

Die thermoplastische Folie mit dem hohen Flächengewicht der Firma LANXESS lässt sich bei Raumtemperatur nicht dehnen und ist daher als Trägermaterial nicht geeignet. Die thermoplastische Folie mit dem leichten Flächengewicht der Firma EMS Chemie zeigt bei Raumtemperatur eine leichte Längung, reißt jedoch nach einer Längung auf 170 % auf Grund ihrer Sprödigkeit. Das Glasfaser-Vlies zeigt ein sehr schlechtes Längungsverhalten und reißt bereits nach einer Längung von 5 mm. Das Glasfaser-Gewirk der Firma TEC-KNIT lässt sich in Kettrichtung auf das dreifache dehnen, in Schussrichtung auf das 2,3-fache. Das Glasfaser-Vlies zeigt trotz der Kombination mit dem thermoplastischen Vlies und der dünnen thermoplastischen Folie das gleiche Verhalten als das reine Glasfaser-Vlies. Das Glasfaser-Gewirk lässt sich mit dem thermoplastischen Vlies um 20 %, mit der thermoplastischen Folie um 10 % weniger Längen als ohne weiteres Trägermaterial.

Auf Grund der Ergebnisse der Längungsversuche wird ein thermoplastisches Vlies mit höherem Flächengewicht bevorzugt. Das Glasfasergewirk bietet zwar starke Vorteile bei der Längung im Vergleich zum Glasfaser-Vlies, allerdings lässt sich das thermoplastische Vlies nur mit hoher Temperatur, längerer Zeit und hohem Druck auf dem Gewirk fixieren. Die dünne thermoplastische Folie lässt sich gut auf dem Glasfaser-Gelege fixieren.

Die in Abbildung 4.24 aufgeführten Materialien werden ebenso auf ihre Drapierbarkeit am „LCC Pole Peak“ getestet. Der Prüfstand wird in Kapitel 6.5 detailliert beschrieben. Die Messungen werden bei Raumtemperatur und bei der entsprechenden Erweichungstemperatur des Thermoplasten durchgeführt. Das Trägermaterial wird mit der maximalen Kraft von 8 bar, was einer Flächenpressung von 0,7 N/mm² entspricht, geklemmt, um ein Nachfließen zu verhindern. Der Zuschnitt entspricht der projizierten Fläche der Drapierform „Pole Peak“ mit einer Zugabe von 20 mm am Umfang zur Klemmung. Das Glasfaser-Vlies reißt bei den Drapierversuchen an den Stellen mit hoher Verformung, und zwar an Hemisphäre als auch an dem Pyramidenteil, wie es in Abbildung 4.26 zu sehen ist. Zusätzlich reißt das Vlies an den Stellen ein, an denen eine große Oberflächenvergrößerung vorhanden ist. Das heißt, das Vlies liegt auf der Oberfläche des Mittelstücks eben auf und wird in den seitlichen Bereichen stark gedehnt und reißt.

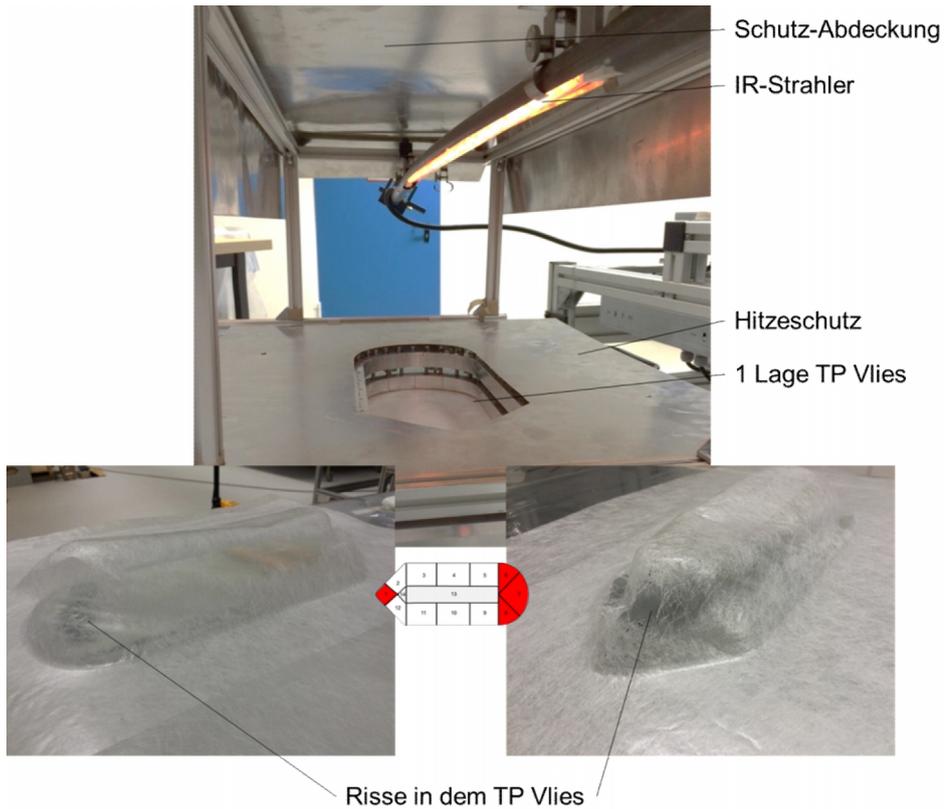


Abb. 4.26: Drapierung von 1 Lage Glasfaser-Vlies

Wird das Glasfaser-Vlies mit einer thermoplastischen Folie von EMS Chemie kombiniert, reißt das Glasfaser-Vlies an den Hemisphären- und Pyramidenteilen nicht so stark ein. Allerdings sind weiterhin starke Risse an den Seitenflächen zu erkennen, wie das untere Foto in Abbildung 4.27 zeigt.



Abb. 4.27: Drapierung von Glasfaservlies mit TP-Folie von EMS Chemie unter Temperatur

Das Verhalten der thermoplastischen Folie von LANXESS ist vollkommen anders. Bei Raumtemperatur lässt sich die Folie gar nicht verformen. Unter Temperatureinwirkung von 150°C beginnt diese zu wellen und Blasen zu werfen, lässt sich allerdings relativ gut über die Drapierform ziehen. Bei einem Niederhalterdruck von 0,01 N/mm² wird das Material, das zur Verformung benötigt wird, von außen herein gezogen und wirft im Bereich außerhalb der Drapierform Falten. Bei hohem Niederhalterdruck von 0,05 N/mm², das heißt wenn kein Nachfließen der Folie möglich ist, kommt es zu Ausdünnungen der thermoplastischen Folie in den Bereichen, in denen sich die Folie stark dehnen muss, und zwar parallel zum Klemmbereich. Abbildung 4.28 zeigt die Blasenbildung im oberen Bild, die Faltenbildung im linken unteren Bild und die Ausdünnungen der Folie im rechten unteren Bild.

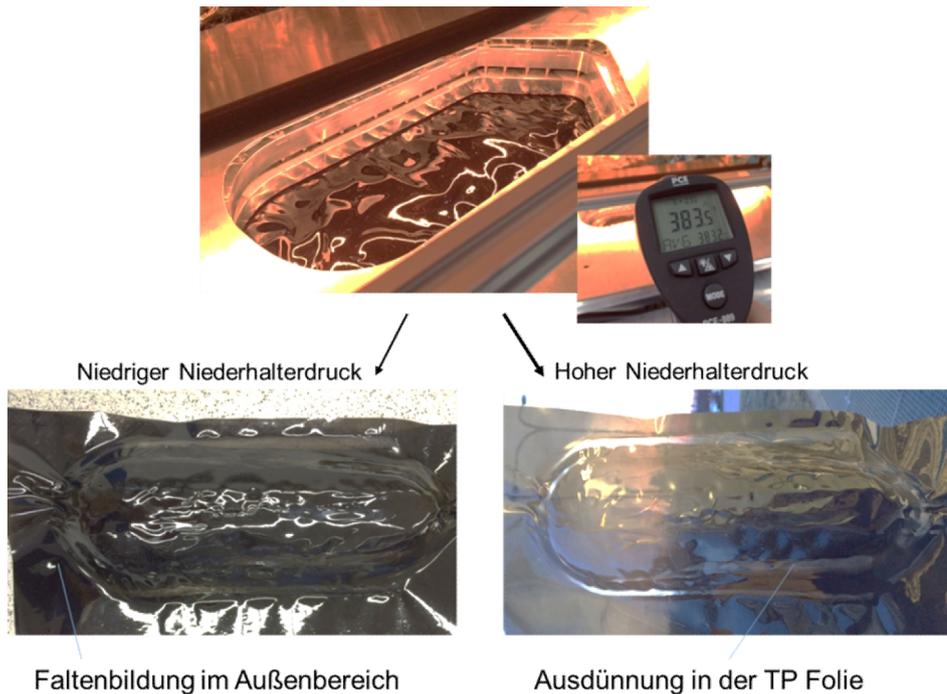


Abb. 4.28: Drapierung einer Lage der TP Folie von LANXESS

Die TP Folie der Firma LANXESS haftet unter Einfluss von Temperatur und Druck nicht an den anderen Materialien an. Allein durch die Zugabe der TP Folie der Firma EMS Chemie findet eine Verbindung statt. Eine sehr gute Verformbarkeit ist bei der Kombination aus Glasfaser-Gewirk und der thermoplastischen Folie von EMS Chemie zu beobachten. Das Gewirk passt sich extrem gut der Drapierform an. Die thermoplastische Folie bleibt an der Oberseite des Mittelstücks in Takt, wird aber stark an den seitlichen Bereichen um die Oberseite des Mittelstücks beansprucht, gedehnt und schmilzt in den Zwischenbereichen der Schlaufen weg. In Abbildung 4.29 ist auf der Oberfläche des Materials ein Muster aufgezeichnet, um die Bereiche mit starken Dehnungen zu identifizieren. Diese liegen genau in den angrenzenden der geraden Oberseite des Mittelstücks.

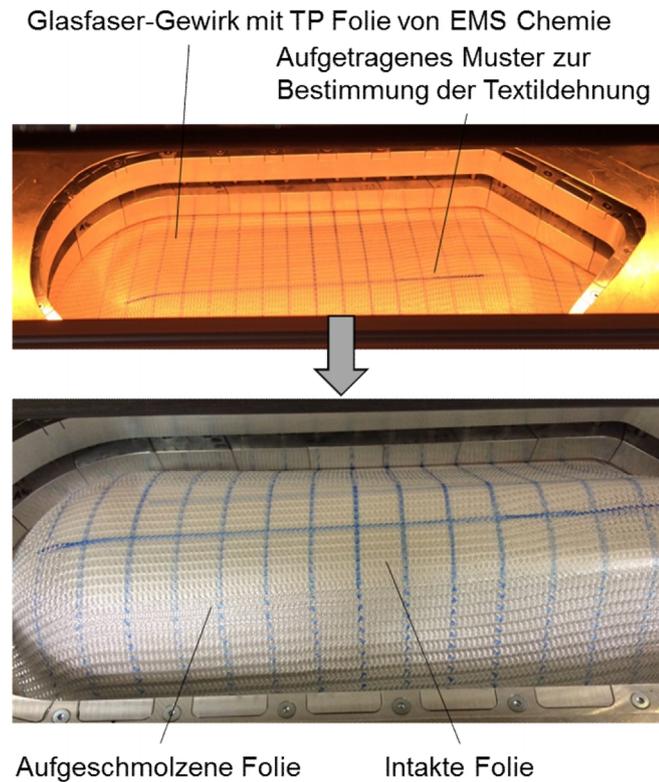


Abb. 4.29: Drapierung von Glasfaser-Gewirk mit TP Folie von EMS Chemie

Wird das Material später aus Carbonfasern, die den Lastpfaden folgen, aufgebaut und zwischen den Carbonrovings sind designbedingte Lücken, wird eine Kombination aus einer thermoplastischen Folie mit einem hoch drapierfähigen textilen Trägermaterial, und einem gut drapierbaren Textil, zum Beispiel einem Glas-Gewirk, eingesetzt.

4.6.1.3. Ablegeversuche

Für die Ablegeversuche von Carbonrovings auf einem Trägermaterial wird ein HTS45 12k Roving der Firma Toho Tenax verwendet. Dieser ist mit einer thermoplastischen Schlichte versehen. Zwei Ablegemuster mit unterschiedlichen Formen werden gewählt; eine Form mit einer unidirektionalen Faserausrichtung, sowie eine Form mit einem überkreuzenden Ablagemuster in Gestalt eines X. Zur Ablage der UD-Form wird ein Einzug E8 gewählt, so dass die fünfundzwanzig Rovings parallel und dicht beieinander liegen und somit eine geschlossene Fläche ergeben. Die Motoren, zwischen denen die Feder eingezogen ist, bleiben in der gleichen Position.

An dieser Stelle wird die Anlagentechnik, die in Kapitel 5 ausführlich beschrieben wird, grob umrissen, um das Ablegemuster in Form eines X deutlicher beschreiben zu können. Die Versuchsanlage verfügt über vier Motoren, die auf einer Linearachse montiert sind. Zwischen jeweils zwei Motoren, die mit Klemmmechanismen ausgestattet sind, wird jeweils eine Zugfeder gespannt ist. Die Motoren können jeweils nach links und rechts auf einer Linearachse verfahren werden. Die Verstärkungsfasern liegen in den Zwischenräumen der Windungen der Zugfeder. Das Foto in Abbildung 4.30 zeigt die vier Motoren und die Andruckwalze.

Motoren mit
Klemmmechanismus
für Zugfeder

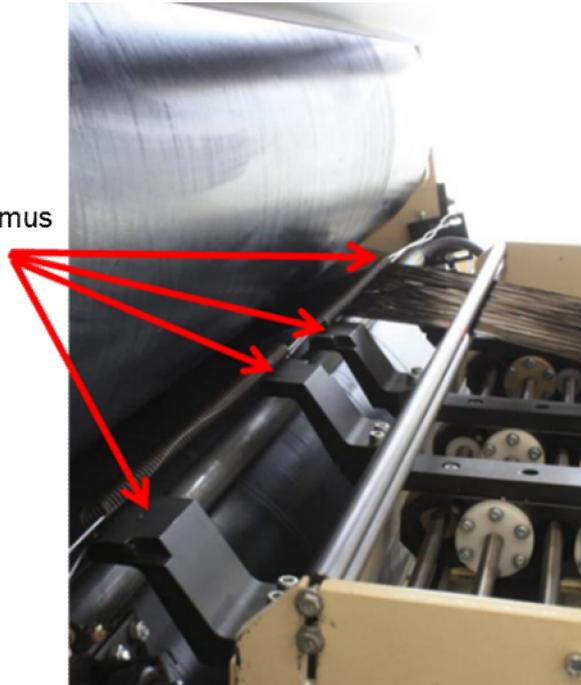


Abb. 4.30: Faserführungseinheit mit 4 Motoren und 2 Federn

Dadurch, dass die Federn 20 mm Abstand von dem Zwickelpunkt der beiden Walzen haben, wird der Versatz der Federn mit den eingezogenen Fasern nicht direkt bis zur Fixierung der Fasern umgesetzt. Die gewünschte Faserablage muss mit dem Verfahrensweg und Verfahrensgeschwindigkeit der Motoren und der Walzen, das heißt der Abzugsgeschwindigkeit korreliert werden. Der Verfahrensweg der Motoren ergibt sich aus der gewünschten Faserablage und dem Abstand zum Zwickelpunkt der Walzen. Das Übersteuern der Motoren ist begrenzt durch die Breite der Anlage sowie durch einen einzuhaltenen Abstand zwischen den beiden mittleren Motoren. Daher kann das reelle Muster leicht vom gewünschten Muster abweichen.

Die Verfahrensweg der Motoren sowie das gewünschte und reelle Muster sind in der Abbildung 4.31 visualisiert. In der Matlab-Software wird die Bewegung der beiden Motoren, zwischen denen eine Federspirale aufgehängt ist, auf der Linearachse, dargestellt in schwarz, um das gewünschte Ablagemuster zu erzeugen, programmiert. Bei Stillstand der Abzugswalze, das heißt wenn kein Abzug stattfindet, bewegen sich die zwei Motoren zueinander hin nach innen (1). Während dieser Bewegung beginnt die Abzugsbewegung in y-Richtung (2). Danach stoppt die Bewegung der Motoren, der Abzug findet weiterhin statt (3). Bei Position 4 stoppt der Abzug erneut und die Motoren bewegen sich auf der Linearachse voneinander weg nach außen. Daraufhin, bei Position 5 beginnt der Abzug, während die Motoren weiter nach außen verfahren werden. Somit entsteht das reelle Muster, das annähernd dem gewünschten Muster entspricht.

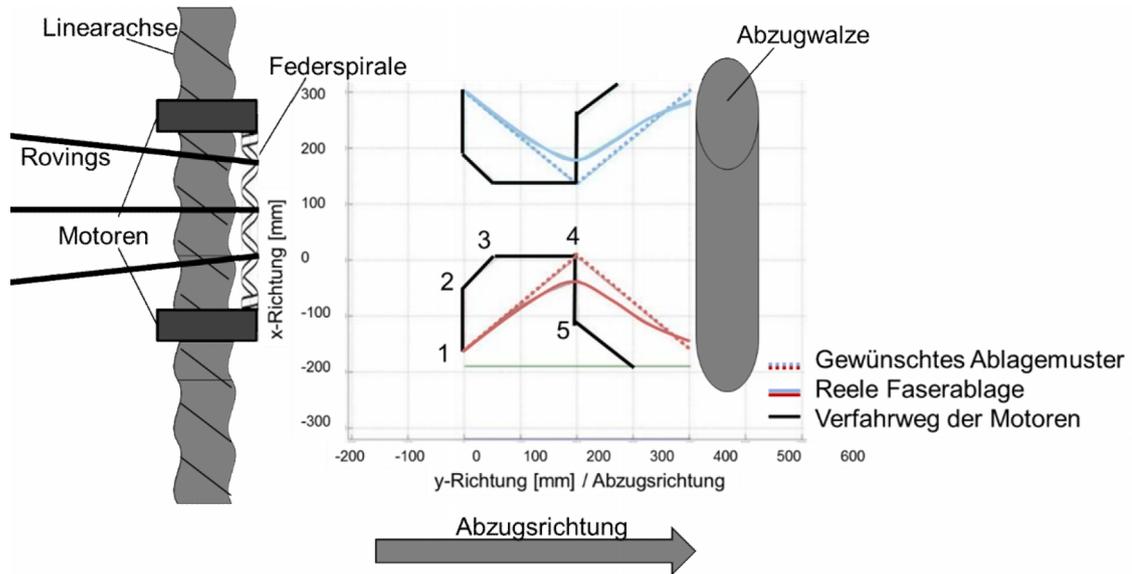
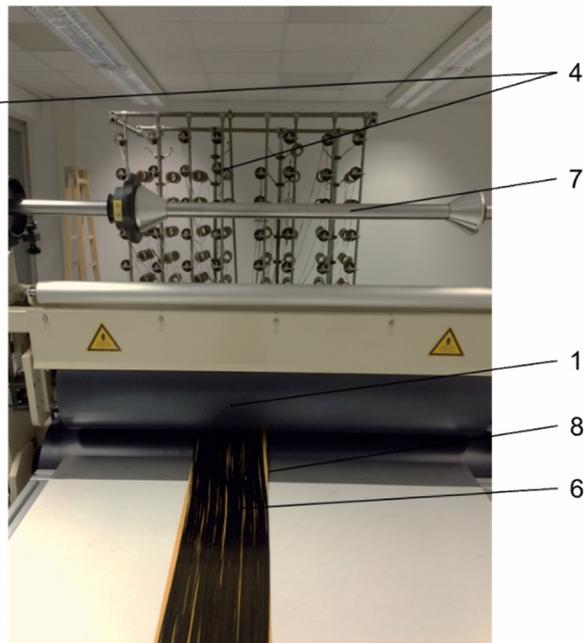
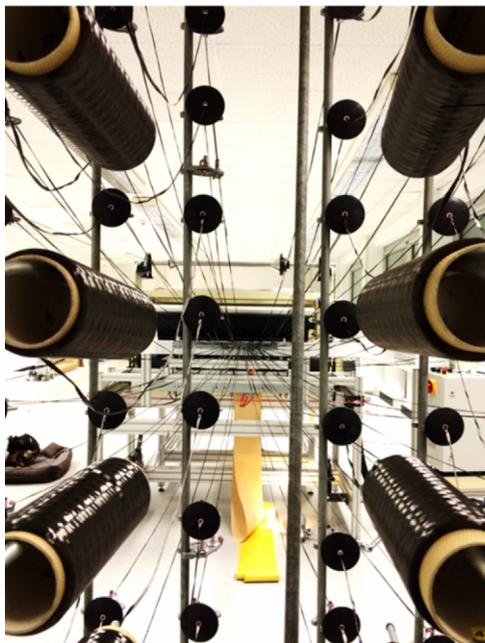
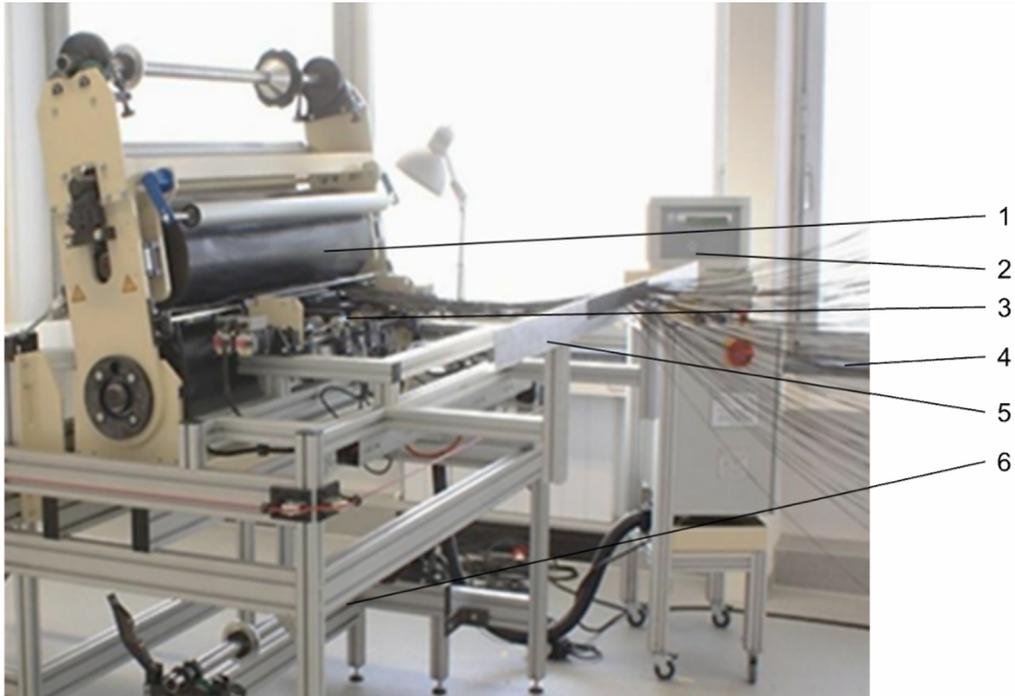


Abb. 4.31: Visualisierung des Verfahrensweges der Motoren und dem entstehenden Faserablagen [TEC-KNIT CCTT GmbH]

Das Trägermaterial kann sowohl von unten als auch von oben zugeführt werden. Ein duroplastischer Harzfilm wird von unten zugeführt. Das Trägerpapier wird händisch abgezogen, da es hierfür noch keine Vorrichtung gibt. Der Harzfilm ist bei Raumtemperatur klebrig und braucht daher nicht aufgeheizt zu werden, sondern die Rovings können direkt auf den Film aufgebracht werden und bleiben an der Position haften. Daher wäre eine weitere Maßnahme, die Abzugsrolle mit einer Teflonfolie zu umwickeln.

Die Grammaturn des Harzfilms wird mit einem Flächengewicht von $140 \pm 10 \text{ g/m}^2$ so gewählt, dass ein Faservolumengehalt von $52 \pm 1 \%$ erreicht wird. Die Rovings liegen bei einem Einzug E8 parallel und mit sehr wenigen Gaps nebeneinander. Leichte Gaps ergeben sich aus den Drehern im Roving, die durch ein Überkopf-Abziehen des Rovings hervorgerufen werden. Vorteilhaft ist, dass die Rovings ohne Wärmeeinwirkung sehr gut auf dem Harzfilm haften. Nachteilig ist, dass der Harzfilm an der oberen Walze zeitweise kleben bleibt und dort Harzreste hinterlässt.

In Abbildung 4.32 ist die Anlage, die in Kapitel 5 detailliert beschrieben wird, abgebildet. Die vom Gatter zulaufenden Rovings werden auf dem duroplastischen Harzfilm abgelegt, der sich zwischen zwei Trägerfolien befindet. Die obere Folie wird vor der Rovingablage von dem Harzfilm abgezogen, die untere Folie verbleibt auf dem Harzfilm.



- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 Fügestation | 5 Lochblech |
| 2 Bedien- und Steuerungseinheit | 6 EP-Harzfilm auf Trägerfolie |
| 3 Faser-Führungsstation | 7 2. Abrollung |
| 4 Rovinge von Gatter | 8 Angehaftete Rovinge |

Abb. 4.32: Ablegeversuche von Carbonrovings auf EP-Folie

Insgesamt lassen sich die Rovings sehr gut auf dem Harzfilm positionieren und befestigen, so dass ein stabiles Prepreg entsteht. Dieses Prepreg kann weiter zu einem Stack verpresst werden oder als zusätzliche Verstärkungspatche, zum Beispiel von metallischen Strukturen, verwendet werden.

4.6.2. Verstärkungsfasern

Die Verstärkungsfasern bilden die Basis des späteren Bauteils und nehmen in Kombination mit der Matrix die in dem Bauteil auftretenden Kräfte auf, wie Zug-, Druck und Schubkräfte. Entsprechend dieser Kräfte, beziehungsweise resultierenden Lasten im Bauteil, werden die Fasern abgelegt. Zusätzlich ist die Ablage der Verstärkungsfasern auf dem Trägermaterial hauptverantwortlich für die Drapierbarkeit des Halbzeuges, wozu die Fasern mit Fadenreserven abgelegt werden. Auf Grund des lastpfadgerechten, anisotropen Aufbaus des Halbzeuges, sowie der mäanderartigen Ablage der Fasern für die Ausbildung der Fadenreserven, wird das Verhalten der Rovings in Krümmungen untersucht.

Die Verstärkungsfasern werden meist von den Bauteilherstellern, bzw. den Bauteilanwendern vorgegeben.

Es ergibt sich folgendes Anforderungsprofil:

- Rovingausrichtung entsprechend der mechanischen Eigenschaften des Bauteils (wird hier nicht untersucht, da bauteilabhängig)
- Preis (wird hier nicht betrachtet)
- Gutes Haftungsvermögen auf dem Trägermaterial
- Gutes Steering-Verhalten

4.6.1.1. Materialauswahl

Als Verstärkungsfasern werden unterschiedliche Rovings hinsichtlich Titer, Ablegebreite und Aufmachung, das heißt gedreht, ungedreht oder gespreizt, durch die Fadenführungseinheit und die Fügestation geführt.

Folgende Materialien werden für die Testreihe verwendet:

- SGL Carbon Fibers SIGRAFIL C30 50k
- Mitsubishi Rayon GRAFIL 34-600 48k
- Toho Tenax HTS-45 24k
- Toho Tenax HTS-45 12k
- Schappé COMFIL-C 55C-PA6-1460 12k

4.6.1.2. Ablegeversuche

Zur Umsetzung der Fadenreserven wird das Ablegeverhalten unterschiedlicher Rovings getestet. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Steering-Verhalten der Rovings in der x/y-Ebene und dem Filamentverlauf bei Richtungsänderungen. Die Rovings werden zunächst geradlinig in die Fadenführungseinheit zugeführt und in Abzugsrichtung auf dem Trägermaterial fixiert (Versuch 1). Als Träger wird eine selbstklebende Folie gewählt. Die zwei Bewertungskriterien sind zum einen die lastangepasste Ablage und zum anderen der Fixierungsgrad auf dem Trägermaterial. Im zweiten Schritt werden die unterschiedlichen Rovings mit dem größtmöglichen Winkel von 45 ° seitlich ausgelenkt, jeweils in beide Richtungen (Versuch 2). Auf Grund der Anlagenlimitierung kann ein maximaler Winkel von 45 ° erreicht werden. Die Bewertungskriterien sind wiederum

die kraftflussgerechte Ablage auf dem Trägermaterial, sowie das Positionierverhalten der einzelnen Filamente innerhalb des Rovings beim Richtungswechsel. In Abbildung 4.33 wird der Einlauf der fünf verschiedenen Rovings in die Anlage dargestellt. Nach der Fügeinheit befinden sich die fünf verschiedenen Rovingtypen fixiert auf einer einseitig selbstklebenden Folie.

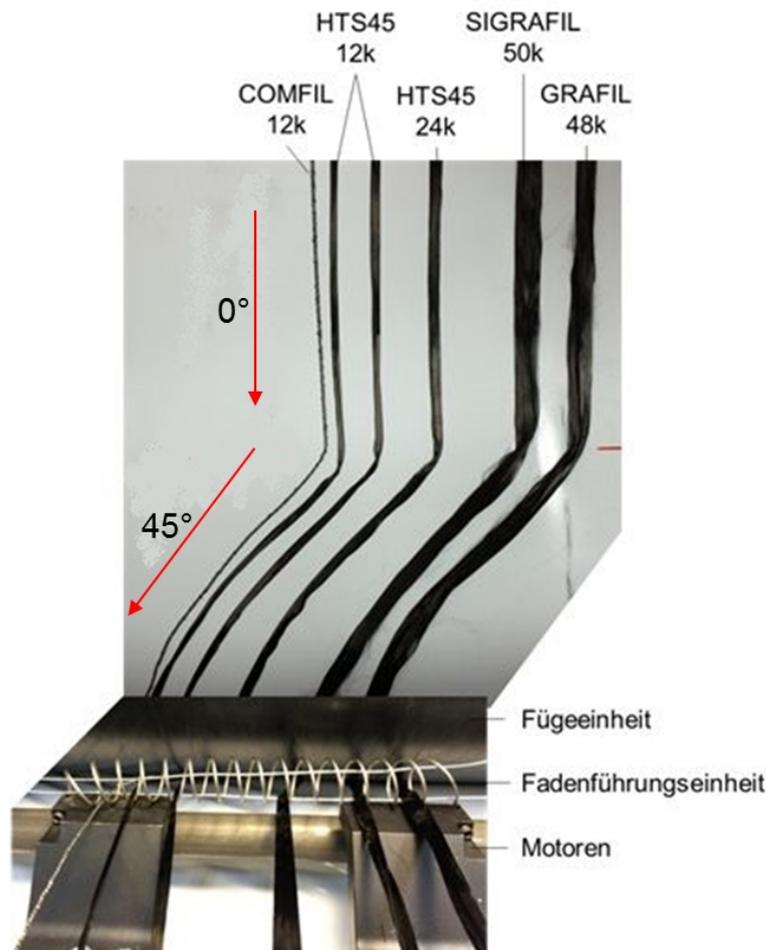


Abb. 4.33: Ablegeversuch mit 5 verschiedenen Rovings

Die groben Rovings GRAFIL und SIGRAFIL besitzen einen relativ runden Rovingquerschnitt. Daher werden lediglich die unteren Filamente fixiert, die oberen Filamente werden nur durch die Schlichte mit den anderen Filamenten zusammengehalten. Der HTS45 mit 24k ist relativ flach im Rovingquerschnitt und wird dadurch über die gesamte Breite gut auf dem Träger fixiert. Wird der Roving mit 20 Drehungen pro Meter beaufschlagt, lässt sich der Roving ebenfalls gut auf dem Träger fixiert. Der HTS45 mit 12k hat einige Dreher, wird allerdings auf Grund der geringen Breite ebenfalls gut auf dem Träger fixiert. Die Untersuchung hat gezeigt, dass sich der COMFIL-Roving, der im Querschnitt vollkommen rund ist, unzureichend auf dem Träger fixieren lässt und leicht verschoben werden kann. Der Rovingtiter und die Aufmachung hinsichtlich Drehung und Rovingquerschnitt haben einen größeren Einfluss auf die Ablage bei Richtungsänderungen. Die oberen, losen Filamente der 48k und 50k-Rovings ziehen sich entlang der Tangente des inneren Radius. Die fixierten Filamente schlagen leichte Wellen oder brechen zum Teil, wie es in Abbildung 4.34 zu sehen ist. Daher ist der bisheri-

ge Prozess für „heavy tow“ Rovings nicht geeignet. Im Vergleich lässt sich der vollkommen runde COMFIL-Zwirn ohne Schwierigkeiten um einen Winkel von 45 ° ablenken.



Abb. 4.34: Filamentverlauf bei 45 °-Richtungsänderung eines GRAFIL- (links) und SIGRAFIL (rechts)-Rovings

Ziel ist es, im späteren Verbund einen kraftflussgerechten Verlauf der Rovings zu erhalten, ohne die Ausbildung von Schlaufen, Wellen, Drehungen und Ondulationen. Daher ist es speziell bei der Einbringung der Fadenreserven in der x/y-Ebene wichtig, dass sich die Rovings so im Halbzeug ablegen lassen, dass sie sich während des Drapierens wieder vollkommen gestreckt und den Anforderungen gerecht ohne Drehung ausrichten.

Der genaue Filamentverlauf eines flachen Rovings bei Richtungsänderungen wird im Folgenden am Beispiel des HTS45 24k-Rovings dargestellt. Der Fadenverlauf wird so gewählt, dass er die Richtung der Fadenreserven abbildet. Wie in Abbildung 4.31 skizziert, wird der Roving zunächst nach rechts mit den Motoren der Faserführung ausgeleitet und dann in die entgegengesetzte Richtung geführt. Die äußeren Filamente des Rovings legen sich entsprechend des in Abbildung 4.31 abgebildeten Verlaufs auf dem Träger ab.

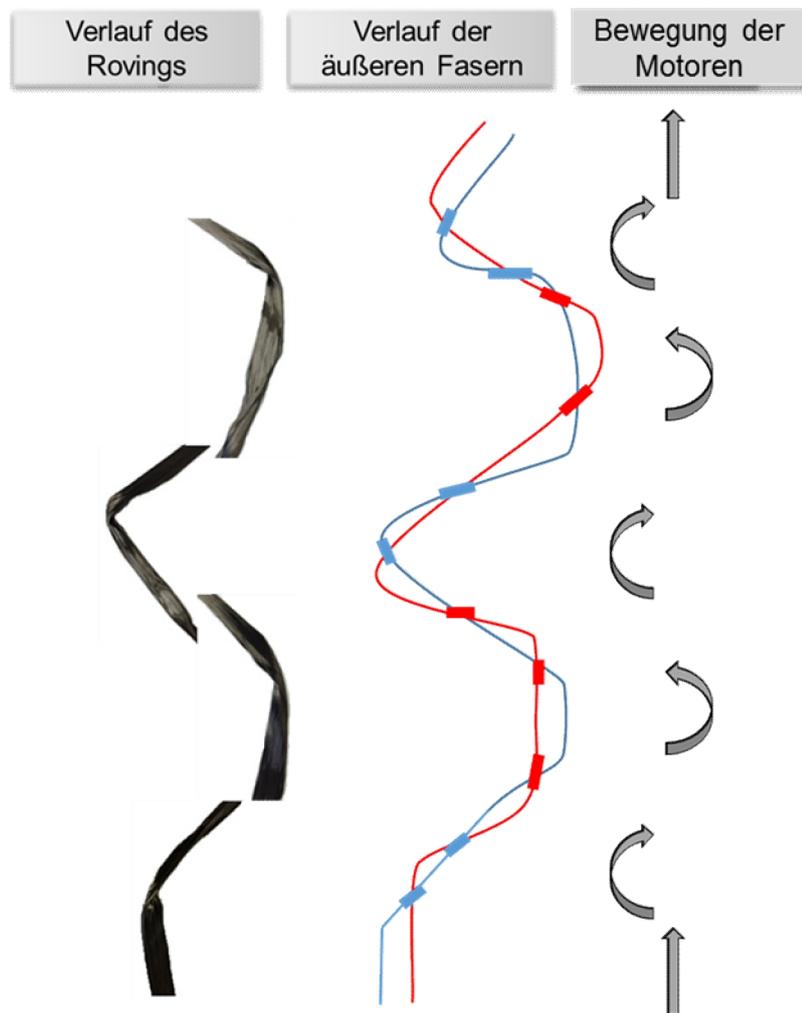


Abb. 4.35: Verlauf der Filamente bei Fasersteering, 24k Roving flach

Bei einem ungedrehten, sehr flachen Roving ist der Rovingverlauf reproduzierbar vorhersagbar. Bei einem Kurvenverlauf nach rechts wird die linke Seite des Rovings (siehe Abbildung 4.35 in blau) stark nach rechts gezogen, so dass sie kurzzeitig oberhalb (in dick blau) der rechten Seite des Rovings (in rot dargestellt) und rechts davon liegt. Bei einem Kurvenverlauf nach links wird die rechte Seite des Rovings über (in dick rot) die linke Rovingseite stärker nach links gezogen, bis sich die Seiten wieder ändern und zurückklappen.

Bei einer ungeraden Kurvenanzahl bleibt ein Dreher im Roving. Daher muss die Anzahl der Kurven immer gerade sein, um keine Dreher im späteren Bauteil zu haben.

Durch die erworbene Erkenntnis kann das Halbzeug für die Drapierform „Pole Peak“ hergestellt werden. Das Mittelstück enthält geradlinige Rovings, da dort keine Längung stattfindet. An beiden Endstücken muss sich das Material stark verformen. Dort werden die Fadenreserven mit jeweils zwei Schlaufen eingebracht. In Abbildung 4.36 ist die Bemaßung der Geometrie „Pole Peak“ zu sehen, die für die Faserablage in Abbildung 4.37 gebraucht wird.

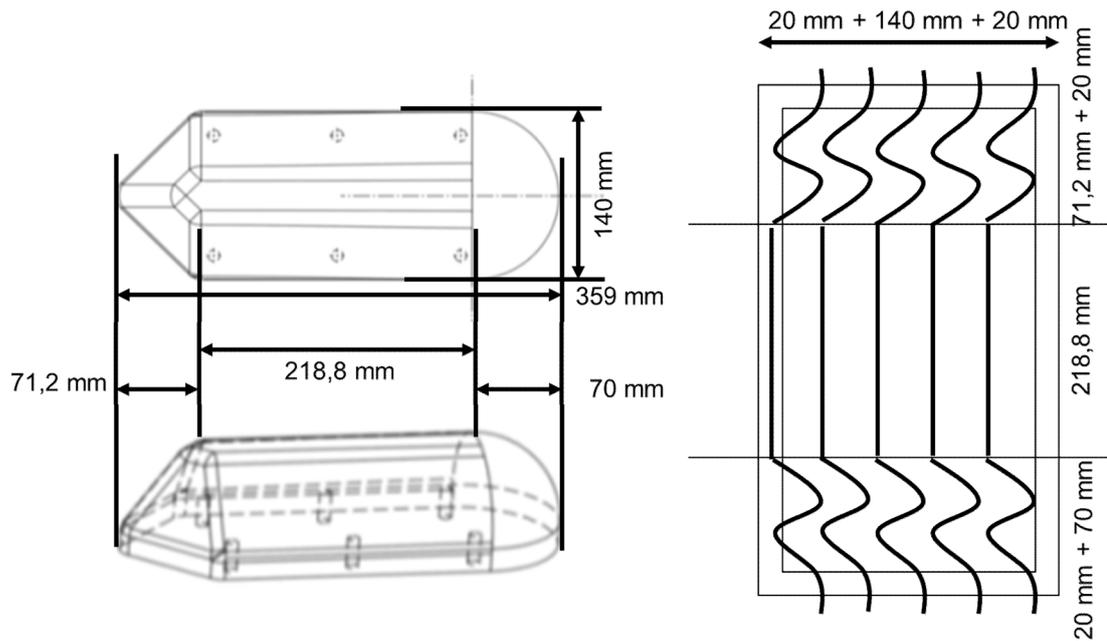


Abb. 4.36: Bemaßung der Geometrie „Pole Peak“

Bei dem Halbzeug für die Drapiergeometrie wird an allen Seiten 20 mm des Trägermaterials zugegeben, um es in diesem Bereich beim Drapiervorgang klemmen zu können.

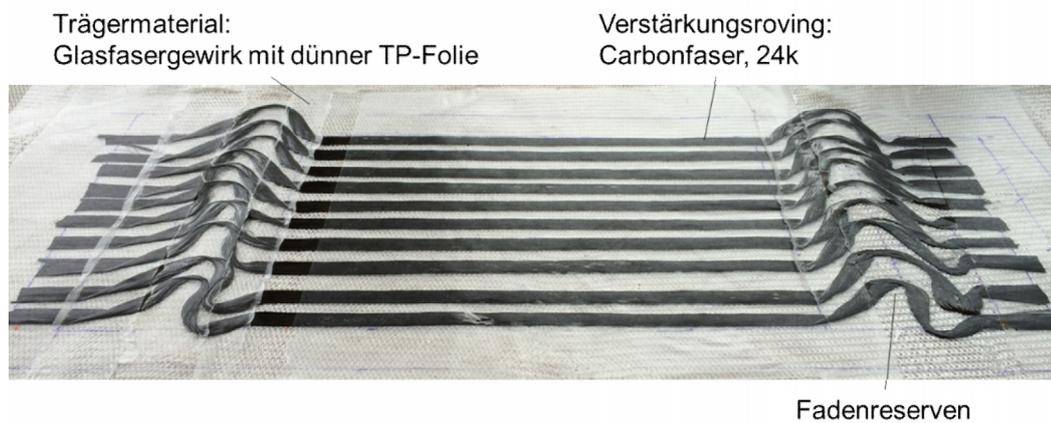


Abb. 4.37: „CoCo“-Halbzeug für die Geometrie „Pole Peak“

5. Entwicklung einer Versuchsanlage zur Herstellung des Halbzeuges „CoCo“

5.1. Anforderungsprofil

Die Entwicklung der Versuchsanlage basiert auf dem internationalen Patent des Erfinders und Anmelders Wolfgang Hoeck, veröffentlicht am 02.05.2013, mit der Veröffentlichungsnummer WO2013/ 060 468 A1. Das Patent beschreibt eine Führungseinrichtung zum Führen einer Mehrzahl von Fasern sowie eine Vorrichtung zur Herstellung eines Faserverbundbauteils.

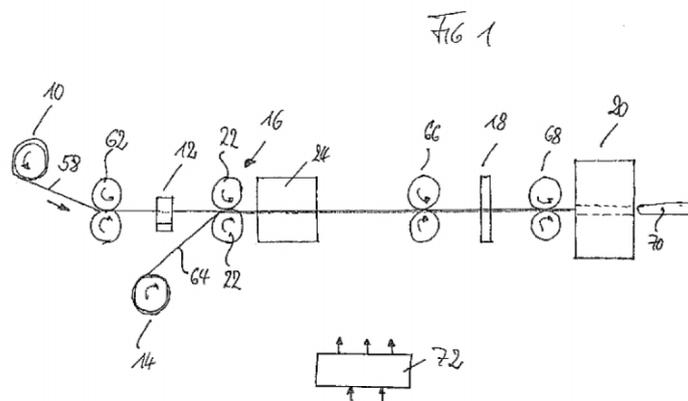


Abb. 5.1: Bild 1 des Patents WO2013/ 060 468 A1 [29]

Die Fasern (58) in Abbildung 5.1 werden von einer Spule oder einem Gatter abgezogen (10) und mittels eines Fadenführungssystems in Form eines Kammes (12) auf ein Trägermaterial (14) aufgebracht (22) und mit diesem verbunden (24). Das Material wird daraufhin zu einem Faserverbundbauteil (70) geformt (20).

Das Herzstück der Erfindung ist das Fadenführungssystem. Dieses wird in diesem Patent in Form einer Kombination mehrerer Kämmen beschrieben. Die Fasern laufen durch die Aussparungen der Kämmen, die gegeneinander verdreht und verschoben werden können, um die Faserablage zu steuern, siehe Abbildung 5.2.

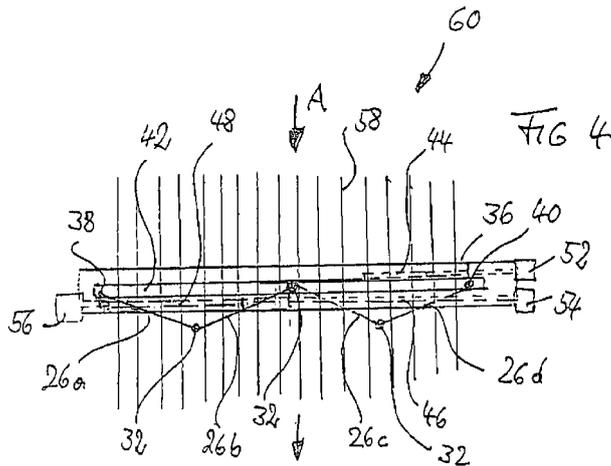


Abb. 5.2: Bild 4 des Patents WO2013/ 060 468 A1 [29]

In einem weiteren internationalen Patent WO2014/ 060 092 A1, veröffentlicht am 24.04.2014, beschreibt der Erfinder und Anmelder Wolfgang Hoeck eine zusätzliche Möglichkeit zur Steuerung des Versatzes der Fäden, und zwar mittels einer Schraubenfeder.

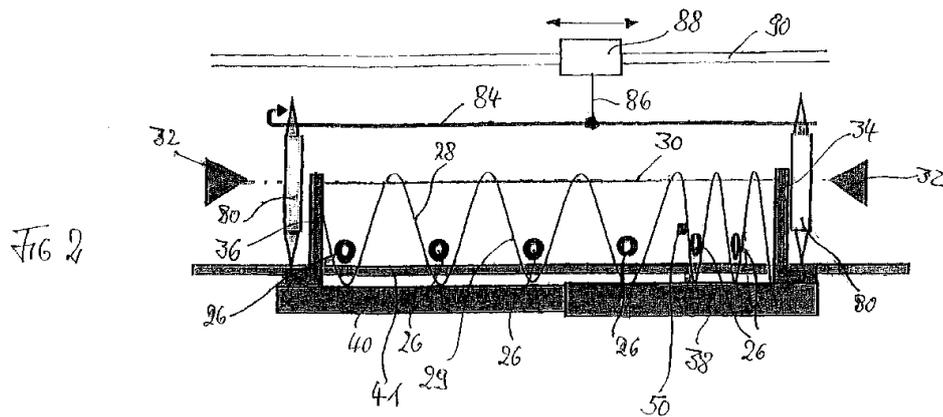


Abb. 5.3: Bild 2 des Patents WO2014/ 060 092 A1 [30]

Hierbei laufen die Fäden (26) in Abbildung 5.3 durch jeweils einen Zwischenraum zwischen den Windungen (29) einer Schraubenfeder (28), die gedehnt oder zusammengeschoben werden kann. Ein mechanischer Finger (50) kann zudem einzelne Windungen der Feder (28) individuell ansteuern.

Aus den beiden Patenten und den Anforderungen an das Halbzeug erschließt sich folgender Anforderungskatalog an die Versuchsanlage:

- Simultane Ablage der Rovings über die komplette Breite
- Ablagekontur entsprechend der Bauteilkontur
- Fixierung der Rovings auf einem Trägermaterial
- Integration von Mechanismen für erhöhte Drapierfähigkeit
- Variabelaxiale Faserablage
- Ablage von lastpfadfolgenden Rovings
- Möglichkeit zur Einbringung von lokalen Verstärkungen
- Integration der thermoplastischen Matrix

In nachfolgender Abbildung 5.4 wird das Konzept der Anlagenentwicklung dargestellt mit der Bevorratung von Verstärkungsfasern auf einem Spulengatter, dem Faserführungssystem und dem Ausformen zu einem Bauteil, noch als Black box dargestellt. Daraus ergibt sich die Umsetzung der verschiedenen Möglichkeiten zur Anpassung der Halbzeugeigenschaften, speziell die Möglichkeit zur lokalen Erhöhung des Flächengewichts, lokal erhöhte Drapiereigenschaften und der Steuerung der Rovings, so dass sie den Hauptbelastungsrichtungen folgen.

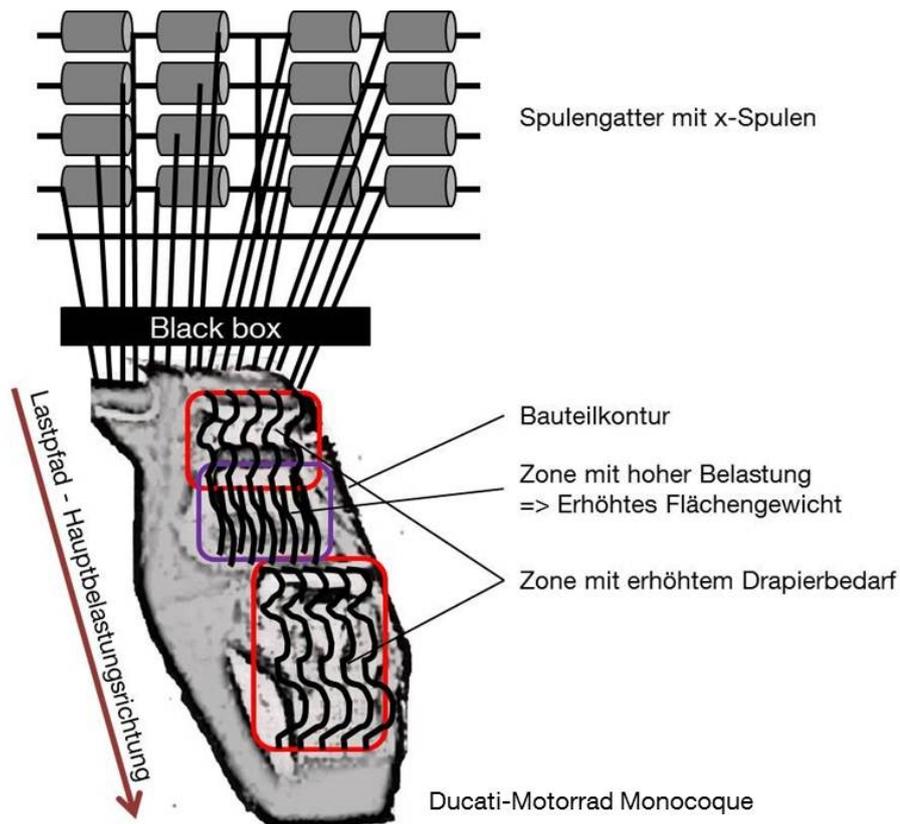


Abb. 5.4: Konzept zur Anlagenentwicklung

5.2. Prozessroutenanalyse

Der Hauptfokus in Richtung Matrixsystem liegt auf der Verwendung einer thermoplastischen Matrix. Zusätzlich soll es durch einen flexiblen und modularen Aufbau der Anlage möglich sein, duroplastische Matrixsysteme zu verwenden. In der Auswahlmatrix in Abbildung 5.5 werden mehrere Teillösungen zu jedem Prozessschritt aufgezeigt. Mittels eines morphologischen Kastens, siehe Anhang A.1 und A.2 dieser Arbeit, werden die einzelnen zur Produktion eines thermoplastischen Bauteils nötigen Prozessschritte betrachtet und bewertet. Die vollzogene Bewertung führt zu zwei favorisierten Prozessrouten, abgebildet in Abbildung 5.5 in blau und rot.

5 Entwicklung einer Versuchsanlage zur Herstellung des Halbzeuges „CoCo“

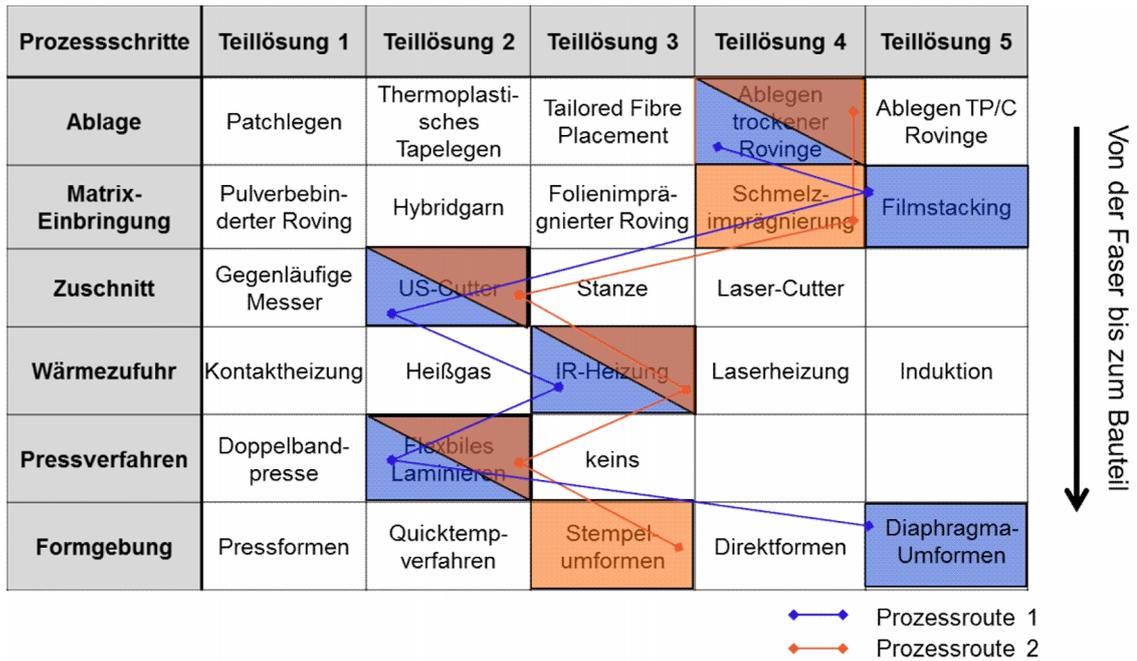


Abb. 5.5: Auswahlmatrix zur Prozessroutenanalyse

Für beide Prozessrouten wird die Ablage von trockenen Rovings gewählt, diese können entweder mit einem Film oder einer Folie als Matrix verbunden werden (Prozessroute 1) oder mittels einer Schmelze imprägniert werden (Prozessroute 2). Als Schneidsystem wird ein Ultraschall-Cutter und zum Heizen ein Infrarotsystem für beide Prozessrouten ausgewählt. Bevorzugter Weise soll für beide Prozessrouten ein flexibles Laminiersystem verwendet werden, da das Halbzeug keine ebene Topologie aufweist. Beim Formgebungsprozess gibt es zwei Möglichkeiten, zum einen das Diaphragmaumformen und das Stempelumformen. Alternativ wird zunächst auf ein etablierteres Verfahren zurückgegriffen werden, dem Pressformen mit zwei starren Werkzeugen.

Für die weitere Entwicklung der Versuchsanlage wird Prozessroute 1 ausgewählt, da hierbei die Anschaffungskosten der Versuchsanlage am geringsten sind. Die trockenen, nicht vorimprägnierten Rovings werden auf einem Film, bzw. einer thermoplastischen Folie, die mit Infrarot beheizt wird, abgelegt und auf dem Trägermaterial angepresst. Das Anpressen erfolgt mit flexiblen Rollen, um auch unterschiedliche Dicken bedingt durch die lastpfadgerechte Ablage zu gewährleisten. Dieser Prozess wird in Reihe geschaltet, je nach Lagenanzahl. Das Abtrennen des Materials direkt vor der Laminiereinheit geschieht mittels Ultraschall-Cutter. Für die Formgebung und das Verpressen wird das Diaphragmaumformverfahren gewählt.

Demnach ergibt sich daraus folgende Prozessroute, siehe Abbildung 5.6.

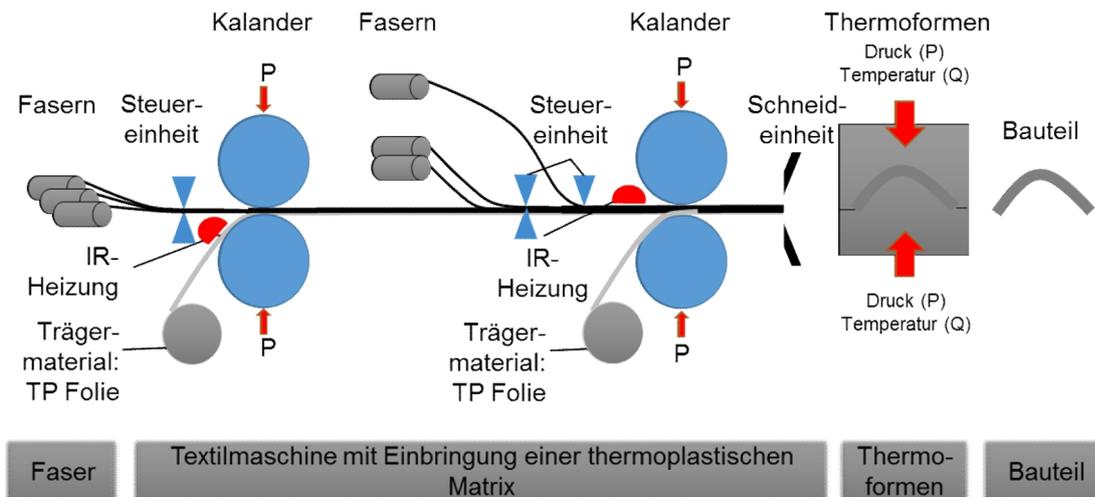


Abb. 5.6: Prozessroute für Anlagenentwicklung

Die Prozessroute bildet den kompletten Prozess von der Faser bis zum Bauteil ab.

5.3. Aufbau und Funktion der Anlage

Mit der zu entwickelnden Versuchsanlage soll es möglich sein, die Fasern entsprechend der Bauteilkontur, der Lastpfade und der dreidimensionalen Bauteilform abzulegen. Die Bauteilkontur wird hauptsächlich durch den Bauraum bestimmt. Die Lastpfade werden in der Bauteilauslegung definiert. Diese beiden Vorgaben kommen vom Bauteilhersteller, bzw. Endanwender. Die Bauteiltopologie wird mittels der Komplexitätsanalyse, wie im Absatz 4.2 beschrieben, durchgeführt, siehe Abbildung 5.7.

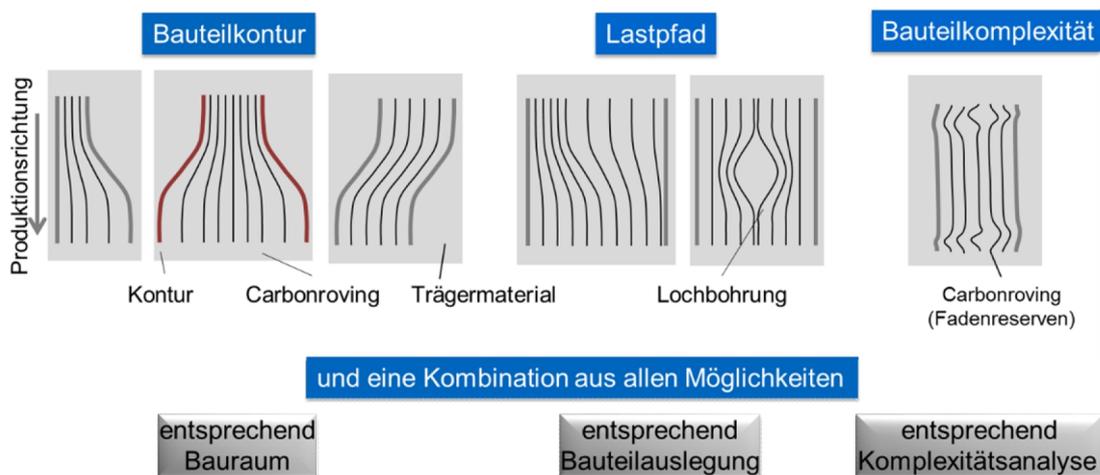


Abb. 5.7: Mit der Versuchsanlage zu realisierende Faserablagen

Für die Versuchsanlage wird zunächst der erste Teil des gesamten Prozesses „Von der Faser bis zum Bauteil“ entwickelt und umgesetzt, das heißt der Faserabzug, die Steuerung der Fasern, die Ablage auf dem Trägermaterial und das Verpressen von Faser und Trägermaterial. Das Endprodukt ist ein Halbzeug aus Verstärkungsfasern und Matrix in Form einer Folie, siehe Abbildung 5.8.

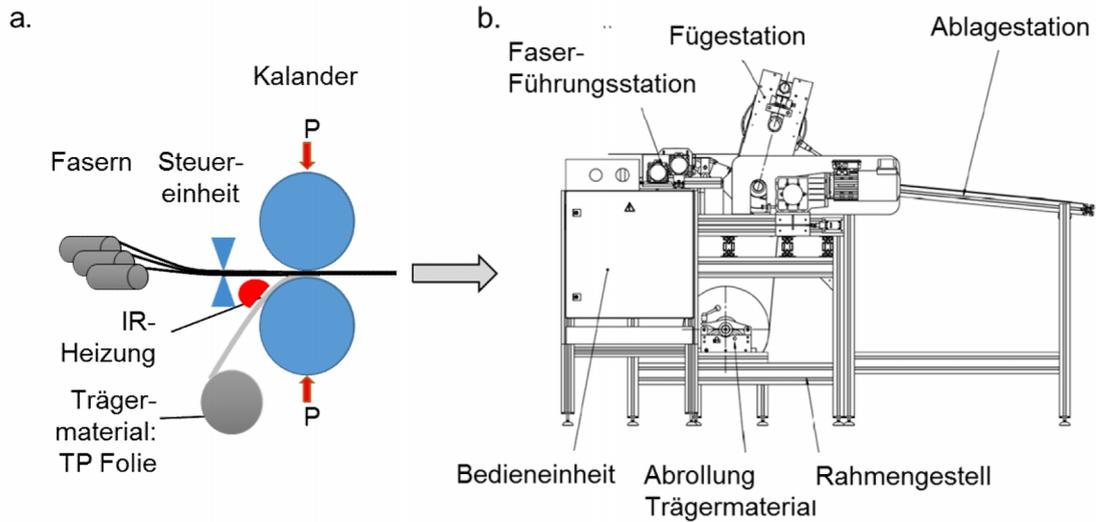


Abb. 5.8: Von der Prozessroute (a.) zur Prinzipskizze (b.) der „CoCo“-Experimentalanlage [b.: Horstmann]

Die in Kooperation mit den Firmen TEC-KNIT GmbH und Horstmann Maschinenbau entwickelte Versuchsanlage der 1. Generation weist als Fadenführungseinheit das im Patent WO 2013 060468 A1 beschriebene Kammsystem auf, siehe Abbildung 5.9.

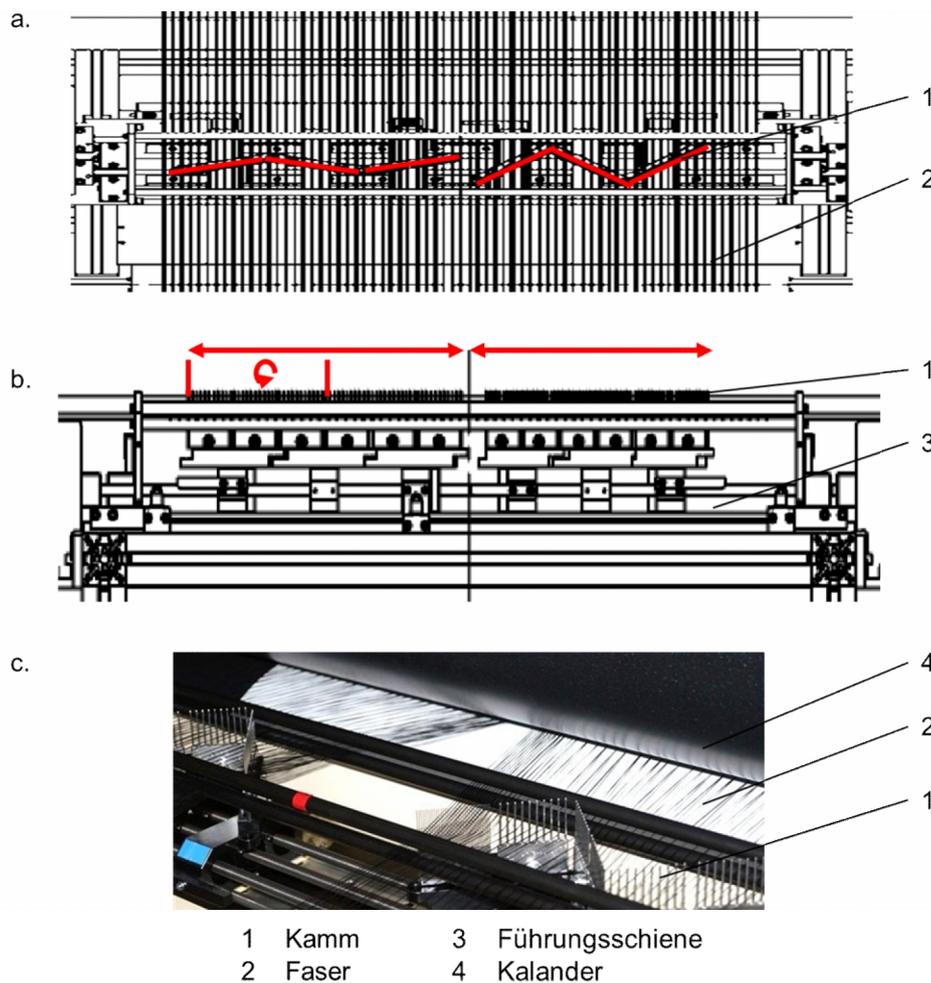


Abb. 5.9: Kammsystem als Faserführungssystem, a. Skizze Draufsicht, b. Skizze Vorderansicht, c. Foto Draufsicht [a.,b.: Horstmann]

Die Versuchsanlage der 2. Generation enthält als Faserführungssystem ein Federsystem, wobei in jeden Zwischenraum zwischen den Windungen ein Roving eingelegt werden kann. Die Feder wird zwischen zwei Verstellmotoren aufgehängt, von denen insgesamt vier an der Versuchsanlage verbaut sind. Somit kann die Feder auseinander gezogen werden, so dass der Abstand zwischen den Rovings größer wird. Zusätzlich können die Motoren mit gleichbleibendem Abstand seitlich verfahren werden. Abbildung 5.10 zeigt die Aufsicht auf das Federsystem mit eingezogenen Rovings.

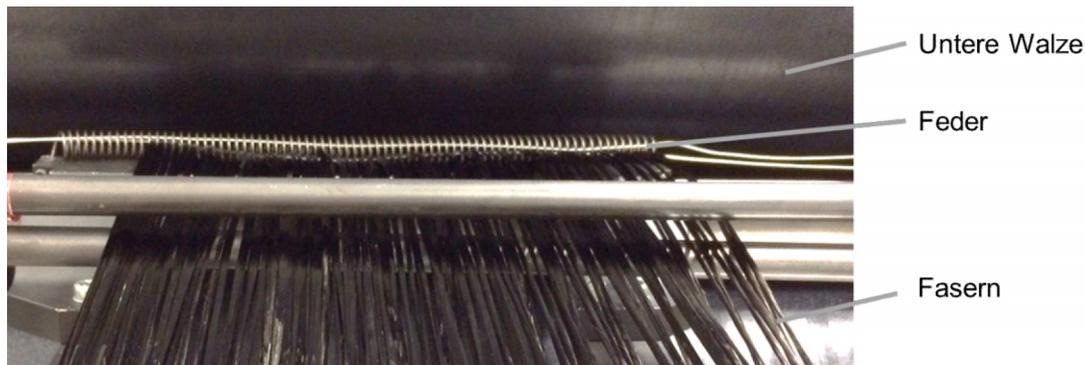


Abb. 5.10: Feder als Faserführungssystem

5.4. Herstellung lastpfadgerechter Verstärkungshalbzeuge

Mit dem Fadenführungsmodul, das Kernstück der Anlage, soll es möglich sein jegliche, errechneten Fadenreserven umzusetzen. Das Fadenführungsmodul der 1. Generation, das sogenannte Kamm-Modul, besteht aus zwölf Kämmen, wobei immer zwei Kämmen simultan gesteuert werden. Wiederum jeweils sechs Kämmen verlaufen zusammen auf einer Führungsschiene. Die jeweils zwei Kämmen sind zueinander entlang der Maschinenbreite verschiebbar und können sich noch zueinander verdrehen, so dass auch unterschiedliche Abstände der Fasern zueinander, und dementsprechend unterschiedliche Flächengewichte realisiert werden können. Allerdings zeigt das Kamm-Modul einen großen Nachteil: Die Verdrehung der einzelnen Kammpaare kann auf zwei unterschiedliche Art und Weisen geschehen, so dass in Kammstellung 1 die äußeren Kämmen nah zur Walze steht und in Kammstellung 2 die äußeren Kämmen fern zur Walze stehen.

In Abbildung 5.11 und 5.12 ist zu sehen, was die Auswirkungen dieser zwei Varianten der Kammstellung auf das Ablagebild mit sich bringt: Um von der höchsten zur geringsten Breite zu gelangen, bedarf es einer großen Strecke. Zusätzlich ist die Strecke, um die geringste Breite und somit das höchste Flächengewicht zu erzielen, bei den zwei verschiedenen Kammstellungen unterschiedlich. Das liegt an dem Abstand der Kämmen zu dem Walzenpaar. Bei Kammstellung 1 ist der Winkel der äußeren Rovings größer, wodurch schneller die geringste Breite erzielt wird. Abbildung 5.11 verdeutlicht die Unterschiede der Faserablage.

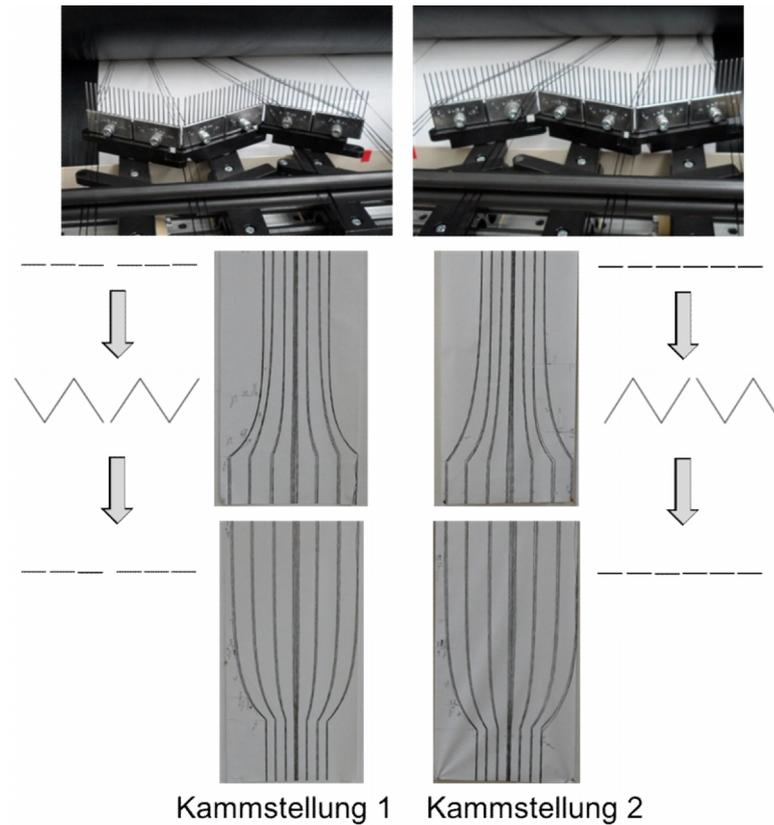


Abb. 5.11: Unterschiedliche Faserablage bei 2 Kammeinstellungen

Bei der Ausmessung der Muster ist der Unterschied der Strecken für beide Kammstellungen deutlich zu sehen.

Position [%]	Kammstellung 1			Kammstellung 2		
	Breite [mm]	Strecke [mm]	Winkel [°]	Breite [mm]	Strecke [mm]	Winkel [°]
0	592,0	-	55	595,0	-	35
50	441,5	93	33	443,0	135	22
90	321,1	288	7	321,4	451	3
100	291,0	973	-	291,0	1080	-

Abb. 5.12: Unterschiedliche Abmaße der Ablage bei zwei Kammeinstellungen

Besonders starke Auswirkungen haben die unterschiedlichen Kammeinstellungen auf den seitlichen Versatz.

Daher wird ein neues Konzept entwickelt, das mit einem Federsystem anstelle der Kämmen ausgestattet ist. Zudem muss das Fadenführungssystem näher an die Walzen gesetzt werden, um Fadenreserven, d.h. schnelle Richtungsänderungen des Rovings, umsetzen zu können. Abbildung 5.13 zeigt den Unterschied bei der Ausführung des seitlichen Versatzes zwischen Kamm- und Federsystem.

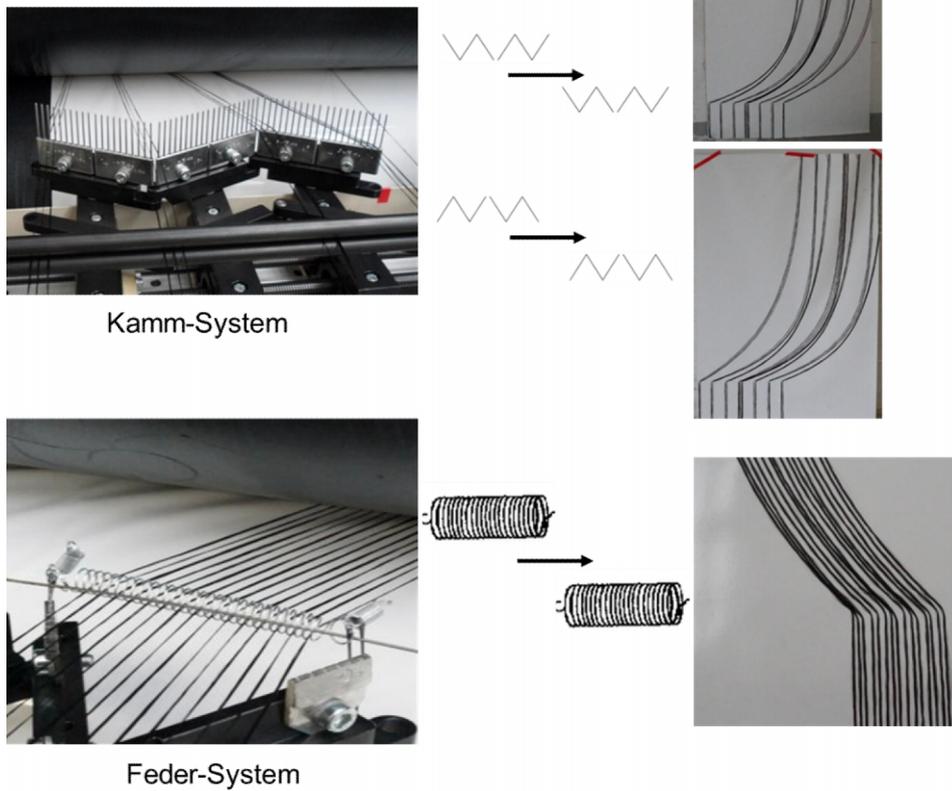


Abb. 5.13: Unterschied bei Ausführung des seitlichen Versatzes zwischen Kamm- und Federsystem

Durch den Einsatz von Federn, aus dem Patent WO 2014/ 060 092 A1, wird das oben beschriebene, durch die Käme verursachte Problem, gelöst.

6. Bestimmung der Drapierbarkeit

Die falten- und fehlerfreie Drapierbarkeit von ebenen, lastangepassten Textilien über eine dreidimensionale Geometrie hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Beschaffenheit des Textils
- Bauteilgeometrie (Umlenkung über 2 Kanten, Kofferecken, Übergänge, ...)
- Materialführung (Klemmung, Reibung)

Zur Prüfung der Drapierbarkeit eines Textils werden die Bauteilgeometrie sowie die Materialführung identisch gelassen, lediglich die Beschaffenheit und Aufmachung des Textils wird variiert.

Hierzu wird ein Drapierprüfstand entwickelt. Mit dem Prüfstand „LCC Pole Peak“ lassen sich verschiedenen Textilien auf ihre Drapierbarkeit prüfen. Auf dem Prüfstand lassen sich Textilien nach dem Durchdrückprinzip, siehe Abbildung 6.1, drapieren. Das zu prüfende Textil (8) wird auf eine Tischplatte (3), die eine Aussparung der projizierten Fläche der Drapierform mit einem Aufschlag von 2 mm enthält, aufgelegt. Das Textil wird mittels Niederhaltern (2) fixiert, siehe Abbildung 6.1 a. Die Drapierform „Pole Peak“ (1) wird anhand eines Schrittmotors (5), der sich auf einer Zwischenplatte (7) befindet, über eine Gewindespindel (4) mit Hilfe von Linearführungen (6) senkrecht nach oben verfahren. Während die Drapierform durch die Aussparung in der Tischplatte verfährt, wird das Textil über die Form drapiert, siehe Abbildung 6.1 b.

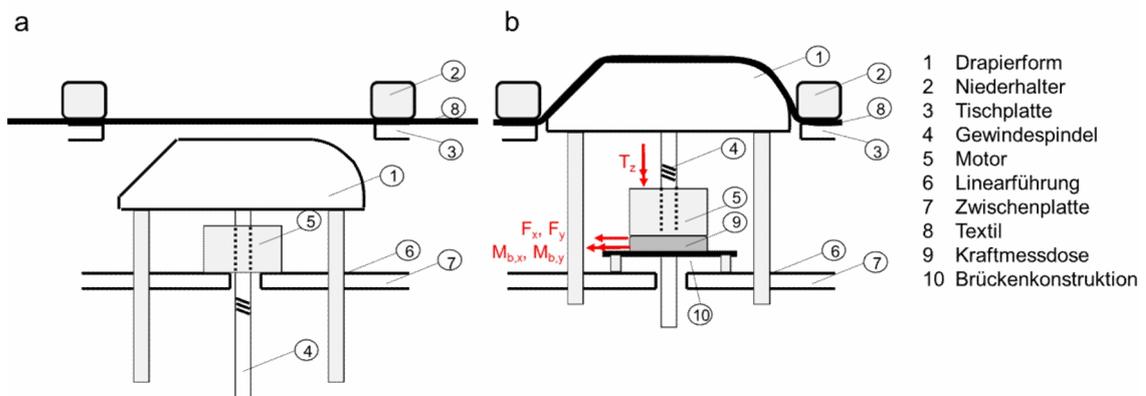


Abb. 6.1: Prinzip des Drapierprüfstandes „LCC Pole Peak“

Zur Drapierprüfung können mehrere Parameter eingestellt werden:

- Niederhalterkraft, entspricht der Klemmkraft
- Oberfläche von Tischplatte und Niederhalter, zur Einstellung des Reibwertes
- Verfahrgeschwindigkeit
- Verfahrensweg

Die Besonderheiten des Drapierprüfstandes sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

6.1. Spezielle Drapiergeometrie

Typische für Drapiertests verwendete Geometrien sind eine Hemisphäre [31, 32, 33, 34, 35, 36], ein Tetraeder [20] oder ein Doppel-Dom [37, 38].

misphäre auf, mit einem Durchmesser von 70 mm und einem 25 mm langen, tangentialen Übergangsbereich zu den angrenzenden Flächen des Mittelstücks.

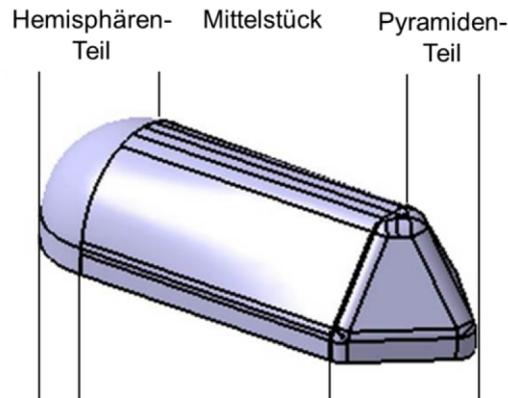


Abb. 6.3: CATIA-Part der Drapierform Pole Peak

Zur späteren Bewertung der Drapierbarkeit, Drapiermechanismen und Drapierfehler von Textilien wird die Form in einzelne Bereiche eingeteilt:

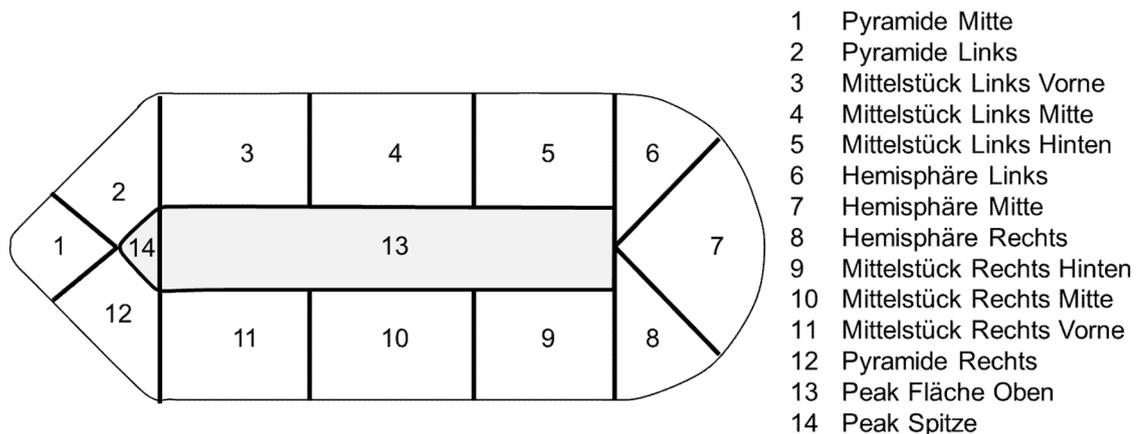


Abb. 6.4: Einteilung der Drapierform „Pole Peak“

Die drapierten Textilien weisen in diesen vierzehn Bereichen unterschiedliche Drapiermechanismen, in denen Drapierfehler auftreten können.

6.2. Segmentierte Klemmung

Die Art der Klemmung für die Textilien wird an Hand des folgenden Anforderungskataloges entwickelt:

- Klemmung von unterschiedlichen Materialien
- Klemmung von unterschiedlichen Materialdicken und mehreren Lagen
- Klemmung direkt an der projizierten Fläche der Drapierform
- Segmentierung der Klemmung zur Steuerung des Drapierprozesses
- Flächige Pressung jedes Segments
- Klemmung jedes Filaments trotz Segmentierung

- Einstellung der Anpresskraft jedes Segments zur Anpassung der lokalen Flächenpressung
- Unterschiedliche Oberflächen für unterschiedliche Reibwerte
- Geringe Bauhöhe
- Geringes Gewicht zur leichten Handhabung
- Gleich große Grundfläche der Segmente für die Vereinfachung der Einstellung der Flächenpressung

Mit variabler Flächenpressung ist es möglich, das Drapierergebnis zu beeinflussen. [75, 76] Daher wird in Zusammenarbeit mit der Firma MICADO SMART ENGINEERING, Oberlienz, nach diversen verschiedenen Konzeptideen ein Niederhaltersystem entsprechend der Anforderungsliste entwickelt und umgesetzt. Bei der ersten Konzeptidee wird die unterschiedliche Flächenpressung mit auf einem Steg verschiebbaren Gewichten realisiert, siehe Abbildung 6.5.

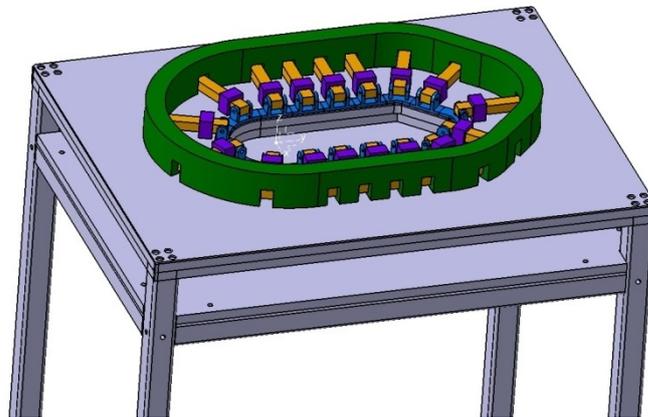


Abb. 6.5: Erste Konzeptidee für einen segmentierten Niederhalter [MICADO]

Nachteilig ist hierbei, dass mit diesem Konzept keine Flächenpressung von 0 N erreicht werden kann. Zusätzlich beträgt das Gesamtgewicht des Niederhalters circa 20 kg, was zu schwer ist, um es vor und nach der Prüfung anzuheben.

Gewicht der Prüfstandkomponenten:

- | | |
|--|-----------|
| • Rahmen (grün), evtl. aus Aluminium | >7 kg |
| • Segmente (blau), gesamt | 1-2 kg |
| • Arme (gelb), gesamt (evtl. aus Kunststoff) | 1 kg |
| • Gewichte (lila), gesamt | ca. 10 kg |
| Gesamtgewicht | > 19 kg |

Der für den Drapierprüfstand umgesetzte Niederhalter enthält einzelne Segmente mit Kurzhubzylindern, die pneumatisch angesteuert werden. Die Segmente, die in Abbildung 6.6 als Niederhalterelemente beschrieben sind, werden an einer Stahlplatte befestigt, die sich mittels eines Handgriff und einer Gasdruckfeder über ein Scharnier aufklappen lässt. Dadurch wird ein leichtes Öffnen des Niederhalters zum Einlegen und Entnehmen des Textils gewährleistet.

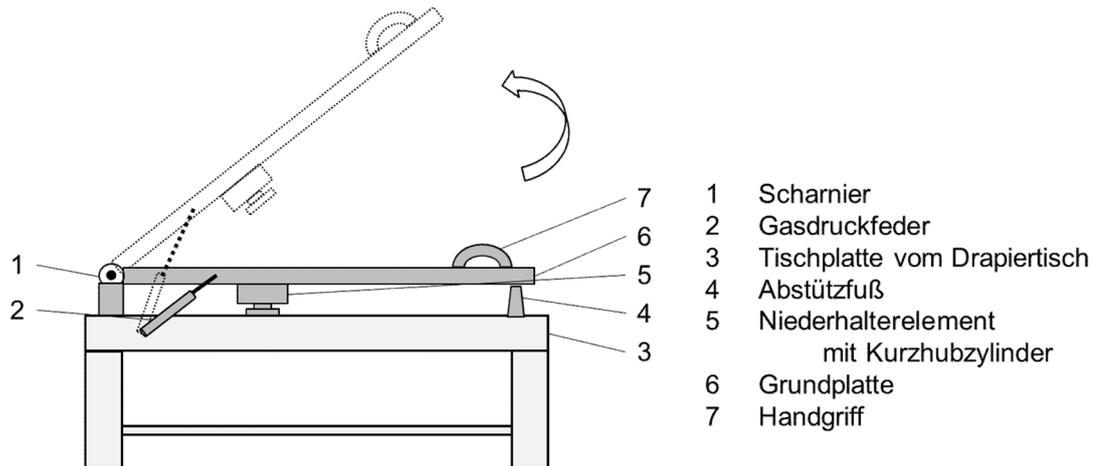


Abb. 6.6: Finale Konzeptidee für den segmentierten Niederhalter

Für die Umsetzung der einzelnen Segmente ist es wünschenswert, die Anzahl der Segmente möglichst gering zu halten, wobei eine ausreichend feine Aufteilung zu wählen ist, um die Klemmung an den in Abbildung 6.4 beschriebenen Bereichen der Drapierform „Pole Peak“ individuell einstellen zu können. Zusätzlich soll die Grundfläche der einzelnen Segmente relativ gleich groß sein, um bei einem bestimmten eingestellten Druck auch dieselbe Flächenpressung sicherzustellen. Im Anhang A.3 sind die Flächen für unterschiedliche Anzahlen an Segmenten für die drei Bereiche Pyramide, Mittelstück und Hemisphäre aufgelistet.

Zu den Segmentflächen werden ebenfalls die Segmentlängen bei verschiedenen Anzahlen der Segmente bestimmt. Um eine möglichst geringe Abweichung der Segmentgröße zu erreichen, wird das rot markierte Konzept gewählt, wie in der Übersicht in Abbildung 6.7 gezeigt wird, da dieses die geringste Standardabweichung aufweist.

Anzahl der Segmente			Gesamte Segmentanzahl	Ideale Segmentlänge	Standardabweichung
Pyramide	Mittelstück	Hemisphäre			
3	7	4	28	31,6	1,9
3	7	3	26	34	2,8
2,5	7	3	25	35,4	3,6
3	6	3	24	36,9	2,1
2,5	6	3	23	38,5	1,2
2	6	3	22	40,2	5,9
2,5	5	3	21	42,1	2,7
2	5	3	20	44,2	4,9
2,5	4	3	19	46,5	7,9
2	4	3	18	49,1	7,3
2	4	2	16	55,3	3,2

Abb. 6.7: Berechnung der Standardabweichung bei unterschiedlicher Segmentanzahl des halben Niederhalters

Bei dieser Variante mit der geringsten Standardabweichung der Segmentlänge und Segmentfläche ergeben sich 5 Segmente am Pyramidenteil, 12 Segmente am Mittelstück und 6 Segmente im Hemisphärenteil. Die Aufteilung sieht dementsprechend wie folgt aus:

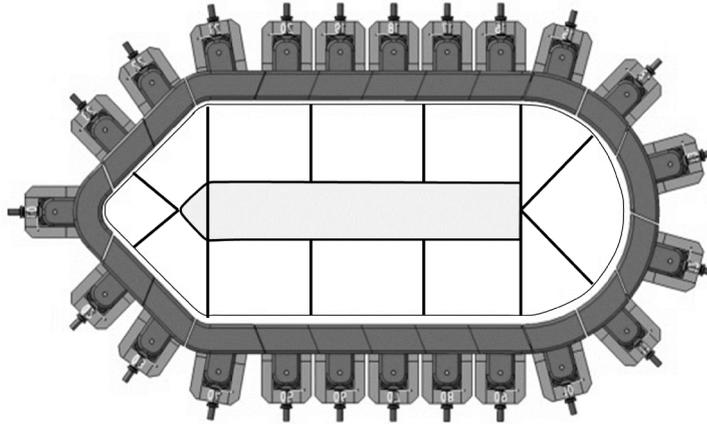


Abb. 6.8: Aufteilung des Niederhalters in 23 Segmente

Insgesamt wird der Niederhalter in 23 Segmente eingeteilt, mit einer gesamten Fläche von 9500 mm^2 und einem Radius von $R 5$, um bei der Umlenkung am Kantenbereich des Niederhalters keine Faserschädigung zu erzeugen. Die Stöße der einzelnen Segmente werden so gestaltet, dass die Segmente nach außen auseinander gezogen werden können, um auch dickere Textilien oder textile Stacks zu testen. Mit schrägen Stößen ist dieses gewährleistet, siehe Abbildung 6.9, Variante 2.

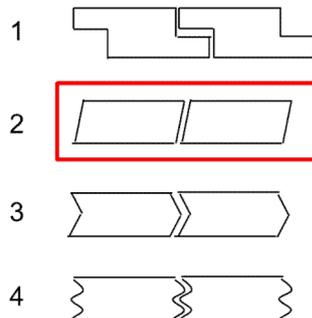


Abb. 6.9: Varianten von Stößen zwischen den einzelnen Segmenten

Mit dieser Art von Stoßstellen ist zusätzlich gewährleistet, dass bei den Hauptausrichtungen der Rovings, d.h. 0° , 90° , $+45^\circ$ und -45° , die Rovings auch beim Auseinanderziehen der Segmente stets von einem Segment geklemmt sind, siehe Abbildung 6.10.

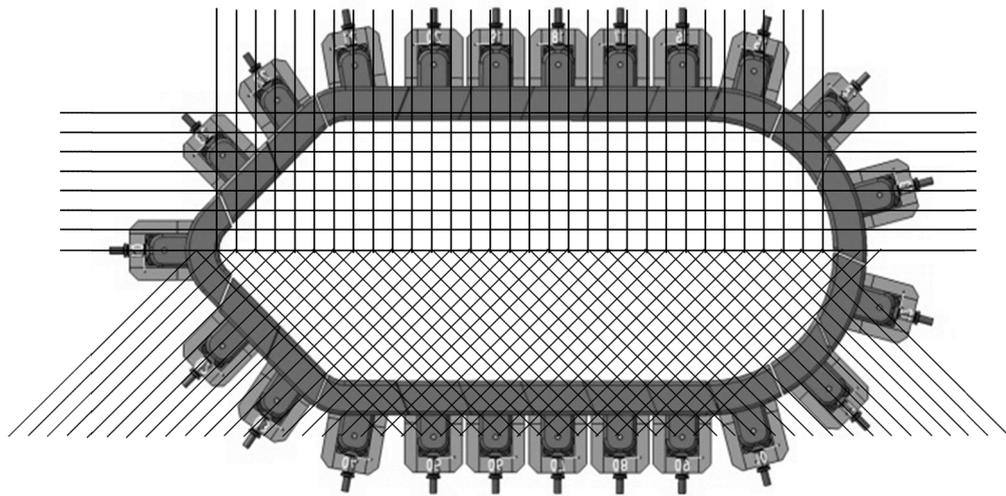


Abb. 6.10: Darstellung zur Klemmung der Rovings in den Hauptrichtungen 0° , 90° , $+45^\circ$, -45°

Die Niederhalterelemente sind aus Aluminium gefertigt. Zur Änderung der Reibwerte können die einzelnen Elemente mit einer selbstklebenden Glasfaserverstärkten Teflonfolie überklebt werden.

Versuche zu den unterschiedlichen Reibwerten zwischen verschiedenen Textilien und verschiedenen Oberflächenmaterialien mit dem am LCC entwickelten Reibprüfstand zeigen keine reproduzierbaren Ergebnisse. Daher werden sie in der Arbeit nicht mit aufgenommen. Zur Prüfung des Halbzeuges „CoCo“ ist allerdings ein hohes Reibwert erwünscht, da das Material nicht unter den Niederhaltern herausgezogen werden darf. Hierzu werden der Drapiertisch und die Niederhalter mit einem Schleifpapier mit der Körnung 80 überzogen.

6.3. Temperierung

Das Material „CoCo“ wird unter anderem auf einem thermoplastischen Trägermaterial abgelegt. Zur Prüfung der Drapierbarkeit dieses neu entwickelten Materials wird in dem Prüfstand eine Heizung integriert.

Anforderungskatalog für die Heizung bei Taktzeiten < 6 Minuten

- Schnelle Aufheizung
- Zerstörungsfreie Aufheizung
- Kontrollierte, gut steuerbare Aufheizung
- Homogene Aufheizung
- Einfache Realisierung
- Gute Integration in den vorhandenen Prüfstand
- Untersuchung eines weiten Spektrums an verschiedenen Materialien

Auf dem Markt verfügbare Heizquellen sind:

- Konduktive Heizquelle / Kontaktheizung
- Konvektive Heizquelle / Wärmeströmung (Heizgas)
- Strahlung als Heizquelle (IR-, Mikrowellen-Strahlung)
- Elektromagnetische Heizquelle (Radiowellen)
- Mechanische Wellen als Heizquelle (Ultraschall)
- Mechanisches Feld als Heizquelle (Induktion) => nur für leitendes Material
- Elektrischer Widerstand als Heizquelle => nur für leitendes Material

Die unterschiedlichen Heizquellen werden auf ihre Eigenschaften und Eignung miteinander verglichen und bewertet, siehe Anhang A.5 dieser Arbeit.

6.3.1. Konzeptauswahl

Das Material soll erst erhitzt werden, wenn es sich bereits in dem Drapierprüfstand befindet und mit den segmentierten Niederhaltern fixiert ist. Ansonsten kann das aufgeheizte, biegeschlaife Material nicht mehr per Hand eingelegt werden, sondern es bedarf eines komplexeren Handlingsystems. Gewünscht ist eine gleichmäßige Verteilung der Temperatur in dem gesamten, zu drapierenden Bereich des Textils.

Das Textil ist im eingespannten Zustand nur von unten und oben bei der Aussparung der Tischplatte zugänglich. Zusätzlich muss bei bestimmten Drapiermethoden, und zwar beim Zugdruckumformen, wenn das Material von außen hereingezogen wird, auch das Material unterhalb der Niederhalter aufgeheizt werden. Zur Realisierung der Heizung wird auf Grund der Auswertung der Bewertungsmatrix (A.5) ein kombiniertes System aus Infrarot-Strahlung und Kontaktheizung gewählt, siehe Abbildung 6.11.

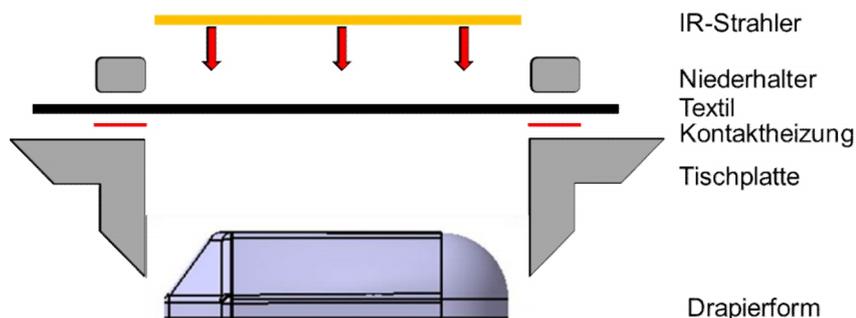


Abb. 6.11: Konzept für Temperierung

Die Infrarot-Strahler heizen das Halbzeug in dem Bereich der Aussparung zwischen den Niederhaltern auf. Die Kontaktheizung erwärmt den Bereich, der sich unterhalb der Niederhalter befindet und somit von den Infrarot-Strahlern nicht erreicht werden kann.

6.3.2. IR-Strahler

In Automobilanwendungen vorzugsweise eingesetzte thermoplastische Matrixsysteme sind Polyamide, kurz PA, und Polyolefine, zum Beispiel PP und PE. Diese lassen sich mit mittelwelliger Infrarotstrahlung aufschmelzen. [40] Abbildung 6.12 zeigt den Wel-

Wellenlängenbereich von Infrarot-Strahlung und im speziellen von mittelwelligen Infrarotstrahlung im Vergleich zu den Wellenlängenbereichen, bei denen sich Polyamide und Polyolefine aufschmelzen lassen.

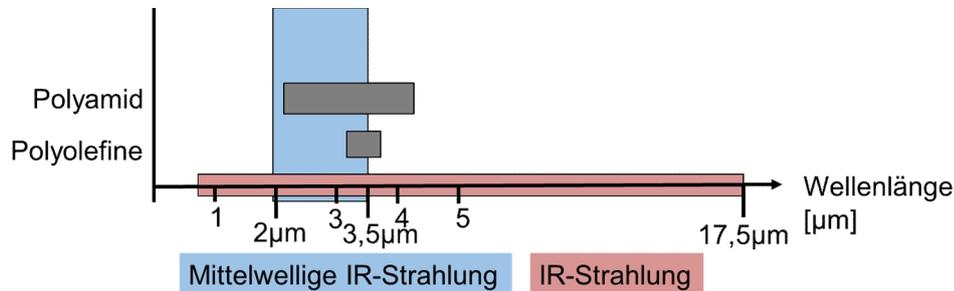


Abb. 6.12: Übersicht der Wellenlänge für im Automobilbereich eingesetzte Thermoplaste

Die benötigte Leistung der IR-Strahler wird mittels einer Berechnung der Wärmekapazität c_p , der Wärmemenge Q und der Heizleistung P ausgewählt, wobei weder nichtideale Absorption noch konvektive Kühlung durch die Umgebungsluft berücksichtigt werden.

In Abbildung 6.13 wird die benötigte Wärmemenge Q für Organobleche aus Carbonfasern mit PA6 und aus Glasfasern mit PA6 bei unterschiedlichen Faservolumengehalten berechnet.

Mit der folgenden Formel (5) wird die gemischte Wärmekapazität c_p aus Matrix und Faser berechnet.

$$c_p = \delta \cdot c_F + (1 - \delta) \cdot c_M \quad (5)$$

Mit:

c_M : Wärmekapazität Matrix

c_F : Wärmekapazität Faser

δ : Faseranteil

Mit nachfolgender Gleichung (6) wird die zur Erwärmung um die Temperaturdifferenz ΔT benötigte Wärmemenge Q berechnet.

$$Q = m \cdot (c_p \cdot \Delta T) + (1 - \delta) \cdot h_M \quad (6)$$

Mit:

Q : Wärmemenge

h_M : Schmelzenthalpie Matrix

Die Masse m des Thermoplasts berechnet sich über folgende Gleichung (7):

$$m = \rho \cdot b \cdot l \cdot d \quad (7)$$

Mit:

ρ : Dichte

b : Breite

l : Länge

d : Dicke

6 Bestimmung der Drapierbarkeit

Die Dichte ρ des Thermoplasten ergibt sich über den Faservolumenanteil δ in der Matrix, nach Formel (8):

$$\rho = \delta \cdot \rho_F + (1 - \delta) \cdot \rho_M \quad (8)$$

Mit:

ρ_M : Dichte der Matrix

ρ_F : Dichte der Faser

Die benötigte Heizleistung P ist von der Wärmemenge Q und der Aufheizzeit t abhängig und wird mit der Gleichung (9) berechnet:

$$P = \frac{Q}{t} \quad (9)$$

Mit:

P: Heizleistung

Material	Faseranteil			
	30 %	40 %	50 %	60 %
CFK + PA6	72,9 kJ	69,3 kJ	65,0 kJ	60,1 kJ
GFK + PA6	86,5 kJ	86,0 kJ	84,4 kJ	81,0 kJ

Abb. 6.13: Berechnung benötigter Wärmemenge

In Abbildung 6.14 sind die benötigten Heizleistungen P bei Aufheizzeiten von 10 Sekunden und 30 Sekunden für Faservolumenanteile von 30 % bis 60 % für die Werkstoffe PA6CFK und PA6GFK aufgelistet; weitere Berechnungen der benötigten Heizleistung bei Aufheizzeiten von 15 Sekunden und 20 Sekunden sind im Anhang A.6 zu finden.

Das zu erwärmende Volumen wird mit der maximal möglichen Drapierdicke von 1,6 mm und einer Grundfläche von 0,075 m² berechnet. Somit sind die in Abbildung 6.14 aufgelisteten Leistungswerte die benötigten Maximalwerte.

Material	Faseranteil				Faseranteil			
	10 Sekunden				30 Sekunden			
Heizzeit	30 %	40 %	50 %	60 %	30 %	40 %	50 %	60 %
CFK + PA6	7,3 kW	6,9 kW	6,5 kW	6,0 kW	2,4 kW	2,3 kW	2,2 kW	2,0 kW
GFK + PA6	8,6 kW	8,6 kW	8,4 kW	8,1 kW	2,9 kW	2,9 kW	2,8 kW	2,7 kW

Abb. 6.14: Berechnung benötigter Heizleistung für Heizzeit von 10 Sekunden (links) und 30 Sekunden

Auf Grund der höheren Wärmekapazität von Glasfasern benötigt die Erwärmung von glasfaserverstärkten Thermoplasten eine größere Wärmemenge bzw. Leistung als die von kohlefaserverstärkten Thermoplasten. Um schnelle Aufheizzeiten von etwa 20 Sekunden zu erreichen, ist bei GFK + PA6 eine maximale Leistung von 4,324 kW der IR-Strahler bei einem Fasergehalt von 30 % nötig.

6 Bestimmung der Drapierbarkeit

Basierend auf der Anforderung von kurzen Zykluszeiten werden IR-Strahler mit hohen Leistungen eingesetzt. Abbildung 6.15 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit von Aufheizzeit zur benötigten Leistung des Strahlers für CFK + PA6 mit 50 % Faservolumenanteil.

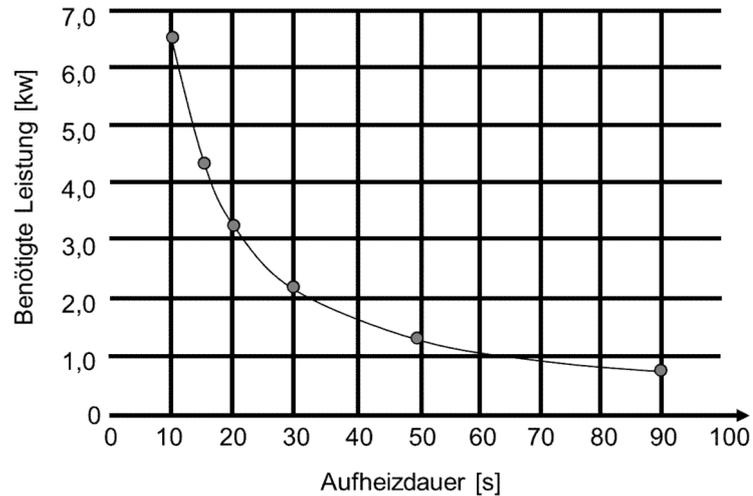


Abb. 6.15: Benötigte Heizleistung bei variabler Aufheizdauer für CFK PA6, 50% v_f

Die Wahl fällt auf eine Anordnung von zwei 80 W/cm „Carbon twin-tube“ Strahlern mit Goldreflektor der Firma Heraeus Noblelight mit einer beheizten Länge von 600 mm.

Der Abstand zu Beginn der Drapierprüfung beträgt 170 cm zum Textil. Bei solch einem Abstand ist der Abfall der Strahlerleistung im Randbereich wie in Abbildung 6.16 dargestellt. [41]

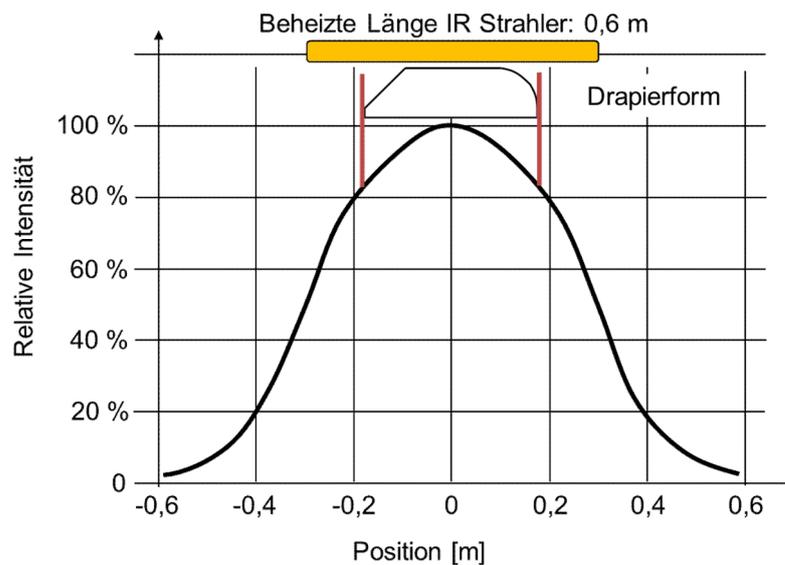


Abb. 6.16: Leistungsverluste an den Strahlerenden bei einem Abstand von 170 cm

Eine relative Intensität von $> 0,8$ ist somit an den Randbereichen des zu beheizenden Materials sichergestellt. Die Intensität der Strahler wird mit dem Leistungssteller Heratron (R) Typ CB3x25 P der Firma Heraeus gesteuert.

6.3.3. Kontaktheizung

Bei der Kontaktheizung wird der direkte Kontakt zwischen Heizung und Textil vermieden, um Verunreinigungen durch den Thermoplasten auszuschließen. Daher wird der Teil der Tischplatte direkt unter der Niederhaltersegmente aufgeheizt. Hierfür wird ein System der Firma Watlow ausgewählt namens „Coil/Cable Heaters“, kabelförmige Heizelemente, siehe Abbildung 6.17.



Abb. 6.17: Kabelheizelemente von Watlow [WATLOW]

Diese biegbaren Heizkabel werden in Ausfräsungen der Unterfläche der Tischplatte eingelegt und mit einem PID Regler verbunden, sowie mit Thermoelementen zur Messung der Temperatur des Textils ausgestattet, siehe Abbildung 6.18.



Abb. 6.18: Einlegen der Heizkabel an Drapiertischunterseite

Die Heizkabel werden an das Steuerungsgerät EZ-ZONE PM PID Regler PM6C1EA-AAAAAAA der Firma Watlow angeschlossen. Der Regler wird über eine Software auf dem Computer bedient. Ein an dem Regler angeschlossener Temperaturfühler bestimmt die Temperatur zwischen Textil und Niederhalter.

6.4. Bewertungsparameter

Eine objektive Bewertung der Drapierbarkeit mittels einer Art Drapierkennzahl ist mit dem hier aufgezeigten Drapierprüfstand und auch an sonstigen anderen Drapierprüfständen so gut wie nicht möglich. Die Bewertung der Drapierbarkeit wird vergleichend durchgeführt, und zwar durch den Vergleich der Drapierfehler, des kritischen Scherwinkels und der aufzuwendenden Drapierenergie.

6.4.1. Optische Auswertung mit ProFactor

Die österreichische Firma PROFACTOR GmbH hat einen Oberflächensensor entwickelt, mit dem es möglich ist, die Oberfläche eines Textils aufzunehmen und zu analysieren. Somit können die im Textil vorkommenden Drapierfehler aufgenommen und vermessen werden. Hierzu gehören die Aufnahme und Vermessung der Faserorientierung in x-, y- und z-Richtung und Gaps.

6.4.2. Kraftaufnehmer

Die Drapierform wird mittels eines Schrittmotors L4118S1404-T6 x 2 der Firma Nanotec verfahren. Dieser Motor ist ein Linearaktuator, das heißt der Rotor ist direkt an ein Innengewinde gekoppelt. Dieses Innengewinde mit einer Steigung von 2 mm wird direkt mit einer Gewindespindel verbunden. Die maximal zu realisierende Verfahrgeschwindigkeit beträgt 20 mm/s, mit einer Schubkraft von bis zu 250 N in axialer Richtung. Der Motor wird mit der Steuerung SMCI33-1 ebenfalls der Firma Nanotec verfahren.

Zur Messung der aufzubringenden Kraft, die benötigt wird, um das Textil bei einer bestimmten Niederhalterkraft und einem bestimmten Reibfaktor zu drapieren, wird eine Kraftmessdose in den Prüfstand eingebaut. Die Messung der Kraft hat zwei unterschiedliche Funktionen. Zum einen kann die Abbildung der aufzuwendenden Kraft die Reproduzierbarkeit des Prüfstandes abbilden. Zum anderen gibt sie durch eine objektive Bewertungsmethode einen Wert an. Durch die Berechnung der benötigten Energie aus dem Integral wird ein vergleichender Wert für jedes Textil erzeugt. Aus den aufgenommenen Werten kann auch auf den Reibwert zwischen Niederhalter, Textil und Auflegeplatte zurückgeschlossen werden.

Die Kraftmessdose, Zug-Druck-Kraftsensor Typ 8435 der Firma Burster Praezisionsmesstechnik GmbH & Co. KG, kann bis zu 400 N messen. Um eine Verfälschung der Ergebnisse auf Grund von Torsions- und Biegemomente, sowie von Querkräften zu vermeiden, wird der Sensor (9), wie in Abbildung 6.19 zu sehen ist, auf der Zwischenplatte (7) als ortsfeste und verdrehsichere Position und zusätzlich auf einer Brückenkonstruktion installiert.

Die Schwingungen in der Messkurve der Durchdrückkraft rühren von dem Betrieb des Motors im Open Loop Modus, das heißt jeder Schritt des Motors wird mit maximaler Stromstärke geschaltet, was eine ruckartige Rotordrehung zur Folge hat. Trotz der Schwingungen der Kurve befinden sich Messungen mit einer 95 %igen Wahrscheinlichkeit in dem Konfidenzintervall.

6.5. Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“

Der Aufbau des finalen Prüfstandes „LCC Pole Peak“ wird in Abbildung 6.21 ohne Heizstrahler für eine bessere Visualisierung dargestellt.

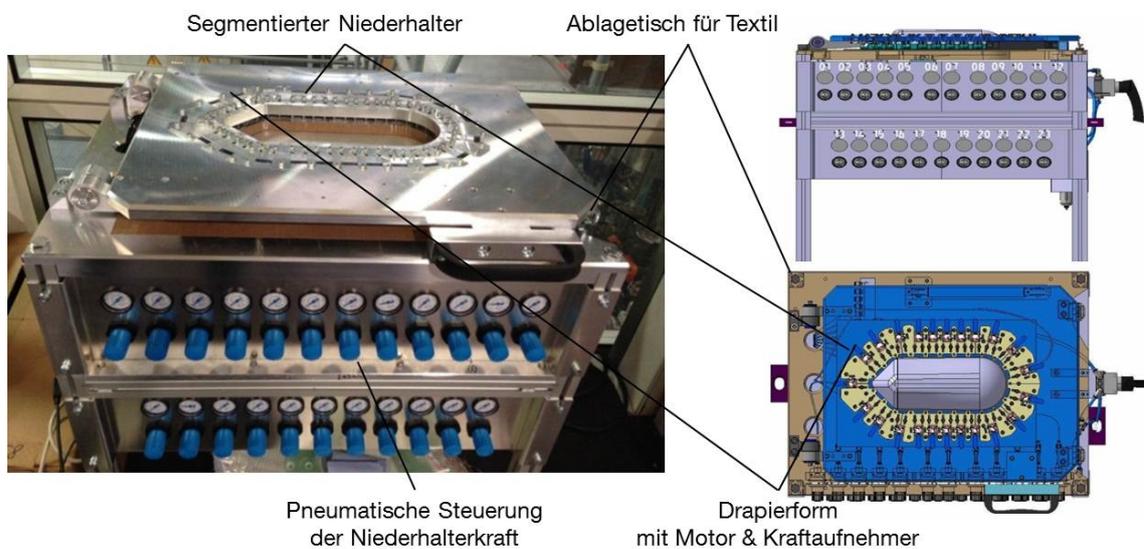


Abb. 6.21: Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“

Abbildung 6.22 zeigt die Infrarot-Strahler und die entsprechenden Abschirmungen, einerseits zum Schutz des Bedieners vor der Infrarot-Strahlung und andererseits zum Schutz der pneumatischen Komponenten vor hohen Temperaturen.

6 Bestimmung der Drapierbarkeit

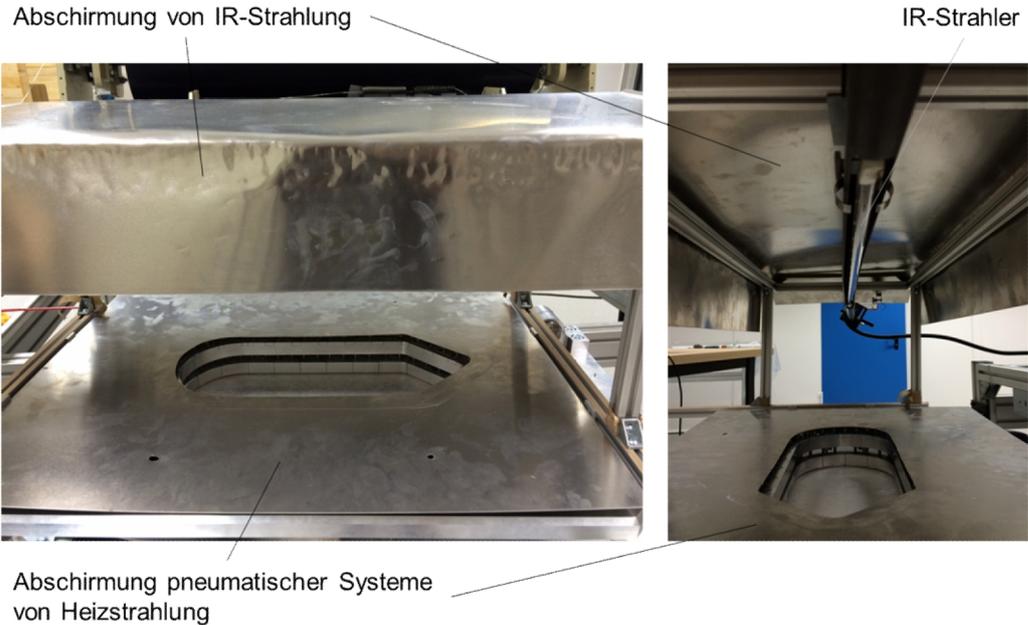


Abb. 6.22: Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“ mit IR-Strahler

7. Drapieranalysen – 2D zu 3D

Das Drapieren eines zweidimensionalen Flächengebildes zu einer dreidimensionalen komplexen Form stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. In diesem Kapitel soll eine detaillierte Analyse zu dem Drapierverhalten von Verstärkungstextilien durchgeführt werden. Zunächst werden die Drapiermechanismen beschrieben, die dem Textil die Fähigkeit geben, sich definiert zu verformen. Darüber hinaus werden die Drapierfehler beschrieben, die entstehen, wenn ein Maximum an Deformation eines Textils erreicht ist. Die Drapieranalyse beschreibt zum einen die Drapierbarkeit von Standardtextilien, wie Gewebe und multiaxiale Gelege, sowie die Drapierbarkeit des Halbzeuges „CoCo“.

7.1. Drapiermechanismen bei Textilien

Das Drapieren von Verstärkungstextilien kann zum Teil mit dem Metallumformen verglichen werden, vor allem das Thermoformen. Zwei Methoden bei dem Metallumformen entsprechen ziemlich stark dem Drapieren, und zwar das Tiefziehen und das Streckziehen. [79]

Während des Drapierprozesses entstehen durch Einwirkung von äußeren Kräften, die zu einer Anpassung an die drei-dimensionale Geometrie führen, Zug-, Druck- und Schubbeanspruchungen, die durch Zug an den Fasern, z.B. durch die Klemmkraft des Niederhalters, oder durch Reibung übertragen werden. [78]

In der Literatur beschriebene Kraft- und Spannungszustände des Blechs beim Metallumformen, dem Tiefziehen, können Rückschlüsse auf ähnliche Spannungszustände beim Drapieren von Halbzeugen gezogen werden. Ein großer Unterschied beim Drapieren von Halbzeugen zu Blechen sind die Materialeigenschaften der Werkstoffe. Die Beanspruchungen innerhalb des Werkstoffes können zum einen durch Drapiermechanismen des Textils ausgeglichen werden, zum anderen bei zu hohen Verformungskräften im Halbzeug zu Fehlern innerhalb des Textils führen.

7.1.1. Drapiermechanismen durch Materialeinzug

Das Tiefziehen gehört zu den Verfahren des Zugdruckumformens. Im Material kommt es zu Zug- und Druckbeanspruchungen. Beim Drapieren von Halbzeugen entspricht der Niederhalter dem Ziehring beim Metallumformen, die Drapierform dem Ziehstempel und der Ablegetisch dem Niederhalter. [80, 81]

Beim Tiefziehen wird der zusätzliche Materialbedarf aus der Umgebung herausgezogen und in den Werkzeugspalt, auch Ziehspalt genannt, zwischen Stempel und Matrize hineingezogen. Dies entspricht dem Drapieren von Verstärkungstextilien mit typischen Drapiermechanismen. Abbildung 7.1 verdeutlicht das Prinzip des Materialeinzugs beim Drapieren über ein Werkzeug.

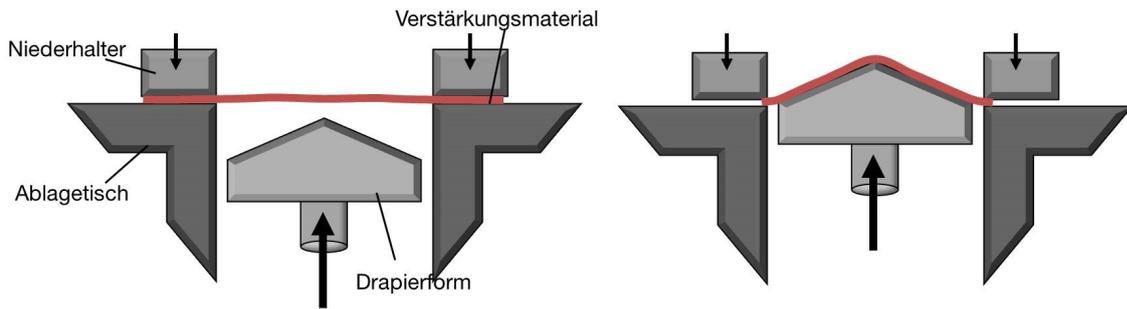


Abb. 7.1: Prinzip des Tiefziehens

Aus dem Metallumformen ist bekannt, dass im Einzugsbereich so genannte „charakteristische Dreiecke“ auftreten, die für die Umformung überschüssiges Material darstellen. Diese Dreiecke sind schematisch in Abbildung 7.2 dargestellt.

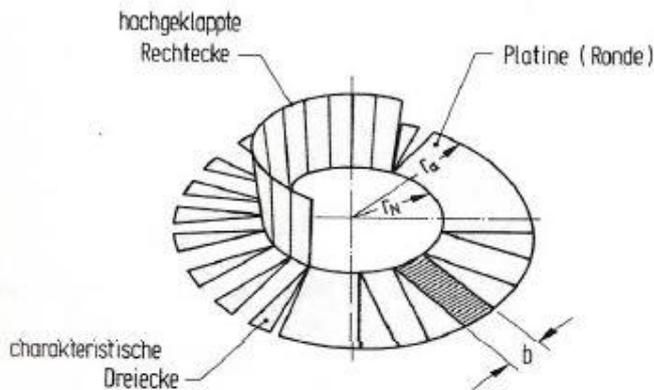


Abb. 7.2: Tiefziehen eines Hohlkörpers mit Ausbildung von „charakteristischen Dreiecken“ [81]

Auf Grund der Ausbildung dieses überschüssigen Materials kommt es zu Druckspannungen im Material, der als Faltenwurf im Textil außerhalb der Niederhalter erkennbar wird.

Unterhalb des Niederhalters kommt es zu Radial- σ_r , Tangential- σ_t und Normalspannungen σ_n im Werkstoff, die das Material verformbar machen. [82]

In Abbildung 7.3 werden diese Spannungen im Material unterhalb des Niederhalters verdeutlicht.

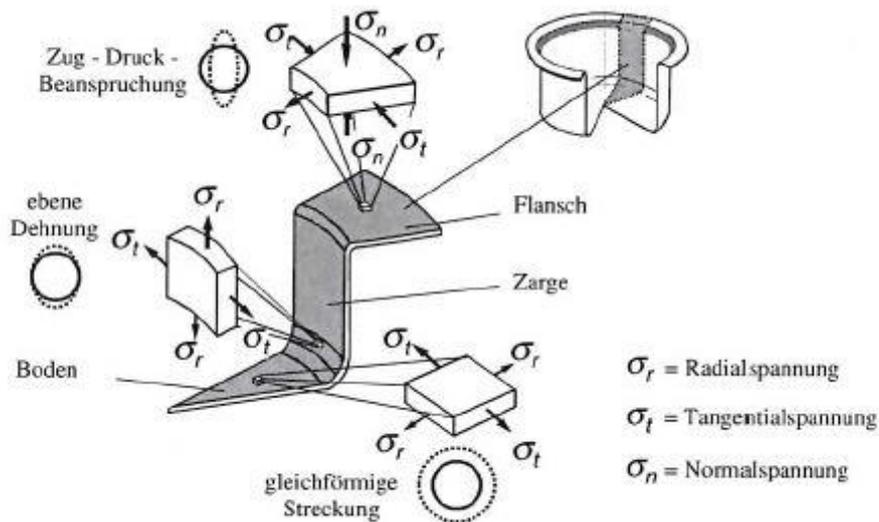


Abb. 7.3: Spannungszustände beim Tiefziehen [80]

Die Tangentialspannung σ_t wirkt im Niederhalterbereich als Druckspannung, und somit als Stauchung auf das Material.

Bei dem Drapieren von mehrlagigen Textilien und Stacks kommt es auf Grund von unterschiedlichen Faserausrichtungen innerhalb der Lagen zu ungleichmäßigem Materialeinzug und unregelmäßigem Faltenwurf außerhalb der drapierten Form. Dies wird in Abbildung 7.4 an Hand einer Drapiersimulation verdeutlicht.

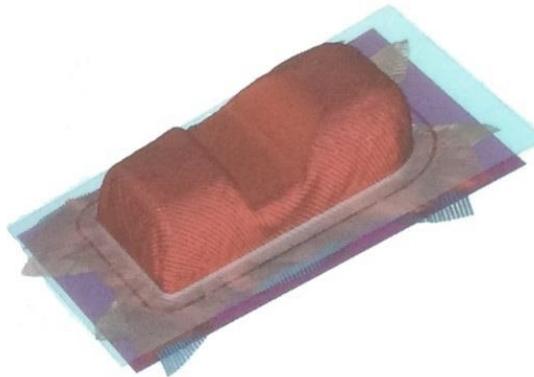


Abb. 7.4: Simulation von unterschiedlichem Materialeinzug bei Materialstacks mit unterschiedlichen Faserausrichtungen, am Beispiel eines Gewebes [89]

7.1.2. Drapiermechanismen durch Oberflächenvergrößerung

Das Streckziehen kommt ebenfalls aus dem Metallumformen, wobei sich das Material dehnt und streckt und somit eine Verringerung der Dicke auf Grund der Oberflächenvergrößerung mit sich bringt. In Abbildung 7.5 wird das Prinzip des Streckziehens mit Oberflächenvergrößerung verdeutlicht.

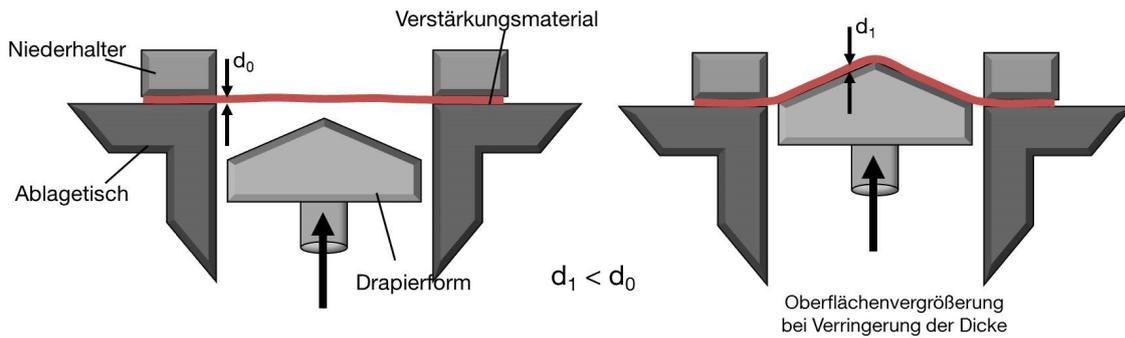


Abb. 7.5: Prinzip des Streckziehens mit reservenbedingter Verformung

Beim Streckziehen kommt es zu einer reinen Zugbelastung. [88] Dieser Mechanismus ist bei Halbzeugen aus Verstärkungsfasern weniger bekannt. Bei Textilien können keine plastischen Verformungen realisiert werden, da die Materialdehnung relativ gering, im Bereich von unter 3 %, sind.

7.1.3. Drapiermechanismen des Contour Composite („CoCo“)

Bei dem neuentwickelten UD-Material werden zwei Mechanismen gleichzeitig genutzt. Einer dieser Mechanismen ist das Streckziehen, wobei sich das Trägermaterial dehnt und streckt und somit eine Verringerung der Dicke auf Grund der Oberflächenvergrößerung mit sich bringt. Zusätzlich müssen sich die Verstärkungsfasern ebenfalls an die Geometrie anpassen. Dies geschieht durch eine Streckung der Fasern, wobei sich die Fadenreserven (sei es aus der x/y-Ebene oder der z-Ebene) entlang der vorhergesehenen Linie ausrichtet. Hierbei kommt es zu keinem Nachfließen aus überschüssigem Material unterhalb des Niederhalters. Der kombinierte Drapiermechanismus des Streckziehens und Faserstreckens wird in der Prinzipskizze in Abbildung 7.6 verdeutlicht.

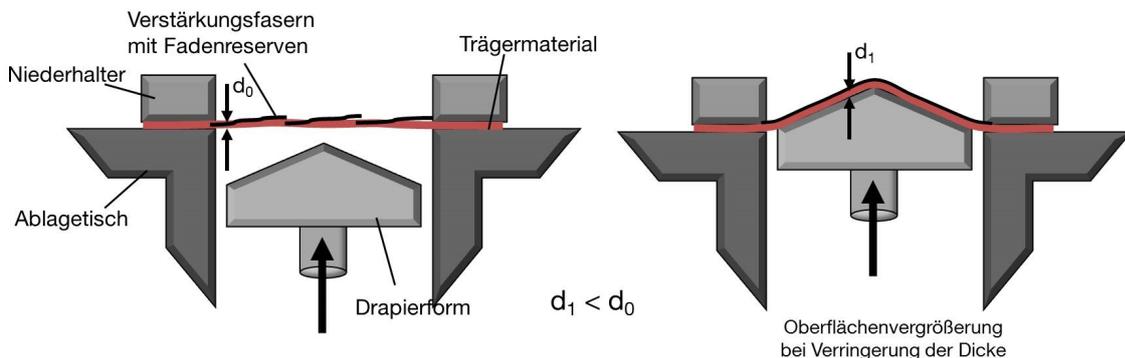


Abb. 7.6: Drapiermechanismen beim „CoCo“ Material – Streckziehen und Streckung

Bei dem Streckziehen in Kombination mit der Streckung kommt es zu Zug-Zug- und Schubbelastungen.

7.2. Drapierverhalten von Standardtextilien

7.2.1. Halbzeugformen

Zu Standardtextilien zählen Textilien, die auf allgemein bekannten Textilmaschinen hergestellt werden. Dazu gehören zum Beispiel Gewebe, multiaxiale verwirkte und verhäkelte Gelege und verstärkte Gewirke. Diese Textilien können Verstärkungsfasern in nur einer Richtung, das heißt sie sind unidirektional, oder in zwei oder mehreren verschiedenen Richtungen aufweisen.

Zum Vergleich mit dem Halbzeug „CoCo“, das die Verstärkungsfasern innerhalb einer Lage variabelaxial beinhaltet, werden unidirektionale Halbzeuge auf der Basis von Geweben, Gelegen und Gewirken auf ihre Material- und Drapiereigenschaften untersucht. Im Allgemeinen beeinflusst die textile Aufmachung das Drapierverhalten stark. Hierzu zählen folgende Eigenschaften:

- Flächengewicht und Kompaktheit
- Faserausrichtung
- Rapport (bei Geweben)
- Vermaschung (bei MAG), z.B. Nähfeinheit, Stichelänge, Wirkfadenmaterial, Einarbeitung, Legung [23]
- etc.

Die Mechanismen und die resultierenden Drapierfehler sind allerdings nicht abhängig von den Parametern innerhalb einer Eigenschaft, sondern werden nur hinsichtlich ihres Ausmaßes beeinflusst.

7.2.2. Allgemeine Deformationsmechanismen

Textile Halbzeuge haben die Möglichkeit, auf Grund von verschiedenen Deformationsmechanismen, sich einer dreidimensionalen Oberfläche anzupassen. Zu den Deformationsmechanismen gehören Faserdehnung und -streckung, Fasergleiten, Faser- und Textilbiegung und Textilscherung. Wie bereits aus den Bezeichnungen hervorgeht wirken die verschiedenen Mechanismen entweder auf Faser- oder Textilebene.

7.2.1.1. Faserdehnung und -streckung

Faserdehnung und Faserstreckung werden durch longitudinal zur Faserrichtung wirkende Zugkräfte ausgelöst. Bei der Faserdehnung längt sich die Faser auf Grund von elastischer Dehnfähigkeit der Faser. Verstärkungsfasern, vor allem Carbonfasern, weisen eine hohe Steifigkeit und eine geringe elastische Dehnung. Daher tritt dieser Mechanismus bei Faserverstärkungen für CFK in einem zu vernachlässigenden Maße auf. Faserstreckung bezeichnet die Reduktion von Krümmungsradien; die Fasern werden longitudinal gestreckt. Bei allen Halbzeugen, in denen durch Verwebung oder Verwirkung Krümmungen in den Fasern vorliegen, strecken sich die Fasern zunächst entlang der longitudinalen Hauptzugkräfte, bis sich alle Fasern in Kontakt befinden. Auf Grund der

beschriebenen hohen Steifigkeit der Carbonfasern kann das Materialverhalten der Verstärkungsfasern als linear angenommen werden, so dass die Faserstreckung von der Faserdehnung entkoppelt und somit das Hookesche Gesetz angewendet werden kann. [85] Zusätzlich wird in nachfolgendem Model die Rovingkompaktierung vernachlässigt. In Abbildung 7.7 werden die wirkenden Zugkräfte F_1 und F_2 mit den daraus entstehenden Kompressionskräften F_{k1} und F_{k2} dargestellt, die innerhalb eines biaxialen Textils, zum Beispiel eines Gewebes, auf die Fasern wirken und zur Faserstreckung λ_1 und λ_2 entlang den Koordinatenachsen x_1 und x_2 führen. [83, 84]

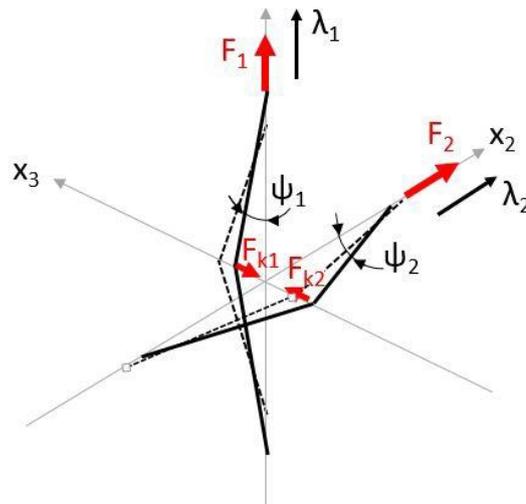


Abb. 7.7: Vereinfachtes Strukturmodell der biaxiale Deformationstheorie; Entkopplung der Faserdehnung und -kompaktierung [83]

Wie in Abbildung 7.7 schematisch gezeigt wird, ist die Kompressionskraft F_k nur von der textilen Aufmachung abhängig, denn es gilt folgende Formel mit dem Krümmungswinkel ψ_i :

$$F_k = F_i \times \sin \psi_i \quad (10)$$

Mit:

$i=1,2$

Bei Geweben kann der Mechanismus, wie oben beschrieben, festgestellt werden. Bei Halbzeugen, die durch Verwirken oder Verhäkeln die Verstärkungsfasern zusammenhalten, ist der Streckungseffekt der Verstärkungsfasern selbst vernachlässigbar, da diese bereits in gestreckter Form in Halbzeug vorliegen. Allerdings wirken auf die Nähte Zugkräfte, so dass diese sich zusammenziehen und somit die Relativbewegung der Verstärkungsfasern durch erhöhte Reibung minimieren.

7.2.1.2. Fasergleiten

Fasergleiten bezeichnet eine translatorische Faserverschiebung innerhalb einer Lage. Ausgelöst wird dieser Mechanismus durch zwei unterschiedliche Faktoren. Zum einen spielt die Geometrie, über die das Halbzeug geformt wird, eine Rolle. Besonders Kanten lösen eine Faserverschiebung aus, was meist eine Lücke zwischen den Fasern zur Folge hat. In Abbil-

dung 7.8 werden die auf das Textil wirkenden Kräfte dargestellt, die eine Faserverschiebung an einer Kante zur Folge haben. Die Drapierkraft F_{Tex} presst das Textil an die Form, und zwar an horizontalen Flächen senkrecht zur Faser. Trifft allerdings eine Kante auf, so wirkt die Drapierkraft F_{Tex} nicht senkrecht auf die Fasern, sondern entlang der Schräge neben der Kante, die zu einer Querkraft $F_{q,1}$ und $F_{q,2}$ führt. $F_{q,2}$ führt zu der Fasergleiten.

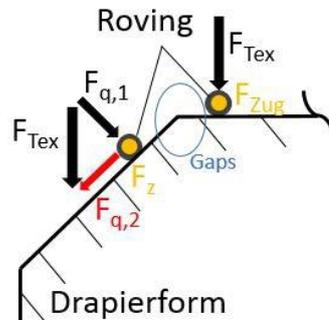


Abb. 7.8: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte bei Fasergleiten [92]

Zum anderen wird Fasergleiten durch lokale Reibung hervorgerufen. Reibung entsteht zwischen zwei textilen Lagen oder zwischen dem Halbzeug und der formgebenden Oberfläche. Die Reibung ist vor allem eine richtungsabhängige Größe. Der Reibungswiderstand, und somit das Fasergleiten, ist stärker ausgeprägt je größer der Richtungsunterschied der aufeinander gleitenden Materialien sind. [86]

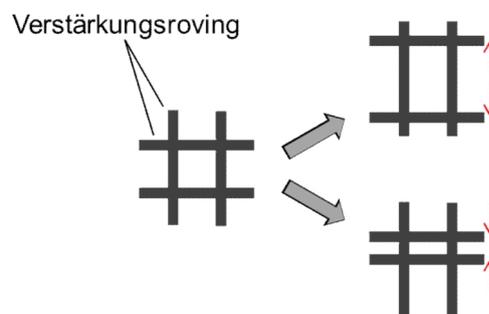


Abb. 7.9: Schematische Darstellung des Mechanismus Fasergleiten

7.2.2.3. Faser- und Textilbiegung

Der Drapiermechanismus Biegung wird auf zwei Ebenen betrachtet, und zwar auf der mesoskopischen, der Rovingebene, und der makroskopischen, der Textilebene. [87]

Die Faser- und Textilbiegung hängt von den Fasern, ihren mechanischen Eigenschaften, der geometrischen Anordnung und ihrem Kontaktverhalten ab.

Die Faserbiegung steht im engen Zusammenhang mit den mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Biegesteifigkeit der Fasern. Textilien lassen sich über abwickelbare Geometrien mit nur einer Krümmungsebene auf Grund der Möglichkeit zur Textilbiegung drapieren. [85] Bei starker Krümmung kann es zur Stauchung der am Innenradius liegenden Fasern im Roving kommen, beziehungsweise zu Faserverschiebungen. Bei der Drapierung über nicht abwickelbare Geometrien kann das Drapierverhalten von

Halbzeugen nicht allein aus den in-plane Materialeigenschaften abgeleitet werden, sondern beinhaltet ein strukturelles Problem auf mehreren Ebenen auf Grund der Inhomogenität der Halbzeuge. Abbildung 7.10 zeigt die drei Tangentenebenen einer nicht abwickelbaren Geometrie.

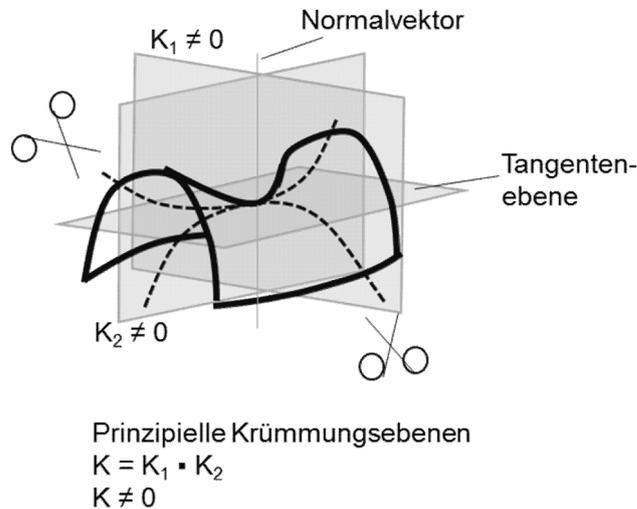


Abb. 7.10: Drapieren über eine nicht abwickelbare Geometrie

Bei Krümmung können sich die einzelnen Lagen gegeneinander verschieben und sich entsprechend der Krümmung anpassen. Abbildung 7.11 zeigt schematisch die Biegung eines zweilagigen Halbzeuges.

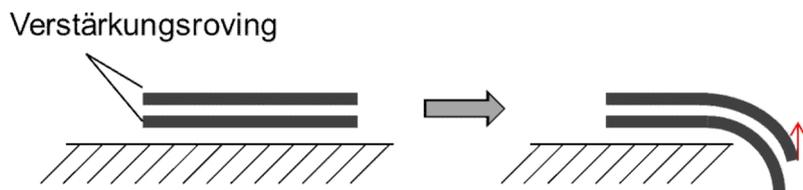


Abb. 7.11: Schematische Darstellung einer Biegung eines zweilagigen Halbzeuges

7.2.2.4. Textilscherung

Textilscherung, auch „Trellis“-Effekt genannt, tritt auf, wenn Scherspannungen auf die Fasern wirken. Die Zugkräfte wirken dabei nicht in den Hauptrichtungen der Faserverstärkung. Die Fasern richten sich nach der Richtung der Zugkräfte aus, bis sie parallel zur Krafrichtung liegen. Scherung kann vor allem bei Textilien beobachtet werden, in denen zwei Faserrichtungen vorliegen. Die Textilien können aus reinen Verstärkungsfasern bestehen, oder aus Verstärkungsfasern in einer Richtung und Stütz- oder Wirkfäden in einer anderen Richtung. Wird ein bestimmter Scherwinkel zwischen den beiden Faserrichtungen überschritten, das heißt wird der sogenannte kritische Scherwinkel erreicht, kommt es zur Ausbildung von Fehlern, zum Beispiel in Form von Falten. In Abbildung 7.12 wird der Mechanismus Scherung skizziert. γ_0 steht für den Ausgangswinkel, γ_1 bezeichnet den Scherwinkel und γ_{\min} den kritischen Scherwinkel.

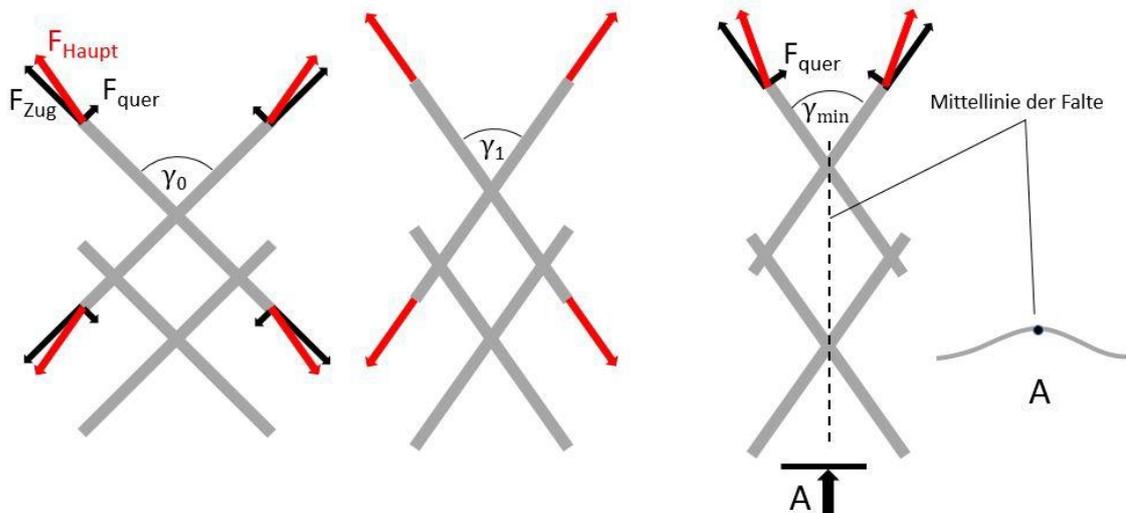


Abb. 7.12: Schematische Darstellung des Mechanismus Scherung und der Fehlerbildung Welle an Hand eines Gewebes [92]

Bei unidirektionalen Halbzeugen sieht die Faserscherung, ausgelöst durch Schubspannungen, anders aus als bei Materialien mit zwei Faserrichtungen. Dieser Effekt tritt vor allem bei unterschiedlichem Einzug von Fasermateriallängen von außen, woraus sich Schlaufen und Faserbruch ergeben. Abbildung 7.13 stellt diesen Mechanismus bei einem unidirektionalen Halbzeug dar.

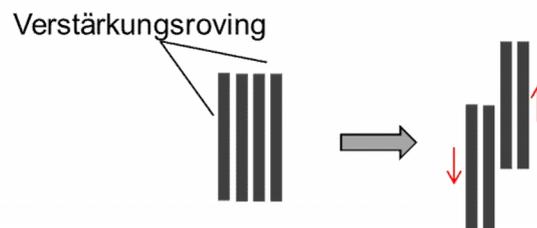


Abb. 7.13: Schematische Darstellung des Mechanismus Scherung an Hand eines UD-Halbzeuges

7.2.3. Drapierfehler

Auf Grund von verschiedenen, oben beschriebenen, Mechanismen eines Textils können sich zweidimensionale Textilien einer dreidimensionalen Kontur anpassen. Sind die Verformungsmechanismen bis zum Maximum ausgereizt, zeigen die Verstärkungstextilien Fehlerbilder während der Verformung.

Die Fehlerarten von Verstärkungstextilien, die bei einem formgebenden Prozess vorkommen können, lassen sich unterteilen in out-of-plane und in-plane, also in solche, die aus der Materialebene heraustreten, oder innerhalb dieser wirken.

Zu den Fehlerbildern zählen Gaps (in-plane Verschiebung), Wellen (out-of-plane Verwerfung), Schlaufen (out-of-plane Ondulation) und Mäander (in-plane Ondulation).

7.2.3.1. Gaps

Lücken, sogenannten Gaps, entstehen, wenn Rovings innerhalb einer Lage durch quer zur Faserrichtung wirkende Kräfte voneinander entfernt werden. Das seitliche Verrutschen der Fasern tritt besonders stark bei Textilien mit geringer Packungsdichte auf, das zu Lückenbildung führt. In Abbildung 7.14 ist ein UD-MAG abgebildet, das starke Gaps zwischen den von den Wirkschlaufen eingebundenen Filamenten zeigt.



Abb. 7.14: Fehlerbild von Gaps in einem unidirektionalen MAG

In dem Bereich des Gaps befindet sich keine Faser, sondern im späteren Verbund nur das Matrixsystem, was zu inhomogenen Laminateneigenschaften führt.

7.2.3.2. Wellen

Das flächige Aufwerfen und der implizierte Verlust des Werkzeugkontaktes eines Textils werden als Wellen bezeichnet. Besonders bei Verformungsprozessen mit lediglich einem Werkzeug bilden sich Wellen aus, da genügend Bewegungsfreiheit außerhalb der Textilebene zur Verfügung steht. Zweiteilige Drapierwerkzeuge verhindern eine Wellenformung außerhalb der Textilebene. Wellen im Bereich der Klemmung durch einen Niederhalter sind in Abbildung 7.15 abgebildet.



Abb. 7.15: Fehlerbild von Wellen in einem bidiagonalen MAG (+45 ° / -45 °)

7.2.3.3. Schlaufen

Das lokale Ausbeulen, beziehungsweise Ondulation von Fasern außerhalb der Textilebenen, das heißt out-of-plane, auch „Knittern aus der Ebene“ [90] genannt, wird als Schlaufenbildung bezeichnet. Druck- und Schubbeanspruchungen lösen das Fehlerbild von Schlaufen aus. Begrenzt werden die Schlaufen durch Nähte oder Stützfäden, die in einer anderen Richtung verlaufen als die schlaufenbildenden Fasern und unter Zugspannung stehen. In Abbildung 7.16 wird das Fehlerbild von Schlaufen skizziert und bildhaft dargestellt.



Abb. 7.16: Skizze (links) und Fehlerbild (rechts) von Schlaufen in einem unidirektionalen Gewebe

7.2.3.4. Mäander

Ondulationen innerhalb der Textilebene, das heißt in-plane, auch „Knittern in der Ebene“ [90] genannt, werden mit dem Fehlerbild der Mäander tituliert. Mäander werden ebenso wie Schlaufen durch Druck- und Schubkräfte ausgelöst. Allerdings wird das Beulen außerhalb der Ebene durch gewisse Randbedingungen verhindert, so dass die Fasern innerhalb der Ebene ondulieren. [78, 90] Das Fehlerbild von Mäandern und die daraus resultierenden Gaps werden in Abbildung 7.17 verdeutlicht. Gerade bei der Formung von Mäandern bilden sich auch immer kleinere Gaps aus.



Abb. 7.17: Fehlerbild von Mäandern in einem bidiagonalen MAG (+45 ° / -45 °)

Als zusätzlicher Fehler kann noch Winkeländerung genannt werden. Während des Drapierens verschieben sich die Fasern um eine Achse, so dass die Längsrichtung der Fasern im Laminat nicht der gewünschten Längsrichtung entspricht. Zusätzlich treten auch Faser- beziehungsweise Winkelverschiebungen auf.

7.2.4. Materialprüfungen

Für die vergleichenden Materialprüfungen werden folgende Halbzeuge gewählt.

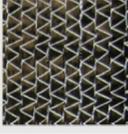
Textiltyp	Hersteller	Flächengewicht	Verstärkungsmaterial	Zusätzliches Material für Zusammenhalt	Bild
UD-Gewebe, Leinwand	Zulieferer: R&G	218 g/m ²	12 k	Schuss: E-Glas 110 tex	
UD-Gelege, Trikot-Vernähung	SAERTEX GmbH & Co. KG	154 g/m ²	12 k	Wirkfaden: PET 48dtex	
0 °/90 °-Gewebe, Leinwand	Zulieferer: R&G	400 g/m ²	12 k	---	
+45 °/-45 °-Gelege, Franse-Vernähung	SAERTEX GmbH & Co. KG	410 g/m ²	12 k	90 °: E-Glas 68 tex 0 °: E-Glas 34 tex	

Abb. 7.18: Verwendete Materialien für Material- und Drapierprüfung

Die unterschiedlichen zu testenden Textiltypen weisen annähernd gleiche Flächengewichte pro Einzellage auf, so dass allein die Aufmachung, das heißt die Art des Textils, den Unterschied ausmacht. Durch den Vergleich der unterschiedlichen Halbzeuge kann auf allgemeine Drapiermechanismen und –fehler von Standard-Textilien geschlossen werden.

Zur Darstellung der Drapierbarkeit eines Halbzeuges, des Drapierprozesses und der Bauteilkomplexität sind die oben genannten Drapiermechanismen, vor allem Biegung und Scherung, ausschlaggebend. Die Reibung zwischen Werkzeug / Textil, Klemmung / Textil und Faser / Faser führt zu den beschriebenen Mechanismen von Faserstreckung und Fasergleiten. Die Reibung zwischen Faser / Faser ist auf die Aufmachung des Textils zurückzuführen, während die Reibung zwischen Werkzeug / Textil und Klemmung / Textil mehr mit der Werkzeuggeometrie und –oberfläche und dem Prozess in Verbindung gebracht werden kann.

Mit dem Picture-Frame-Test wird das Scherverhalten der einzelnen Halbzeuge geprüft.

7.2.4.1. Scherprüfung – Picture-Frame-Test

Der Picture-Frame-Test besteht aus einem quadratischen Scherrahmen mit Drehgelenken, der mittels einer Zugprüfmaschine vertikal verzogen wird. Hierbei zeigen die Halbzeuge, die in den Rahmen eingespannt sind, eine Scherung, die mittels der Zugkraft F und dem Scherwinkel θ bemessen werden kann. Abbildung 7.19 zeigt den schematischen Aufbau des Scherrahmens und das Prinzip des Picture-Frame-Tests.

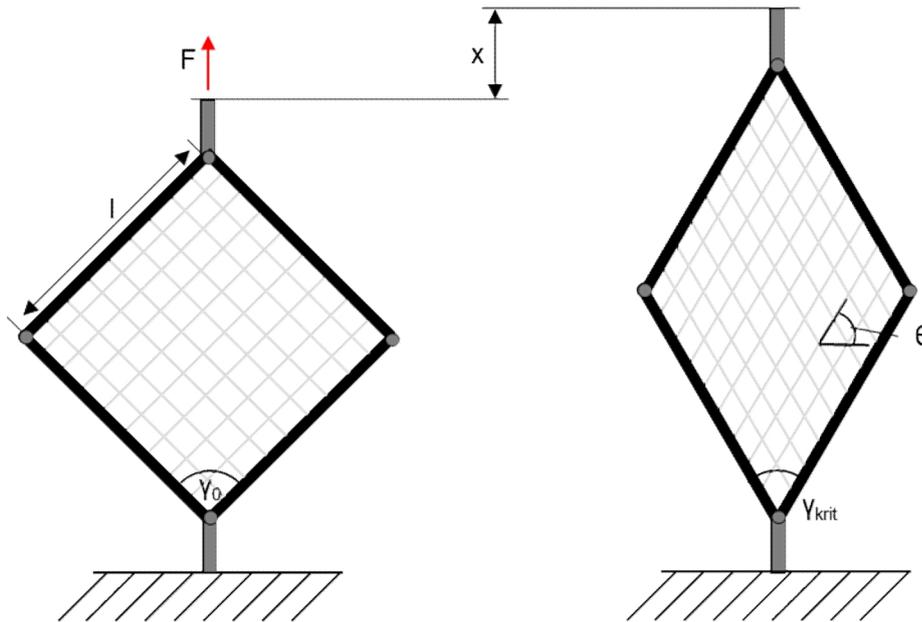


Abb. 7.19: Schematischer Aufbau des Picture-Frame-Tests

Der Scherwinkel θ wird aus dem Ausgangswinkel γ_0 und dem im Endzustand vorherrschenden Winkel γ_{krit} laut folgender Formel berechnet:

$$\theta = \gamma_0 - \gamma_{krit} = \frac{\pi}{2} - \gamma_{krit} \quad (11)$$

Mit der Kanteninnenlänge des Rahmens l und dem Verfahrensweg x lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Verfahrensweg und Scherwinkel mit folgender Formel herstellen:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2 \times \arccos\left(\frac{\sqrt{2}l + x}{2l}\right) \quad (12)$$

Innerhalb des Rahmens herrscht eine reine Scherspannung, wobei die Länge der Rovings gleich bleibt, sich allerdings die Fläche ändert d_A , die wie folgt berechnet wird:

$$d_A = \frac{1}{2}(\sqrt{2}l + x) \left(\sqrt{2l^2 - 2\sqrt{2}lx - x^2} \right) - l^2 \quad (13)$$

Bei den Versuchen wird ein Verfahrensweg von 90 mm eingestellt, woraus sich ein Scherwinkel von 47,5 ° und eine Flächenreduktion von 32,5 % ergeben.

Besonders interessant sind die aufgezeichnete Kraft während der Versuche und die ausgebildeten Fehlerbilder der unterschiedlichen zu prüfenden Textilien.

Abbildung 7.20 zeigt den durchschnittlichen Kraftverlauf der unterschiedlichen Materialien über den Verfahrensweg. Besonders auffällig ist der anfänglich geringe

Kraftanstieg, der in einen starken Anstieg übergeht, des biaxialen MAG mit der Wirkfadenausrichtung parallel zur Zugrichtung, in blau dargestellt. Bei geringem Verfahrweg lässt sich das Textil sehr einfach verscheren bis zu dem Punkt, bei dem die Wirkfäden gestreckt vorliegen, und zwar bei einem Verfahrweg von 19 mm. Ab diesem Zeitpunkt wirkt eine hohe Zugspannung auf die Wirkfäden, die einen extremen und linearen Kraftanstieg von 3,5 N/mm und Wellenbildung hervorruft, wie es in Abbildung 7.21 im rechten Bild zu sehen ist.

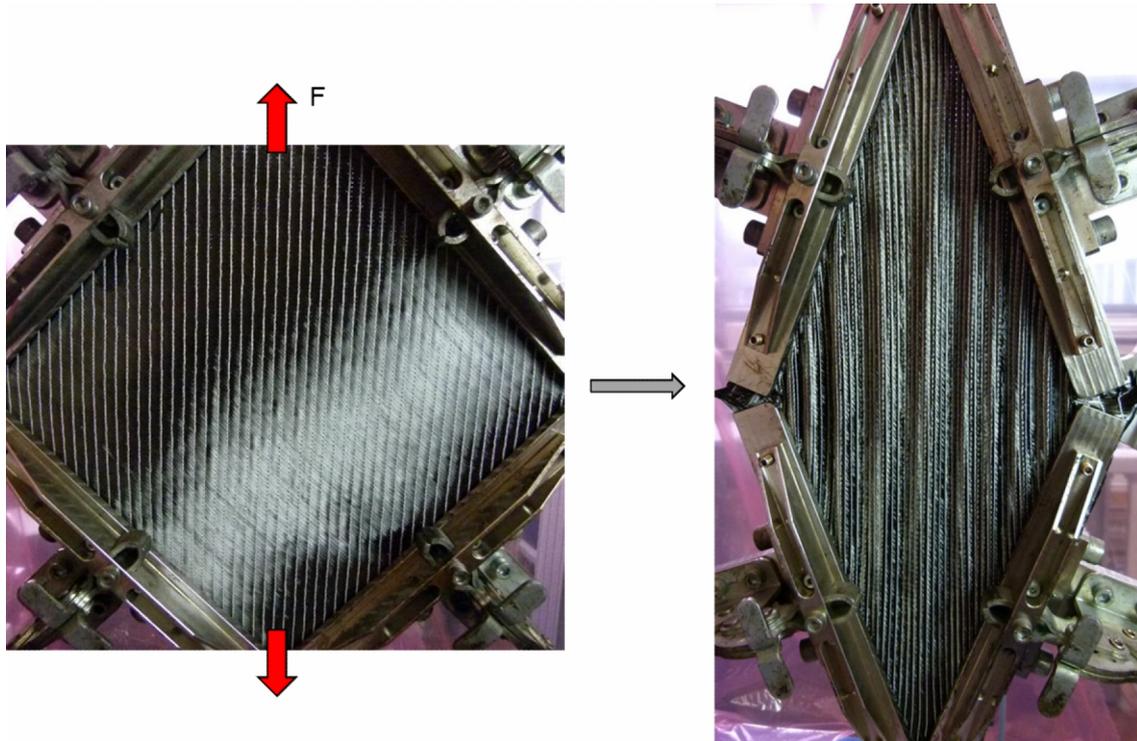


Abb. 7.20: Picutre Frame Test eines biaxialen MAG mit Wirkfäden in Zugrichtung

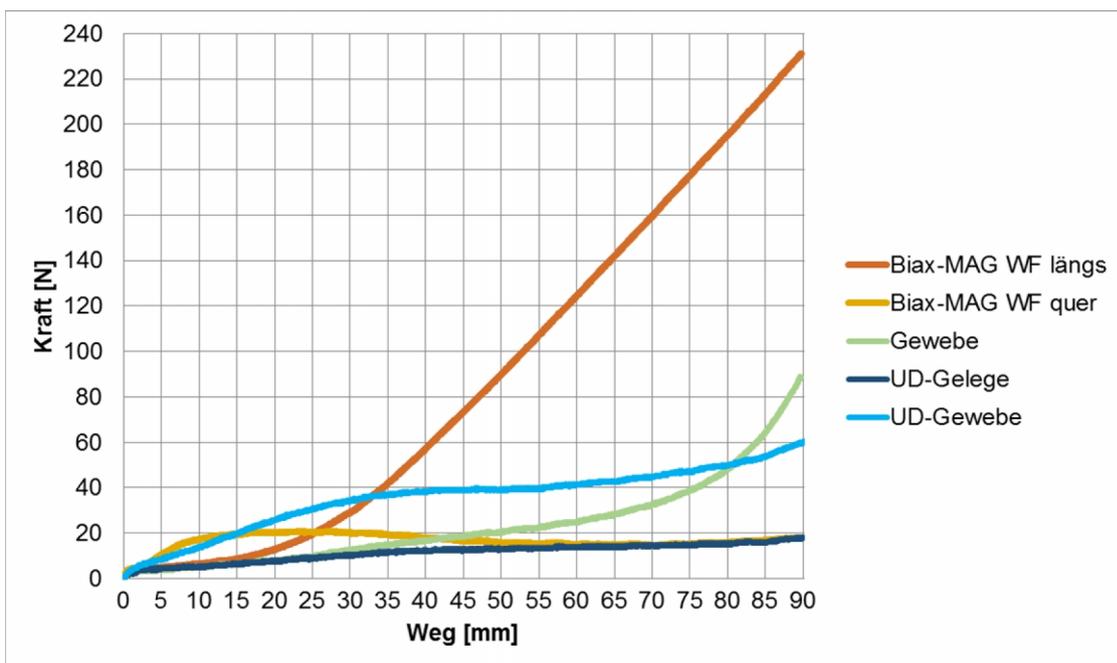


Abb. 7.21: Kraftverlauf bei Picture-Frame-Test, getestete Materialien im Vergleich

Das UD-Gewebe und das biaxiale MAG mit den Wirkfäden quer zur Zugrichtung zeigen zunächst einen starken Anstieg der Kraft, die benötigt wird, um die im Textil vorherrschende Reibung der Rovings zu überwinden. Bei einem Verfahrensweg von 21 mm beim UD-Gewebe und bei dem biaxialen MAG nach 9 mm nimmt die Steigung ab, beziehungsweise geht in einen sinkenden Verlauf über. Beide Materialien können eine hohe Packungsdichte erreichen. Allerdings führt die Scherung zwischen den Rovings des biaxialen MAG zu Schlaufenbildung, wie in Abbildung 7.22 im rechten Bild zu erkennen ist.

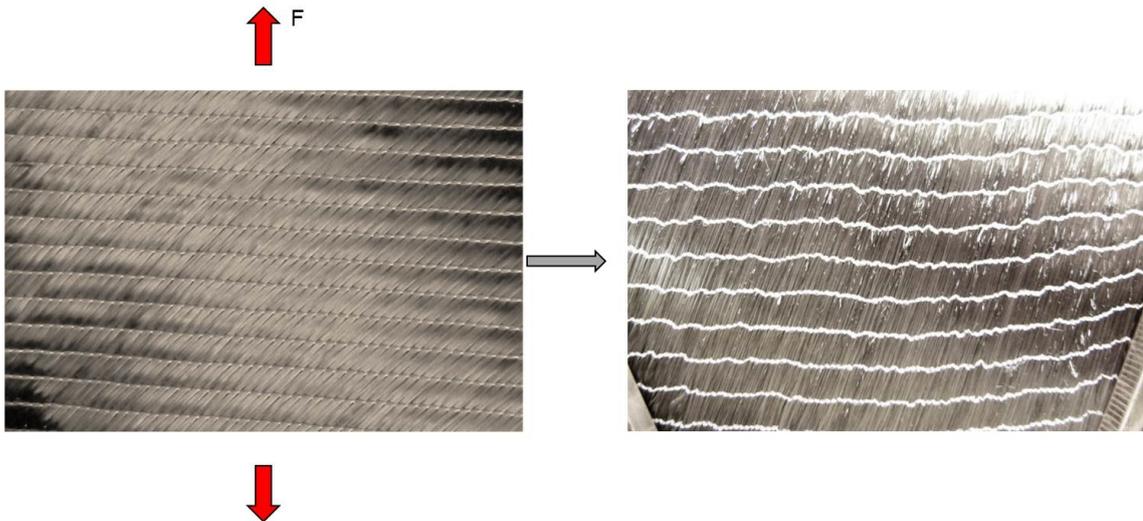


Abb. 7.22: Picture Frame Test eines biaxialen MAG mit Wirkfäden quer zur Zugrichtung

Bei dem UD-Gewebe treten bei zunehmender Scherung Schlaufen und Mäander auf. Diese Fehler werden vor allem durch die Verklebung der Rovings mit den thermoplastischen Schussfäden hervorgerufen. Wird die maximale Packungsdichte erreicht, kommt es erneut zu einem starken Kraftanstieg und Intensivierung der Fehlerbilder, wie es in Abbildung 7.23 abgebildet ist.

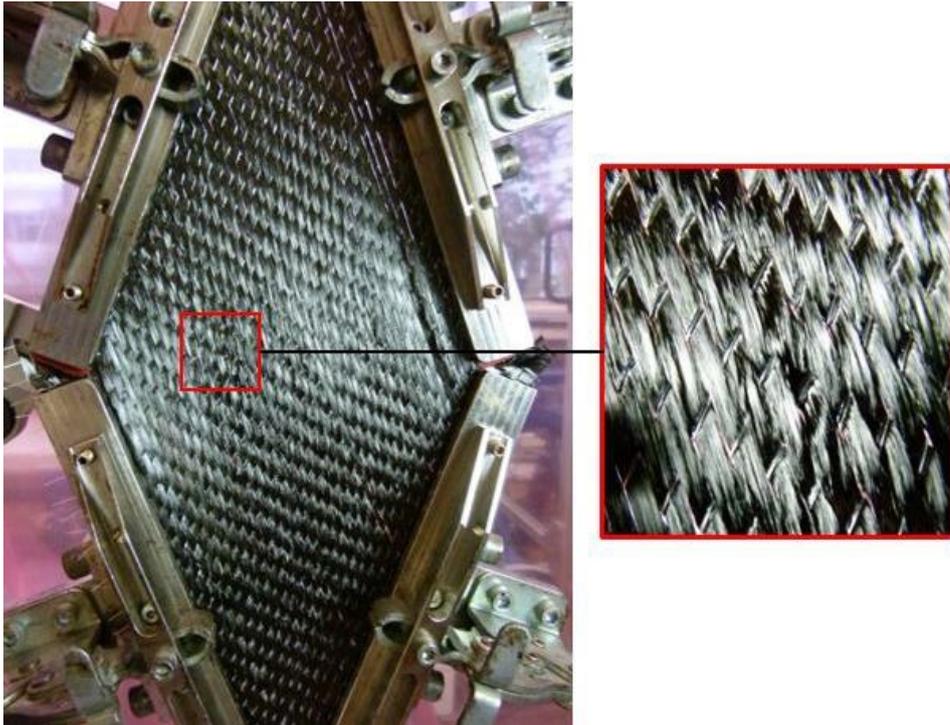


Abb. 7.23: Picture Frame Test eines UD-Gewebes

Das UD-Gelege und das Gewebe zeigen ein sehr hohes Verformungsvermögen hinsichtlich der Scherung. Ohne großen Kraftaufwand lassen sich beide Materialien leicht scheren.

Das UD-Gelege, das in einer flexiblen Trikotlegung verwirkt ist, wird lediglich gegenüber der Wirkfäden verschert. Erst bei langem Verfahrensweg richten diese Wirkfäden sich entlang der Zugrichtung aus, wie es in Abbildung 7.24 zu sehen ist, und führen daraufhin zu einem leichten Kraftanstieg und Schlaufenbildung.

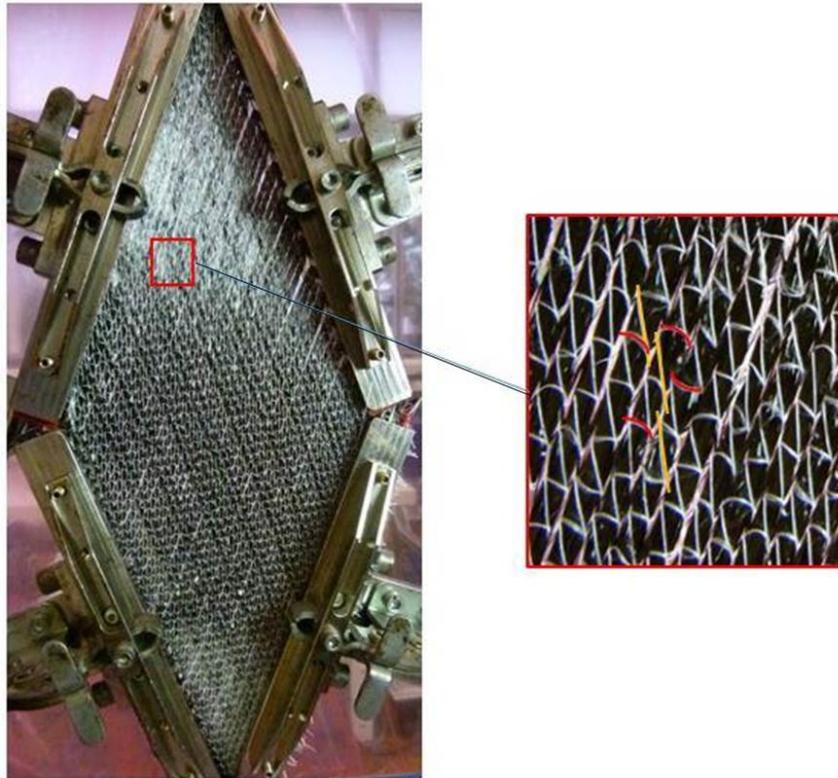


Abb. 7.24: Picture-Frame-Test eines UD-Geleges

Das Gewebe zeigt erst bei einem Verfahrensweg von 60 mm die Ausbildung von Schlaufen, die auf die extreme Packung der Rovings zurückzuführen ist, wie Abbildung 7.25 zeigt.

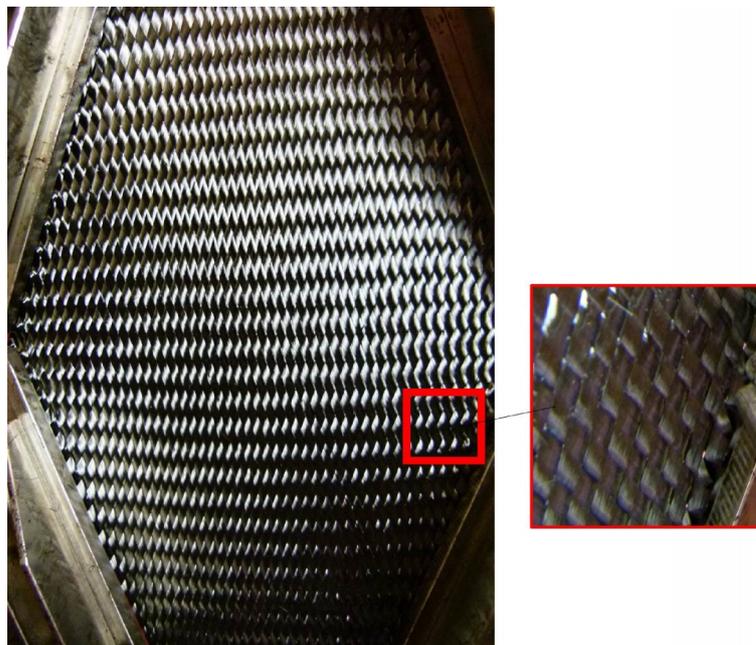


Abb. 7.25: Picture-Frame-Test eines Gewebes

Aus den Versuchen ist erkennbar, dass lediglich das Gewebe und das UD-Gelege mit einem flexiblen Maschensystem eine reine Scherung aufweisen. Bei den anderen Texti-

lien führen vor allem der Wirkfaden oder der verklebte thermoplastische Schussfaden zu weiteren im Textil vorherrschenden Beanspruchungen, die die beschriebenen Fehlerbilder hervorrufen. Abbildung 7.26 zeigt eine Übersicht über die maximalen Kräfte F_{\max} , den kritischen Scherwinkel θ_{sl} und die Fehlerbilder.

	UD-Gewebe	UD-Gelege	Gewebe	+/-45 ° MAG längs	+/-45 ° MAG quer
F_{\max}	60 N	20 N	90 N	230 N	20 N
θ_{sl}	34 °	41 °	28 °	8 °	38 °
Fehler	Schlaufen, Mäander	Schlaufen	Schlaufen	Wellen	Schlaufen

Abb. 7.26: Zusammenfassung der Ergebnisse der Picture-Frame-Tests

7.2.4.2. Drapierprüfungen am Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“

Der Materialeinzug, die Reibung, die Geometrie der Form, sowie die Aufmachung des Textils sind die Hauptfaktoren bei den vorherrschenden Spannungen und der Ausbildung der Drapierfehler.

Bei dem Umformverfahren nach dem Tiefziehprozess erfolgt die mittelbare Krafteinleitung durch die Peak Fläche oben und die Peak Spitze der Drapierform und wird über die seitlichen Flächen des Mittelstücks, sowie die Pyramiden- und Hemisphärenflächen auf die Flanschflächen unter dem Niederhalter übertragen. Die zur Umformung erforderlichen Kräfte lassen sich in drei Komponenten, und zwar die Form-, Werkstoff- und Reibungskomponente, aufteilen. [82, 91].

Wie bereits erwähnt, funktioniert der Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“ nach dem Tiefziehprinzip. Die Formkomponenten stellen die Drapieform „Pole Peak“, die Niederhaltergeometrie und der Zuschnitt des Textils dar. Das Prinzip der „geometrischen Dreiecke“, wie in Abbildung 7.2 gezeigt, lässt sich an der Drapieform „Pole Peak“ umgekehrt abbilden. Anstatt Rechtecke ins Bauteil zu drapieren und die „geometrischen Dreiecke“ als Überschuss auszubilden, werden bei der Pole Peak-Geometrie Dreiecke ins Bauteil drapiert und „geometrische Rechtecke“ bilden das überschüssige Material. Es kommt ebenfalls zu Zugspannungen in den Fasern. Die auftretenden Druckkräfte können jedoch von den Fasern nicht aufgenommen werden und somit wird das Material gestaucht, was zu unerwünschten Drapierfehlern führt. Abbildung 7.27 zeigt die Fläche des Zuschnittes, wobei die Fläche des „Materialbedarfs“ um einiges kleiner ist. Speziell der Umfang des zur Drapierung gebrauchten Materials, gekennzeichnet durch „Materialbedarf“, ist größer als der Umfang des drapierten Materials. Im Bereich des Mittelstücks ruft dies keine Verformungen hervor, allerdings im Bereich der Pyramide und der Hemisphäre. Überschüssiges Material, in Abbildung 7.27 rot schraffiert, muss verdrängt werden. Dort muss demnach das Material stark verformt werden, um sich der Geometrie anpassen zu können.

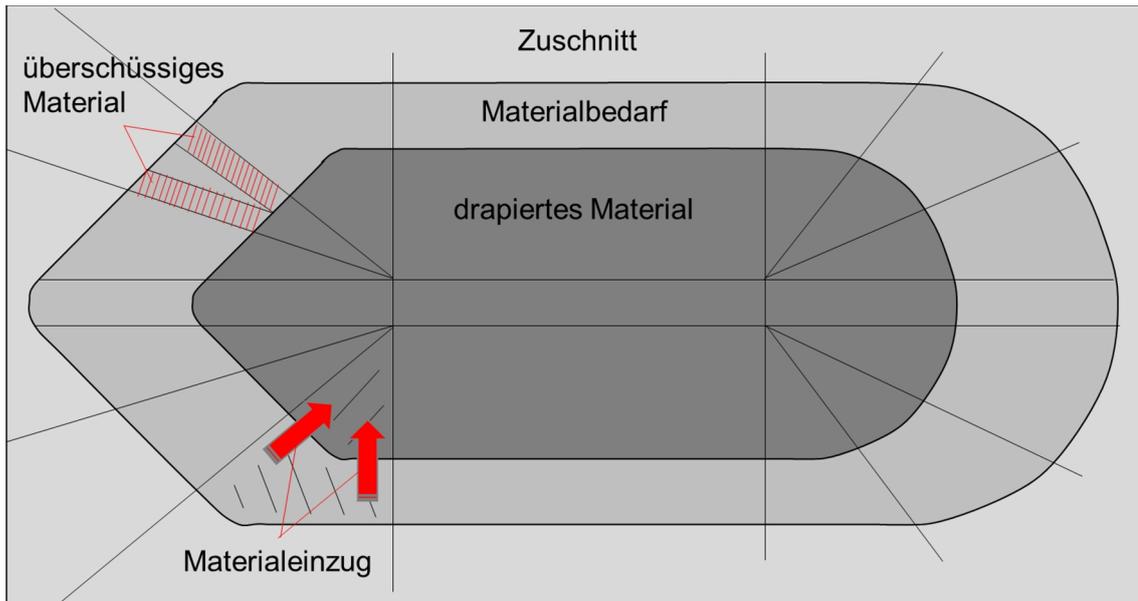


Abb. 7.27: Materialeinzug beim Drapieren über die Drapierform „Pole Peak“

Auf Grund der Formkomponente kommt es zu vor allem zu Druckspannungen im Pyramiden- und Hemisphärenbereich, die durch Scherung im Textil ausgeglichen wird. In Abbildung 7.28 ist ein $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe mit Leinwandbindung der Firma R&G mit einem Flächengewicht von 400 g/m^2 gezeigt, das sich gut verscheren lässt.

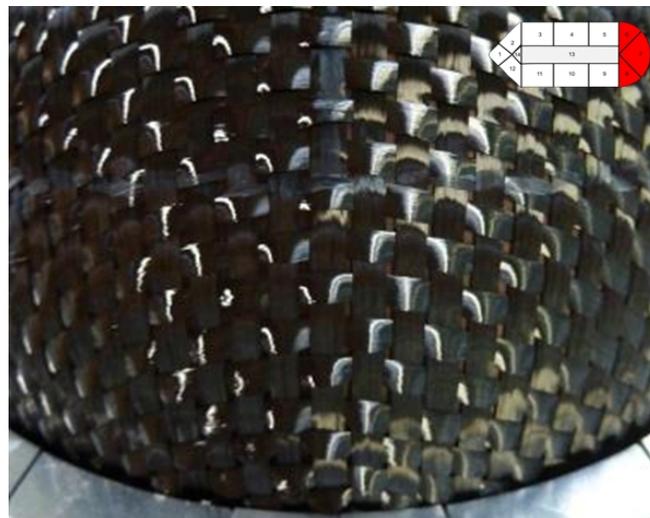


Abb. 7.28: Verschertes Gewebe, Hemisphärenbereich

Ebenso lässt sich das biaxiale MAG mit Wirkfaden quer zur Zugrichtung gut verscheren, wie es in Abbildung 7.29 zu erkennen ist.

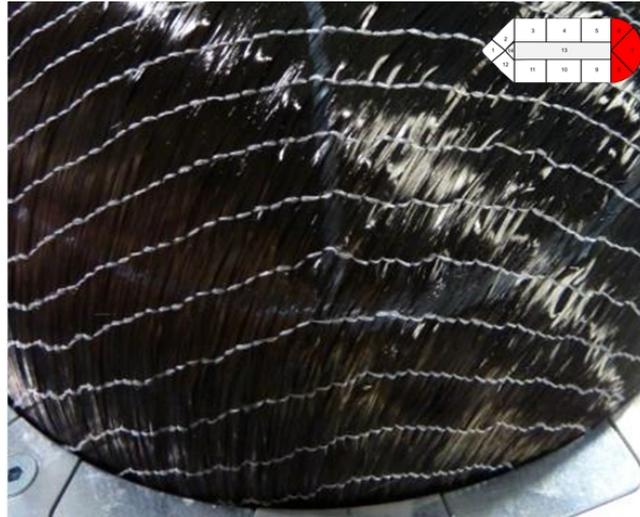


Abb. 7.29: Verschertes biaxiales MAG, Wirkfaden quer zur Zugrichtung, Hemisphärenbereich

Wird das UD-Gelege in den kritischen Bereichen, und zwar dem Hemisphären- und Pyramidenteil verschert, so wirken zunächst Zugkräfte auf die Wirkfäden, die in Trikotlegung verwirkt sind, die das Verscheren der Rovings verhindern und somit Schlaufen ausbilden, wie es in Abbildung 7.30 zu sehen ist.

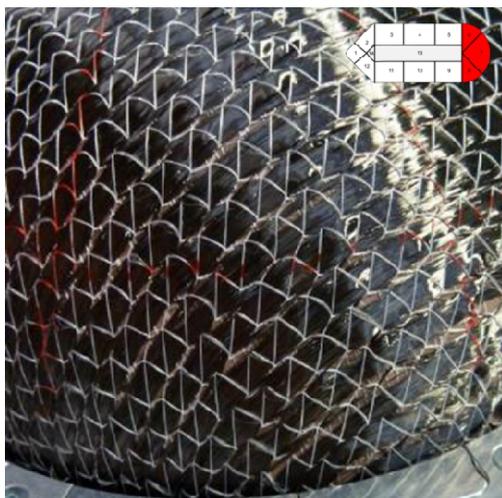


Abb. 7.30: Verschertes UD-Gelege, Hemisphärenteil (Links) und Pyramidenteil rechts (rechts)

Lässt sich ein Textil nicht gut verscheren, wie es zum Beispiel bei dem biaxialen MAG mit Wirkfaden längs zur Zugrichtung der Fall ist, kommt es ab einem bestimmten Punkt zu Wellenwurf, wie es in Abbildung 7.31 zu sehen ist.

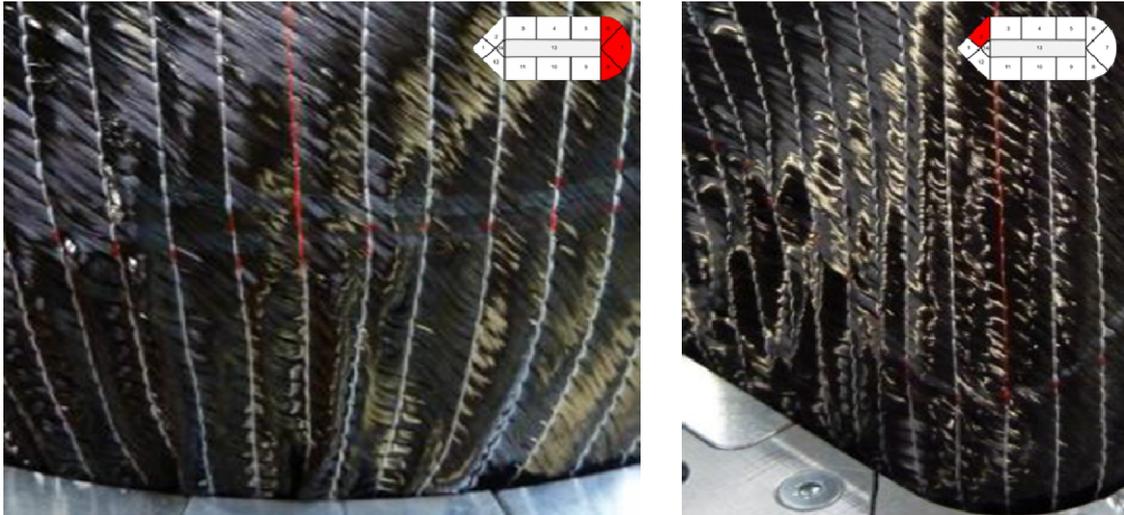


Abb. 7.31: Verschertes biaxiales MAG, Wirkfaden in Zugrichtung, Fehlerbild „Wellen“, Hemisphärenbereich (links) und Pyramidenteil links (rechts)

Beim Verfahren der Drapierform innerhalb der kreisförmig angeordneten Niederhaltersegmente wird eine Kraft auf das Textil aufgebaut, die sogenannte Durchdrückkraft auf das Textil. Auf Grund der Klemmung des Textils zwischen den Niederhaltern und dem Drapiertisch entstehen Zugkräfte, die auf das Textil wirken. Diese Kräfte konzentrieren sich in Form von Flächenlasten vor allem in den Kantenbereichen des Pyramidenteils aus. Im Hemisphärenbereich werden die Lasten homogen verteilt. Die Ausprägung der Flächenlasten ist in Abbildung 7.32 dargestellt.

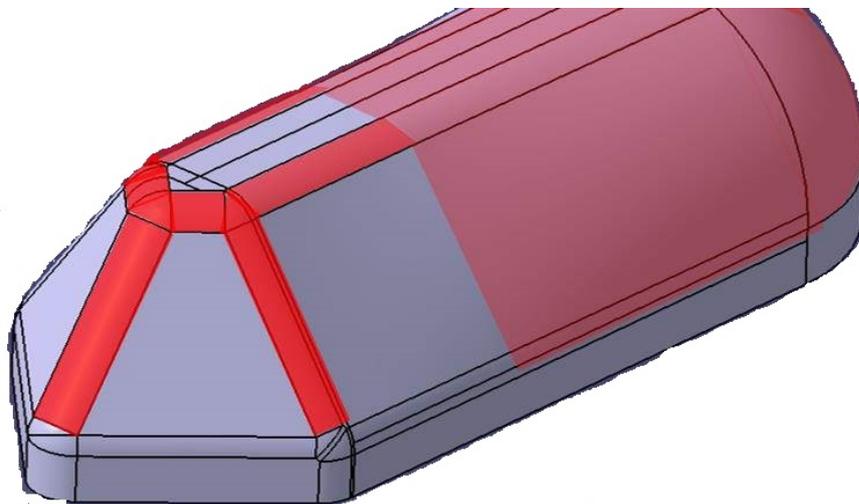


Abb. 7.32: Verteilung der Flächenlast auf der Drapierform „Pole Peak“

Auf Grund des Zusammenspiels der Drapierform und der Niederhaltersegmente lassen sich diverse Spannungszustände im Textil identifizieren. Abbildung 7.33 skizziert die unterschiedlichen Spannungen an den Flächen der Drapierform. Dabei treten Zugspannungen σ_z , Druckspannungen σ_d und Schubspannungen τ auf.

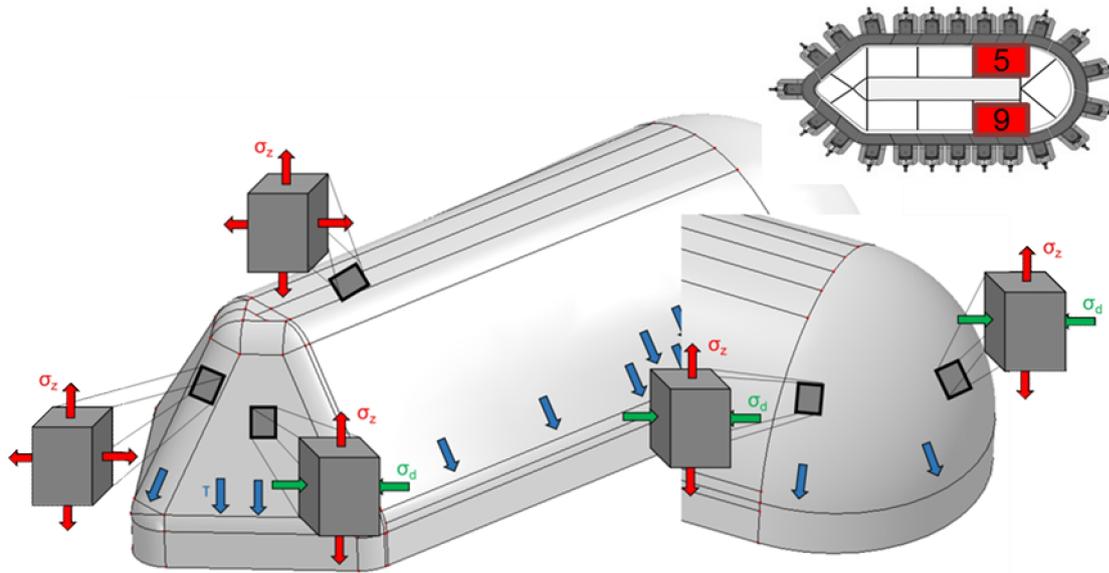


Abb. 7.33: Spannungszustände im Textil im drapierten Zustand

Hohe Schubspannungen im Mittelstück rechts und links hinten (Nummer 5 und 9) führen zu Verschiebungen im Textil. Daraus entstehen Gaps und Winkeländerung der UD-Rovings, wie es zum Beispiel bei dem UD-Gewebe in Abbildung 7.34 zu sehen ist.

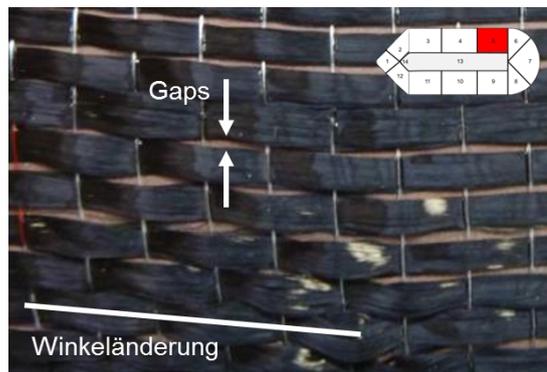


Abb. 7.34: Gaps und Winkeländerung eines UD-Gewebes

Dasselbe ist auch bei dem UD-Gelege zu beobachten, wo sich auf Grund von Schubspannung Gaps und Winkeländerungen ausbilden, wie es in Abbildung 7.35 gezeigt wird.

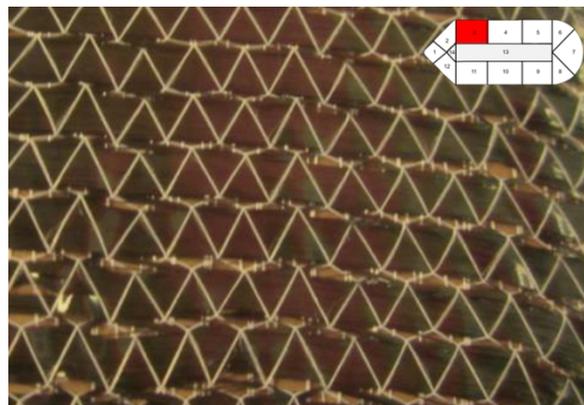


Abb. 7.35: Gaps und Winkeländerung eines UD-Geleges

Auf Grund von Zug-Zug-Spannungen, wie sie zum Beispiel im Bereich 1, 13 und 14 der Drapierform auftreten, werden die Rovings in 0 °- und 90 °-Richtung auseinander gezogen und gespannt. In diesem Bereich können leichte Gaps auftreten, wie es bei dem Gewebe in Abbildung 7.36 zu sehen ist.

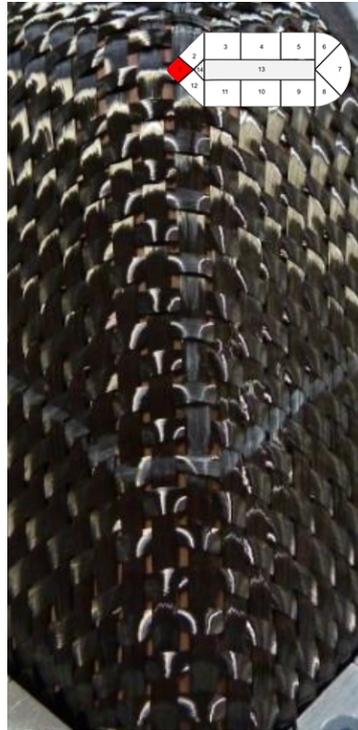


Abb. 7.36: Gaps beim Gewebe auf Grund von Zug-Spannungen

Auf Grund der Überlappung von Zug- und Druck-Spannungen kommt es besonders begünstigt durch die Druckspannungen zu Schlaufenbildung. Die Zugspannungen in der perpendicularen Richtung verstärken zudem den Effekt der Schlaufenbildung, wie es in Abbildung 7.37 zu sehen ist. Das linke Bild ist eine mit dem Sensor der Firma PRO-FACTOR erstellte Aufnahme in Azimut-Ansicht. In dieser Ansicht werden beide Hauptfaserrichtungen abhängig von ihrer Orientierung in x-, y- und z-Richtung farblich dargestellt.

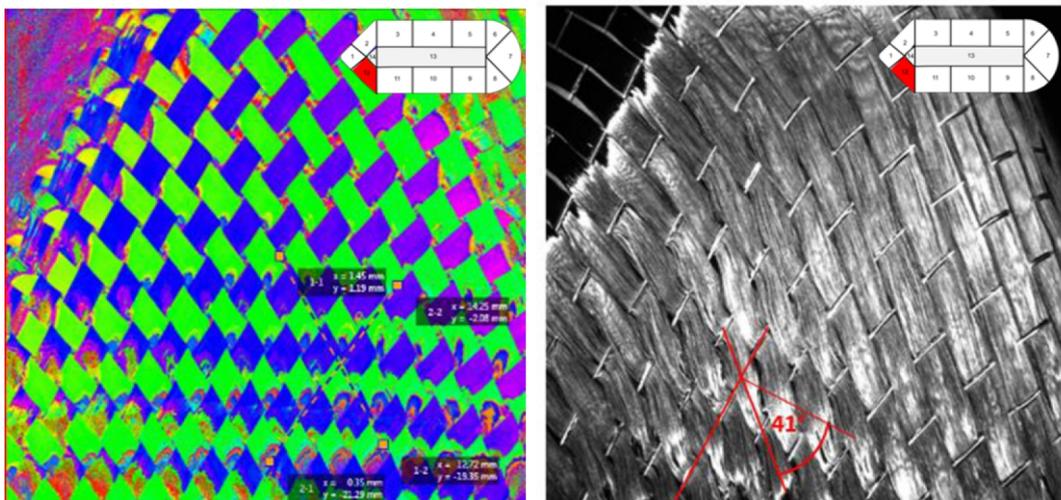


Abb. 7.37: Gewebe und UD-Gewebe beansprucht auf Zug und Druck, leichte Schlaufenbildung

Bei den Drapierversuchen am „LCC Pole Peak“ lässt sich der Einfluss der Reibungskomponenten in Form der Reibungskräfte an Hand der Durchdrückkraft gut darstellen. Abbildung 7.38 zeigt die Durchdrückkraft bei zwei verschiedenen Oberflächen des Auflagetisches und der Niederhalter. In Versuchsreihe 1 bestehen die Oberflächen aus einer Teflonfolie, die sich an den Kanten auf Grund der Reibung während der Versuche ablöst und somit die Klebeschicht zum Vorschein kommt. In Versuchsreihe 2 werden die Stahloberfläche des Auflagetisches und die Aluminiumoberfläche der Niederhaltersegmente verwendet. An Hand des Kraftverlaufs ist zu erkennen, dass bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 1 mm/s die Folie sich nach 50 mm abzulösen beginnt und es zu erhöhter Reibung und somit zu einer Steigerung der Durchdrückkraft kommt.

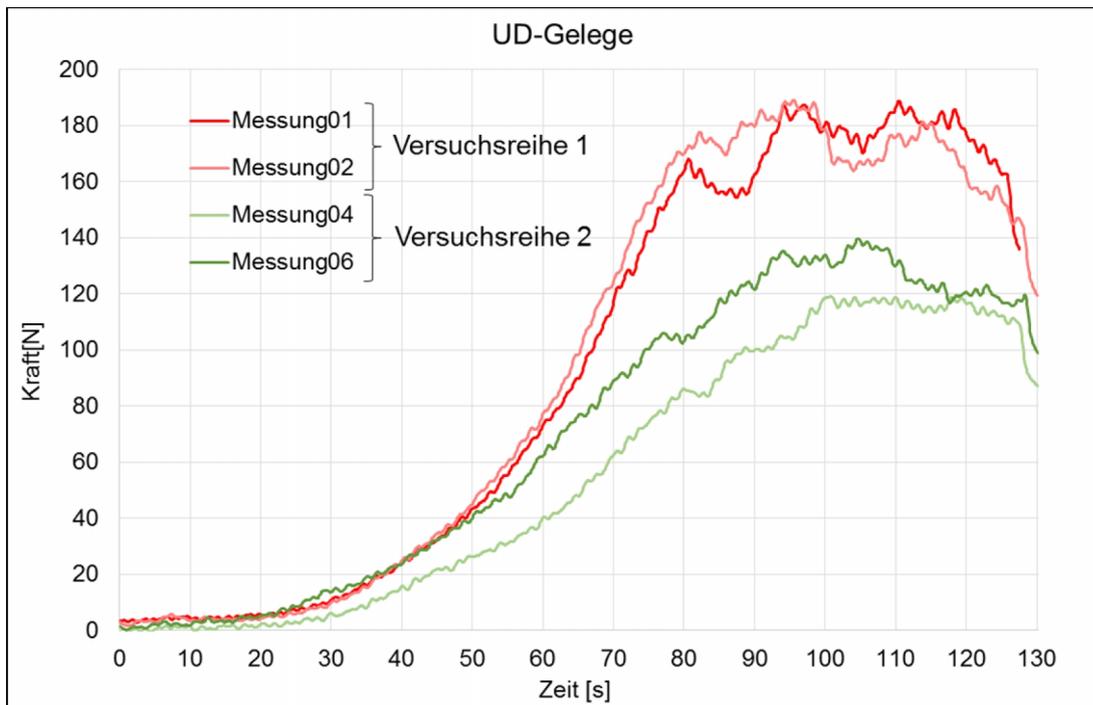


Abb. 7.38: Unterschiedliche Durchdrückkräfte bei verschiedenen Reibwerten

7.2.5. Fazit der Drapieranalyse von Standard-Textilien

Aus den bekannten Drapiermechanismen und Drapierfehlern bei Standard-Textilien und den durchgeführten Material- und Drapierversuchen lässt sich auf die Ursache und die Wirkung der Drapiermechanismen schließen. Abbildung 7.39 gibt eine Übersicht über die einzelnen Ursachen und Wirkungen der verschiedenen Drapiermechanismen.

Drapiermechanismus	Verursachende Kraft	Auslöser	Grenzen	Fehler
Textilscherung	Scherkraft	Textilaufmachung	Kritischer Scherwinkel	Wellen Schlaufen Gaps Mäander
Faserstreckung	Zugkraft	Textilaufmachung	Textilaufmachung	Wellen Schlaufen
Biegung	Druckkraft	Bauteilgeometrie	Mechanische Fasereigenschaft	Schlaufen Mäander Gaps Wellen
Fasergleiten	Zugkraft Scherkraft Druckkraft	Bauteilgeometrie Textilaufmachung Reibung	Textilaufmachung	Gaps Schlaufen Mäander

Abb. 7.39: Ursache und Wirkung der verschiedenen Drapiermechanismen

7.3. Drapierverhalten und Deformationsmechanismen des Halbzeuges „CoCo“

Auf das Drapierverhalten des neu entwickelten, mit Dehungsreserven versehenen Materials haben folgende Parameter Einfluss:

- Bauteilgeometrie und –komplexität
- Material der Drapierform
- Niederhalterkraft / Reibung
- Fixierung der Fadenreserven
- Aufmachung und Material des Trägers
- Temperatur
- Aufheizzeit
- Verformungsgeschwindigkeit

In den folgenden Abschnitten werden die Drapierversuche des neuentwickelten Materials „CoCo“ dargestellt. Die Verstärkungsrovings werden manuell abgelegt, da mit der momentanen Steuerung die für die Drapierform benötigten Fadenreserven mit zu kleinen Radien abgelegt werden müssen, die die aktuelle Steuerung nicht abbilden kann.

7.3.1. Versuchsdurchführung

Die Verstärkungsrovings in Form von Carbonrovings HTS45 12k werden mit der in Kapitel 4 berechneten Rovinglänge auf unterschiedlichen Trägermaterialien vollständig entlang der Länge fixiert und unter Einwirkung von Temperatur über die Drapierform „Pole Peak“ geformt. Die Drapierform besteht aus Stahl. Die Niederhalterkraft beträgt $0,7 \text{ N/mm}^2$, die eine Klemmung ohne Nachfließen sicherstellt. Daher entsteht auch keine Reibung zwischen Niederhalter, Textil und Drapiertisch. Die Infrarot-Strahler werden auf 45 % ihrer Leistung eingestellt. Das Material wird für 15 Sekunden vorgeheizt

und wird dann durch die Drapierform abgeformt, die mit 1 mm pro Sekunde senkrecht nach oben verfährt.

Die Carbonrovings werden zwischen der thermoplastischen Folie von LANXESS und der thermoplastischen Folie von EMS Chemie fixiert, um eine ausreichende Stabilität des Verbunds sicherzustellen. Auf Grund von schwierigem Handling lassen sich die Carbonfasern nicht sehr regelmäßig aufbringen, wie es in Abbildung 7.40 zu sehen ist.



Abb. 7.40: Carbonrovings zwischen TP Folien von EMS und LANXESS mit Fadenreserven

Bei den Drapierversuchen schmelzen die Folien zunächst regelmäßig auf. Auf Grund der guten Wärmeleitfähigkeit der Carbonrovings schmelzen im Bereich der Carbonfasern die thermoplastischen Folien stärker auf und reißen entlang der Faser, parallel zu den Niederhaltern im Mittelstück. Dies führt zu einem Abrutschen der Rovings entlang der schrägen Ebene des Mittelstücks, wie es in Abbildung 7.41 im mittleren Bild zu sehen ist. Im Pyramidenteil stellen sich die Carbonrovings in z-Richtung auf bevor sie sich auf der Oberfläche der Form ausrichten.

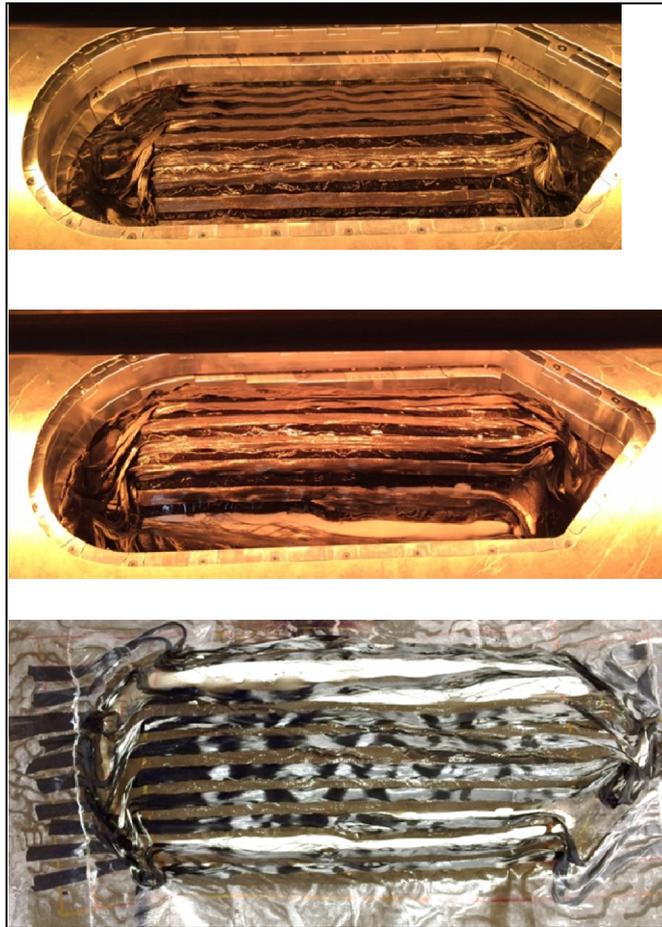


Abb. 7.41: Drapierung unter Temperatur von Carbonrovings zwischen TP Folien

Zudem werden Carbonrovings zwischen einem Glasfaser-Gewirk von TEC-KNIT und der thermoplastischen Folie von EMS Chemie fixiert. Die Rovings werden wiederum mit Fadenreserven in x-/y-Richtung eingebracht, wie es in Abbildung 7.42 zu sehen ist.

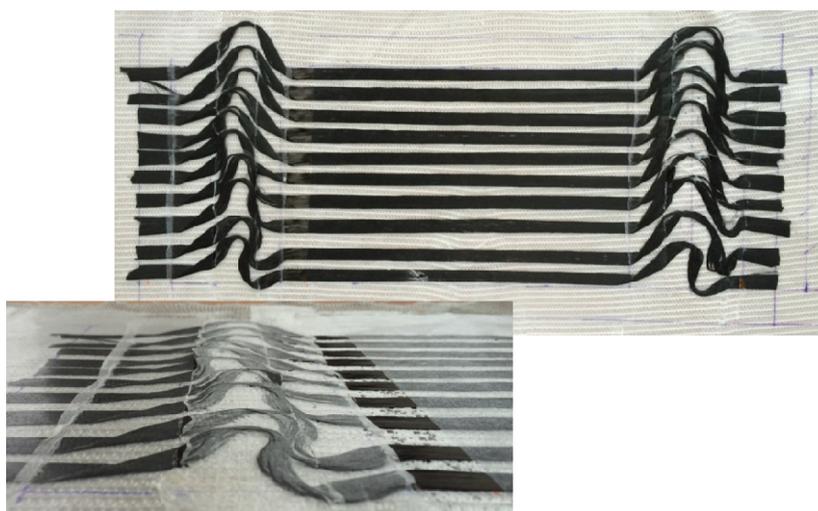


Abb. 7.42: Carbonrovings fixiert zwischen Glasfaser-Gewirk und TP-Folie von EMS Chemie

Beim Verfahren der Drapierform senkrecht nach oben, kann ebenfalls ein Abheben der Carbonfasern am Pyramidenteil beobachtet werden. Das Gewirk dehnt sich regelmäßig

aus, während die thermoplastische Folie die Fasern auf dem Gewirk fixiert. Die Fadenreserven strecken und richten sich entsprechend der gewünschten Orientierung aus, wie es in Abbildung 7.43 zu sehen ist.

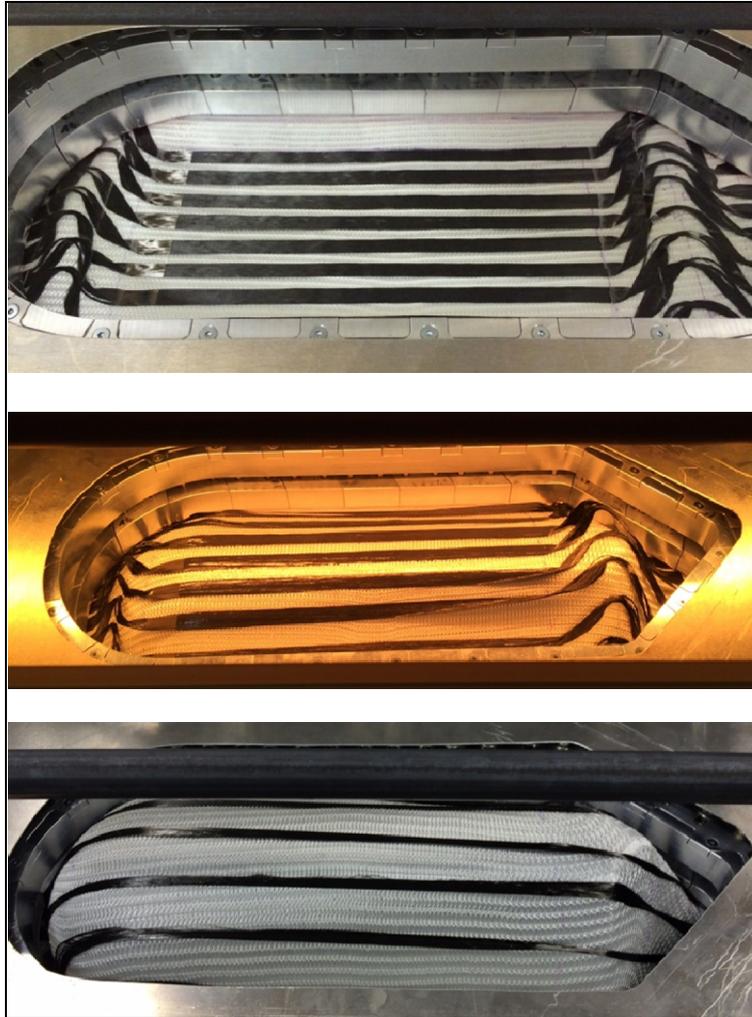


Abb. 7.43: Drapierung unter Temperatur von Carbonrovings zwischen Gewirk und TP Folie

7.3.2. Versuchsauswertung

Die Versuche haben gezeigt, dass gute Drapierergebnisse mit dem Glasfaser-Gewirk als Träger und mit der thermoplastischen Folie als Matrix erzielt werden. Das Glasfaser-Gewirk verhindert das Reißen der thermoplastischen Folie und weist genügend hohe Drapierbarkeit auf. Die Folie verhindert ein Abrutschen der Fasern. Die Rovings, die zuvor in Schlaufen auf dem Glasfaser-Gewirk fixiert waren, lösen sich auf Grund der Durchdrückkraft der Drapierform und richten sich entlang der Oberfläche der Drapierform aus.

7.3.3. Drapiermechanismen bei dem Halbzeug „CoCo“

Die Drapiermechanismen lassen sich bei dem Halbzeug „CoCo“ auf verschiedenen Ebenen betrachtet, da drei unterschiedliche Materialien kombiniert werden: das Trägermaterial, ein thermoplastisches Material in Kombination mit einem Verstärkungsträger, und die Verstärkungsfasern.

Das thermoplastische Material wird während der Drapierung durch die Wärmeeinwirkung des IR-Strahlers aufgeschmolzen und auf Grund von Zug- und Schubspannungen verstreckt, was zu einer Materialdehnung und Verjüngung in der Dicke führt. Der Verstärkungsträger weist eine hohe Drapierbarkeit auf Grund ihrer Verschlaufung auf. Die Schlaufen enthalten demnach auch eine Art Fadenreserven, die eine Faserstreckung auf Grund von Zugspannungen aufweisen können, wie es an einem Beispiel-Gewirk in Abbildung 7.44 gezeigt wird.

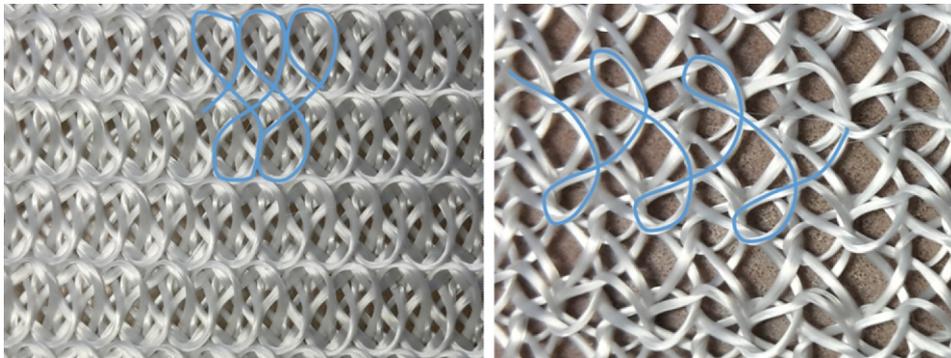


Abb. 7.44: Drapierung des Trägermaterials

Die Verstärkungsfasern werden ebenfalls in eine Art Schlaufen gelegt, sind aber nicht miteinander verschlauft. Hier kommt es ebenfalls auf Grund von Zugkräften zu einer erheblichen Faserstreckung, wobei sich die Faserbiegung auflöst. Dies ist besonders eine Eigenschaft der hoch steifen Carbonfaser, die unter Auflösung der Verbindung zu dem Trägermaterial in eine Faserstreckung übergeht. Ausgelöst durch lokale die Aufhebung der Verbindung kann die Carbonfaser ebenfalls ein Fasergleiten aufweisen.

7.3.4. Drapierfehler bei dem Halbzeug „CoCo“

Bei den Drapierfehlern muss wiederum zwischen den verschiedenen Materialien unterschieden werden. Durch das Dehnen des thermoplastischen Materials können Gaps, beziehungsweise Risse auftreten, die zu lokal unterschiedlichen Faservolumengehalten führen. Dies muss durch ein lokales Zufügen der thermoplastischen Matrix, zum Beispiel in Form eines Pulvers, ausgeglichen werden. Die Faserstreckung des gewirkten Verstärkungsträgers führt zu unregelmäßigen Dicken und Faservolumengehalten. Daher muss hierbei ein Träger mit sehr geringem Flächengewicht gewählt werden.

Größere Auswirkungen hat das Drapierverhalten der Carbonfasern. Hierbei kann es auf Grund von ungenügender Faserstreckung zu Mäandern kommen, die die mechanischen

Eigenschaften stark verringern. Das Fasergleiten kann zu Gaps und Faserverschiebungen führen.

7.4. Fazit der Deformationsmechanismen bei Textilien

Im Vergleich zu den Standard-Textilien weist das Halbzeug „CoCo“ eine geringere Anzahl an Drapierfehlern auf. Zu diesen zählen Mäander, Gaps und Faserverschiebungen, wie in der Übersicht in Abbildung 7.45 zu sehen ist.

Standard-Textil	Halbzeug „CoCo“
Gaps	Gaps
Wellen	---
Schlaufen	---
Mäander	Mäander
Faser- und Winkelverschiebung	Faser- und Winkelverschiebung

Abb. 7.45: Vergleich der Drapierfehler

Noch genauer zu untersuchen ist die Häufigkeit, die Größe und die Auswirkung, das heißt „the effect of defect“, der auftretenden Fehler im späteren Bauteil.

8. Drapierprozessroute – Konzept zur Umsetzung für Großserien

Um den Drapierprozess ökonomisch und technologisch optimiert zu gestalten, muss ein ausgereiftes Konzept entworfen werden.

Ausschlaggebend für den Drapierprozess sind das Halbzeug selbst, der Aufbau des Stacks, das Klemmsystem, die richtungsbezogenen Führung des Halbzeuges, das Werkzeug und die Temperaturführung.

Speziell das Umformen von thermoplastischen Halbzeugen bietet großes Potential für kurze Zykluszeiten. Daher wird für das Konzept zur Umsetzung des Drapierprozesses das Thermoformen gewählt.

8.1. Prozesskette „Von der Faser zum Bauteil“

Voraussetzung für kurze Zykluszeiten ist die Vermeidung eines variothermen Prozesses. Vorteilhaft, vor allem aus ökonomischer Sicht, ist ein Prozess, der bei gleichbleibender Temperatur durchgeführt wird. Beim Thermoformen wird daher das Halbzeug zunächst zu einem sogenannten „tailored Organosheet“ verpresst, um unter hohem Druck die thermoplastische Matrix in die Fasern zu pressen. In einer Aufheizstation wird das „tailored Organosheet“, das in Bezug auf die Außenkontur und den Faserverlauf maßgeschneidert ist, aufgeheizt. In der Schneideinheit direkt vor dem Werkzeug wird das Organosheet entsprechend der Bauteillänge abgeschnitten und in einem kalten Werkzeug umgeformt und konsolidiert, siehe Abbildung 8.1.

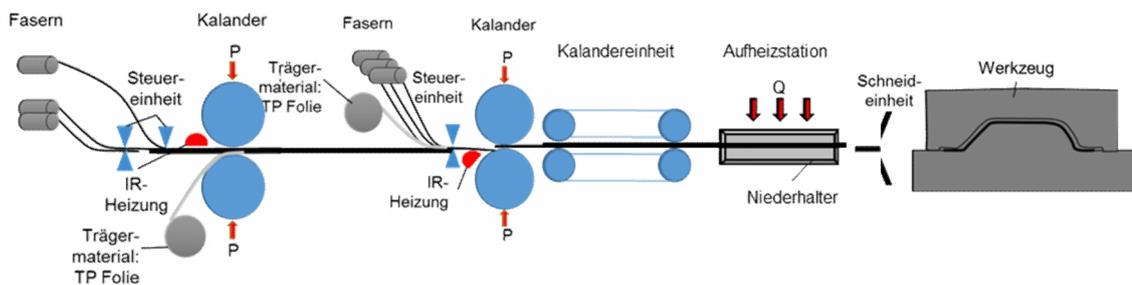


Abb. 8.1: Prozesskette „Von der Faser bis zum Bauteil“

Durch die Verwendung eines isothermen Prozesses, das heißt, dass die Werkzeugtemperatur stets auf Umformtemperatur bleibt, kann die Zykluszeit des Thermoformprozesses stark verkürzt werden. [73]

8.2. Detaillierung der Prozesskette

Ausgegangen wird bei der Entwicklung der Drapierprozesskette von dem fertigen multi-variablen Halbzeug, bestehend aus einem Trägermaterial, einer thermoplastischen Folie optional mit einer Glasfaserverstärkung, und den Verstärkungsfasern multi-

variabel, konturgetreu und Faserreserven vorhaltend (I). Dieses Halbzeug wird letztendlich zu einem Bauteil umgeformt und konsolidiert werden.

Wie in der Abbildung 8.2 beschrieben, werden zunächst die einzelnen Halbzeuglagen aufeinander gelegt (II). Der Stack wird in einer Doppelbandpresse zu einem tailored Organosheet verpresst, wobei die einzelnen Lagen noch die Fadenreserven in x/y-Richtung beinhalten (III). Unter hohem Druck und hoher Temperatur kann die thermoplastische Matrix innerhalb kürzester Zeit in die Fasern und das Trägermaterial gepresst werden. Dadurch kann beim Umformen und Konsolidieren auf den variothermen Prozess verzichtet und somit die Prozesszeit stark verkürzt werden. Das tailored Organosheet (IV) wird in eine Spannvorrichtung eingehängt, von unten und oben mit Membranen fixiert und unter Temperatur aufgeheizt und vorverstreckt (V). Das Vorverstrecken geschieht durch das Drapieren. Hierzu kann von unten Luftdruck aufgebracht oder ein dünnwandiges, beheiztes Drapierwerkzeug verwendet werden. Die Rovings, abgelegt mit Fadenreserven, beginnen sich in die endgültige Position auszurichten. Das aufgeheizte tailored Organosheet wird in einem warmen Werkzeug umgeformt und konsolidiert (VI). Beim Umformen werden die Verstärkungsfasern Position gedrückt. Zuletzt entsteht ein komplexes, endkonturgetreues, lastpfadgerechtes, thermoplastisches Bauteil. Abbildung 8.2 zeigt die Drapierprozesskette im Detail.

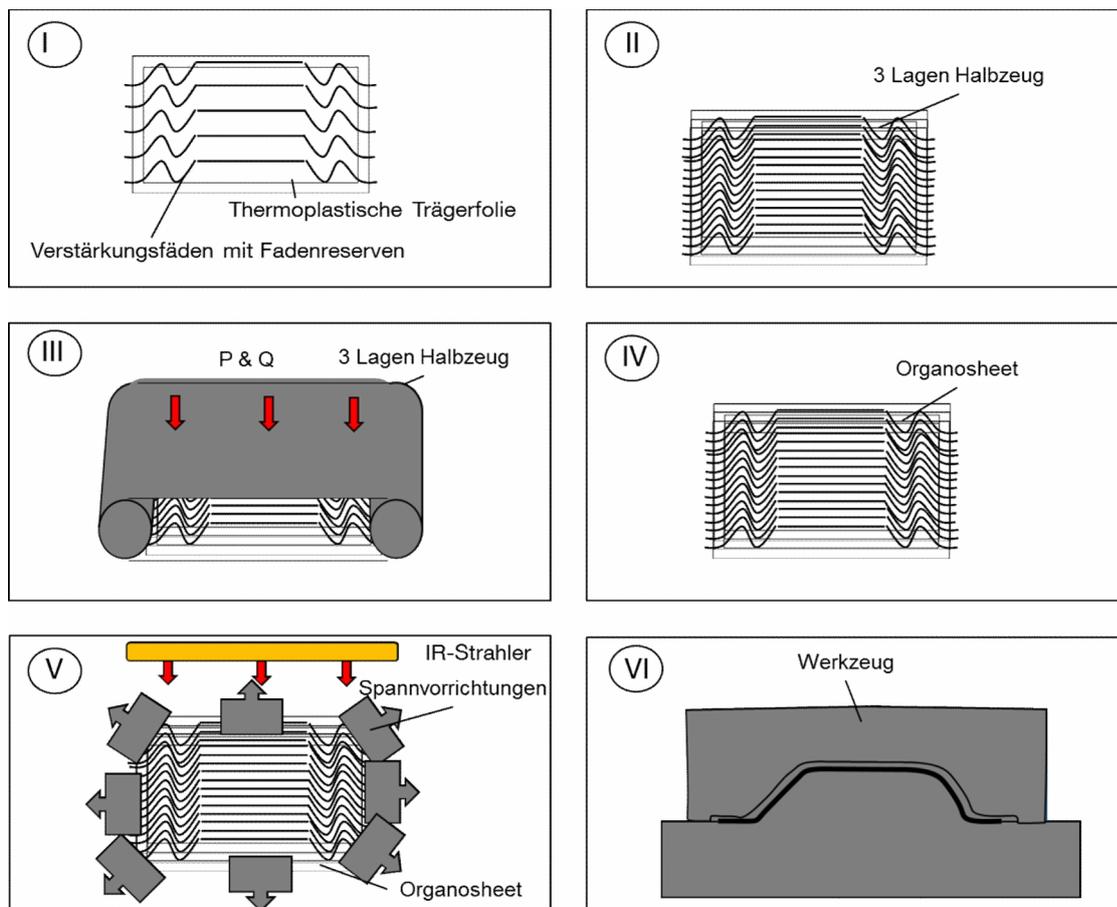


Abb. 8.2: Drapierprozesskette

Bei dem Niederhalter muss eine hohe Druckkraft und hohe Reibung verwendet werden, um eine hohe Klemmkraft zu erzielen. Dadurch werden die Fasern nicht aus dem Niederhalter herausgezogen während sich der Rest der Fasern im Bauteil ausrichten.

Im Werkzeug wird das überschüssige Material im Randbereich, das heißt das Material unterhalb der Niederhalter, mittels eines Stanzmessers abgeschnitten. Dieser Verschnitt ist der einzige, der innerhalb der gesamten Prozesskette anfällt und nicht wiederverwendet werden kann. Abhängig von dem Verhältnis zwischen Bauteilgröße und Umfang besteht das Potential bis zu maximal 10 % bei kleinen Bauteilen, und unter 5 % bei großflächigen Bauteilen zu erreichen.

9. Mechanische Eigenschaften

9.1. Open Hole Tension – Versuche, allgemein

Die lastpfadgerechte Ablage von Faserverstärkungen in Verbundbauteilen ist vor allem im Hinblick auf die Steifigkeit und Festigkeit zu untersuchen. Allgemeingültige Versuchsaufbauten und -durchführungen sind Proben mit einem zentral gebohrten Loch oder mit punktuell belasteten Löchern an beiden Enden der Probe. Bei isotropen Laminaten mit einem zentralen Loch verlaufen die Kurvenscharen der Hauptspannungen und der Hauptlastpfade in Zug um das Loch herum, wie dies in Abbildung 9.1 zu sehen ist.

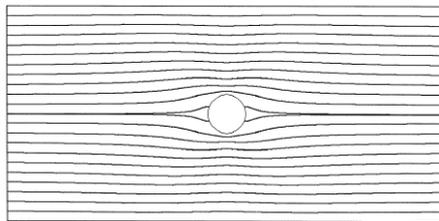


Abb. 9.1: Verlauf der Hauptspannungstrajektorien in Zug bei einem isotropen Laminat mit Loch [62]

Bei quasi-isotropen Laminaten hingegen ist der dominante Kurvenscharenverlauf der Hauptspannungen etwas stärker um das Loch herumgelenkt.

In der Literatur wird ein großer Vorteil der lastpfadgerechten Laminaten gegenüber isotropen und anisotropen Laminaten illustriert. [70] Dieser Vorteil, vor allem im Hinblick auf die Erhöhung der Steifigkeit von lastpfadgerechten Laminaten, soll für das Material „CoCo“ getestet werden.

9.2. Probenvorbereitung

Der Open Hole Tension (OHT) Test soll die Vorteile der lastpfadgerechten Faserablage an Hand der Umfahrung des Loches mit den Verstärkungsfasern demonstrieren. Dieser wird nach DIN 65 559 durchgeführt. Es werden unidirektionale, anisotrope und quasi-isotrope Aufbauten mit der lastpfadgerechten Faserablage, die mit der „CoCo“-Technologie realisiert wird, verglichen.

Die Lagen für den Probenaufbau werden alle mit der „CoCo“ Versuchsanlage gefertigt. Es werden Carbonfasern der Firma Toho Tenax vom Typ HTS45 E23 12K mit 800 tex auf einem Harzfilm der Firma SGL EPO mit 150 g/m² abgelegt. Für die Führung der Faser wird ein Einzug von E9 gewählt, so dass das Lagengewicht bei einer annähernd geschlossenen Oberfläche von 250 g/m² erreicht wird. In der Ablage ergeben sich leichte Gaps zwischen den Fasern, da diese nicht vollkommen ohne Drehung auf das Trägermaterial abgelegt werden können (siehe Abbildung 9.2).

Das bisher verwendete Gatter erlaubt nur einen Abzug über Kopf, so dass dadurch Drehung in den Roving induziert wird, und zwar fünf Drehungen pro Meter.

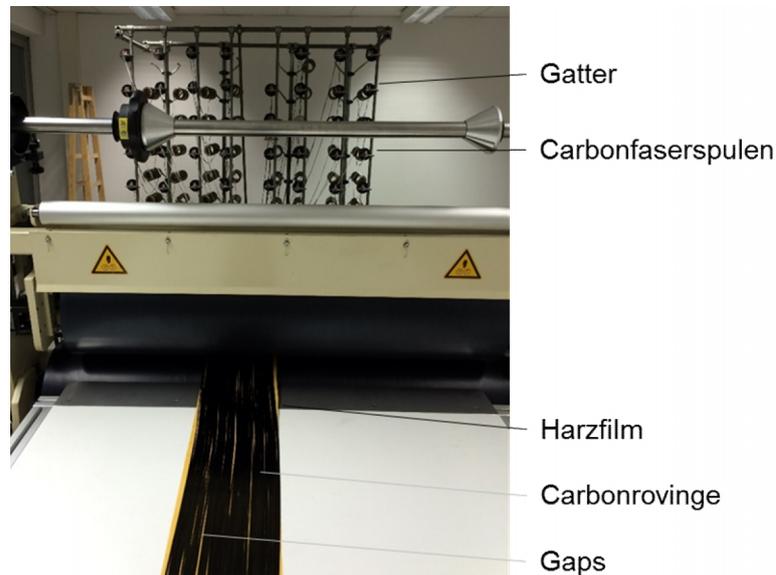


Abb. 9.2: Oberfläche der Faserablage mit leichten Gaps

Jeweils acht unidirektionale Lagen werden aufeinander gelegt und auf einem Heiztisch entsprechend dem Aushärtezyklus des Harzfilms ausgehärtet.

Für das quasi-isotrope Laminat wird ein symmetrischer Aufbau $[0/+45/90/-45/-45/90/+45/0]$ gewählt. Die einzelnen Lagen werden entsprechend der Faserausrichtung aus den unidirektionalen Halbzeuglagen ausgeschnitten, gestackt und unter den gleichen Bedingungen wie die UD-Laminat ausgehärtet.

Die Ablage der lastpfadgerechten Rovings um das Loch mit einem Durchmesser von 6 mm erweist sich mit der momentanen Ablagemechanismus und der gezielten Führung der Fasern in einer Zugfeder der CoCo-Versuchsanlage, die nur ein zwei Motoren aufgehängt ist, als nicht umsetzbar. Die Faserumlenkung innerhalb einer sehr kurzen Länge ist zu stark, um dies mit dem momentanen Stand der Versuchsanlage umzusetzen.

Daher werden die Fasern ebenfalls in unidirektionaler Richtung abgelegt und nach dem Stacken werden die Fasern um ein Loch herum ausgelenkt, das während der Aushärtung mit einem Silikonschlauch von 2 mm Höhe und 6 mm Durchmesser ausgefüllt wird, wie es in dem ausgehärteten Laminat in Abbildung 9.3 zu sehen ist.

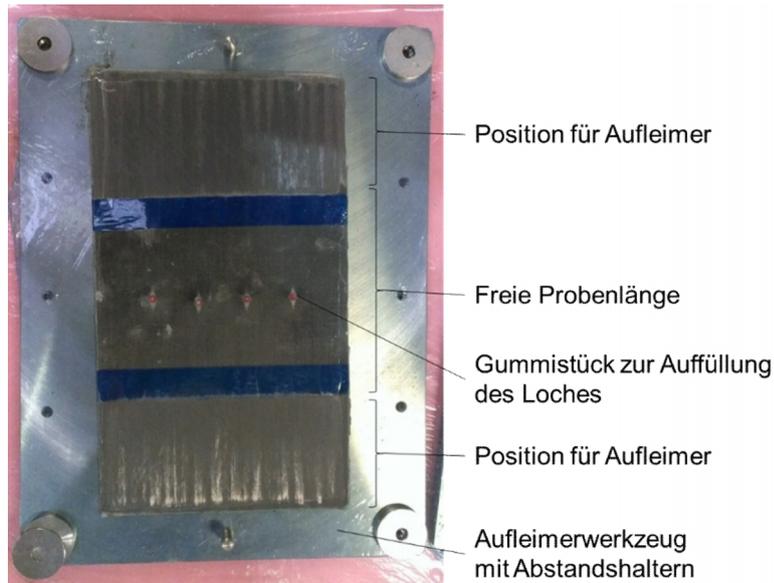


Abb. 9.3: Laminat mit lastpfadgerechter Faserausrichtung um die Bohrung

Aus der Auslenkung der Fasern ergibt sich ein Faserverlauf als e-Funktion. Deutlich zu sehen ist, dass sich entlang der x-Achse mit einem Abstand von bis zu 6 mm zum Mittelpunkt des Loches katzenaugenartige harzreiche Zonen ergeben.

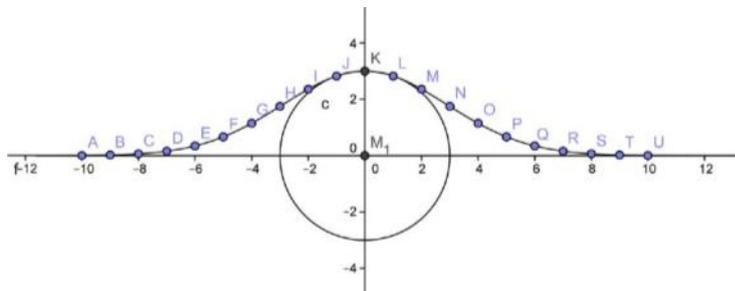


Abb. 9.4: Faserverlauf der lastpfadgerechten Proben um die Bohrung als e-Funktion

Der Zugschnitt aus den Laminaten erfolgt entsprechend der Geometrie, die in der Norm vorgegeben ist, und zwar mit einer Gesamtprobenlänge von 280 mm, einer Aufleimerlänge von 50 mm und einer daraus sich ergebenden freien Probenlänge von 180 mm. Die Dicke der Laminat ist 2 mm sein und die Breite beträgt 36 mm. Im Anhang A.7 sind die Abmessungen der Proben aufgelistet.

9.3. Versuchsdurchführung

Insgesamt werden acht Proben der drei unterschiedlichen Laminat, UD, QI und „CoCo“ an einer Universalprüfmaschine der Firma Hegewald und Peschke mit einer Maximalzugkraft von 250 kN getestet. Die Dehnungen werden mit dem System Aramis der Firma GOM aufgezeichnet.

Auf Grund von Fertigungsschwankungen der Einzellagen entsprechen die Proben nicht genau den Abmaßen aus der Norm. Die Ergebnisse der Versuche werden daher auf die entsprechende Probengröße normiert.

Alle Proben werden bis zum endgültigen Versagen getestet.

Die UD-Proben versagen schlagartig und zersplittern in viele Einzelteile. Die lastpfadgerechten Proben bekommen eine Schädigung bei einer geringeren Belastung und tragen die Last bis zu einem schlagartigen Versagen, bei dem sie vollkommen zersplittern.

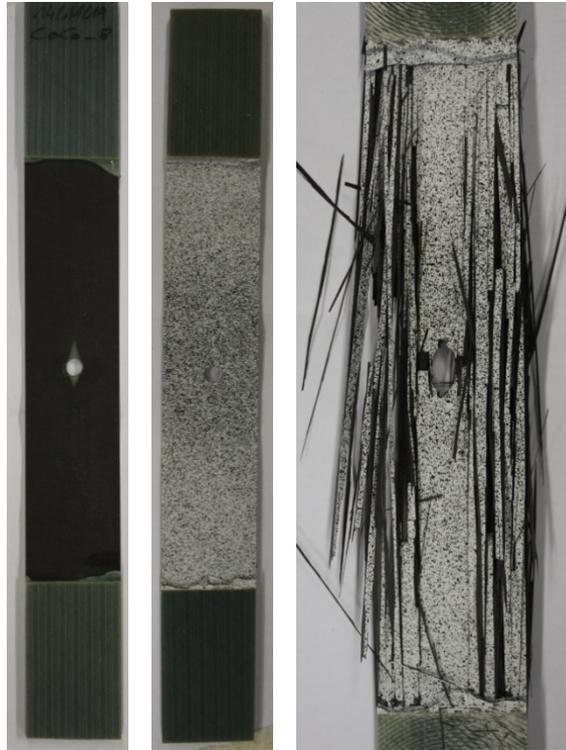


Abb. 9.5: Lastpfadgerechte Probe, mit Loch (rechts), mit zufälligem Muster (Mitte) für die Aramis-Messung und die versagte Probe (rechts)

Die quasi-isotropen Laminate zeigen bereits bei geringer Belastung eine erste Schädigung, die sich durch ein Knacksen äußert. Das Versagen ist eher schleichend.

9.4. Ergebnisse und Auswertung der Versuche

Aussagekräftig bei den OHT-Versuchen sind die Steifigkeit und die Kerbzugfestigkeit.

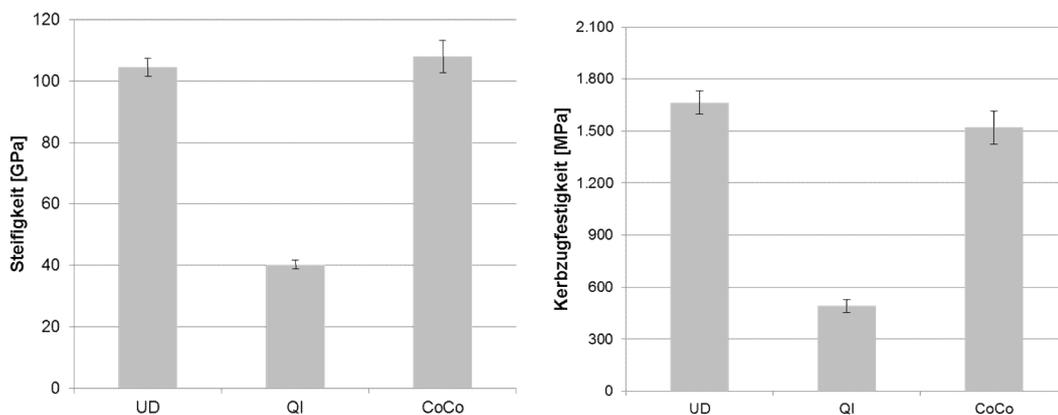


Abb. 9.6: Steifigkeit und Kerbzugfestigkeit der OHT-Proben, Vergleich UD, QI und „CoCo“

Die lastpfadgerechten „CoCo“-Proben weisen mit einem Durchschnitt von 108 GPa die höchste Steifigkeit auf im Vergleich zu den UD-Laminaten mit 104 GPa und den QI-Laminaten mit 40 GPa. Die Differenz zwischen CoCo und UD Proben ist jedoch statistisch nicht signifikant.

Die erhöhte Steifigkeit der CoCo Proben ist durch die größere Anzahl an Fasern im Bereich der Bohrung zu erklären. Da die Fasern um das Loch herumgeführt werden, tragen diese zur Steifigkeit bei. Im Falle der UD Proben wird ein Teil der Fasern durch die Bohrung zerstört. Daher wird der Kraftfluss unterbrochen.

Die Kerbzugfestigkeit ist bei den UD-Proben mit 1663 MPa am höchsten, die „CoCo“-Proben erreichen ein durchschnittliches Niveau von 1520 MPa. Aufgrund der großen Streuung ist der Unterschied jedoch statistisch nicht signifikant. Die QI-Proben liegen mit einer Kerbzugfestigkeit von 492 MPa deutlich unterhalb der UD- und „CoCo“-Proben.

Die geringere maximale Kerbzugfestigkeit der „CoCo“-Lamine gegenüber den UD-Proben lässt sich wie folgt erklären: durch die Umlenkung der Fasern im Falle der lastpfadgerechten Proben werden Schubspannungen im Bereich der Bohrung induziert, die zu einer frühzeitigen Schädigung führen.

Relevant sind allerdings die Abbildungen der Spannungen bei einem bestimmten Lastniveau. Die drei Lamine werden bei Zugbelastung von 40 kN, bzw. im Falle der QI-Lamine von 30 kN, hinsichtlich der Verteilung der Spannung über die gesamte Probe. Besonders interessant ist der Bereich um die Bohrung.

Das Dehnungsfeld visualisiert die Effekte die zu den Unterschieden in Steifigkeit und Festigkeit zwischen UD- und „CoCo“-Proben führen. In den UD-Proben treten starke Dehnungen im Bereich der Bohrung auf. Diese Fasern werden am stärksten belastet. Der Großteil der Fasern vor und hinter der Bohrung zeigt jedoch wenig bis keine Dehnung und damit auch keine Belastung auf. Grund hierfür ist, dass die Kräfte über Schubspannungen zu den Fasern hinter der Bohrung transferiert werden müssen. Dieser Anteil der Fasern trägt somit kaum zur Steifigkeit und Festigkeit der Proben bei.

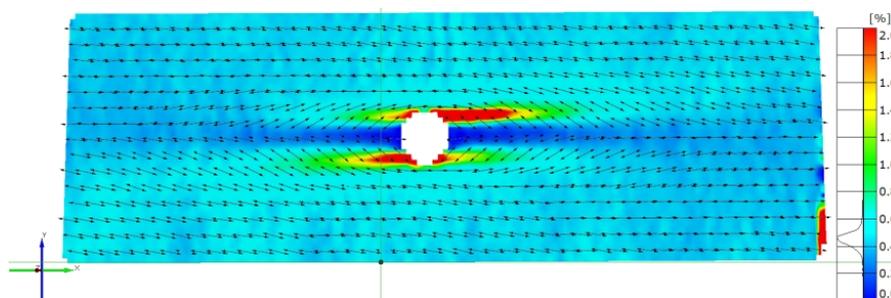


Abb. 9.7: Abbildung der Spannung in x-Richtung bei 40kN Zugbelastung, UD-Probe

Die „CoCo“-Proben weisen eine homogene Verteilung der Dehnungen auf und damit einhergehend eine homogene Spannungsverteilung. An den Hauptdehnungsrichtungen lassen sich jedoch auch die Kräfte quer zur Faserorientierung erkennen, die zu einem frühzeitigen Versagen der Proben führen.

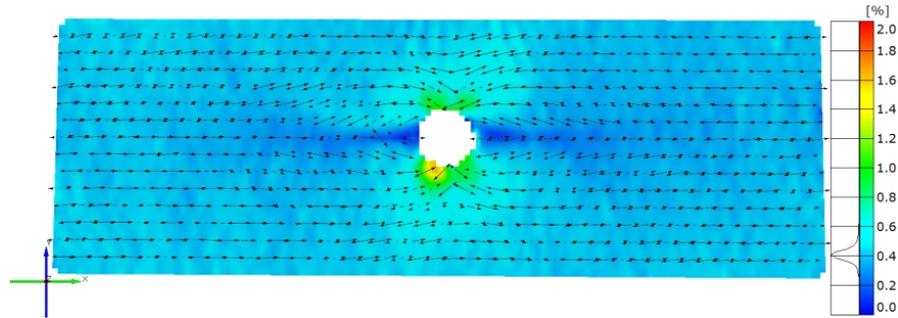


Abb. 9.8: Abbildung der Spannung in x-Richtung bei 40kN Zugbelastung „CoCo“-Proben

Bei den QI-Proben ist die Spannungsverteilung ebenfalls sehr regelmäßig, allerdings auf einem deutlich niedrigeren Niveau als bei den „CoCo“-Proben.

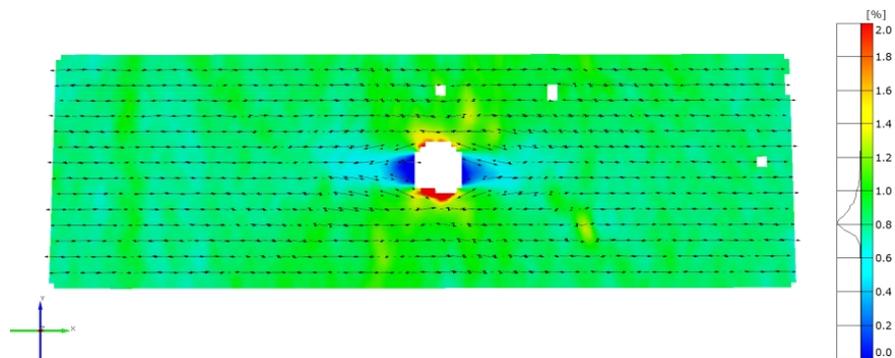


Abb. 9.9: Abbildung der Spannung in x-Richtung bei 30kN Zugbelastung, QI-Proben

9.5. Vergleich des Halbzeuges „CoCo“ mit anderen Technologien

Es gibt auch weitere Textiltechnologien, mit denen speziell Löcher und Bohrungen verstärkt werden können. Hierzu zählt das Vernähen der Preform um die Aussparung herum mittels eines Nähfadens aus Glas-, Carbon-, Aramid- oder Thermoplastnähfadens. In [68] werden Gewebeprouben ohne Loch, mit Loch (3 mm) und mit fixierenden Nähten am Loch miteinander verglichen. Die Festigkeit verringert sich durch das Bohren um 31 %, bei den durch Nähte verstärkten Proben lediglich um 6,8 %. In der Gegenüberstellung der Proben mit Loch erhöht sich die Zugfestigkeit der verstärkten Proben um 19,2 % im Vergleich gegenüber den unverstärkten.

Ebenso kann eine Lochverstärkung durch TFP erreicht werden.

In [70] wird ein triaxiales Gelege [0/-45/+45] mit einem biaxialen Gelege [-45/+45] und einer zusätzlichen variabelaxialen Lage aus TFP [C1] in einem open hole test verglichen. Abbildung 9.10 zeigt jeweils eine Probe der beiden Lamine zum Zeitpunkt des Versagens und die entsprechenden Spannungen um das Loch herum.

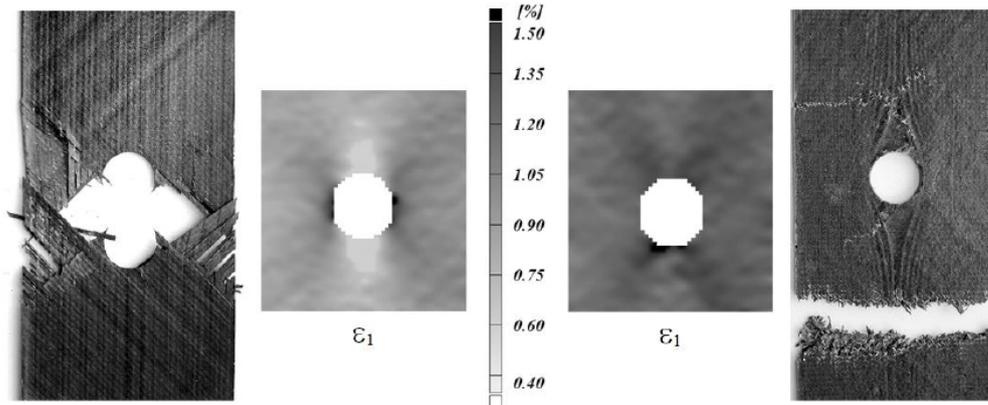


Abb. 9.10: OHT, triaxiales Gelege [0°/-45°/+45°] (links) und TFP Probe [C1/-45°/+45°] (rechts) [70]

Die triaxialen MAG- (multiaxialen Gelege-) Proben versagen am seitlichen Lochrand, da sich hier die Spannungen konzentrieren. Die TFP-Proben, in denen die 0°-Lagen um das Loch herumverlaufen, zeigen eine homogene Spannungsverteilung und Bruchcharakteristik. Der Bruch beginnt nicht bei dem Loch. Die Bruchfestigkeit liegt bei den TFP-Proben um etwa 48 % höher als bei den MAG-Proben.

9.6. Bewertung der Charakterisierungsmethode

Momentan gibt es noch keine standardisierten Prüfkörpergeometrien, die das Potential von anisotropen Werkstoffen realistisch widerspiegeln. Bisherige Geometrien sind auf unidirektionale oder quasi-isotrope Werkstoffe ausgerichtet, wie zum Beispiel Standard Zug-, Druck- und Schubversuche.

Der Open Hole Tension (OHT) und der Bolt Bearing Test [63, 66] sind einige der wenigen Testmethoden, die schon annähernd das Potential anisotroper Strukturen beleuchten. Jedoch wird momentan versucht, die Ablegestrategie dem Testkörper anzupassen als vice versa, das heißt die Testkörper nach den Materialeigenschaften und -vorteilen zu designen.

Zusätzlich gibt es viele Untersuchungen hinsichtlich Ablegestrategien von Fasern, die den Trajektorien folgen, ob die Fasern sich überlappen oder Lücken bilden sollen. [64] Verschiedenen Ablegeszenarien werden, wie in [69] beschrieben, an Hand eines Bauteils gegeneinander geprüft, z.B. eines Brake Booster, einer Zugscheibe, einer Kettenlasche oder einer Fahrradrahmenverstärkung.

Hinsichtlich der mechanischen Prüfungen werden sich einige Technologien zusammenschließen können, die dieselben Herausforderungen zu bewältigen haben, wie zum Beispiel TFP, AFP und ATL.

Als eine mögliche Testgeometrie wird ein Knochen-Biege-Zug-Versuch mit verbolzten Lochbohrungen vorgeschlagen.

Bei verbolzten Proben wird eine höhere statische Festigkeit erreicht als bei OHT-Proben, dadurch dass der Versagensmodus sich ändert. Das Erstlagen-Delaminierungsversagen wird durch ein Auszugsversagen ersetzt, gefolgt von einem Delaminationswachstum initiiert durch die Klemmkräfte. [71]

Bei dieser Testgeometrie wird das Potential einer anisotropen Struktur besser sichtbar als bei standardisierten OHT-Versuchen.

Das flächig hergestellte Halbzeug wird in einer Form konsolidiert, bzw. ausgehärtet, welche die Endkontur der Testgeometrie besitzt. Die Struktur wird mittig über einen Stift fixiert, wobei die beiden Enden unter einem 60° -Winkel nach unten hängen. Die Enden werden zusätzlich um 90° um die z-Achse verdreht. Bei dem Zugversuch werden beide Enden der Struktur unter einem 60° -Winkel nach unten – außen gezogen, wie es in Abb. 9.11 erkennbar ist. Zur Versuchsauswertung wird eine optische Erfassung der lokalen Dehnungen an verschiedenen Positionen vorgeschlagen.

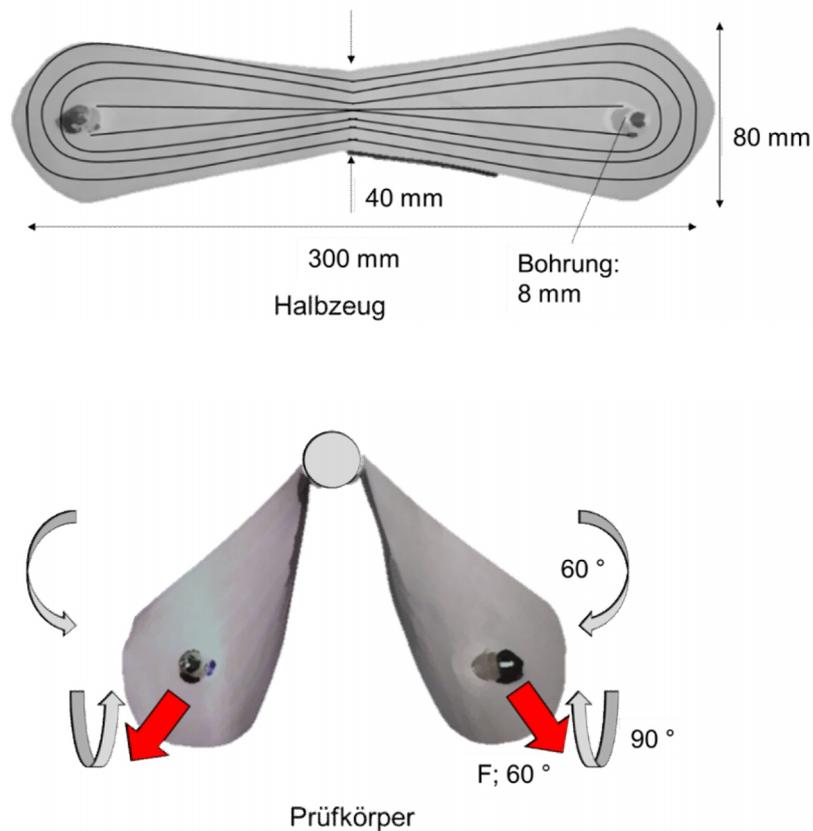


Abb. 9.11: Vorschlag einer Testgeometrie für variableaxiale Strukturen

10. Konzepte zur Serienproduktion von „CoCo“-Bauteilen

Als Beispiel für die Serienproduktion eines Bauteiles aus dem Halbzeug „CoCo“ wird die Domstrebe des Audi R8 herangezogen. Die Domstrebe ist üblicher Weise ein Aluminium-Bauteil. In einer Materialstudie setzt Audi diese Domstrebe auch aus pulverbeschichtetem Magnesium und carbonfaserverstärktem Kunststoff um.



Abb. 10.1: Wettbewerb der Materialien: Domstrebe des R8 aus Aluminium, pulverbeschichtetem Magnesium und CFK (von rechts) [Audi]

Das CFK-Bauteil mit Epoxidharz ist mit 0,9 kg am leichtesten von den drei Bauteilen, die in Abbildung 10.1 aufgeführt werden.

Das Bauteil besteht ungefähr aus 600 g Carbonfasern und 300 g Harz. Epoxidharze und PA6 haben in etwa dieselbe Dichte, daher ist die prozentuale Verteilung identisch.

10.1. Beschreibung des Herstellungsprozesses

Zur Herstellung eines Bauteils mit drei Lagen, wie zum Beispiel der Domstrebe, werden drei Legeeinheiten der „CoCo“-Anlage gebraucht. Diese produzieren hintereinander in Serie geschaltet jeweils eine konturgetreue Lage mit Fadenreserven in x/y-Richtung auf einem thermoplastischen Trägermaterial. Diese Lagen werden im Folgeprozess zu einem endkonturnahen tailored Organosheet gepresst. Darauffolgend wird das Organosheet mit einem Klemmsystem fixiert, aufgeheizt und vorverstreckt. Im Werkzeug wird das Organosheet vollständig umgeformt und die überstehende thermoplastische Matrix ausgestanzt. Final entsteht die Domstrebe; die überstehende thermoplastische Matrix kann recycelt werden.

Der Herstellungsprozess ist schematisch in Abbildung 10.2 dargestellt.

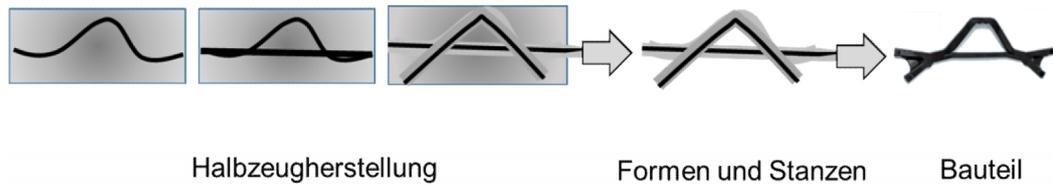


Abb. 10.2: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses einer Domstrebe; materialabhängig

10.2. Bewertung der Technologiereife des entwickelten Verfahrens

Zur Beurteilung der Serienreife wird die Reifegradbeurteilung von Audi herangezogen. Der Innovationsprozess einer Technologieentwicklung lässt sich in mehrere Phasen von der Idee bis zum „Start of Production“ (SOP) einteilen. 48 Monate vor SOP gibt es die Basisfreigabe einer Entwicklung, die mit der Prinziptauglichkeit nachgewiesen wird. Ab dem Zeitpunkt beginnen die Serienentwicklung und die Projektumsetzung. In dieser Phase gehören die ersten fünfzehn Monate der Produktdefinition, worauf die nächsten 33 Monate an der Produktentstehung gearbeitet werden. Die Serientauglichkeit muss 27 Monate vor SOP feststehen. Die einzelnen Phasen sind in Abbildung 10.3 gezeigt.

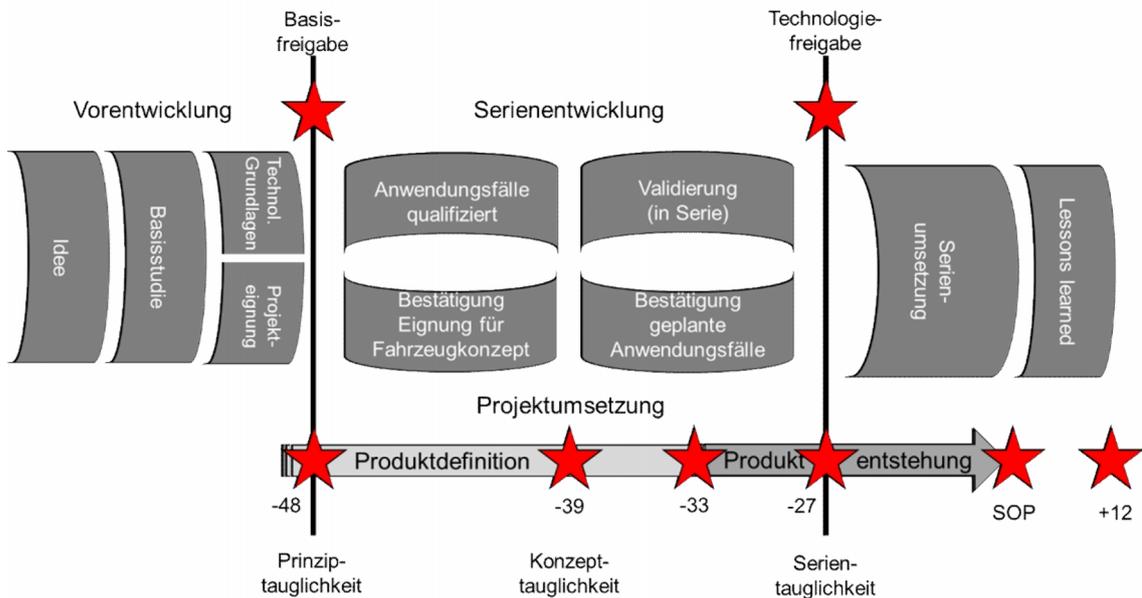


Abb. 10.3: Phasen des Innovationsprozesses in der Technologieentwicklung [Audi, überarbeitet von Eisenhauer]

Der Reifegrad wird fortlaufend während der Vorentwicklung und Serienentwicklung beurteilt. Kriterien der Bewertung sind Nutzungspotential, Abgleich der Produktkonstruktion, Abgleich des Fertigungskonzeptes, technologische Lieferantenabsicherung, Projektumsetzungsgrad der Technologie und Projektumsetzungsgrad der Betriebsmittel. Die Produktentstehung setzt erst nach erfolgreicher Reifegradbeurteilung direkt nach der Produktdefinition an, das heißt 33 Monate vor SOP. Drei Stufen gibt es zur Ein-

schätzung der Technologieeignung, von einer negativen über eine neutrale bis zur positiven Einordnung.

Die Bewertung an Hand dieser Kriterien wird für die Entwicklung des Halbzeuges „CoCo“ durchgeführt, siehe Abbildung 10.4. Das Nutzungspotential der Technologie wird sehr positiv bewertet, allerdings stehen noch Bauteiltest aus und daher befindet sich die vollständige Bewertung des Nutzungspotentials noch im Bearbeitungsstadium. Mit der Produktkonstruktion wurde bereits begonnen, die Ablegestrategien sind festgelegt und die Fadenreserven können berechnet werden. Allerdings ist damit erst ein Viertel der gesamten Produktkonstruktion abgeschlossen. Das Fertigungskonzept mit den Fadenführungssystemen ist abgeschlossen, das entspricht etwa der Hälfte des Fertigungskonzeptes. Mit den weiteren Arbeiten hinsichtlich Serientauglichkeit der Anlage wurde noch nicht begonnen. Die Auswahl der Lieferanten wurde für die Festlegung der Verstärkungsfasern und der Trägermaterialien begonnen. Allerdings ist hinsichtlich der Betriebsmittel noch kein Konzept angedacht worden. Abbildung 10.4 zeigt die Reifegradbeurteilung im Überblick.

Der Abarbeitungsgrad wird in fünf Stufen eingeteilt, von einem leeren Kreis, das heißt die Tätigkeit wurde noch nicht begonnen, über einen viertel, halb, dreiviertel und vollkommen gefüllten Kreis. Der Abarbeitungsstatus wird in drei Stufen dargestellt, von einem roten Punkt, das heißt der entsprechende Abarbeitungspunkt mit dem entsprechenden Abarbeitungsgrad wurde noch nicht begonnen, über einen gelben bis zu einem grünen Punkt, der die vollständige Fertigstellung verdeutlicht. Die drei unterschiedlichen Pfeile, von rot über gelb zu grün, verdeutlichen die Einschätzung der Technologieeignung, mit grün als positiv, gelb als neutral und rot als negativ.

Kriterium	Aktueller Abarbeitungsgrad	Aktueller Abarbeitungsstatus	Einschätzung Technologieeignung
Nutzungspotential			
Abgleich Produktkonstruktion			
Abgleich Fertigungskonzept			
Technol. Lieferantenabsicherung			
Projektumsetzungsgrad Technologie			
Projektumsetzungsgrad Betriebsmittel			

Abb. 10.4: Reifegradbeurteilung der Technologie „CoCo“

10.3. Herstellungs- und Vertriebskonzept

Für die Herstellung von strukturellen CFK-Bauteilen mittels des Prozesses „CoCo“ sind einige Aspekte hinsichtlich Know-how, Kernkompetenz und Wissenstransfer zu bündeln.

Die Firma TEC-KNIT GmbH in Rhede mit ihrem Entwicklungszentrum in Ottobrunn verfügt über ein fundiertes Wissen in der Herstellung von technischen Textilien auf der Basis der Kettenwirktechnik, im Bereich Kaschierung und Ausrüstung. Zusätzlich ist am Entwicklungsstandort ein breites Wissen an Fertigungstechnologie im Bereich Faserverbundwerkstoffe vorhanden.

Um ein Bauteil für die Automobilindustrie fertigen zu können, muss zum einen das Bauteil basierend auf den Materialkennwerten simuliert werden können. Aus den Bauraumvorgaben des Kunden, sei es ein OEM oder ein direkter Komponentenzulieferer, wird für das Bauteil, hergestellt aus dem strukturoptimierten Halbzeug „CoCo“, eine Topologieoptimierung durchgeführt, woraus sich zusammen mit dem Kunden ein CAD-Design ergibt. Daraus kann der Herstellungsprozess des Textils berechnet und simuliert werden, sowie die Maschinensteuerung programmiert werden. Nach der FEM Analyse der umzusetzenden Faserablage wird der Materialbedarf errechnet, das Rohmaterial beim Materialzulieferer bestellt und zur Fertigung des Halbzeuges geliefert.

Für die Firma TEC-KNIT GmbH wäre für das vorgeschlagene Szenario ein Zusammenschluss in Form eines Joint Ventures mit einer Firma denkbar, die bereits Erfahrung in der Herstellung von thermoplastischen Bauteilen hat. Somit könnte das erarbeitete Wissen, auf Basis des weltweiten Patents, zur Herstellung des Halbzeuges in der Firma TEC-KNIT bleiben, weitere Entwicklungen könnten vorangetrieben werden und der Prozess „Von der Faser bis zum Bauteil“ bliebe als kontinuierlicher Prozess bestehen.

Wie in Abbildung 10.5 zu sehen ist, müssen noch einige Entwicklungen im Bereich der Materialauslegung, sowie der Bauteilfertigung mit kompetenten Partnern durchgeführt werden.

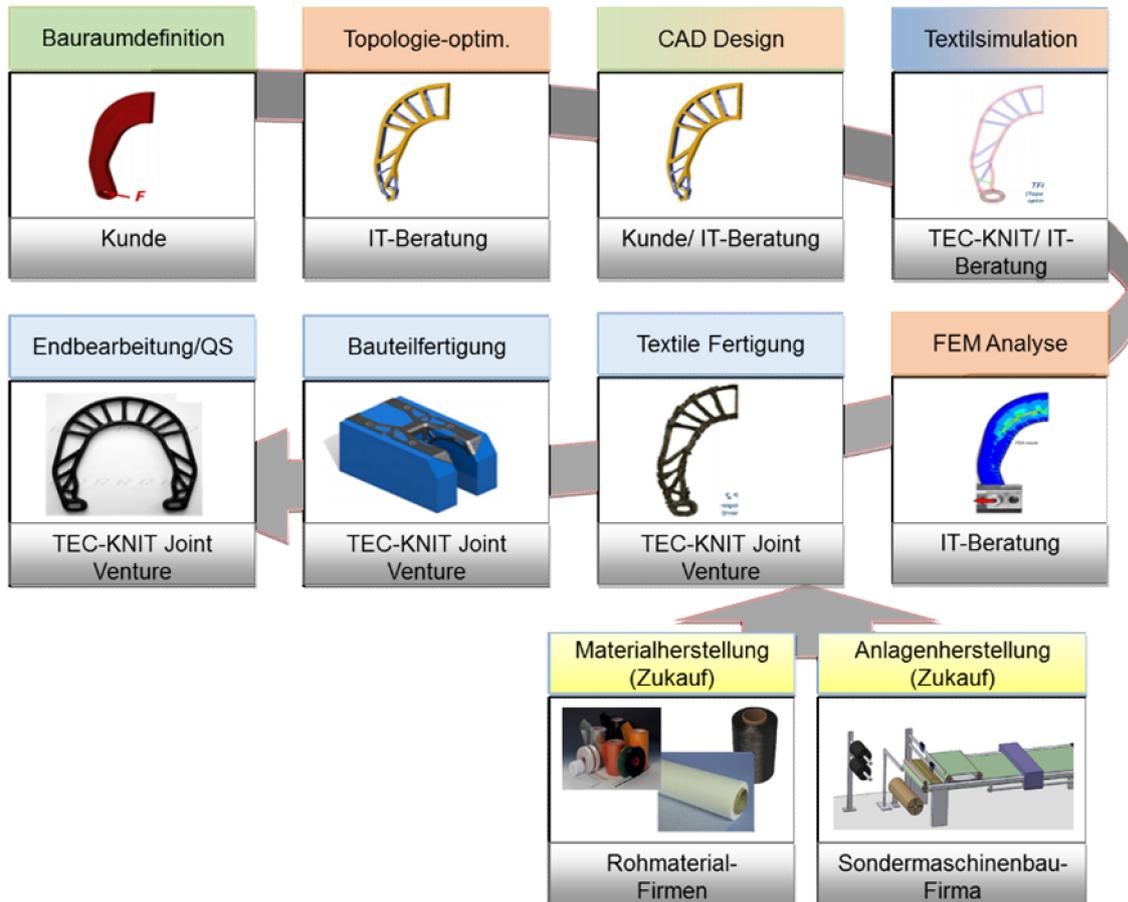


Abb. 10.5: Herstellungs- und Vertriebskonzept – Tier 1-Supplier

Für die Entwicklung geeigneter Simulationssoftwares wird ein Zeitraum von etwa drei Jahren veranschlagt. Die Entwicklung und Fertigung der finalen Seriengesamtanlage wird in etwa auch drei Jahre betragen. Entwicklungsbedarf wird auch noch in der lokalen Einbringung, Umformung und Konsolidierung der thermoplastischen Matrix gesehen. Für diese Entwicklung werden ebenfalls drei Jahre betragen. Zum Aufbau der Anlage, Verträge mit Zulieferern, Akquise eines geeigneten Partners für das Joint Venture werden weitere zwei Jahre angenommen. Daraus ergibt sich eine Marktreife innerhalb von fünf Jahren.

10.4. Ermittlung der Anlagenressourcen, Personalkosten und Bauteilkosten

Die Kosten für Bauteile aus Carbonfaserverstärkten Kunststoffen liegt momentan bei dem fünf bis sechsfachen, mit etwa 42 €/kg, eines Stahlbauteils. Laut einer Studie von McKinsey [60] wird bis 2030 eine Kostenreduktion von 45 % auf 23 €/kg bei einer Stückzahl von 60.000 Teilen pro Jahr prognostiziert.

Im Folgenden werden die Bauteilkosten für die Domstrebe in verschiedenen Fahrzeugen, hergestellt aus dem Material „CoCo“, ermittelt.

Der R 8 wird mit einer Stückzahl von 5.000 Stück pro Jahr gefertigt. Hierzu soll ein BMW i3 mit 30.000 Stück pro Jahr und ein VW Golf 7 mit rund 450.000 Stück pro Jahr verglichen werden.

Folgende Parameter werden für die Berechnung der Anlagenkosten, Personalkosten, Materialkosten angenommen:

Domstrebe für Audi R 8:

- Stückzahl: 5.000 Bauteile pro Jahr
- Prozesszeit: 30 Minuten pro Bauteil
- Personal:
 - 1-Schicht-Betrieb, 200 Tage pro Jahr
 - 3 Mitarbeiter pro Anlage
 - 40.000 € Einkommen, mit Overhead: 30.000 €
- Materialkosten:
 - Carbonfasern: 18 €/kg
 - Thermoplast: 8 €/kg
- Anlagenkosten
 - 1.000.000 € pro Anlage
 - Abschreibung über 5 Jahre, entspricht 200.000 € pro Jahr
 - 2 Anlagen

Domstrebe für BMW i3:

- Stückzahl: 30.000 Bauteile pro Jahr
- Prozesszeit: 30 Minuten pro Bauteil
- Personal:
 - 1-Schicht-Betrieb, 356 Tage pro Jahr
 - 3 Mitarbeiter pro Anlage
 - 40.000 € Einkommen, 10.000 € Wochenendzuschlag, mit Overhead: 120.000 €
- Materialkosten:
 - Carbonfasern: 18 €/kg
 - Thermoplast: 8 €/kg
- Anlagenkosten
 - 1.000.000 € pro Anlage
 - Abschreibung über 5 Jahre, entspricht 200.000 € pro Jahr
 - 5 Anlagen

Domstrebe für VW Golf 7:

- Stückzahl: 450.000 Bauteile pro Jahr
- Prozesszeit: 30 Minuten pro Bauteil
- Personal:
 - 3-Schicht-Betrieb, 356 Tage pro Jahr
 - 3 Mitarbeiter pro Anlage

- 40.000 € Einkommen, 10.000 € Wochenendzuschlag, 10.000 € Schichtzuschlag, mit Overhead: 500.000 €
- Materialkosten:
 - Carbonfasern: 16 €/kg
 - Thermoplast: 7 €/kg
- Anlagenkosten
 - 1.000.000 € pro Anlage
 - Abschreibung über 5 Jahre, entspricht 200.000 € pro Jahr
 - 26 Anlagen

Daraus lassen sich die Kosten pro Bauteil, die in Herstellungskosten und Materialkosten aufgeteilt werden können, errechnen.

Fahrzeug	Herstellungskosten pro Bauteil	Fertigungskosten pro Bauteil	Materialkosten pro Bauteil
Audi R8	159,20 €	146,00 €	13,20 €
BMW i3	101,90 €	88,70 €	13,20 €
VW Golf 7	44,91 €	33,21 €	11,70 €

Abb. 10.6: Auflistung der Kosten pro Bauteil für 3 Modelle

Um die Bauteilkosten pro Bauteil zu senken, muss die Prozesskette automatisiert werden, so dass nur ein Maschinenführer pro Anlage eingesetzt wird. Zusätzlich muss der Konsolidierungsprozess optimiert werden, um auf 15 Minuten pro Bauteil zu kommen.

Fahrzeug	Herstellungskosten pro Bauteil	Fertigungskosten pro Bauteil	Materialkosten pro Bauteil
Audi R8	110,80 €	97,60 €	13,20 €
BMW i3	67,20 €	54,00 €	13,20 €
VW Golf 7	27,83 €	16,13 €	11,70 €

Abb. 10.7: Auflistung der Kosten pro Bauteil für 3 Modelle nach Prozessoptimierung

In der Optimierung der Prozesskette liegt ein großes Kostenpotential, und zwar eine Reduktion der Kosten um etwa 30 %. Das bedeutet, dass bei einer späteren Produktion eines Bauteils mit der „CoCo“ Technologie großer Wert auf Automatisierung und Prozessoptimierung gelegt werden sollte. Dies erfordert jedoch ein hohes Investitionsvolumen.

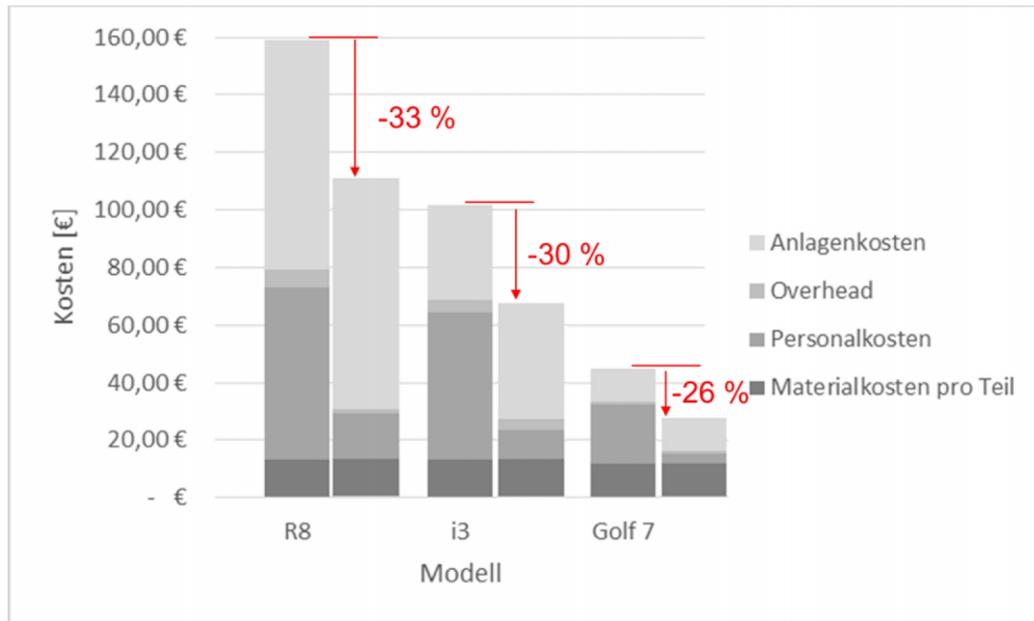


Abb. 10.8: Einsparpotential bei den Fertigungskosten durch Prozessoptimierung

Die Anlagenkosten mit hohem Grad an Automatisierung werden auf einen Wert von etwa 1,5 – 2 Millionen Euro geschätzt, d.h. in etwa doppelt so teuer wie die nicht-automatisierte Anlage. Allerdings kann auf 30 % des Personals reduziert werden, wodurch insgesamt etwa 30 % der Fertigungskosten eingespart werden können.

10.5. Entwurf eines Hallen- und Anlagenlayouts

Für die Auswahl der Fabrikplanung wird als Voraussetzung eine sogenannte „High-tech-Fabrik“ in Kombination mit einer „wandlungsfähigen Fabrik“ angekommen. Es wird ein höchst innovatives Produkt hergestellt, bei dem es wichtig ist, „möglichst schnell von der Entwicklung in die Produktion“ [61] zu kommen. Hauptfokus beim Aufbau der Fabrik ist zunächst die „Beherrschung der Technologie und die reibungslose Inbetriebnahme“ [61]. Zusätzlich wird eine hohe Wandlungsfähigkeit der Fabrik angestrebt, um schnell auf Veränderungen reagieren zu können, z.B. bei Erhöhung der Bauteilstückzahl, Änderungen der Bauteilgeometrie oder Änderung von Rohmaterialien. Bei der Hallenplanung sind kurze Transportwege, die Positionierung der Anlagen und die Berücksichtigung von Wachstum ausschlaggebend. Einen Vorschlag für einen Hallenentwurf ist in Abbildung 10.9 zu finden.

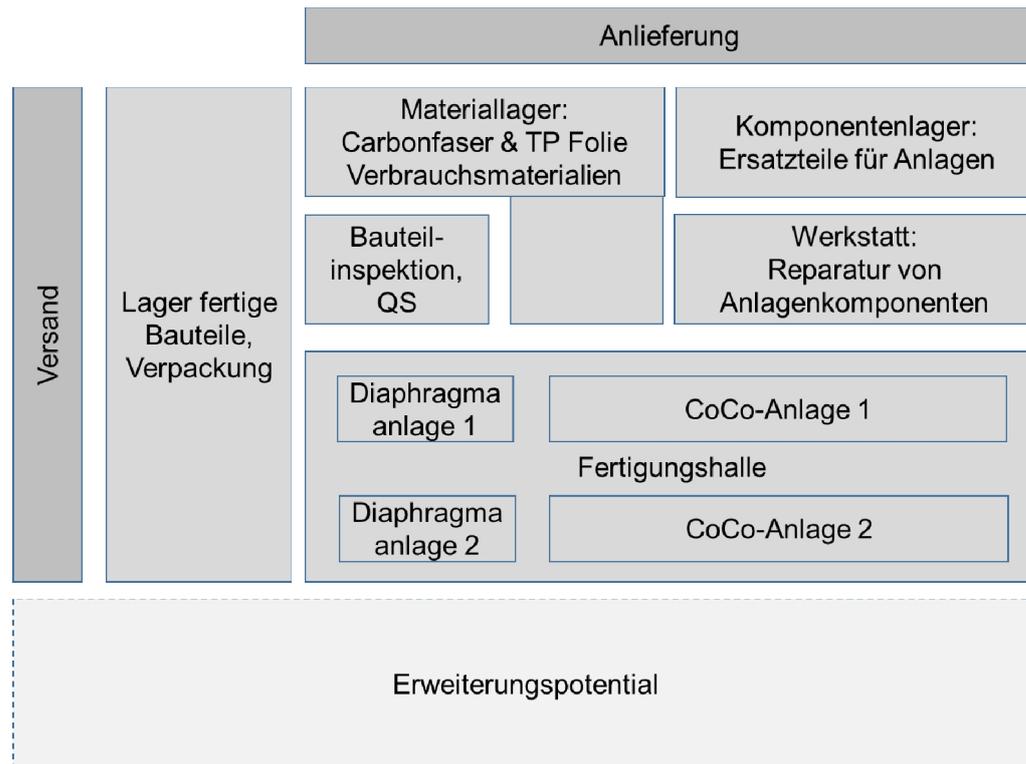


Abb. 10.9: Hallenlayout

Als Gesamtfläche werden etwa 500 m² angenommen, mit einem Erweiterungspotential um 100 %. Somit besteht die Möglichkeit von 5.000 Stück pro Jahr (in einem 1-Schichtbetrieb an 250 Tagen im Jahr) bis zu 21.900 Stück pro Jahr (in einem 3-Schichtbetrieb an 365 Tagen im Jahr) nach der Erweiterung zu fertigen.

Bei einem weiteren Ausbau mit hohem Automatisierungsgrad bei gleichbleibender Anlagenzahl kann die produzierbare Stückzahl von 40.000 Stück pro Jahr bei einem 1-Schichtbetrieb ohne Wochenendarbeit erreicht werden. Bei einem 3 Schichtbetrieb an 365 Tagen im Jahr können etwa 170.000 Stück pro Jahr gefertigt werden.

11. Zusammenfassung und Ausblick

11.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde, motiviert durch den aktuellen Bedarf vor allem der Automobilindustrie, ein vollkommen neues Halbzeug entwickelt. Die Anforderungen sowie Herausforderungen bestanden vor allem darin, ein Halbzeug zu entwickeln, das verschnittarm, lastpfadangepasst ist und annähernd keine Drapierfehler aufweist. Dies führte zu der Entwicklung eines Halbzeuges, das konturgetreu abgelegt werden kann, variabelaxial ist, also Verstärkungsfasern in gezielter, vorzugsweise kraftflussgerechter Ausrichtung aufweist, und zusätzlich hoch drapierfähig ist. Basierend auf ausführlichen Recherchen des Stands der Technik wurden die Neuheit und die Innovation des neu entwickelten Halbzeuges herausgearbeitet (Kapitel 3). Das neuartige Halbzeug, namens CoCo – contoured composites, hebt sich vor allem durch die außergewöhnliche Faserablage, die hervorragende Drapierbarkeit, selbst bei der Herstellung von hochkomplexen Bauteilen, die einzigartige Herstellungsmethode, dem hohen Grad an Automatisierung und effizienten Fertigung stark vom Stand der Technik ab. Die Idee zur Herstellung des Halbzeuges basiert auf einem einzigen Produktionsprozesses, und zwar direkt vom Verstärkungsroving bis hin zum Halbzeug, das bereits die Matrix, vorzugsweise eine thermoplastische Matrix, für das daraus resultierende Bauteil beinhaltet. Die Rovings werden von einem Gatter abgezogen, auf einem Trägermaterial, das die Matrix des späteren Bauteils darstellt, abgelegt, darauf fixiert und in einem direkt nachgeschalteten Umformungsprozess in die finale Bauteilgeometrie gepresst.

Ein Hauptaspekt der Halbzeugentwicklung, der in dieser Arbeit abgehandelt wurde, betrifft die Ablage der Verstärkungsrovings auf dem Trägermaterial. Jedes Halbzeug wird entsprechend der finalen Bauteilgeometrie hergestellt. Basis hierfür bildete die Analyse der Bauteilgeometrie und ihrer Komplexität hinsichtlich Umformgrade mittels einer Bauteilkomplexitätsanalyse, die in Kapitel 4.2 und 4.3 beschrieben wurde. Mit dieser Analyse ist es möglich die Bauteilgeometrie jedes einzelnen Bauteils hinsichtlich ihrer Komplexität in Bezug auf Umformgrade im Detail zu untersuchen und zu beschreiben. Basierend auf dieser Analyse kann das Halbzeug „CoCo“ jeder Bauteilgeometrie entsprechend angepasst werden. Hierzu werden bei der Ablage der Verstärkungsfasern auf dem Trägermaterial Fadenreserven, deren Länge und Position zuvor berechnet wird, in x- und y-Richtung vorgehalten. Eine Herausforderung, die in dieser Arbeit gelöst wurde, ist die Berechnung der benötigten Rovinglänge, sowie der Rovinganzahl und –position im zweidimensionalen Textil zur Einbringung der Fadenreserven. Ziel war es, dass die Verstärkungsrovings durch Auflösen der Fadenreserven nach der Umformung in die finale Bauteilgeometrie in der vorgesehenen, kraftflussgerechten Position, gestreckt und ohne Abweichung von der zuvor berechneten Ausrichtung auf Grund von fehlerhafter Ausformung während der Drapierung, liegen. Dieses Berechnungsmodell zur optimalen Ablage der Verstärkungsrovings in der zweidimensionalen Ebene wurde erfolgreich entwickelt (Kapitel 4.4) und durch Herstellung von Musterhalbzeugen validiert (Kapitel 4.5). Verschiedene Strategien zur Einbringung der Fadenreserven wurden während der Herstellung der Musterhalbzeuge getestet und hinsichtlich ihrer

Umsetzbarkeit bewertet. Ein für die automatisierte Herstellung einfaches Ablegekonzept zur Einbringung von Fadenreserven wurde durch die Ablage der Verstärkungsfasern in Form von Schlaufen in der x/y-Ebene erzielt. Während des Drapierprozesses werden die Fadenreserven des zweidimensionalen Textils aufgelöst, so dass die Verstärkungsfasern vollkommen gestreckt im finalen Bauteil vorliegen. Im Gegensatz dazu durchläuft das Trägermaterial einen anderen Prozess, um sich in die finale Bauteilgeometrie verformen zu lassen. Da das Trägermaterial, in Form einer Folie, eines Vliesstoffes oder eines Films, bereits in der zweidimensionalen Form gänzlich gestreckt vorliegt, muss es während des Drapierprozesses eine Verformbarkeit der Fläche aufweisen. Zur Auswahl von geeigneten Trägermaterialien wurde ein umfangreiches Materialscreening mit verschiedenen Materialien hinsichtlich ihrer Stabilität während der Ablage der Verstärkungsfasern, ihrer Verformbarkeit und Dehnfähigkeit sowie der Anhaftbarkeit der Verstärkungsfasern bewertet (Kapitel 4.6.1). Es wurde eine Kombination aus verschiedenen thermoplastischen Trägermaterialien herausgearbeitet, die zu den besten Ergebnissen führte. Ebenso die Auswahl geeigneter Verstärkungsfasern hat großen Einfluss auf die Qualität des Halbzeuges, als auch des späteren Bauteils. Verschieden Carbonfaserroving wurden in Ablegeversuchen evaluiert und hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit bewertet (Kapitel 4.6.2). Als besonders geeignet zeigten sich Rovings mit geringem Titer und gedrehte Rovings.

Zur Herstellung des Halbzeuges „CoCo“ wurde eine Versuchsanlage konzeptioniert und gebaut (Kapitel 5). Zur schrittweisen Entwicklung der Versuchsanlage wurde zunächst ein Prozessroutenkonzept entworfen, um die einzelnen Prozessschritte zunächst zu definieren, evaluieren und festzulegen. Die größte Herausforderung bei der Anlagenentwicklung lag in der Ausgestaltung der Führungselemente zur gezielten Ablage der für das Bauteil benötigten Anzahl an Verstärkungsfasern auf dem Trägermaterial. Gelöst wurden die Führungselemente durch Zugfedern, die zwischen Klemmeinrichtungen eingespannt werden. Diese Klemmeinrichtungen lassen sich durch Stellmotoren auf einer Linearachse hin- und herbewegen, um dadurch die in die Feder eingezogenen Verstärkungsfasern gezielt auf dem Trägermaterial zu positionieren.

Zur Bestimmung und Evaluierung der Drapierbarkeit des neu entwickelten Halbzeuges „CoCo“ wurde ein Drapierprüfstand entwickelt, der nach dem Durchdrückprinzip funktioniert (Kapitel 6). Bestandteil des Prüfstands ist eine neu entwickelte Drapierform, die durch ihre gezielte Geometrie typische Drapiermodi in dem zu drapierenden Halbzeug hervorruft. Eine Segmentierung des Klemmrahmens, der das Textil zum Tisch hin fixiert, wurde als vorteilhaft erachtet, um somit ein gezieltes Nachfließen des Halbzeuges während des Drapierprozesses zu ermöglichen. Eine weitere Notwendigkeit war die Integration einer Heizquelle in den Drapierprüfstand, um durch Aufschmelzen des thermoplastischen Trägermaterials die Umformung jenes zu ermöglichen. Hierzu wurden verschiedenen Heizquellen hinsichtlich eines Anforderungskatalogs bewertet und eine Auswahl getroffen. Als besonders zweckmäßig für den Einsatz in dem Drapierprüfstand erwiesen sich Infrarotstrahler in Kombination mit einer Kontaktheizung. Zusätzlich wurden zwei Auswerteeinrichtungen zur objektiven Beurteilung der Drapierbarkeit konzipiert und in den Prüfstand integriert, und zwar eine optische Auswerteeinrichtung und ein mechanischer Kraftaufnehmer. Die Drapierbarkeit und das Verhalten der Ver-

stärkungsfasern während des Drapierprozesses wurden an Hand dieses neu entwickelten Drapierprüfstands „LCC Pole Peak“ untersucht (Kapitel 7). Hierzu wurde ein Vergleich mit Standard-Textilien, wie Geweben und MAG, aufgestellt. Es hat sich gezeigt, dass „CoCo“ andere Drapiermechanismen als die bisher eingesetzten, konventionellen Textilien aufweist. Im Gegensatz zu den konventionellen Textilien, die die allgemeinen Deformationsmechanismen, wie Faserdehnung- und Streckung, Fasergleiten, Roving- und Textilbiegung und Textilscherung, mit sich bringen, zeigte sich bei dem Halbzeug „CoCo“ ein Drapiermechanismus in Form von einer Kombination aus Oberflächenvergrößerung des Trägermaterials und Streckziehen sowie Faserstreckens der Verstärkungsrovings. Besonders hervorzuheben ist die gewonnene Erkenntnis, dass sich auf Grund der unterschiedlichen Drapier- und Deformationsmechanismen das Halbzeug „CoCo“ deutlich weniger Drapierfehler ausgebildet hat.

Besonders vorteilhaft für das neu entwickelte Halbzeug sind die mechanischen Eigenschaften im Verbund (Kapitel 9). In der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften zeigte sich das Halbzeug „CoCo“ sehr vielversprechend im Vergleich zu konventionellen Textilien. Vor allem im Open Hole Tension Test wurde eine deutlich gleichmäßigere Spannungsverteilung um das Loch herum festgestellt als bei den zum Vergleich getesteten Textilien.

Um das Potential dieser Entwicklung vollkommen ausschöpfen zu können ist der nächste Schritt die Überführung der entwickelten Technologie in die Serienproduktion. Hierzu wurde ein Konzept zur Umsetzung der Drapierprozessroute mit einer vollständigen Prozesskette aufgestellt (Kapitel 8). Zur Herstellung eines Bauteils sind zum Aufbau der Wandstärke und zur Erreichung der mechanischen Eigenschaften mehrere Lagen notwendig. Mit der bisherigen Versuchsanlage war es bisher möglich eine einzige Lage herzustellen. In der Prozesskette für die Serienproduktion wurden daher mehrere Faserführungsanlagen, ähnlich der Versuchsanlage, hintereinander positioniert. Der daraus resultierende Stack wird durch eine flexible Kalandereinheit geführt und nach dem Aufheizschritt, bei dem das Halbzeug „CoCo“ in Form eines Organosheets von Niederhalten im Randbereich fixiert wird, verpresst.

Abschließend wurde eine Kostenrechnung durchgeführt, sowie ein Fertigungskonzept entwickelt, das zeigt, wie eine Serienproduktion bei verschiedenen Stückzahlen ausgelegt wird. Zwar sind die Herstellungskosten, vor allem bei kleinerer Stückzahl von etwa 5.000 Bauteilen pro Jahr, im Vergleich zu konventionellen Herstellungsprozessen auf Grund des hohen Investments relativ hoch, allerdings konnte gezeigt werden, dass ein hohes Einsparpotential in den Herstellungskosten durch Prozessoptimierung und Automatisierung liegt.

Mit der entwickelten Technologie lässt sich ein Durchbruch im industriellen Umfeld der ressourceneffizienten Bauteile aus Faserverstärkten Kunststoffen erzielen.

11.2. Ausblick

Mit dem neu entwickelten Prozess ist es möglich, variabelaxiale, endkonturnahe und hoch drapierfähige Halbzeuge herzustellen. Ein weiterer Schritt wird sein, diese Halbzeuge in einer Serienproduktion zu fertigen. Hierfür bedarf es der Weiterentwicklung der Versuchsanlage und die Umsetzung des vorgeschlagenen Fertigungskonzepts. Zusätzliches Entwicklungspotential wird in der Automatisierung gesehen. Eine wichtige Rolle wird hierbei dem Thermoformprozess zugeschrieben. Ein automatisiertes Umformen des Halbzeuges „CoCo“ im großen Maßstab bedarf einer stabilen Anlagentechnik, vor allem hinsichtlich der Fixierung der Fasern im Werkzeug, sowie einer kontrollierten Steuerung der Fasern während der Auflösung der Fadenreserven.

Großes Entwicklungspotential liegt ebenso im Bereich der Materialcharakterisierung für lastpfadgerechte Konstruktionen. Hierzu sind weitere Untersuchungen der Materialeigenschaften mit speziell für gradierte Strukturen neu entwickelten Versuchsaufbauten, bei denen es möglich ist lokale Dehnungen und Spannungen der kraftflußgerechten, inhomogenen Strukturen aufzunehmen, notwendig.

A. Anhang

a. Betreute Studienarbeiten

Art	Nummer	Name	Titel der Arbeit
SA	2011-0014	Michael Wolf	Drapieren von flächigen Halbzeugen zur Anwendung in der Luftfahrtindustrie
BA	2011-0008	Michael Krapf	Entwicklung eines Drapierprüfstandes für Carbonfaser-Halbzeuge
SA	2012-0006	Maximilian Bichler	Verbesserung der Drapierbarkeit von Gelegen
SA	2012-0575	Johannes Casper	Untersuchungen zu automatisierten Preform-Fertigungsverfahren für die automobiler Großserie
SA	2012-0030	Benedikt Borchert	Untersuchungen zur Herstellung von Composite-Bauteilen für die automobiler Großserie im Faserspritzverfahren mit gerichteten Fasern
BA	2012-0021	Dennis Schneider	Drapierprüfstand für Verstärkungstextilien - Verbesserung der Drapierergebnisse
SA	2013-0021	Sebastian Rausch	Einflußfaktoren auf die Drapierbarkeit von gewirkten Verstärkungstextilien für Faserverbundwerkstoffe
SA	2013-0055	Felix Diwo	Drapierprüfstand für Verstärkungstextilien – Entwicklung eines segmentierten Niederhalters
SA	2013-0032	Raphael Fuhrer	Prozessroutenanalyse und Prozessentwicklung von Herstellungsverfahren für thermoplastische Composite-Bauteile
SA	2014-0059	Elisabeth Steinbrenner	Recherche zum Stand der Technik und Entwicklung eines endkonturnahen, lastpfadgerechten Verstärkungstextils für Faserverbundwerkstoffe
SA	2014-0037	Chengyuan Zhai	Beschreibung von Bauteilkomplexitäten mittels CATIA-Analyse
SA	2014-0052	Hailin Chao	Ablegestrategien und Streckziehversuche zur Entwicklung von hoch-drapierfähigen UD-Textilien mit Fadenreserven
BA	2014-0028	Thomas Fuchs	Drapierprüfstand für Verstärkungstextilien – Entwicklung einer Temperiereinheit für Thermoplaste
SA	2015-0054	Mark Braun	Hoch drapierbare, konturgetreue, variabelaxiale Verstärkungstextilien für faserverstärkte Kunststoffe

b. Daten oder Bewertungsmatrizen

Zu Kap. 5 Entwicklung einer Versuchsanlage:

Prozessbestandteil		Teillösung 1			Teillösung 2		Teillösung 3		Teillösung 4		Teillösung 5	
Lagenlegen												
Anforderung \ Teillösung	Lagenlegemaschine mit Zusatzeinrichtungen			Thermoplast Tapelegen		Tailored Fiber Placement		Ablegen trockener Rovinge auf einem Trägermaterial		Ablegen Schmelzimpregnierter Rovinge		
	G	P	G*P	P	G*P	P	G*P	P	G*P	P	G*P	
Undulationen	4	5	20	5	20	3	12	4	16	4	16	
Lastpfadgerechtes Ablegen	4	1	4	4	16	4	16	5	20	5	20	
3D-Ablegung	3	0	0	3	9	0	0	0	0	3	9	
Automatisierungsgrad	4	1	4	5	20	4	16	5	20	4	16	
Variation der Ablegbreiten	2	0	0	4	8	2	4	5	10	2	4	
Großserientauglichkeit	5	0	0	0	0	0	0	4	20	3	15	
Zykluszeit	5	0	0	3	15	1	5	5	25	3	15	
Verschnitt	2	0	0	4	8	5	10	3	6	4	8	
Gesamtpunktzahl = $\Sigma(G*P)$		28			96		63		117		103	

Abb. A.1: Auswahlmatrix zur Prozessroutenanalyse – Lagenlegen [28]

Prozessbestandteil		Teillösung 1			Teillösung 2		Teillösung 3		Teillösung 4		Teillösung 5	
Lagenlegen												
Matrix-Einbringung												
Anforderung \ Teillösung	Pulverbindeter Roving			Hybridgarn		Folienimpregnierter Roving		Schmelzimpregnierter Roving				
	G	P	G*P	P	G*P	P	G*P	P	G*P			
Faser-Matrix-Verteilung	5	4	20	5	25	3	15	5	25			
Einstellbarkeit des FVG	3	1	3	1	3	5	15	3	9			
Konsolidierung	4	4	16	4	16	3	12	5	20			
Gesamtpunktzahl = $\Sigma(G*P)$		39			44		42		54			

Abb. A.2: Auswahlmatrix zur Prozessroutenanalyse – Lagenlegen [28]

Zu Kap. 6 Bestimmung der Drapierbarkeit:

Pyramide		Mittelstück		Hemisphäre	
Anzahl Segmente	Fläche [mm ²]	Anzahl Segmente	Fläche [mm ²]	Anzahl Segmente	Fläche [mm ²]
1	77,78	1	223,39	1	109,96
2	38,89	4	55,85	2	54,98
3	25,93	5	44,68	3	36,65
		6	37,23	4	27,49
		7	31,91		
		8	27,92		

Abb. A.3: Berechnung der Segmentfläche bei unterschiedlicher Segmentanzahl des Niederhalters

Segmentnummer	1	2 & 23	3 & 22	4 & 21	5-9 & 16-20	10 & 15	11 & 14	12	13
Segmentfläche	895	620	617	762	584	598	587	736	866
SOLL Flächenpressung N/mm ²	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Manometerdruck in bar *	1,1	0,8	0,8	1	0,7	0,8	0,7	0,9	1,1
SOLL Flächenpressung N/mm ²	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Manometerdruck in bar *	5,7	3,9	3,9	4,9	3,7	3,8	3,7	4,7	5,5

*Genauigkeit der Einstellung +/-0,1

Abb. A.4: Druckeinstellungen am „LCC Pole Peak“ zur gewünschten Flächenpressung

Methode	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
Kontaktheizung (Konduktion)	<ul style="list-style-type: none"> - Besserer Wärmetransport durch Anpressung - Aufheizzeit abhängig von Heizplattentemperatur, Ausgangstemperatur, Halbzeugdicke, Dichte, spez. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache Realisierung - Viele verschiedene Systeme auf dem Markt vorhanden - Mögliche Integration direkt in Tischkonstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Träge Temperaturregelung; - Haften des Thermoplasts an der Heizplatte - Polymerreste verursachen Faserabrieb (v.a. unter Niederhalter)
Heissgas (Konvektion)	<ul style="list-style-type: none"> - Phänomen der erzwungenen Konvektion 	<ul style="list-style-type: none"> - Homogene Wärmeverteilung - Vermeidung der Degradation des Thermoplast unter Sauerstoff (unter Schutzgas wie z.B. Stickstoffgas) 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ langsam - keine hohen Temperaturen - Gasturbulenzen führen zur Schädigung der Faser - Aufwändig in der Integration
IR-Strahler (Strahlung)	<ul style="list-style-type: none"> - Geometrien flächig-, linien- oder punktförmig - Nutzbare Strahlung zwischen 0,9 und 6µm 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Absorptionsgrad des FV Thermoplasten - Geringe Reflexion - Relativ kostengünstig - Kein Ankleben, kontaktlos - Einfacher und flexibler Einbau 	<ul style="list-style-type: none"> - Halbzeugtemperatur abhängig von verwendetem FV Thermoplasten - Erwärmung nur an der Oberfläche - Nur geringe Materialdicken realisierbar
Mikrowellen (Strahlung)	<ul style="list-style-type: none"> - Elektromagnetische Wellen von 1GHz - 100GHz - Dielektrische Erwärmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelle Aufheizung - Aufheizung von innen nach außen 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur nichtleitende Materialien (kein CFK) - Hoher Energiebedarf - Gute Abschirmung notwendig

Radiowellen	<ul style="list-style-type: none"> - Elektromagnetische Wellen von 1 – 100MHz - Dielektrische Erwärmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelle und homogene Aufheizung auf Grund der geringen Abschirmwirkung der Carbonfasern in diesem Frequenzbereich 	
Ultraschall	<ul style="list-style-type: none"> - Kombination von statischem Druck + hochfrequenten mechanischen Wellen 	<ul style="list-style-type: none"> - Gleichmäßige Aufheizung entlang der Dicke bei dünnen Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> - Längere Aufheizzeiten - Aufwändig in der Integration - Möglicher Faserabrieb
Induktion	<ul style="list-style-type: none"> - Hochfrequentes änderndes magnetisches Feld - Faser als Leiter 	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelle und homogene Aufheizung - Einfache Einbringung in vorhandene Tischkonstruktion - Relativ kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur leitende Materialien (CFK) - Flächige Erwärmung nur bei multidirektionalen Lagen möglich - Kontakt nötig
direkter elektrischer Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> - Erwärmung durch Nutzung des inneren Widerstand des FV Thermoplast 	<ul style="list-style-type: none"> - Homogene Aufheizung - Leichte Adaption an Prüfstand - relativ kostengünstig - Aufheizrate leicht durch Spannung und Stromstärke regelbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur leitende Materialien (CFK)

Abb. A.5: Bewertungsmatrix zu verfügbaren Heizquellen zur Integration in den „LCC Pole Peak“

Material	Faseranteil				Faseranteil			
	30%	40%	50%	60%	30%	40%	50%	60%
CFK + PA6	3,6kW	3,5kW	3,3kW	3,0kW	4,9kW	4,6kW	4,3kW	4,0kW
GFK + PA6	4,3kW	4,3kW	4,2kW	4,1kW	5,8kW	5,7kW	5,6kW	5,4kW

Abb.A.6: Berechnung benötigter Heizleistung für Heizzeit von 20 Sekunden (links) und 15 Sekunden (rechts)

Zu Kap. 9 Mechanische Versuche:

Proben- nummer	UD		QI		„CoCo“	
	B [mm]	t [mm]	B [mm]	t [mm]	B [mm]	t [mm]
1	35,360	2,370	35,337	2,370	35,420	2,276
2	35,360	2,427	35,383	2,403	35,397	2,283
3	35,377	2,457	35,320	2,460	36,330	2,437
4	35,237	2,380	35,320	2,510	35,667	2,370
5	35,600	2,377	35,377	2,357	34,737	2,393
6	35,287	2,323	35,410	2,390	34,900	2,493
7	35,147	2,287	35,273	2,460	36,160	2,443
8	35,323	2,410	35,490	2,443	34,793	2,330
Mittelwert	35,340	2,380	35,360	2,420	35,430	2,380
Standard- abweichung	0,131	0,055	0,067	0,053	0,606	0,078

Abb.A.7: Probenmaße der jeweils 8 Proben der 3 Lamine, UD, QI und „CoCo“

c. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Verschiedene Preforming-Prozessrouten zur Bauteilherstellung [2].....	2
Abb. 1.2:	Preformherstellung beim i3 [BMW].....	3
Abb. 1.3:	Zusammensetzen von mehreren Preforms zu einem Bauteil [3]....	3
Abb. 1.4:	Einschnitte zur Drapierung eines Helikopterspantes des NH90 [52].....	4
Abb. 1.5:	Komplexe Geometrien im BMW i3 [5] am Beispiel des Seitenrahmens	4
Abb. 1.6:	Bauteilspezifische Simulation der Hauptspannungsrichtungen [Audi AG].....	5
Abb. 1.7:	Mechanismen zur Anpassung der Steifigkeit [65].....	6
Abb. 1.8:	Unterschiede in der Bauteilauslegung, QI vs. UD [5]	6
Abb. 1.9:	BMW i3 - Unterteilung der Bauteile nach Design [3].....	7
Abb. 2.1:	Bewertung der Wertigkeiten von Fertigungsvarianten [7, überarbeitet Eisenhauer].....	9
Abb. 2.2:	Vergleich der E-Module unterschiedlicher CFK-Laminatarchitekturen ($\alpha=60\%$) [8].....	10
Abb. 2.3:	Lastpfadgerechte Verstärkung des Unterbodens [WorldCarFans.com, überarbeitet von Eisenhauer].....	11
Abb. 2.4:	Lastpfadgerechte B-Säule mit Lasteinleitung in Schweller und Dachstruktur [Audi, überarbeitet von Eisenhauer]	11
Abb. 2.5:	Gliederung und Methodik der Arbeit.....	13
Abb. 2.6:	Entwicklungsthemen.....	14
Abb. 3.1:	Endkonturnahes Gewebe [Gerster TechTex].....	16
Abb. 3.2:	Lastoptimierte Faserarchitektur und maßgeschneidertes Halbzeug [Compositence].....	16
Abb. 3.3:	Grundprinzip der Kettfadenversatzeinheit des MAG-KV-Verfahrens und Detailansicht der Kettfadenversatzeinheit [10]....	17
Abb. 3.4:	Musterablage eines 24k-Kohlenstofffaserrovings auf einem Glasfasergrund (links), Beispiele unterschiedlicher realisierbarer Fadenablagemuster (rechts) [11]	18
Abb. 3.5:	Open Reed Weaving [93].....	18
Abb. 3.6:	EU-Projekt EMBROIDERY: topologisch optimierter Stuhl hergestellt mittels TFP-Technologie [94].....	19
Abb. 3.7:	Trägermaterial mit aufgestickten Verstärkungen (links) und umgeformtes Faserverbundbauteil (rechts) [13].....	20
Abb. 3.8:	Prinzip des Fadenvorrates außerhalb der Bauteilkontur [15]	21
Abb. 3.9:	Mittels TFP hergestelltes Halbzeug (links) und geformtes hutartiges Bauteil (rechts) [15]	21

Abb. 3.10: Kettengewirk mit Fadenreserven vor (links) und nach (rechts) dem Drapieren [16].....	22
Abb. 3.11: System zur Einbringung der Fadenreserven [16]	22
Abb. 3.12: System zur Einbringung der Fadenreserven [17]	23
Abb. 3.13: Berechnung der Fadenreserven, am Beispiel einer Halbkugel [17]	23
Abb. 3.14: 3 Stufen der Drapierbarkeitsbestimmung von Halbzeugen.....	24
Abb. 3.15: Wichtige Parameter für Auswahl eines Drapierprüfstandes	25
Abb. 3.16: Skizze des Drapierprüfstandes von University Nottingham und Glasgow [18]	26
Abb. 3.17: Drapierprüfstand von University Cranfield [19]	26
Abb. 3.18: Drapierprüfstand der Université d’Orléans, Université de Lyon und EADS Innovation Works [20].....	27
Abb. 3.19: Drapierprüfstand der Université d’Orléans und Université de Lyon, Aufbau (links) und Drapierform mit Niederhalter (rechts) [21]	27
Abb. 3.20: Drapierprüfung am ITV.....	27
Abb. 3.21: Drapiersimulation am ITV Denkendorf [22].....	28
Abb. 3.22: ITA-Drapierprüfstand I [ITA RWTH Aachen]	28
Abb. 3.23: Drapierprüfstand DRAPETEST [TexTechno] (links), detailliert [FIBRE] (rechts).....	29
Abb. 3.24: Drapierprüfstand der University of Surrey [24]	29
Abb. 3.25: ITA-Drapierprüfstand II [ITA RWTH Aachen].....	30
Abb. 3.26: Drapierprüfstand der KU Leuven [www.mtm.kuleuven.be].....	30
Abb. 3.27: Schematisch dargestellter Prüfstand mit Double-Diaphragma-Verfahren [25, überarbeitet Eisenhauer]	31
Abb. 3.28: Drapierprüfstand der TU Delft [26]	31
Abb. 4.1: Generierung des Zuschnitts, Stand der Technik im Vergleich zum Halbzeug „CoCo“	33
Abb. 4.2: Umwandlung eines CATIA Teils in eine Punktwolke zur Bestimmung der Bauteilkomplexität.....	34
Abb. 4.3: Oberflächenverstreckverhältnis für einfache Geometrien [27], mit h =projizierte Höhe	34
Abb. 4.4: Drapierform „Pole Peak“ mit Oberflächenlängungsverhältnissen.....	35
Abb. 4.5: Drapierform „Pole Peak“ mit Oberflächen- und Grundflächenlänge quer zur Hemisphäre.....	35
Abb. 4.6: Oberflächenvergrößerungsfaktor R_a der Form „Pole Peak“	36
Abb. 4.7: Skizze zur Berechnung der Rovingposition auf der x-Achse.....	37
Abb. 4.8: Mittelpunkte der Rovings zur Positionierung auf x-Achse	37
Abb. 4.9: Position der Intervalle auf der projizierten Fläche der Drapierform	38
Abb. 4.10: Berechnung der Position der Verstärkungsfäden auf der x-Achse vom Bauteil	38

Abb. 4.11: Prinzip der Berechnung der Fadenreservelängen	39
Abb. 4.12: Berechnete Rovinglängen mit Fadenreserven für die halbe Form „Pole Peak“	40
Abb. 4.13: Fadenreserven in z-Richtung mit engen Fixierungspunkten zur Drapierung einer Halbkugel.....	41
Abb. 4.14: Fadenreserven in z-Richtung mit unterschiedlichen Schlaufenhöhen zur Drapierung einer Halbkugel.....	41
Abb. 4.15: Fadenreserven in z-Richtung zur Drapierung einer Halbkugel, radial verlaufende Verstärkungsfasern	41
Abb. 4.16: Anlagenkonzept zur Umsetzung der Fadenreserven in z-Richtung.....	42
Abb. 4.17: Umsetzung der Fadenreserven in x/y-Richtung am Beispiel des „Pole Peaks“.....	43
Abb. 4.18: Anlagenkonzept zur Umsetzung der Fadenreserven in x/y-Richtung [28]	43
Abb. 4.19: Skizze der Faserablage auf dem Trägermaterial	44
Abb. 4.20: Prozesskette der Faserablage bei unabhängiger Matrix.....	45
Abb. 4.21: Prozesskette der Faserablage bei duroplastischer Matrix	45
Abb. 4.22: Prozesskette der Faserablage bei thermoplastischer Matrix	46
Abb. 4.23: Übersicht der Materialkombinationen für Trägermaterial	47
Abb. 4.24: Versuchsmatrix zum Längungsverhalten des Trägermaterials	48
Abb. 4.25: Skizzierung der Versuchsdurchführung zum Längungsverhalten des Trägermaterials	48
Abb. 4.26: Drapierung von 1 Lage Glasfaser-Vlies	50
Abb. 4.27: Drapierung von Glasfaservlies mit TP-Folie von EMS Chemie unter Temperatur.....	51
Abb. 4.28: Drapierung einer Lage der TP Folie von LANXESS	52
Abb. 4.29: Drapierung von Glasfaser-Gewirk mit TP Folie von EMS Chemie	53
Abb. 4.30: Faserführungseinheit mit 4 Motoren und 2 Federn.....	54
Abb. 4.31: Visualisierung des Verfahrensweges der Motoren und dem entstehenden Faserablagen [TEC-KNIT CCTT GmbH]	55
Abb. 4.32: Ablegeversuche von Carbonrovings auf EP-Folie.....	56
Abb. 4.33: Ablegeversuch mit 5 verschiedenen Rovings	58
Abb. 4.34: Filamentverlauf bei 45 °-Richtungsänderung eines GRAFIL- (links) und SIGRAFIL (rechts)-Rovings	59
Abb. 4.35: Verlauf der Filamente bei Fasersteering, 24k Roving flach	60
Abb. 4.36: Bemaßung der Geometrie „Pole Peak“	61
Abb. 4.37: „CoCo“-Halbzeug für die Geometrie „Pole Peak“	61
Abb. 5.1: Bild 1 des Patents WO2013/ 060 468 A1 [29]	62
Abb. 5.2: Bild 4 des Patents WO2013/ 060 468 A1 [29]	63
Abb. 5.3: Bild 2 des Patents WO2014/ 060 092 A1 [30]	63
Abb. 5.4: Konzept zur Anlagenentwicklung.....	64
Abb. 5.5: Auswahlmatrix zur Prozessroutenanalyse	65

Abb. 5.6:	Prozessroute für Anlagenentwicklung.....	66
Abb. 5.7:	Mit der Versuchsanlage zu realisierende Faserablagen.....	66
Abb. 5.8:	Von der Prozessroute (a.) zur Prinzipskizze (b.) der „CoCo“- Experimentalanlage [b.: Horstmann].....	67
Abb. 5.9:	Kammsystem als Faserführungssystem, a. Skizze Draufsicht, b. Skizze Vorderansicht, c. Foto Draufsicht [a.,b.: Horstmann] ...	67
Abb. 5.10:	Feder als Faserführungssystem.....	68
Abb. 5.11:	Unterschiedliche Faserablage bei 2 Kammeinstellungen.....	69
Abb. 5.12:	Unterschiedliche Abmaße der Ablage bei zwei Kammeinstellungen.....	69
Abb. 5.13:	Unterschied bei Ausführung des seitlichen Versatzes zwischen Kamm- und Federsystem.....	70
Abb. 6.1:	Prinzip des Drapierprüfstandes „LCC Pole Peak“	71
Abb. 6.2:	CATIA-Skizzen der Drapierform „Pole Peak“ [39].....	72
Abb. 6.3:	CATIA-Part der Drapierform Pole Peak	73
Abb. 6.4:	Einteilung der Drapierform „Pole Peak“	73
Abb. 6.5:	Erste Konzeptidee für einen segmentierten Niederhalter [MICADO]	74
Abb. 6.6:	Finale Konzeptidee für den segmentierten Niederhalter	75
Abb. 6.7:	Berechnung der Standardabweichung bei unterschiedlicher Segmentanzahl des halben Niederhalters	75
Abb. 6.8:	Aufteilung des Niederhalters in 23 Segmente	76
Abb. 6.9:	Varianten von Stößen zwischen den einzelnen Segmenten	76
Abb. 6.10:	Darstellung zur Klemmung der Rovings in den Hauptrichtungen 0 °, 90 °, +45 °, -45 °	77
Abb. 6.11:	Konzept für Temperierung	78
Abb. 6.12:	Übersicht der Wellenlänge für im Automobilbereich eingesetzte Thermoplaste	79
Abb. 6.13:	Berechnung benötigter Wärmemenge	80
Abb. 6.14:	Berechnung benötigter Heizleistung für Heizzeit von 10 Sekunden (links) und 30 Sekunden	80
Abb. 6.15:	Benötigte Heizleistung bei variabler Aufheizdauer für CFK PA6, 50% v_f	81
Abb. 6.16:	Leistungsverluste an den Strahlerenden bei einem Abstand von 170 cm	81
Abb. 6.17:	Kabelheizelemente von Watlow [WATLOW].....	82
Abb. 6.18:	Einlegen der Heizkabel an Drapiertischunterseite	82
Abb. 6.19:	Verdrehsicherer Einbau der Kraftmessdose, Ausgleich von Störgrößen	84
Abb. 6.20:	Messung der Drapierkraft zum Beweis der Reproduzierbarkeit ...	84
Abb. 6.21:	Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“	85
Abb. 6.22:	Drapierprüfstand „LCC Pole Peak“ mit IR-Strahler	86
Abb. 7.1:	Prinzip des Tiefziehens.....	88

Abb. 7.2:	Tiefziehen eines Hohlkörpers mit Ausbildung von „charakteristischen Dreiecken“ [81]	88
Abb. 7.3:	Spannungszustände beim Tiefziehen [80]	89
Abb. 7.4:	Simulation von unterschiedlichem Materialeinzug bei Materialstacks mit unterschiedlichen Faserausrichtungen, am Beispiel eines Gewebes [89]	89
Abb. 7.5:	Prinzip des Streckziehens mit reservenbedingter Verformung... ..	90
Abb. 7.6:	Drapiermechanismen beim „CoCo“ Material – Streckziehen und Streckung	90
Abb. 7.7:	Vereinfachtes Strukturmodell der biaxiale Deformationstheorie; Entkopplung der Faserdehnung und -kompaktierung [83]	92
Abb. 7.8:	Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte bei Fasergleiten [92]	93
Abb. 7.9:	Schematische Darstellung des Mechanismus Fasergleiten	93
Abb. 7.10:	Drapieren über eine nicht abwickelbare Geometrie	94
Abb. 7.11:	Schematische Darstellung einer Biegung eines zweilagigen Halbzeuges	94
Abb. 7.12:	Schematische Darstellung des Mechanismus Scherung und der Fehlerbildung Welle an Hand eines Gewebes [92]	95
Abb. 7.13:	Schematische Darstellung des Mechanismus Scherung an Hand eines UD-Halbzeuges	95
Abb. 7.14:	Fehlerbild von Gaps in einem unidirektionalen MAG	96
Abb. 7.15:	Fehlerbild von Wellen in einem bidiagonalen MAG (+45 ° / -45 °)	96
Abb. 7.16:	Skizze (links) und Fehlerbild (rechts) von Schlaufen in einem unidirektionalen Gewebe	97
Abb. 7.17:	Fehlerbild von Mäandern in einem bidiagonalen MAG (+45 ° / -45 °)	97
Abb. 7.18:	Verwendete Materialien für Material- und Drapierprüfung	98
Abb. 7.19:	Schematischer Aufbau des Picture-Frame-Tests	99
Abb. 7.20:	Picture Frame Test eines biaxialen MAG mit Wirkfaden in Zugrichtung	100
Abb. 7.21:	Kraftverlauf bei Picture-Frame-Test, getestete Materialien im Vergleich	100
Abb. 7.22:	Picture Frame Test eines biaxialen MAG mit Wirkfaden quer zur Zugrichtung	101
Abb. 7.23:	Picture Frame Test eines UD-Gewebes	102
Abb. 7.24:	Picture-Frame-Test eines UD-Geleges	103
Abb. 7.25:	Picture-Frame-Test eines Gewebes	103
Abb. 7.26:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Picture-Frame-Tests	104
Abb. 7.27:	Materialeinzug beim Drapieren über die Drapierform „Pole Peak“	105
Abb. 7.28:	Verschertes Gewebe, Hemisphärenbereich	105

Abb. 7.29: Verschertes biaxiales MAG, Wirkfaden quer zur Zugrichtung, Hemisphärenbereich	106
Abb. 7.30: Verschertes UD-Gelege, Hemisphärenteil (Links) und Pyramidenteil rechts (rechts)	106
Abb. 7.31: Verschertes biaxiales MAG, Wirkfaden in Zugrichtung, Fehlerbild „Wellen“, Hemisphärenbereich (links) und Pyramidenteil links (rechts)	107
Abb. 7.32: Verteilung der Flächenlast auf der Drapierform „Pole Peak“	107
Abb. 7.33: Spannungszustände im Textil im drapierten Zustand	108
Abb. 7.34: Gaps und Winkeländerung eines UD-Gewebes	108
Abb. 7.35: Gaps und Winkeländerung eines UD-Geleges	108
Abb. 7.36: Gaps beim Gewebe auf Grund von Zug-Spannungen	109
Abb. 7.37: Gewebe und UD-Gewebe beansprucht auf Zug und Druck, leichte Schlaufenbildung	109
Abb. 7.38: Unterschiedliche Durchdrückkräfte bei verschiedenen Reibwerten	110
Abb. 7.39: Ursache und Wirkung der verschiedenen Drapiermechanismen	111
Abb. 7.40: Carbonrovings zwischen TP Folien von EMS und LANXESS mit Fadenreserven	112
Abb. 7.41: Drapierung unter Temperatur von Carbonrovings zwischen TP Folien	113
Abb. 7.42: Carbonrovings fixiert zwischen Glasfaser-Gewirk und TP-Folie von EMS Chemie	113
Abb. 7.43: Drapierung unter Temperatur von Carbonrovings zwischen Gewirk und TP Folie	114
Abb. 7.44: Drapierung des Trägermaterials	115
Abb. 7.45: Vergleich der Drapierfehler	116
Abb. 8.1: Prozesskette „Von der Faser bis zum Bauteil“	117
Abb. 8.2: Drapierprozesskette	118
Abb. 9.1: Verlauf der Hauptspannungstrajektorien in Zug bei einem isotropen Laminat mit Loch [62]	120
Abb. 9.2: Oberfläche der Faserablage mit leichten Gaps	121
Abb. 9.3: Laminat mit lastpfadgerechter Faserausrichtung um die Bohrung	122
Abb. 9.4: Faserverlauf der lastpfadgerechten Proben um die Bohrung als e-Funktion	122
Abb. 9.5: Lastpfadgerechte Probe, mit Loch (rechts), mit zufälligem Muster (Mitte) für die Aramis-Messung und die versagte Probe (rechts)	123
Abb. 9.6: Steifigkeit und Kerbzugfestigkeit der OHT-Proben, Vergleich UD, QI und „CoCo“	123
Abb. 9.7: Abbildung der Spannung in x-Richtung bei 40kN Zugbelastung, UD-Probe	124

Abb. 9.8: Abbildung der Spannung in x-Richtung bei 40kN Zugbelastung „CoCo“-Proben	125
Abb. 9.9: Abbildung der Spannung in x-Richtung bei 30kN Zugbelastung, QI-Proben	125
Abb. 9.10: OHT, triaxiales Gelege [0°/-45°/+45°] (links) und TFP Probe [C1/-45°/+45°] (rechts) [70]	126
Abb. 9.11: Vorschlag einer Testgeometrie für variableaxiale Strukturen	127
Abb. 10.1: Wettbewerb der Materialien: Domstrebe des R8 aus Aluminium, pulverbeschichtetem Magnesium und CFK (von rechts) [Audi]	128
Abb. 10.2: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses einer Domstrebe; materialabhängig	129
Abb. 10.3: Phasen des Innovationsprozesses in der Technologieentwicklung [Audi, überarbeitet von Eisenhauer] ...	129
Abb. 10.4: Reifegradbeurteilung der Technologie „CoCo“	130
Abb. 10.5: Herstellungs- und Vertriebskonzept – Tier 1-Supplier	132
Abb. 10.6: Auflistung der Kosten pro Bauteil für 3 Modelle	134
Abb. 10.7: Auflistung der Kosten pro Bauteil für 3 Modelle nach Prozessoptimierung	134
Abb. 10.8: Einsparpotential bei den Fertigungskosten durch Prozessoptimierung	135
Abb. A.1: Auswahlmatrix zur Prozessroutenanalyse – Lagenlegen [28]	142
Abb. A.2: Auswahlmatrix zur Prozessroutenanalyse – Lagenlegen [28]	142
Abb. A.3: Berechnung der Segmentfläche bei unterschiedlicher Segmentanzahl des Niederhalters	142
Abb. A.4: Druckeinstellungen am „LCC Pole Peak“ zur gewünschten Flächenpressung	143
Abb. A.5: Bewertungsmatrix zu verfügbaren Heizquellen zur Integration in den „LCC Pole Peak“	144
Abb. A.6: Berechnung benötigter Heizleistung für Heizzeit von 20 Sekunden (links) und 15 Sekunden (rechts)	144
Abb. A.7: Probenmaße der jeweils 8 Proben der 3 Lamine, UD, QI und „CoCo“	145

B. Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Lässig, R.; Dr. Eisenhut, M.; Mathias, A.; Dr. Schulte, R.T.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T.; Dr. Begeman, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen, 2012
- [2] Eisenhauer, C.: Preformtechnologien für den hochvolumigen Einsatz im Fahrzeugbau, IHK Schulungsunterlagen, 2014
- [3] Starke, J.: BMW i3 and challenges for CFRP; Vortragsunterlagen International AVK Conference 06.-07. October 2014, Düsseldorf
- [4] Nezami, F.N.; Gereke T.; Hübner, M.; Döbrich, O.; Cherif, C.: "Factors of Process Robustness in Multilayer Preforming of Carbon Fibre Reinforcements"; ECCM16 - 16TH European Conference on Composite Materials, Seville, Spain, 22-26 June 2014
- [5] Zogg, M.: Faserverstärkte Kunststoffe, Vorlesungsunterlagen Strukturlabor ETH Zürich, 2013
- [6] Pfefferkorn, T.: Vom Laminat zum Bauteil, Kunststoffe 12/2013, Carl Hanser Verlag München
- [7] MT Aerospace: Automatisiertes Legen von faserverstärkten Thermoplasten, Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium am 15. Mai 2013 bei DLR
- [8] Durst, K.G.: Beitrag zur systematischen Bewertung der Eignung anisotroper Faserverbundwerkstoffe im Fahrzeugbau; Doktorarbeit Universität Stuttgart, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
- [9] BMBF (Hrsg.): Abschlussbericht des BMBF-Projekts "BIOTEX". 2009
- [10] Heinrich, G.: Bionisch verstärkte Multiaxialgelege. Vortrag auf der Internationalen Fachtagung "Bionik - Innovationsquelle für Textilien und Faserverbundbauteile", Chemnitz, 2010
- [11] Heinrich, G.: Bionisch verstärkte Multiaxialgelege. Vortrag auf der Internationalen Fachtagung "Bionik - Innovationsquelle für Textilien und Faserverbundbauteile", Chemnitz, 2010
- [12] Spickenheuer, A.: Zur fertigungsgerechten Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteilen für den extremen Leichtbau auf Basis des variabelaxialen Fadenablageverfahrens Tailored Fiber Placement, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2014
- [13] EP 0 567 845 B1
- [14] EP 0 873 849 A3
- [15] EP 0 873 849 A3
- [16] EP 680 529 A
- [17] EP 0 867 548 A3
- [18] Lin H, Wang J, Long A, Clifford M, Harrison P. Predictive modelling for optimization of textile composite forming. *Composites Science and Technology* 2007;67(15-16):3242–52.
- [19] Vinot L. *Advanced Textile Fabrics Draping*, Masterarbeit, Cranfield, 2005.

- [20] Soulat D, Allaoui S, Chatel S. Experimental device for the preforming step of the RTM process. *Int J Mater Form* 2009;2009(2):181–4.
- [21] Allaoui S, Boisse P, Chatel S, Hamila N, Hivet G, Soulat D et al. (eds.). Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape: *Composites: Part A* 42 (2011) 612–622. München: Elsevier; 2011.
- [22] Siebenpfeiffer, W.: *Leichtbau – Technologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung – Konzepte*; Springer
- [23] Palinsky, A.; Eisenhauer, C; Bünker, J.; Ischtschuk, L.: Effizientere Faserverbundherstellung durch den Einsatz funktionalisierter Multiaxialer Gelege. In: Dörfel, A. (Ed.): *Proceedings of the 2nd Aachen-Dresdner International Textile Conference*, Dresden, Dezember, 2008
- [24] Mohammed, U.; Lekakou, C.; Bader, M.G.: Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics. *Composites Part A: applied science and manufacturing* 2000: 1409-1420.
- [25] Gutowski, T. G., Dillon, G., Chey, S. und Li, H.: *Laminate wrinkling scaling laws for ideal composites*, 1995.
- [26] Nino, G. F. und Bergsma, O. K.: *Structural Evaluation of Woven Composites*, 2007.
- [27] James, L.; Throne, Joachim Beine: „*Thermoformen: Werkstoffe – Verfahren – Anwendungen*“; München; Wien; Hanser 1999; ISBN 3-446-21020-2
- [28] Fuhrer R.: *Prozessroutenanalyse und Prozessentwicklung von Herstellungsverfahren für thermoplastische Composite-Bauteile*; SA 2014-0032, Technische Universität München, Lehrstuhl für Carbon Composites
- [29] WO2013/ 060 468 A1
- [30] WO2014/ 060 092 A1
- [31] Gutowski, T. G., Dillon, G., Chey, S. und Li, H.: “*Laminate wrinkling scaling laws for ideal composites*”, 1995.
- [32] Nino, G. F.; Bergsma, O. K.: *Structural Evaluation of Woven Composites*, 2007.
- [33] Textile Book Publishers, I. N. (Herausgeber): *Handbook of Textile Testing and Quality Control*. Textile Book Publishers, I. N.C., New York, NY, 1960.
- [34] Creech, G. und Pickett, A. K.: Meso-modelling of Non-Crimp Fabric composites for coupled drape and failure analysis. [Url: http://www.springerlink.com/content/10305u42n64th712/fulltext.pdf](http://www.springerlink.com/content/10305u42n64th712/fulltext.pdf), 2006. [Online; accessed November-2010].
- [35] Falk, E.-M.: Multiaxialgelege als Halbzeug für dreidimensionale Geometrien. *Kettenwirk-Praxis*, 2007(2):23–26, 2007. [Online; accessed November-2010].
- [36] TexTechno, Produktbeschreibung: Drapetester
- [37] Sargent, J.: *Benchmark study of Finite Element Models for Simulating the Thermoforming of woven-fabric reinforced composites*, 2010.
- [38] Hamila, N.; Vidal-Sallé, E.: Simulation of textile composite reinforcement forming. [Url: http://lamcos.insa-lyon.fr/Posters/Posters/pdf/10.pdf](http://lamcos.insa-lyon.fr/Posters/Posters/pdf/10.pdf), 2010. [Online; accessed November-2010].
- [39] Wolf, M.: *Drapieren von flächigen Halbzeugen zur Anwendung in der Luftfahrt-industrie*; SA 2011-0009; Technische Universität München, Lehrstuhl für Carbon Composites

- [40] Spieler, C.: Ressourcenschonung durch einstufige Temperierung in einer Prozesskette für endlosfaserverstärkte thermoplastische Strukturbauteile; Abschlussbericht. 2013.
- [41] Heraeus Produktbeschreibung: Infrared Basics and Technology
- [42] Puls, T.: CO₂ –Regulierung für PKW – Fragen und Antworten zu den europäischen Grenzwerten für Fahrzeughalter; Institut der deutschen Wirtschaft Köln; 2013
- [43] Ehinger, C.A.: Automatisierte Montage von Faserverbundwerk-Vorformlingen; Forschungsberichte IWB, Band 268, Technische Universität München, 2012
- [44] Christie, C.A.: Task 3 – Material Strength Properties and Design Values; Federal Aviation Administration, 1995
- [45] Derks, M.: CFK-Technologien im Automobilbau; DLR Wissenschaftstage, Braunschweig, 2007, BMW Group München
- [46] WO2011/ 128 110 A1
- [47] Nino, G. F.; Bergsma, O. K.; Bersee, H.E.; Beukers, A.: Influence of Fiber Orientation on Mechanical Performance for Thermoformed Composites; 16th International Conference on Composite Materials; Kyoto, 2007
- [48] Velji, A.; Kubach, H.; Spicher, U.: Beitrag zur Versachlichung der Diskussion: „Verbrennungsmotor gegen Elektromotor“; Karlsruher Innovationsabend Automobil, Pfitztal, 2010
- [49] Drechsler, K.: Carbonfaserverstärkter Kunststoff im Auto; Mobility 2.0; April 2012
- [50] Rüger, O.; Fröhlich, F.: Endkonturnahe Fertigung von CFK-Bauteilen; Lightweight Design, August 2011, Volume 4, Issue 4
- [51] Drechsler, K.: CFK – Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Märkten lernen kann; C.C.e.V. Automotive Symposium; Neckarsulm, Juni 2010
- [52] Schneeberger, M.; Spanner, H.; Weimer, C.: CFK-Spante in Prepreg und VAP-Bauweise; Seminar 2007; Universität der Bundeswehr München, Institut für Leichtbau
- [53] The EU directive No. 443/2009, Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community’s integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles, 23 April 2009
- [60] Heuss, R.; Müller, N.; van Sintern, W.; Starke, A.; Tschiesner, A.: Advanced Industries – Lightweight, heavy impact; McKinsey & Company, Februar 2012
- [61] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung - Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2008, Springer Verlag, eISBN: 978-3-540-78403-6
- [62] Tosh, M.W.; Kelly, D.W.: On the design, manufacture and testing of trajectorial fibre steering for carbon fibre composite laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 31, pp. 1047-1060, 2000
- [63] Hazra, K.; Saverymuthapulle, M.; Hawthorne, M.; Stewart, D.L.; Weaver, P.; Potter, K.: Investigation of Mechanical Properties of Tow Steered CFRP Panels; ACCIS, University of Bristol, ICCM17proceedings

- [64] Jegley, B.F.; Tatting, B.F.; Gürdal, Z.: Optimization of Elastically Tailored Tow-Placed Plates with Holes; American Institute of Aeronautics and Astronautics; NASA-AIAA-2003-1420
- [65] Ribeiro, P.; Akhavan, H.; Teter, A.; Warminski, J.: A review on the mechanical behaviour of curvilinear fibre composite laminated panels; Journal of Composite Materials 2014, Vol. 48(22) 2761–2777
- [66] Blom, A.W.; Lopes, C.S.; Kromwijk, P.J.; Gürdal, Z.; Camanho, P.P.: A Theoretical Model to Study the Influence of Tow-drop Areas on the Stiffness and Strength of Variable-stiffness Laminates; Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 43, No. 05/2009
- [67] WO2009/ 042 225 A2
- [68] Zhao, N.: Nähen als Montageverfahren textiler Preforms und Wirkungen der Nähte auf lokale mechanische Eigenschaften thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe; Dissertation Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2009
- [69] Mattheij, P.; Gliesche, K.; Feltin, D.: Tailored Fiber Placement – Mechanical Properties and Applications; Journal of Reinforced Plastics and Composites, 774_86, 1998
- [70] Spickenheuer, A.; Bittrich, L.; Uhlig, K.; Richter, E.; Gert, H.: Variable-axial fibre design – A Strategy to Utilize Material Properties for Composites Lightweight Parts more Efficiently; SETEC 14, Tampere; 2014
- [71] Nixon-Pearson, O.J.; Hallett, S.R.: An Experimental Investigation into Fatigue Damage Development in Open and Bolted Hole Specimens; ECCM16, Sevilla; 2014
- [72] ten Thije, R.H.W.; Loendersloot, R.; Akkerman, R.: Material characterisation for Finite Element simulations of draping with non-crimp brics University of Twente, Twente Institute of Mechanics
- [73] Berthold, U.: Beitrag zur Thermoformung gewebeverstärkter Thermoplaste mittels elastischer Stempel. Technische Universität Chemnitz, 2001
- [74] Long, A.C.: Composite forming technologies, 2007, Woodhead Publishing Limited eISBN-13: 978-1-84569-253-7
- [75] Gereke, T.; Döbrich, O.; Hübner, M.; Cherif, C.: Experimental and computational composite textile reinforcement forming. A review. Compos Part A-Appl S., 46:1-10, 2013
- [76] Nezami, F.N.; Gereke, T.; Cherif, C.: Automated preforming of woven fabrics with segmented blank holders: a multi scale experimental approach, In TexComp-11, 16-20th September 2013, Leuven
- [77] Hübner, M.; Diestel, O., Seenewald, C.; Gereke, T.; Cherif, C.: Simulation of the Drapability of Textile Semi-Finished Products with Gradient-Drapability Characteristics by Varying the Fabric Weave. Fibres & Textiles in Eastern Europe. 20: 88-93, 2012
- [78] Ermanni, P.: Composites Technologien: Skript zur ETH-Vorlesung 151-0307-00L; Skript. Zürich; 2007

- [79] Werner, E.: Werkstoffkunde I: Vorlesungsbegleitendes Skriptum. Skript; München; 2011
- [80] Hallfeldt, T.: Untersuchungen zur Beschreibung des Tief- und Streckziehverhaltens höherfester Feinbleche aus Stahlwerkstoffen; Düsseldorf: VDI-Verl; 2002
- [81] Tschätsch H.: Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge; 8th ed. Wiesbaden: Vieweg; 2005
- [82] Grahnert, R.: Die Reibungsvorgänge im Flanschbereich beim Tiefziehen rechteckiger Teile; Düsseldorf: VDI Verlag; 1985
- [83] Launay, J.; Hivet, G.; Duong, A.; Boisse, P.: Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements; *Composites Science and Technology* 2008; 68:506–15
- [84] Hamila, N.; Boisse, P.: Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element; *Composites Part B: engineering* 2008; 39:999–1010
- [85] Gereke, T.; Döbrich, O.; Hübner, M.; Cherif, C.: Experimental and computational composite textile reinforcement forming: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2013;46:1–10.
- [86] Boisse, P.; Zouari, B.; Daniel, J.: Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2005;37:2201–12
- [87] Industrie Hansa Consulting & Engineering: Von vielen Einzelteilen zu einem Ganzen. [20.01.15]; <http://www.industriehansa.de/de/leistungen-storage/aviation/struktur/primaerstruktur.html>.
- [88] Kuhn, W.: Untersuchungen über das Streckziehen von Stahlhülsen mit mehreren Ziehringen; Dissertation; ETH Zürich; 1958
- [89] Klöppel, T.; Finckh, H.: RTM-Prozesssimulation mittels der Finiten-Elemente-Methode basierend auf Mikro-CT Untersuchungen; Präsentation ITC Aachen Dresden, 2014
- [90] Effenberger, M.: Entwicklung eines Prozesses zur Herstellung von drapierten Probekörpern und Vergleich der Drapierfehler; Studienarbeit; TU Bremen; 2007
- [91] Doege, E.: Untersuchung über die maximal übertragbare Stempelkraft beim Tiefziehen rotationssymmetrischer zylindrischer Teile; 1963
- [92] Braun, M.: Hoch drapierbare, konturgetreue, variabelaxiale Verstärkungstextilien für faserverstärkte Kunststoffe, Semesterarbeit, Technische Universität München, 2015
- [93] Lenz, C.; Gries, T.: High performance textile structures for composites through open reed weaving; ITMA Research and Innovation Speakers Platform, Milan, Italian, November 2015
- [94] <https://www.ipfdd.de/de/abteilungen-und-gruppen/forschungsplanung-und-koordinierung/technologietransfer/applikationslabor/variabelaxiale-faserverbundbauweisen/>
- [95] Hofer, S.: Analyse der prozesstechnischen und materialbedingten Einflussfaktoren auf den Drapierprozess von Carbonfaser-Gelegen, Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012

