

# **IVW - Schriftenreihe Band 121**

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

---

**Timo Grieser**

**Textiles Formgebungsverhalten  
beim kontinuierlichen Preforming**

### Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer  
Erwin-Schrödinger-Straße  
TU Kaiserslautern, Gebäude 58  
67663 Kaiserslautern  
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Technische Universität Kaiserslautern  
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2016

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.  
ISSN 1615-021X  
ISBN 978-3-944440-17-0

# **Textiles Formgebungsverhalten beim kontinuierlichen Preforming**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Timo Grieser**

aus Kaiserslautern

Tag der mündlichen Prüfung:	24. März 2016
Prüfungsvorsitzender:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Frank Balle
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski

D386



## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2010 bis 2015 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.

Mein herzlichster Dank gilt meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Peter Mitschang, welcher mir die Möglichkeit bot in einem exzellenten Forschungsumfeld zu arbeiten und als Wissenschaftler zu reifen. Des Weiteren bedanke ich bei Herrn Jun.-Prof. Dr.-Ing. Frank Balle für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie bei Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski für die Zweitbegutachtung meiner Arbeit.

Während meiner Tätigkeit am IVW wurde ich stets von allen Kolleginnen und Kollegen bei meinen Vorhaben unterstützt und die zahlreichen Diskussionen waren eine essentielle Grundlage für den erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation. Besonders die Zusammenarbeit mit meinen Kollegen am D.A.Z. werde ich zukünftig sehr vermissen. An dieser Stelle möchte ich mich in besonderem Maße bei Volker Disandt bedanken, welcher in stundenlangen Sitzungen eine Vielzahl von Versuchsanlagen mit mir geplant und anschließend erfolgreich umgesetzt hat. Den weiteren D.A.Z.-Mitarbeitern Holger Franz, Stefan Giehl, Julia Schröck, Karl-Heinz Hammer und Roman Schüler danke ich ebenfalls für die Unterstützung und die besonders angenehme gemeinsame Zeit.

Zu einem großen Dank verpflichtet bin ich gegenüber Andrea Hauck, welche meine schriftlichen Ausarbeitungen von Fehlern befreit hat und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Ich danke auch David Becker für die zahlreichen Diskussionen, Sport- und Verpflegungseinheiten, Hilfestellungen sowie humorvollen Ablenkungen vom Arbeitsalltag. Ohne Dich wäre die Zeit am IVW nur halb so gut gewesen.

Ich bedanke mich ebenfalls bei allen gegenwärtigen und ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeitern der Abteilung Verarbeitungstechnik. Speziell nennen möchte ich hierbei Thomas Bayerl, Lars Moser und Gunnar Rieber, welche mich zu Beginn meiner Zeit am IVW unterstützt haben. Des Weiteren danke ich meinem ehemaligen Bürokollegen Matthias Arnold für die entspannte und lustige Zusammenarbeit sowie René Holschuh, Marcel Christmann, Klaus Hildebrandt, Jens Mack, Dennis Maurer, Oliver Rimmel, Matthias Domm, Florian Gortner, Jovana

Džalto, Martina Hümbert, Gihune Jung, Florian Kühn, Stephan Becker und Jan Eric Semar. Auch den Laboringenieuren und Technikern der Abteilung 3 möchte ich meinen tiefen Dank ausdrücken. Selbstverständlich danke ich auch allen weiteren Mitarbeitern und Alumni des IVW!

Eine Dissertation ist bekanntlich nicht alleine zu bewältigen, daher möchte ich meinen tiefen Dank den Studenten ausdrücken, die mich bei der Durchführung und Analyse der Versuche tatkräftig unterstützt haben. Hervorheben möchte ich hierbei Stefano Cassola wegen seiner vorbildlichen Arbeitsweise.

Zu den wichtigsten Menschen denen ich an dieser Stelle danken möchte, zählen selbstverständlich meine Familie, welche mich bei der Entscheidung zu einem Studium unterstützt haben und somit meinen bisherigen Lebensweg entscheidend geprägt haben.

Zuletzt, aber von Herzen, danke ich meiner Frau Eva und meinem Sohn Jannis für den privaten Rückhalt. Meine eigene kleine Familie stellt meinen Ruhepol zum Krafttanken und Entspannen dar und nur durch diese Auszeiten war es für mich möglich durchzuhalten und meine Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Basel, April 2016

Timo Grieser

## Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis verwendeter Abkürzungen.....</b>	<b>IV</b>
<b>Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....</b>	<b>VI</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Herausforderungen und Potentiale beim Preforming.....	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>6</b>
2.1 Grundlagen der Preform-LCM Prozesskette.....	6
2.2 Automatisierung von Preforming Verfahren.....	11
2.2.1 Automatisiertes sequentielles Preforming .....	12
2.2.2 Kontinuierliches Preforming.....	15
2.2.3 Entwicklungsstand kontinuierlicher Profil-Preforming Verfahren gegenüber kontinuierlichen FKV-Herstellungsverfahren .....	18
2.3 Einfluss der Textileigenschaften auf das Formgebungsverhalten beim Preforming .....	22
2.3.1 Kompaktierungsverhalten.....	22
2.3.2 Reibungsverhalten .....	26
2.3.3 Biegeverhalten .....	31
2.4 Anforderungen an Preforms und Preforming Verfahren .....	35
2.5 Zusammenfassung .....	38
<b>3 Entwicklung eines kontinuierlichen Profil-Preforming Systems .....</b>	<b>39</b>
3.1 Theoretische Vorbetrachtung zur Herstellung von kontinuierlichen Profil-Preforms.....	39
3.2 Continuous Profile Preforming Systems (CPPS) .....	41

---

3.3	Einflussfaktoren auf die kontinuierliche Formgebung .....	45
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Textileigenschaften von CF-Gelegen .....</b>	<b>48</b>
4.1	Materialien .....	48
4.2	Messsysteme und Versuchsdurchführung .....	49
4.2.1	Messsystem Kompaktierung .....	51
4.2.2	Messsystem Reibung .....	52
4.2.3	Messsystem Biegung .....	55
4.3	Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens .....	58
4.3.1	Einfluss der Materialparametern.....	58
4.3.2	Einfluss der Prozessparametern .....	65
4.4	Untersuchung des Reibungsverhaltens .....	69
4.4.1	Einfluss der Materialparametern.....	69
4.4.2	Einfluss der Prozessparametern .....	74
4.5	Untersuchung des Biegeverhaltens .....	78
4.5.1	Einfluss der Materialparameter.....	78
4.5.2	Einfluss der Prozessparameter .....	85
4.6	Richtlinien zur Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens beim Preforming .....	88
<b>5</b>	<b>Übertragung der Erkenntnisse auf das kontinuierliche Profil-Preforming System .....</b>	<b>93</b>
5.1	Messsystem zur Ermittlung der kontinuierlichen Formgebungskraft.....	93
5.1.1	Sensitivitätsanalyse zur Validierung des Messsystems.....	94
5.2	Textiles Formgebungsverhalten beim kontinuierlichen Preforming.....	96
5.2.1	Formstabilität der CF-Gelege beim kontinuierlichen Preforming .....	96
5.2.2	Auswirkung von Material- und Prozessparameter auf die kontinuierliche Formgebungskraft .....	98
5.2.3	Analyse des kontinuierlichen Formgebungsverhaltens .....	103



---

5.3	Anwendung der entwickelten Richtlinien .....	109
5.3.1	Anwendung der entwickelten Richtlinien durch Variation von Materialparameter .....	109
5.3.2	Anwendung der entwickelten Richtlinien durch eine Prozessmodifikation .....	112
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>117</b>
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>121</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>132</b>
<b>9</b>	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>146</b>
<b>10</b>	<b>Publikationen .....</b>	<b>148</b>
<b>11</b>	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>150</b>

## Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
ACPM200	Automatisches Cantilever-Biegesteifigkeitsprüfgerät mit paralleler Messwerterfassung maximale Probenbreite 200 mm
ACPU	Automated Continuous Preforming Unit
ADFP	Automated Dry Fiber Placement
APM	Automated Preforming Machine
ARTM	Advanced Resin Transfer Molding
BraF	Braided Frames
CAD	Computer-Aided Design
CCPS	Continuous Composite Preforming System
CF	Kohlenstofffaser
CNC	Computerized Numerical Control
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CPFS	Continuous Profile Preforming System
DFP	Directed Fiber Preforming
DP	Duroplast
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVG	Faservolumengehalt
GF	Glasfaser
GTG	Gleichorientierte textile Grenzflächen
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
KES	Kawabata Evaluation System
L	Lage
LCM	Liquid Composite Molding
M	Material
MEQ	Materialeinsatzquote
O-O	Oberseite auf Oberseite
OSS	Single-Side-Stitch
PES	Polyethersulfon

---

PRTM	Pultrusion Resin Transfer Molding
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin Transfer Molding
TFA	Textile Friction Analyzer
TP	Thermoplast
UD	Unidirektional
U-O	Unterseite auf Oberseite
U-U	Unterseite auf Unterseite
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VI	Vakuuminjektionsverfahren
WZ	Werkzeug

---

## Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m <sup>2</sup>	Kontaktfläche
B	N*m <sup>2</sup>	Biegesteifigkeit (Festkörper)
C	-	Reibungskonstante
C*	Pa <sup>(1-n)</sup>	Reibungskonstante (nach Howell)
E	N/m <sup>2</sup>	E-Modul
F <sub>B</sub>	N	Biegekraft
F <sub>B</sub> *	N	Normierte Biegekraft
F <sub>F</sub>	N	Formgebungskraft
F <sub>F</sub> *	N	Normierte Formgebungskraft
F <sub>K</sub>	N	Kompaktierungskraft
F <sub>N</sub>	N	Normalkraft
F <sub>R</sub>	N	Reibungskraft
F <sub>R,Oberseite</sub>	N	Reibungskraft Gelegeoberseite
F <sub>R,O-O</sub>	N	Reibungskraft Gelegeoberseite-Gelegeoberseite
F <sub>R,O-U</sub>	N	Reibungskraft Gelegeoberseite-Gelegeunterseite
F <sub>R,Unterseite</sub>	N	Reibungskraft Gelegeunterseite
F <sub>R,U-U</sub>	N	Reibungskraft Gelegeunterseite-Gelegeunterseite
F <sub>T,Dyn.,Festkörper</sub>	N	Dynamische Tangentialkraft (Festkörper)
F <sub>T,Stat.,Festkörper</sub>	N	Statische Tangentialkraft (Festkörper)
F <sub>T,Tex</sub>	N	Tangentialkraft (textile Halbzeuge)
FVG	%	Faservolumengehalt
G	mN*cm	Biegesteifigkeit (trockene textile Halbzeuge)
g <sub>x</sub>	g/m <sup>2</sup>	Flächengewicht
h <sub>gesamt</sub>	m	Kavitätshöhe
I	m <sup>4</sup>	Flächenträgheitsmoment
k	1/m	Krümmung
M <sub>b</sub>	Nm	Biegemoment
M <sub>x</sub>	-	Materialbezeichnung
n	-	Reibungsindex
Ø	m	Durchmesser
R <sup>2</sup>	-	Bestimmtheitsmaß

---

RZ	$\mu\text{m}$	Gemittelte Rautiefe
$\mu^*$	-	Dynamischer Reibungskoeffizient von textilen Halbzeugen
$\mu_{T,Dyn.,Festkörper}$	-	Dynamischer Reibungskoeffizient (Festkörper)
$\mu_{T,Stat.,Festkörper}$	-	Statischer Reibungskoeffizient (Festkörper)
$\rho_x$	$\text{kg/m}^3$	Dichte

---

## Kurzfassung

Bei der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden durch Harzinjektionsverfahren wird ein textiler Vorformling, die Preform, mit einem Harzsystem imprägniert und anschließend ausgehärtet. Die Erzeugung der Preform, auch Preforming genannt, beinhaltet dabei eine Vielzahl an Arbeitsschritten, welche maßgeblich die Kosten des herzustellenden Bauteils bestimmen. Die Automatisierung des Preformings birgt daher ein enorm hohes Potential zur Kostenreduzierung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb ein neues Preforming System entwickelt, welches die kontinuierliche Herstellung von Profil-Preforms aus textilen Halbzeugen ermöglicht. Erstmals wurde dabei zur kontinuierlichen Fixierung die Nähtechnik verwendet, welche ein energie- und zeiteffizientes Preforming zulässt. Allerdings hat sich bei der Herstellung von Profil-Preforms mit unterschiedlichen textilen Halbzeugen gezeigt, dass die maximal erreichbare Prozessgeschwindigkeit ohne relative Textilschädigung variiert. Ursache hierfür ist das Textilverhalten während der Formgebung. Durch die Wahl geeigneter Material- und Prozessparameter besteht allerdings ein hohes Potential, einen Preforming Prozess zu optimieren. Daher war es das Ziel dieser Arbeit, Richtlinien für Material- und Prozessparameter zu entwickeln, die sowohl eine robuste als auch effiziente Preformherstellung ermöglichen.

Als kritische Textileigenschaften wurden das Kompaktierungs-, das Reibungs- und das Biegeverhalten identifiziert. Diese wurden in separaten Parameterstudien hinsichtlich der Auswirkungen von Materialparametern (z. B. Bindungsart) und Prozessparametern (z. B. Prozessgeschwindigkeit) untersucht. Die Ergebnisse konnten anschließend in Richtlinien zusammengefasst werden, welche für eine prozessorientierte Materialauswahl oder für Prozessmodifikationen beim Preforming genutzt werden können. Bei der Übertragung auf einen Preforming Prozess muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich Effekte verursacht durch Kompaktierung, Reibung und Biegung in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes der Preforms überlagern können. Daher wurden anhand einer weiteren Studie dominierende Textileigenschaften in Abhängigkeit des Ziel-FVG der Profil-Preforms beim entwickelten Preforming Prozess identifiziert. Abschließend wurden die entwickelten Richtlinien verifiziert, indem sowohl eine prozessorientierte Materialauswahl als auch prozesseitig eine Vorkompaktierungseinheit validiert wurden.

## Abstract

During the manufacturing of fiber reinforced polymer composites via Liquid Composite Molding a predefined fiber structure (preform) is impregnated with a resin system and subsequently cured. The production of semi-finished textile preform products includes a number of steps which largely determine the costs of the final component. Therefore, automation of the preforming process represents an extremely high potential for cost reduction.

To overcome the deficits of current preforming approaches, a new continuous profile preforming system was developed in the frame of this work. For the first time, stitching technology was applied to fix continuously formed semi-finished textile products which increased the efficiency of preforming. Due to this development, it was possible to double original production speed limits from 2 m/min to currently 4 m/min.

However, in the production of profile preforms with different textile semi-finished products it was necessary to vary the maximum production speed to prevent damage to the different textiles. This applies particularly when forming the textile semi-finished products. By choosing suitable materials and process parameters, there is a high potential to improve the preforming process and its efficiency. Therefore, the aim of this work was to develop material and process parameter guidelines which allow both stable and efficient preform production.

Friction, bending, and compaction behavior were identified as the most critical textile characteristics. In a first step, separate parametric studies were performed in order to investigate the effects of material (e.g. single-ply superficial density) and process parameters (e.g. process speed) on the friction, bending, and compaction behavior. The goal of this investigation was to identify dominant parameters to allow a process-related material selection and process modifications. Concerning the material parameters, five carbon fiber non-crimped fabrics (NCF) were examined, which differed by not more than two parameters. To investigate the effects caused by process parameters, processing speed, normal load, tool surface, number of testing cycles and testing directions were varied.

The results of the compaction study revealed that doubling the superficial density of single plies decreases the compaction forces to reach a fiber volume content of 50 % by 80 %. In this context, less amount of stitching yarns and bigger yarns bundles decrease the compaction forces. Especially for multi-ply preforms, the stitching yarns tend to superimpose which leads to an increase of compaction force. But selective tailoring of stacking sequences can decrease the compaction forces. For example, by turning individual plies within one stack, nesting possibilities can be achieved to reduce the compaction forces by up to 42 %, while the mechanical performance is almost not affected. Concerning the process parameters, ten consecutively applied compaction cycles reduce the compaction forces by up to 87 %.

The friction study revealed that coefficients of friction of carbon fiber NCFs vary due to changing surface structures at different fiber volume contents. Furthermore, tool-textile friction is half of the friction forces between two NCF samples. When the single-ply superficial density of the NCF is doubled, the dynamic friction forces are reduced by 80 %. The type of stitching influences the friction behavior as well. For example, NCFs with a pillar stitching pattern lead to higher dynamic friction forces on the bottom side of the NCF compared to its top side. Additionally, by varying the process speed no relevant effect on the friction behavior could be observed.

In the bending study, the bending stiffness of the dry NCFs were measured using the cantilever test set-up (single-ply tests). It was found that the bending stiffness of  $\pm 45^\circ$ -NCFs is up to 85 % lower compared to  $0^\circ/90^\circ$ -NCFs and halving the superficial density of single plies led to a decrease of 77 %. By utilizing a new test set-up it could be shown that a quasi-linear relationship between the number of plies and the bending force exists, whereby each additional ply increased the bending force by 27 % in the considered range. However, at an equal superficial density of a multi-ply stack, 6-ply preforms require less bending forces than 3-ply preforms. In this context, yarn bundling is the dominant material parameter, which depends on the stitching type used in the NCFs.

The results of the studies were summarized and transferred into guidelines (friction, bending, and compaction). These guidelines can be utilized for preforming design to realize a process-related material selection or process modifications to increase the stability and material throughput of preforming processes. Concerning the application



of the developed guidelines for a preforming process, it has to be considered that friction, bending, and compaction can have counteracting effects. However, a final parametric study has shown that the findings can be transferred to the developed continuous preforming process. The dominant textile characteristics of T-profile-preforms at different fiber volume contents could be identified which opened the opportunity to selectively vary material and process parameters in order to increase the process robustness and/or efficiency.

Finally, based on the developed guidelines, a process-related material selection and a process modification of the new preforming system were performed. With respect to the process-related material selection it was possible to reduce the continuous forming forces by approximately 24 % by increasing the superficial density of single plies as well as decreasing the stitching yarn amount. Furthermore, the integration of a pre-compaction unit (process modification) reduced the continuous forming forces approximately 20 %. Consequently, the process speed to manufacture a T-profile-preform (fiber volume content was 50 %) could be quadrupled until the initial forming force (base reference without applied pre-compaction cycles) was again reached. Accordingly, the application of the guideline was successfully demonstrated.

These insights into the textile forming behavior can be applied on both the material and process side. On the material side e.g. textile manufacturers have the opportunity to expand their product portfolio by manufacturing friction, bending and compaction optimized textile semi-finished products. On the process side, the number of optimization loops can be reduced since the used textile semi-finished products can be selected according to the expected material behavior. In existing preforming processes limitations can be overcome by a targeted adaption of material parameter.



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Leichtbau ist ein zentrales Thema heutiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Hierbei kann durch den Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) ein hohes Maß an Gestaltungsfreiheit bei gleichzeitiger Gewichtsreduzierung der Bauteile realisiert werden. Die zielgerichtete Kombination unterschiedlicher Ausgangsmaterialien im Verbund ermöglicht dabei bessere Eigenschaftsprofile als bei den Einzelmaterialien. Bei FKV werden durch den Einsatz von Fasern (z. B. Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern) als verstärkende Komponente im Kunststoff hervorragende mechanische Eigenschaften bei relativ geringen Materialdichten ermöglicht. Hierbei übertragen die Fasern die auf das FKV-Bauteil wirkenden mechanischen Lasten und bestimmen im Wesentlichen die Festigkeit und Steifigkeit. Der Kunststoff (Duroplast, Thermoplast oder Elastomer) bildet die Matrix und fixiert die Fasern in der gewünschten geometrischen Anordnung, ermöglicht die Lasteinleitung in die Fasern und schützt die Fasern vor Umgebungseinflüssen. Anwendungsspezifische Anpassungen von FKV-Bauteilen sind unter anderem durch die Einstellung des Faservolumenanteils, die Variation der Faserlänge, die Kombination verschiedener Faserarten und das Hinzufügen von Füllstoffen in die Matrix möglich.

Endlosfaserverstärkte FKV, bei denen die verstärkenden Fasern als textile Halbzeuge (Gelege, Gewebe, etc.) eingebracht werden, zeichnen sich im besonderen Maße durch die Möglichkeit der lastgerechten Faserorientierung aus und können beispielsweise im Transportsektor einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen und langfristigen Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten [1]. Studien zeigen, dass aus diesem Grund auch in Zukunft der Bedarf an FKV steigt und sich weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben werden [2]. Der Übergang von konventionellen, meist metallischen Konstruktionswerkstoffen, zu ausgereiften FKV-Bauteilen ist allerdings ein ressourcenintensiver und teurer Prozess [3].

Einer der wirtschaftlichsten Herstellungsprozesse für die Serienfertigung ist das Resin Transfer Molding (RTM). Dieses Verfahren gehört zu den Harzinjektionsverfahren, auch Liquid Composite Molding (LCM) genannt, und ist für die Herstellung qualitativ hochwertiger FKV-Bauteile von kleinen (> 1.000 p. a.) bis

mittleren Seriengrößen (> 10.000 p. a.) besonders geeignet. Allerdings ist die Ausschöpfung des wirtschaftlichen Potentials meist zu gering und die hohen Herstellkosten stellen ein wesentliches Einsatzhemmnis dar. Ursachen hierfür sind der hohe Arbeitsaufwand bei der Erzeugung von Vorformlingen (Preforms) sowie das ungenutzte Potential bei der Materialauswahl. [1, 4, 5]

Im Folgenden wird erläutert wie das Preforming durch eine robuste Prozessführung sowie durch eine prozessorientierte Materialauswahl verbessert werden kann. Darauf aufbauend werden die Zielsetzung und der Aufbau dieser Arbeit dargestellt.

### 1.1 Herausforderungen und Potentiale beim Preforming

Bei der Preform-LCM Prozesskette werden, ausgehend von Fasern/textilen Halbzeugen, mit hohem Arbeitsaufwand (Schneiden, Orientieren, Stapeln, Formen und Fixieren der Fasern) Preforms hergestellt. Diese werden anschließend mit einem Harz/Härter-System unter spezifischen Druck- und Temperaturzyklen in einem Werkzeug imprägniert und ausgehärtet, wodurch ein konsolidiertes Bauteil entsteht (siehe Abbildung 1.1). Da das Preforming ca. 50 % der Bauteilkosten verursacht (bei mittlerer Bauteilkomplexität), besteht hier großes Potential zur Prozesseffizienzsteigerung. [3, 6]

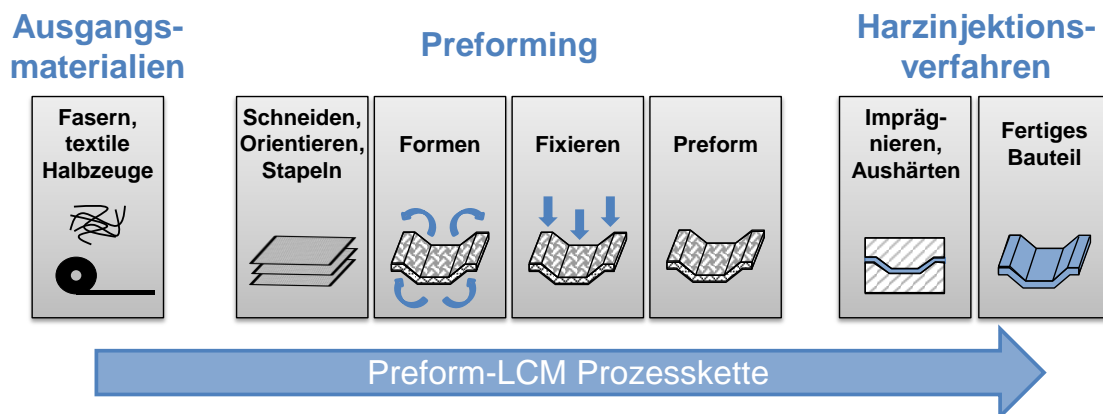


Abbildung 1.1: Preform-LCM Prozesskette

Zur Steigerung der Prozessrobustheit und -effizienz kann die Vielzahl händischer Arbeitsschritte beim manuellen Preforming automatisiert werden, indem Knickarmroboter mit intelligenten Greifersystemen zum Einsatz kommen (automatisiertes, sequentielles Preforming) [6-8]. Eine sehr vielversprechende Möglichkeit bieten integrierte Lösungen, die einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen

(kontinuierliches Preforming). Jedoch sind Produktionsgeschwindigkeiten und Materialdurchsätze existierender Systeme steigerungsfähig [8, 9]. Dieser Sachverhalt kann jedoch zum Beispiel durch alternative Fixierungstechnologien der Preforms verbessert werden.

Materialeseitig kann durch eine prozessorientierte Materialauswahl das Preforming an den vorliegenden Prozess angepasst werden. Hierbei wird eine gezielte Verringerung der auf die textilen Halbzeuge wirkenden Kräfte (z. B. Kompaktierungskraft) angestrebt, so dass beim Preforming die benötigte Formgebungskraft zur Erreichung einer 3D-Kontur reduziert werden kann um so beispielsweise Schädigungen der Preform zu minimieren. Das textile Formgebungsverhalten wird hierbei maßgeblich von Materialparametern (Faserorientierung, Einzellagenflächengewicht, etc.) beeinflusst. Ganzheitliche Informationen über die Auswirkung von Materialparametern auf Textileigenschaften (Kompaktierungs-, Reibungs-, Biege- und Scherverhalten) und letztendlich auf das textile Formgebungsverhalten, speziell beim kontinuierlichen Profil-Preforming, existieren fast keine. Somit besteht an dieser Stelle ein sehr großes Potential Optimierungsmaßnahmen durchzuführen. Zur Verdeutlichung der prozess- und materialeseitigen Entwicklungspotentiale sind die drei Preformingmethoden manuelles Preforming, sequentielles Preforming (automatisiert) und kontinuierliches Preforming hinsichtlich einer robusten Prozessführung und einer prozessorientierten Materialauswahl aufgeführt (siehe Abbildung 1.2).

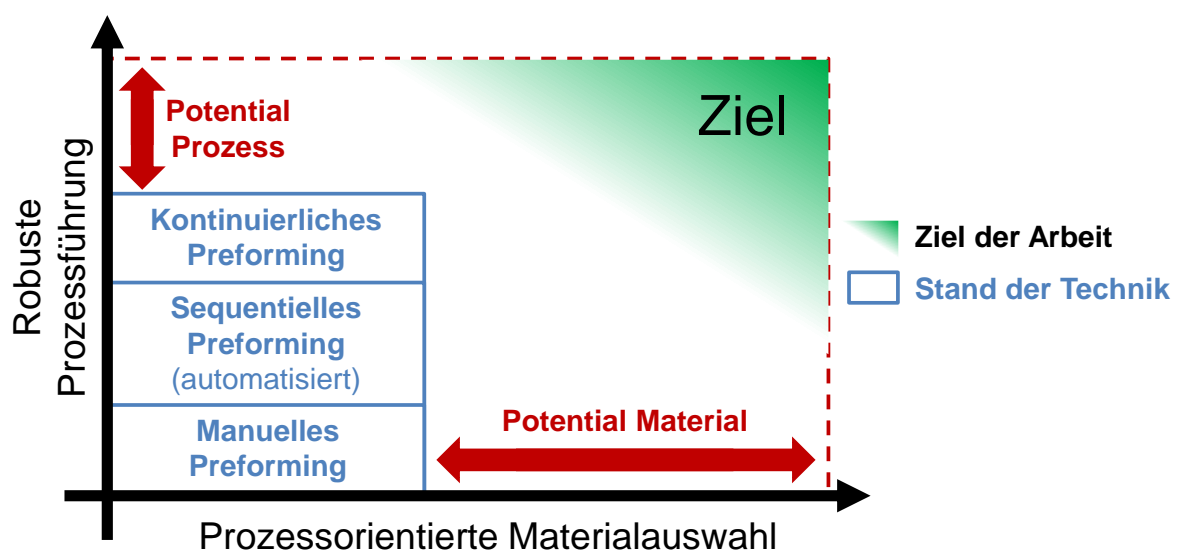


Abbildung 1.2: Prozess- und materialeseitige Entwicklungspotentiale hinsichtlich Prozessführung und Materialauswahl

## 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, einen neuen kontinuierlichen Preforming Prozess zu entwickeln, durch Untersuchungen an Kohlenstofffaser-Gelegen (CF-Gelege) dominierende Auswirkungen von Material- und Prozessparametern auf das textile Formgebungsverhalten zu evaluieren und Richtlinien zu entwickeln, die sowohl eine stabile als auch effiziente Preformherstellung ermöglichen. Wesentliche Fragestellungen, welche hierbei adressiert werden, sind im Folgenden aufgelistet:

- Wie muss ein effizienter kontinuierlicher Preforming Prozess aufgebaut sein?
- Wie beeinflussen Textileigenschaften das kontinuierliche Formgebungsverhalten beim Preforming?
- Was sind die wesentlichen Material- und Prozessparameter zur Beeinflussung von Textileigenschaften?

Aus der Zielsetzung und den daraus aufgestellten Fragestellungen ergibt sich die in Abbildung 1.3 dargestellte Struktur der Arbeit.

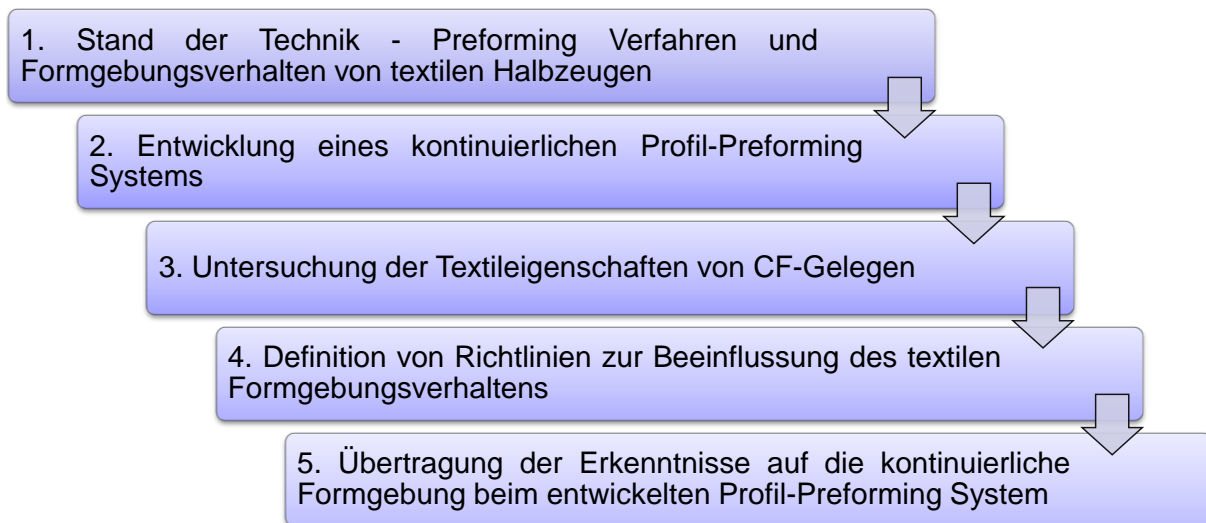


Abbildung 1.3: Struktur der Arbeit

1. Beim Stand der Technik werden zunächst die Grundlagen der Preform-LCM Prozesskette sowie bereits existierende automatisierte Preforming Verfahren (sequentiell und kontinuierlich) vorgestellt. Anschließend folgt eine Gegenüberstellung der kontinuierlichen Preforming Verfahren mit kontinuierlichen FKV-Herstellungsverfahren. Materialeitig wird der Einfluss von Textileigenschaften (Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten) auf das Formgebungsverhalten adressiert. Abschließend werden allgemeine

Anforderungen an Preforms und Preforming Verfahren identifiziert und die wichtigsten Entwicklungspotentiale (material- und prozesseitig) zusammengefasst.

2. Die prozesseitigen Entwicklungspotentiale bilden die Grundlage für das in Kapitel 3 entwickelte kontinuierliche Profil-Preforming System. Zu Beginn erfolgt eine theoretische Vorbetrachtung, bei der die wesentlichen Herausforderungen beim kontinuierlichen Preforming identifiziert werden. Anschließend wird das entwickelte kontinuierliche Profil-Preforming System beschrieben und es werden beeinflussende Textileigenschaften auf das kontinuierliche Formgebungsverhalten beim entwickelten System identifiziert.
3. In Kapitel 4, Untersuchung der Textileigenschaften, werden das Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten anhand von separaten Parameterstudien an CF-Gelegen untersucht und analysiert. Zur Durchführung der Parameterstudien müssen teilweise neue Messsysteme entwickelt werden. Basierend auf den Ergebnissen wird versucht Richtlinien zu definieren, welche zur positiven Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens beim Preforming genutzt werden können.
4. Im letzten Kapitel wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den separaten Parameterstudien auf die kontinuierliche Formgebung beim entwickelten Profil-Preforming System geprüft. Hierzu muss zunächst ein geeignetes Messsystem aufgebaut werden, sodass die kontinuierlichen Formgebungskräfte gemessen werden können. Bei der anschließenden Testreihe sollen die gleichen CF-Gelege wie bei den vorherigen Parameterstudien verwendet werden. Ziel der Untersuchung ist es, dominierende Textileigenschaften in Abhängigkeit des angestrebten Faservolumengehaltes (FVG) der Profil-Preforms zu eruieren. Abschließend erfolgt die Anwendung der entwickelten Richtlinien, wodurch die Prozessrobustheit und -effizienz gesteigert werden sollen.

## 2 Stand der Technik

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein Überblick über die Prozessschritte und eingesetzten Materialien innerhalb der Preform-LCM Prozesskette gegeben. Im Anschluss daran werden die Möglichkeiten zur automatisierten Herstellung von Preforms (sequentiell und kontinuierlich) aufgezeigt und eine Gegenüberstellung zwischen kontinuierlichen Profil-Preforming Systemen und FKV-Herstellungsverfahren vorgenommen. Materialeitig werden Textileigenschaften, welche das Formgebungsverhalten von textilen Halbzeugen beeinflussen, beschrieben. Dabei werden die mathematischen/physikalischen Zusammenhänge, die Messmethoden und wesentliche Forschungsarbeiten aufgezeigt. Gegen Ende des Kapitels werden allgemeine Anforderungen an Preforms und Preforming Verfahren identifiziert und die wichtigsten Entwicklungspotentiale (material- und prozesseitig) zusammengefasst.

### 2.1 Grundlagen der Preform-LCM Prozesskette

LCM-Verfahren (Harzinjektionsverfahren) bieten aufgrund ihrer hohen Prozessvariabilität die Möglichkeit ein sehr großes Anwendungsspektrum von kleinen bis großen Seriengrößen abzudecken. Wichtige Verarbeitungskriterien, wie Bauteilgröße (klein - groß), Formkomplexität (einfach - komplex) und Realisierbarkeit definierter Faserorientierung/ -positionierung können durch diese Verfahren umfassend erfüllt werden. [3, 10]

Eine Übersicht der verschiedenen Verarbeitungsmöglichkeiten, ausgehend von der Faser bis hin zum fertigen Bauteil, innerhalb der Preform-LCM-Prozesskette gibt Abbildung 2.1.

Als **Ausgangsmaterialien** werden Fasern (Kohlenstoff-, Glas-, Aramid- oder Naturfasern), auch Rovings genannt, verwendet, welche entweder direkt oder über 2-dimensionale textile Halbzeuge zu endkonturnahen 3D-Preforms verarbeitet werden können. Konventionelle textile Halbzeuge sind Gelege, Gewebe, Vliese, Gestricke oder Geflechte. Die Hauptvertreter sind hierbei Gelege und Gewebe, welche in einer sehr hohen Variantenvielfalt erhältlich sind.



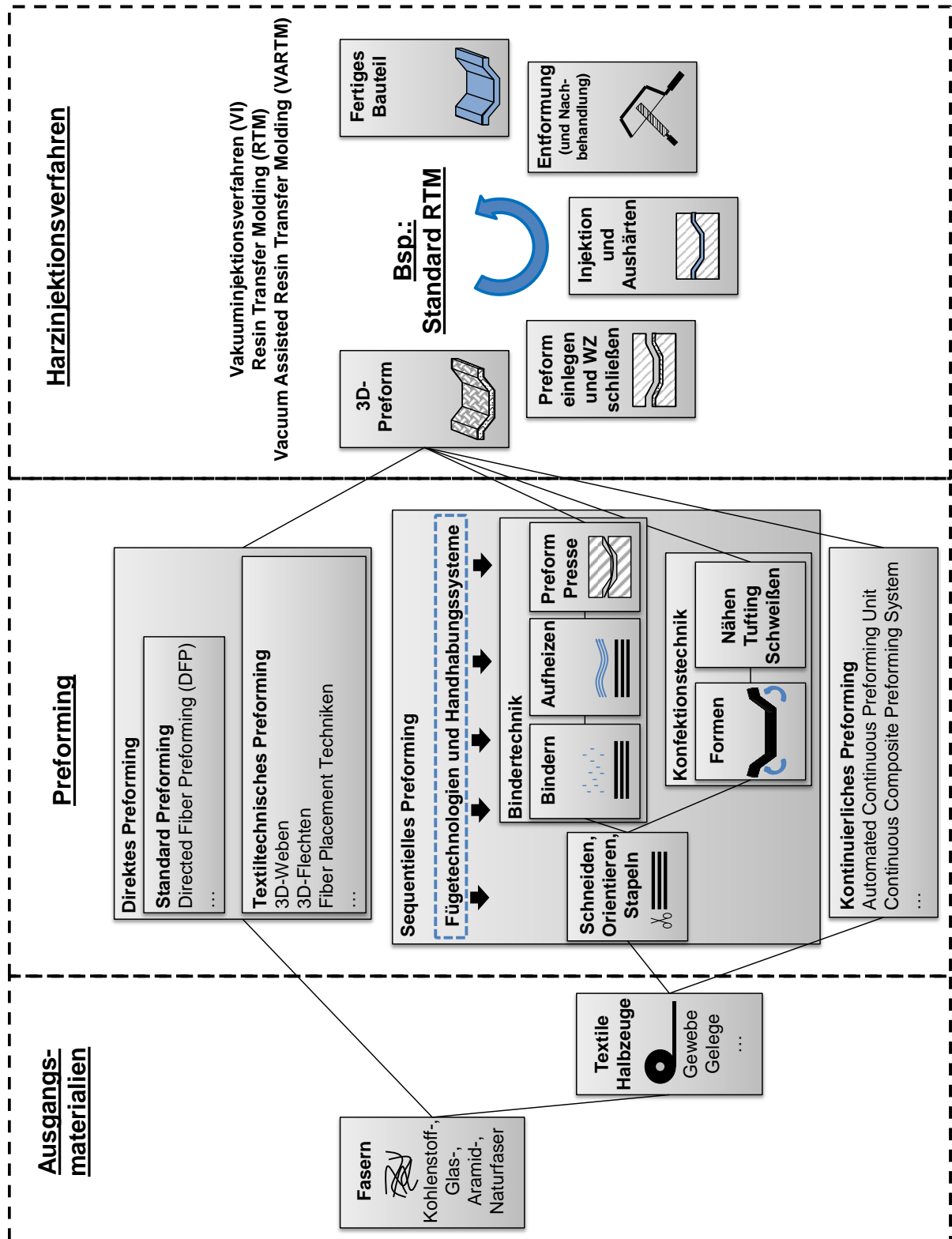


Abbildung 2.1: Übersicht der Preform-LCM Prozesskette

Gewebe sind durch die Rechtwinkligkeit von mindestens zwei Fasersystemen gekennzeichnet. Die Garne in Produktionsrichtung werden als Kettgarne und die Garne senkrecht dazu als Schussgarne bezeichnet. Die Faserkreuzungen

(Bindungen) bewirken hierbei Ondulationen der Fasern (auch Crimp genannt), welche die Handhabung sowie die mechanischen Eigenschaften des späteren FKV-Bauteils beeinflussen. Zu den wesentlichen Bindungsarten zählen die Leinwand-, die Körper- und die Atlasbindung, welche vom ersteren bis letzteren mit abnehmender Anzahl von Faserkreuzungen gekennzeichnet sind. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind das Flächengewicht, die Garnfeinheit sowie die Fadendichte (siehe Abbildung 2.2, oben). [3, 11]

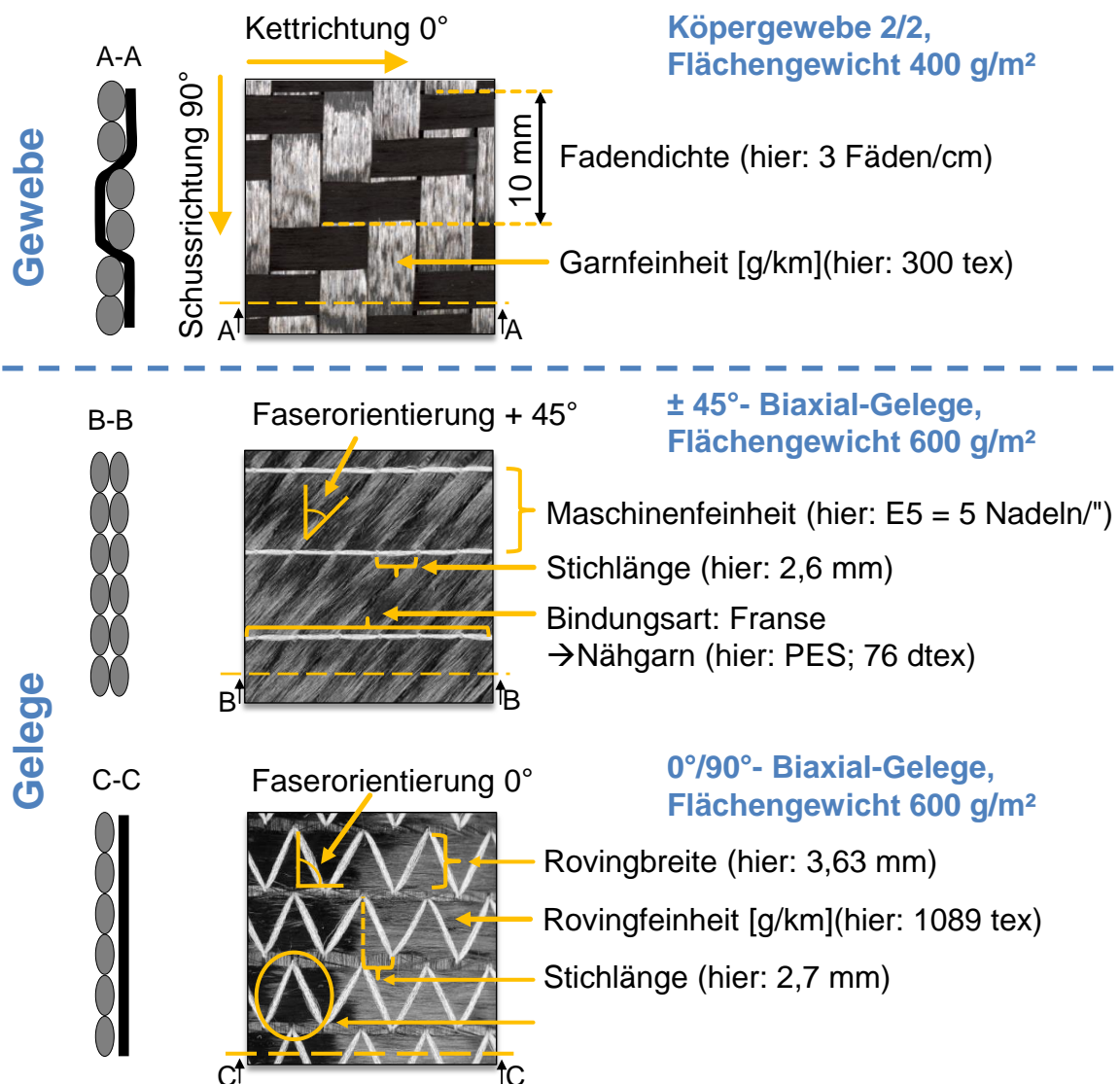


Abbildung 2.2: Aufbau eines Glasfaser-Gewebes (GF-Gewebe) mit Körperbindung 2/2 (oben); Aufbau von zwei CF-Gelegen (Biaxial-Gelege) mit  $\pm 45^\circ$  und  $0^\circ/90^\circ$  Faserorientierung (unten)

Bei *Gelegen* werden im Gegensatz zu Geweben die Fäden nicht gekreuzt, sondern lagenweise aufeinander abgelegt und anschließend miteinander vernäht bzw. verwirkt. Die wesentlichen Vorteile dabei sind, dass die Fasern in gestreckter Form

im Halbzeug vorliegen und die Orientierung der Einzellagen nahezu frei einstellbar ist. Hinsichtlich der Bindungsart (Verwirkungsart) wird zwischen Franse-, Trikot- oder Franse-Trikot-Bindung (Hybrid-Bindung) unterschieden. Fertigungsbedingt kann jedoch nicht beliebig jede Bindungsart für jede Faseranordnung bei der Gelegerherstellung appliziert werden. Beispielsweise kann für ein  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege (Faserorientierung wird in Produktionsrichtung angegeben) nur eine Trikot- oder Hybrid-Bindung verwendet werden. Besteht ein Gelege aus zwei, drei bzw. vier Lagen, wird es als Biaxial-, Triaxial- bzw. Quadriaxial-Gelege bezeichnet. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind das Flächengewicht, die Maschinenfeinheit, die Stichlänge, die Garnfeinheit und die Garnbreite. Bei der Garnfeinheit und der Garnbreite ist anzumerken, dass diese nur indirekt vom Roving als Ausgangsmaterial bestimmt werden, da diese letztendlich durch die applizierte Bindungsart eingestellt werden (siehe Abbildung 2.2, unten). [12, 13]

**Direkte Preforming Verfahren** wie Directed Fiber Preforming (DFP), 3D-Flechten, 3D-Weben, Stricken sowie Fiber-Placement-Techniken (z. B. Tailored Fiber Placement) benutzen als Ausgangsmaterial direkt die Rovings [14-17]. Daher ist die Abfallrate bei dieser Verfahrensgruppe sehr gering. Allerdings ist die erreichbare Bauteilkomplexität oftmals eingeschränkt und die späteren mechanischen Eigenschaften sind aufgrund der starken Faserondulation (z. B. bei textilen Prozessen) herabgesetzt [3].

Beim **sequentiellen Preforming** werden textile Halbzeuge zugeschnitten (manuell, CNC-Cutter, Stanze), gemäß der Bauteilanforderungen orientiert und zu Lagenaufbauten gestapelt. Anschließend erfolgt die Drapierung der textilen Halbzeuge in die gewünschte Form und die Fixierung der Preform mittels Binder- oder Konfektionstechnik. Die zu erzeugende Preform kann je nach Komplexitätsgrad direkt als finale Preform oder in Form von Sub-Preforms hergestellt werden. Bei letzterem werden ein oder mehrere zusätzliche Montage- und Fügeschritte benötigt, welche entweder manuell oder durch den Einsatz von Handhabungssystemen (z. B. Greifersysteme) und Füge-technologien durchgeführt werden können. Trotz der vielen Zwischenschritte lassen sich insgesamt höhere Produktionsraten als beim direkten Preforming erzielen. Weiterhin besteht für sehr komplexe Bauteile, bei welchen während des Drapierungsprozesses die resultierenden mechanischen Eigenschaften

durch Faserverschiebungen beeinflusst werden können, die Möglichkeit lastgerechte Zuschnitte computerunterstützt zu erstellen. Dieser Ansatz kann zur Minimierung von Verschnitt, Erhaltung der mechanischen Eigenschaften und zu Zeitersparnissen beim Drapieren führen. [3, 18-20]

Wird die Bindertechnik als *Fixierungstechnologie* eingesetzt, kann ein meist thermoplastischer Binder (Pulver, Vlies, Emulsion, Garn) direkt bei der Halbzeugherstellung oder nach dem Zuschneiden der textilen Halbzeuge flächig oder lokal appliziert werden. Danach erfolgt die Binderaktivierung in einer Heizstrecke (z. B. durch Infrarot, Konvektion, etc.) indem die Schmelztemperatur des verwendeten Bindermaterials (z. B. Polyamid) appliziert wird. Nachdem das Bindermaterial aufgeschmolzen ist, folgt die Generierung der Preform durch Abkühlen in einem Umformwerkzeug, welches der Kontur des herzustellenden Bauteils entspricht. Durch zunehmenden Einsatz der Bindertechnik ist in jüngster Vergangenheit eine Vielzahl neuer Bindermaterialien entstanden. Zu den zentralen Entwicklungsthemen gehören dabei matrixkompatible und hybride Bindersysteme, die sich aus duroplastischen und thermoplastischen Matrices zusammensetzen. [9, 21]

Werden die textilen Halbzeuge (eben oder bereits drapiert) beispielsweise genäht, getuftet oder gefügt, werden *Konfektionstechniken* angewendet. Die wichtigste bzw. am häufigsten eingesetzte Konfektionstechnik ist das Nähen, welche sich unter anderem durch eine hohe Anpassungsfähigkeit des Prozesses, niedrige Investitionskosten, einen hohen Automatisierungsgrad, hohe Prozessgeschwindigkeiten, der Möglichkeit zur Integration artfremder Werkstoffe (Schäume, metallische Inserts, etc.) und der beliebigen Kombination verschiedener textiler Halbzeuge auszeichnet. Zu den wesentlichen Stichtypen gehören hierbei der Kettenstich, der Blindstich, der One-Side-Stitch (OSS) und der Doppelsteppstich, welche je nach Art der Anwendung (z. B. Fixierungs- oder Strukturnaht) zum Einsatz kommen. [3, 12, 18, 22]

Seit wenigen Jahren ist aus wirtschaftlichen Gründen eine weitere Gruppe entstanden, welche als **kontinuierliches Preforming** bezeichnet wird. Hierbei werden textile Halbzeuge (Schmaltextilien oder Standardhalbzeuge) von einem ebenen Ausgangszustand kontinuierlich zu 3D-Profil-Preforms geformt (siehe Kapitel 2.2.2). Als Fixierungstechnologie können die Bindertechnik sowie die

Nähtechnik eingesetzt werden. Diese Verfahren stellen somit eine Kombination aus dem direkten und sequentiellen Preforming dar, wobei die Vorteile beider Verfahrensgruppen genutzt werden. [8, 9, 23, 24]

Nach der Herstellung der Preform folgt die Imprägnierung der Fasern mit einer Matrix. Dazu steht eine Vielzahl von **LCM-Verfahren** zur Verfügung, welche sich im angewendeten Werkzeugkonzept (ein- oder mehrteilig), dem Verarbeitungsdruck (Vakuum bis Hochdruck) und der Injektionsstrategie (Punkt-, Ring-, Linien-, Flächeninjektion) unterscheiden. Zu den Hauptvertretern gehören das Vakuuminjektionsverfahren (VI), das Resin Transfer Molding (RTM) und das Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM). [25-27]

Als Matrices kommen Duroplaste (Epoxid-, Polyester-, Vinylester- und Phenolharze) zum Einsatz, welche in spezifischen Druck- und Temperaturzyklen verarbeitet werden und dabei irreversibel chemisch vernetzen. Je nach Matrixmaterial und Härtetemperatur variiert die Dauer der Härtungszyklen zwischen 2 min - 240 min. Neue Ansätze versuchen durch Matrixkombinationen (Duroplast (DP) - Thermoplast (TP)) Synergieeffekte bei der Verarbeitung zu erzeugen. Dadurch kann beispielsweise die Matrix unter duroplastischen Prozessbedingungen verarbeitet werden, jedoch bleibt der Werkstoff schmelzbar und kann anschließend umgeformt bzw. geschweißt werden. [28, 29]

Im folgenden Unterkapitel werden die Möglichkeiten zur Automatisierung von Preforming Verfahren dargestellt, welche die Effizienz des zeit- und kostenintensiven Preformings erhöhen.

## **2.2 Automatisierung von Preforming Verfahren**

In diesem Kapitel werden Automatisierungsmöglichkeiten des sequentiellen Preformings vorgestellt, indem Fügetechnologien, Handhabungssysteme, Qualitätssicherungsmethoden und existierende automatisierte Prozessketten aufgezeigt werden (Kapitel 2.2.1). Anschließend folgt die Beschreibung der im Fokus dieser Arbeit stehenden kontinuierlichen Profil-Preforming Systeme, welche bei der abschließenden Gegenüberstellung mit kontinuierlichen FKV-Herstellungsverfahren hinsichtlich ihres Entwicklungsstadiums qualitativ geprüft werden.

## 2.2.1 Automatisiertes sequentielles Preforming

Ein Großteil der zuvor beschriebenen Arbeitsschritte zur Herstellung von Preforms wird heutzutage manuell durchgeführt, wodurch die eigentlichen positiven Effekte wie günstige textile Halbzeuge und niedrigere Prozesskosten reduziert werden. Grund dafür ist die technisch anspruchsvolle Handhabung der biegeschlaffen textilen Halbzeuge beim Zuschneiden, Absortieren, Positionieren und Drapieren, Fixieren und ggf. Fügen. Im Vergleich zu den bereits automatisiert durchgeführten Injektionsprozessen, besteht beim Preforming daher nach wie vor großer Handlungsbedarf. [4, 30, 31]

Durch die gezielte Anwendung der Näh- und Bindertechnik besteht die Möglichkeit die Handhabung der biegeschlaffen textilen Halbzeuge durch lokale Steifigkeitserhöhungen oder vorgegebene Drapierungszonen zu erleichtern [25, 32-34]. Weiterhin befinden sich Planungstools in der Entwicklung, welche beispielsweise geeignete Fertigungsstrategien für die automatische Herstellung von Preforms ermitteln können [10]. Das sequentielle Preforming kann nur durch eine Automatisierung aller Prozessschritte wirtschaftlich werden. In den letzten Jahren wurde daher verstärkt an der Realisierung technischer Grundprinzipien bzgl. der automatisierten Handhabung und dem Fügen der textilen Halbzeuge geforscht. Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über automatisierte Handhabungssysteme sowie Füge-technologien und zeigt deren Einsatzmöglichkeiten beim automatisierten, sequentiellen Preforming. [30, 35, 36]

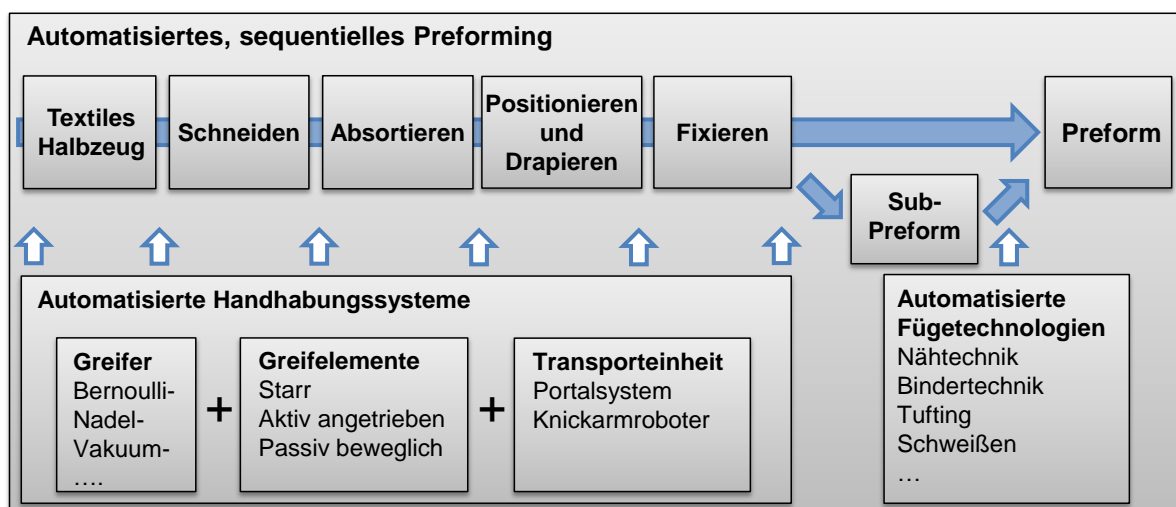


Abbildung 2.3: Möglichkeiten zur Erreichung eines automatisierten, sequentiellen Preformings durch automatisierte Handhabungssysteme und Füge-technologien

Grundsätzlich unterscheiden sich die existierenden **Handhabungssysteme** durch den eingesetzten Greifer (Wirkprinzip) und dem dazugehörigen Greifelement (Endeffektor). Beide zusammen, montiert auf einem Portalsystem oder einen Knickarmroboter, bilden ein automatisiertes Handhabungssystem. [6]

Zu den wesentlichen Greifern zählen kraftschlüssige (Vakuum-, Bernoulli-, Elektroadhäsions- und Klemmgreifer), stoffschlüssige (Gefrier- und Adhäsionsgreifer) sowie formschlüssige (Nadel-, Kratz- und Klettgreifer) Greifer [37, 38]. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Greifer werden durch die Anschaffungskosten, den benötigten Bauraum, maximale Haltekräfte, etc. bestimmt [30]. Bisher wurden verschiedene Ansätze zur Einteilung der Greifersysteme verfolgt, wobei als Entscheidungskriterium das physikalische Wirkprinzip [39], die industrielle Anwendbarkeit [40] oder der technische Reifegrad [41] dienen kann.

Greifelemente können starr, passiv beweglich oder aktiv angetrieben aufgebaut sein [6]. Bei einem starren Aufbau ist das Greifelement hinsichtlich der Anforderungen an ein spezifisches Bauteil angepasst. Jedoch können durch verstellbare Greifelementsegmente [42] oder individuell aktivierbare Greifbereiche [35, 41] die Einsatzmöglichkeiten erweitert werden. Im Gegensatz dazu sind passiv bewegliche Greifelemente in der Lage, sich während des Drapierungsprozesses an die zu erzeugende Kontur des Formwerkzeuges anzupassen [6, 43]. Bei den aktiv angetriebenen Systemen dagegen sorgen elektrisch betriebene Steuereinheiten für eine kontrollierte räumliche Anpassung des Greifelements inklusive den Greifern [34, 38].

In jüngster Vergangenheit wurden Methoden sowie Entscheidungstools entwickelt, welche beispielsweise unter Berücksichtigung der Textilstruktur eine Auswahl von Handhabungssystemen für die entsprechende Anwendung ermöglichen [7, 38, 44].

Hinsichtlich der **Fügetechnologien** existieren drei wesentliche Gruppen: die Nähtechnik, die Bindertechnik sowie alternative Fügeverfahren. Die einzelnen Fügetechnologien können von mit Endeffektoren (z. B. modifizierte Nähmaschine) ausgestatteten Knickarmrobotern benutzt werden, um die Fügepartner (Sub-Preforms) vor Ort und nicht in stationären Fügeeinheiten zu fügen [6, 45, 46].

Bei der Nähtechnik wird zwischen einseitig (z. B. Blindstich oder OSS) und beidseitig (Ketten- und Doppelsteppstich) arbeitenden Verfahren unterschieden, wobei letztere

und OSS meist zusätzliche Fügevorrichtungen benötigen und nicht direkt im Injektions- oder Drapierungswerkzeug angewendet werden können [3, 12].

Beim Fügen mittels Bindertechnik sind die Art der Binderaktivierung und -konsolidierung wesentliche Unterscheidungskriterien. Hierbei können durch flächiges stationäres Pressen, lokalwirkende Heizelemente, diskontinuierliches Punktschweißen, kontinuierliches Schweißen (Induktion, Ultraschall oder Laser) oder Bindertapelegen einzelne Sub-Preforms zu einer finalen Preform gefügt werden. [3, 10, 12, 30, 47, 48]

Zu den alternativen Fügemethoden zählen das Klammern und das Chemical Stitching. Erstere ist eine pragmatische Methode, welche oftmals aus Kostengründen in der Prototypenfertigung ihre Anwendung findet. Letztere kombiniert die Grundzüge der Konfektions- und Bindertechnik, indem matrixkompatible Binder unter Verwendung von gefüllten Nadeln lokal zwischen die Preforms appliziert werden [49].

Die prozessintegrierte **Qualitätssicherung** spielt bei einer vollautomatisierten, reproduzierbaren Fertigung eine wichtige Rolle und stellt die Summe aller Maßnahmen dar, die eine konstante Produktqualität sicherstellen. An dieser Stelle wird jedoch nicht weiter auf Qualitätssicherungssysteme bzw. deren Entwicklungspotentiale eingegangen, sondern beispielhaft zu diesem Thema verwiesen. [46, 50, 51]

Im Folgenden werden zwei aktuelle Beispiele zur automatisierten Herstellung von Preforms bzw. LCM-Bauteilen vorgestellt.

Das ITA-Preformcenter ist eine vollautomatisierte Preformingstation. Hierbei werden textile Halbzeuge mit einem CNC-gesteuerten Industriebreitschnittmesser zugeschnitten und anschließend mit einem über Kopf gelagerten Knickarmroboter, welcher über wechselbare Endeffektoren zum Handhaben, Fixieren, Besäumen und Qualitätssichern verfügt, zu Preforms (z. B. Automobil-Cabriodach mit metallischen Inserts) verarbeitet. [6, 21]

Das AUTO-RTM ist eine vollautomatisierte Fertigungsstraße zur Herstellung von Luftfahrtbauteilen, in welcher alle Arbeitsschritte der Preform-LCM-Prozesskette (Materialvorbereitung, Erzeugung der Preform, Injektion des Matrixsystems im RTM-Verfahren) vollautomatisiert durchgeführt werden. Hierbei entsteht jedoch ein erheblicher Investitionsaufwand. [5, 6]



## 2.2.2 Kontinuierliches Preforming

Kontinuierliche Profil-Preforming Systeme vereinen die Vielzahl von arbeitsaufwendigen Prozessschritten zur Erzeugung einer Preform zu einem durchgängigen Verarbeitungsschritt und ermöglichen somit eine wirtschaftliche Fertigung von LCM-Strukturbauteilen unter konstanten Prozessbedingungen. Hierbei wird ausgehend von ebenen textilen Halbzeugen die angestrebte 3D-Querschnittsform (z. B. T-Profil) durch einen kontinuierlichen Formgebungsprozess erzeugt und anschließend fixiert.

Die **Schlüsselemente kontinuierlicher Profil-Preforming Systeme** sind das Formgebungskonzept, die Materialführung, die Fixierung der Preforms und die Synchronisierung der Transportelemente. Dadurch ergeben sich Restriktionen bzgl. der Verarbeitbarkeit von textilen Halbzeugen, der Realisierung belastungsgerechter Faserorientierungen, der Möglichkeit für lokale Verstärkungen, der Stabilität der Preforms, der Einhaltung von Geometrietoleranzen sowie der Adaptierbarkeit auf ähnliche Profile. Weiterhin hat die eingesetzte Fixierungstechnologie maßgeblichen Einfluss auf die Energie- und Investitionskosten sowie die erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten, was folglich die Wirtschaftlichkeit der Verfahren festlegt. Abbildung 2.4 zeigt drei kontinuierliche Profil-Preforming Systeme: das **Continuous Composite Preforming System (CCPS)**, die **Automated Continuous Preforming Unit (ACPU)** und die **Automated Preform Machine (APM)**. [8, 9, 24, 52]

Alle drei Systeme sind voll automatisiert und ermöglichen die Herstellung von endkonturnahen (near net-shape) Profil-Preforms mit Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 2 m/min. Für das CCPS und die APM ist die herstellbare Profillänge endlos, wohingegen bei der ACPU die realisierbare Profillänge derzeit auf 0,52 m - 1,21 m beschränkt ist. Als Ausgangsmaterialien dienen Schmaltextilien in Form von Gelegen oder Geweben, wohingegen Gelege aufgrund ihrer guten Handhabung und besseren mechanischen Eigenschaften bevorzugt werden. Die jeweiligen Formgebungseinheiten bestehen aus teilweise beheizbaren Rollen- und Schienensystemen. Die herstellbaren Profilformen sind C-, I-, U-, S- und T-Profile. Als Fixierungstechnologie wird ausschließlich die Bindertechnik eingesetzt, wobei sich die Profil-Preforming Systeme hinsichtlich des verwendeten Bindermaterials (Vlies oder Pulverbinder) sowie der Einbringung der Binderaktivierungsenergie (Induktion oder Infrarot)

unterscheiden. Aufgrund der Bindertechnik als Fixierungstechnologie sind für alle drei Profil-Preforming Systeme die Energie- und Investitionskosten im mittleren Bereich und die derzeitig angestrebten Anwendungsbereiche sind die Luftfahrt sowie der Automobilsektor. [9, 24, 52]

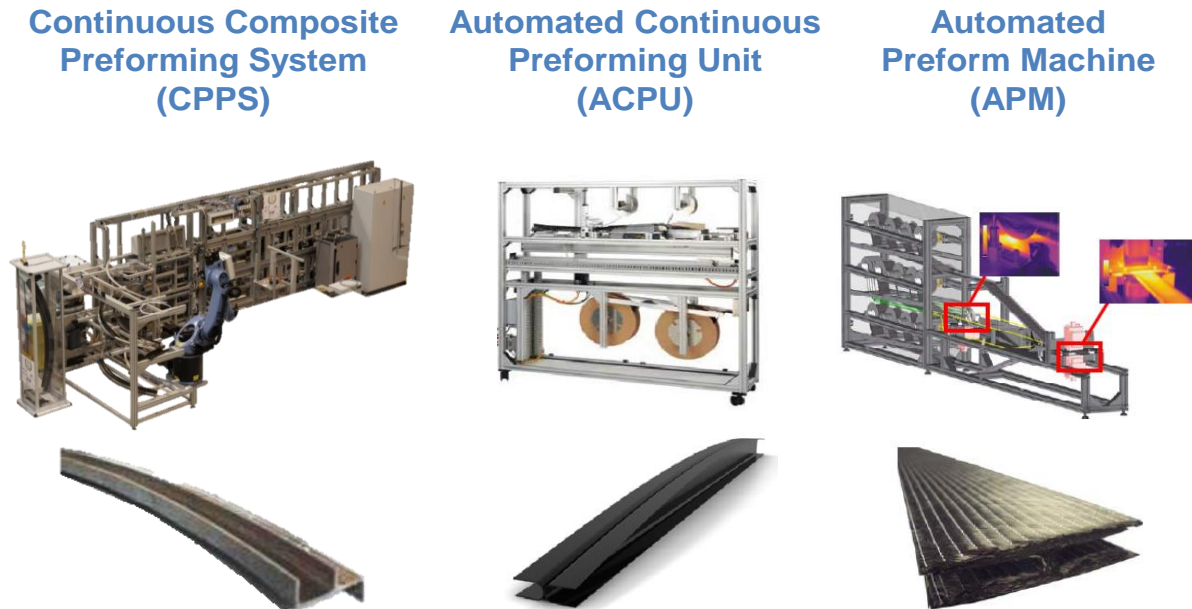


Abbildung 2.4: Kontinuierliche Profil-Preforming Systeme: Continuous Composite Preforming System (links) [53], Automated Continuous Preforming Unit (Mitte) [52] und Automated Preform Machine (rechts) [24]

Beim **CCPS** werden je zwei S-Preforms und eine C-Preform hergestellt, welche zusätzlich eine Profilkrümmung mit einem Biegeradius zwischen 1,9 m - 4,3 m, je nach verwendetem textilem Halbzeug, zulassen. Einer der limitierenden Faktoren hinsichtlich erreichbarer Biegeradien ist die Ermöglichung einer belastungsgerechten Faserorientierung (Abweichungen kleiner  $\pm 5$  % akzeptabel). Erreichbare FVG der Sub-Preforms sind  $< 38$  %. In einem anschließenden Füge- und Kompaktierungsprozess werden die einzelnen Sub-Preforms zur finalen LCF-Profil-Preform fixiert und auf den Ziel-FVG kompaktiert. Im Jahr 2014 wurde eine Nachfolganlage entwickelt, welche es unter Verwendung von 14 separat ansteuerbaren Aktuatoren ermöglicht, Spantpreforms mit variablen Querschnitten zu erzeugen. [9, 54]

Die I-Profil-Preforms der **ACPU** basieren auf zwei C-Preforms, welche in ihrer Steghöhe zwischen 0,01 m - 0,035 m variabel geformt werden können. Die Variabilität der Steghöhe ist primär von der Biegesteifigkeit und dem Scherverhalten der eingesetzten textilen Halbzeuge abhängig, wobei als limitierender Faktor die

Beibehaltung belastungsgerechter Faserorientierungen von  $< 5\%$  im Flankenbereich festgelegt ist. [52]

Bei der **APM** sind die H-Profil-Preforms aus je zwei U-Preforms und zwei Decklagen aufgebaut, wobei weder die Möglichkeit zur Profilkrümmung noch zur variablen Höheneinstellung während des Prozesses gegeben ist. Andererseits kann dadurch stets eine belastungsgerechte Faserorientierung in allen Bereichen der Profil-Preforms gewährleistet werden. [24]

Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Profil-Preforming Systeme ist im Anhang in Tabelle 8.1 dargestellt. [8, 9, 24, 52, 55]

Neben den zuvor beschriebenen Profil-Preforming Systemen existieren zwei weitere kontinuierliche Preforming Verfahren: der **Braided Frames (BraF) Prozess** und das **Profil-Rollformen am Drapierwerkzeug**.

Der **BraF-Prozess** kombiniert die Flechttechnik, die Wickeltechnik sowie das kontinuierliche Ablegen von Schmaltextilien. Durch die Herstellung von uniaxial geflochtenen Preforms (Verstärkungsfasern in Kombination mit Bindergarnen) können hierbei nahezu ondulationsfreie Faserlagen generiert werden. Dies führt im Gegensatz zur konventionellen Flechttechnik zu gesteigerten mechanischen Eigenschaften. Zusätzlich können die Restriktionen hinsichtlich erreichbarer Faserorientierungen durch den zusätzlichen Einsatz der Wickeltechnik oder die Zuführung von Schmaltextilien überwunden werden. Jedoch ist der Aufwand für die Nachbearbeitung stark abhängig vom gewünschten Profilquerschnitt und die Prozessgeschwindigkeit ist derzeit auf  $< 1$  m/min beschränkt. [56, 57]

Beim **Profil-Rollformen am Drapierwerkzeug** werden bebinderte textile Halbzeuge (meist Gelegebänder) auf ein Drapierwerkzeug kontinuierlich abgelegt, fixiert (Aktivierung des Bindermaterials im textilen Halbzeug) und abgelängt. Die Formgebung der textilen Halbzeuge erfolgt während des Ablegens und wird durch ein Rollensystem, welches in die Ablegeeinheit integriert ist, realisiert. Dieses Verfahren ist somit flexibel hinsichtlich Änderungen des Lagenaufbaus und Krümmungen entlang der Profillängsachse sind möglich. Jedoch sind die erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten, die Variantenvielfalt der einsetzbaren textilen Halbzeuge sowie die Komplexität der herzustellenden Profil-Preforms limitiert und abhängig vom Endeffektor. [58, 59]

### 2.2.3 Entwicklungsstand kontinuierlicher Profil-Preforming Verfahren gegenüber kontinuierlichen FKV-Herstellungsverfahren

In diesem Kapitel werden die fünf vorgestellten kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren den kontinuierlichen FKV-Herstellungsverfahren **Pultrusion**, **Pultrusion Resin Transfer Molding (PRTM)** und dem quasi-kontinuierlichen Verfahren **Intervallheißpressen** gegenübergestellt. Vor der Gegenüberstellung werden die FKV-Herstellungsverfahren kurz erläutert, wobei sich vorrangig auf duroplast-verarbeitende Prozessvarianten bezogen wird.

Die **Pultrusion** (auch Profil-/Strangziehverfahren genannt) ist ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von kontinuierlich verstärkten Profilen. Die Verstärkungsmaterialien (vorwiegend Rovings) werden hierbei, ausgehend von Spulen oder Rollen, über eine am Ende der Anlage befindliche Zieheinheit (z. B. Klemm- oder Raupensystem) durch eine Imprägnierstation (Harzbad oder Injektions-/Aushärtewerkzeug) geführt. Die Verstärkungsmaterialien können vor oder nach der Tränkung mit dem DP-Matrixsystem vorgeformt werden. Durch Variation der Prozessparameter sowie der Verstärkungsmaterialien wird das spätere Eigenschaftsprofil des hergestellten FKV-Bauteils eingestellt. In manchen Fällen ist eine zusätzliche Aushärtung im Durchlaufofen erforderlich. Abschließend wird das FKV-Profil auf die gewünschte Länge abgelängt und besäumt. Bei der Verwendung von bereits vorimprägnierten textilen Halbzeugen (Prepregs) entfällt die Imprägnierstation. [3, 27, 60]

Beim **PRTM** wird der Pultrusionsprozess mit Verfahrenselementen des RTM erweitert. Zu Beginn werden die zu verarbeitenden textilen Halbzeuge ebenfalls von einem Spulengatter kontinuierlich abgezogen und in einer Formgebungseinheit, bestehend aus einem Rollen-/Schienensystem, vorgeformt und fixiert. Die erzeugte Profil-Preform durchläuft anschließend ein Injektionswerkzeug, sodass ein vollimprägniertes, jedoch nur teilkonsolidiertes FKV-Profil entsteht. Hierbei liegen die Verarbeitungsdrücke zwischen 3 bar - 5 bar und die Werkzeugtemperatur ist meist < 120 °C. Die finale Konsolidierung wird von einer allseitig wirkenden Presse, welche im Gleichlauf zur Produktionsgeschwindigkeit mitbewegt wird, erreicht. Die finale Querschnittsgeometrie und der FVG des herzustellenden Profils werden dabei unter spezifischen (an das Matrixsystem angepassten) Drücken (bis 7 bar) und

Temperaturen ( $< 180\text{ °C}$ ) eingestellt. Zur Ermöglichung einer kontinuierlichen Konsolidierung wird das Presswerkzeug nach einer definierten Distanz ( $<$  Presswerkzeuglänge) geöffnet, zum Ausgangspunkt transferiert, geschlossen und erneut mitbewegt. Abschließend wird das FKV-Profil zum Nachtempern durch einen Durchlaufofen geführt, abgelängt und ggf. besäumt. [9, 61]

Das **Intervallheißpressen** ermöglicht die Herstellung sowohl von ebenen TP-Laminaten (Organobleche) als auch profilierten Geometrien (DP und TP), wie beispielsweise L-, U-, C- oder T-Profile. Ausgangsmaterialien sind trockene textile Halbzeuge mit Kunststofffolien als Zwischenlage (Film-Stacking-Verfahren), vorimprägnierte textile Halbzeuge (DP- oder TP-Matrix) oder Organobleche. Diese werden mit einem getakteten Abzug durch eine oder mehrere in Reihe angeordnete temperierte Säulenpressen geführt und verpresst. Der Prozessablauf kann hierbei in vier Phasen unterteilt werden: Schließen des Werkzeuges, Pressphase, Öffnen des Werkzeuges und Transportphase. Nachdem das Werkzeug geschlossen ist, wirkt während der Pressphase vollflächig der Pressdruck ( $\leq 25\text{ bar}$ ) auf das zu verarbeitende Material. In der Transportphase wird das Werkzeug (Stirnflächen offen) zunächst geöffnet, bevor das Pressgut nahezu drucklos um eine definierte Strecke weitertransportiert wird. Beim Durchlaufen der Materialien durch die beheizten Werkzeuge ( $\leq 410\text{ °C}$ ) mit unterschiedlichen Temperaturprofilen werden diese definiert aufgewärmt (Presseneinlauf) und abgekühlt (Pressenauslauf), was eine vollständige Imprägnierung und anschließende Solidifikation ermöglicht. Die erreichbare Prozessgeschwindigkeit ( $0,1\text{ m/h} - 60\text{ m/h}$ ) ist limitiert durch die erforderliche Schmelz-, Imprägnier-, Abkühl- bzw. Erstarrungszeit der Materialien sowie die Größe des Presswerkzeuges. Am Ende der Anlage wird das Organoblech/FKV-Profil auf die gewünschte Länge abgelängt. [3, 62-64]

Im Folgenden werden die kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren den FKV-Herstellungsverfahren qualitativ gegenübergestellt. Eine quantitative Gegenüberstellung ist an dieser Stelle nicht zielführend, da bei den kontinuierlichen Profil-Preforming Systemen nicht die gesamte Prozesskette zur Bauteilherstellung (Fehlen des Injektionsschrittes) betrachtet wird und keine Gewichtung der Unterscheidungskriterien erfolgt. Daher soll die Gegenüberstellung primär die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren aufzeigen. Eine detaillierte

Zusammenfassung der jeweiligen Verfahrenscharakteristiken bzgl. der unterschiedlichen Verfahren ist in Tabelle 8.2 im Anhang gelistet.

Die aufgezeigten Unterscheidungskriterien sind Prozessgeschwindigkeit, Profildesignflexibilität, Investitionskosten, Energieverbrauch, Materialkosten, Produkteigenschaften und Automatisierungsgrad. Die Gegenüberstellung wird anhand eines Netzdiagramms (siehe Abbildung 2.5) unter Verwendung einer Skala von 1 (geringe Erfüllung der Charakteristik hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Prozesses) bis 5 (hohe Erfüllung der Charakteristik) durchgeführt. Demzufolge hat ein sehr hoher Energieverbrauch den Wert 1, wobei eine sehr hohe Prozessgeschwindigkeit den Wert 5 annimmt.

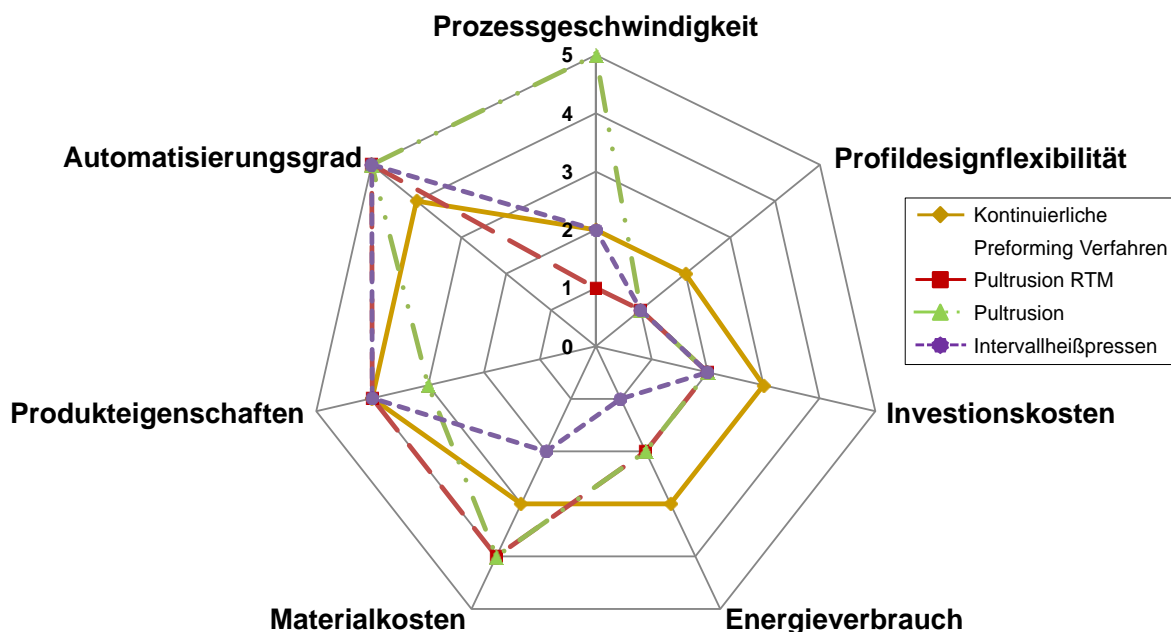


Abbildung 2.5: Gegenüberstellung der kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren (CCPS, ACPU, APM, BraF-Prozess und Profil-Rollformen am Drapierwerkzeug) mit den FKV-Herstellungsverfahren Pultrusion RTM, Pultrusion und Intervallheißpressen

Aufgrund der Adaptierbarkeit möglicher Faserorientierungen und des integrierten Injektion- und Aushärteprozesses sind die möglichen Produktionsgeschwindigkeiten beim PRTM (1) mit  $< 0,1$  m/min am geringsten. Anschließend folgt das Intervallheißpressen (2) mit maximal 1 m/min. Die kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren erreichen Produktionsgeschwindigkeiten bis zu 2 m/min (2). Der limitierende Faktor ist hier die Bindertechnik, welche als Fixierungstechnologie benutzt wird. Demgegenüber sind Prozessgeschwindigkeiten bei der Pultrusion (4) bis zu 10 m/min erreichbar und somit mit Abstand am höchsten.

Hinsichtlich der Profildesignflexibilität besteht bei allen Verfahren Optimierungsbedarf. In diesem Zusammenhang wird der benötigte Rüstaufwand zur Änderung des Profildesigns betrachtet. Dadurch sind Pultrusion RTM, Pultrusion und Intervallheißpressen mit jeweils 1 Punkt vergleichsweise schlecht, da eine Änderung des Profildesigns mit einem extrem hohen Rüstaufwand (z. B. Wechsel des Injektionswerkzeuges) verbunden ist. Dagegen müssen bei den kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren (2) primär die Formgebungseinheiten angepasst werden, was weniger Aufwand bedeutet.

Die Investitions- und Energiekosten der FKV-Herstellungsverfahren (2) sind höher als bei den kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren (3), da bei letzteren der Imprägnierungsschritt nicht mit einbezogen ist. Jedoch existiert bei den kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren, aufgrund der Verwendung der Bindertechnik, Optimierungspotential, denn zur Fixierung der Preforms werden hierbei aufwendige Aufheiz- und Kühlstationen benötigt.

Die Materialkosten der kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren (3) sind aufgrund der hauptsächlichlichen Verwendung von Schmaltextilien anstatt Rovings höher als bei Pultrusion und PRTM (jeweils 4). Beim Intervallheißpressen (2) stellen die teuren Halbzeuge (textile Halbzeuge mit Kunststofffolien oder Organobleche) ein Entwicklungspotential dar.

Bei den kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren, dem PRTM und beim Intervallheißpressen besteht die Möglichkeit, beanspruchungsgerechte Faserorientierungen aufgrund der Flexibilität bei der Materialzuführung einzustellen. Somit können bei diesen Verfahren angepasste Produkteigenschaften (4) hinsichtlich Biegung, Torsion, etc. ermöglicht werden. Die Pultrusion liegt in diesem Punkt auf einem mittleren Niveau (3), da prozessbedingt vorzugsweise UD-verstärkte FKV-Profile produziert werden.

Hinsichtlich des Automatisierungsgrades befinden sich die kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren mit 4 Punkten auf einem guten Niveau (Tendenz steigend). Führend sind das PRTM (5), das Intervallheißpressen (5) und die Pultrusion (5), ein seit vielen Jahren etablierter Prozess, welcher in der Lage ist, hochautomatisiert FKV-Profile herzustellen.

Zusammenfassend betrachtet zeichnen sich die kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren durch einen hohen Automatisierungsgrad (4) und gute

Produkteigenschaften (4) aus. Hinsichtlich der Materialkosten (3), des Energieverbrauches (3) und der Investitionskosten (3) besteht jedoch Entwicklungspotential. Die Schwachpunkte dieser Verfahrensgruppe sind die erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten (2) und die Profildesignflexibilität (2).

### **2.3 Einfluss der Textileigenschaften auf das Formgebungsverhalten beim Preforming**

Dieses Unterkapitel beschreibt das Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten (Textileigenschaften) textiler Halbzeuge und dient als Grundlage für die Untersuchungen in Kapitel 4. Hierbei werden jeweils die mathematischen/physikalischen Zusammenhänge aufgezeigt, entwickelte Messmethoden beschrieben sowie die wesentlichen Forschungsergebnisse vergangener Studien vorgestellt.

Das Scherverhalten von textilen Halbzeugen wird hier nicht behandelt, da der später betrachtete Formgebungsprozess (siehe Kapitel 3.2) zur 3D-Querschnittsform durch ein reines 2D-Falten, ohne das Vorkommen von Scherung, erreicht wird. Daher wird an dieser Stelle lediglich auf Arbeiten zu diesem Thema verwiesen [65-72].

#### **2.3.1 Kompaktierungsverhalten**

Das Kompaktierungsverhalten beschreibt den Widerstand eines textilen Halbzeugs bzw. eines Lagenaufbaus (Preform) gegen äußere Kräfte (senkrecht zur Textilebene) zur Erreichung eines definierten FVG. In der Vergangenheit wurde dieses Verhalten in zahlreichen Arbeiten modelliert und experimentell validiert. Einen guten Überblick gibt hierzu das Review von Potluri und Sagar [73].

Das Kompaktierungsverhalten textiler Halbzeuge kann in die Einflussgrößen Garndeformation, Garnverflachung, Garnbiegung, Verdichtung der Fehlstellen bzw. Lücken in der Faserstruktur sowie Nesting aufgegliedert werden (siehe Abbildung 2.6, links). Hierbei ist naheliegend, dass das resultierende Kompaktierungsverhalten nicht nur auf einem dieser Einflussgrößen beruht, sondern als komplexes Zusammenspiel von Materialparametern und applizierten Prozessparametern angesehen werden muss. [73-75]



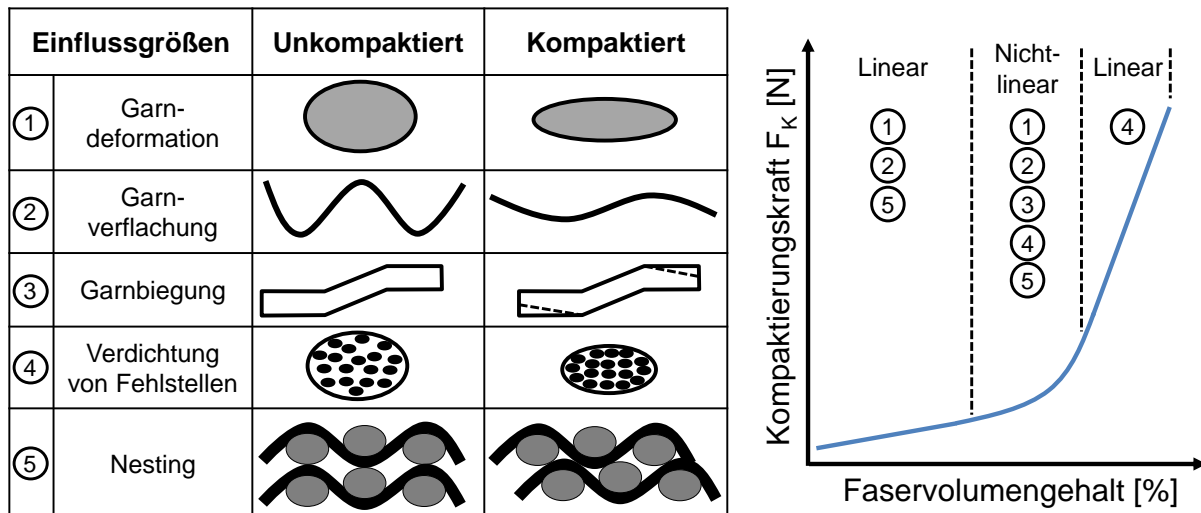


Abbildung 2.6: Einflussgrößen auf das Kompaktierungsverhalten textiler Halbzeuge (links); Typischer Kraftverlauf über den FVG bei einer Kompaktierungsmessung von textilen Halbzeugen (rechts)

Der Kompaktierungskraftverlauf (Reaktion eines textilen Halbzeuges) im Belastungsfall kann in drei Phasen unterteilt werden (siehe Abbildung 2.6, rechts). Zu Beginn besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Dickenabnahme der Probe (Steigerung des FVG) und der applizierten Kompaktierungskraft  $F_k$ . Bei mehrlagigen Proben ist dieser Bereich größer, da mehr Raum für das Zusammenschieben der Einzellagen zur Verfügung steht. In der zweiten Phase ändert sich das Verhalten aufgrund des gesteigerten Widerstandes der Fasern gegen transversale Kompression zu einem nichtlinearen exponentiellen Verhalten. Sobald die Garnkompaktierung sowie das Ineinandergleiten der Fasern vollständig abgeschlossen sind, ist die Reaktion der textilen Halbzeuge auf das Modul quer zur Faser zurückzuführen. Folglich stellt sich wieder ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft und FVG ein. [73-78]

Die **Messmethoden** zur Ermittlung des Kompaktierungsverhaltens textiler Halbzeuge unterscheiden sich untereinander nur marginal. Die zugeschnittenen Proben (kreisförmig oder rechteckig) werden ein- oder mehrlagig zwischen zwei metallischen Messplatten positioniert (vgl. Abbildung 4.1). Die Messplatten sind meist auf einer Universalprüfmaschine (Zwick, Instron, etc.) montiert, damit eine konstante Kavität durch eine parallele Ausrichtung dieser gewährleistet ist. Durch das Zusammenfahren der Messplatten (konstant oder oszillierend) wird die Kompaktierungskraft (ein- oder mehrmalig) appliziert. Ist eine gewisse Kavitätshöhe

oder eine maximale Kompaktierungskraft erreicht, folgt die Entlastungsphase entweder direkt oder nach einer gewissen Haltezeit. Zusätzlich können die Messungen im trockenen oder gesättigten Zustand (Harz, Öl, etc.) durchgeführt werden. [73-93]

Zur Analyse der Ergebnisse wird die gemessene Kraft bzw. der Druck über den dazugehörigen FVG oder über die Dickenabnahme der Materialkonfiguration aufgetragen. Zur Berechnung des vorliegenden FVG wird die Lagenzahl  $n_x$ , das Einzellagenflächengewicht der textilen Halbzeuge  $g_x$ , die Dichte der Fasern  $\rho_x$ , sowie die Kavitätshöhe  $h_{gesamt}$  mit der folgenden Formel berechnet:

$$FVG = \sum_1^x \frac{n_x \cdot g_x}{\rho_x} \cdot \frac{1}{h_{gesamt}} \quad (2.1)$$

Es existiert eine Vielzahl von **Forschungsarbeiten**, welche das Kompaktierungsverhalten textiler Halbzeuge für FKV-Anwendungen untersucht haben. Allerdings konnten nur wenige allgemeingültige Aussagen getroffen werden, da paarweise Vergleiche einzelner Materialparameter nur selten adressiert wurden. Aufgrund der Unterschiede zwischen Geweben und Gelegen im Materialaufbau, variieren die jeweils dominierenden Materialparameter sowie die Auswirkungen von applizierten Prozessparametern während der Kompaktierungsmessung. Daher werden in den folgenden Abschnitten zunächst die materialeitigen Auswirkungen (aufgegliedert in Gewebe und Gelege) beschrieben, bevor auf prozesseitige Auswirkungen eingegangen wird.

Bei Geweben spielen die Garnverflachung sowie die Biegung der Fasern, aufgrund herstellungsbedingter Faserondulationen, eine entscheidende Rolle. Zusätzlich neigen die Grenzflächen der Einzellagen bei mehrlagigen Proben dazu sich ineinanderzuschieben. Dieser Effekt wird als Nesting beschrieben und es werden im Vergleich zu Einlagentests geringere Kompaktierungskräfte benötigt. Weiterhin wird für Mehrlagenpreforms über eine scheinbare Grenzlagenanzahl berichtet, ab welcher die resultierende Kraft konstant bleibt. Saunders et al. [79] untersuchten bis zu 20 Lagen eines Leinwandgewebes und bestimmten 5 als kritische Lagenanzahl. Dagegen deklarierten Chen et al. [74] 10 als kritische Lagenanzahl für Leinwandgewebe aus Glasfasern. Letztere konnten mit zunehmender Lagenanzahl eine Reduktion der Probendicke um bis zu 29 % beobachten. [26, 73, 74, 79-81]

Für Gelege spielen Garnverflachung sowie die Biegung der Fasern, aufgrund des herstellungsbedingten gestreckten Zustandes der Fasern, nur eine untergeordnete Rolle. Daher wird Nesting als vernachlässigbar eingestuft. Für Mehrlagenpreforms beobachteten Hammami und Gebart [82] sowie Liu et al. [83], welche gleichorientiert gestapelte GF-Gelege mit einer Lagenanzahl bis 10 (UD-Gelege) bzw. 16 (Triaxial- und Quadriaxial-Gelege) testeten, daher keinen Effekt der Lagenanzahl. Dagegen berichten Somashekar et al. [84] und Klunker et al. [85] über eine Zunahme der Kompaktierungskräfte mit gesteigerter Lagenzahl. Dieser Effekt kann hierbei durch Überlagerungen von Verwirkungsgarnen begründet werden. Hinsichtlich des Einflusses des Lagenaufbaus berichten Hammami und Gebart [82] für alternierend und halb/halb gestapelte UD-Gelege (vernäht) über eine Verringerung des Kompaktierungswiderstandes. Für gemischt gestapelte Triaxial- und Quadriaxial-Gelege konnten Liu et al. [83] allerdings keinen Einfluss auf das Kompaktierungsverhalten feststellen. Lomov et al. [86] modellierten und testeten eine Vielzahl von Gelegen um die wesentlichen Zusammenhänge zu identifizieren.

Zur Untersuchung der Einflüsse von Prozessparametern wurden die Testgeschwindigkeit, die Anzahl von aufeinanderfolgenden Kompaktierungszyklen (multiple Zyklen), der Testzustand (ungesättigt oder gesättigt) sowie die applizierte Preformingtechnik (Näh-, Bindertechnik) variiert.

Hinsichtlich der Testgeschwindigkeit sind unabhängig von der Textilart die Erkenntnisse vergangener Studien nahezu identisch [78, 79, 87, 88]. Eine Erhöhung der Testgeschwindigkeit bewirkt eine Steigerung des Kompaktierungswiderstandes (im trockenen Zustand). Die Hauptursache für dieses Verhalten ist, dass bei einer Steigerung der Testgeschwindigkeit weniger Zeit zur Faserneuordnung (mikrostrukturelle Neuordnung) zur Verfügung steht [78, 84, 88]. Wird allerdings direkt nach der Kompaktierungsphase eine Haltezeit (Kompaktierungskraft bleibt konstant) definiert, ist eine Steigerung des FVG - begründet durch die Relaxation der Faserstruktur - die Folge. Dies bestätigt, dass textile Halbzeuge ein viskoelastisches Kompaktierungsverhalten aufweisen. Das Ausmaß der Relaxation der Faserstruktur ist stark abhängig vom ursprünglichen Kompaktierungszustand sowie dem Zustand der Faserstreckung [78]. Weiterhin konnten Kruckenberg et al. [80] im gesättigten Testzustand und mit steigender Lagenanzahl eine Zunahme des Relaxations-

vermögens beobachten. Kelly et al. [87] bestätigten dies für den gesättigten Testzustand.

Werden aufeinanderfolgende Kompaktierungszyklen durchgeführt, reduziert sich die benötigte Kompaktierungskraft zur Erreichung eines bestimmten Ziel-FVG mit steigender Zykluszahl [78, 80, 81, 84, 89-91]. Eine sehr hohe Anzahl von 51 aufeinanderfolgenden Zyklen wurde von Robitaille und Gauvin [91] getestet. Hierbei stieg der finale erreichte FVG stetig an und es konnte kein eindeutiger Grenzwert ermittelt werden. Jedoch verringert sich die prozentuale Kraftabnahme mit zunehmender Zyklusanzahl. Somashekar et al. [84] und Comas-Cardona et al. [93] konnten bei ihren Untersuchungen an mehrlagigen Preforms sogar eine Dickenabnahme von 50 % bzw. 70 % feststellen. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass zumindest eine quasi-plastische Deformation der Faserstruktur stattfindet.

Abschließend sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Kompaktierungsverhalten durch den Drapierungs- und Testzustand (trocken oder gesättigt) sowie dem Einsatz von Preformingtechniken (z. B. Nähetechnik) stark beeinflusst werden kann. Im gesättigten Testzustand ist der initiale Kompaktierungszustand entscheidend, welcher entweder Schmiereffekte zwischen den Fasern oder die Permeabilität der textilen Probe dominieren lässt [78-82, 85, 87, 92, 93]. Zum Thema Drapierung und Preforming sind bisher weit weniger Studien durchgeführt worden, jedoch wurde in den meisten Studien eine Steigerung des Kompaktierungswiderstandes durch Scherung der textilen Halbzeuge und vorgelagerte Preformingschritte festgestellt [81, 89, 94-96].

In Anbetracht aller zuvor dargestellten Erkenntnisse reagieren textile Halbzeuge auf eine senkrecht zur Textilebene applizierte Kompaktierungskraft (inklusive Entlastungsphase) mit einem viskoelastischen und quasi-plastischen Materialverhalten.

### **2.3.2 Reibungsverhalten**

Reibung ist ein Bewegungswiderstand, der sich als eine Widerstandskraft sich berührender Körper gegen die Einleitung (statische Reibung) oder Aufrechterhaltung (dynamische Reibung) einer Relativbewegung äußert [97]. Das Coulombsche Gesetz, auch als Amontonsches Gesetz bekannt, ist die wohl bekannteste Formulierung zur Beschreibung der trockenen Festkörperreibung. Für viele Ingenieursanwendungen reicht dieses Gesetz in erster Näherung aus, wobei für die

statische und dynamische Tangentialkraft (Reibungskraft) folgende Beziehung gelten:

$$F_{T,Stat.,Festkörper} = \mu_{Stat.,Festkörper} \cdot F_N \quad (1.2)$$

$$F_{T,Dyn.,Festkörper} = \mu_{Dyn.,Festkörper} \cdot F_N \quad (2.3)$$

Das Gesetz beschreibt hierbei eine direkte Proportionalität zwischen der statischen Tangentialkraft ( $F_{T,Stat.,Festkörper}$ ) bzw. dynamischen Tangentialkraft ( $F_{T,Dyn.,Festkörper}$ ) und der Normalkraft  $F_N$ , wobei  $\mu_{Stat., Festkörper}$  bzw.  $\mu_{Dyn., Festkörper}$  die jeweiligen Reibungskoeffizienten der Werkstoffpaarung darstellen. Weiterhin sind die Tangentialkräfte ( $F_{T,Stat.,Festkörper}$  und  $F_{T,Dyn.,Festkörper}$ ) unabhängig von der Größe der Kontaktfläche sowie der Testgeschwindigkeit. [97-99]

Im Gegensatz zu Festkörpern mit durchgehend, fester Oberfläche (z. B. Metall) liegt die Besonderheit bei textilen Halbzeugen darin, dass die Elastizität der Faserstruktur berücksichtigt werden muss. Diese wird durch Materialparameter wie beispielsweise Bindungsart, Faserart, etc. bestimmt (siehe Abbildung 2.2). Erkenntnisse bzgl. des Reibungsverhaltens textiler Halbzeuge wurden in der Vergangenheit vorwiegend an Materialien aus der Bekleidungsindustrie (Polyester, Wolle, Nylon, etc.) gewonnen. Für diese Halbzeuge berichten Wissenschaftler des 20. Jahrhunderts, dass die Proportionalität zwischen Tangential- und Normalkraft oftmals nicht gegeben ist. Weiterhin besteht eine Abhängigkeit bzgl. variierender Prüfgeschwindigkeiten und Kontaktflächengrößen. Aus diesem Grund wurde das physikalische Gesetz aus (2.3) weiterentwickelt, sodass es auf jegliche textile Halbzeuge angewendet werden kann. [100-104]

Peirce [100] analysierte 1930 die Oberflächeneigenschaften von textilen Halbzeugen, wie z. B. Baumwolle. Allerdings entwickelte er keine Methode zur objektiven Beurteilung des Reibungsverhaltens. Anschließende Studien befassten sich mit der Entwicklung objektiver Messmethoden zur Bestimmung des Warengriiffs (handle of cloth) der textilen Halbzeuge [105]. Erst 1953 berichtetet Howell [101], dass sich bei textilen Halbzeugen die Tangentialkraft  $F_{T,Tex}$  pro Kontaktflächeneinheit  $A$  exakter durch

$$F_{T, \text{Tex}} = C \cdot F_N^n \quad (2.4)$$

beschreiben lässt. Hierbei stellt  $C$  eine Reibungskonstante und  $n$  einen Reibungsindex dar. Diese Gleichung ist ebenfalls für Polymerwerkstoffe sowie viskoelastische Werkstoffe gültig. [106-109]

1963 bestätigt Wilson [102] experimentell sowie theoretisch, dass die scheinbare Kontaktfläche<sup>1</sup> für die Beschreibung des Reibungsverhaltens bei textilen Halbzeugen wichtig ist und logarithmierte die Gleichung (2.4) zu

$$\log (F_{T, \text{Tex}} / A) = C^* + n \log (F_N / A) \quad (2.5)$$

wobei die Kontaktfläche  $A$  explizit dargestellt ist. Hierbei weisen  $\log (F_{T, \text{Tex}} / A)$  und  $\log (F_N / A)$  einen linearen Zusammenhang auf. Der Reibungsindex  $n$  ist dimensionslos und nimmt für textile Halbzeuge Werte von 0 bis 1 und für Polymerwerkstoffe von 2/3 bis 1 an [107, 109-112].  $C^*$  dagegen hat die Einheit  $\text{Pa}^{(1-n)}$  und ist somit von  $n$  abhängig [106, 110]. Wie die Berechnung der  $C^*$ - und  $n$ -Werte anhand einer Regressionsanalyse erfolgen kann zeigt Hermann [113].

In der vorliegenden Arbeit wird die Gleichung von Wilson neben dem Coulombschen Reibungsgesetz als geeignete Gleichung zur Beschreibung von Textilreibung angesehen.

Die **Messmethoden** zur Bestimmung von Reibungskräften können in translatorische und rotatorische Systeme aufgeteilt werden, wobei erstere häufiger und in einer größeren Variantenvielfalt angewendet werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden die wesentlichen translatorischen Messsysteme das Instron Tensile Tester System [101], das Kawabata Evaluation System (KES-FB4) [103], der Textile Friction Analyzer (TFA) [114] und die schiefe Ebene [115] beschrieben. Die vier Messsysteme sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

Beim Instron Tensile Tester und dem KES-FB4 wird der Prüfkörper/Messschlitten (kreisförmig oder rechteckig) auf dem zu testenden textilen Halbzeug positioniert und mit einer konstanten Geschwindigkeit über das Testmaterial gezogen. Der translatorische Prüfvorgang kann auch als alternierende Bewegung des Untergrunds (Textile Friction Analyzer) oder durch eine Schiefstellung des Untergrunds (schiefe Ebene) initiiert werden.

<sup>1</sup> Durch die Rauheit zwischen zwei Reibungspartnern ist die wahre Kontaktfläche kleiner als die scheinbare Kontaktfläche.

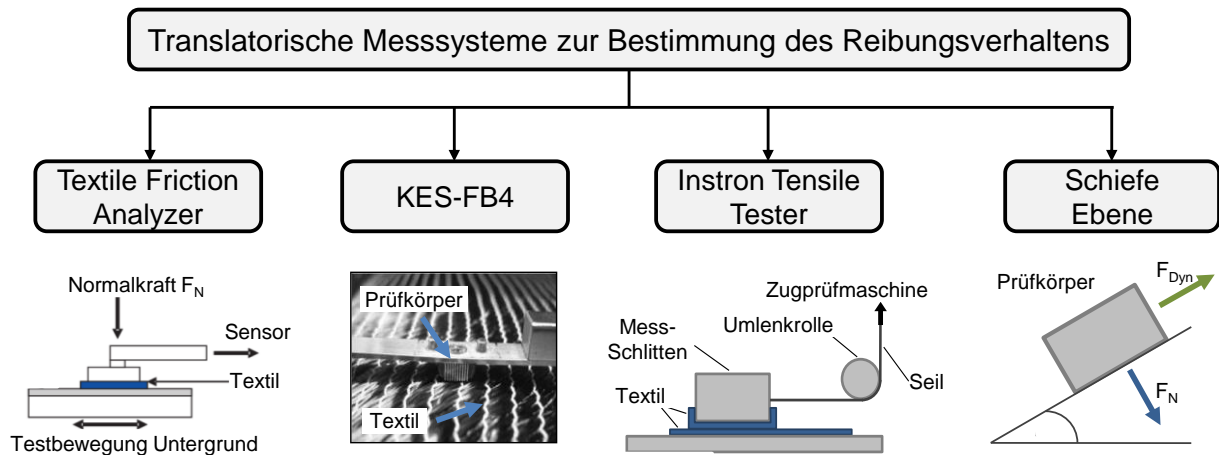


Abbildung 2.7: Translatorische Messsysteme zur Bestimmung des Reibungsverhaltens [101, 103, 114, 115]

Während des Prüfungsvorgangs werden bei allen vier Messsystemen die Tangentialkräfte durch Messsensoren gemessen und an eine Auswertesoftware weitergeleitet. Unterschiedliche Normalkräfte können entweder durch Änderungen des Pressdrucks (Textile Friction Analyzer, KES-FB4) oder durch Zusatzgewichte am Messschlitten (Instron Tensile Tester, Schiefe Ebene) erzeugt werden. [100, 101, 114]

**Forschungsarbeiten** aus der Bekleidungsindustrie bilden eine gute Grundlage hinsichtlich des Reibungsverhaltens von textilen Halbzeugen, jedoch ist der direkte Transfer der Erkenntnisse auf beispielsweise CF-Gelege fraglich. Neben den bereits dargestellten Abhängigkeiten textiler Halbzeuge bei der Reibungswertermittlung bzgl. variierender Prüfgeschwindigkeiten und Kontaktflächengrößen existieren weitere Effekte. Ein häufig beobachteter Effekt ist der sogenannte Stick-Slip-Effekt, welcher sich in der Form einer gleichmäßigen Oszillation der dynamischen Tangentialkraft zweier gleitender Körper äußert [116, 117]. Weiterhin können sich drei verschiedene Textilstände während einer Messung ausbilden: das textile Halbzeug bleibt unverändert, eine Textilwölbung (Welle) bildet sich unmittelbar vor dem Reibungsschlitten aus oder eine ausgeprägte Deformation in Dickenrichtung der textilen Halbzeuge stellt sich ein [108].

Hinsichtlich technischer Fasern (z. B. CF) beschränkt sind die Forschungsarbeiten mit nur wenigen Ausnahmen auf Rovingreibung anstatt auf textile Halbzeuge. Beispielsweise untersuchten Roselman und Tabor [118, 119] die Reibungseigenschaften von einzelnen Kohlenstofffaserfilamenten unter Verwendung einer Reibtrommel. Sie berichten, dass der dynamische Reibungskoeffizient für glatte

Oberflächen höher ist als für raue. Begründet wird diese Beobachtung durch die Adhäsionstheorie sowie durch die Topographie der Oberflächen, wonach die reale Kontaktfläche (bei gleicher Normalkraft) für glatte Oberflächen größer ist als für raue Oberflächen (vgl. Howell [101]).

Des Weiteren beschreiben Cornelissen et al. [120], dass während der Verarbeitung von Fasern nicht nur Roving-Werkzeug-Reibung, sondern auch Intra-Roving- und Inter-Roving-Reibung existieren. Ihre Ergebnisse an Kohlenstoff-, Glas- und Aramidrovings zeigen ebenfalls, dass im Vergleich zu rauen Gegenkörperoberflächen um bis zu 40 % höhere Reibungswerte resultieren, wenn die Gegenkörperoberflächen glatt sind. Dies bestätigt die Beobachtungen von Roselman und Tabor [118, 119]. Mit der Entwicklung eines analytischen Modells konnten Cornelissen et al. [121] qualitativ die Ergebnisse ihrer Arbeiten [120] abbilden. In einer weiterführenden Arbeit [122] transferierten Cornelissen et al. ihre Erkenntnisse auf ein Gewebe mit Atlasbindung und stellten über die reale Kontaktfläche einen Zusammenhang zwischen den Einzelmessungen an Rovings und dem textilen Halbzeug her. Weiterhin untersuchten Chakladar et al. [123] den Einfluss der Rovinggröße und des Reibungswinkels zwischen Rovings. Die Ergebnisse zeigten, dass der Reibungskoeffizient vom Reibungswinkel (bei  $0^\circ$  am Höchsten) abhängig ist und dass die Rovinggröße nur einen marginalen Einfluss auf den Reibungskoeffizient hat, was die Beobachtungen von Cornelissen [120] bestätigt.

Lomov et al. [124] untersuchten das Reibungsverhalten von CF-Gelegen. Hierbei wurden drei verschiedene CF-Gelege in je vier Prüfrichtungen ( $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  und  $90^\circ$ ) unter Verwendung des KES-FB4 getestet. Die Gelegearten waren zwei Biaxial-Gelege ( $0^\circ/90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ) und ein Quadriaxial-Gelege ( $0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ$ ). Sie berichten, dass die Reibungskoeffizienten des  $0^\circ/90^\circ$ -Geleges und des Quadriaxial-Geleges auf der Vorderseite höher sind als auf der Rückseite. Im Gegensatz dazu konnte beim  $\pm 45^\circ$ -Gelege kein Unterschied gemessen werden. Als Ursache hierfür wird die Bindungsart genannt. Es konnte jedoch kein klarer Zusammenhang zwischen Faserorientierung bzw. Testrichtung mit dem resultierenden Reibungskoeffizienten bestimmt werden.



### 2.3.3 Biegeverhalten

Die Technische Mechanik beschreibt die Biegesteifigkeit  $B$  als Quotient zwischen Biegemoment  $M_B$  und Krümmung  $k$  folgendermaßen [12]:

$$B = E \cdot I = \frac{M_B}{k} \Leftrightarrow M_B = B \cdot k \quad (2.6)$$

Dabei sind  $E$  das E-Modul des Materials und  $I$  das dazugehörige Flächenträgheitsmoment [125]. Allerdings ist diese Definition für textile Halbzeuge nur bedingt zutreffend, da sich im Preforming Prozess die verwendeten textilen Halbzeuge nicht elastisch verformen, sondern vorwiegend Fasern aneinander gleiten. Daher ist die Biegesteifigkeit von der verwendeten Faserart, der Garnkonstruktion sowie dem konstruktiven Aufbau des textilen Halbzeugs abhängig. [12, 126-128]

Ein Großteil bisheriger Arbeiten zur Untersuchung/Beschreibung des Biegeverhaltens textiler Halbzeuge stammt aus der Bekleidungsindustrie (meist zur Qualitätsbeurteilung). Peirce [100] entwickelte hierbei ein klassisches, linear-elastisches Modell (vgl. Gleichung 2.6). Weitere Modelle wurden von Grosberg [129], Ngo Ngoc et al. [130] sowie Lahey und Heppler [131] entwickelt. Bei Letzteren ist das Biegemoment durch eine Hysterese<sup>2</sup> gekennzeichnet, bei welcher nichtlineare Elastizitäten sowie viskoelastische und coulombsche Reibungseinflüsse der textilen Halbzeuge berücksichtigt werden. Abbildung 2.8 stellt die verschiedenen Modelle zur Beschreibung des Biegeverhaltens grafisch dar.

---

<sup>2</sup> Die Hysterese ist ein Maß für die Fähigkeit eines textilen Halbzeugs sich zurück zu verformen. Wird ein anfänglich gerades textiles Halbzeug gebogen, so ist die zeitliche Änderung des Quotienten von Biegemoment  $M_B$  und Krümmung  $k$  nichtlinear (vgl. Übergangskurve bei C in Abbildung 2.8). Die Ursache hierfür ist der Reibungswiderstand zwischen den Fasern beim Biegen. Wenn es möglich ist das textile Halbzeug in die Ausgangslage zurückzubiegen, führt dies zu einer Hystereseform. Ist die Haftreibung am Anfang des Biegevorgangs überwunden und die elastischen Fasern entspannen sich währenddessen nicht, so läuft die Hystereseform bei wiederholten Biegungen nicht mehr durch den Ursprung.

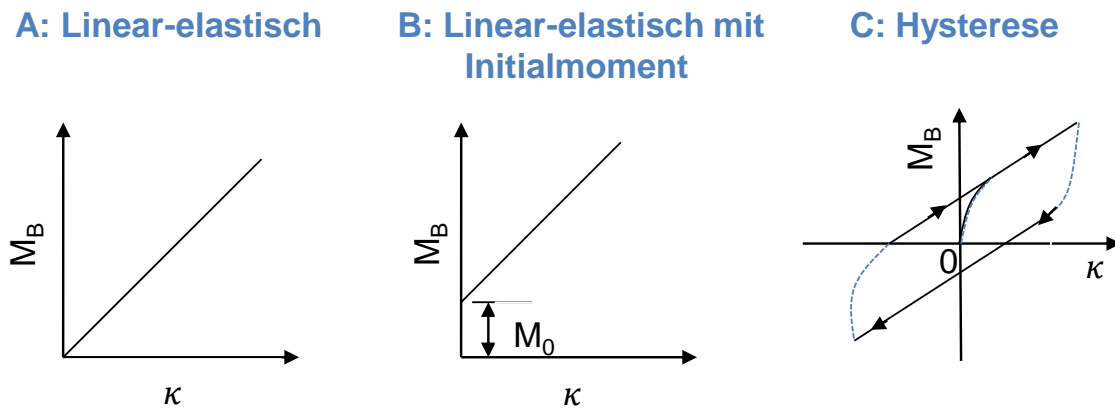


Abbildung 2.8: Grafische Darstellung der theoretischen Modelle zur Beschreibung des Biegeverhaltens von textilen Halbzeugen [100, 129, 131-133]

Einige der Modelle basieren auf 2D-Einheitszellen, bei welchen die Faserquerschnitte (z. B. rund, elliptisch, etc.) und die Faserflexibilität variieren [134-137]. Weitere Modelle ändern die Freiheitsgrade der Einzelfilamente im Roving [138], die Bindungsart bei Geweben [139, 140] oder beschreiben die textilen Halbzeuge als elastische Streifen mit internen Verformungsbedingungen [141].

1999 entwickelten Jiang und Hu [142] ein Modell zur Beschreibung der Biegehysteresekurve von Multiaxial-Gelegen und validierten dieses mit experimentellen Untersuchungen an GF-Gelegen. Hierbei wird über die parametrische Funktion einer zylindrischen Helix die Biegesteifigkeit einer mehrlagigen GF-Gelege Preform in Abhängigkeit der Faserorientierung als Summe der Biegesteifigkeiten der Einzellagen beschrieben.

Bezüglich der Berechnung der Biegeeigenschaften textiler Halbzeuge existieren weitere numerische Modelle, welche im Review von Syerko übersichtlich dargestellt sind [143].

Die **Messmethoden** zur Bestimmung des Biegeverhaltens entstammen aus dem Bereich der Bekleidungsindustrie und können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Messung der Gewebeverformung unter Eigengewicht (Kategorie 1) und Messung von Kräften, Momenten oder Energien bei einer vorgegebenen Biegeverformung (Kategorie 2) [128, 130].

Beim Cantilever Verfahren (Kategorie 1) wird die zu testende Probe auf einer horizontalen Plattform positioniert und innerhalb von 10 s horizontal über eine Kante unter konstanten Rahmenbedingungen bewegt, bis die Stirnseite der Probe einen

Winkel von  $41^{\circ} 30'$  erreicht. Anschließend wird die Überhanglänge der getesteten Probe genutzt um die Biegesteifigkeit  $G$  [ $\text{mN}\cdot\text{cm}$ ] zu berechnen. [144]

Der wesentliche Vorteil des Cantilever Verfahrens ist, dass es eine sehr einfache und kostengünstige Messmethode ist. Allerdings ist die Messmethode von subjektiven Einflüssen durch den Prüfer geprägt, es wird lediglich ein linear-elastisches Verhalten abgebildet und es können keine mehrlagigen Proben ohne vorgeschalteten Fixierungsschritt der Einzellagen getestet werden [144, 145]. Aufgrund dessen wurde das Cantilever Verfahren im Laufe der Jahre weiterentwickelt indem beispielsweise die Probenbewegung elektronisch erfasst wird [135] oder zusätzlich optische und mechanische Mess-/Überwachungsmodule eingesetzt werden [128]. Das „**Automatische Cantilever-Biegesteifigkeitsprüfgerät mit paralleler Messwerterfassung maximale Probenbreite 200 mm**“ (ACPM 200) ist eine der modernsten Varianten und ermöglicht eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse von  $> 95\%$ . [145-147]

Bei der zweiten Kategorie hat sich das KES-FB2 für die Bestimmung des Biegeverhaltens von textilen Halbzeugen etabliert [128, 148]. Die textile Probe wird hierbei vertikal zwischen einer starren und einer beweglichen Halterung fixiert und anschließend mit einem Biegemoment belastet. Für textile Halbzeuge aus CF oder GF ist das KES-FB2 auf Grund des eingeschränkten Messbereichs nur bedingt geeignet. Weiterhin ist es ein sehr komplexes und teures Messsystem, welches mehrlagige Proben nicht ohne das Auftreten von Schubkräften (zwischen den Einzellagen) prüfen kann. Vorteilhaft sind allerdings die Erzeugung einer definierten kreisförmigen Biegung, die Möglichkeit zur Abbildung eines nichtlinearen Biegeverhaltens sowie die Vermeidung von Gravitationseinflüssen. [105, 128, 130, 149]

In Anlehnung an das KES-FB2 wurde ein neues Biegeprüfverfahren mit drehbarer Einspannung entwickelt. Auch bei diesem Verfahren wird die zu testende Probe vertikal eingeklemmt, sodass der Einfluss von Gravitationskräften vermieden wird. Weiterhin ermöglicht das Verfahren die Aufzeichnung von zeit- und winkelabhängigen Biegekraftverläufen zur Analyse des Relaxationsverhaltens textiler Halbzeuge. Jedoch können auch mit diesem Verfahren mehrlagige Proben aufgrund der Entstehung von Schubkräften zwischen den Einzellagen nur bedingt getestet werden. [130, 146]

**Forschungsarbeiten** zur Bestimmung des Biegeverhaltens von Gelegen haben gezeigt, dass Materialparameter wie das Einzellagenflächengewicht, die Faserorientierung, die Bindungsart, die Stichlänge, die Verwirkungsgarnspannung, der Nahtabstand sowie die Garngemetrie das Biegeverhalten maßgeblich beeinflussen. Allerdings konnten nur wenige allgemeingültige Aussagen getroffen werden, da die untersuchten textilen Halbzeuge (Gewebe, Gelege, Matten) sich grundlegend in ihren Materialparametern unterschieden und nur in wenigen Ausnahmen ein paarweiser Vergleich stattgefunden hat.

Hinsichtlich des Einflusses der Faserorientierung und des Einzellagenflächengewichtes untersuchten Lomov et al. [124] mehrere CF-Gelege in drei verschiedenen Testrichtungen ( $0^\circ$ ,  $+45^\circ$  und  $90^\circ$ ). Vereinzelt konnte eine Richtungsabhängigkeit bzgl. des Biegeverhaltens festgestellt werden, was auf die unterschiedliche Garnbündelung (aufgrund der Bindungsart) zurückzuführen ist. Beispielsweise wurden für das getestete Quadriaxial-Gelege um ca. 25 % höhere Biegesteifigkeiten in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  gemessen als in  $+45^\circ$  Testrichtung. Weiterhin waren die Biegesteifigkeiten des  $0^\circ/90^\circ$ -Geleges dreimal höher als beim  $\pm 45^\circ$ -Gelege (trotz nahezu identischem Einzellagenflächengewicht) und höher als beim doppelt so schweren Quadriaxial-Gelege. Als Ursache hierfür wird die unterschiedliche Einzelfilamentanzahl der Rovings genannt. Ähnliche Trends wurden auch bei Dörsch et al. [36] beobachtet.

Mehrlagige CF-Gelegeproben (Faserorientierung  $\pm 45^\circ$ , Einzellagenflächengewicht  $568 \text{ g/m}^2$ ) wurden von Bilbao et al. [128] untersucht. Zur Vermeidung des Auffächerns während des Prüfvorgangs wurden je zwei Textillagen miteinander vernäht, wodurch sich die Biegesteifigkeit im Vergleich zur 1-lagigen Probe um 46 % erhöhte. Ergänzend wurde in Voruntersuchungen zur vorliegenden Arbeit der Einfluss der Lagenanzahl und der Stichlänge von vernähten CF-Geweben untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Steigerung der Lagenanzahl und eine Verringerung der Stichlänge die Biegesteifigkeit erhöhen. [23]

Eckers et al. [150] untersuchten in ihrer Studie mehrere biaxiale GF- und CF-Gelege (Faserorientierung  $0^\circ/90^\circ$ ), welche sich hinsichtlich der Bindungsart, der Feinheit der Verstärkungsfasern sowie der Stichlänge unterschieden. Im Gegensatz zur Franse-Bindung führt eine Trikot-Bindung zu einem stabileren Textil, wodurch die Biegesteifigkeit erhöht wird. Vallons [151] bestätigt in seiner Arbeit diese Aussage

und weist ebenfalls darauf hin, dass eine Erhöhung der Verwirkungsgarnspannung die Stabilität von Gelegen zusätzlich steigert. Ähnliche Ergebnisse haben Yüksekkaya [125] und Truong [152] beobachtet. Weiterhin wird durch eine Vergrößerung der Stichlänge bei einer Trikot-Bindung das Maschensystem flexibler, was zu einer Reduktion der Biegesteifigkeit führt. Im Gegensatz dazu sind Gelege mit einer Franse-Bindung nahezu unabhängig von der Stichlänge. Hinsichtlich des Nahtabstands berichtet Cripps [153], dass eine Erhöhung die Flexibilität der textilen Halbzeuge steigert, was wiederum die Biegesteifigkeit verringert.

Eckers [150] und Yüksekkaya [125] beschreiben in ihren Arbeiten, dass durch eine Zunahme der Garnfeinheit der Verstärkungsfasern (dickere Einzelfilamente) höhere Biegesteifigkeiten aufgrund des höheren Fallkoeffizienten<sup>3</sup> verursacht werden. Je dichter hierbei die Fasern bei gleichem Durchmesser im Garn gepackt sind (Packungsdichte), desto biegesteifer ist das textile Halbzeug. In diesem Zusammenhang ist die Angabe des Titers nicht zielführend, da sich Garne (Monofilamentstrang oder Stapelgarn) mit gleichem Titer unterschiedlich steif verhalten können. Auch die Verdrillung hat einen Einfluss auf das Biegeverhalten und führt zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit. [125, 154]

## **2.4 Anforderungen an Preforms und Preforming Verfahren**

In den vorherigen Kapiteln wurden verschiedene Ansätze zur automatisierten Herstellung von Preforms vorgestellt. Angesichts branchenspezifischer Anforderungen und der Variantenvielfalt von FKV-Bauteilen ist es schwierig allgemeine Aussagen über erforderliche mechanische Kennwerte zu quantifizieren. Im Gegensatz dazu lassen sich konkrete Anforderungen an Preforms und Preforming Prozesse ableiten, wobei die Anforderungen an den Preforming Prozess durch die der Preform bestimmt werden. Abbildung 2.9 zeigt hierzu die Charakteristika und Einflussfaktoren hinsichtlich der Anforderungen an Preforms und Preforming Prozesse. Diese Aufstellung dient im Anschluss als Grundlage für die Entwicklung eines neuen kontinuierlichen Profil-Preforming Systems.

---

<sup>3</sup> Der Fallkoeffizient beschreibt nach DIN EN ISO 9073-9 das Verhältnis der Fläche des projizierten Schattens der drapierten Messprobe zur Fläche der undrapierten (glatten) Messprobe in Prozent.

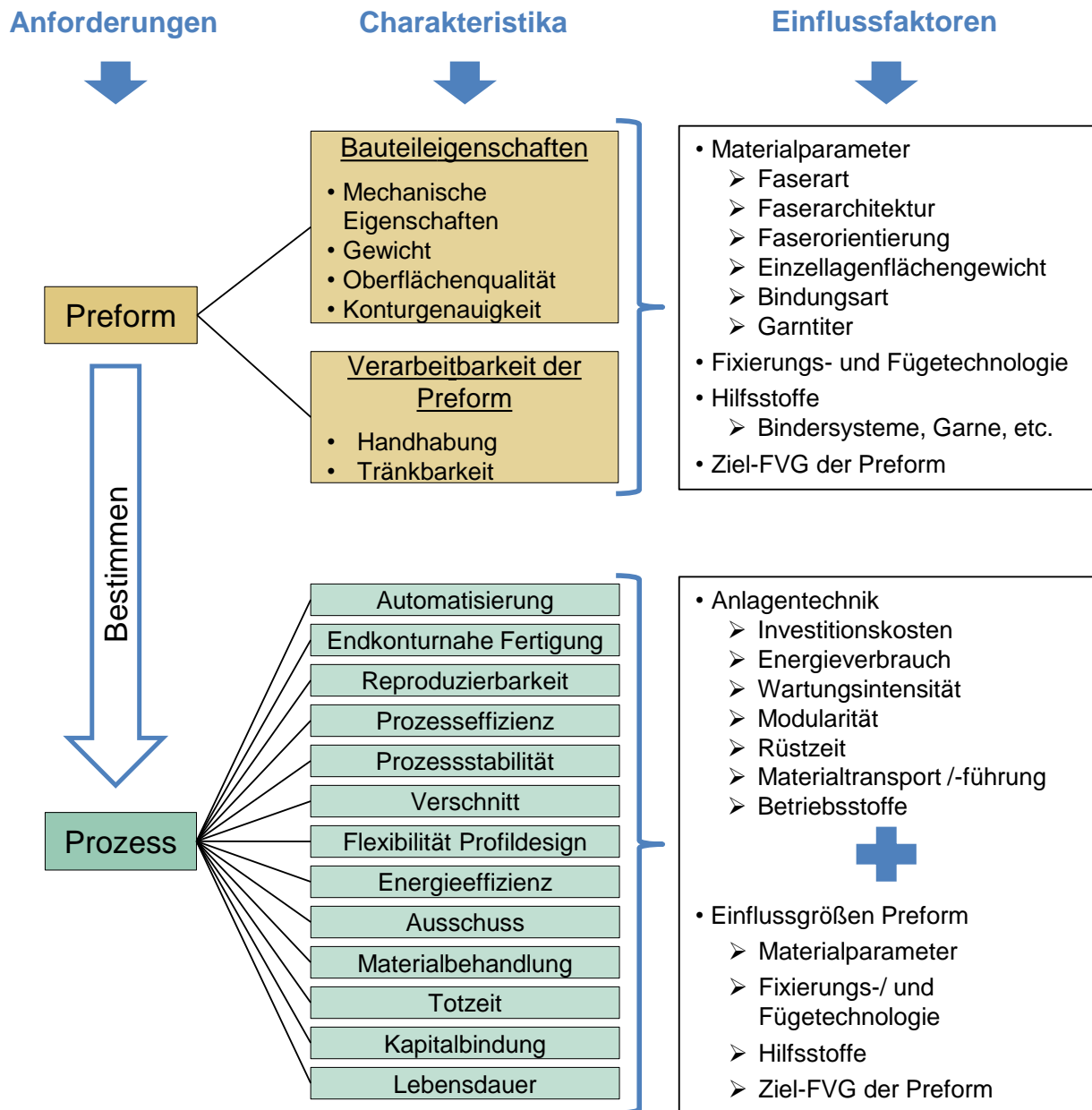


Abbildung 2.9: Überblick über die Anforderungen, Charakteristika und Einflussgrößen bei Preforms und Preforming Prozessen

Anforderungen an Preforms werden durch die angestrebten Bauteileigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit der Preforms bestimmt. Erstere gliedern sich hierbei in mechanische Eigenschaften, Gewicht, Oberflächenqualität sowie Konturgenauigkeit auf, wohingegen die Verarbeitbarkeit der Preforms durch Handhabung (Struktursteifigkeit) und Tränkbarkeit charakterisiert wird. Die wesentlichen Einflussfaktoren, welche zur Erreichung der angestrebten Anforderungen entscheidend sind, können in Materialparameter, Fixierungs- und Füge-technologie, Hilfsstoffe und Ziel-FVG der Preform untergliedert werden. Hinsichtlich der

Materialparameter besteht der größte Spielraum, da die Faserart, die Faserarchitektur, das Einzellagenflächengewicht, etc. variiert werden können. Bei den Fixierungs- und Füge-technologien unterscheiden sich die integrierten Hilfsstoffe (z. B. Garnmaterial) sowie deren Applizierungsstrategie. [1, 3, 6, 10-13, 27, 35, 47]

Prozesseitig gliedern sich die Charakteristika in Automatisierungsgrad, endkonturnahe Fertigung, Reproduzierbarkeit, Prozesseffizienz, Prozessstabilität, Verschnitt (Materialeinsatzquote - MEQ), Flexibilität Profildesign, Energieeffizienz, Ausschuss, Materialbehandlung, Totzeit, Kapitalbindung und Lebensdauer auf. Diese wiederum werden durch anlagenspezifische Einflussgrößen und die zuvor genannten Einflussgrößen (Materialparameter, Fixierungs- und Füge-technologie, Hilfsstoffe und FVG der Preform) bestimmt. Zu den wesentlichen anlagenspezifischen Einflussgrößen gehören Investitionskosten, Energieverbrauch, Wartungsintensität, Modularität, Rüstzeit, Materialbehandlung und Betriebsstoffe. [1, 3, 6, 9, 10, 12, 18, 21, 27, 35]

Innerhalb der verschiedenen Industriesektoren (Luft- und Raumfahrt, Automobilsektor und Windindustrie) werden einzelne Anforderungen mit einer übergeordneten Wichtigkeit versehen, welche in den folgenden Abschnitten qualitativ aufgeführt werden.

In der Luft- und Raumfahrt spielt neben den mechanischen Eigenschaften und der Oberflächenqualität das Gewicht der Bauteile eine entscheidende Rolle, denn hier können pro eingespartem Kilogramm die Kosten um bis zu 5000 € reduziert werden [155, 156]. Gleichmaßen wird eine präzise und stabile Fertigung verlangt, welche nur sehr geringe Toleranzabweichungen gestattet [1, 157].

Im Automobilsektor werden sehr hohe Anforderungen an die Automatisierbarkeit und die Fertigungskosten gestellt, damit die Produktion hoher Stückzahlen sowie die Konkurrenzfähigkeit zu metallischen Bauteilen gewährleistet werden können [1, 30]. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die verwendeten Ressourcen, welche die dauerhaften Fixkosten bestimmen. Eine Gewichtsreduzierung ist im Vergleich zur Luft- und Raumfahrt nicht im selben Ausmaß entscheidend. Allerdings kann durch eine Gewichtseinsparung von 100 kg eine Kraftstoffeinsparung von 0,3 - 0,5 l / 100 km ermöglicht werden [158].

Hinsichtlich der Windindustrie sind die Investitionskosten der Fertigungsanlagen aufgrund der enormen Bauteilgröße entscheidend. Da in der Regel kleinere Seriengrößen (100er-Serien) produziert werden, hat sich in den vergangenen Jahren der Fokus jedoch auf die Optimierung einzelner Prozessschritte (Handhabung, Nachbearbeitung, etc.) verlagert [1].

## **2.5 Zusammenfassung**

Bei der Betrachtung des Standes der Technik können folgende Punkte zusammengefasst werden:

- Preforming ist nach wie vor der Flaschenhals der Preform-LCM Prozesskette und besitzt hohe Relevanz bei der FKV-Bauteilherstellung
- Kontinuierliche Profil-Preforming Systeme besitzen großes Potential die Herstellungskosten von FKV-Profilen zu reduzieren
- Wissen über textiles Formgebungsverhalten birgt großes Potential zur Steigerung der Preformingrobustheit und -effizienz
  - o Der Einfluss von Material- und Prozessparameter auf einzelne Textileigenschaften (Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten) ist nur teilweise bekannt
  - o Umfassende Untersuchungen bezüglich der Einflüsse von Textileigenschaften auf das Formgebungsverhalten fehlen
- Richtlinien für das textile Formgebungsverhalten beim Preforming sind nicht vorhanden

Die bestehenden Entwicklungspotentiale von Prozess und Material werden im Rahmen der Arbeit durch eine Prozessentwicklung und umfassende Parameterstudien bzgl. der Textileigenschaften (separate Parameterstudien hinsichtlich des Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhaltens) und der kontinuierlichen Formgebung adressiert. Das Ziel ist die Entwicklung von Richtlinien, welche zur Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens eingesetzt werden können.



### 3 Entwicklung eines kontinuierlichen Profil-Preforming Systems

Basierend auf den Anforderungen an Preforms und Preforming Verfahren sowie den erschlossenen prozesseitigen Entwicklungspotentialen wurde ein neues Profil-Preforming System entwickelt. Nach einer theoretischen Vorbetrachtung der Herausforderungen zur kontinuierlichen Herstellung von Profil-Preforms und einer Zusammenfassung der Anforderungen an ein kontinuierliches Profil-Preforming System (Lastenheft), folgt die detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise des neuen Systems. Anschließend werden die Einflussfaktoren, welche die kontinuierliche Formgebung beim neu entwickelten Profil-Preforming System beeinflussen, identifiziert.

#### 3.1 Theoretische Vorbetrachtung zur Herstellung von kontinuierlichen Profil-Preforms

Die Gegenüberstellung der kontinuierlichen Verfahren aus Kapitel 2.2.3 verdeutlicht, dass bei den existierenden kontinuierlichen Profil-Preforming Systemen noch Entwicklungspotential besteht. Zur Verbesserung einzelner Prozesseigenschaften, wie beispielsweise zur Steigerung der Prozessgeschwindigkeit, müssen verschiedene Prozessherausforderungen überwunden werden. Diese Herausforderungen sind im Folgenden aufgelistet:

- Kontinuierlicher und fasergerechter **Materialtransport**
- Definierte **Formgebung/Faserorientierung**
- Realisierbarkeit anwendungsspezifischer **Faservolumengehalte**
- **Flexibilität** des Formgebungskonzeptes
- Kontinuierliche **Fixierung** der Preforms
- Materialschonende **Führung** der textilen Halbzeuge
- Kurze **Rüstzeiten**
- **Robustheit** gegenüber unterschiedlichen textilen Halbzeuge

Aus den Erkenntnissen des Standes der Technik und den Herausforderungen lässt sich ein Lastenheft für das neu zu entwickelnde kontinuierliche Profil-Preforming System definieren (siehe Tabelle 3.1).

Als Schlüsselement wird die Fixierungstechnologie des Preforming Systems angesehen. Die bereits vorgestellten kontinuierlichen Profil-Preforming Systeme (vgl.

Kapitel 2.2.2) basieren auf der Bindertechnik, welche hinsichtlich Prozessgeschwindigkeit, Anpassungsfähigkeit, Investitionskosten und Energieverbrauch nachteilig ist. Daher muss bei der Neuentwicklung eine alternative Fixiertechnologie angewendet werden. Hierzu wird die Nähetechnik als geeignet angesehen, da diese die zuvor aufgeführten Nachteile der Bindertechnik (vgl. Kapitel 2.1) kompensieren kann und eine lokale Fixierung zur geometrischen Stabilisierung ausreichend erscheint. Wird allerdings eine flächige Fixierung der Preform benötigt, müsste auf die Bindertechnik zurückgegriffen werden.

Tabelle 3.1.: Lastenheft für eine Anlage zur kontinuierlichen Herstellung von Profil-Preforms (z. B. T-, I-Profil-Preforms)

Kategorie	Anforderungen an den Preforming Prozess
<b>Prozess</b>	
Materialkapazität	Produzierbare Profillaufänge $\geq 30$ m; Anzahl textiler Halbzeuge für den Lagenaufbau $> 6$ Stück
Formgebung	Variables Formgebungskonzept für unterschiedliche Profilformen (T, I, etc.)
Fixierung Preforms	Kontinuierlich, effizient und flexibel
Zuschnitt Preforms	Niedrige Materialeinsatzquote (Verschnitt $< 10$ %)
Modularität	Kurze Rüstzeiten bzgl. Anpassung an verschiedene Profildesigns, Austauschen von Hilfs- und Betriebsstoffen und Integration von zusätzlichen Anlagenkomponenten
Automatisierungsgrad	Manueller Aufwand für Materialbestückung und Preformentnahme $< 10$ %
Prozessgeschwindigkeit	$> 2$ m/min
Transporteinheiten und Materialführung	Keine Oberflächenbeschädigungen oder Zerstörungen der Materialien; Keine Faltenbildung und kein Verzug
Prozessstabilität	Störungsfreie Fertigung, geringe Wartungsintensität
Reproduzierbarkeit	Ausschuss $< 5$ %
Lebensdauer	Geringer Anlagenverschleiß (z. B. Führungsschienen)
<b>Produkt</b>	
Geometrie	Fertigungstoleranzen der Preforms $\Delta$ FVG $\leq \pm 2$ %
Materialien	Verwendung von Standardmaterialien $\rightarrow$ Schmaltextilien und Standardhalbzeuge
Eigenschaften	Beliebige Faserorientierung möglich; FVG der Preforms $> 40$ %
<b>Kosten</b>	
Ressourcen	Kostengünstige Hilfs- und Betriebsstoffe
Kapitalbindung	Geringe Investitionskosten
Energieverbrauch	Geringer Stromverbrauch (z. B. durch Vermeidung von Aufheiz- und Kühlstationen)

Basierend auf dem Lastenheft wurde das Continuous Profile Preforming System (CPPS) entwickelt, welches im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

### 3.2 Continuous Profile Preforming Systems (CPPS)

Das entwickelte Continuous Profile Preforming System (CPPS) ermöglicht die kontinuierliche Herstellung von 3D-Profil-Preforms ausgehend von ebenen textilen Halbzeugen. Das modular aufgebaute System (5600 mm x 1500 mm x 1900 mm) besteht aus vier Grundeinheiten: **Materialzuführung**, **Formgebung**, **Fixierung** und **Trennung** (siehe Abbildung 3.1). Die zu verarbeitenden textilen Halbzeuge müssen zur Erzeugung einer Profil-Preform jede dieser Einheiten nacheinander passieren.

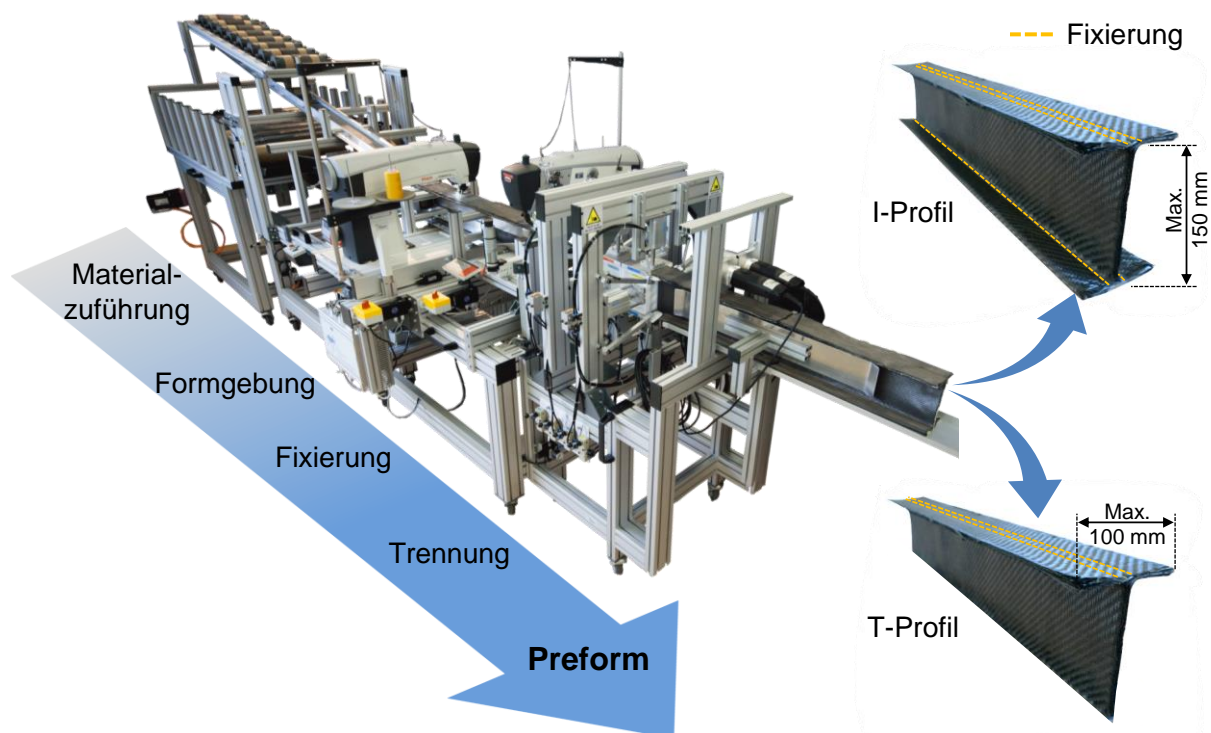


Abbildung 3.1: Continuous Profile Preforming System (CPPS) inklusive herstellbarer Profil-Preforms (T- und I-Profil-Preforms)

In der **Materialzuführungseinheit** erfolgt die Materialbereitstellung direkt durch „Material von der Rolle“ (Standardmaterialien und Schmaltextilien, Kapazität  $\geq 30$  m Materialauflänge). Bis zu 8 Materialrollen (erster Teil der Profil-Preform) können rotierend gelagert auf einem Förderband (GUF-P 2000) positioniert werden, welche anschließend fasergerecht im gewünschten Lagenaufbau zur Formgebungseinheit transportiert werden. Weitere 8 Materialrollen (zweite Teil der Profil-Preform) können oberhalb des Förderbands positioniert werden, welche über eine Schiene zur Formgebungseinheit gelangen. Der Lagenaufbau wird durch die Anordnung der Halbzeuge erzeugt und kann durch einen einfachen Wechsel der Materialrollenposition individuell und somit lastfallgerecht variieren.

Anschließend wird in der **Formgebungseinheit** die zu erzeugende Profilform durch ein fünfteiliges Schienensystem geformt. Abbildung 3.2 zeigt den Ablauf der Profilentstehung in der Formgebungseinheit anhand einer I-Profil-Preform.

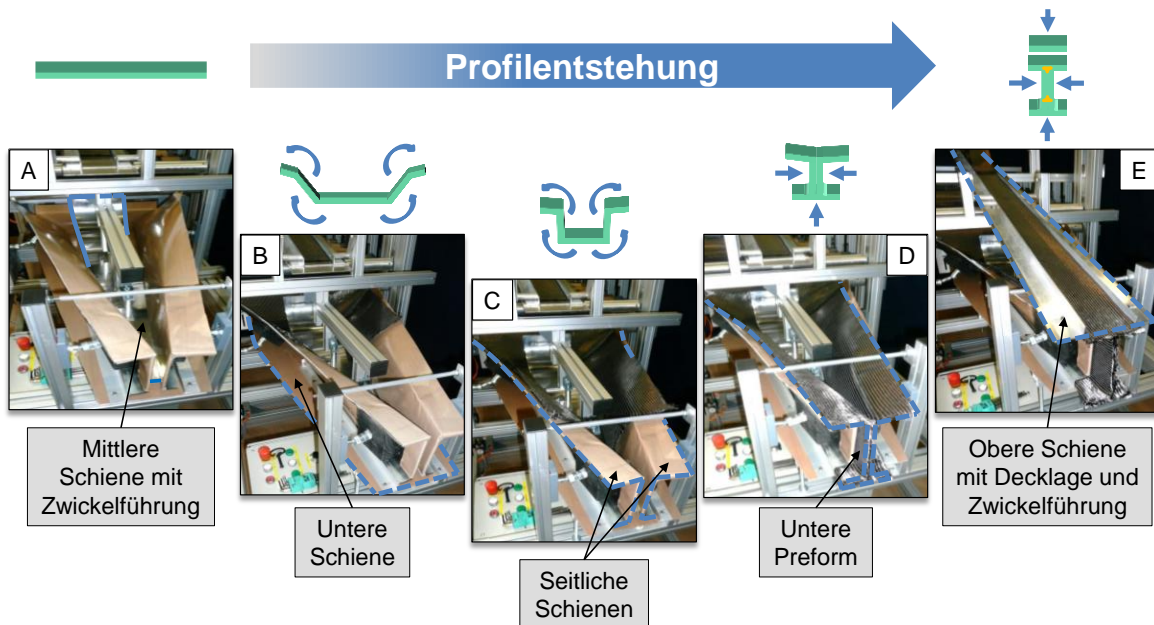


Abbildung 3.2: Profilentstehung einer I-Profil-Preform in der Formgebungseinheit des CPPS

Der erste Teil der Profil-Preform wird durch die Bewegung in Prozessrichtung mit Hilfe von vier Führungsschienen (eine untere, zwei seitliche, eine mittlere) kontinuierlich vorgeformt (A - D). Der zweite Teil der Profil-Preform, Decklagen in Form von Schmaltextilien, wird auf einer oberen Schiene am Ende der Formgebungseinheit zugeführt (E). Beide Teile bilden die zu erzeugende Profil-Preform, bei welcher der angestrebte FVG stufenlos eingestellt werden kann. Der maximale erreichbare FVG ist hierbei abhängig von den verwendeten textilen Halbzeugen ( $\leq 60\%$ ). Mit dem entwickelten Designkonzept können nicht nur I-Profile, sondern auch weitere Profildesigns (T, L, etc.) geformt werden. Derzeitig betragen die maximale Steghöhe 150 mm und die maximale Flanschbreite 100 mm. Durch den Wechsel der Formgebungsschienen (kurze Rüstzeiten) wird der 2D-Faltprozess zur 3D-Preform durch die Neuordnung der Formgebungsschienen zueinander angepasst. Zur Vermeidung von harzreichen Zonen an den Kreuzungspunkten zwischen dem Steg und den Flanschen können während der Formgebung zusätzlich Rovings oder Flechtschläuche, sogenannte Zwickel, kontinuierlich zugeführt werden.

In der **Fixierungseinheit** wird die Preform durch zwei in Reihe angeordnete Säulennähmaschinen (PFAFF 2571) kontinuierlich fixiert. Der verwendete Stichtyp ist ein modifizierter Doppelstepstich, bei welchem die Verknotung zwischen Unter- und Oberfaden außerhalb der Preform liegt. Dadurch werden harzreiche Zonen im späteren Bauteil minimiert und die gewünschten mechanischen Eigenschaften gesichert [159]. Die Stichlänge ( $\leq 5$  mm) und Nähgeschwindigkeit ( $\leq 3500$  Stiche/min) sind variabel und ermöglichen eine theoretische Prozessgeschwindigkeit bis zu 17,5 m/min. Derzeitig ist eine maximale Prozessgeschwindigkeit von 4 m/min möglich. Bei höheren Prozessgeschwindigkeiten sind die auf die textilen Halbzeuge wirkenden Kräfte zu groß und es kommt zu Geometrieungenauigkeiten der Profil-Preforms, Verzug der textilen Halbzeuge, Textilschädigungen oder fehlerhaften Stichbildern. Die Nähmaschinen sind in einem modularen Schienensystem integriert, welches den geformten Querschnitt der Profil-Preforms aufrechterhält. Die Anzahl der Nähmaschinen richtet sich an dieser Stelle nach der benötigten Nahtanzahl und ist aufgrund des modularen Aufbaus des Gesamtsystems variabel<sup>4</sup>. Im Gegensatz zur Bindertechnik sind durch den Einsatz der Nähtechnik als Fixierungstechnologie die Investitionskosten und der Energieverbrauch geringer, da auf Aufheiz- und Kühlstationen verzichtet werden kann. Zusätzlich werden keine teuren Betriebs- und Hilfsstoffe benötigt und die Wartungsintensität der Nähmaschinen ist vergleichsweise gering.

Im letzten Schritt werden die vernähten Profil-Preforms in der **Trenneinheit** auf die gewünschte Länge zugeschnitten (Verschnitt < 10 %). Allerdings wird die Preform während des Trennprozesses (Ablängen) durch pneumatisch betriebene Klemmbacken allseitig fixiert, sodass Faserverschiebungen vermieden werden können. Daher ist der Prozess derzeit quasi-kontinuierlich. Durch eine mitbewegte Schneideinheit kann dies jedoch behoben werden. Bei Bedarf können zusätzlich zwei elektrisch betriebene Schneiden zur Gewährleistung einer endkonturnahen Preformqualität ( $\Delta$  FVG  $\pm 2$  %) eingesetzt werden.

---

<sup>4</sup> Für die Fixierung einer T-Profil-Preform werden zwei Nähmaschinen eingesetzt, wobei für die Fixierung einer I-Profil-Preform vier Nähmaschinen benötigt werden. Da es sich hier um eine Prototypenanlage mit derzeit zwei Nähmaschinen handelt, werden I-Profil-Preforms zweimal durch die Anlage geführt. Alternativ dazu könnten zwei zusätzliche Nähmaschinen integriert werden.

Die Automatisierung des Gesamtsystems, ausgehend von der Materialzuführung bis hin zur endkonturnahen Profil-Preform, stimmt alle Arbeitsschritte präzise aufeinander ab (manueller Aufwand für Materialbestückung und Preformmentnahme ist 10 %). Damit die Leistungsfähigkeit und Orientierung der Fasern vollständig erhalten bleiben, muss jedoch ein kontinuierlicher Materialtransport sichergestellt und lokale Belastungsspitzen auf die textilen Halbzeuge müssen minimiert werden. Aufgrund dessen wurden zusätzlich zu den Transportelementen, dem Förderband und den Nähmaschinen drei Puller in die Anlage integriert. Diese befinden sich direkt hinter der Formgebungseinheit, zwischen den Nähmaschinen und direkt vor der Trenneinheit. Dadurch wird die Abzugskraft gleichmäßig verteilt und Oberflächenbeschädigungen, Zerstörungen, Faltenbildung und Verzug der textilen Halbzeuge können vermieden werden. Die einzelnen Transportelemente (Förderband, Nähmaschinen und Puller) sowie die Schneideinheiten sind auf einem LabVIEW-basierenden Programm zusammengefasst und können separat, in Gruppen oder global angesteuert werden.

Das neu entwickelte kontinuierliche Profil-Preforming System erfüllt im Wesentlichen die im Lastenheft (Tabelle 3.1) aufgestellten Randbedingungen/Anforderungen zur kontinuierlichen Herstellung von Profil-Preforms. Eine Übersicht hierzu gibt Tabelle 8.3 im Anhang.

Bei einer erneuten Gegenüberstellung der kontinuierlichen Verfahren (vgl. Kapitel 2.2.3) mit dem CPPS wird deutlich, dass das CPPS den Eigenschaftsbereich der kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren in vier von sieben Punkten erweitert (siehe Abbildung 3.3, Bewertungsskala 1 - 5). Die gesteigerten Unterscheidungskriterien sind Prozessgeschwindigkeit, Profildesignflexibilität, Investitionskosten und Energieverbrauch. Hinsichtlich der erreichbaren Produkteigenschaften sowie des Automatisierungsgrades ist das bereits hohe Niveau der vorgestellten kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren erreicht. Der erwartete bzw. mögliche Eigenschaftsbereich des CPPS ist in der folgenden Abbildung blau markiert.

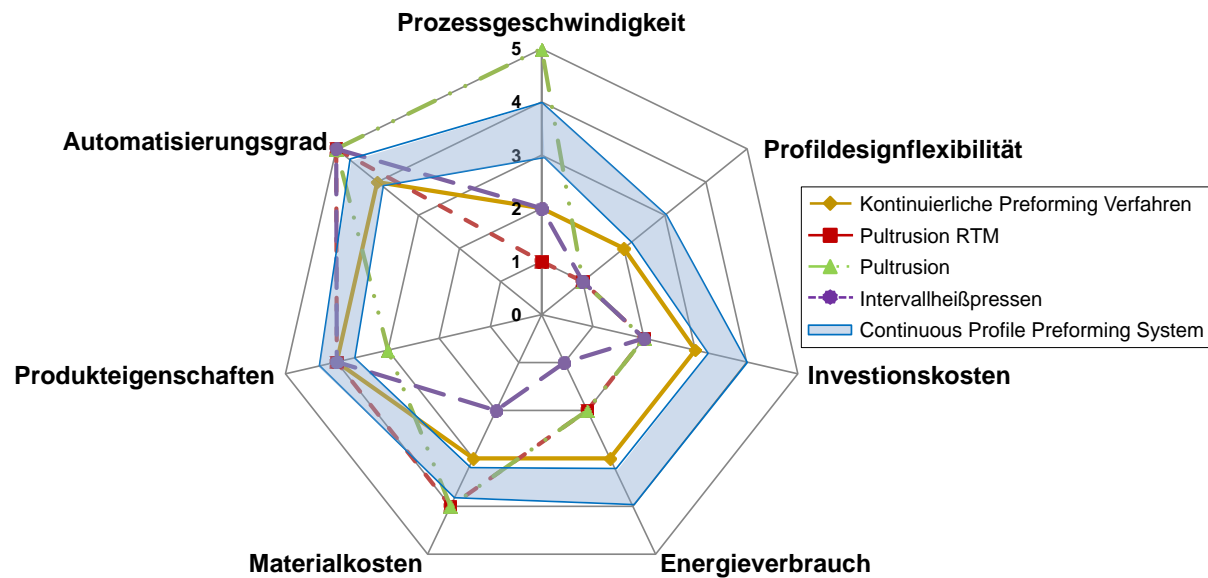


Abbildung 3.3: Gegenüberstellung der kontinuierlichen Verfahren: kontinuierliche Profil-Preforming Verfahren (basierend auf der Bindertechnik), FKV-Herstellungsverfahren und CPPS

Demnach erhöht das CPPS den Entwicklungsstand kontinuierlicher Profil-Preforming Systeme.

### 3.3 Einflussfaktoren auf die kontinuierliche Formgebung

Das entwickelte Profil-Preforming System ermöglicht die kontinuierliche Herstellung endkonturnaher Profil-Preforms. Allerdings hat sich während der Preformherstellung mit unterschiedlichen textilen Halbzeugen herausgestellt, dass die Systemgrenzen hinsichtlich der maximal erreichbaren Prozessgeschwindigkeit unter Beibehaltung einer hohen Produktqualität variieren. In diesem Zusammenhang sind die Indikatoren hoher Qualität: geringe Geometrietoleranzen<sup>5</sup> ( $\Delta$  FVG  $< \pm 2$  %), exakte Stichbilder<sup>6</sup> ( $\Delta$  Stichlänge  $< 10$  %) sowie geringe Abweichungen der Faserorientierung ( $< 5$  % Abweichung von ursprünglichen Orientierung). Weiterhin dürfen keine Textilschädigungen auftreten. Beispielsweise führen zu hohe Biegesteifigkeiten der textilen Halbzeuge zu hohen Rückstellkräften, sodass die textilen Halbzeuge nach der Formgebung das Bestreben haben sich in ihren ursprünglichen ebenen Ausgangszustand zurückzubiegen. Dadurch steigt beim Weitertransport durch das Preforming System der Widerstand an den Führungsschienen, wodurch sich die

<sup>5</sup> Die Abweichung des FVG von  $\pm 2$  % bezieht sich auf den angestrebten kompaktierten Zustand der Profil-Preform, sodass für anschließende Prozesse (z. B. Imprägnierung) keine Faltenbildung entsteht.

<sup>6</sup> Die Abweichung der Stichlänge von  $< 10$  % ist als Richtwert zu sehen, da diese von einer Vielzahl von Faktoren (Garnmaterial, Struktursteifigkeit des textilen Halbzeugs, etc.) abhängig ist.

benötigten Förderkräfte an den Transporteinheiten maximieren. Dies kann derzeit nur durch eine Reduzierung der Prozessgeschwindigkeit oder des Kompaktierungszustandes kompensiert werden, was jedoch nicht zielführend ist. Folglich ist die Prozessrobustheit und -effizienz des CPPS materialabhängig.

Die höchste Belastung auf die textilen Halbzeuge wirkt in der Formgebungseinheit des CPPS. Hier werden, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, die ebenen Ausgangsmaterialien kontinuierlich zur gewünschten Profilform geformt. Aufgrund dessen befindet sich in dieser Einheit der Schlüssel zur Reduzierung der benötigten Förderkräfte. Die Reaktion der textilen Halbzeuge während der kontinuierlichen Formgebung kann in die grundlegenden Textileigenschaften<sup>7</sup> **Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten** aufgeteilt werden (siehe Abbildung 3.4). Durch eine prozessorientierte Materialauswahl können daher einzelne Kraftanteile der textilen Halbzeuge bzgl. Kompaktierung, Reibung oder Biegung gezielt reduziert werden.

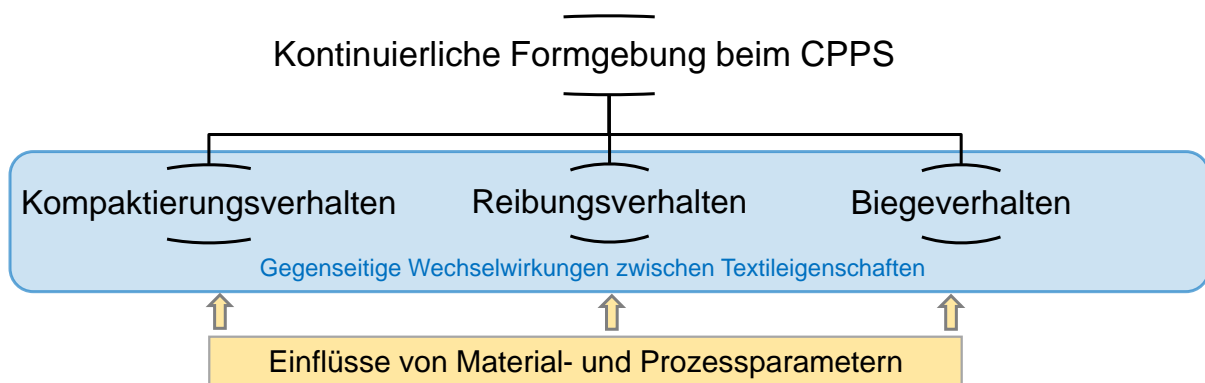


Abbildung 3.4: Textileigenschaften während der kontinuierlichen Formgebung beim CPPS und Einflüsse von Material- und Prozessparametern

Der finale Kompaktierungszustand der herzustellenden Preform, welcher entscheidend für anschließende Verarbeitungsschritte (z. B. Imprägnierung) ist, wird am Ende der Formgebungseinheit durch die Abstände der Formgebungsschienen eingestellt. Die eingesetzten textilen Halbzeuge bzw. der verwendete Lagenaufbau sollten möglichst geringe Kompaktierungskräfte und ein reproduzierbares Kompaktierungsverhalten (geringe Standardabweichungen) zur Erreichung eines angestrebten FVG aufweisen.

<sup>7</sup> Scherung wird an dieser Stelle nicht betrachtet, da der vorliegende Formgebungsprozess ein reiner 2D-Umformprozess zur 3D-Profilpreform ist, bei welchem keine bzw. nur eine minimale Scherung der textilen Halbzeuge (Abweichung Faserorientierung < 5 %) auftritt.



Reibung tritt während des Fortschreitens des Lagenaufbaus zwischen der äußeren Lage und den Formgebungsschienen, zwischen den einzelnen Textillagen sowie zwischen den Fasern/Rovings (innerhalb einer Textillage) auf. Beispielsweise könnte eine Reduzierung der Reibung zwischen oder innerhalb der Einzellagen den Transport der textilen Halbzeuge durch das CPPS erleichtern.

Die Biegung spielt bei der Erzeugung der herzustellenden Profilform (2D → 3D) eine entscheidende Rolle. Hierbei sollte die Biegesteifigkeit der textilen Halbzeuge einerseits hinreichend gering (Minimierung der Materialrückstellkräfte) und andererseits ausreichend hoch (Vermeidung von Faltenbildung und ausreichende Prefomsteifigkeit) sein.

Zusätzlich bestehen individuelle Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Textileigenschaften, welche sich abhängig vom Formgebungsprozess unterschiedlich stark überlagern.

Die vorgestellten Forschungsarbeiten aus Kapitel 2.3 haben bereits gezeigt, dass die einzelnen Textileigenschaften jeweils sowohl von Materialparametern (beispielsweise dem Einzellagenflächengewicht) als auch von Prozessparametern (z. B. Prozessgeschwindigkeit) beeinflusst werden können. Somit besteht an dieser Stelle ein hohes Risiko, denn durch die Wahl „ungeeigneter“ Parameter wird ein Preforming Prozess instabil. Dies kann zu Geometrieungenauigkeiten der Profil-Preforms, Verzug der textilen Halbzeuge, Textilschädigungen und fehlerhaften Stichbildern führen. Auch anschließende Verarbeitungsschritte, wie die Imprägnierung der Faserstruktur, können dadurch negativ beeinflusst werden. Allerdings besteht durch die Wahl geeigneter Parameter ein enorm hohes Potential einen Preforming Prozess robust und effizient zu gestalten.

Bisher wurden keine umfassenden Parameterstudien bzgl. der drei Textileigenschaften (Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten) an ausgewählten CF-Gelegen (paarweiser Vergleich) durchgeführt. Daher wird im folgenden Kapitel zunächst untersucht, ob durch separat durchgeführte Parameterstudien bzgl. der Textileigenschaften material- und prozesseitige Auswirkungen identifiziert und Richtlinien zur Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens beim Preforming ausgearbeitet werden können.

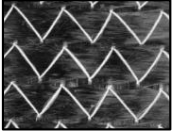
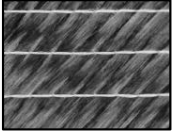
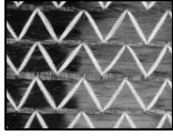
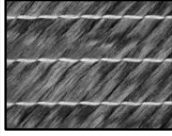

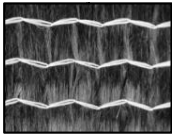
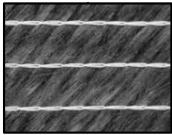
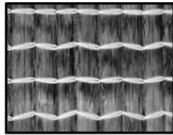
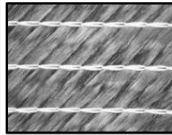
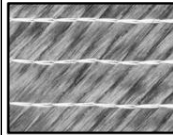
## 4 Untersuchung der Textileigenschaften von CF-Gelegen

Die Erkenntnisse aus Kapitel 2 und 3 dienen als Grundlage für die Untersuchung der Textileigenschaften (Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten) und wurden bei der Materialauswahl sowie beim Aufbau der Messsysteme berücksichtigt. Nach der Beschreibung der ausgewählten textilen Halbzeuge (CF-Gelege) und Messsysteme zur Untersuchung der jeweiligen Textileigenschaft folgen die Ergebnisdarstellung und -analyse hinsichtlich des Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhaltens unter Variation von Material- und Prozessparametern. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Definition von Richtlinien, welche zur Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens beim Preforming genutzt werden können.

### 4.1 Materialien

Für die Untersuchungen der Textileigenschaften wurden fünf CF-Gelege (vier Biaxial- und ein Triaxial-Gelege) verwendet. Diese unterscheiden sich gemäß den Herstellerangaben primär im **Einzellagenflächengewicht**, der **Bindungsart** sowie der **Faserorientierung**. Das verwendete Verwirkungsgarn der Gelege besteht hierbei aus Polyester mit einer Feinheit von 76 dtex. In den folgenden Kapiteln sind die Materialien M1 - M5 hinsichtlich des Einzellagenflächengewichtes in Gruppe I (M1 und M2) mit  $\sim 300 \text{ g/m}^2$  und Gruppe II (M3 - M5) mit  $\sim 600 \text{ g/m}^2$  unterteilt worden. Für die Angabe weiterer Materialparameter wie Nähfeinheit, Stichtlänge, Garnbreite und -titer wurden zusätzlich Mikroskopaufnahmen (DigiMicro Profi, dnt) der CF-Gelege M1 - M5 erstellt. Tabelle 4.1 zeigt hierzu eine Übersicht der CF-Gelege M1 - M5 mit den dazugehörigen Materialparametern.

Tabelle 4.1: Übersicht der Materialparameter der fünf CF-Gelege M1 - M5

Merkmale		Materialparameter der CF-Gelege				
Hersteller/ Herstellerbezeichnung		SGL Group/ HPT300 C090	SGL Group/ HPT300 C45	SGL Group/ HPT600 C090	SGL Group/ HPT600 C45	SGL Group/ HPT600 C045
Probenbezeichnung		M1	M2	M3	M4	M5
Oberseiten						
Unterseiten						
Faserart/ Fasertyp		CF/ Sigrafil C30T50	CF/ Sigrafil C30T50	CF/ Sigrafil C30T50	CF/ Sigrafil C30T50	CF/ Sigrafil C30T50
Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]		297	296	607	606	608
Bindungsart <sup>1</sup>		Trikot	Fränse	Trikot	Fränse	Hybrid
Faserorientierung [°]		0°/90°	±45°	0°/90°	±45°	0°/±45°
Nähfeinheit * [1/"]		6	6	7	6	6
Stichlänge * [mm]		3,33	2,6	2,7	2,5	2,5
Garnbreite * [mm]	Oberseite	4,2	1,8	3,6	1,8	4,2
	Unterseite	3,3	1,8	2,7	1,8	1,8
Garntiter * [tex]	Oberseite	614	267	1089	530	847
	Unterseite	483	267	810	530	354
<sup>1</sup> Verwicklungsgarn: Polyethersulfon (PES), Verwicklungsgarnfeinheit 76 dtex.						
* Keine Herstellerangaben. Materialkenndaten wurden mit einem digitalen Kameramikroskop (DigiMicro Profi, dnt, max. Bildauflösung 2592 x 1944 Pixel) erfasst und vermessen.						

## 4.2 Messsysteme und Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der Einflüsse von Materialparametern auf die Textileigenschaften wurden zusätzlich zu den grundlegenden Unterscheidungsmerkmalen wie Einzellagenflächengewicht, Bindungsart und Faserorientierung auch verschiedene Lagenaufbauten untersucht. Prozessseitig sind die Prüfgeschwindigkeit, die Normalkraft, die Werkzeugoberfläche, die Zykluszahl (Anzahl von Wiederholungsversuchen bzw. multiple Kompaktierungszyklen) und die Testrichtung (0° und 90°) variiert worden. Eine Übersicht der Material- und Prozessparameter gibt Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Übersicht der verwendeten Material- und Prozessparameter zur Untersuchung des Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhaltens

		Kompaktierungs- verhalten	Reibungs- verhalten	Biege- verhalten
<b>Material</b>				
	<b>Bindungsart</b>	Franse, Trikot, Hybrid	Franse, Trikot, Hybrid	Franse, Trikot, Hybrid
	<b>Flächengewicht<sup>A</sup></b>	300, 600 g/m <sup>2</sup>	300, 600 g/m <sup>2</sup>	300, 600 g/m <sup>2</sup>
	<b>Faserorientierung</b>	/	0°/90°, ±45°	0°/90°, ±45°
	<b>Lagenanzahl</b>	1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15	1, 2	1 - 6
	<b>Mischaufbauten</b> (3- und 6-lagig)	Offset 45° <sup>B</sup>	Gelege-Gelege Reibung (2-lagig)	Alternierend, halb/halb, ...
	<b>Lagenaufbauten</b> (OU = Wechsel von Ober-/Unterseite)	OU-alternierend, ...	Gelege-Gelege Reibung (2-lagig)	OU-alternierend, ...
	<b>Ober-/Unterseite</b>	/	Ja	Ja
<b>Prozess</b>				
	<b>Geschwindigkeit</b>	1, 50, 100 mm/min	1 - 6 m/min <sup>C</sup>	0,14, 0,27 rad/s
	<b>Normalkraft</b>	bis 20 kN	3 - 25 N <sup>D</sup>	< 400 N <sup>D</sup>
	<b>WZ-Oberfläche<sup>E</sup></b>	St	St, Al, PTFE	St
	<b>Kontaktfläche</b>	8000 mm <sup>2</sup>	1800 mm <sup>2</sup>	20000 mm <sup>2</sup>
	<b>Zykluszahl</b>	1 - 10	1 - 120	1 - 10
	<b>Testrichtung</b>	/	0°, 90°	0°, 90°
<sup>A</sup> Flächengewichte wurden vor jedem Versuch überprüft.				
<sup>B</sup> Offset 45° bedeutet, dass jede 2. Lage im Lagenaufbau um 45° gedreht ist.				
<sup>C</sup> Geschwindigkeit in Schritten von 0,5 m/min gesteigert				
<sup>D</sup> Normalkräfte wurden an die jeweiligen Kompaktierungskräfte zur Einstellung definierter FVG angepasst				
<sup>E</sup> Werkstoff/Bezeichnung: St / X5CrNi1810 (Härte: 149 HB), Al / Al MgSi0,5 (Härte: 70 - 80 HB), PTFE (Härte: D 50 - 65 Shore); Alle WZ-Oberflächen wurden vor Beginn einer Messreihe poliert (Rautiefe R <sub>z</sub> < 1,1 µm)				

Alle Tests sind unter konstanten Umgebungsbedingungen mit einer Temperatur von  $22,5 \pm 2$  °C und einer relativen Feuchtigkeit von  $65 \pm 5$  % durchgeführt worden. Das Flächengewicht jeder Probe wurde vor einer durchgeführten Versuchsreihe gewogen, sodass Produktionsschwankungen sowie Faserverluste an den Kanten (aufgrund von Schneid- und Handhabungsprozessen) berücksichtigt werden konnten. Zur statistischen Absicherung wurden alle Versuche mindestens dreimal wiederholt.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass für jedes der Messsysteme Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden, sodass die Aussagekraft der

Messergebnisse (z. B. reproduzierbare Messwerterfassung) gewährleistet werden kann. Die wichtigsten Erkenntnisse werden während der Beschreibung der jeweiligen Messsysteme (Kapitel 4.2.1 - 4.2.3) aufgeführt.

#### 4.2.1 Messsystem Kompaktierung

Ein Messsystem zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von textilen Halbzeugen muss eine durchgängige Erfassung einer Kraft (senkrecht zur Textilebene) über den Verfahrensweg (Abstand der Messplatten) bei konstanten Testgeschwindigkeiten realisieren können. Um dies zu ermöglichen, wird das Kompaktierungsverhalten der trockenen Gelege an einer universellen Prüfmaschine (ZWICK 1474) untersucht.

Zu Beginn einer Messung werden die zuvor kreisförmig<sup>8</sup> zugeschnittenen Proben (A,  $\varnothing = 100$  mm) im gewünschten Lagenaufbau (1 - 15 Lagen) zwischen zwei metallischen Messplatten<sup>9</sup> (B,  $\varnothing = 150$  mm) positioniert. Durch eine Aufwärtsbewegung der unteren Messplatte mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit (1, 50 und 100 mm/min) wird eine flächige Kompaktierkraft auf den zu testenden Lagenaufbau appliziert (siehe Abbildung 4.1). Nachdem die Maximalkraft von 20 kN erreicht ist, folgt eine Haltezeit von 2 min<sup>10</sup> bevor die Entlastungsphase eingeleitet wird. Bei der Versuchsreihe mit aufeinanderfolgenden Kompaktierungszyklen ist bis zur zehnten Wiederholung ebenfalls eine Haltezeit von 2 min zwischen jedem Zyklus eingehalten worden.

Für jede Messung sind die Zeit, Kraft sowie der Abstand der Messplatten zueinander nach dem Überschreiten des Schwellenwerts von 5 N mit der Prüfsoftware testXpert II aufgezeichnet worden. Systembedingte Messfehler, welche durch den Messsensor oder andere Systemkomponenten verursacht werden können, werden

---

<sup>8</sup> Die kreisförmige Probengeometrie wurde zur Vermeidung von Ausrichtungseinflüssen, welche bei der Probenvorbereitung (Zuschnitt der Proben) auftreten können, ausgewählt.

<sup>9</sup> Die obere Messplatte ist über ein Kugelgelenk (C) gelagert, sodass eine konstante Kavitätshöhe (parallele Ausrichtung der Messplatten) gewährleistet ist.

<sup>10</sup> Die Haltezeit von 2 min entspricht der Dauer, welche eine Preform benötigt um durch das CPPS (bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 1 m/min) geführt zu werden.

durch eine Subtraktion der Blindkurven<sup>11</sup> automatisch berücksichtigt. Die ermittelten Daten können zur Analyse in Excel-Dateien ausgegeben werden.

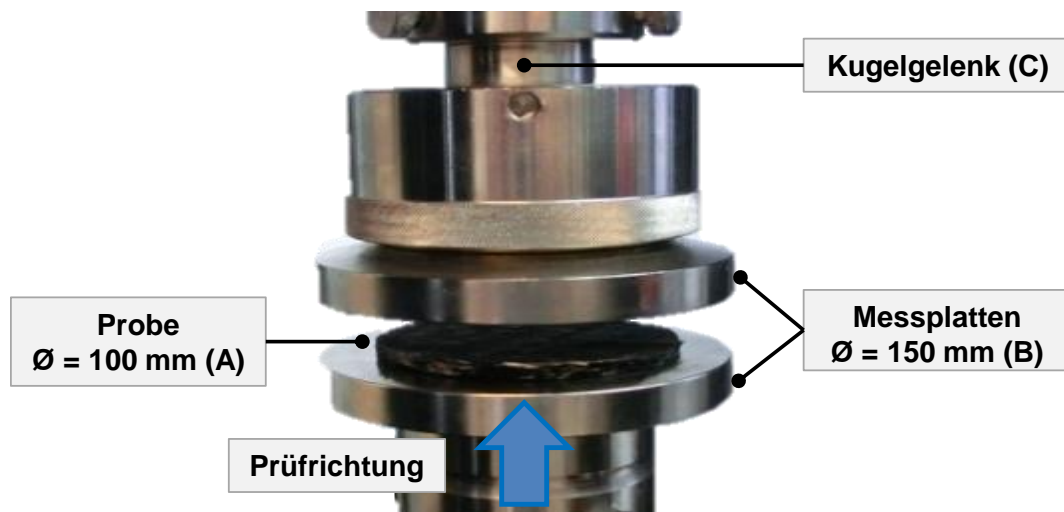


Abbildung 4.1: Messsystem zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens

In dieser Arbeit korreliert der berechnete FVG nicht mit dem Nettogewicht der Kohlenstofffasern, sondern mit dem Gesamtgewicht des jeweiligen CF-Geleges (für jede Probe separat ermittelt). Die Unterschiede sind jedoch vernachlässigbar, da die Gewichtsanteile der Verwirkungsgarne bei den verschiedenen Gelegen unter 2 % betragen. Ein Beispiel einer Messkurve mit dazugehörigem Evaluationsbereich ist in Abbildung 8.1 im Anhang dargestellt.

#### 4.2.2 Messsystem Reibung

Die wesentlichen Anforderungen an ein Messsystem zur Untersuchung des Reibungsverhaltens entstammen aus den bereits vorgestellten translatorischen Messsystemen (vgl. Kapitel 2.3.2) und sind wie folgt: wechselbare Messschlitten, variabel einstellbare Normalkraft und Testrichtung, konstante Testgeschwindigkeit sowie eine durchgängige Messwerterfassung (Tangentialkraft, Weg und Zeit). Für die Untersuchungen ist daher ein Industriebullmer (Assyst Bullmer Premiumcut CV) mit einer Prüfvorrichtung am Schneidkopf modifiziert worden. Abbildung 4.2 zeigt das entwickelte Messsystem, welches auf dem Prinzip des Instron Tensile Testers (vgl. Kapitel 2.3.2) beruht.

<sup>11</sup> Blindkurven werden gemessen, indem ein kompletter Kompaktierungszyklus ohne Probe durchgeführt wird. Dadurch können entstehende Dehnungen einzelner Systemkomponenten der Prüfmaschine evaluiert und von den Prüfergebnissen subtrahiert werden. Dadurch wird gewährleistet, dass der wahre Abstand der Messplatten abgebildet wird.

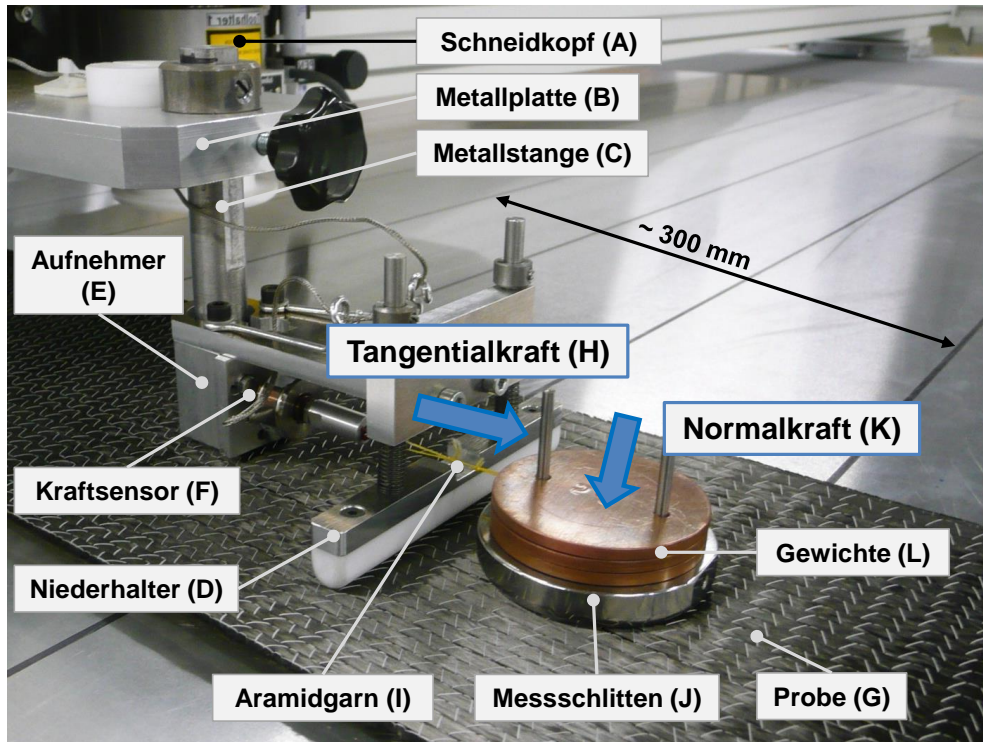


Abbildung 4.2: Messsystem zur Ermittlung des Reibungsverhaltens

Die Anbindung der Prüfvorrichtung besteht aus einer mit dem Schneidkopf (A) verschraubten horizontalen Metallplatte (B), einer darin geführten höhenverstellbaren Metallstange (C) an welcher ein PTFE-beschichteter Niederhalter<sup>12</sup> (D) montiert ist sowie einem Aufnehmer (E) für den Kraftsensor (F). Der Aufnehmer befindet sich am unteren Ende der Metallstange, ist radial frei beweglich und ermöglicht somit eine beliebige Ausrichtung (Winkelbereich ist  $0^\circ - 360^\circ$ ) zwischen dem Kraftsensor und der Probe (G).

Der Präzisions-Miniatur-Kraftsensor (Burster, Typ 8431-20) kann Zug-/Druckkräfte bis zu 20 N (Messgenauigkeit von  $\pm 0,2\%$ ) aufnehmen. Die verwendete Messsoftware (DigiVision) gibt die an dem Kraftsensor angreifende Tangentialkraft (H) über das gemessene Zeitintervall in einer in MS Excel generierten Tabelle aus. Die Tangentialkraft wird hierbei durch eine gleichmäßige translatorische Bewegung des Kraftsensors, welcher über ein Aramidgarn<sup>13</sup> (I) mit einem Messschlitten (J, hier  $\varnothing = 87,4\text{ mm}$ ) verbunden ist, eingeleitet.

<sup>12</sup> Ein Niederhalter minimiert die Entstehung von Gelegewölbungen vor dem Messschlitten.

<sup>13</sup> Die flexible Kopplung (Aramidgarn) zwischen Messschlitten und Kraftsensor verhindert die Entstehung von Querkraften (Messwertverfälschungen) am Kraftsensor.

Die Messschlitten sind kreisförmig und variieren in ihrer Größe ( $\varnothing = 47,9$  mm, 67,7 mm und 87,4 mm). Zur Einstellung der Normalkraft (K) werden die Messschlitten (Stahl, Aluminium oder PTFE) mit entsprechenden Zusatzgewichten (L) bestückt. Zur Bestimmung (vor der Messung) und Kontrolle (nach der Messung) der Oberflächengüte der Messschlitten wurden die Rauheiten der Messschlittenunterseiten mit einem Weißlichtprofilometer der Firma FRT bestimmt.

Vor Beginn einer Messung wird der Cuttertisch mit einer Aluminiumplatte<sup>14</sup> als Auflage bestückt (3000 mm x 1500 mm x 3 mm). Danach wird das zu untersuchende Gelege (einlagig) auf der Aluminiumplatte positioniert und durch Klebebänder am Rand einseitig fixiert. Anschließend wird der verwendete Messschlitten entsprechend des zu untersuchenden FVG des Geleges mit den benötigten Zusatzgewichten bestückt<sup>15</sup>, mit dem Kraftsensor verbunden und hinsichtlich der angestrebten Testrichtung ausgerichtet. Nach der Eingabe der Prüfrichtung<sup>16</sup> ( $0^\circ$  oder  $90^\circ$ ) und Testgeschwindigkeit (0,1 m/min - 6 m/min) wird die Messung gestartet. Der Evaluationsbereich der Reibungskräfte ist auf eine Messstrecke von 300 mm festgelegt. Nach Beendigung der Messung wird der Messschlitten ausgehängt, die nächste Probe aufgelegt und der Schneidkopf neu positioniert. Ein Beispiel einer Messkurve mit dazugehörigem Evaluationsbereich ist in Abbildung 8.2 im Anhang dargestellt.

Bei der Bestimmung der Gelege-Gelege Reibungskräfte erfolgt ein zusätzlicher Vorbereitungsschritt der Messschlitten in einer Drapierungsvorrichtung. Das zu testende Gelege wird hierbei grob zugeschnitten (A), auf der dazugehörigen metallischen Matrize entsprechend der gewünschten Testrichtung positioniert und anschließend händisch in die Matrize drapiert. Unter Verwendung eines Kabelbinders wird das Gelege am Messschlitten fixiert (B) und danach zugeschnitten (C). Somit ist eine faltenfreie Fixierung der Proben an den jeweiligen Messschlitten gegeben (D). Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch den Drapierungsvorgang am Stahlmessschlitten unter Verwendung des 300 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Geleges M2.

---

<sup>14</sup> Aluminiumplatte als ebener/steifer Untergrund zur Vermeidung von Messwertverfälschungen aufgrund lokaler Unebenheiten auf dem Cuttertisch.

<sup>15</sup> Die entsprechenden Gewichte wurden aus den Kompaktierungsversuchen zur Erreichung eines bestimmten Ziel-FVG abgeleitet.

<sup>16</sup> Abweichungen der Messschlittenausrichtung  $< 5^\circ$  zur angestrebten Prüfrichtung sind zulässig.



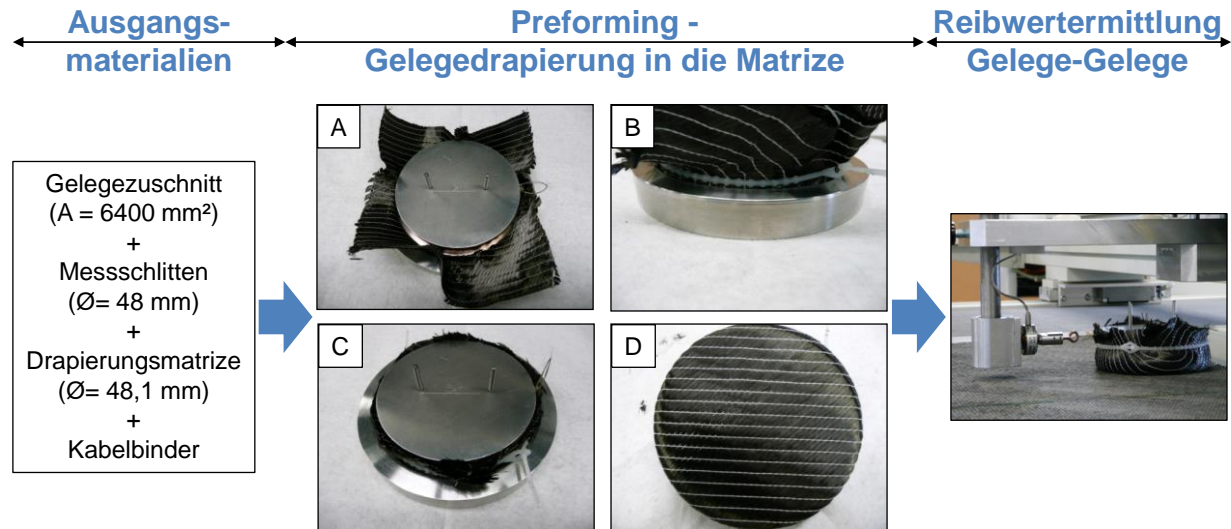


Abbildung 4.3: Vorbereitung der Gelege in der Drapierungsvorrichtung zur Bestimmung der Gelege-Gelege Reibungskräfte; Messschlittendurchmesser  $\varnothing = 48 \text{ mm}$

#### 4.2.3 Messsystem Biegung

Zur Untersuchung des Biegeverhaltens (Biegesteifigkeit) von trockenen Einzellagen der Gelege werden Versuche anhand des Cantilever-Tests nach DIN 53362 [144] durchgeführt. Der Testablauf wurde bereits in Kapitel 2.3.3 beschrieben. Der Aufbau des verwendeten Messsystems in dieser Arbeit ist in Abbildung 8.3 im Anhang dargestellt. Für jede Materialkonfiguration werden 10 Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Beim Cantilever-Test können keine Mehrlagenversuche ohne die Verwendung von Fixierungstechnologien (z. B. Nähetechnik) durchgeführt werden, da sich die trockenen Gelege während des Prüfvorgangs auffächern (vgl. Messmethoden Kapitel 2.3.3). Im Hinblick auf das kontinuierliche Formgebungsverhalten beim CPPS ist es jedoch notwendig prozessnah das Biegeverhalten von Mehrlagenproben zu evaluieren. Daher wird für die Biegekraftermittlung mehrlagiger textiler Lagenaufbauten (Einzellagentests sind ebenfalls möglich) ein neues Messsystem aufgebaut. Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2.3.3 muss das neu entwickelte Messsystem folgende Kriterien/Anforderungen erfüllen: Vermeidung von Schubkräften zwischen den Einzellagen bzw. Auffächern der Einzellagen während des Messvorgangs, konstante und variabel einstellbare Testgeschwindigkeiten sowie eine durchgängige Messwerterfassung (Biegekraft, Biegewinkel und Zeit).

Das Grundgestell des neuen Messsystems zur Bestimmung von Biegekräften besteht aus Aluminiumprofilen. Eine darauf befestigte Linearachse (Wiesel DYNALine WV60, Neff) verbindet das zweigeteilte Messsystem, bestehend aus einer *fixierten* (A) und einer in horizontaler Richtung *beweglichen* (B) Einheit (siehe Abbildung 4.4). Das gesamte Messsystem ist in Abbildung 8.4 im Anhang abgebildet.

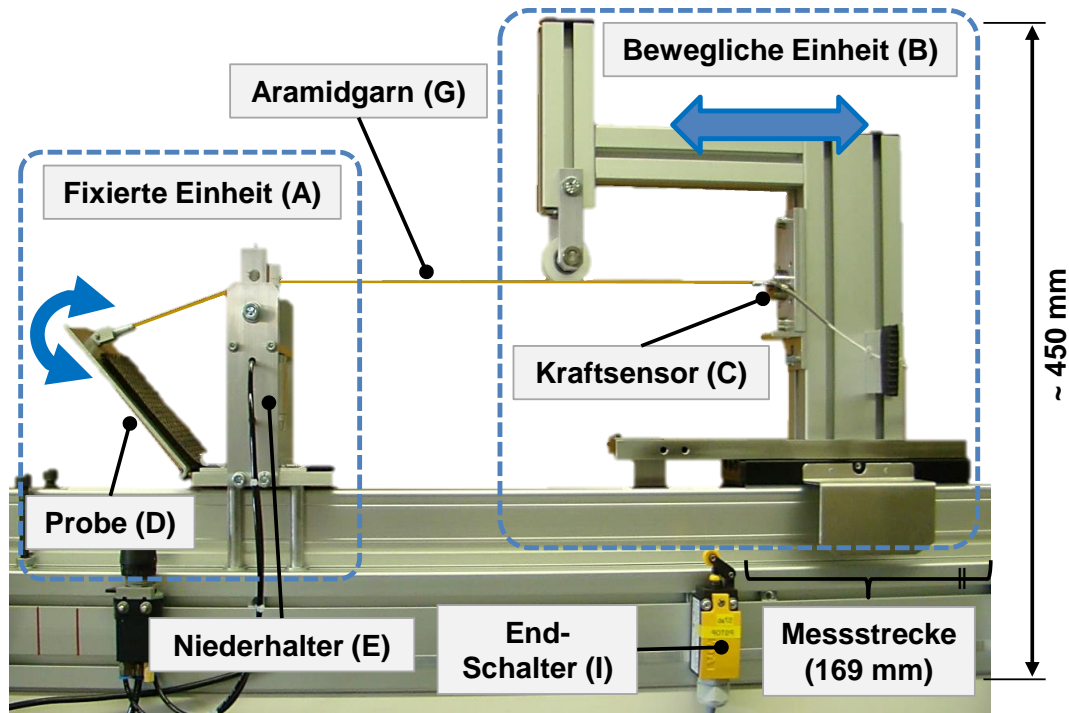


Abbildung 4.4: Detailausschnitt des neuen Messsystems zur Untersuchung des Biegeverhaltens (Biegekraft)

Zur Erfassung der Biegekräfte ist an der *beweglichen* Einheit ein Präzisions-Miniatur-Kraftsensor Typ 8431-20 der Firma Burster (C) verschraubt, welcher Zug-/Druckkräfte bis zu 20 N (Messgenauigkeit von  $\pm 0,2\%$ ) aufnehmen kann. In der *fixierten* Einheit wird die Probe (D, 220 mm x 90 mm) einseitig über einen Niederhalter (E), welcher an einen pneumatischen Kompaktzylinder (AEVULQZ 25-20-P-A) gekoppelt ist, gegen Verschieben gesichert. Der zweite Teil der Probe befindet sich auf einer eloxierten Aluminiumplatte<sup>17</sup> (F, 150 mm x 119 mm), welche in einem Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  beweglich gelagert ist. Die Verbindung der beweglichen und fixierten Einheit (Aluminiumplatte und Kraftsensor) ist über ein

<sup>17</sup> Vergleichsmessungen mit einer PTFE-Beschichtung beeinflussen die resultierenden Biegekräfte nur geringfügig. Daher wird davon ausgegangen, dass primär Biegekräfte und keine Reibungskräfte erfasst werden. Für den Vergleich der Biegekräfte zwischen den verschiedenen Gelegen in Kapitel 4.5 ist das an dieser Stelle ausreichend.

Aramidgarn (G) verwirklicht. Zur Minimierung der internen Reibungswerte während der Messung bestehen die Führungselemente aus Keramik bzw. PTFE.

Der Fahrweg der beweglichen Einheit wird über einen Messwertaufnehmer (KTC IP60, Ixthus Instrumentals, Linearität  $\pm 0,05$  %) aufgenommen<sup>18</sup>. Dadurch kann die Abhängigkeit zwischen Biegewinkeländerung der Probe (auf der Aluminiumplatte) und Fahrweg der beweglichen Einheit bestimmt werden. Diese ist nichtlinear und als Polynom 4. Grades angenähert (Abweichung Winkel - Weg  $< 1^\circ$ ) in einem LabVIEW-basierten Masterprogramm eingepflegt. Zur Begrenzung des maximalen Fahrwegs von 169 mm (entspricht  $82^\circ$ <sup>19</sup>) sind Endschalter (I, LS-02/L, EATON) am Anfang und Ende an der Linearachse angebracht.

Im Masterprogramm erfolgt neben der Erfassung der Messdaten (Biegekraft, Biegewinkel, Fahrweg und Versuchszeit) auch die Steuerung des Servomotors (AKM 42E-GNCNR-00), welcher stirnseitig an die Linearachse gekoppelt ist.

Zu Beginn einer Messung wird die zu testende Probe in der fixierten Einheit positioniert<sup>20</sup> und mit dem Niederhalter gegen Verschieben gesichert. Anschließend wird die Messung mit der gewünschten Testgeschwindigkeit (0,1 m/min - 4 m/min<sup>21</sup>) gestartet. Durch die transversale Bewegung der fixierten Einheit erfährt die Probe eine Winkeländerung von  $0^\circ$  -  $82^\circ$ <sup>22</sup>. Sobald die maximale Winkeländerung erreicht ist, wird die Erfassung der Messdaten beendet und die bewegliche Einheit in ihre Ausgangsposition zurückgefahren. Ein Beispiel einer Messkurve mit dazugehörigem Evaluationsbereich ist in Abbildung 8.5 im Anhang abgebildet.

---

<sup>18</sup> Reproduzierbarkeit der Prüfgeschwindigkeiten wurde durch 10 Wiederholungsmessungen bei 1, 2 und 4 m/min bestätigt.

<sup>19</sup> Diese Einschränkung wurde festgelegt, da ab einem Winkel von  $82^\circ$  die mehrlagigen Proben nicht mehr fehlerfrei getestet werden können (Anstoßen der Gelege am Niederhalter oder Ablösen der Gelegelagen von der Aluminiumplatte).

<sup>20</sup> Es ist darauf zu achten, dass die Probe flach aufliegt, damit von Beginn an die Biegekraft des gesamten Lagenaufbaus gemessen wird. Hierzu wird vor jedem Versuch eine Stahlplatte (Gewicht ca. 245 g) 10 s lang auf die zu testende Probe platziert. Nach einer weiteren Verweilzeit von 2 min (Relaxation der Probe) wird die Messung gestartet.

<sup>21</sup> Die Testgeschwindigkeit [m/min] bezieht sich auf die Geschwindigkeit der beweglichen Einheit und wird bei der Analyse der Ergebnisse in Kapitel 4.5 in eine Winkelgeschwindigkeit [rad/s] umgerechnet.

<sup>22</sup> Der grundlegende Unterschied zum Cantilever-Verfahren ist, dass die Messung der Biegekräfte (ein- oder mehrlagig) bei einer vorgegebenen Biegeverformung und nicht durch das Eigengewicht stattfindet.

Durch das neu entwickelte Messsystem ist es nun möglich nichtfixierte mehrlagige Gelegekonfigurationen miteinander zu vergleichen<sup>23</sup>.

### 4.3 Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens

#### 4.3.1 Einfluss der Materialparametern

Zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens der fünf CF-Gelege M1 - M5 sind zunächst **Einzellagentests** durchgeführt worden. Die resultierenden Kraftverläufe können im untersuchten Faservolumengehaltsbereich (FVG-Bereich) von 40 % - 50 % durch ein Polynom fünften Grades<sup>24</sup> abgebildet werden (siehe Abbildung 4.5, links).

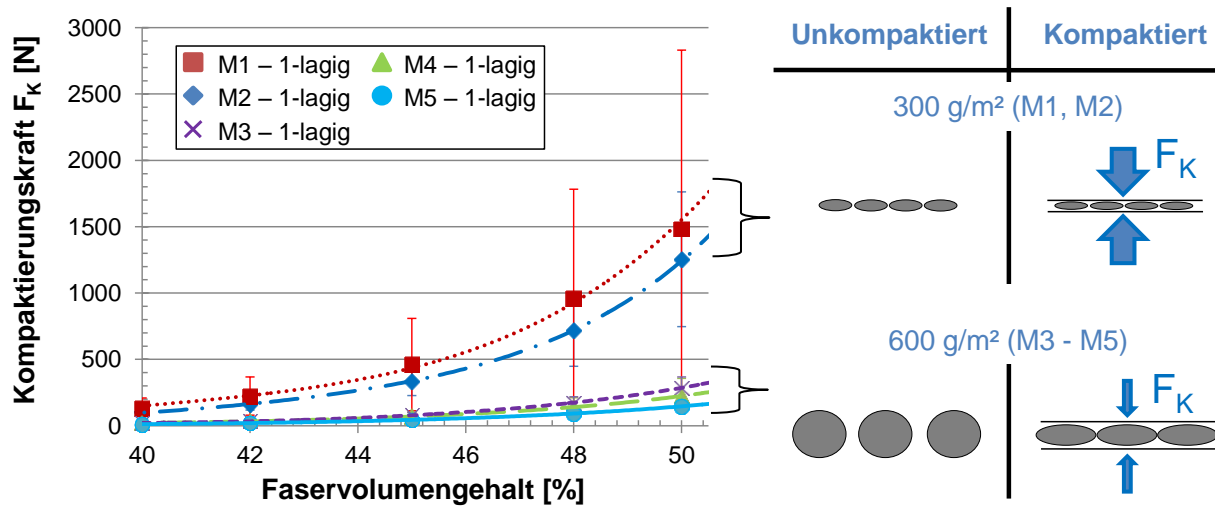


Abbildung 4.5: Kompaktierungskraftverläufe bei Einzellagentests von M1 - M5 (links); Schematische Seitenansicht der Garnstruktur der Gelege (300 g/m<sup>2</sup> vs. 600 g/m<sup>2</sup>) im unkompaktierten und kompaktierten Zustand (rechts)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Einzellagentests aufgrund großer Standardabweichungen lediglich qualitative Trends abgeleitet werden können. Gründe dafür sind herstellungsbedingte (Ausgangsqualität der Gelege) sowie vorbereitungsbedingte (Handling und Schneidprozess) Materialheterogenitäten. Besonders anfällig sind die 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M1 und M2, was sich im untersuchten FVG-Bereich durch sehr hohe Standardabweichungen von 26 % - 95 % verdeutlicht. Weniger ausgeprägt sind die Effekte bei den 600 g/m<sup>2</sup> schweren

<sup>23</sup> Mit dem neuen Messsystem werden keine Absolutwerte oder Biegesteifigkeiten ermittelt. Es dient lediglich dem Vergleich von Biegekräften verschiedener Lagenaufbauten.

<sup>24</sup> Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate können durch Polynome fünften Grades die jeweiligen Verläufe der Kompaktierungskräfte im betrachteten FVG-Bereich exakt abgebildet werden.

Gelegen M3 - M5. Die Standardabweichungen belaufen sich hierbei auf 27 % - 58 %, allerdings werden deutlich niedrigere Kompaktierungskräfte benötigt.

Vergleicht man den Aufbau der vier Biaxial-Gelege M1 - M4 (paarweiser Unterschied im Einzellagenflächengewicht), sind für die 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M3 bzw. M4 nahezu doppelt so viele CF-Garne durch die Bindungsart gebündelt wie bei M1 bzw. M2 (je 300 g/m<sup>2</sup>), was zu eher kreisförmigen anstatt elliptischen Garnquerschnitten führt (vgl. Abbildung 4.5, rechts). Im Gegensatz zu den elliptischen lassen sich die kreisförmigen Garnquerschnitte während der Belastungsphase leichter verformen (flachdrücken) und es werden geringere Kompaktierungskräfte benötigt um einen gewünschten FVG zu erreichen.

Zur Überprüfung der beobachteten Trends wurden in Folgeversuchen **Mehrlagenaufbauten** untersucht, wobei die jeweilige Lagenanzahl schrittweise (bis maximal 15) erhöht wurde. Eine Abhängigkeit zwischen steigender Lagenanzahl und resultierender Kompaktierungskraft kann im betrachteten FVG-Bereich von 40 % - 50 %) nicht festgestellt werden<sup>25</sup>. Zum gleichen Ergebnis kamen bereits Hammami und Gebart [82] sowie Liu et al. [83]. Weiterhin konnten die beobachteten Trends der Einzellagentests (Einzellagenflächengewicht als Charakteristikum) bestätigt werden. Beispielsweise werden für das  $\pm 45^\circ$ -Gelege mit 300 g/m<sup>2</sup> (M2) zur Erreichung eines FVG von 40 % bzw. 45 % eine Kompaktierungskraft von ca. 101 N bzw. 326 N benötigt. Im Gegensatz dazu müssen für das  $\pm 45^\circ$ -Gelege M4 mit 600 g/m<sup>2</sup> lediglich 15 N (70 N) aufgebracht werden. Ähnliche Zusammenhänge wurden für die andere Gelegepaarung der  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege M1 (40 % = 109 N, 45 % = 353 N) und M3 (40 % = 17 N, 45 % = 66 N) ermittelt. Für das 600 g/m<sup>2</sup> schwere Triaxial-Gelege M5 werden 12 N bzw. 47 N benötigt um einen FVG von 40 % bzw. 45 % zu erreichen. Demnach verhält es sich wie die 600 g/m<sup>2</sup> schweren Biaxial-Gelege.

Das Ergebnis, dass sich die Gelege mit einem höheren Einzellagenflächengewicht leichter und gleichmäßiger kompaktieren lassen, kann zur Reduktion der kontinuierlichen Formgebungskräfte und gleichzeitigen Steigerung der Prozessrobustheit (geringe Standardabweichungen) genutzt werden. Um dieses Potential zu

---

<sup>25</sup> Bei höheren FVG (> 50 %) kann für die Gelege mit geringem Einzellagenflächengewicht, aufgrund hoher Standardabweichungen (Effekte der Materialheterogenitäten), keine Aussage mehr bzgl. des Einflusses der Lagenanzahl getroffen werden.

überprüfen, wurden 6-Lagenpreforms der 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege (M1, M2) mit 3-Lagenpreforms der 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege (M3 - M4) verglichen. Die sich einstellenden Gesamtflächengewichte der Biaxial-Gelege sind 1782 g/m<sup>2</sup> bzw. 1776 g/m<sup>2</sup> (M1 bzw. M2) und 1821 g/m<sup>2</sup> bzw. 1818 g/m<sup>2</sup> (M3 bzw. M4). Abbildung 4.6 stellt exemplarisch den Vergleich der Biaxial-Gelege bei 50 % FVG dar.

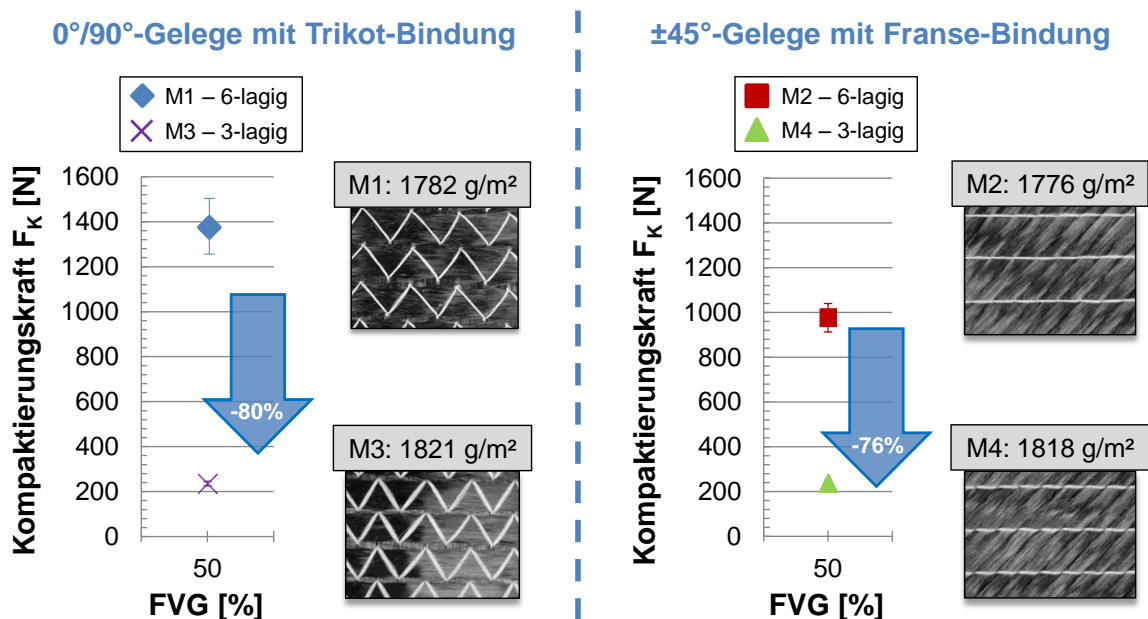


Abbildung 4.6: Einfluss des Einzellagenflächengewichts auf die Kompaktierungskraft von Mehrlagenpreforms bei einem FVG von 50 %; 6-Lagenpreforms der 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege (M1 bzw. M2) im Vergleich mit 3-Lagenpreforms der 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege (M3 bzw. M4)

Die Kompaktierungskräfte der 3-Lagenpreforms (M3 bzw. M4) sind im Mittel ca. 80 % geringer sind als die der 6-Lagenpreforms (M1 bzw. M2), obwohl das Gesamtflächengewicht von ca. 1800 g/m<sup>2</sup> gleich ist. Weiterhin sind die Standardabweichungen der 3-Lagenpreforms konstant gering. Neben den unterschiedlichen Garnquerschnitten der zwei Gelegegruppen (300 g/m<sup>2</sup> vs. 600 g/m<sup>2</sup>) ist ein weiterer wesentlicher Grund für die höheren Kompaktierungswiderstände der 6-Lagenpreforms (aufgebaut aus 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelegen M1 bzw. M2), dass der Verwirkungsgarnanteil fast doppelt so hoch ist als bei den 3-Lagenpreforms bestehend aus M3 bzw. M4.

Entsprechende Ergebnisse können im gesamten FVG-Bereich (40 % - 50 %) und bei geringeren Gesamtflächengewichten von ca. 1200 g/m<sup>2</sup> (2- vs. 4-Lagenpreforms) und 600 g/m<sup>2</sup> (1- vs. 2-Lagenpreforms) beobachtet werden. Demnach sind

vergleichbar aufgebaute Gelege mit höherem Einzellagenflächengewicht leichter zu kompaktieren und reproduzierbarer verarbeitbar (weniger anfällig gegen interne Materialunregelmäßigkeiten).

Um den Einfluss des **Verwirkungsgarns und der Faserorientierung** auf das Kompaktierungsverhalten näher zu untersuchen, wurden für Mehrlagenpreforms (3- vs. 6-lagig) zwei unterschiedliche Strategien bzgl. des Lagenaufbaus angewendet: *Erzeugung eines Versatzes* (Rotation jeder zweiten Lage um 45°) und *Erzeugung von gleichorientierten textilen Grenzflächen* (Einzellagen wurden innerhalb einer Preform gedreht).

Die **Erzeugung eines Versatzes** führt im Vergleich zu aufeinander gestapelten Lagen ohne Versatz zu einer maßgeblichen Reduktion der Kompaktierungskräfte. Für die 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M1 bzw. M2 (je 6-lagig) reduzieren sich die benötigten Kompaktierungskräfte der Preforms mit Versatz im untersuchten FVG-Bereich zwischen 12 % - 38 % bzw. 5 % - 16 %. Nesting wird an dieser Stelle als vernachlässigbar eingestuft, da die Faserorientierung der Gelege bei den Grenzflächen der Einzellagen 45° und nicht 0° (0° entspricht einer parallelen Faserausrichtung) ist und Gelege bei Belastung senkrecht zur Gelegeebene weniger stark ineinander gleiten als Gewebe (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Ursache für dieses Verhalten kann vielmehr durch die Lage der Verwirkungsgarne zueinander begründet werden. Aufgrund des Versatzes wird die Verteilung der Verwirkungsgarne beeinflusst und es entstehen je nach vorliegender Bindungsart (z. B. Trikot- oder Franse-Bindung) Bereiche in denen mehr oder weniger lokale Überlagerungen der Verwirkungsgarne vorliegen. In Abbildung 4.7 sind exemplarisch Bilder der Gelegeoberflächen (Ober- und Unterseite) von M1 (A), das dazugehörige Verwirkungsgarnmuster einer Einzellage von M1 (B) sowie Verwirkungsgarnmuster der beiden unterschiedlichen Konfigurationen von M1 (ohne bzw. mit Versatz) dargestellt (C bzw. D).

Für die Preforms von M1 (300 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht) ohne Versatz (C) entsteht aufgrund der identischen Lagenausrichtung eine Vielzahl von überlagerten Verwirkungsgarnen. Nur geringe Abweichungen  $\Delta x / \Delta y$  zueinander können durch

Materialheterogenitäten und Preforming entstehen<sup>26</sup>. Bei den Preforms mit Versatz (D) ist die Anzahl von überlagerten Verwirkungsgarnen durch die homogenere Verteilung der Verwirkungsgarne in der Ebene geringer. Dies führt zu einer Reduktion von lokalen Kraftüberhöhungen während der Kompaktierung, was insgesamt geringere Kompaktierungskräfte zur Erreichung des gewünschten FVG zur Folge hat.

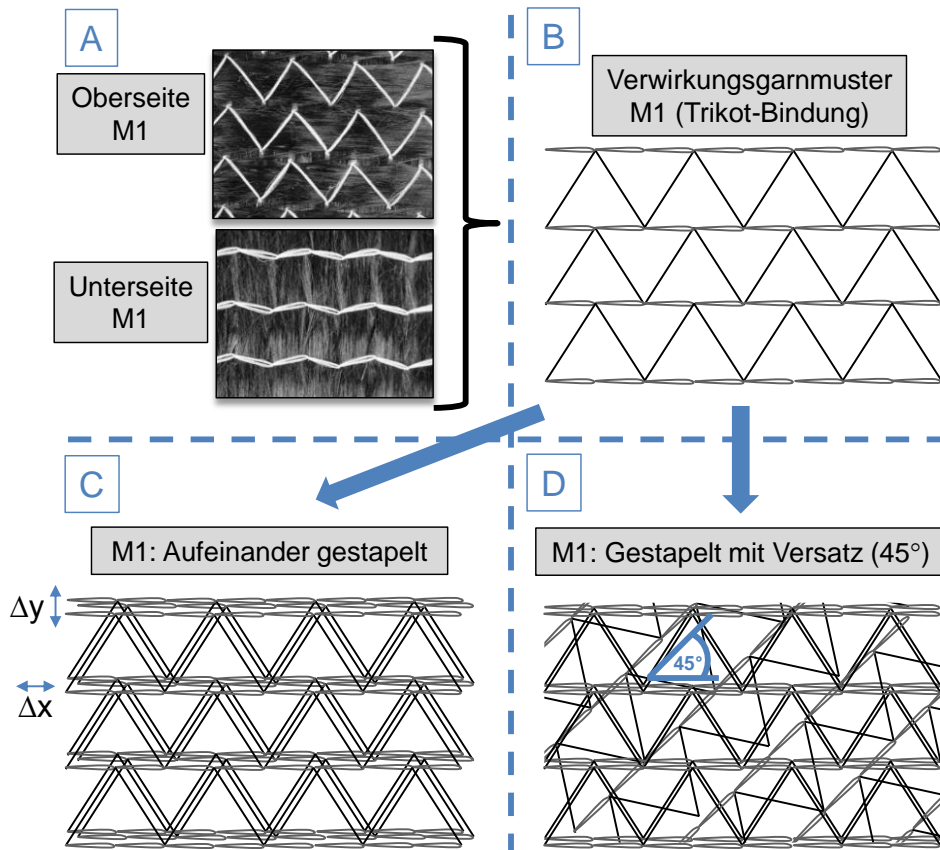


Abbildung 4.7: Materialauschnitt der Ober- und Unterseite des 300 g/m<sup>2</sup> schweren Geleges M1 (A); Verwirkungsgarnmuster (schematisch) der Trikot-Bindung von M1 (B); Verwirkungsmuster von M1-Preforms ohne Versatz (C) und mit Versatz von  $45^\circ$  bei jeder zweiten Lage (D)

Auch für das 300 g/m<sup>2</sup> schwere Gelege mit Franse-Bindung (M2) bestätigt sich die These von überlagerten Verwirkungsgarnen. Jedoch ist aufgrund der Franse-Bindung die Verteilung der Verwirkungsgarne in der Ebene lokaler konzentriert, was zu einer geringeren Abnahme der Kompaktierungskräfte führt. Die schematische

<sup>26</sup> Beim Zuschnitt der Gelege wurde darauf geachtet, dass die Orientierung und der Anteil der Verwirkungsgarne auf der Probe gleich bleiben. In der Realität wird dies, zur Reduzierung des Materialverschnitts, oftmals nicht eingehalten. Zur Identifizierung der Einflussparameter ist eine definierte Stapelung der Gelege jedoch notwendig.



Darstellung der Verwicklungsmuster von M2 mit und ohne Versatz ist in Abbildung 8.6 (A) im Anhang dargestellt.

Bezugnehmend auf die 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege (M3 - M5) konnten keine Veränderungen des Kompaktierungsverhaltens aufgrund von Versatz beobachtet werden. Begründet wird dies durch die ausgeprägten CF-Garndeformationen bei Belastung (vgl. Abbildung 4.5, rechts), welche den Effekt von überlagerten Verwicklungsgarnen dominiert. Die Hybrid-Bindung von M5 ist in Abbildung 8.6 (B) im Anhang dargestellt.

Durch die Erzeugung von **gleichorientierten textilen Grenzflächen (GTG)** innerhalb der Preforms soll eine Reduktion der Kompaktierungswiderstände durch die Initiierung von Nesting erreicht werden. Abbildung 4.8 zeigt die schematischen untersuchten Lagenaufbauten von drei 6-Lagenpreforms bestehend aus dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M1: Referenzaufbau ohne GTG (A), Aufbau mit drei GTG (B, vier Lagen gedreht) und Aufbau mit fünf GTG (C, drei Lagen gedreht).

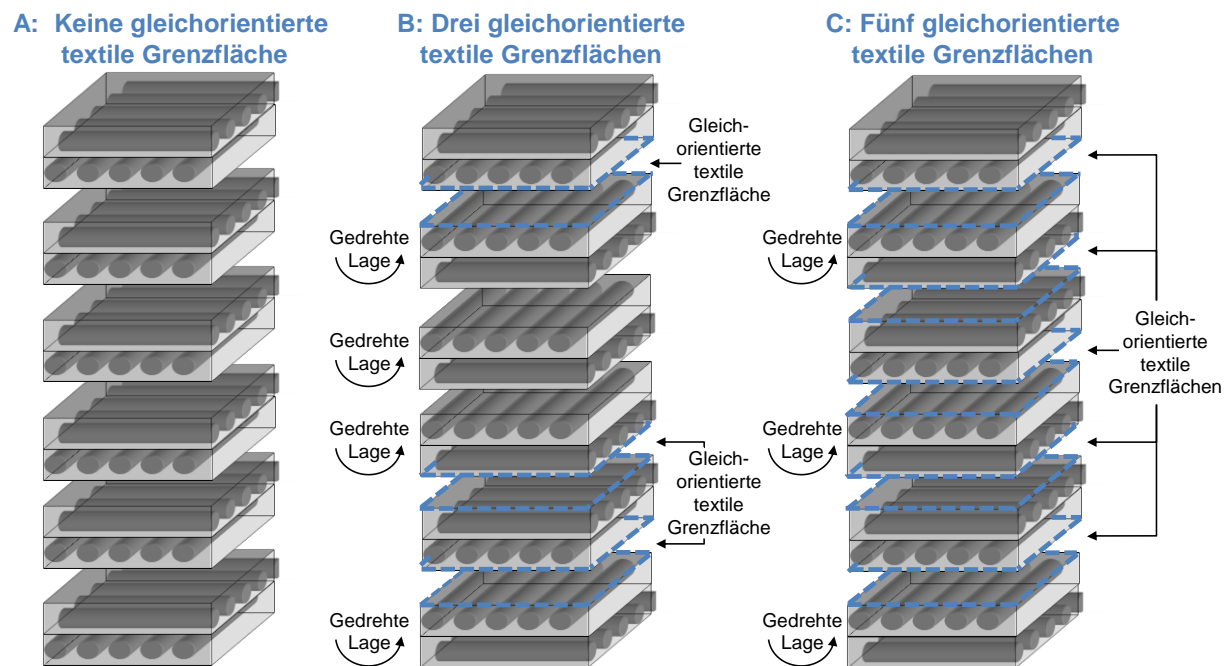


Abbildung 4.8: Schematischer Aufbau von 6-Lagenpreforms bestehend aus dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M1: Referenzaufbau ohne GTG (A), Aufbau mit drei GTG (B, vier Lagen gedreht) und einen Aufbau mit fünf GTG (C, drei Lagen gedreht)

Die einzelnen Kraftverläufe von M1 (A als Referenz, B mit 3 GTG und C mit 5 GTG) sowie das schematische Kompaktierungsverhalten mit und ohne GTG sind in

Abbildung 4.9 dargestellt. Weiterhin sind zwei 3-Lagenpreforms (Referenz und Aufbau mit zwei GTG) bestehend aus 3-Lagenpreforms mit M3 (600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht) abgebildet.

Die Ergebnisse zeigen, dass zur Erreichung eines bestimmten FVG niedrigere Kompaktierungskräfte für die modifizierten Lagenaufbauten von M1 mit GTG benötigt werden als für die Referenz. Für den Fall B (3 GTG) verringern sich die Kräfte zwischen 6 % - 33 % im betrachteten FVG-Bereich. Durch die Erhöhung der GTG von drei auf fünf verringern sich die Kompaktierungskräfte bis zu 42 %. Folglich sind durch die Drehung der Einzellagen (vgl. Abbildung 4.9, rechts) Nestingmöglichkeiten initiiert worden, welche den Widerstand der CF-Gelege gegen Kompaktierung verringern.

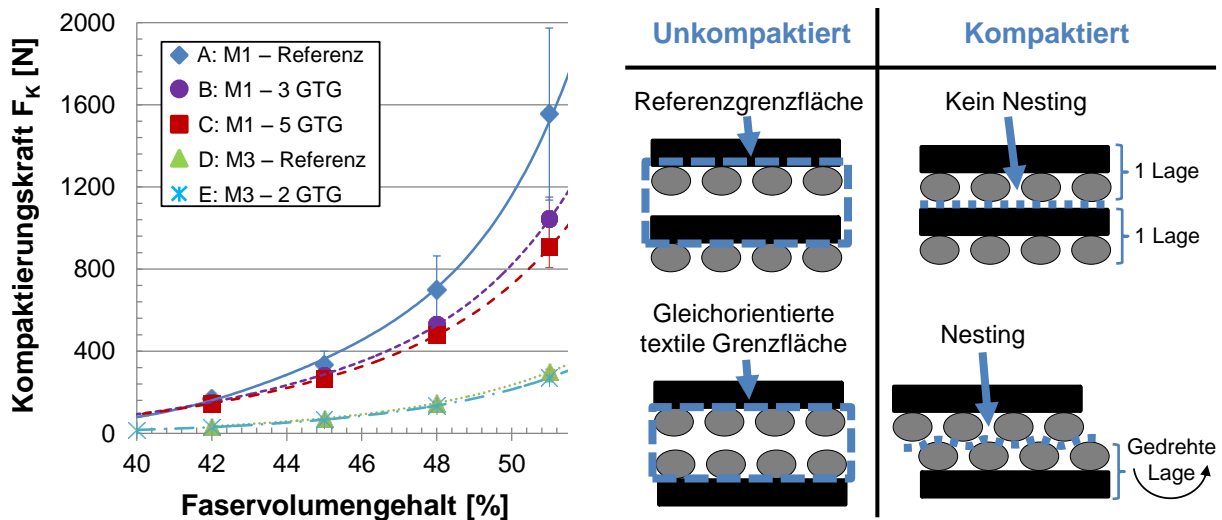


Abbildung 4.9: Einfluss des Lagenaufbaus auf das Kompaktierungsverhalten von 6-Lagenpreforms bestehend aus M1 (je 300 g/m<sup>2</sup>) sowie 3-Lagenpreforms bestehend aus M3 (je 600 g/m<sup>2</sup>): Referenz M1 (A), M1 mit 3 GTG (B), M1 mit 5 GTG (C), Referenz M3 (D) und M3 mit 2 GTG (E); Kraftverläufe von A - E im FVG-Bereich von 40 % - 50 % (links); Schematischer Aufbau von Referenzgrenzflächen und GTG im unkompaktierten und kompaktierten Zustand (rechts)

Auch für M3 wird eine geringere Kompaktierungskraft für die Preform mit zwei GTG (Fall E) benötigt als für die Referenz (D). Allerdings ist der Effekt mit einer konstanten Kraftabnahme von 10 % zwischen 40 % - 50 % FVG kleiner als bei den 6-Lagenpreforms mit M1, was auf die geringere Anzahl von GTG und die Garnstruktur der 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege zurückzuführen ist. Demnach können Nestingmöglichkeiten durch GTG geschaffen werden, wobei mit steigender Anzahl von GTG niedrigere Kompaktierungskräfte zur Erreichung eines Ziel-FVG appliziert

werden müssen. Zum Beweis dieser These wurden von den einzelnen Lagenaufbauten A - E Lamine im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt. Abbildung 8.7 und Abbildung 8.8 im Anhang zeigen Lichtmikroskopie-Aufnahmen der Konfigurationen A und B bzw. D und E bei 25-facher Vergrößerung. Bei den Aufnahmen ist deutlich zu erkennen, dass durch GTG Nestingmöglichkeiten geschaffen werden können.

Zusammengefasst sei angemerkt, dass durch unterschiedliche Strategien bzgl. des Lagenaufbaus (Versatz oder GTG) die Kompaktierungskräfte reduziert werden können. Allerdings können durch Variationen des Einzellagenflächengewichts (hier: 300 g/m<sup>2</sup> auf 600 g/m<sup>2</sup>) höhere Reduktionen der Kompaktierungskräfte erreicht werden.

#### 4.3.2 Einfluss der Prozessparametern

Bei der Untersuchung der Prozessparameter wurde zunächst die **Testgeschwindigkeit** variiert. Zur Veranschaulichung des Einflusses des Einzellagenflächengewichts auf die Kompaktierungskraft zeigt Abbildung 4.10 die Kraftverläufe von 6-Lagenpreforms bestehend aus M1 (je 300 g/m<sup>2</sup> Einzellagengewicht) und 3-Lagenpreforms bestehend aus M3 (je 600 g/m<sup>2</sup> Einzellagengewicht) bei den Testgeschwindigkeiten 1, 50 und 100 mm/min.

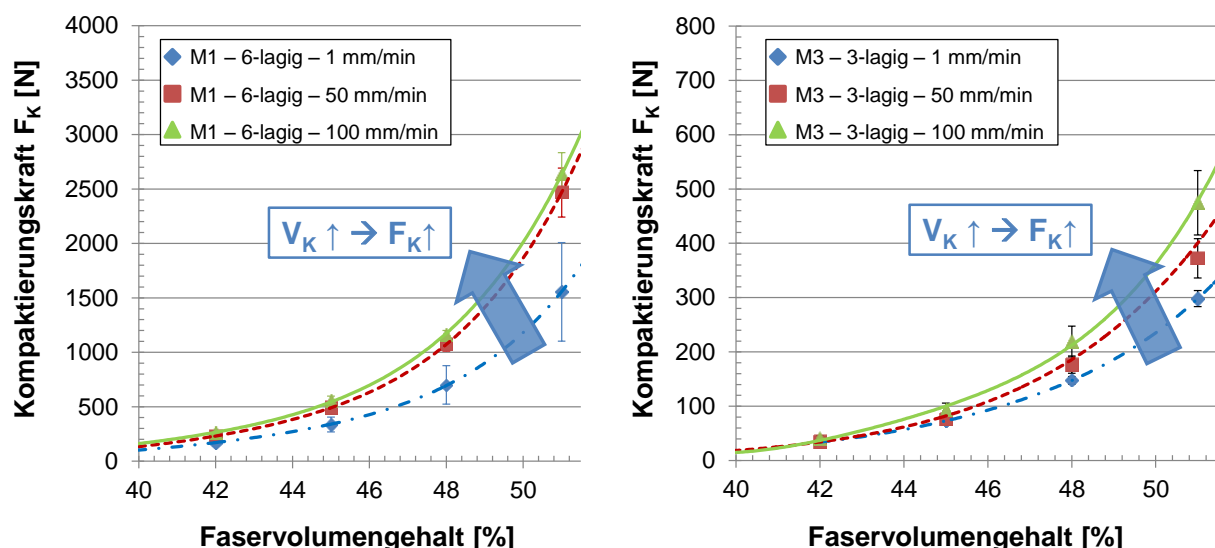


Abbildung 4.10: Einfluss der Testgeschwindigkeit (1, 50 und 100 mm/min) auf 6-Lagenpreforms M1 (je 300 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht, links) sowie 3-Lagenpreforms M3 (je 600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht, rechts)

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Testgeschwindigkeit höhere Kompaktierungskräfte benötigt werden um einen Ziel-FVG zu erreichen. Weiterhin ist der Effekt der Testgeschwindigkeit für die Preforms mit 300 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht (M1) stärker ausgeprägt als für die Preforms mit 600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht (M3). Beispielsweise sind die Kompaktierungskräfte zur Erreichung eines FVG von 42 % für die Preforms mit 300 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht (M1) um 56 % höher, wenn mit 100 mm/min anstatt 1 mm/min Testgeschwindigkeit kompaktiert wird. Im Vergleich dazu sind die Kräfte der Preforms mit 600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht (M3) um 18 % gesteigert. Mit steigendem FVG ist der Einfluss der Geschwindigkeit noch stärker ausgeprägt, sodass bei einem FVG von beispielsweise 51 % der Kraftzuwachs nun 70 % (M1) bzw. 59 % (M3) beträgt. Allerdings befinden sich die Kompaktierungskräfte der 3-lagigen Preforms, aufgebaut aus dem 600 g/m<sup>2</sup> schwere Gelege M3, auf einem deutlich geringeren Niveau.

Durch die gesteigerte Belastung senkrecht zur Gelegeebene wird eine gewisse Zeit für Faserumorientierungen benötigt. Dadurch erhöht sich der Widerstand gegen eine Formgebung mit steigender Testgeschwindigkeit, da kein direkter Abbau der äußeren Belastung möglich ist. Dieses Verhalten entspricht einem viskoelastischen Materialverhalten [78, 79, 87, 88]. Bei höheren FVG ist der verfügbare Porenraum für die Neuordnung der Fasern begrenzt, wodurch sich der Einfluss der Testgeschwindigkeit verstärkt.

**Multiple Kompaktierungszyklen (Wiederholungszyklen)** spielen eine sehr wichtige Rolle bei der Untersuchung des Einflusses von Prozessparametern auf das Kompaktierungsverhalten. Jedes textiles Halbzeug besitzt seine eigene Vorkompaktierungsvorgeschichte, welche bedingt durch den bereits durchlaufenen Lebenszyklus (Herstellung, Transport, Handling, etc.) existiert. Diese Vorgeschichte kann das Formgebungsverhalten während des Preformings maßgeblich beeinflussen. Aufgrund dessen wurden gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.2.1, im Abstand von 120 s zwischen jedem Kompaktierungszyklus, 10 Wiederholungszyklen durchgeführt. Abbildung 4.11 zeigt den Einfluss multipler Kompaktierungszyklen auf das Kompaktierungsverhalten von 6-Lagenpreforms bestehend aus M1 (300 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht) zur Erreichung der FVG von 40 %, 45 % und 50 %.

Im Vergleich zum ersten Kompaktierungszyklus reduzieren 10 Wiederholungszyklen die Kompaktierungskräfte um 84 % - 87 %, wobei die höchste Reduktion zwischen den ersten beiden Zyklen erreicht wird. Hierbei verringern sich die Kompaktierungskräfte um 61 % bzw. 56 % zur Erreichung eines FVG von 40 % bzw. 50 %. Anschließend flachen die Kraftverläufe mit steigender Zykluszahl stark ab, sodass vom neunten auf den zehnten Kompaktierungszyklus 6 % - 19 % weniger Kraft benötigt wird um den gewünschten FVG zu erhalten.

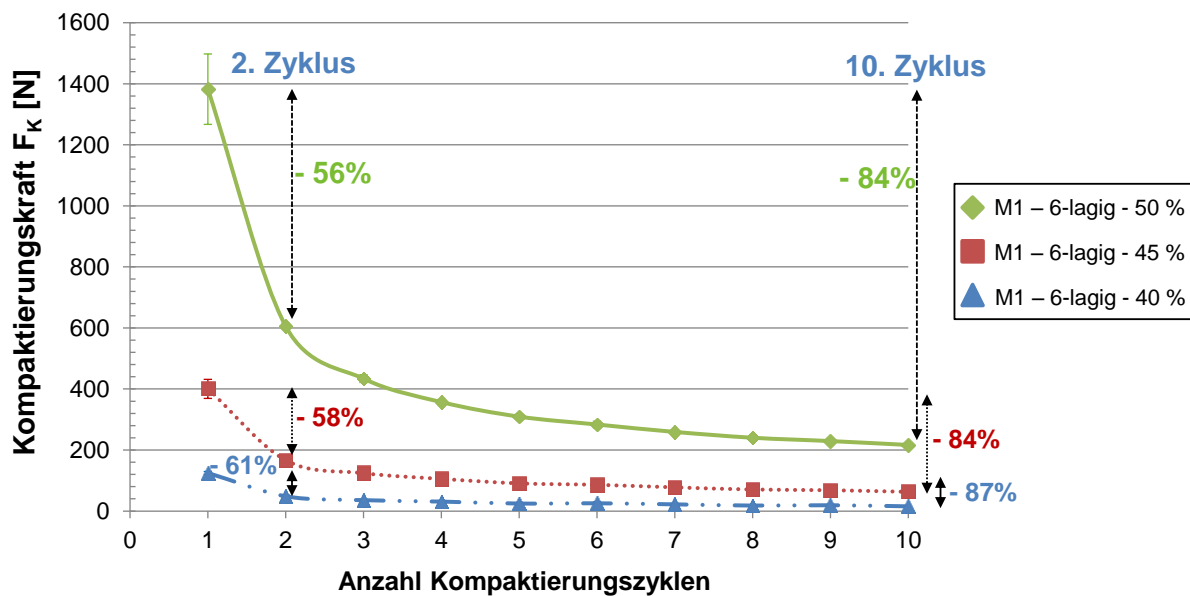


Abbildung 4.11: Einfluss von multiplen Kompaktierungszyklen (1 - 10) auf das Kompaktierungsverhalten von 6-Lagenpreforms bestehend dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M1

Auch für die Gelege mit 600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht existiert der gleiche Zusammenhang zwischen Kompaktierungskraft und Zykluszahl. Beispielsweise verringern sich die Kompaktierungskräfte von M3 (3-Lagenpreforms) zwischen den ersten beiden Zyklen um 86 % - 94 % und zwischen den letzten beiden Zyklen um 2 % - 17 %. Demnach stagnierte für keine der Materialgruppen die benötigte Kompaktierungskraft bis zu einer Zykluszahl von 10. Dennoch weisen die Kraftverläufe darauf hin, dass eine Grenzkraft erreicht wird, wenn die Anzahl von Kompaktierungszyklen weiter gesteigert werden würde. Zur Erreichung eines FVG von 45 % liegt dieser für M1 bei ca. 60 N und für M3 bei ca. 5 N. Robitaille und Gauvin [91], welche in ihrer Studie bis zu 51 multiple Kompaktierungszyklen durchgeführt hatten, berichten ebenfalls über eine Annäherung der Ergebnisse an eine Grenzkraft.

Das zuvor beschriebene Gelegeverhalten kann einerseits durch die bereits angesprochene Viskoelastizität und andererseits durch quasi-plastische<sup>27</sup> Deformation der Gelege erklärt werden. Das Auftreten einer quasi-plastischen Deformation der Garnform kann in diesem Fall durch die Überprüfung der final erreichten Kavitätshöhe nach jeder Messung identifiziert werden. Für die 6-Lagenpreforms (M1) stellte sich heraus, dass nach dem 10. Kompaktierungszyklus der Abstand zwischen den beiden Messplatten sich um 0,07 mm verringert hat, was einer Erhöhung des maximal erreichbaren FVG um 2,7 Prozentpunkte entspricht. Für M3 (3-Lagenpreforms) wurde eine Erhöhung des maximal erreichbaren FVG von 2,2 von hundert Prozentpunkten gemessen. Dies bestätigt, dass bei Kompaktierungsversuchen auch quasi-plastische Deformation des Fasermaterials auftritt (vgl. Kapitel 2.3.1).

Weitere Informationen bzgl. des Kompaktierungsverhaltens können [160] entnommen werden. Dort ist ein umfangreicher Überblick über die bereits geleisteten Arbeiten gegeben.

**Zusammenfassend** können folgende Punkte festgehalten werden:

- Gelege mit vergleichsweise höherem Einzellagenflächengewicht lassen sich einfacher kompaktieren,
- Einfluss der Lagenanzahl ist bei Gelegen vernachlässigbar,
- Versatz und GTG im Lagenaufbau verringern den Kompaktierungswiderstand von Mehrlagenpreforms,
- eine Steigerung der Testgeschwindigkeit führt zur Erhöhung des Kompaktierungswiderstandes und
- multiple Kompaktierungszyklen reduzieren den Kompaktierungswiderstand.

---

<sup>27</sup> Plastische Deformation kann sich bei textilen Halbzeugen aus den makroskopischen Verformungen der Faserstruktur ergeben. Allerdings wurden in dieser Arbeit keine Langzeitversuche durchgeführt. Im betrachteten Zeitraum (< 2 min → Dauer der Profil-Preformherstellung) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Verformung der Faserstruktur erhalten bleibt und daher als quasi-plastische Deformation bezeichnet werden kann.

## 4.4 Untersuchung des Reibungsverhaltens

### 4.4.1 Einfluss der Materialparametern

Im Gegensatz zu Geweben besitzen Gelege strukturbedingt einen höheren Widerstand gegen Deformation senkrecht zur Gelegeoberfläche. Daher kann angenommen werden, dass das Amonton-Coulomb Gesetz für die fünf CF-Gelege (Einzellagenflächengewichte < 600 g/m<sup>2</sup>) aus dieser Arbeit angewendet werden kann.<sup>28</sup>

Für die Ermittlung der Reibungskoeffizienten  $\mu^*$  wurden pro FVG jeweils drei Messungen durchgeführt. Die Reibungskoeffizienten (Quotient aus Tangentialkraft  $F_T$  und Normalkraft  $F_N$ ) werden mit  $\mu^*$  gekennzeichnet, da diese sich hinsichtlich *Testrichtung* (0°, 90°) und *Gelegeorientierung* (Ober- und Unterseite) variieren. Die CF-Gelege mit geringem Einzellagenflächengewicht (300 g/m<sup>2</sup>) wurden bei 35 %, 36,5 % und 38 % FVG und die Gelege mit hohem Einzellagenflächengewicht (600 g/m<sup>2</sup>) wurden bei 38 %, 40 %, 41,5 % und 43 % getestet<sup>29</sup>. Aufgrund unterschiedlicher Kompaktierungsverhalten der Gelege variieren die benötigten Normalkräfte zur Einstellung spezifischer FVG (vgl. Kapitel 4.3). Eine Übersicht der applizierten Normalkräfte zeigt Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Übersicht der applizierten Normalkräfte zur Einstellung spezifischer FVG für die Ermittlung der Reibungskoeffizienten von M1 - M5

Material	Lagenanzahl	Normalkräfte (N) für die Ermittlung der Reibungskoeffizienten					
		FVG					
		35,0 %	36,5 %	38,0 %	40,0 %	41,5 %	43,0 %
M1	1	7,99	12,33	17,5	/	/	/
M2	1	6,06	9,21	13,65	/	/	/
M3	1	/	/	2,92	5,11	7,78	11,45
M4	1	/	/	2,86	4,91	7,71	11,36
M5	1	/	/	2,08	3,44	5,34	7,7

<sup>28</sup> Die Eignung der Wilson-Gleichung für die fünf CF-Gelege wurde überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass diese auch für CF-Gelege (< 600 g/m<sup>2</sup>) angewendet werden kann. Jedoch werden die Ergebnisse in dieser Arbeit nicht weiter dargestellt, sondern direkt die Ergebnisse basierend auf dem Amonton-Coulomb Gesetz vorgestellt.

<sup>29</sup> Die FVG sind relativ niedrig gewählt worden, da während der Formgebung der Gelege in der Formgebungseinheit des CPPS weitestgehend keine Normalkräfte appliziert werden.

Für einen Vergleich der Reibungskoeffizienten bei einer **identischen Normalkraft** wurden die Datenpunkte inter- bzw. extrapoliert<sup>30</sup>. Abbildung 4.12 zeigt die Inter- bzw. Extrapolation der Datenpunkte anhand des 600 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Geleges M4 (A), eine Übersicht der Reibungskoeffizienten  $\mu^*$  von M1 - M5 für unterschiedliche Testrichtungen ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) und Gelegeorientierungen (Ober- und Unterseite) bei einer Normalkraft von 8 N (B) sowie eine Übersicht der Gelegeoberflächen von M1 - M5 (C).

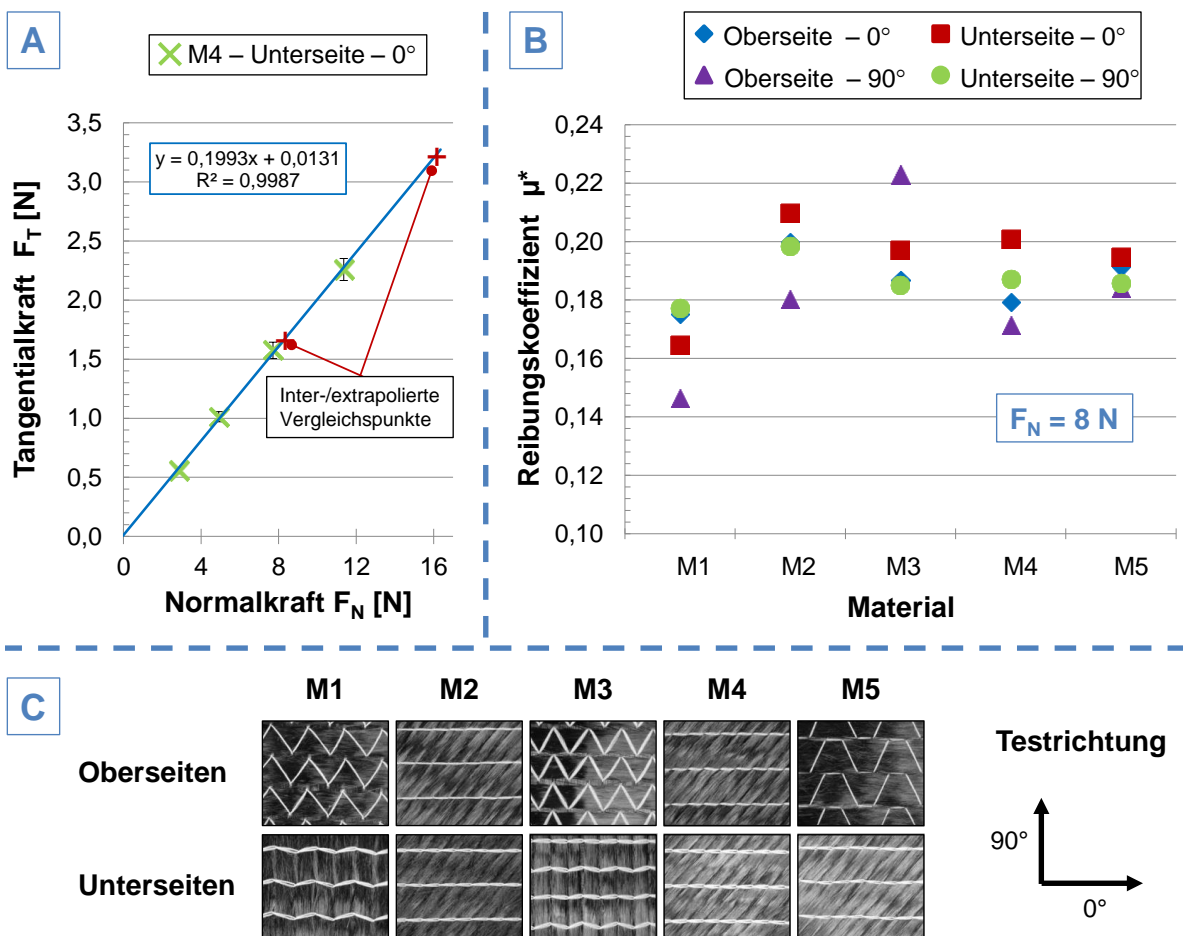


Abbildung 4.12: Inter- und Extrapolation der Datenpunkte für den Vergleich der Reibungskoeffizienten am Beispiel des  $\pm 45^\circ$ -Geleges M4 (A); Übersicht der Reibungskoeffizienten  $\mu^*$  von M1 - M5 bei einer Normalkraft von 8 N (B) in Abhängigkeit von der Testrichtung ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) und Gelegeorientierung (Ober- und Unterseite); Übersicht der Gelegeoberflächen von M1 - M5 (C)

Alle Reibungskoeffizienten der Stahl-Gelege Konfigurationen befinden sich mit 0,14 - 0,23 im Bereich von vergleichbaren Literaturwerten [124]. Es ist zu erkennen,

<sup>30</sup> Durch die Inter- und Extrapolation der Datenpunkte können keine  $\mu^*$ -Standardabweichungen (siehe Abbildung 4.12, B) dargestellt werden.



dass bei konstanter Normalkraft unterschiedliche Reibungskoeffizienten für variierende Testrichtungen und Gelegeorientierungen vorliegen. Beispielsweise besitzt das 600 g/m<sup>2</sup> schwere 0°/90°-Gelege M3 mit 0,19 - 0,22 die höchsten und das 300 g/m<sup>2</sup> schwere 0°/90°-Gelege M1 mit 0,15 - 0,18 die niedrigsten Reibungskoeffizienten. Zusätzlich variieren die Reibungskoeffizienten untereinander bei einer Verdopplung der Normalkraft auf beispielsweise 16 N (siehe Abbildung 8.9 im Anhang).

Auffällig ist, dass bei den Gelegen mit einer Franse-Bindung die Reibungskoeffizienten der Gelegeunterseiten in 0°-Testrichtung am höchsten sind. Ursache hierfür kann der höhere Verwirkungsgarnanteil (Schlaufenbildung der Verwirkungsgarne) im Vergleich zu den Gelegeoberseiten sein, denn der Reibungskoeffizient von Polyester auf Stahl ist mit 0,2 - 0,4 [161] vergleichsweise hoch. Dadurch könnten auch die höheren Reibungskoeffizienten von M3 erklärt werden, denn M3 besitzt aufgrund der höchsten Nähfeinheit von 7 (vgl. Tabelle 4.1) den höchsten Verwirkungsgarnanteil. Eindeutige Trends bzgl. einzelner Materialparameter (bspw. Bindungsart und Faserorientierung) können jedoch nicht abgeleitet werden.

In Kapitel 2.3.1 wird beschrieben, dass die Elastizität der Faserstruktur durch die Materialparameter eines textilen Halbzeugs beeinflusst wird. Demnach wird dadurch der Widerstand von textilen Halbzeugen gegen eine Belastung senkrecht zur Textilebene (Kompaktierungsverhalten) beeinflusst. Zur Einstellung spezifischer FVG werden daher unterschiedliche Normalkräfte benötigt. Allerdings können diese sehr stark voneinander abweichen, sodass die resultierenden Reibungskräfte  $F_R$  (entspricht den Tangentialkräften  $F_T$ ) stark variieren. Beispielsweise erzeugt die Normalkraft von 8 N beim vorherigen Beispiel (vgl. Abbildung 4.12) für Gelege mit 300 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht (M1 bzw. M2) einen FVG von 35 % bzw. 36 % und für die Gelege mit 600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht (M3, M4 bzw. M5) einen FVG von 42 %, 43 % bzw. 45 %. Da beim kontinuierlichen Preforming stets ein bestimmter FVG der Preforms eingestellt wird und hinsichtlich der Prozessoptimierung die Formgebungskräfte reduziert werden sollen, werden im Folgenden ausschließlich die **Reibungskräfte** anstatt der Reibungskoeffizienten bezogen auf einen definierten FVG miteinander verglichen. Dadurch kann ein prozessnaher Vergleich durchgeführt werden. Abbildung 4.13 zeigt hierzu eine

Übersicht der Reibungskräfte von M1 - M5 in Abhängigkeit der Testrichtung ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) und Gelegeorientierung (Ober- und Unterseite) bei einem FVG von 38 %.

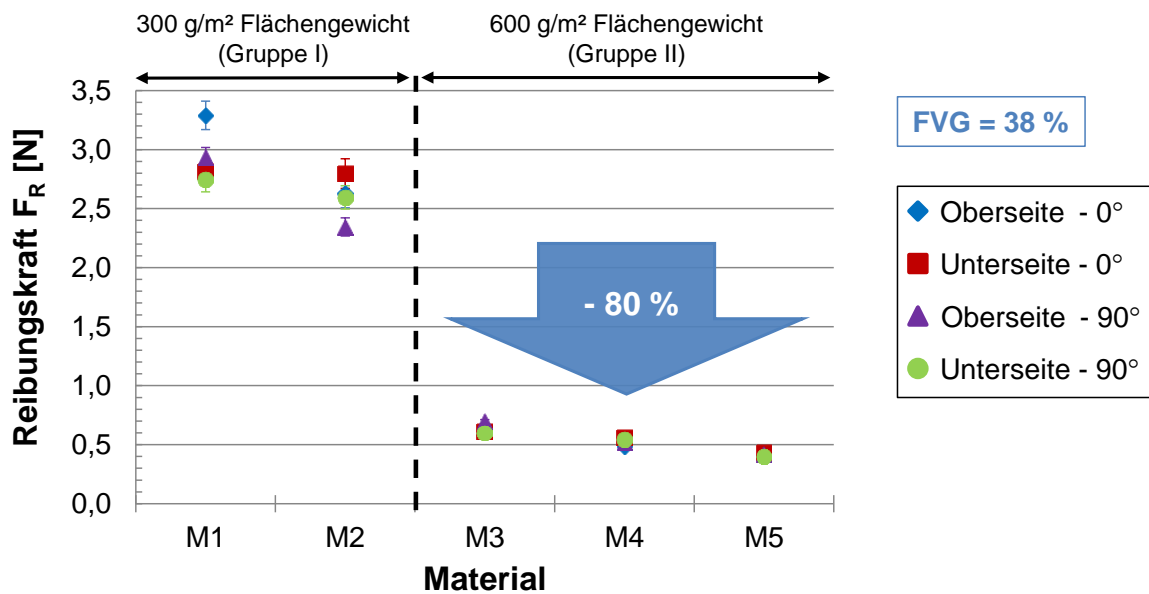


Abbildung 4.13: Übersicht der Reibungskräfte von M1 und M2 (je 300 g/m) sowie M3 - M5 (je 600 g/m<sup>2</sup>) in Abhängigkeit von der Gelegeorientierung (Ober- und Unterseite) sowie Testrichtung ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) bei einem FVG von 38 %

Im Gegensatz zu dem Vergleich der Reibungskoeffizienten, bei welchen hinsichtlich der Prozessoptimierung M1 die niedrigsten und M3 am höchsten Reibungskoeffizienten haben, zeigt die Gegenüberstellung der Reibungskräfte ein anderes Ergebnis. Unabhängig von der Testrichtung ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) und Orientierung der Gelege (Ober-/Unterseite), sind die Reibungskräfte der Gelege mit einem Einzellagenflächengewicht von 300 g/m<sup>2</sup> (M1, M2) wesentlich höher als die der doppelt so schweren Gelege M3 - M5. Prozentual ausgedrückt sind für die 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege die resultierenden Reibungskräfte ca. 80 % geringer. Begründet wird dies durch die höheren Normalkräfte, welche alle anderen zuvor vorgestellten Reibungseffekte dominieren. Dies wird anhand der Reihenfolge der resultierenden Reibungskräfte, welche sich mit der Reihenfolge der zugehörigen Normalkräfte deckt, bestätigt (vgl. Tabelle 4.3).

Eine Gemeinsamkeit zur Literatur zeigt der Vergleich der Reibungskräfte zwischen der Ober- und Unterseite der Gelege mit einer Trikot-Bindung (M1, M3), bei welchen die Oberseiten eine meist höhere Reibungskraft erzeugen [124]. Bei Gelegen mit einer Franse-Bindung (M2, M4) resultieren, aufgrund der Verschlaufungen des Verwicklungsgarns, höhere Reibungskräfte auf den Unterseiten. Folglich sind

hinsichtlich der Werkzeug-Gelege Reibung Gelege mit gesteigertem Flächengewicht, einer Franse-Bindung und geringem Verwirkungsgarnanteil (mit der Oberseite zum Werkzeug gerichtet) zu bevorzugen, wenn geringere Reibungskräfte angestrebt werden.

Neben der Werkzeug-Gelege Reibung entsteht während des Formgebungsprozesses auch **Gelege-Gelege Reibung** zwischen den Einzellagen im Lagenaufbau. Daher wurden Ein-Materialkombinationen und Multi-Materialkombinationen der Biaxial-Gelege mit 600 g/m<sup>2</sup> Flächengewicht untersucht. Abbildung 4.14 zeigt eine Übersicht der Gelege-Gelege Reibungskräfte von M3/M3 (Trikot/Trikot), M4/M4 (Franse/Franse) bzw. M3/M4 (Trikot/Franse) bei 90° Testrichtung<sup>31</sup> und unterschiedlichen Gelegeorientierungen (O-O = Oberseite auf Oberseite, U-O = Unterseite auf Oberseite, U-U = Unterseite auf Unterseite).

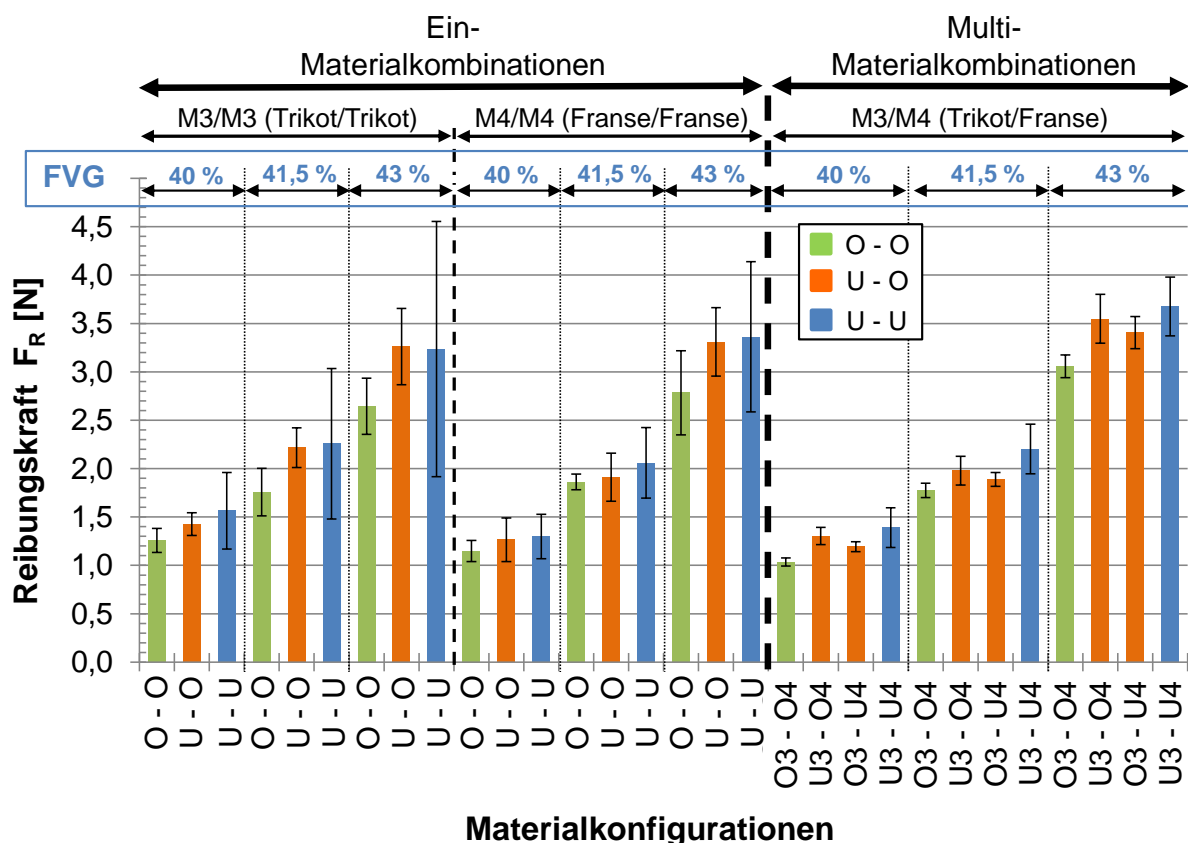


Abbildung 4.14: Übersicht der Gelege-Gelege Reibungskräfte der Ein-Material- und Multi-Materialkombinationen des 0°/90°-Geleges M3 und des ±45°-Geleges M4 bei 90° Testrichtung in Abhängigkeit der Gelegeorientierung (Ober- und Unterseite)

<sup>31</sup> Es wird angenommen, dass sich die Gelegelagen aufgrund des vorliegenden Formgebungsprozesses beim CPPS primär 90° zur Produktionsrichtung zueinander bewegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass unabhängig von der Materialkombination (Ein- oder Multi-Materialkombination) die O-O-Konfigurationen niedrigere Reibungskräfte als die U-U-Konfigurationen erzeugen. Die U-O-Konfigurationen liegen hierbei jeweils zwischen den beiden anderen. Die hohen Reibungskräfte der U-U-Kombinationen werden durch die Verschlaufungen der Verwirkungsgarne auf den Unterseiten der Gelege und die daraus resultierenden Verwirkungsgarnanhäufungen begründet. Verstärkt wird dieser Effekt durch parallele CF-Rovingreibung, was sich mit den Ergebnissen von Cornelissen [120] und Chakladar [123] deckt. Allerdings spielt hierbei auch das Verwirkungsgarnmuster in Verbindung mit dem Verwirkungsgarnanteil eine entscheidende Rolle. Schematische Darstellungen der Reibungsoberflächen (nur Verwirkungsgarne) der verschiedenen Materialkonfigurationen sind in Abbildung 8.10 im Anhang dargestellt.

Folglich sollten zur Reduktion von Reibungskräften zwischen den Gelegen U-U-Kontakte und Reibungswinkel  $\neq 0^\circ$  bei sich berührenden Lagen im Lagenaufbau vermieden werden. Die Reibungskräfte der Multi-Materialkombinationen M3/M4 (Trikot/Franse) sind bei höheren FVG (43 %) im Mittel um ca. 10 % höher als bei M3/M3 (Trikot/Trikot) und M4/M4 (Franse/Franse). Allerdings liegen für FVG von 40 % und 41,5 % die Normalkräfte zwischen denen der Ein-Materialkombinationen. Hinsichtlich Reibung sind Multi-Materialkombinationen für das Preforming (FVG < 43 %) demnach vertretbar, bei höheren FVG allerdings nachteilig.

Zusammengefasst sind die Reibungskoeffizienten der Gelege-Gelege Reibung mit 0,28 – 0,48 bedeutend höher als die der Stahl-Gelege Reibung (0,15 - 0,22).

#### 4.4.2 Einfluss der Prozessparametern

Zur Untersuchung des **Einflusses der Normalkraft** auf die Reibungskraft wurden die Gelege M1 - M5 gemäß Tabelle 4.3 getestet. Das Einzellagenflächengewicht der Gelege dient hier als entscheidendes Charakteristikum. Abbildung 4.15 zeigt die resultierenden Reibungskräfte (Stahl-Gelege) der Ober- und Unterseiten in  $0^\circ$  Testrichtung<sup>32</sup> bezogen auf den jeweiligen FVG.

---

<sup>32</sup> Die  $0^\circ$ -Testrichtung wurde in diesem Zusammenhang gewählt, da dies der Produktionsrichtung beim CPPS entspricht.

Bei einer Steigerung der Normalkraft verformt sich die textile Faserstruktur und folglich die Oberflächenstruktur der Gelege, sodass die Anzahl der realen Kontaktpunkte zwischen Gelegeoberfläche und Messschlitten zunimmt. In bestimmten FVG-Bereichen dominieren demnach, abhängig von der Gelegeart, die Verwirkungsgarne oder die Verstärkungsfasern die Reibungskräfte. Die zuvor beobachteten Trends bei einem FVG von 38 % (vgl. Abbildung 4.13) gelten auch für den hier betrachteten FVG-Bereich. Beispielsweise erzeugen die Unterseiten der  $\pm 45^\circ$ -Gelege mit einer Franse-Bindung (M2 und M4) durchgehend höhere Reibungskräfte (6 % für M2 und 12 % für M4) als die Oberseiten.

Hinsichtlich M5 ist deutlich zu erkennen, dass nahezu kein Unterschied zwischen Ober- und Unterseite besteht. Allerdings wirken hier zwei gegensätzliche Effekte. Zum einen wird durch die Erhöhung des FVG der Einfluss der Verwirkungsgarne auf der Gelegeunterseite verstärkt und zum anderen erhöht sich aufgrund der Hybrid-Bindung<sup>33</sup> die Anzahl realer Kontaktpunkte zwischen Messschlitten und Verstärkungsfasern auf der Oberseite.

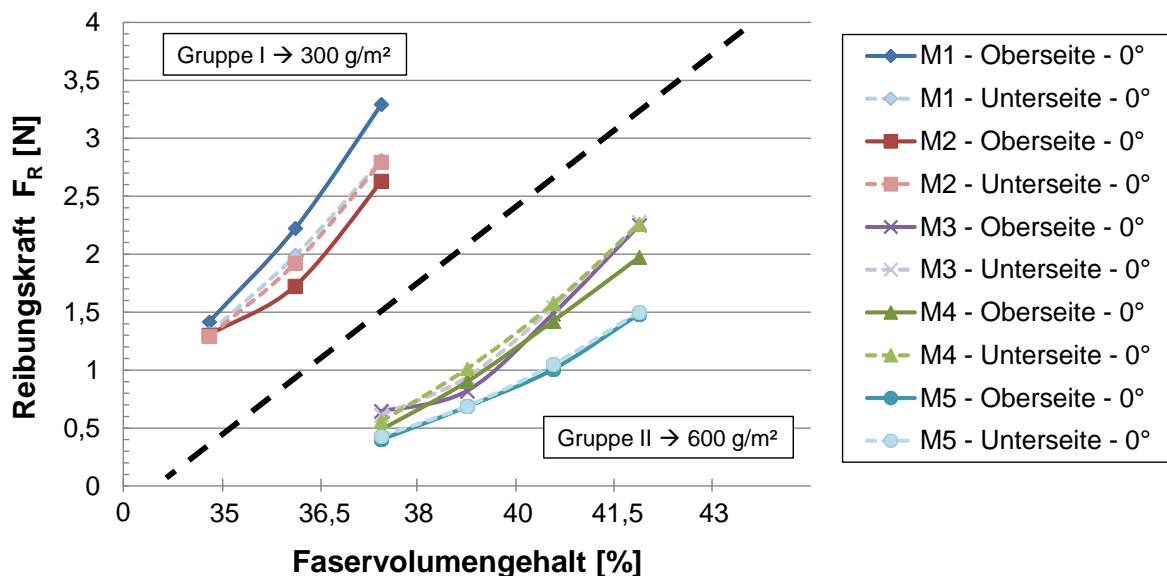


Abbildung 4.15: Einfluss der Normalkraft auf die Reibungskraft bei M1 - M5 (Ober- und Unterseite) in  $0^\circ$  Testrichtung. FVG für M1 und M2 (Gruppe I) sind 35 %, 36,5 % und 38 %; FVG für M3 - M5 (Gruppe II) sind 38 %, 40 %, 41,5 % und 43 %

Für die  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege können nur für M1 Trends aus den Ergebnissen eruiert werden. Hierbei wird bei steigendem FVG der Effekt der Verwirkungsgarne (feine

<sup>33</sup> Bei der Hybrid-Bindung befinden sich die Verwirkungsgarne der Gelegeoberseiten in  $0^\circ$ -Produktionsrichtung in „Kanälen“ zwischen den gebündelten Verstärkungsgarnen.

Verwirkung auf Gelegeoberseite) durch die Steigerung der realen Kontaktpunkte reduziert, sodass die Faserreibung dominiert.

Hinsichtlich des **Einflusses der Testgeschwindigkeit** wurde das Triaxial-Gelege mit Hybrid-Bindung (M5) zwischen 0,1 m/min - 6 m/min bei drei unterschiedlichen FVG von 40 %, 41,5 % und 43 % getestet (siehe Abbildung 4.16).

Die Ergebnisse können in zwei Bereiche eingeteilt werden. Im ersten Bereich (0,1 m/min - 3 m/min) bewirkt eine Steigerung der Testgeschwindigkeit eine Erhöhung der Reibungskraft. Abhängig von FVG beträgt die Erhöhung der Reibungskraft zwischen 25 % - 30 % bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 0,1 m/min auf 0,5 m/min. Mit steigender Geschwindigkeit ( $\leq 3$  m/min) sinkt der Zuwachs der Reibungskraft auf  $< 2$  % (2,5 m/min auf 3 m/min). Als Ursache hierfür werden geringfügige Deformationen der Gelegeoberflächen (Ausbildung einer kleinen Bugwelle vor dem Messschlitten) angesehen, welche mit steigender Testgeschwindigkeit zunehmen und sich während der transversalen Schlittenbewegung nicht direkt über die restliche Gelegeoberfläche entspannen können. Im zweiten Bereich ( $> 3$  m/min) stagniert das Ausmaß an Gelegedeformationen und es ist kein Einfluss der Testgeschwindigkeit zu erkennen.

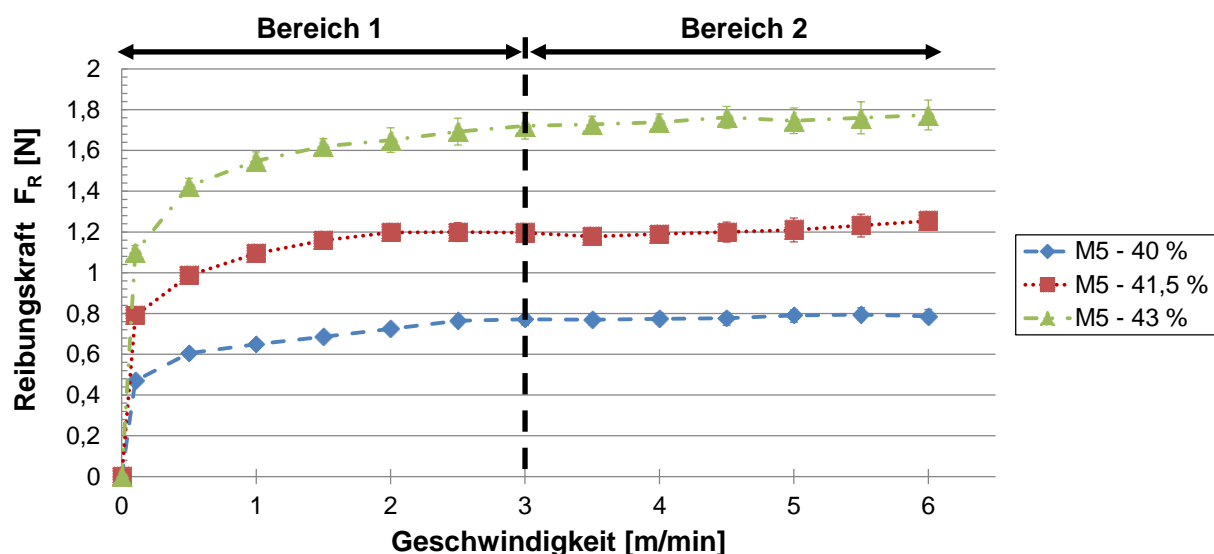


Abbildung 4.16: Einfluss der Testgeschwindigkeit (0,1 m/min - 6 m/min) auf die Reibungskraft des 600 g/m<sup>2</sup> schweren Triaxial-Geleges M5 bei unterschiedlichen FVG (40 %, 41,5 % und 43 %)

Der im ersten Bereich beobachtete Effekt kann auf den Aufbau des Messsystems zurückgeführt werden, da der Prüfkörper (Messschlitten) kleiner ist als die zu

testende Gelegeprobe und dadurch Gelegedeformationen begünstigt werden. Dagegen passieren die textilen Halbzeuge während der Verarbeitung zu Profil-Preforms im CPPS großflächig die Führungsschienen, sodass lokale Materialdeformationen vermieden werden. Folglich existiert, wie auch bei der Festkörperreibung, keine Auswirkung der Testgeschwindigkeit auf die Reibungskraft und die Prozessgeschwindigkeit stellt aus Sicht der Reibung keinen limitierenden Faktor dar.

Es wurden ebenfalls Stichproben bei den Biaxial-Gelegen (M1 - M4) durchgeführt, welche die vorherigen Erkenntnisse bestätigten.

Bei kontinuierlichen Preforming Verfahren werden die textilen Halbzeuge über größere Distanzen transportiert um die angestrebte Preform (Profil-Preform) herzustellen. Zur Untersuchung des Einflusses der **Dauerbelastung** wurden exemplarisch die Reibungskräfte des 0°/90°-Geleges M1 bei 3 m/min Prozessgeschwindigkeit und 40 % FVG ermittelt. Hinsichtlich des CPPS müssten ca. 60 Wiederholungsmessungen an den Gelegen durchgeführt werden damit die Gesamtlänge zu passierender Führungsschienen abgebildet wird. Zur Sicherheit wurden 120 Wiederholungsmessungen durchgeführt, was zwei Durchläufen beim CPPS entspricht. Als Messschlittenmaterial wurden Stahl, PTFE und Aluminium verwendet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich konstante Kraftverläufe über 120 Wiederholungsmessungen einstellen. Hinsichtlich des Einflusses des Messschlittenmaterials (Werkzeugoberfläche) sind die resultierenden Reibungskräfte für die Stahl-Gelege Konfiguration mit 4,7 N geringer als für die Konfigurationen mit PTFE (5,3 N) und Aluminium (6,4 N). Hierbei ist die Beständigkeit der Messschlittenoberflächen gegen Abnutzung (bspw. Ausbildung von Riefen) von Stahl höher als für Aluminium und PTFE<sup>34</sup>. Bei der Untersuchung der Gelegeoberfläche von M1 konnte durch Mikroskopie-Aufnahmen gezeigt werden, dass keine sichtbaren Beschädigungen durch Reibung stattfindet (siehe Abbildung 8.11 im Anhang)<sup>35</sup>.

---

<sup>34</sup> Bei den Messschlitten aus Aluminium und PTFE waren auf den Werkzeugoberflächen Riefen (in Prozessrichtung) stärker ausgeprägt als für Stahl, was auf die vergleichsweise geringeren Materialhärten zurückzuführen ist. Eine Bestimmung von Oberflächenrauheiten wurden an dieser Stelle nicht durchgeführt, da die optische Kontrolle als ausreichend angesehen wird.

<sup>35</sup> Die Untersuchung der Gelegeoberflächen wurden mit einem digitalen Kameramikroskop (DigiMicro Profi, dnt) durchgeführt (max. Bildauflösung 2592 x 1944 Pixel).

Die Ergebnisse dieser Parameterstudie zeigen gegenüber den Ergebnissen aus der Literatur hinsichtlich Reibung weitestgehend übereinstimmende Ergebnisse, obwohl Gelege aus Hochleistungsfasern anstatt textile Halbzeuge aus der Bekleidungsindustrie getestet wurden.

**Zusammenfassend** können folgende Punkte festgehalten werden:

- Reibungskoeffizienten von Gelegen sind nicht konstant,
- bei konstanten FVG erzeugen Gelege mit vergleichsweise höherem Einzellagenflächengewicht (hier 600 g/m<sup>2</sup> vs. 300 g/m<sup>2</sup>) geringere Reibungskräfte,
- Franse-Bindung erzeugen höhere Reibungskräfte auf Gelegeunterseiten als auf Gelegeoberseiten (umgekehrt für Trikot-Bindungen),
- Reibungskräfte der Werkzeug-Gelege Reibung << Gelege-Gelege Reibung,
- Gelege-Gelege Reibung ist stark abhängig von der Orientierung der Gelege ( $F_{R,O-O} < F_{R,O-U} < F_{R,U-U}$ ),
- Prozessgeschwindigkeit ist kein limitierender Faktor für eine Prozessoptimierung und
- Beständigkeit der Gelege gegen Dauerbelastung ausreichend für Preforming Prozesse.

## 4.5 Untersuchung des Biegeverhaltens

### 4.5.1 Einfluss der Materialparameter

Zu Beginn der Parameterstudie wurden die Biegesteifigkeiten von M1 - M5 im **Cantilever-Verfahren** (Einzellagentests) ermittelt, wobei die Testrichtung (0°, 90°) und Gelegeorientierung (Gelege wurden gedreht getestet<sup>36</sup>) variierten. Die ermittelten Biegesteifigkeiten geben einen guten Eindruck über das Biegeverhalten der jeweiligen Gelege. Tabelle 8.4 im Anhang zeigt eine Übersicht der ermittelten Biegesteifigkeiten von M1 - M5 (Ober- und Unterseiten) inklusive des Einflusses der Faserorientierung und des Einzellagenflächengewichts bei unterschiedlichen Testrichtungen (0°, 90°). Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse der Einzellagentests aufgelistet:

---

<sup>36</sup> Ist beispielweise die Ober- bzw. Unterseite eines Geleges bei der Draufsicht dargestellt, wird diese während des Biegevorgangs auf Zug belastet. Die gegenüberliegende Gelegeseite erfährt dementsprechend eine Belastung auf Druck.



- $\pm 45^\circ$ -Gelege besitzen 75 % bis 85 % (abhängig von Testrichtung und Einzellagenflächengewicht) geringere Biegesteifigkeiten als  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege
  - Für  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege ist die Hälfte der Fasern in Testrichtung ausgerichtet, was sich biegesteifigkeitserhöhend auswirkt
- Eine Halbierung des Einzellagenflächengewichts (300 g/m<sup>2</sup> anstatt 600 g/m<sup>2</sup>) bewirkt eine Reduzierung der Biegesteifigkeit von 62 % bis 77 % (abhängig von der Faserorientierung und der Testrichtung)
  - Existenz verschiedener Garnbündelungen aufgrund unterschiedlicher Einzellagenflächengewichte und applizierter Stichlänge. Je weniger Garne durch die Bindungsart gebündelt sind und/oder je größer die Stichlänge ist, desto niedriger ist die resultierende Biegesteifigkeit
- Variation der Testrichtung ( $0^\circ$  auf  $90^\circ$ ) und Gelegeorientierung (Unter- anstatt Oberseiten auf Zug belastet) reduzieren die Biegesteifigkeiten
  - Unterschiedliche Garnbündelungen sind in verschiedenen Testrichtungen und Orientierungen aufgrund der Bindungsart dominant

Zur Bestimmung der Biegekräfte mit dem neu entwickelten Messsystem (vgl. Kapitel 4.2.3) sind für alle folgenden Tests die Gelege (M1 - M5) quer zur Produktionsrichtung ( $90^\circ$ ) orientiert getestet worden, da auch im CPPS die Biegung quer zur Produktionsrichtung stattfindet. Die Testgeschwindigkeit betrug 1 m/min (0,136 rad/s). Weiterhin sind zur Vermeidung von Gravitationseinflüssen der gelagerten Aluminiumplatte („Zugbrücke“, vgl. Kapitel 4.2.3), die gemessenen Biegekräfte mit denen von Referenzfahrten (ohne Probe auf der „Zugbrücke“) subtrahiert worden. Die Referenzfahrten wurden in regelmäßigen Abständen (alle 25 Messungen) zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wiederholt. Hierbei wurden keine Abweichungen festgestellt.

Mit dem neuen Messsystem wurden zu Beginn der Parameterstudie **Einzellagentests** von M1 - M5 durchgeführt (siehe Abbildung 4.17)<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> Bei einer Testgeschwindigkeit von 1 m/min existiert eine Beschleunigungsphase bis zu einem Biegewinkel von  $7^\circ$ . Erst danach ist die Testgeschwindigkeit konstant.

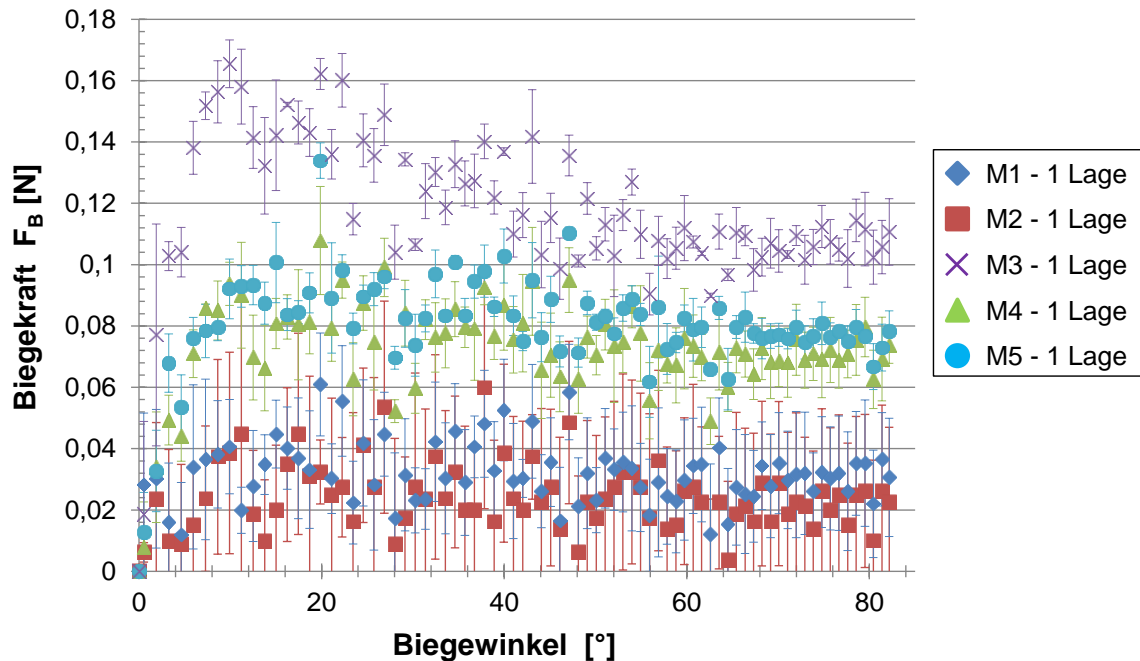


Abbildung 4.17: Biegekräfte der Einzellagen von M1 und M2 (je 300 g/m<sup>2</sup>) sowie M3 - M5 (je 600 g/m<sup>2</sup>) über die Biegewinkel von 0° - 82°; Testgeschwindigkeit 0,136 rad/s

Mit Ausnahme des 600 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Geleges M3 sind konstante Kraftverläufe über die Biegewinkel von 7° - 82° zu beobachten. Aufgrund der Bindungsart (Trikot-Bindung), des höchsten Verwirkungsgarnanteils und der fühlbar<sup>38</sup> höheren Verwirkungsgarnspannung müssen für M3 höhere Reibungskräfte zwischen den Verstärkungsfasern sowie zwischen Verstärkungsfasern und Verwirkungsgarnen überwunden werden bis sich ein konstanter Kraftverlauf einstellt (Biegewinkel > 55°). Yükksekaya [125], Vallons [151] und Truong [152] bestätigen in ihren Arbeiten, dass eine Erhöhung der Verwirkungsgarnspannung die Eigenstabilität von Gelegen steigert, wodurch höhere Biegekräfte benötigt werden. Weiterhin werden aufgrund der höchsten Verwirkungsgarnspannung im Biegebereich die Fasern teilweise in ihrer Position fixiert, sodass eine Umorientierung der Filamente (Beulen und Knicken) stattfindet. Jiang und Hu [142] berichten bei ihren Untersuchungen an GF-Gelegen über ähnliche Beobachtungen.

Hinsichtlich der Biaxial-Gelege benötigen die ±45°-Gelege (M2, M4) niedrigere Biegekräfte als die 0°/90°-Gelege (M1, M3). Beispielsweise müssen für M2 bzw. M4 25 % bzw. 38 % weniger Biegekraft aufgewendet werden als für M1 bzw. M3. Beim

<sup>38</sup> Aus den Herstellerangaben kann keine Aussage über die Verwirkungsgarnspannung entnommen werden, daher konnte an dieser Stelle lediglich ein manueller Vergleich (Überstreichen der Gelege mit dem Finger) durchgeführt werden.

paarweisen Vergleich der Gelege mit gleicher Faserorientierung und gleicher Bindungsart (M1 vs. M3, M2 vs. M4), bewirkt eine Verdopplung des Einzellagenflächengewichts eine Steigerung der Biegekraft um 73 % für M1 vs. M3 und 67 % für M2 vs. M4.

Das 600 g/m<sup>2</sup> schwere Triaxial-Gelege M5 liegt mit einer Biegekraft von 0,083 N, aufgrund des Fehlens der 0°-Fasern in Testrichtung, auf dem gleichen Niveau wie das 600 g/m<sup>2</sup> schwere ±45°-Gelege M4 mit 0,075 N.

Zur Überprüfung des **Einflusses der Lagenanzahl** wurde die Anzahl der Lagen für jedes Gelege schrittweise von 1 bis 6 erhöht (siehe Abbildung 4.18). Beim Vergleich der prozentualen Änderung der Biegekraft mit steigender Lagenanzahl, ist der Effekt zusätzlicher Lagen von einer Lage auf zwei Lagen, mit Änderungen im Bereich von 115 % - 161 %, am höchsten. Jedoch resultiert jede zusätzliche Lage (2 - 6) in einer konstanten prozentualen Änderung von ca. 27 %. Demnach besteht für jedes der Gelege (> 2 Lagen) ein quasi-linearer Zusammenhang zwischen Biegekraft und Lagenanzahl. Bestätigt wird dies durch die Angabe der Bestimmtheitsmaße  $R^2$ , welche Werte im Bereich von 0,981 - 0,996 (1 bedeutet linear) annehmen.

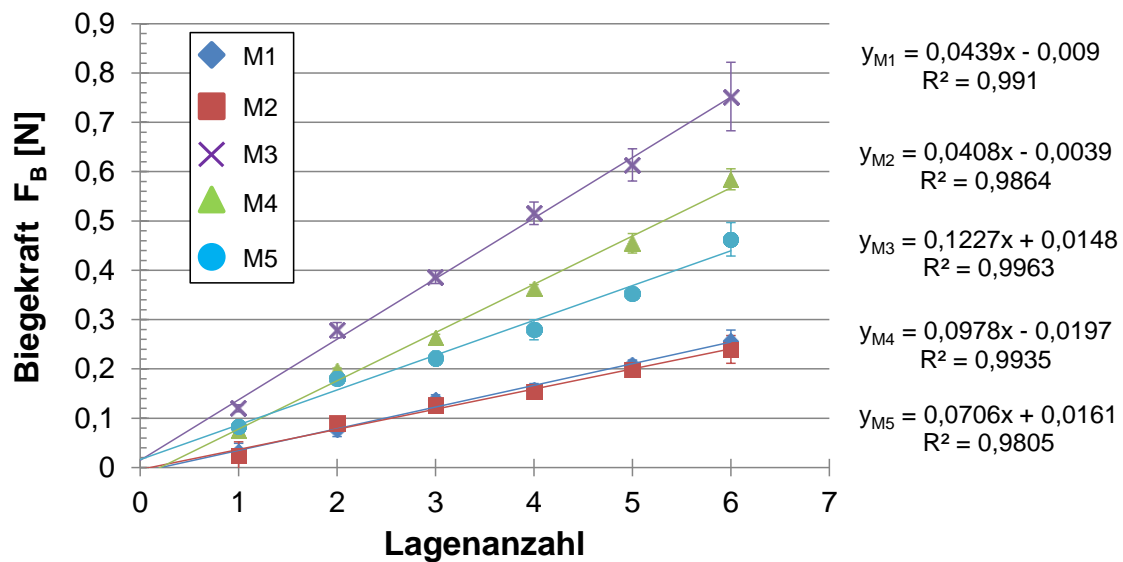


Abbildung 4.18: Einfluss der Lagenanzahl (1 - 6) auf die Biegekraft von M1 und M2 (je 300 g/m<sup>2</sup>) sowie M3 - M5 (je 600 g/m<sup>2</sup>)

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass eine Steigerung der Lagenanzahl bei den Gelegen mit einem Einzellagenflächengewicht von 600 g/m<sup>2</sup> (M3 - M5) einen deutlich größeren Biegekraftzuwachs (Geradensteigungen zwischen 0,07 - 0,12) aufweisen als die der 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M1 und M2 (Geradensteigungen ca. 0,04).

Abschließend ist anzumerken, dass sich für die 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege (M1, M2) die benötigten Biegekräfte angleichen. Im Gegensatz dazu sind eindeutige Unterschiede zwischen den 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelegen M3 - M5 zu erkennen. Hier wirken sich die Effekte bzgl. Faserorientierung und Bindungsart aufgrund unterschiedlicher Garnbündelungen stärker aus.

Hinsichtlich der Reduzierung der kontinuierlichen Formgebungskräfte beim CPPS weisen die Ergebnisse daraufhin, dass Gelege mit geringerem Einzellagenflächengewicht (M1, M2), aufgrund der geringen Biegekräfte, besser geeignet sind als Gelege mit vergleichsweise hohem Einzellagenflächengewicht (M3 - M5). In diesem Zusammenhang muss allerdings das Gesamtflächengewicht der Preforms berücksichtigt werden. Um dieses Potential zu überprüfen wurden 6-Lagenpreforms (M1, M2) mit 3-Lagenpreforms (M3, M4) der Biaxial-Gelege verglichen. Das jeweilige Gesamtflächengewicht beträgt 1782 g/m<sup>2</sup> für M1 (6-lagig), 1776 g/m<sup>2</sup> für M2 (6-lagig), 1821 g/m<sup>2</sup> für M3 (3-lagig) und 1818 g/m<sup>2</sup> für M4 (3-lagig)<sup>39</sup>. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Biegekräfte normiert, indem die jeweiligen Biegekräfte auf die jeweiligen Gesamtflächengewichte bezogen wurden (siehe Abbildung 4.19).

Durch die Normierung ist deutlich zu erkennen, dass für das 600 g/m<sup>2</sup> schwere 0°/90°-Gelege M3 (3-lagig) höhere Biegekräfte benötigt werden als für alle anderen Konfigurationen. Beim Vergleich mit dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M1 (6-lagig) werden, trotz der geringeren Anzahl von Gelege-Gelege Reibungsflächen im Lagenaufbau (2 anstatt 5), im Mittel ca. 45 %<sup>40</sup> höhere Biegekräfte benötigt. Für die ±45°-Gelege, M2 (6-lagig) und M4 (3-lagig), ist der Unterschied mit ca. 9 % nicht so stark ausgeprägt, was wiederum primär durch die Bindungsart und Orientierung der Fasern begründet ist<sup>41</sup>. Ein weiterer Grund für die hohen Biegekräfte von M3 gegenüber den anderen Gelegen aus dieser Arbeit ist, dass M3 das einzige Gelege ist, welches eine Nähfeinheit von 7 anstatt 6 besitzt. Auch Cripps [153] berichtet darüber, dass eine Verringerung des Nahtabstandes die Flexibilität von Gelegen herabsetzt.

---

<sup>39</sup> Die Anzahl der Lagen wurde vom Preforming Prozess des CPPS abgeleitet und würde zu einer Profilstärke von 3,5 mm mit einem FVG von 58 % führen, was einer geläufigen Profilstärke im industriellen Einsatz entspricht.

<sup>40</sup> Das Auswertefenster bezieht sich auf einen Winkelbereich von 20° - 70°. Hierbei werden „Randeffekte“ wie starke Reibung bei kleinen Biegewinkeln und prüfbedingte Krafterhöhungen bei höheren Biegewinkeln nicht berücksichtigt.

<sup>41</sup> Gleiche Trends können auch beim Vergleich von 2-Lagenpreforms (M3, M4) mit 4-Lagenpreforms (M1, M2) sowie 1-Lagenpreforms (M3, M4) mit 2-Lagenpreforms (M1, M2) beobachtet werden.

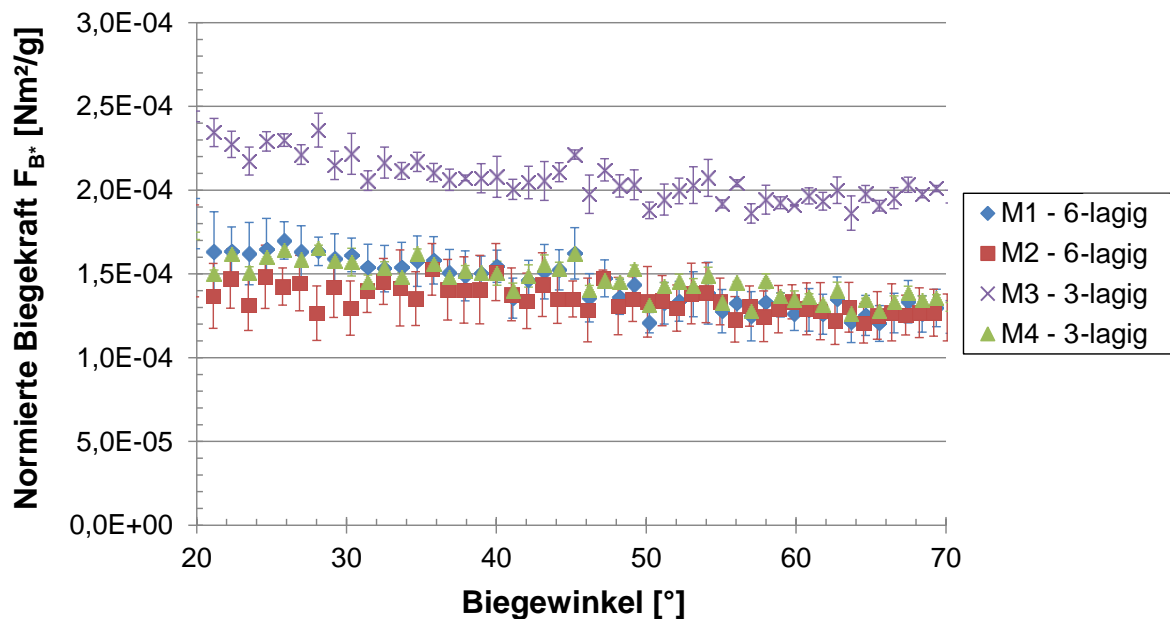


Abbildung 4.19: Vergleich der normierten Biegekräfte  $F_{B^*}$  von 6-Lagenpreforms der  $300 \text{ g/m}^2$  schweren Gelege (M1 und M2) mit 3-Lagenpreforms der  $600 \text{ g/m}^2$  schweren Gelege (M3 und M4) über die Biegewinkel von  $20^\circ$  -  $70^\circ$

Das Triaxial-Gelege M5<sup>42</sup> resultiert im geringsten Widerstand gegen Biegung und befindet sich nach der Normierung mit  $1,22\text{E-}04 \text{ Nm}^2/\text{g}$  sogar unterhalb des Niveaus von M4 ( $1,45\text{E-}04 \text{ Nm}^2/\text{g}$ ) sowie den Gelegen mit  $300 \text{ g/m}^2$  Einzellagenflächengewicht. Gründe hierfür sind die guten Drapierungseigenschaften der Hybrid-Bindung sowie das geringe Einzellagenflächengewicht innerhalb des Geleges von ca.  $200 \text{ g/m}^2$  pro Faserorientierung.

Hinsichtlich der **Orientierung der Gelege** sind für Gelege mit Trikot-Bindung (M1, M3) und Hybrid-Bindung (M5) die Biegekräfte niedriger, wenn die Oberseite der Probe (3-lagig oder 6-lagig) auf Druck belastet wird. Ursache hierfür ist der Unterschied des Verwirkungsgarnmusters der Trikot- und Hybrid-Bindung zwischen Ober- und Unterseite. Der größte Unterschied der Biegekräfte besteht beim  $300 \text{ g/m}^2$  schweren  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege M1 mit ca. 10 %. Für die  $\pm 45^\circ$ -Gelege mit einer Franse-Bindung (M2, M4) konnte kein Unterschied beobachtet werden.

Um den Einfluss der Lagenorientierung auf das Biegeverhalten näher zu untersuchen, wurden innerhalb von Mehrlagenpreforms Einzellagen teilweise gedreht (vgl. Kapitel 4.3.1, Abbildung 4.8). Dadurch entstehen *gleichorientierte textile Grenzflächen* (GTG), bei welchen die CF-Garne gegenüberliegender

<sup>42</sup> Für eine bessere Übersicht der Ergebnisse ist M5 nicht in Abbildung 4.19 dargestellt.

Gelegeoberflächen gleiche Faserorientierungen aufweisen und die Gelege-Gelege Reibungsflächenkonfigurationen (unterschiedliche Verwicklungsgarnmuster sind in Kontakt, vgl. Abbildung 8.10 im Anhang) variieren. Gedrehte Referenzaufbauten ohne GTG (D, Unterseiten werden auf Druck belastet) wurden ebenfalls getestet, sind aber in Abbildung 4.8 nicht abgebildet.

Die Biegekraftverläufe der einzelnen Konfiguration (A - D) über den Biegewinkel sind in Abbildung 4.20 dargestellt.

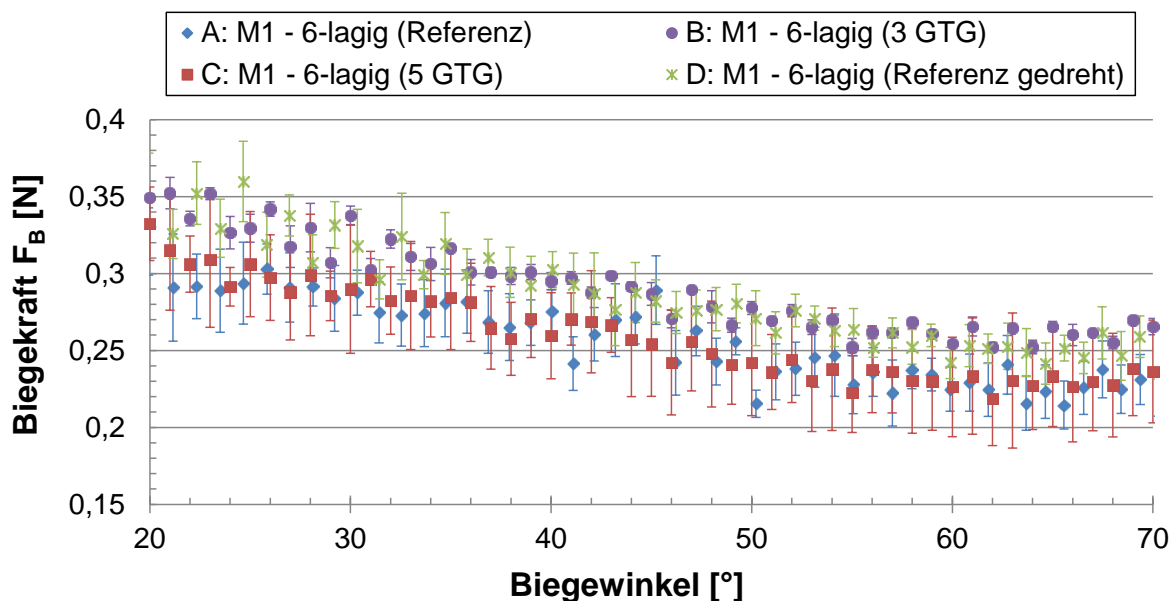


Abbildung 4.20: Einfluss des Lagenaufbaus auf das Biegeverhalten von 6-Lagenpreforms bestehend aus M1: Referenz ohne GTG (A), Aufbau mit drei GTG (B, vier Lagen gedreht), Aufbau mit fünf GTG (C, drei Lagen gedreht) und gedrehte Referenz ohne GTG (D, Unterseiten auf Druck belastet)

Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zur Referenz (A) die Biegekräfte für:

- 5 GTG (C, drei Lagen gedreht) um 4 %,
- 3 GTG (B, vier Lagen gedreht) um 16 % und
- die gedrehte Referenzpreform (D) um 12 %

gesteigert sind. Im Gegensatz zu C und B wurde bei D die gesamte Preform (6 Lagen) gedreht getestet. Allerdings existieren bei Fall B zusätzlich mehrere Gelege-Gelege Reibungsflächen, welche höhere Reibungskräfte zwischen den Einzellagen erzeugen (vgl. Kapitel 4.4.1). Beide Effekte bewirken im Vergleich zu den anderen Konfigurationen die höchsten Biegekräfte.

Nesting zwischen den Einzellagen mit gleichorientierten textilen Grenzflächen kann in diesem Testszenario als vernachlässigbar angesehen werden, da während des Biegevorgangs keine Normalkraft auf die Probe appliziert wird. Ein Ineinanderschieben der Lagen würde sich wiederum krafterhöhend (Erhöhung der Reibung) auswirken. Innerhalb der Parameterstudie zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens (Kapitel 4.3.1) wurde dies näher untersucht und erläutert. Auch bei den Gelegen M2 - M5 wurden verschiedene Konfigurationen mit gedrehten Einzellagen getestet. Hierbei sind für das  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege (M3) und das  $0^\circ/\pm 45^\circ$ -Gelege (M5) die Biegekräfte geringfügig höher ausgefallen, wohingegen für die  $\pm 45^\circ$ -Gelege (M2 und M4) kein nennenswerter Unterschied zu beobachten war.

Da bei der Auslegung und Anwendung von FKV-Bauteilen funktionsbedingt mehrere unterschiedliche Gelegearten verwendet werden, wurden ebenfalls Multi-Materialkombinationen zu Preforms aufgebaut und getestet. Hierbei wurden die Gelege mit unterschiedlichen Bindungsarten bzw. unterschiedlichen Einzellagenflächengewichten miteinander kombiniert. An dieser Stelle kann lediglich festgehalten werden, dass  $0^\circ/90^\circ$ -Lagen, positioniert als äußere Lagen, die benötigten Biegekräfte im Vergleich zu konträren Aufbauten ( $\pm 45^\circ$ -Lagen außen) erhöht haben.

#### 4.5.2 Einfluss der Prozessparameter

Bei der Untersuchung des Biegeverhaltens wurde ebenfalls der Einfluss der **Testgeschwindigkeit** evaluiert. Wie bereits in Kapitel 4.2.3 beschrieben, errechnet sich die Winkelgeschwindigkeit (rad/s), bei welcher die textile Probe eine Biegung von  $0^\circ$  auf  $82^\circ$  erfährt, aus der Testgeschwindigkeit (m/min) der beweglichen Einheit des Messsystems. Hierbei entspricht 1 m/min bzw. 2 m/min Testgeschwindigkeit einer Winkelgeschwindigkeit von 0,136 rad/s bzw. 0,273 rad/s.

Die Biegekraftverläufe der  $\pm 45^\circ$ -Gelege M2 (A, 6-lagig,  $300 \text{ g/m}^2$  Einzellagenflächengewicht) und M4 (B, 3-lagig,  $600 \text{ g/m}^2$  Einzellagenflächengewicht) über die Biegewinkel  $0^\circ - 82^\circ$  bei den Winkelgeschwindigkeiten 0,136 rad/s und 0,273 rad/s sind in Abbildung 4.21 dargestellt. Generell ist zu erkennen, dass eine Verdopplung der Winkelgeschwindigkeit keine ausgeprägte Auswirkung bzgl. der Biegekräfte bewirkt. Lediglich zu Beginn der Messung (Biegewinkel  $< 10^\circ$ ) bewirkt eine Verdopplung der Winkelgeschwindigkeit (0,273 rad/s anstatt 0,136 rad/s) eine Zunahme der Biegekräfte. Diese Kraftzunahmen werden jedoch bei der Auswertung

der Ergebnisse von M1 - M5 nicht berücksichtigt, da sich die Werte außerhalb der Evaluationsbereiche befinden<sup>43</sup>. Einen Überblick über die Biegekräfte von M1 - M5 gibt Tabelle 8.5 im Anhang.

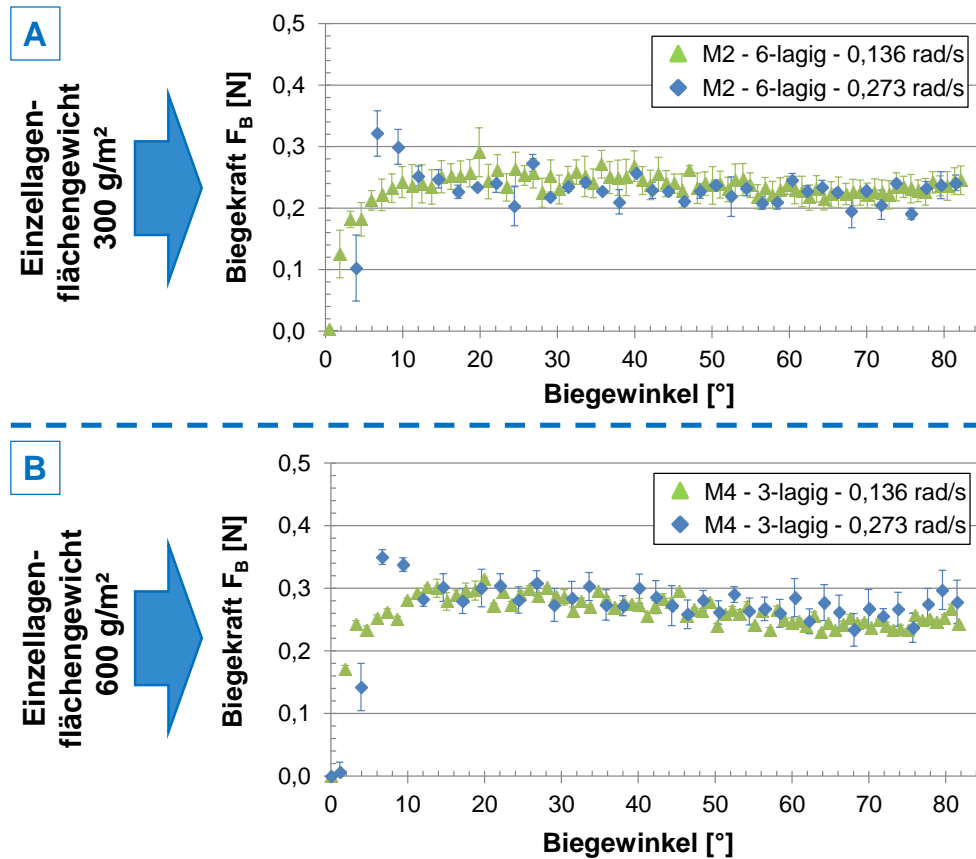


Abbildung 4.21: Einfluss der Winkelgeschwindigkeit ( $0,136 \text{ rad/s}$  und  $0,273 \text{ rad/s}$ ) auf die Biegekraft von Mehrlagenpreforms bestehend aus dem  $300 \text{ g/m}^2$  schweren Gelege M2 (A, 6-lagig) sowie dem  $600 \text{ g/m}^2$  schweren Gelege M4 (B, 3-lagig)

Das Triaxial-Gelege M5 ( $600 \text{ g/m}^2$  Einzellagenflächengewicht) verhält sich wie die  $\pm 45^\circ$ -Gelege (M2, M4). Für die  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege sind speziell für M3 ( $600 \text{ g/m}^2$  Einzellagenflächengewicht) die Zunahmen der Biegekräfte im Anfangsbereich stärker ausgeprägt (siehe Abbildung 8.12 im Anhang), was teilweise auf die zuvor beschriebenen Effekte bzgl. der Bindungsart (vgl. Kapitel 4.5.1) zurückzuführen ist.

Für die untersuchten Gelege M1 - M5 ist neben dem Einfluss der Bindungsart ein weiterer Effekt die Ursache für die Kraftzunahmen. Bei einer Erhöhung der

<sup>43</sup> Zur Erreichung einer angestrebten Winkelgeschwindigkeit ( $0,136 \text{ rad/s}$  oder  $0,273 \text{ rad/s}$ ) wird eine Beschleunigungsphase durchlaufen. Abhängig von der Höhe der eingestellten Winkelgeschwindigkeit, stellt sich erst nach Erreichung eines Biegewinkels von  $7^\circ$  (bei  $0,136 \text{ rad/s}$ ) bzw.  $15^\circ$  (bei  $0,273 \text{ rad/s}$ ) eine konstante Winkelgeschwindigkeit ein. Die Evaluationsbereiche zur Bestimmung des Einflusses der Testgeschwindigkeit auf die Biegekraft beziehen sich daher nur auf Bereiche mit konstanter Winkelgeschwindigkeit.



Testgeschwindigkeit benötigen die Gelege eine gewisse Zeit sich auf die gesteigerte Belastung einzustellen (Faserneuorientierung). Demnach erhöht sich der Widerstand gegen eine Formgebung mit steigender Testgeschwindigkeit, da ein direkter Abbau der äußeren Belastung nicht gegeben ist. Dieses Verhalten entspricht einem viskoelastischen Biegeverhalten. Allerdings ist beim kontinuierlichen Formgebungsprozess beim CPPS der Einfluss der Testgeschwindigkeit auf das Biegeverhalten der Gelege vernachlässigbar, da die Winkelgeschwindigkeit von 0,273 einer Prozessgeschwindigkeit von ca. 10 m/min entspricht, was bereits höher ist als die derzeit maximal mögliche Prozessgeschwindigkeit von 4 m/min<sup>44</sup>.

Im Zuge weiterer Untersuchungen wurde der Einfluss von Wiederholungszyklen (1 - 10) auf die Biegekraft von Mehrlagenpreforms evaluiert. Wiederholungszyklen bewirken hierbei eine „Auflockerung“ der Faserstruktur und somit eine Reduzierung der Biegekraft. Mit zunehmender Anzahl von Wiederholungszyklen sinkt der Effekt der Kraftreduzierung<sup>45</sup>.

**Zusammenfassend** können hinsichtlich des mehrlagigen Biegeverhaltens folgende Punkte festgehalten werden:

- Gelege mit vergleichsweise hohem Einzellagenflächengewicht (hier 600 g/m<sup>2</sup> anstatt 300 g/m<sup>2</sup>) benötigen höhere Biegekräfte (Garnbündelung ist entscheidend),
- Bindungsart, Verwirkungsgarnanteil und -spannung beeinflussen maßgeblich das Biegeverhalten
  - Franse- und Hybrid-Bindungen erzeugen geringere Biegekräfte als Trikot-Bindungen
  - Je geringer der Verwirkungsgarnanteil (und –spannung) ist, desto geringer sind die Biegekräfte,
- der Zusammenhang zwischen Lagenanzahl und Biegekraft ist quasi-linear und
- die Testgeschwindigkeit hat im relevanten Geschwindigkeitsbereich für das CPPS (< 0,136 rad/s bzw. < 5 m/min) keinen Einfluss auf die Biegekraft.

---

<sup>44</sup> Die Winkelgeschwindigkeit von 0,136 rad/s entspricht einer Prozessgeschwindigkeit von 5 m/min.

<sup>45</sup> An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass der bewegliche Teil der Probe während des Biegeversuches unkompaktiert ist. Dadurch dominiert der Effekt der Auflockerung der Faserstruktur und nicht die Reibung zwischen den Einzellagen.

#### 4.6 Richtlinien zur Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens beim Preforming

In diesem Kapitel werden anhand der Ergebnisse aus den Parameterstudien bzgl. der Textileigenschaften Richtlinien zur Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens aufgestellt. Diese können für eine prozessorientierte Materialauswahl sowie für Prozessmodifikationen innerhalb der Preform-LCM-Prozesskette genutzt werden. Beide Anwendungsfälle führen zu einer Verringerung einzelner Kraftanteile (Kompaktierungs-, Reibungs- bzw. Biegekraft), sodass beispielsweise beim kontinuierlichen Preforming die benötigte Formgebungskraft zur Erzeugung einer gewünschten 3D-Profilform ausgehend vom ebenen Zustand der verwendeten Textilien gesenkt werden kann. Dadurch werden bspw. die Lasten an den Transport-/Fördereinheiten auf die zu verarbeitenden Gelege verringert, was einen faserschonenden Materialtransport ermöglicht und höhere Prozessgeschwindigkeiten für die Herstellung von Profil-Preforms zulässt.

Zur Beeinflussung des **Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhaltens** wurde je eine **separate Ergebnistabelle** (siehe Tabelle 4.4, Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6) erstellt. In der ersten Zeile sind jeweils die untersuchten Material- und Prozessparameter aufgelistet (ein detaillierter Überblick ist in Tabelle 4.2 gegeben). Hierbei sind dominierende Parameter grau hinterlegt und fett markiert. In der zweiten Zeile wird die Auswirkung der untersuchten Parameter auf die jeweilige Textileigenschaft beschrieben. Hierbei wird dargestellt, ob der Parameter (wenn appliziert oder erhöht (+) wird) eine stark steigende (↑↑↑), steigende (↑↑), gering steigende (↑), keine relative (o), gering senkende (↓), senkende (↓↓) oder stark senkende (↓↓↓) Auswirkung auf die jeweilige Textileigenschaft hat. Wenn verschiedene Auswirkungen beobachtet wurden, ist ein Bereich (z. B. ↑↑ - ↓↓ bzw. steigend bis senkend) angegeben. Im Folgenden wird beispielhaft erläutert, wie die Richtlinien zu deuten sind und welche Rückschlüsse gefolgert werden können. Detaillierte Begründungen zu den einzelnen Aussagen resultieren aus den Ergebnissen von den Kapiteln 4.3 bis 4.5.

Die Auswirkungen der angewendeten Parameter auf die **Kompaktierungskraft** sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Dominierende Einflussfaktoren sind Geschwindigkeit, Normalkraft, Zyklusanzahl, Bindungsart<sup>46</sup> und Einzellagenflächengewicht.

Tabelle 4.4: Richtlinien zur Beeinflussung des Kompaktierungsverhaltens: Auswirkungen von Material- und Prozessparametern auf die Kompaktierungskraft

Untersuchter Parameter	Materialparameter					Prozessparameter		
	Bindungsart (+) <sup>1</sup>	Flächengewicht (+)	Faserorientierung <sup>2</sup>	Lagenanzahl (+)	Ober-/Unterseite (Nesting +)	Geschwindigkeit (+)	Normalkraft (+)	Zyklusanzahl (+)
<b>Auswirkung auf Kompaktierungskraft</b>	↑↑↑	↓↓↓	↑ - ↓	o	↓	↑↑↑	↑↑↑	↓↓↓
(+ ) Parameter gesteigert								
stark steigend (↑↑↑), steigend (↑↑), gering steigend (↑), keine relative Auswirkung (o), gering senkend (↓), senkend (↓↓), stark senkend (↓↓↓)								
<sup>1</sup> Hinsichtlich der Bindungsart wird unter einer Steigerung dieses Parameters verstanden, dass der Verwirkungsgarnanteil im Gelege erhöht wird.								
<sup>2</sup> Bei ±45°-Gelegen wurden in den meisten Fällen höhere Kompaktierungskräfte gemessen als bei 0°/90°-Gelegen.								

Materialseitig bewirken niedrige Verwirkungsgarnanteile (Verwirkungsgarn wird als Störfaktor angesehen) und vergleichsweise hohe Einzellagenflächengewichte eine starke Senkung der Kompaktierungskräfte (↓↓↓). Prozessseitig reduzieren vorangegangene Kompaktierungszyklen die Kompaktierungskraft stark (↓↓↓). Hier bewirkt die zyklische Vorformung der Faserstruktur samt Verwirkungsgarne eine Reduzierung der Kompaktierungskraft zur Erreichung eines Ziel-FVG.

Tabelle 4.5 zeigt die Auswirkungen der Material- und Prozessparameter auf die **Reibungskraft**. Dominierende Einflussfaktoren sind Bindungsart, Ober-/Unterseiten-Konfigurationen, Normalkraft und WZ-Oberfläche.

Materialseitig führen bei einer Gelege-Gelege Reibung Oberseite-Oberseite Konfigurationen gegenüber Unterseite-Unterseite Konfigurationen zu einer Reduzierung der Reibungskraft (↓↓). Prozessseitig hat beispielsweise eine

<sup>46</sup> Hinsichtlich der Bindungsart wird unter einer Steigerung dieses Parameters verstanden, dass der Verwirkungsgarnanteil im Gelege erhöht wird.

Steigerung der Zykluszahl (Dauerbelastung) keine relative Auswirkung (o) auf die resultierende Reibungskraft.

Tabelle 4.5: Richtlinien zur Beeinflussung des Reibungsverhaltens: Auswirkung von Material- und Prozessparametern auf die Reibungskraft

Untersuchter Parameter	Materialparameter					Prozessparameter			
	Bindungsart <sup>1</sup>	Flächengewicht (+)	Faserorientierung <sup>2</sup>	Testrichtung <sup>1</sup>	Ober-/Unterseite <sup>3</sup>	Geschwindigkeit (+)	Normalkraft (+)	WZ-Oberfläche <sup>4</sup>	Zyklusanzahl (+)
<b>Auswirkung auf Reibungskraft</b>	↑↑	↓↓↓	↑ - ↓	↑ - ↓	↑↑ - ↓↓	o	↑↑↑	↑↑ - ↓↓	o
(+) Parameter gesteigert stark steigend (↑↑↑), steigend (↑↑), gering steigend (↑), keine relative Auswirkung (o), gering senkend (↓), senkend (↓↓), stark senkend (↓↓↓)									
<sup>1</sup> Hinsichtlich der Bindungsart wird unter einer Steigerung dieses Parameters verstanden, dass der Verwicklungsgarnanteil im Gelege erhöht wird.									
<sup>2</sup> Unterschiedliche Garnbündelung und Verwicklungsgarnmuster in 0° bzw. 90° Testrichtung.									
<sup>3</sup> Oberseite auf Oberseite Konfigurationen führen zu den geringsten und Unterseite auf Unterseite Konfigurationen zu den höchsten Reibungskräften.									
<sup>4</sup> PTFE-Oberflächen erzeugen geringere Reibungswiderstände als Stahl- und Aluminiumoberflächen.									

Tabelle 4.6 zeigt die Auswirkung der Material- und Prozessparameter auf die **Biegekraft**. Dominierende Einflussfaktoren sind Bindungsart, Einzellagenflächengewicht, Faserorientierung, Lagenanzahl und Zyklusanzahl.

Tabelle 4.6: Richtlinien zur Beeinflussung des Biegeverhaltens: Auswirkungen von Material- und Prozessparametern auf die Biegekraft

Untersuchter Parameter	Materialparameter							Prozessparameter		
	Bindungsart <sup>1</sup>	Flächengewicht (+)	Faserorientierung <sup>2</sup>	Lagenanzahl (+)	Lagenaufbau: Ober-/Unterseite (Nesting +)	Textrichtung <sup>3</sup>	Ober-/Unterseite <sup>4</sup>	Geschwindigkeit (+)	Normalkraft <sup>4</sup> (+)	Zyklusanzahl (+)
<b>Auswirkung auf Biegekraft</b>	↑↑↑	↑↑	↑↑ - ↓↓	↑↑	↑	↑ - ↓	↑ - ↓	↑	↑ - ↓	↓↓
(+ ) Parameter gesteigert										
stark steigend (↑↑↑), steigend (↑↑), gering steigend (↑), keine relative Auswirkung (o), gering senkend (↓), senkend (↓↓), stark senkend (↓↓↓)										
<sup>1</sup> Hinsichtlich der Bindungsart wird unter einer Steigerung dieses Parameters verstanden, dass der Verwirkungsgarnanteil im Gelege erhöht wird.										
<sup>2</sup> Verstärkungsfasern längs zur Biegerichtung orientiert erzeugen höhere Biegekräfte als Winkel > 0°.										
<sup>3</sup> Bei 0°/90°-Gelegen sind die Biegekräfte quer zur Produktionsrichtung höher als in Produktionsrichtung. Unterschied wird primär durch unterschiedliche Garnbündelung verursacht.										
<sup>4</sup> Bei Trikot- und Hybrid-Bindungen unterschieden sich die Biegekräfte bei unterschiedlicher Gelegeorientierung. Bei Franse-Bindungen besteht kein Unterschied.										
<sup>5</sup> Senkende Auswirkung auf die Biegekraft, wenn der zu biegende Teil der Probe unkompaktiert ist. Steigernde Auswirkung, wenn der zu biegende Teil der Probe kompaktiert ist.										

Hinsichtlich der Materialparameter haben Gelege mit niedrigem Verwirkungsgarnanteil und niedrigem Einzellagenflächengewicht eine stark senkende Auswirkung (↓↓↓) auf die resultierenden Biegekräfte. Prozessseitig wirkt sich eine Steigerung der Zykluszahl (Wiederholungszyklen) senkend (↓↓) auf die Biegekraft aus, was durch eine Auflockerung der Gelegestruktur begründet ist.

Die entwickelten Richtlinien zeigen, dass durch die Variation von Material- und Prozessparametern die einzelnen Textileigenschaften maßgeblich beeinflusst werden können. Manche dieser Parameter haben einen starken Einfluss auf mindestens zwei von drei Textileigenschaften und können daher als dominierende Parameter identifiziert werden. Hinsichtlich der Prozessparameter dominieren die Normalkraft und die Zykluszahl, wohingegen die Bindungsart und das Einzellagenflächengewicht materialseitig dominieren.

Mit den Gelegen aus dieser Arbeit wurde bereits ein breites Spektrum an Materialparametern abgebildet. Gleichermäßen gilt dies für die untersuchten Prozessparameter, sodass qualitative Aussagen über einen Formgebungsprozess

möglich sind. Anhand der entwickelten Richtlinien kann daher eine Abschätzung von relativen Änderungen bei einem Formgebungsprozess prognostiziert werden.<sup>47</sup>

Zur Ermöglichung hoher Prozessgeschwindigkeiten und hoher Preformqualität muss die Belastung auf die zu verarbeitenden textilen Halbzeuge während eines Preforming Prozesses minimal sein. Hinsichtlich der zuvor identifizierten dominierenden Material- und Prozessparameter sollten die Verwirkungsgarnanteile gering, die Einzellagenflächengewichte hoch, die auf die textilen Halbzeuge wirkenden Normalkräfte gering und die Zyklusanzahl (Vorkompaktierungs- bzw. Wiederholungszyklen) hoch sein. Diese Parametereinstellungen können allerdings verarbeitungstechnische Nachteile zur Folge haben, da die textilen Halbzeuge zu instabil oder zu steif, der eingestellte FVG der Preforms zu gering und die Produktionszeiten zu lang werden können. Zusätzlich muss bei der Anwendung der Richtlinien berücksichtigt werden, dass sie eine Vereinfachung komplexer Zusammenhänge abbilden. Bei einer Übertragung auf einen bestimmten Formgebungsprozess überlagern sich einzelne Effekte, welche bei den Einzeluntersuchungen nicht untersucht werden konnten. Welche Textileigenschaft (Kompaktierungs-, Reibungs- oder Biegeverhalten) letztendlich die Formgebungskraft bei einem Preforming Prozess dominiert ist unbekannt und vom adressierten Preforming Prozess abhängig.

Im nächsten Kapitel werden daher die dominierenden Textileigenschaften am Beispiel des kontinuierlichen Formgebungsprozesses beim CPPS ermittelt, bevor die Anwendung der entwickelten Richtlinien erfolgt.

---

<sup>47</sup> Eine Aussage über Absolutwerte kann hier nicht getroffen werden, da quantitative Auswirkungen zu komplex für eine Vorhersage sind.

## 5 Übertragung der Erkenntnisse auf das kontinuierliche Profil-Preforming System

In diesem Kapitel wird die Übertragbarkeit der, basierend auf den Parameterstudien entwickelten, Richtlinien auf den kontinuierlichen Formgebungsprozess des CPPS geprüft. Nach der Beschreibung des Messsystems zur Bestimmung der kontinuierlichen Formgebungskräfte, erfolgt die Messung der kontinuierlichen Formgebungskräfte anhand der fünf CF-Gelege. Hierbei werden die Formstabilität sowie die Auswirkungen von Material- und Prozessparametern auf die kontinuierliche Formgebung evaluiert und analysiert. Abschließend findet durch die Anwendung der Richtlinien ein material- und prozesseitiger Transfer der Erkenntnisse statt.

### 5.1 Messsystem zur Ermittlung der kontinuierlichen Formgebungs kraft

Zur Ermittlung von kontinuierlichen Formgebungs kräften muss ein Messsystem eine durchgängige Erfassung der Formgebungs kräfte bei konstanten Testgeschwindigkeiten ermöglichen und sensibel gegenüber äußeren Einflüssen bzw. verschiedenen textilen Halbzeugen sein. In dieser Arbeit besteht das Messsystem aus der Materialzuführungs- und Formgebungseinheit des CPPS sowie einer Abzugsvorrichtung zur Erfassung der kontinuierlichen Formgebungs kräfte zur Erzeugung einer T-Profil-Preform (siehe Abbildung 5.1).

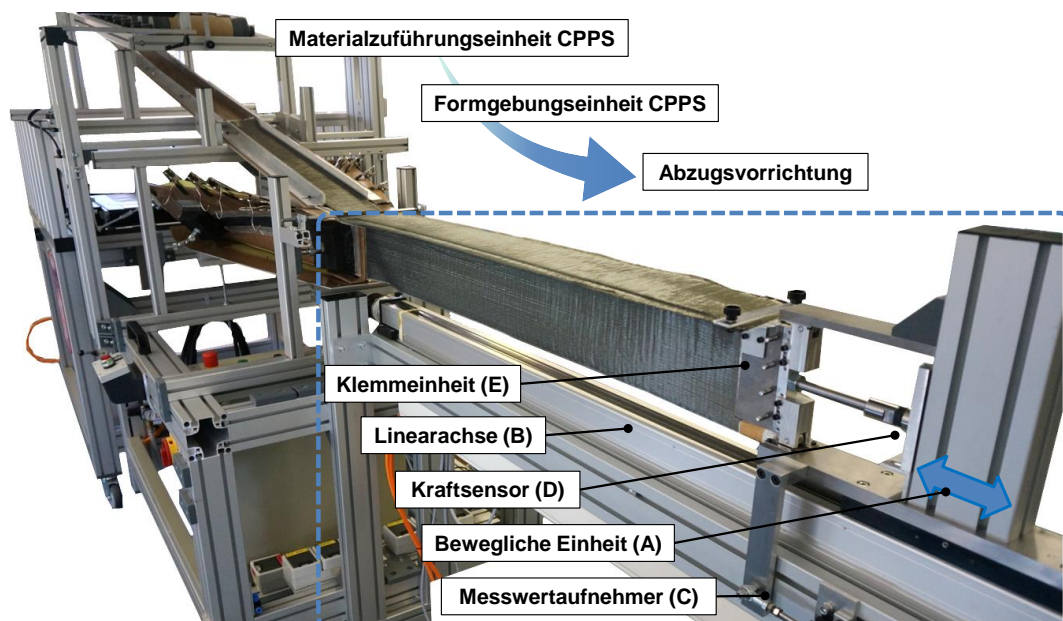


Abbildung 5.1: Messsystem zur Ermittlung der kontinuierlichen Formgebungs kraft für T-Profil-Preforms

Die Abzugsvorrichtung ist eine modifizierte Variante der Messvorrichtung zur Ermittlung der mehrlagigen Biegekräfte aus Kapitel 4.2.3. Die bewegliche Einheit (A) ist nach wie vor auf der Linearachse (B) montiert und der Verfahrweg (Messstrecke von 945 mm) wird über einen Messwertaufnehmer (C) aufgezeichnet. Der zuvor eingebaute Kraftsensor wurde durch einen Präzisions-Miniatur-Kraftsensor Typ 8431-5100 (D) ersetzt, sodass Zug- und Druckkräfte bis zu 100 N (Messgenauigkeit von  $\pm 0,2\%$ ) gemessen werden können.

Zur Klemmung der T-Preform wurde die bewegliche Einheit durch eine Klemmvorrichtung erweitert. Die Klemmeinheit (E) ist hierbei über eine horizontale Achse mit dem Präzisions-Miniatur-Kraftsensor verbunden. Zum Schutz gegen Querkräfte wird die Klemmeinheit zusätzlich horizontal und vertikal durch Kugellager geführt.

Das Datenerfassungs- und Steuerungsprogramm basiert auf LabVIEW und erfasst die Formgebungskraft<sup>48</sup>, den Verfahrweg, die Versuchszeit und die Motorspannung. Zusätzlich werden die Testgeschwindigkeit sowie die Testrichtung von der Software gesteuert.

Vor jedem Versuch wird der untere Teil der Preform (Grundmaterial 400 mm x 2000 mm) durch die Formgebungseinheit (eingestellt auf den angestrebten FVG) bis zur Klemmvorrichtung der Abzugseinheit eingezogen. Die Decklagen (100 mm x 2000 mm) werden separat über eine Rutsche am Ende der Formgebungseinheit zur Vervollständigung der T-Profil-Preform zugeführt (vgl. Kapitel 3.2). Nach der Materialklemmung wird die Testgeschwindigkeit eingestellt und der Versuch gestartet. Sobald die bewegliche Einheit die Teststrecke von 945 mm absolviert hat ist die Messung beendet.

### **5.1.1 Sensitivitätsanalyse zur Validierung des Messsystems**

Zur Validierung der Aussagekraft der kontinuierlichen Formgebungskräfte wurden vor Beginn der Parameterstudie der Einfluss des Profildesigns, die Wiederholungsgenauigkeit der Messung sowie der Einfluss der Förderbandreibung untersucht<sup>49</sup>.

---

<sup>48</sup> Um den Sensor vor Überlastung zu schützen wird der Versuch beim Überschreiten einer Zugkraft von 100 N automatisch abgebrochen.

<sup>49</sup> Zu Beginn der Sensitivitätsanalyse wurden Leerfahrten ohne eingespannte Probe durchgeführt. Bei einer Geschwindigkeit von 1 m/min wurde eine durchschnittliche Kraft von 0,15 N gemessen. Diese Kraft wird im Folgenden als vernachlässigbar klein angenommen.



Hinsichtlich des **Profildesigns** wurden mehrere T-Profil-Preformvarianten untersucht. Hierbei hat sich eine zweiteilige T-Profil-Preformvariante, bestehend aus einer unteren Preform und Decklagen, als vorteilig erwiesen. Allerdings wird eine zusätzliche Kompaktierungsstrebe am Ende der Formgebungseinheit benötigt, damit ein konstanter FVG der Preform sichergestellt werden kann. Abbildung 8.13 im Anhang zeigt die Entstehung der T-Profil-Preform in der modifizierte Formgebungseinheit mit zusätzlicher Kompaktierungsstrebe (A).

Zur Überprüfung der **Wiederholungsgenauigkeit der Messung** bei der Erzeugung einer T-Profil-Preform wurden die Formgebungskräfte bei verschiedenen FVG (40 % - 50 %) mit 1 m/min getestet. Hierbei zeigte sich, dass bei hohen FVG (> 45 %) teilweise ein Kraftabfall der Formgebungskräfte stattgefunden hat, was sich durch eine Aufweitung der Formgebungsschienen begründet ist. Um ein Aufweiten der Schienen zu vermeiden, wurde eine zusätzliche Versteifungsstrebe am Ende der Formgebungseinheit montiert. Anschließende Versuche zeigten, dass nun eine Wiederholungsgenauigkeit der Messung bei höheren FVG (> 45 %) gewährleistet ist. Darüber hinaus sind Standardabweichungen der Formgebungskräfte sehr gering, was einer reproduzierbaren Spalteinstellung zur Erreichung eines angestrebten FVG der Profil-Preform entspricht.

Hinsichtlich des **Einflusses der Förderbandreibung** wurden kontinuierliche Formgebungskräfte mit und ohne PTFE-Auflage auf dem Förderband (nicht angetrieben) verglichen. Die Versuche ergaben, dass die PVC-Oberfläche des Förderbands eine durchschnittlich bis zu 24 % höhere Abzugskraft im Vergleich zur PTFE-Auflage erzeugt (siehe Abbildung 8.14 im Anhang). Weiterhin wurde festgestellt, dass sich ab einem Verfahrensweg von etwa 840 mm die Kraftverläufe beider Konfigurationen annähern. Ursache hierfür ist, dass sich kein Material mehr auf dem Förderband befindet und somit der Einfluss des Förderbands wegfällt. Daher wird zur Analyse des Formgebungsverhaltens und der Bestimmung der jeweiligen Kraftanteile in Kapitel 5.2 der Messbereich auf 850 - 945 mm beschränkt<sup>50</sup>.

---

<sup>50</sup> Für alle Folgeversuche wurde dennoch eine PTFE-Folie auf dem Förderband fixiert um die Belastung auf die Gelege durch Reibung möglichst gering zu halten.

## 5.2 Textiles Formgebungsverhalten beim kontinuierlichen Preforming

In den folgenden Abschnitten werden die kontinuierlichen Formgebungskräfte der Gelege M1 - M5 untersucht. Nach einer kurzen Beschreibung der Formstabilität der kontinuierlich geformten T-Profil-Preforms folgt die Evaluation und Analyse der Auswirkungen von Material- und Prozessparameter auf das kontinuierliche Formgebungsverhalten.

### 5.2.1 Formstabilität der CF-Gelege beim kontinuierlichen Preforming

Die getesteten Lagenaufbauten bestehen je nach Einzellagenflächengewicht (300 g/m<sup>2</sup> bzw. 600 g/m<sup>2</sup>) aus 6 Lagen (M1, M2) bzw. 3 Lagen (M3 - M5). Neben den Ein-Materialkombinationen wurde ebenfalls eine Multi-Materialkombination aus M1/M2 getestet. Die untersuchten Lagenaufbauten sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Übersicht der getesteten Lagenaufbauten zur Untersuchung des textilen Formgebungsverhaltens beim kontinuierlichen Preforming

Typ	Material	Lagenanzahl	Gesamtflächen-gewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Lagenaufbau	Untersuchte FVG <sup>1</sup> [%]
Ein-Material-kombination	M1	6	1782	Normal	20 <sup>2</sup> , 45
	M2	6	1776	Normal	20 <sup>2</sup> , 40, 45, 50
	M3	3	1821	Normal	20 <sup>2</sup> , 45
	M4	3	1818	Normal	20 <sup>2</sup> , 40, 45, 50
	M5	3	1824	Normal	20 <sup>2</sup> , 45
Multi-Material-kombination	M1/M2	3/3	1779	Alternierend	45

<sup>1</sup>Die 0°/90°-Gelege überschritten bei einem FVG von 50 % die maximal Abzugskraft von 100N.  
<sup>2</sup>Theoretischer FVG bezogen auf den Kompaktierungsspalt der Formgebungseinheit.

Die 0°/90°-Gelege (M1, M3) lassen sich ohne Verzug und Faltenbildung in die gewünschte T-Profil-Preform formen. Jedoch kann beim 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M3 in den Flanschbereichen ein Rückbiegen des Geleges beobachtet werden, was durch die hohe Steifigkeit (hohe Rückstellkräfte) von M3 begründet ist (siehe Abbildung 5.2). Durch den Einsatz von Führungsschienen beim CPPS kann dies jedoch kontrolliert werden. Das 300 g/m<sup>2</sup> schwere Gelege M1 zeigt dagegen eine sehr gute Formstabilität und liegt nach dem Prozess entsprechend der gewünschten T-Profilform vor.

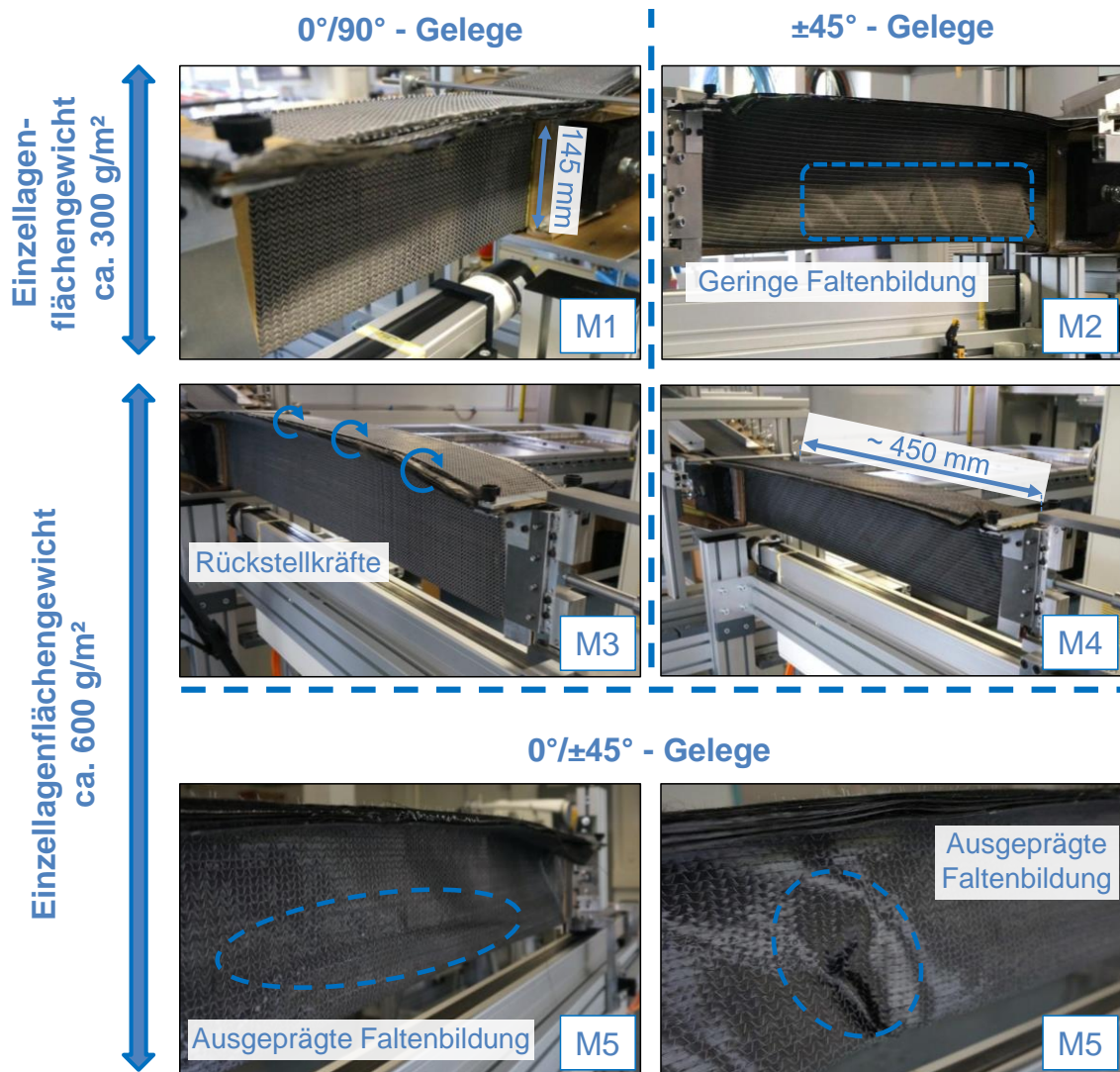


Abbildung 5.2: Formstabilität der T-Profil-Preforms (geformt in der Formgebungseinheit des CPPS) bestehend aus M1 - M5 gegliedert nach Faserorientierung ( $0^\circ/90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  und  $0^\circ/\pm 45^\circ$ ) und Einzellagenflächengewicht (300 und  $600 \text{ g/m}^2$ )

Trotz des Fehlens einer  $0^\circ$ -Faserorientierung zur Lastübertragung in Abzugsrichtung ist es möglich Lagenaufbauten mit  $\pm 45^\circ$ -Gelegen (M2, M4) im CPPS zu T-Profil-Preforms formstabil zu formen. Lediglich beim  $300 \text{ g/m}^2$  schweren Gelege (M2) ist eine geringe Faltenbildung im unteren Teil des Stegs zu erkennen (siehe Abbildung 5.2). Diese kann jedoch durch Führungsschienen beim Profil-Preforming kompensiert werden. Bei höheren FVG ( $\geq 45\%$ ) erfahren M2 sowie M4 allerdings eine Materiallängung bis zu  $15 \text{ mm}$  ( $< 1\%$  der Gesamtlänge der Probe) aufgrund der gesteigerten Abzugs-/Formgebungskraft und des Fehlens von unterstützenden Materialfördereinheiten.

Das Triaxial-Gelege mit Hybrid-Bindung (M5) erschien angesichts der positiven Ergebnisse aus den Parameterstudien (vgl. Kapitel 1) als besonders geeignet für das Profil-Preforming. Allerdings ist die Formstabilität von M5, aufgrund der geringeren Steifigkeit des Geleges (41 mN\*cm quer zur Produktionsrichtung, vgl. Tabelle 8.4) grenzwertig und es kann im vorliegenden Messsystem keine reproduzierbare Formgebung zu einer T-Profil-Preform erreicht werden. Somit ist für M5 die kritische Biegesteifigkeit hinsichtlich einer formstabilen Formgebung unterschritten. Dadurch bilden sich starke Falten und Materialüberlappungen während der Formgebung (siehe Abbildung 5.2).

### 5.2.2 Auswirkung von Material- und Prozessparameter auf die kontinuierliche Formgebungskraft

Zur Evaluierung der Auswirkungen von **Material- und Prozessparameter** auf die Formgebungskraft wurden die Lagenaufbauten bei unterschiedlichen FVG gemäß Tabelle 5.1 getestet. Entsprechend der Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse (vgl. Kapitel 5.1.1) wird zur Bestimmung der kontinuierlichen Formgebungskräfte der Messbereich von 850 - 945 mm herangezogen. Aufgrund des hohen Materialeinsatzes für eine Messung wurden alle Versuche einmal pro Konfiguration durchgeführt. Nur für das 600 g/m<sup>2</sup> schwere  $\pm 45^\circ$ -Gelege M4 wurden die Versuche repräsentativ für alle verwendeten Gelege dreimal wiederholt. Abbildung 8.15 im Anhang zeigt die Kraftverläufe von M4 über den gesamten Verfahrensweg (0 - 945 mm) zur Erstellung einer T-Profil-Preform bei den unterschiedlichen FVG (20 %, 40 %, 45 % und 50 %). Da die Kraftverläufe von M4 verlässlich reproduziert werden können, werden die Ergebnisse und Aussagen bzgl. der weiteren vier Gelege als zuverlässig und repräsentativ angenommen. Weiterhin wird in Abbildung 8.16 im Anhang exemplarisch die Kraftverläufe der fünf Ein-Materialkombinationen (M1 - M5) im unkompaktierten Zustand (20 % FVG) und bei 45 % FVG<sup>51</sup> dargestellt.

Eine Übersicht der kontinuierlichen Formgebungskräfte der Biaxial-Gelege M1 - M4 zur Erzeugung einer T-Profil-Preform mit definierten FVG (20 %, 40 %, 45 % und

---

<sup>51</sup> Für die weitere Analyse des kontinuierlichen Formgebungsverhaltens wurde das Triaxial-Gelege M5 aufgrund seiner Instabilität (Steifigkeit des Geleges zu gering für reproduzierbare Formgebung) nicht weiter betrachtet.

50 %) zeigt Abbildung 5.3. Zusätzlich wird die prozentuale Kraftzunahme von 20 % auf 45 % FVG dargestellt (blaue Pfeile).

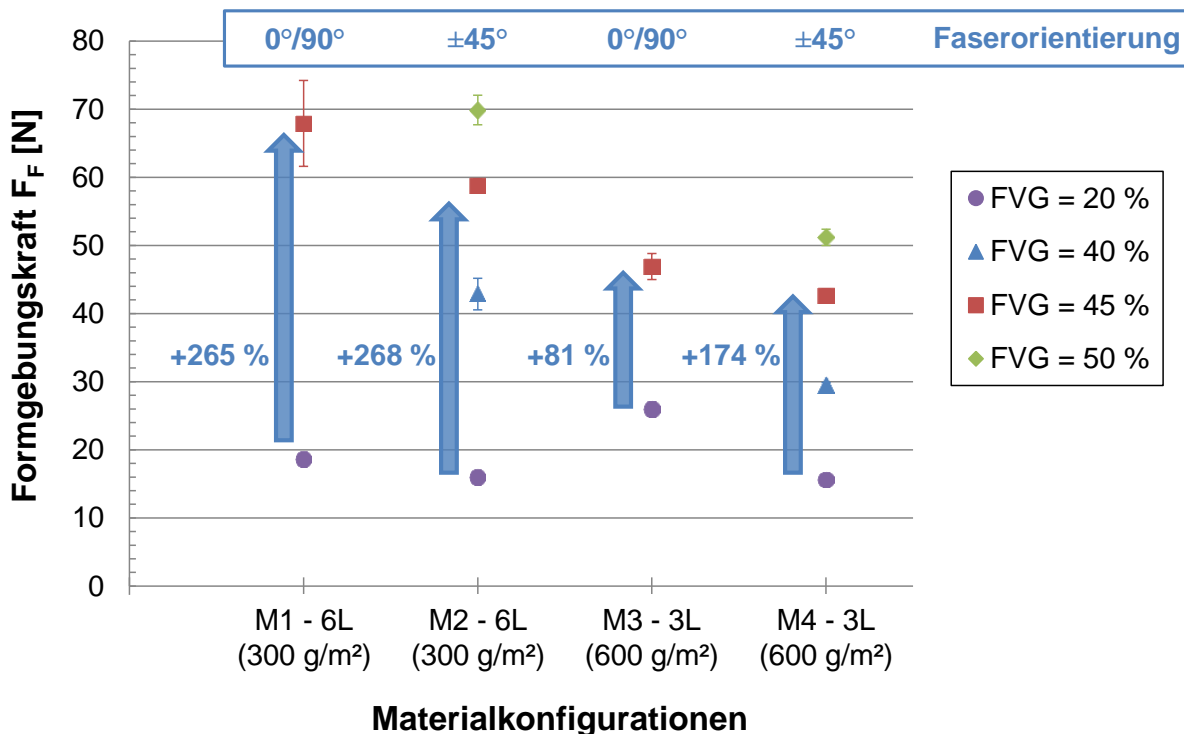


Abbildung 5.3: Übersicht der Formgebungskräfte von M1 und M2 (je 300 g/m² Einzel-lagenflächengewicht) sowie M3 und M4 (je 600 g/m² Einzellagenflächengewicht) bei verschiedenen FVG (20 %, 40 %, 45 % und 50 %)

Bei dem Vergleich der prozentualen Kraftzunahmen der kontinuierlichen Formgebungskräfte von 20 % auf 45 % FVG wird deutlich, dass hinsichtlich des **Einzellagenflächengewichtes** eine Erhöhung des Kompaktierungszustandes auf die 300 g/m² schweren Gelege (M1, M2) einen größeren Einfluss ausübt als auf die 600 g/m² schweren Gelege (M3, M4). Diesbezüglich wurden ähnliche Beobachtungen bei den Kompaktierungsversuchen (vgl. Kapitel 4.3) gemacht. Demnach bestätigen sich die Erkenntnisse aus den Einzeluntersuchungen im vorliegenden Preforming Prozess.

Die 0°/90°-Gelege (M1 und M3) verursachen im Vergleich zu ±45°-Gelegen (M2 und M4) bei hohen FVG (hier 45 %) größere Kraftschwankungen. Dieser Effekt ist primär auf die **Bindungsart** (Trikot- anstatt Franse-Bindung) zurückzuführen. Am Kompaktierungspalt der Formgebungseinheit (Erreichung des angestrebten Ziel-FVG) werden durch Überlagerungen der Verwirkungsgarne lokale Kraftspitzen generiert. Für den 6-lagigen Aufbau (gesteigerter Verwirkungsgarnanteil) von M1 mit

Trikot-Bindung ist der Effekt am höchsten ausgeprägt. Im Vergleich zum 6-lagigen Aufbau von M2 mit Franse-Bindung beträgt die Standardabweichung der Formgebungskraft 6,3 N (M1) anstatt 1 N (M2). Bei den 3-lagigen Aufbauten mit geringerem Verwirkungsgarnanteil können in abgeschwächter Form ähnliche Trends bzgl. der Standardabweichungen beobachtet werden (1,9 N bei M3 vs. 0,9 N bei M4). Somit lassen sich Gelege mit höherem Einzellagenflächengewicht und einer Franse-Bindung robuster zu T-Profil-Preforms verarbeiten.

Zur Untersuchung der **Auswirkungen des Lagenaufbaus** auf die kontinuierlichen Formgebungskräfte wurde eine Multi-Materialkombination mit alternierendem Lagenaufbau bei 45 % FVG getestet. Der alternierende Lagenaufbau (hier 6-lagig), bestehend aus dem 300 g/m<sup>2</sup> 0°/90°-Gelege M1 mit Trikot-Bindung und dem 600 g/m<sup>2</sup> schweren ±45°-Gelege M2 mit Franse-Bindung, siehe Abbildung 5.4.

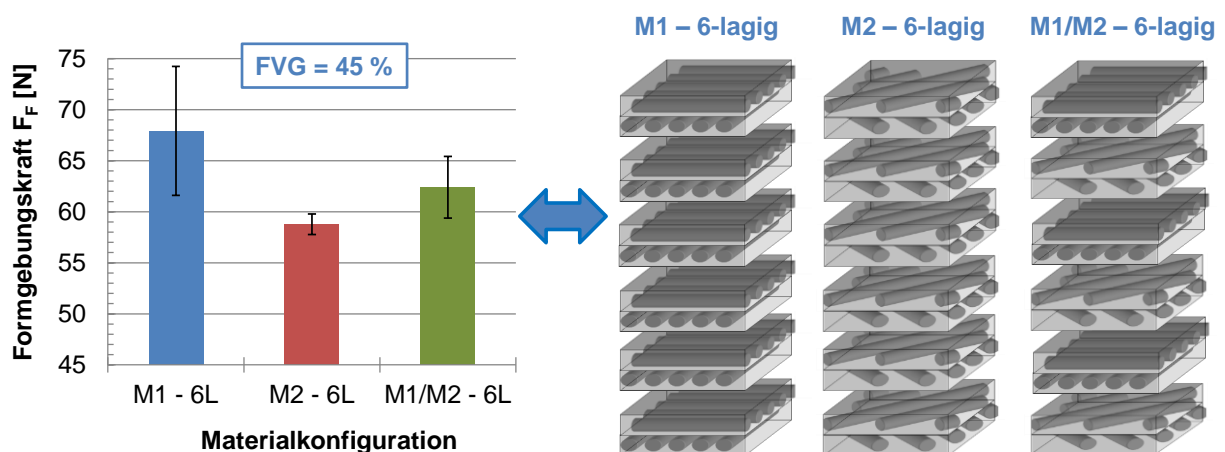


Abbildung 5.4: Vergleich der Formgebungskräfte einer Multi-Materialkombination bestehend aus einem alternierenden Lagenaufbau von M1 und M2 mit den jeweiligen Referenzaufbauten (links); Schematische Darstellung der drei 6-lagigen Lagenaufbauten M1, M2 und M1/M2 (rechts)

Die Ergebnisse zeigen, dass der Lagenaufbau eine erkennbare Auswirkung auf die Formgebungskraft hat. Im Vergleich zu den Formgebungskräften der jeweiligen Referenzaufbauten von M1 (67,9 N ± 6,3 N) und M2 (58,8 N ± 1,0 N) beträgt die Formgebungskraft des M1/M2-Aufbaus 62,4 N ± 3,0 N und befindet sich zwischen den beiden Referenzkräften. Weiterhin bewirkt die Mischung der Bindungsarten im Lagenaufbau (Trikot- und Franse-Bindung) eine Überlagerung der Standardabweichungen. Folglich erzeugt ein Aufbau aus zwei Gelegen eine Überlagerung der Textileigenschaften. Je nach Anteil der jeweiligen Gelegeart im Lagenaufbau

dominieren kraftsenkende bzw. krafterhöhende Materialparameter die resultierende Formgebungskraft.

Hinsichtlich der Prozessparameter wird der **Einfluss der Testgeschwindigkeit** anhand des 600 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Geleges M4 exemplarisch beschrieben. Hierzu wurden bei einem FVG von 45 % die Formgebungskräfte von 3-lagigen Aufbauten bei 1 m/min und 2 m/min miteinander verglichen (siehe Abbildung 5.5).

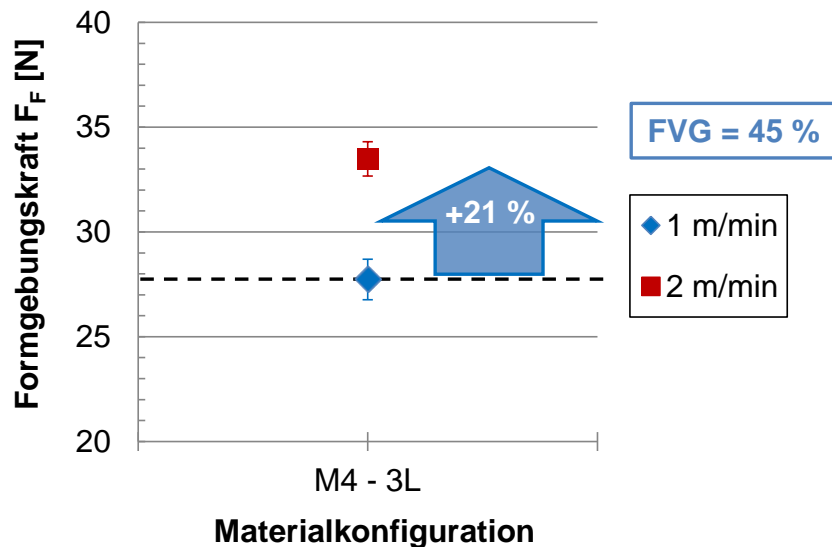


Abbildung 5.5: Einfluss der Testgeschwindigkeit (1 m/min und 2 m/min) auf die kontinuierliche Formgebungskraft zur Erzeugung einer T-Profil-Preform bei einem 3-lagigen Aufbau des  $\pm 45^\circ$ -Geleges M4 mit einem Einzellagenflächengewicht von 600 g/m<sup>2</sup>; FVG = 45 %

Der Vergleich zeigt, dass durch eine Verdopplung der Testgeschwindigkeit eine prozentuale Krafterhöhung von ca. 21 % resultiert. Ursache hierfür ist das viskoelastische Materialverhalten. Somit bestätigen sich die Ergebnisse aus den Einzeluntersuchungen (vgl. Kapitel 4.3.2) im Prozess. Hierbei gilt, je höher die Testgeschwindigkeit ist, desto weniger Zeit haben die Fasern sich umzuorientieren und desto höhere Kompaktierungskräfte werden benötigt. Weitere Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Geschwindigkeit werden in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

Als weiterer dominierender Prozessparameter ist die **Zyklusanzahl** zu nennen. Hinsichtlich des Reibungsverhaltens haben die Untersuchungen aus Kapitel 4.4.2 gezeigt, dass Dauerversuche sich nicht nennenswert (erhöhend/reduzierend) auf die Reibungskraft auswirken. Im Gegensatz hierzu werden Biege- bzw. Kompaktierungskräfte durch Wiederholungsversuche bzw. multiple Kompaktierungszyklen maßgeblich reduziert. Ursache hierfür ist zum einen die „Auflockerung“ der

Faserstruktur inklusive Verwirkungsgarne, wodurch interne Reibungskräfte zwischen den Rovings und den Verwirkungsgarnen sowie zwischen den einzelnen Rovings selbst reduziert werden (Wiederholungsversuche). Zum anderen werden die Verstärkungsfasern umgeformt/vorgeformt, so dass die benötigten Kräfte zur Erreichung eines Ziel-FVG reduziert werden. Es findet demnach eine Homogenisierung des Textilverhaltens statt, welche normalerweise, bedingt durch den bereits durchlaufenen Lebenszyklus (Herstellung, Transport, Handling, etc.) des Geleges, lokal bzw. chargenweise nicht vorliegt.

Zur Überprüfung des Einflusses von Wiederholungszyklen wurden die Proben (Mehrlagenaufbauten) der Biaxial-Gelege viermal hintereinander durch die Formgebungseinheit gezogen. Abbildung 5.6 zeigt deren Einfluss auf die kontinuierliche Formgebungskraft von Mehrlagenpreforms bestehend aus M1 - M4 bei 20 % und 45 % FVG der T-Profil-Preform.

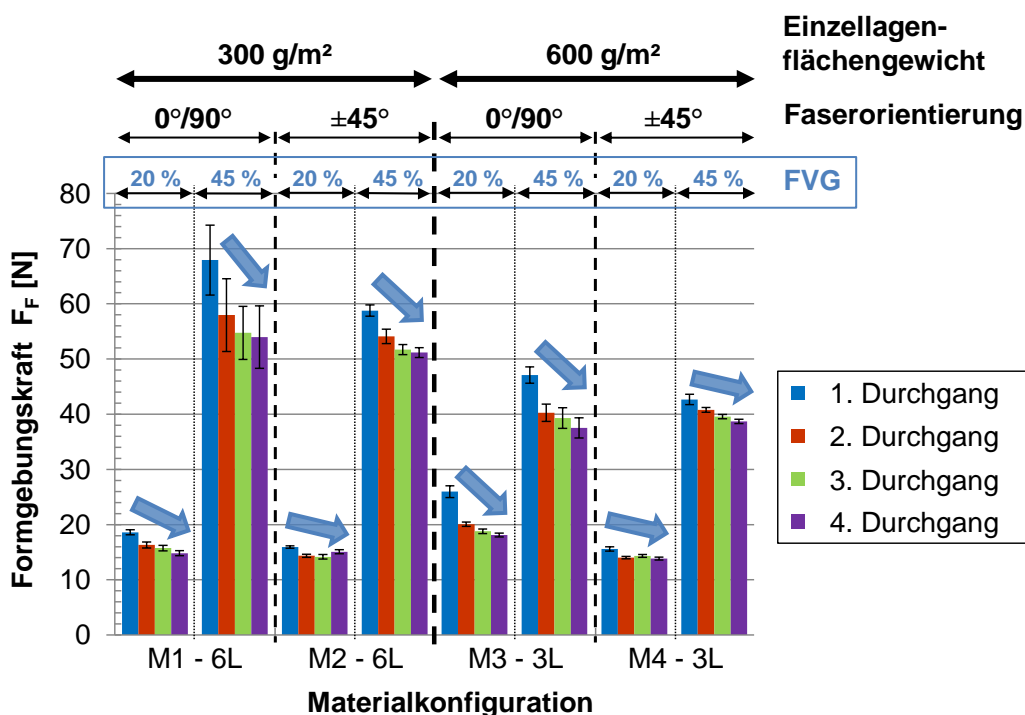


Abbildung 5.6: Einfluss von Wiederholungsversuchen auf die kontinuierlichen Formgebungskräfte von Mehrlagenpreforms bestehend aus den 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelegen M1 bzw. M2 (je 6-lagig) und den 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelegen M3 bzw. M4 (je 3-lagig) bei 20 % und 45 % FVG

Durch Wiederholungszyklen werden für alle vier CF-Gelege mit steigender Zyklusanzahl die jeweiligen Formgebungskräfte reduziert. Die höchste Kraftreduzierung findet zwischen dem ersten und zweiten Zyklus statt. Für das



0°/90°-Gelege M1 ist der Einfluss mit - 14,7 % bei einem FVG von 45 % am höchsten. Mit jedem zusätzlichen Zyklus verringert sich die Kraftabnahme. Die zuvor erzielten Ergebnisse aus den Parameterstudien hinsichtlich des Kompaktierungs- (vgl. Kapitel 4.3.2) und des Biegeverhaltens (vgl. Kapitel 4.5.2) werden demnach ebenfalls im Prozess bestätigt.

Die Ergebnisse aus diesem Unterkapitel zeigen, dass die Erkenntnisse aus den Einzeluntersuchungen auf den kontinuierlichen Formgebungsprozess übertragen werden können, obwohl Überlagerungen mehrerer Effekte auftreten. Die in Kapitel 4.6 deklarierten dominierenden Material- (Bindungsart, Einzellagenflächengewicht) und Prozessparameter (Testgeschwindigkeit, Zyklusanzahl) dominieren demnach auch das kontinuierliche Formgebungsverhalten beim CPPS.

### 5.2.3 Analyse des kontinuierlichen Formgebungsverhaltens

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.2 kann nun eine Aufteilung dominierender Textileigenschaften bzgl. der kontinuierlichen Formgebungskräfte beim CPPS vorgenommen werden. Die Aufteilung gliedert sich in drei Bereiche:

- A = Dominanz Reibungsverhalten - Biegeverhalten
- B = Wechsel der Dominanz von Reibungsverhalten - Biegeverhalten zu Kompaktierungsverhalten
- C = Dominanz Kompaktierungsverhalten

Abbildung 5.7 zeigt die drei Bereiche bzgl. der dominierenden Textileigenschaften (A, B und C) anhand der Gegenüberstellung von den 0°/90°-Gelegen (M1 vs. M3) und den ±45°-Gelegen (M2 vs. M4) bei den getesteten FVG (20 % - 50 %).

Bei einem FVG von 20 % (unkompaktierter Zustand) erzeugt der Lagenaufbau mit M3 aufgrund der Faserorientierung (0°/90°), des hohen Einzellagenflächengewichts (600 g/m<sup>2</sup>) und dem höchsten Verwirkungsgarnanteil die höchste Biegekraft und folglich mit 26 N eine höhere Formgebungskraft als M1 (Dominanz Biegeverhalten, Bereich A). Dahingegen ist bei einem FVG von 45 % das Kompaktierungsverhalten der Gelege dominant (Bereich C), wobei für M3 im Gegensatz zu M1 eine niedrigere Formgebungskraft von - 31 % benötigt wird. Demnach findet in einem bestimmten FVG-Bereich (> 20 % bis < 45 %, Bereich B) ein Wechsel der Dominanz des Biegeverhaltens - Reibungsverhaltens zum Kompaktierungsverhalten statt.

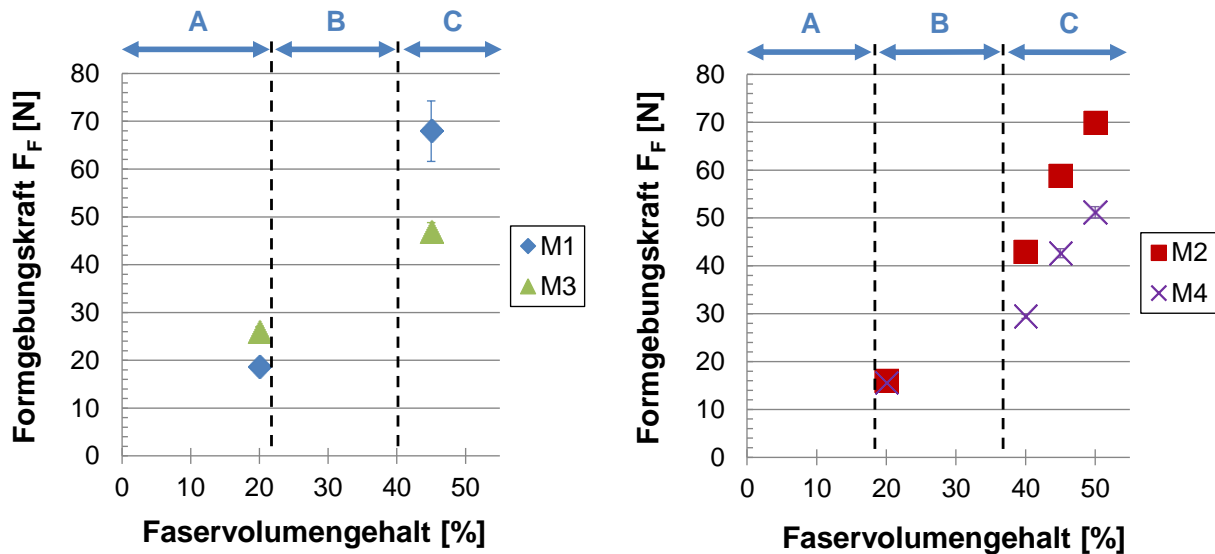


Abbildung 5.7: Gegenüberstellung der  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege M1 und M3 (links) sowie der  $\pm 45^\circ$ -Gelege M2 und M4 (rechts) über den FVG-Bereich 20 % - 50 %; Bereiche dominierender Textileigenschaften: Dominanz Reibungsverhalten - Biegeverhalten (A), Wechsel der Dominanz vom Reibungsverhalten - Biegeverhalten zum Kompaktierungsverhalten (B) und Dominanz Kompaktierungsverhalten (C)

Bei der Gegenüberstellung der  $\pm 45^\circ$ -Gelege (M2, M4) ist ebenfalls ein Wechsel der Dominanz der Textileigenschaften zu erkennen. Beide Lagenaufbauten erzeugen bei einem FVG von 20 % zunächst identische Formgebungskräfte: 15,9 N bei M2 und 15,6 N bei M4 (Dominanz Reibungsverhalten - Biegeverhalten). Bei einem FVG von 40 % ist die Formgebungskraft für den Lagenaufbau mit dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren M2 bereits um 46 % höher als für M4 (600 g/m<sup>2</sup> Einzellagenflächengewicht). Mit zunehmender Steigerung des finalen Kompaktierungszustandes der Preform (FVG = 50 %) bleibt die Dominanz des Kompaktierungsverhaltens erhalten. Daraus lässt sich schließen, dass auch hier zwischen 20 % - 40 % FVG (Bereich B) ein Wechsel der Dominanz der drei Textileigenschaften stattfindet.

Für die gezielte Beeinflussung des textilen Formgebungsverhaltens durch die Anwendung der Richtlinien ist es notwendig, die Formgebungskräfte von M1 - M4 in einzelne Kraftanteile hinsichtlich Kompaktierung, Reibung und Biegung bei einem definierten FVG aufzuteilen. Dadurch können dominierende Textileigenschaften identifiziert und anschließend durch eine prozessorientierte Materialauswahl oder durch eine Prozessmodifikation gesteuert werden. Allerdings können die Kraftanteile von Kompaktierung, Reibung und Biegung nur näherungsweise für die Lagenaufbauten von M1 - M4 bei einem bestimmten FVG (hier 45 %) berechnet

werden, da Biege- und Kompaktierungskräfte stets Reibungskraftanteile enthalten. Die berechneten Werte sind demnach nicht als absolut zu betrachten, vermitteln aber einen sehr guten Eindruck über die Aufteilung der Kraftanteile bei der kontinuierlichen Formgebung zu einer T-Profil-Preform.

Zur Ermittlung der **Reibungskraftanteile** wurden separate Reibungsversuche mit 2000 mm \* 400 mm großen Probestreifen durchgeführt (vgl. Abbildung 8.17 im Anhang). Durch diese Versuche konnten Richtwerte für die Reibungskräfte ohne Biegekraft- und Kompaktierungskraftanteile ermittelt werden.

Zur Bestimmung der **Biegekraftanteile** werden die Ergebnisse der kontinuierlichen Formgebungskräfte für den unkompaktierten Zustand (20 % FVG) verwendet. Die gemessenen Formgebungskräfte resultieren hierbei aus Reibungs- und Biegekräften (Biegekraft beinhaltet zusätzlich textilinterne Reibung) ohne Kraftanteile für Kompaktierung. Werden die Formgebungskräfte bei 20 % FVG mit den Reibungskräften (ohne Biegung) subtrahiert, resultieren die Biegekraftanteile.

Die **Kompaktierungskraftanteile** können aus den kontinuierlichen Formgebungskräften bei einem FVG von 45 % berechnet werden. Hierzu werden die Formgebungskräfte bei 20 % FVG (nur Reibungs- und Biegekräfte) von den Formgebungskräften bei 45 % FVG subtrahiert. Allerdings beinhalten diese höhere Reibungskraftanteile am Ende der Formgebungseinheit. Jedoch wird an dieser Stelle, aufgrund der geringen Fläche mit erhöhten Reibungskräften, die Reibungskraft als konstant angenommen.

Abbildung 5.8 zeigt eine Übersicht der absoluten (links) und prozentualen (rechts) Kraftanteile von Kompaktierung, Reibung und Biegung der einzelnen Lagenaufbauten (M1 - M4) an der kontinuierlichen Formgebungskraft bei einem FVG von 45 %.

Die prozentualen Reibungskraftanteile der Lagenaufbauten aus M1 - M4 betragen zwischen 12,4 - 14,5 % und sind somit, unabhängig vom Einzellagenflächengewicht, die geringsten.

Für die Biegekraftanteile ist eine deutliche Auswirkung des Einzellagenflächengewichts zu erkennen. Wie hoch die jeweiligen Anteile sind, hängt jedoch von den Materialparametern ab. Beispielsweise besitzt das 600 g/m<sup>2</sup> schwere 0/90°-Gelege M3 mit 42,6 % den größten Biegekraftanteil. Dagegen verdeutlicht der niedrige Biegekraftanteil des 600 g/m<sup>2</sup> schweren ±45°-Geleges M4 mit 22,7 % die guten

Biegeeigenschaften trotz des hohen Einzellagenflächengewichts. Für das 300 g/m<sup>2</sup> schwere ±45°-Gelege M2 ist der prozentuale Biegekraftanteil mit 12,6 % am geringsten.

Der Kompaktierungskraftanteil des Lagenaufbaus mit dem 600 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M3 ist im Vergleich zu den anderen Gelegen mit 44,6 % der geringste, was auf die guten Kompaktierungseigenschaften der 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege zurückzuführen ist. Für den Lagenaufbau des 600 g/m<sup>2</sup> schweren ±45°-Geleges M4 ist der Hauptanteil der Formgebungskraft mit 63,5 % der Kompaktierungskraft zugeordnet, was jedoch im Absolutwert (27,1 N) immer noch sehr gering ist. Die hohen Formgebungskräfte der 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M1 bzw. M2 entstehen ebenfalls primär durch Kompaktierung (ca. 73 %), allerdings sind die Absolutwerte mit 49,3 N bzw. 42,8 N bedeutend höher.

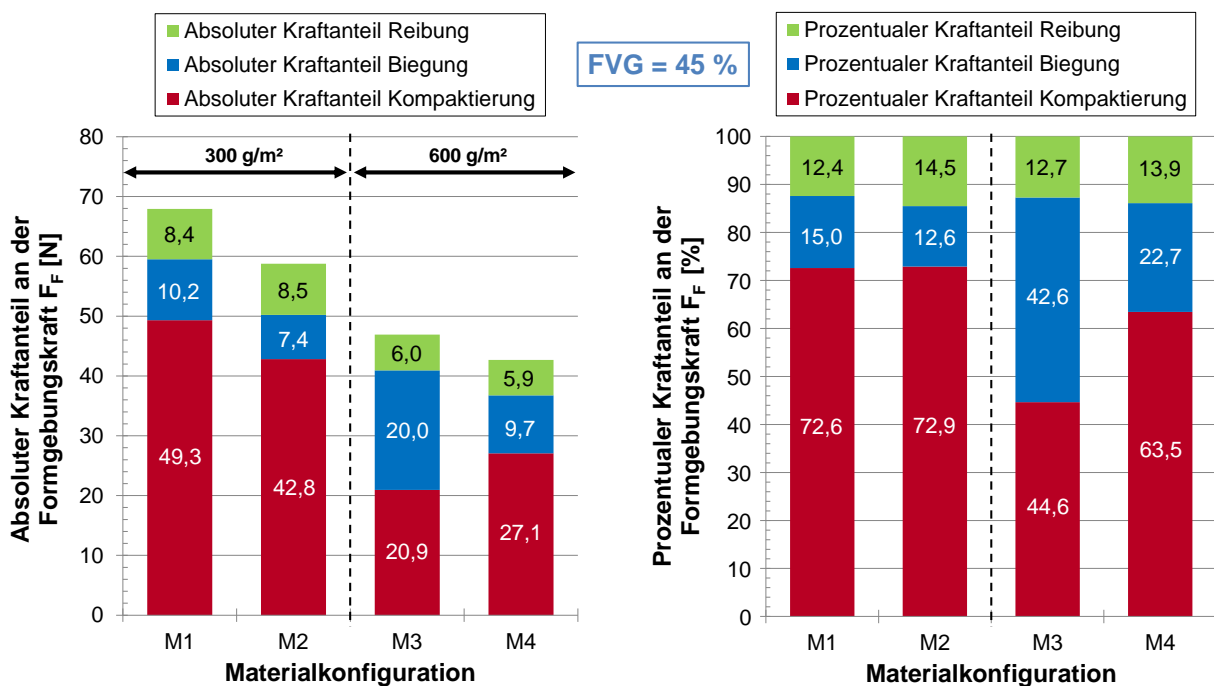


Abbildung 5.8: Übersicht der absoluten (links) und prozentualen (rechts) Kraftanteile von Kompaktierung, Reibung und Biegung an der kontinuierlichen Formgebungskraft zur Erzeugung einer T-Profil-Preform mit den Gelegen M1 - M4 bei einem FVG von 45 %

Ein Vergleich zwischen den ±45°-Gelegen M2 (6-lagig) und M4 (3-lagig) soll exemplarisch zeigen, wie sich der Einfluss des Einzellagenflächengewichts auf die prozentualen Kraftanteile (Kompaktierung, Reibung und Biegung) zur Erzeugung

einer kontinuierlich geformten T-Profil-Preform bei unterschiedlichen FVG (20 %, 40 %, 45 % oder 50 %) auswirkt (siehe Abbildung 5.9).

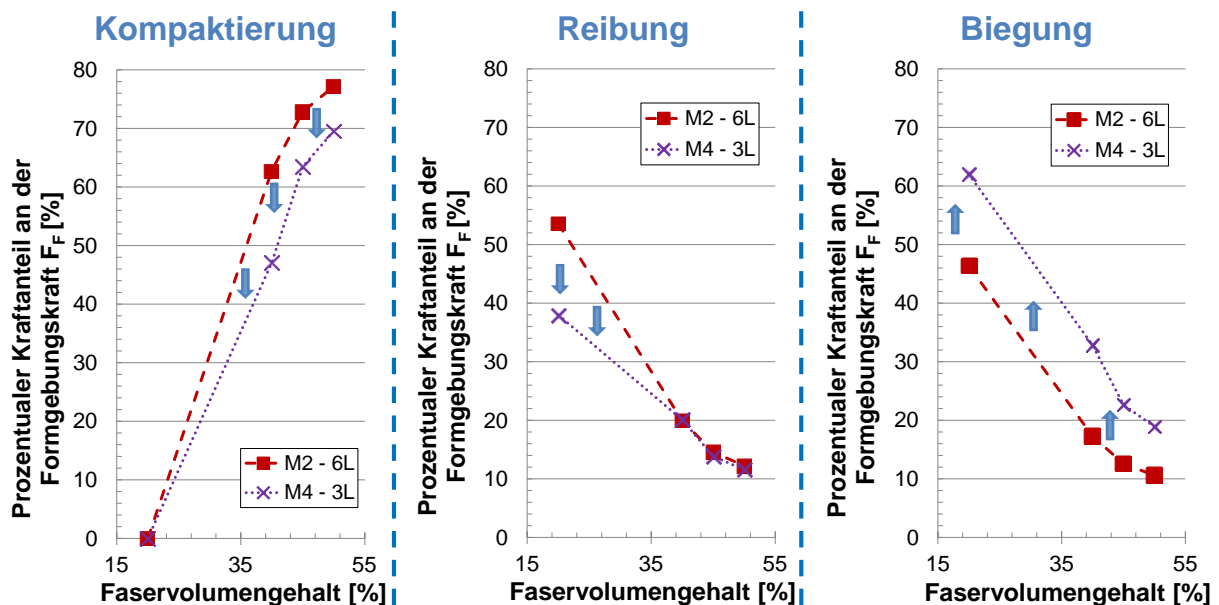


Abbildung 5.9: Einfluss des Einzellagenflächengewichts auf die prozentualen Kraftanteile von Kompaktierung, Reibung und Biegung der  $\pm 45^\circ$ -Gelege M2 (300 g/m<sup>2</sup>, 6-lagig) und M4 (600 g/m<sup>2</sup>, 3-lagig) zur Erzeugung einer kontinuierlich geformten T-Profil-Preform mit definiertem FVG (20 %, 40 %, 45 % oder 50 %)

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich durch die Verdopplung des Einzellagenflächengewichts die prozentualen Reibungs- und Kompaktierungskraftanteile verringern und die Biegekraftanteile erhöhen. Beispielsweise entspricht, bei einem angestrebten FVG von 45 % der T-Profil-Preform, die Verdopplung des Einzellagenflächengewichts (M4 anstatt M2) einer Abnahme des Kompaktierungskraftanteils um ca. 9 Prozentpunkte, wobei der Biegekraftanteil um ca. 10 Prozentpunkte zunimmt. Ähnliche Trends konnten auch bei der Gegenüberstellung der  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege Preforms (M1 vs. M3) beobachtet werden.

Bei der Übertragung der Erkenntnisse auf den kontinuierlichen Formgebungsprozess des CPPS konnte gezeigt werden, dass sich die einzelnen Textileigenschaften und deren Auswirkungen auf den Formgebungsprozess überlagern. Weiterhin wurden die Ergebnisse aus den separaten Parameterstudien im Prozess bestätigt. Dies gilt auch für die zuvor identifizierten dominierenden Material- und Prozessparameter. Wie die einzelnen dominierenden Materialparameter (Bindungsart und Einzellagenflächengewicht) bzw. dominierenden Prozessparameter (Prozessgeschwindigkeit und Zykluszahl) bei einer Steigerung (+) die jeweiligen prozentualen Kraftanteile

(Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegekraft) beeinflussen, wird zusammenfassend in Abbildung 5.10 dargestellt (qualitativ). Die Summe der einzelnen prozentualen Kraftanteile bei einem beliebigen FVG beträgt hierbei immer 100 %. Zusätzlich ist die Auswirkung (steigernd ↑, neutral ● oder senkend ↓) der Material- und Prozessparameter auf die Kraftanteile anhand der Ausrichtung der Pfeile abgebildet, wobei die Stärke der Pfeile das Ausmaß der Auswirkung darstellt.

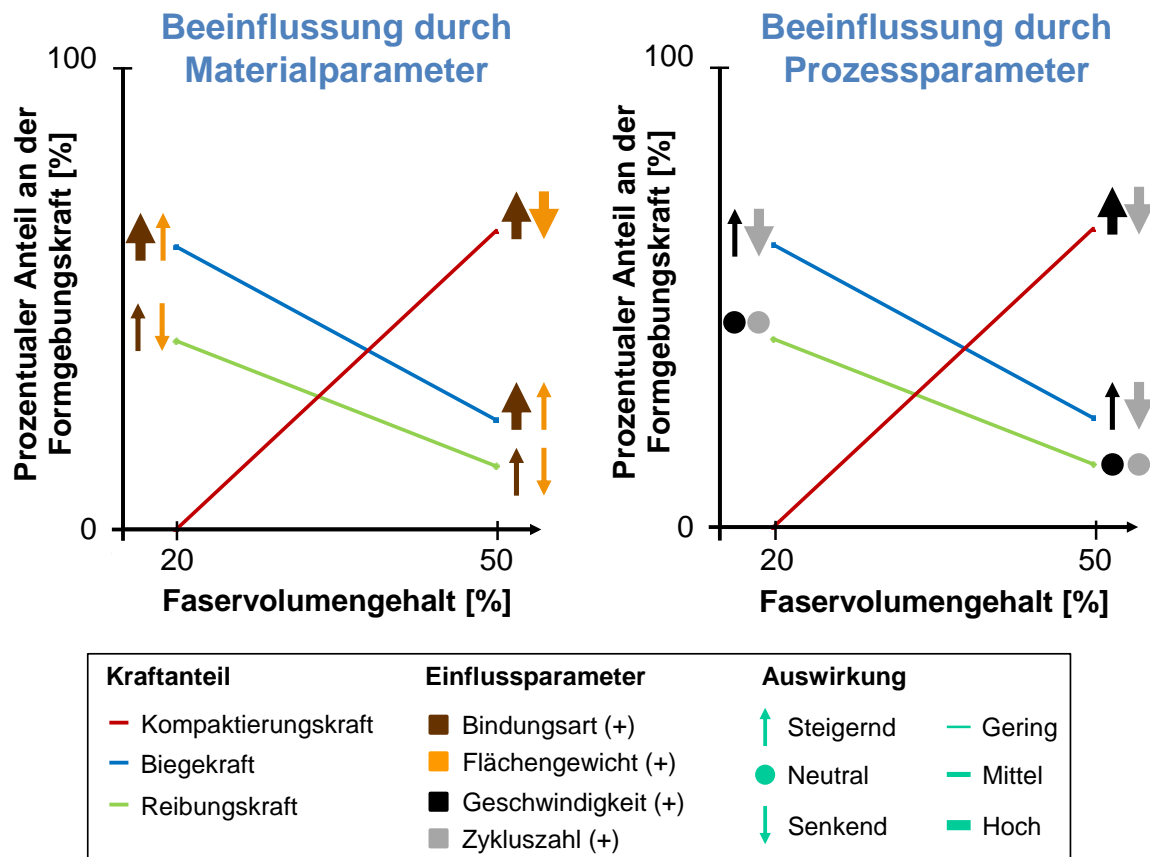


Abbildung 5.10: Qualitative Aufteilung der prozentualen Kraftanteile von Reibung, Biegung und Kompaktierung an der kontinuierlichen Formgebungskraft zur Erzeugung einer T-Profil-Preform im untersuchten FVG-Bereich (20 % - 50 % FVG) inklusive der Einflüsse von Materialparametern (Einzellagenflächengewicht, Bindungsart<sup>52</sup>) und Prozessparametern (Prozessgeschwindigkeit, Zykluszahl), wenn diese gesteigert (+) werden

Abschätzungen relativer Änderungen auf die resultierende Formgebungskraft sind nun möglich, da dominante Textileigenschaften unterschiedlichen FVG-Bereichen zugeordnet sind. Somit ist die Grundlage für eine prozessorientierte Materialauswahl bzw. Prozessmodifikationen geschaffen.

<sup>52</sup> Hinsichtlich der Bindungsart wird unter einer Steigerung dieses Parameters verstanden, dass der Verwirkungsgarnanteil im Gelege erhöht wird.

Im folgenden Kapitel wird gezeigt, wie die Formgebungskräfte zur Herstellung von Profil-Preforms mit einem FVG > 45% durch eine prozessorientierte Materialauswahl und durch eine Prozessmodifikation optimiert/gesenkt werden können.

### 5.3 Anwendung der entwickelten Richtlinien

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit der entwickelten Richtlinien material- und prozesseitig geprüft. Bei ersterem erfolgt eine prozessorientierte Materialauswahl, indem dominierende Materialparameter gezielt variiert werden. Prozesseitig wird eine Prozessmodifikation durchgeführt und validiert. In beiden Fällen soll die benötigte Formgebungskraft reduziert werden, wodurch der entwickelte Preforming Prozess stabiler und effizienter wird ohne dass die Qualität der Preforms (z. B. Gelegebeschädigung) sich reduziert.

Bei der Anwendung der entwickelten Richtlinien werden zwei neue CF-Gelege verwendet. Die Materialeigenschaften dieser sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Tabelle 5.2: Materialeigenschaften der für die Anwendung der Richtlinien verwendeten CF-Gelege

Materialbezeichnung	Herstellerbezeichnung	Faserart/-typ	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Bindungsart	Nähfeinheit [1/']	Faserorientierung [°]
M6	SAERTEX/S37CB500	CF/STS40	404	Hybrid <sup>1</sup>	5	0°/90°
M7	SAERTEX/V106585	CF/STS40	404	Franse <sup>1</sup>	5	±45°

<sup>1</sup>Verwirkungsgarn: Polyethersulfon (PES), 4 g/m<sup>2</sup>.

Für die folgenden Untersuchungen werden die 400 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M6 sowie M7 4-lagig zu T-Profil-Preforms geformt, wodurch sich ein jeweiliges Gesamtflächengewicht von 1616 g/m<sup>2</sup> ergibt.

#### 5.3.1 Anwendung der entwickelten Richtlinien durch Variation von Materialparameter

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 und 5.2 haben gezeigt, dass Unterschiede bzgl. der Materialparameter das textile Formgebungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Als dominierende Materialparameter haben sich das Einzellagenflächengewicht sowie die Bindungsart herauskristallisiert. Hinsichtlich einer **prozessorientierten**

**Materialauswahl** werden diese nun gezielt variiert, damit die Formgebungskräfte reduziert werden können und auch bei höheren Ziel-FVG der Preforms oder höheren Prozessgeschwindigkeiten eine endkonturnahe Preformqualität zu erhalten. Hinsichtlich der endkonturnahen Preformqualität sollen demnach Gelegeschädigungen, Verzug der Gelege, Geometrieungenauigkeiten der Preforms und fehlerhafte Stichbilder aufgrund zu hoher äußerer Kräfte vermieden werden. Die Faserorientierung im Lagenaufbau sowie der final eingestellte FVG der T-Profil-Preform von 45 % bleiben im Vergleich zum Referenzaufbau mit dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M1 (6-lagig) unverändert.

Durch die Einstellung eines FVG von 45 % ist das Kompaktierungsverhalten die dominante Textileigenschaft, welche die kontinuierliche Formgebungskraft beeinflusst. Materialeitig ist es daher zweckmäßig, Gelege mit gesteigertem **Einzellagenflächengewicht** zu verwenden um Kompaktierungskräfte zu reduzieren. Das Einzellagenflächengewicht wird allerdings nur geringfügig von ca. 300 g/m<sup>2</sup> auf ca. 400 g/m<sup>2</sup> erhöht, da das Biegeverhalten bei einer zu großen Steigerung des Einzellagenflächengewichts stark negativ (Erhöhung der Biegekräfte) beeinflusst wird. Hinsichtlich des Reibungsverhaltens wird keine Auswirkung aufgrund der Veränderung des Einzellagenflächengewichts erwartet.

Der zweite dominierende Materialparameter, die **Bindungsart**, beeinflusst alle drei Textileigenschaften. Beim Reibungsverhalten sind die Zusammenhänge etwas komplexer, sodass konfigurationsspezifisch entschieden werden sollte. Allerdings werden hinsichtlich des Biege- und Kompaktierungsverhaltens Franse- oder Hybrid-Bindungen gegenüber Trikot-Bindungen bevorzugt. Darüber hinaus sind geringe Verwirkungsgarnanteile vorteilhaft, da Verwirkungsgarne generell als Störfaktoren fungieren. Aus diesen Gründen wird ein Gelege mit Hybrid-Bindung anstatt einer Trikot-Bindung und geringerem Verwirkungsgarnanteil als M1 angestrebt. Für die prozessorientierte Materialauswahl wurde daher das 400 g/m<sup>2</sup> schwere 0°/90°-Gelege M6 ausgewählt (vgl. Tabelle 5.2).

Da sich das Gesamtflächengewicht des 4-lagigen Lagenaufbaus von M6 mit ca. 1616 g/m<sup>2</sup> von dem 6-lagigen Referenzlagenaufbau M1 mit 1776 g/m<sup>2</sup> unterscheidet, wird die kontinuierliche Formgebungskraft im Folgenden auf das Gesamtflächengewicht des jeweiligen Lagenaufbaus bezogen. Abbildung 5.11 zeigt die



Vorgehensweise bei der prozessorientierten Materialauswahl (links) sowie die Gegenüberstellung der resultierenden Formgebungskräfte zwischen dem Referenzaufbau mit M1 und dem optimierten Aufbau mit M6 bei einer Prozessgeschwindigkeit von 1 m/min.

### Prozessorientierte Materialauswahl

FVG = 45 % → Dominanz Kompaktierung

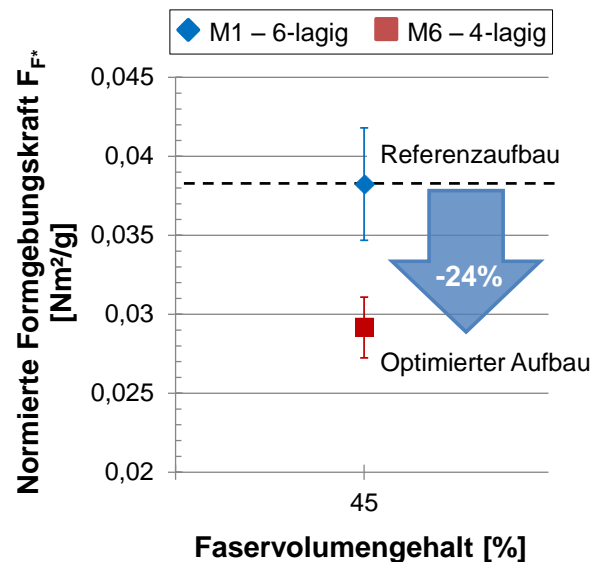
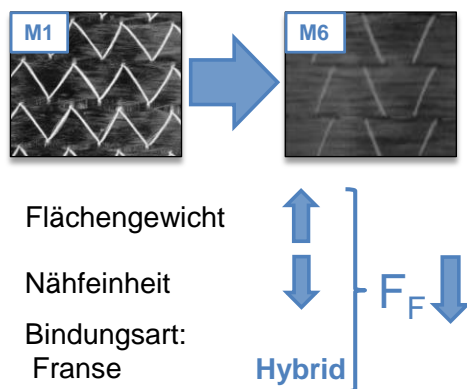


Abbildung 5.11: Beispiel einer prozessorientierten Materialauswahl zur Reduzierung der Formgebungskräfte zur Herstellung einer T-Profil-Preform bei 45 % FVG (links); Normierte (flächengewichtsbezogene) Formgebungskräfte der 0°/90°-Gelege M1 (6-lagig) und M6 (4-lagig)

Das Ergebnis zeigt, dass das dominierende Kompaktierungsverhalten durch eine gezielte Variation der Materialparameter gesteuert werden kann. Bei der kontinuierlichen Formgebung einer T-Profil-Preform mit einem FVG von 45 % benötigt der Lagenaufbau mit M6 ca. 24 % geringere Formgebungskräfte als der Referenzaufbau bestehend aus M1. Zusätzlich sind die Standardabweichungen vom modifizierten Lagenaufbau mit M6 um ca. 46 % geringer, wodurch der Formgebungsprozess robuster ist.

Durch die Reduzierung der Formgebungskräfte besteht nun die Möglichkeit den FVG der herzustellenden Profil-Preform zu steigern oder die Prozessgeschwindigkeit bei der Herstellung einer T-Profil-Preform bestehend aus M6 zu erhöhen. Hierbei kann der FVG oder die Prozessgeschwindigkeit so lange gesteigert werden bis der ursprüngliche Kraftlevel des Referenzaufbaus, bis zu welchem keine Veränderung der endkonturnahen Preformqualität auftritt, erreicht ist.

Insgesamt betrachtet verhält sich M6 den Ergebnissen aus Kapitel 4 und 5.2 entsprechend, womit die Anwendbarkeit der entwickelten Richtlinien durch eine prozessorientierte Materialauswahl bewiesen ist.

### 5.3.2 Anwendung der entwickelten Richtlinien durch eine Prozessmodifikation

Der wesentliche Vorteil einer **Prozessmodifikation** besteht darin, dass die mechanischen Eigenschaften des herzustellenden Bauteils nicht geändert werden, da weder die zu verwendeten textilen Halbzeuge noch der Lagenaufbau variieren. Die Ergebnisse aus den Parameterstudien haben gezeigt, dass auch durch die Variation von Prozessparametern die Textileigenschaften maßgeblich beeinflusst werden können. Als dominierender Prozessparameter hat sich hierbei unter anderem die Zykluszahl herauskristallisiert.

Durch **multiple Kompaktierungszyklen** bzw. **Wiederholungszyklen** konnte bei den Parameterstudien bzgl. Kompaktierung (vgl. Kapitel 4.3.2) bzw. Biegung (vgl. Kapitel 4.5.2) gezeigt werden, dass die jeweiligen Kraftanteile zur Erreichung eines angestrebten FVG bzw. zur Einstellung eines Biegewinkels maßgeblich reduziert werden können. Die Ursache hierfür ist die Vorformung bzw. Auflockerung der Faserstruktur inklusive Verwirkungsgarne, wodurch Ziel-FVG leichter erreicht werden bzw. sich die Reibungskräfte innerhalb der Gelege (Roving-Roving und Roving-Verwirkungsgarn) verringern. Bei der Übertragung der Erkenntnisse auf die kontinuierliche Formgebung (vgl. Kapitel 5.2.2) konnten die Ergebnisse hinsichtlich des Biegeverhaltens durch Wiederholungsversuche mit der gleichen Probe näherungsweise bestätigt werden. Im Anwendungsfall würden die Gelege jedoch nicht mehrmals durch eine Preforminganlage geführt werden, da der Zeitaufwand zu groß ist. Durch eine Vorkompaktierungseinheit zwischen Materialzuführungs- und Formgebungseinheit kann jedoch, ohne dass mehr Zeit für den Formgebungsprozess benötigt wird, der Effekt der Vorformung der Faserstruktur ausgenutzt werden um die Kompaktierungs- und Biegekräfte und folglich die Formgebungskräfte zu reduzieren.

Aufgrund der zuvor genannten Erkenntnisse ist eine **Vorkompaktierungseinheit** in das vorhandene Messsystem zur Untersuchung der kontinuierlichen Formgebungskräfte integriert worden. Die Vorkompaktierungseinheit (aufgebaut auf

Aluminiumprofilen) besteht aus drei gegenüberliegenden Walzenpaaren<sup>53</sup> (Länge 785 mm,  $\varnothing = 70 \pm 0,05$  mm), einem Elektromotor (6SM47L-3000, Seidel) für den Antrieb der unteren Walzen sowie einer Materialablage (800 mm \* 2200 mm)<sup>54</sup>. Abbildung 5.12 zeigt das erweiterte Messsystem zur Ermittlung der kontinuierlichen Formgebungskräfte inklusive eines Detailausschnittes der Walzenpaare.

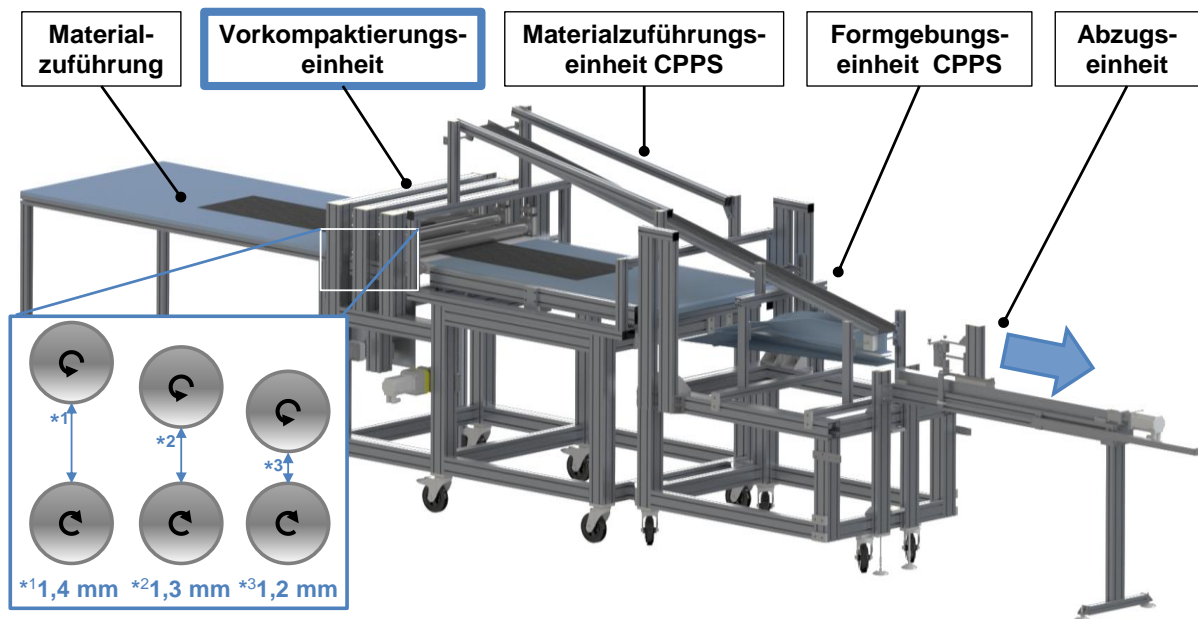


Abbildung 5.12: Messsystem zur Ermittlung der kontinuierlichen Formgebungskraft mit vorgeschalteter Vorkompaktierungseinheit und Detailausschnitt der drei Walzenpaare

Die Walzenpaare sind im festen Abstand von 175 mm hintereinander positioniert und vertikal beweglich gelagert, so dass eine stufenlose Einstellung des Spaltabstandes möglich ist. Dies ermöglicht die spezifische Einstellung verschiedener Vorkompaktierungszustände. Für die anschließenden Untersuchungen wurden die Spaltabstände distanzreduzierend von 1,4 mm (erstes Walzenpaar) über 1,3 mm (zweites Walzenpaar) auf 1,2 mm (drittes Walzenpaar) eingestellt<sup>55</sup>.

<sup>53</sup> Die Anzahl der Walzenpaare wurde anhand der Kompaktierungsversuche aus Kapitel 4.3.2 festgelegt. Die Versuche zeigten, dass nach 3 Kompaktierungszyklen bereits bis zu 74 % (M1 - 6L) bzw. 83 % (M3 - 3L) geringere Kompaktierungskräfte benötigt werden, um einen angestrebten Ziel-FVG (hier 45 %) zu erreichen und sich weitere Zyklen nur geringfügig auswirken.

<sup>54</sup> Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.2 wurde die Vorkompaktierungseinheit an den Anfang der Anlage und nicht zwischen Materialzuführungs- und Formgebungseinheit des CPPS positioniert.

<sup>55</sup> Die Abstufung der Walzenpaare wurde auf Basis der Kompaktierungsuntersuchungen (Werkzeugabstand nach multiplen Kompaktierungszyklen bei einer Maximalkraft von 20 kN) an der Universalprüfmaschine und der Biegesteifigkeiten der Walzenpaare festgelegt. Bezüglich der Biegesteifigkeiten der Walzenpaare wird eine Durchbiegung von  $< 0,04$  mm (Abstand der Walzen 1,2 mm) als vertretbar hinsichtlich des Einflusses auf den angestrebten FVG der Preform angesehen.

Der Testablauf mit vorgeschalteter Vorkompaktierungseinheit entspricht nahezu dem Ablauf zur Bestimmung der kontinuierlichen Formgebungskräfte aus Kapitel 5.1. Er unterscheidet sich lediglich darin, dass die Grundmaterialien zuerst durch die angetriebenen Walzenpaare geleitet werden, bevor diese direkt bis zur Klemmvorrichtung der Abzugseinheit weitergeleitet werden. Auch die Decklagen werden durch die Vorkompaktierungseinheit geführt, bevor sie auf der Rutsche positioniert werden.

Der Einfluss von multiplen Vorkompaktierungszyklen wird zuerst am Beispiel des  $0^\circ/90^\circ$ -Geleges M3 (3-lagig, Einzellagenflächengewicht ca.  $600 \text{ g/m}^2$ ) demonstriert. Abbildung 5.13 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung der Formgebungskräfte mit und ohne vorgeschaltete Vorkompaktierungseinheit, welche zur Herstellung einer Profil-Preform mit 45 % FVG bei einer Prozessgeschwindigkeit von 1 m/min benötigt werden.

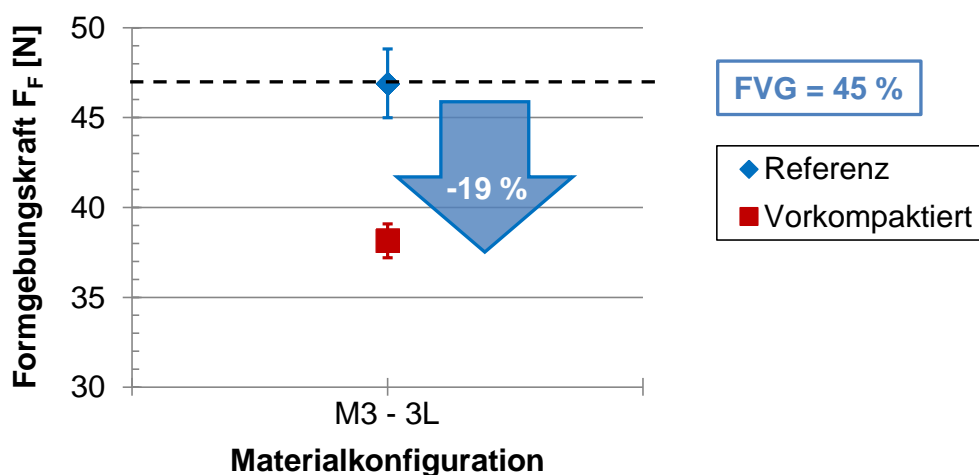


Abbildung 5.13: Einfluss von multiplen Vorkompaktierungszyklen (3 Stück) auf die kontinuierliche Formgebungskraft zur Erzeugung einer T-Profil-Preform bei einem 3-lagigen Aufbau des  $0^\circ/90^\circ$ -Geleges M3 mit einem Einzellagenflächengewicht von ca.  $600 \text{ g/m}^2$ ; FVG = 45 %

Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Prozessmodifikation die resultierende Formgebungskraft reduziert wird. Die Applizierung von drei Vorkompaktierungszyklen bewirkt hierbei eine Reduktion der kontinuierlichen Formgebungskräfte von  $46,9 \pm 1,9 \text{ N}$  auf  $38,1 \pm 0,9 \text{ N}$ . Weiterhin ist eine Senkung der Standardabweichung zu erkennen. Beides zusammen bewirkt eine Steigerung der Prozessrobustheit, da sich die Reibungskräfte an den Materialfördereinheiten reduzieren und auf die zu verarbeitenden Gelege eine konstante Kraftbelastung während des kontinuierlichen

Preformings wirkt. Demzufolge besteht auch bei der Anwendung der entwickelten Richtlinien durch eine Prozessmodifikation die Möglichkeit höhere FVG der Profil-Preforms einzustellen oder die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen, ohne dass die endkonturnahe Preformqualität beeinträchtigt wird.

Im Folgenden wird daher untersucht, inwieweit die Ergebnisse transferiert werden können und ob eine Effizienzsteigerung durch den Einsatz einer Vorkompaktierungseinheit möglich ist. Hierzu wird zunächst der zuvor beschriebene Versuch mit dem 400 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Gelege M7 (4-lagig) bei verschiedenen FVG durchgeführt. Abbildung 5.14 zeigt die Formgebungskräfte bei unterschiedlichen FVG (20 %, 45 % und 50 %) der T-Profil-Preform mit und ohne Vorkompaktierungseinheit. Die Prozessgeschwindigkeit betrug 1 m/min.

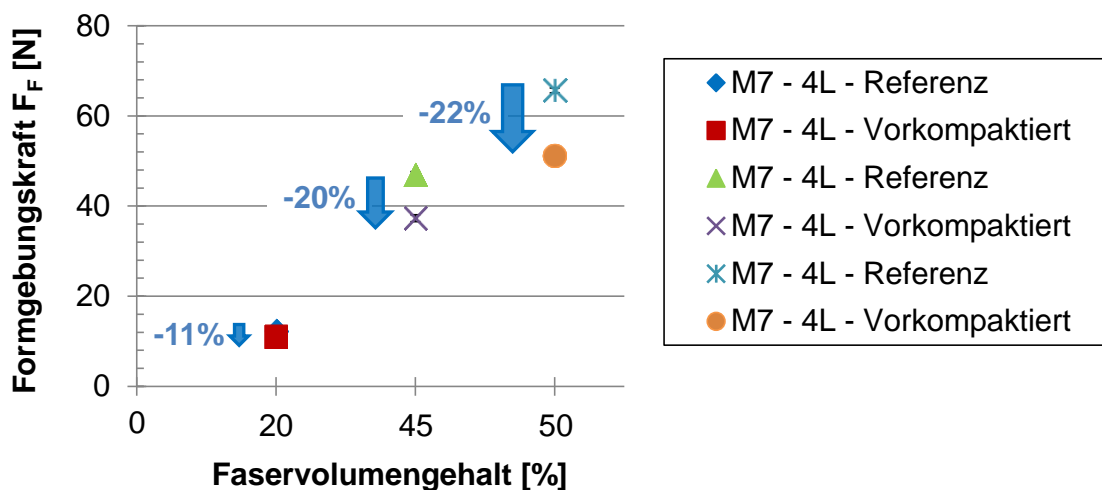


Abbildung 5.14: Einfluss von multiplen Vorkompaktierungszyklen (3 Stück) auf die kontinuierliche Formgebungskraft des 400 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Geleges M7 (4-lagig) bei 20 %, 45 % und 50 % FVG mit einer Prozessgeschwindigkeit von 1 m/min

Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei diesem Gelege eine Reduzierung der Formgebungskräfte bis zu 22 % durch drei Vorkompaktierungszyklen erreicht wird, obwohl im Vergleich zum  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege M3 die Bindungsart, das Flächengewicht und die Faserorientierung variieren. Somit sind die Ergebnisse auf andere textile Halbzeuge (hier CF-Gelege) übertragbar. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass sich der Effekt von Vorkompaktierungszyklen mit Zunahme des Ziel-FVG der herzustellenden T-Profil-Preform verstärkt.

Zur Überprüfung der Effizienzsteigerung wird die Prozessgeschwindigkeit von bereits vorkompaktierten Lagenaufbauten erhöht, bis die Formgebungskraft der Referenz (M7 - 4L ohne Vorkompaktierungszyklen bei 1 m/min) erreicht wird. Der eingestellte

Ziel-FVG der T-Profil-Preform beträgt 50 %. Abbildung 5.15 zeigt hierzu den Einfluss von Vorkompaktierungszyklen bei 1 m/min sowie die Entwicklung der Formgebungskräfte vorkompaktierter Lagenaufbauten von M7 bei einer Steigerung der Prozessgeschwindigkeit von 1 m/min auf 2 m/min bzw. 4 m/min.

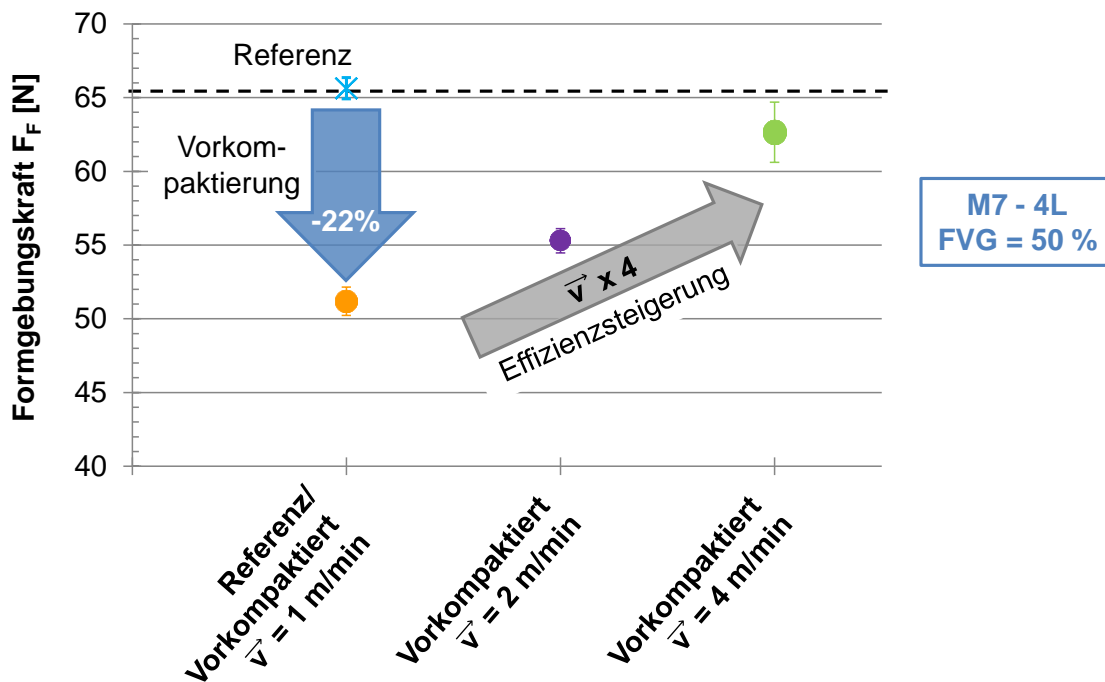


Abbildung 5.15: Einfluss von multiplen Vorkompaktierungszyklen (3 Stück) auf die kontinuierliche Formgebungskraft des 400 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Geleges M7 (4-lagig) mit unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten von 1, 2 und 4 m/min bei einem FVG von 50 %

Im Vergleich zum Referenzaufbau (M7, 4-lagig, ohne Vorkompaktierungszyklen) kann die Prozessgeschwindigkeit um das 4-fache erhöht werden, wenn der Lagenaufbau zuvor durch die Vorkompaktierungseinheit gefördert wird.

Die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 zeigen, dass die entwickelten Richtlinien für eine prozessorientierte Materialauswahl sowie für Prozessmodifikationen genutzt werden können. Wichtig bei der Anwendung ist jedoch, dass der zu optimierende Preforming Prozess ausreichend bekannt ist, sodass gezielt dominierende Textileigenschaften beeinflusst werden können.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt der Arbeit war die Entwicklung eines neuen Preforming Systems, welches in der Lage ist, textile Halbzeuge kontinuierlich zu Profil-Preforms zu formen und zu fixieren. Im Vergleich zu bereits existierenden kontinuierlichen Preforming Systemen wurde dabei erstmalig zur Fixierung die Nähetechnik anstatt der Bindertechnik verwendet. Dadurch war es möglich die maximal mögliche Prozessgeschwindigkeit von maximal 2 m/min auf aktuell 4 m/min zu steigern.

Bei der Herstellung von Profil-Preforms mit unterschiedlichen Gelegen hat sich herausgestellt, dass die maximal erreichbare Prozessgeschwindigkeit ohne relative Gelegeschädigung variiert. Folglich ist die Prozessrobustheit und -effizienz des Preforming Systems materialabhängig. Die höchste Belastung auf die Gelege wirkt dabei während der Formgebung, wenn diese vom flachen Ausgangszustand kontinuierlich zu einer 3D-Profil-Preform geformt werden. Somit besteht an dieser Stelle ein hohes Risiko durch die Wahl „falscher“ Material- und Prozessparameter, den Preforming Prozess instabil zu machen. Allerdings kann durch die Wahl geeigneter Parameter ein hohes Potential genutzt werden, um einen Preforming Prozess stabil und effizient zu gestalten. Ziel der Arbeit war es daher, durch Untersuchungen an CF-Gelegen dominierende Auswirkungen von Material- und Prozessparametern auf das textile Formgebungsverhalten zu evaluieren und Richtlinien zu entwickeln, die eine zielgerichtete Steuerung der Preformherstellung ermöglichen.

Als kritische Textileigenschaften wurden das Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhalten identifiziert. In separaten Parameterstudien wurden daher die Auswirkungen von Material- und Prozessparametern auf die jeweiligen Textileigenschaften anhand ausgewählter CF-Gelege untersucht. Ziel dieser Untersuchung war es, Grundlagen für eine prozessorientierte Materialauswahl zu eruieren um gezielt dominierende Kraftanteile während der kontinuierlichen Formgebung zu steuern. Beispielsweise können dadurch Gelegeschädigungen auch bei hohen Prozessgeschwindigkeiten vermieden werden. Zur Evaluierung der Materialparameter (z. B. Einzellagenflächengewicht) wurden fünf CF-Gelege ausgewählt, welche sich in maximal zwei Parametern unterschieden, sodass deren

Auswirkungen fokussiert untersucht werden konnten. Zur Untersuchung der Auswirkungen von Prozessparametern wurden Geschwindigkeit, Normalkraft, Werkzeugoberfläche, Zyklusanzahl und Testrichtung variiert.

Die Parameterstudie bzgl. des Kompaktierungsverhaltens hat gezeigt, dass durch eine Verdopplung des Einzellagenflächengewichts bis zu 80 % niedrigere Kompaktierungskräfte zur Erreichung eines FVG von 50 % benötigt werden. In diesem Zusammenhang sind Verwirkungsgarne Störfaktoren, welche mit zunehmendem Garnanteil die benötigten Kompaktierungskräfte zur Erreichung eines angestrebten Ziel-FVG erhöhen. Speziell bei Mehrlagenpreforms entstehen Überlagerungen von Verwirkungsgarnen, welche eine zusätzliche Steigerung der Kompaktierungskräfte erzeugen. Allerdings können durch angepasste Lagenaufbauten (Anteile der jeweiligen Faserorientierung blieben identisch) die Kompaktierungskräfte gezielt verringert werden. Beispielsweise können durch gedrehte Einzellagen im Lagenaufbau Nestingmöglichkeiten geschaffen werden, welche die Kompaktierungskräfte um bis zu 42 % reduzieren. Prozessseitig führen multiple Kompaktierungszyklen zu einer Reduzierung der Kompaktierungskräfte um bis zu 87 % (nach 10 Wiederholungszyklen). Hierbei findet die höchste Kraftreduzierung zwischen den ersten beiden Kompaktierungszyklen statt.

Die Studie hinsichtlich des Reibungsverhaltens hat gezeigt, dass die Reibungskoeffizienten von CF-Gelegen aufgrund ihrer veränderlichen Kontaktfläche bei verschiedenen FVG variieren. Weiterhin ist die Gelege-Gelege Reibung mehr als doppelt so groß wie die Werkzeug-Gelege Reibung. Wird gezielt das Einzellagenflächengewicht variiert (z. B. von 300 g/m<sup>2</sup> auf 600 g/m<sup>2</sup>), reduzieren sich bei konstantem FVG die Reibungskräfte um bis zu 80 %. Die Bindungsart beeinflusst ebenfalls das Reibungsverhalten, wobei beispielsweise Franse-Bindungen niedrigere Reibungskräfte auf den Gelegeoberseiten erzeugen als auf den Gelegeunterseiten. Durch Versuche mit unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten konnte gezeigt werden, dass die Prozessgeschwindigkeit keine Auswirkung auf die Reibungskraft hat, wohl aber auf die Biege- und Kompaktierungskraft.

Bei den Biegeuntersuchungen wurden die Biegesteifigkeiten der CF-Gelege im Cantilever-Verfahren (Einlagentests) ermittelt. Die Ergebnisse zeigten, dass  $\pm 45^\circ$ -Gelege um bis zu 85 % geringere Biegesteifigkeiten besitzen als  $0^\circ/90^\circ$ -Gelege,



eine Halbierung des Einzellagenflächengewichts eine Reduzierung der Biegesteifigkeit von bis zu 77 % bewirkt und eine Abhängigkeit hinsichtlich der Testrichtung und Gelegeorientierung besteht. Weiterhin wurde unter Verwendung eines neuen Messsystems gezeigt, dass zwischen Lagenanzahl und Biegekraft ein quasi-linearer Zusammenhang besteht, wobei sich im betrachteten Bereich (2 - 6 Lagen) jede zusätzliche Lage ca. 27 % biegekrafterhöhend auswirkt. Allerdings erzeugen bei gleichem Gesamtflächengewicht sechs 300 g/m<sup>2</sup> schwere Gelelagen geringere Biegekräfte als drei 600 g/m<sup>2</sup> schwere Gelelagen. Neben dem Einzellagenflächengewicht wurde als weiterer dominierender Materialparameter die Bindungsart identifiziert, da sie die Garnbündelung festlegt.

Die Ergebnisse der Parameterstudien konnten schließlich in Richtlinien bzgl. des Kompaktierungs-, Reibungs- und Biegeverhaltens zusammengefasst werden, welche für eine prozessorientierte Materialauswahl oder für Prozessmodifikationen beim Preforming genutzt werden können. Materialeitig sind das Einzellagenflächengewicht und die Bindungsart dominant. Dagegen dominieren prozesseitig die Normalkraft und die Zyklusanzahl (multiple Kompaktierungszyklen bzw. Wiederholungszyklen). Dadurch ist es möglich, einzelne Material- und Prozessparameter gezielt zu variieren, um eine Steigerung der Prozessrobustheit und/oder -effizienz zu erreichen.

Bei der Übertragung auf einen Preforming Prozess muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich einzelne Textileigenschaften gegensätzlich überlagern können. Daher wurde anhand einer weiteren Parameterstudie gezeigt, dass die Ergebnisse auf den entwickelten kontinuierlichen Preforming- bzw. vorliegenden Formgebungsprozess übertragbar sind. Zusätzlich konnten dominierende Textileigenschaften, abhängig von angestrebtem Ziel-FVG der T-Profil-Preforms, identifiziert werden.

Abschließend wurde anhand der entwickelten Richtlinien eine prozessorientierte Materialauswahl getroffen und eine Prozessmodifikation vorgenommen. Hinsichtlich der prozessorientierten Materialauswahl konnten durch eine Erhöhung des Einzellagenflächengewichts und einer Verringerung des Verwirkungsgarnanteils die kontinuierlichen Formgebungskräfte um bis zu 24 % reduziert werden. Weiterhin wurde durch die Integration einer Vorkompaktierungseinheit gezeigt, dass

Vorkompaktierungszyklen die kontinuierlichen Formgebungskräfte um ca. 20 % senken. Somit konnten material- und prozesseitig kritische Formgebungskräfte reduziert werden. Dadurch wirken, speziell an den Transporteinheiten des Preforming Prozesses, geringere Kräfte auf die Gelege, wodurch Schädigungen an Preforms minimiert bzw. verhindert werden. Durch die Prozessmodifikation wurde die Prozessgeschwindigkeit zur Herstellung einer T-Profil-Preform (FVG 50 %) ohne das Auftreten von Gelegeschädigungen um das Vierfache erhöht, bis die ursprünglichen Formgebungskräfte (ohne Vorkompaktierungszyklen) erreicht wurden. Demnach konnte die Anwendbarkeit der Richtlinien material- sowie prozesseitig erfolgreich demonstriert werden.

Die Erkenntnisse zum textilen Formgebungsverhalten können material- und prozesseitig genutzt werden. Materialeitig besteht bspw. für Textilhersteller die Möglichkeit ihr Produktportfolio zu erweitern, indem sie kompaktierungs-, reibungs- und biegeoptimierte Gelege herstellen. Prozesseitig können Bauteilentwickler bei der Auslegung von Bauteilen die Anzahl von Optimierungsschleifen reduzieren, da die verwendeten Gelege entsprechend des zu erwartenden Materialverhaltens ausgewählt werden können. Bei existierenden Preforming Prozessen (getaktet oder kontinuierlich) können Prozesseinschränkungen (z. B. maximal erreichbarer FVG) durch eine zielgerichtete Anpassung von Materialparametern überwunden werden. Durch die entwickelten Richtlinien kann somit die Anzahl von kosten- und zeitintensiven Trial-and-Error Versuchen minimiert werden. Demnach besteht durch die Anwendung der Richtlinien die Möglichkeit, die Preform-LCM Prozesskette kurzfristig zu optimieren.

## 7 Literatur

- [1] Lässig, R., Eisenhut, M., Mathias, A., Schulte, R. T., Peters, F., Kühmann, T., Waldmann, T., Begemann, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen, 2012.
- [2] Eickenbusch, H., Krauss, O.: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2013.
- [3] Mitschang, P., Neitzel, M., Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2. Auflage, München: Hanser Verlag, 2014.
- [4] Beier, U., Hülder, G., Spanner, H., Hassler, U.: Kosteneffiziente Preformingprozesskette für komplexe Hochleistungs-Faserverbund-Strukturbauteile. Zeitschrift Kunststofftechnik, Vol. 5, Heft 4, 2009.
- [5] Friedrich, M.: Perspektiven einer automatisierten RTM-Fertigung. In: Wissenschaftstag 2009, Braunschweig, 30. September 2009
- [6] Greb, C.: Systematische Gestaltung von Fertigungsprozessen textiler Verstärkungsstrukturen für Hochleistungs-Faserverbundkunststoffe. Dissertation TU Aachen, 2013
- [7] Reinhart, G., Straßer, G.: Flexible gripping technology for the automated handling of limp technical textiles in composites industry. Production Engineering, Vol. 5, Heft 3, 2011, S. 301-306
- [8] Wiedemann, M., Sinapius, M.: Research Topics in Aerospace. Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [9] Purol, H.: Entwicklung kontinuierlicher Preformverfahren zur Herstellung gekrümmter CFK-Versteifungsprofile. Dissertation Universität Bremen, 2011
- [10] Siebenpfeiffer, W.: Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoff-Fertigung-Konzepte. Springer-Verlag, 2013
- [11] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2006
- [12] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, 2007
- [13] Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften. Springer Verlag, 2011
- [14] Bilisik, K.: Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review. Textile Research Journal, Vol. 82, Heft 7, 2012, S. 725-743
- [15] Bilisik, K.: Three-dimensional braiding for composites: A review. Textile Research Journal, Vol. 83, Heft 13, 2012, S. 1414-1436
- [16] Harper, L., Turner, T., Warrior, N., Dahl, J., Rudd, C.: Characterisation of random carbon fibre composites from a directed fibre preforming process -

- Analysis of microstructural parameters. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 37, Heft 11, 2006, S. 2136-2147
- [17] Gardiner, G.: Beating metal volume production. High Performance Composites, 2013, S. 54-61.
- [18] Mitschang, P.: Prozessentwicklung und ganzheitliches Leichtbaukonzept zur durchgängigen, abfallfreien Preform-RTM Fertigung. 2004
- [19] Herzberg, C., Krzywinski, S., Rödel, H.: Load-adapted 3D-reinforcement by means of function-adjusted ready-making process. International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 15, Heft 3/4, 2003, S. 189-197
- [20] Krzywinski, S., Lin, H., Branke, D., Kästner, M.: Drapieren, textiltechnische 3D-Formgebung oder Konfektion - Ergebnisse theoretischer und experimenteller Untersuchungen am Beispiel eines druckbelasteten FVK-Bauteiles als Entscheidungshilfe zur faserverbundgerechten Konstruktion. In: 14. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz, 2014
- [21] Klingele, J., Greb, C., Linke, M.: Auftrag und Aktivierung von Bindern. Lightweight Design, Vol. 4, Heft 6, 2011, S. 54-61
- [22] Drechsler, K.: Process and simulation chains for advanced textile structural composites. In: SAMPE Conference, Long Beach, Kalifornien, 2008
- [23] Grieser, T., Mitschang, P.: Kontinuierliches Profil-Preforming für Versteifungsstrukturen. Lightweight Design, Vol. 7, Heft 4, 2014, S. 24-29
- [24] Cinquin, J., Voillaume, H., Stroehlein, T., Ruzek, R.: Modular joining of B-stage cured composite element with forming process and film adhesive for structural application. In: Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials, Edingburgh, 2009
- [25] Mitschang, P., Ogale, A., Schlimbach, J., Weyrauch, F., Weimer, C.: Preform technology: A necessary requirement for quality controlled LCM-processes. Polymers & Polymer Composites, Vol. 11, Heft 8, 2003, S. 605-622
- [26] Rieber, G.: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. IVW Schriftenreihe Band 96, Kaiserslautern: IVW GmbH, 2011
- [27] AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 3. Auflage, Springer-Verlag, 2014
- [28] Hildebrandt, K., Mack, J., Becker, D., Mitschang, P., Medina, L.: Potentiale neuer Matrixpolymere für die FKV-Bauteilfertigung. Lightweight Design, Vol. 7, Heft 2, 2013, S. 14-21
- [29] Ehrenstein, G. W.: Polymer Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendungen. 2011
- [30] Klingele, J.: Produktorientierte Auswahl von Verfahren zur Vorfixierung textiler Preforms. Dissertation TU Aachen, 2014
- [31] Reinhart, G., Scharrer, J., Straßer, G.: Automatisierte Fertigung von Faserverbundbauteilen. Springer Verlag, 2008

- [32] Girdauskaite, L., Krzywinski, S., Rödel, H., Wildasin-Werner, A., Böhme, R., Jansen, I.: Local structure fixation in the composite manufacturing chain. *Applied Composite Materials*, Vol. 17, Heft 2010, S. 597-608
- [33] Ogale, A., Mitschang, P.: Tailoring of textile preforms for fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 34, Heft 2/10, 2004, S. 77-96
- [34] Henning, K., Gries, T., Flachkamp, P.: *Wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Hilfe automatisiert hergestellter textiler Preforms*. Shaker Verlag, 2008
- [35] Ehinger, C. A.: *Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen*. Dissertation TU München, Band 268, 2012
- [36] Dörsch, C., Ohlendorf, J., Gebauer, I., Müller, D., Weigel, L.: Teilautomatisiertes preforming zur Qualitätssicherung und Verkürzung von Fertigungszeiten bei der Herstellung von Rotorblättern von Windenergieanlagen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 38, Heft 11, 2007, S. 915-921
- [37] Reiff-Stephan, J.: *Automatisierte Handhabung biegeschlaffer Materialien - Wo setzt die Ingenieursaufgabe an?* TH Wildau - Wissenschaftliche Beiträge, Vol. Heft 2013, S. 72-76
- [38] Brecher, E., Emonts, M.: *Automatisierte Handhabung für die FVK-Großserienproduktion*. In: 17. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V., Aachen, 2011
- [39] Reiff-Stephan, L.: *Beitrag zum Greifen von Textilien*. Dissertation TU Berlin, 2001
- [40] Saadat, M., Nan, P.: Industrial applications of automatic manipulation of flexible materials. *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 29, Heft 5, 2002, S. 434-442
- [41] Straßer, G.: *Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung*. Dissertation TU München, 2012
- [42] Greb, C., Schnabel, A., Kruse, F., Linke, M., Gries, T., Bailey, V.: *Cost efficient preform production for complex FRP structures*. In: *Sampe Conference*, Long Beach, 2011
- [43] Reinhold, R.: *Automatisierung - Lösungen für anspruchsvolle Faserverbundteile*. *Kunststoffe*, Vol. 100, Heft 5, 2010, S. 38-40
- [44] Seliger, G., Szimmat, F., Niemeier, J., Stephan, J.: *Automated handling of non-rigid parts*. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52, Heft 1, 2003, S. 21-24
- [45] Herkt, M.: *Prozesskette zur robotergestützten Herstellung vernähter faserverstärkter Preforms*. Dissertation Universität Stuttgart, 2014
- [46] Steinhilber, M.: *Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Herstellung faserverstärkter Bauteile: REDUX - Realisierung einer durchgängigen*

- Prozeßkette zur effizienten Produktion von CFK-Strukturen in textiler Preform-/RTM-Technik. 2008
- [47] Weiland, F.: Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK-Luftfahrtstrukturen. IVW Schriftenreihe Band 104, Kaiserslautern: IVW GmbH, 2012
- [48] Mack, J.: Entwicklung eines adaptiven Bebinderungsprozesses für die Preformherstellung. IVW Schriftenreihe Band 115, Kaiserslautern: IVW GmbH, 2015
- [49] Thoma, B., Weidenmann, K. A.: Chemical-Stitching, ein vielversprechender Ansatz für die automatisierte Preform-Fertigung. Zeitschrift Kunststofftechnik, Vol. 8, Heft 5. 2012
- [50] Stahl, A., Borgwardt, H.: Quality controlled continuously formed NCF-preforms. In: SAMPE Conference, Seattle, 2014
- [51] Ullmann, T., Schmidt, T., Hofmann, S., Jemmali, R.: In-line quality assurance for the manufacturing of carbon fiber reinforced aircraft structures. In: 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, 2010
- [52] Borgwardt, H.: Adaptive, tolerant and efficient composite structures - Continuous preforming with variable web height adjustment. Springer-Verlag, 2013
- [53] Herrmann, A.: Ist die CFK-Technologie des Flugzeugs auf andere Branchen übertragbar? In: 3. Internationales Zulieferforum der Industrial Supply, Hannover, 2011
- [54] Velten, J.: Preformen am laufenden Band. Carbon Composites Magazin, Vol. 1, 2015.
- [55] Reinhold, R.: Composite Preforming Cell - Innovative Automatisierungslösung zur Composite-Serienfertigung. Lightweight Design, Vol. 3, 2013.
- [56] Arold, B., Beaumont, M.: Fertigung von Flugzeugspannen auf Basis der unidirektionalen Flechttechnologie. Lightweight Design, Vol. 3, Heft 5, 2010, S. 16-22
- [57] Gardiner, G.: Airbus A350 Update: BRaF & FPP. High-Performance Composites, Vol. 20, Heft 1, 2012, S. 32-39
- [58] Schillfahrt, C., Fauster, E., Schledjewski, R.: Effiziente Verarbeitung von Luftfahrt-Strukturbauteilen durch den Einsatz automatisierter Profil-Preformfertigung. In: 23. Leobener Kunststoff-Kolloquium, Leoben, 2014
- [59] Apmann, H.: Automatische Handhabung von CFRP-Material für Spante und Stringer. In: DLR Bauweisen Kolloquium, Stuttgart, 2009
- [60] Meyer, R. W.: Handbook of Pultrusion Technology. Chapman and Hall, 1985
- [61] Hillermeier, R., Friedrich, L.: Continuous pultrusion process for producing high performance structural profiles, 2011
- [62] Mitschang, P., Schledjewski, R.: Faserverstärkte Kunststoffe verarbeiten. Kunststoffe, Vol. 93, Heft 10, 2003, S. 189-194

- [63] Wöginger, A.: Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge. Institut für Verbundwerkstoffe, 2004
- [64] Christmann, M.: Optimierung der Organoblechherstellung durch 2D-Imprägnierung. IVW Schriftenreihe Band 114, Kaiserslautern: IVW GmbH, 2014
- [65] Arnold, M.: Einfluss verschiedener Angusszenarien auf den Harzinjektionsprozess und dessen simulative Abbildung. IVW Schriftenreihe Band 110, Kaiserslautern: IVW GmbH, 2014
- [66] Nosrat-Nezami, F., Gereke, T., Eberdt, C., Cherif, C.: Characterisation of the shear-tension coupling of carbon-fibre fabric under controlled membrane tensions for precise simulative predictions of industrial preforming processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 67, Heft 2014, S. 131-139
- [67] Smith, P., Rudd, C., Long, A.: The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of aligned reinforcements. *Composites Science and Technology*, Vol. 57, Heft 3, 1997, S. 327-344
- [68] Li, L., Zhao, Y., Chen, Y., Yang, J., Duan, Y.: In-plane shear investigation of biaxial carbon non-crimp fabrics with experimental tests and finite element modeling. *Materials & Design*, Vol. 63, Heft 2014, S. 757-765
- [69] Endruweit, A., Ermanni, P.: The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, Heft 4, 2004, S. 439-451
- [70] Lomov, S. V., Verpoest, I., Peeters, T., Roose, D., Zako, M.: Nesting in textile laminates - Geometrical modelling of the laminate. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Heft 7, 2003, S. 993-1007
- [71] Louis, M., Huber, U.: Investigation of shearing effects on the permeability of woven fabrics and implementation into LCM simulation. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Heft 14, 2003, S. 2081-2088
- [72] Heardman, E., Lekakou, C., Bader, M. G.: In-plane permeability of sheared fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32, Heft 7, 2001, S. 933-940
- [73] Potluri, P., Sagar, T. V.: Compaction modelling of textile preforms for composite structures. *Composite structures*, Vol. 86, Heft 1, 2008, S. 177-185
- [74] Chen, B., Lang, E. J., Chou, T. W.: Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 317, Heft 1-2, 2001, S. 188-196
- [75] Chen, B. X., Chou, T. W.: Compaction of woven-fabric preforms: Nesting and multi-layer reformation. *Composites Science and Technology*, Vol. 60, Heft 12-13, 2000, S. 2223-2231
- [76] Hu, J., Newton, A.: Low-load lateral-compression behaviour of woven fabrics. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 88, Heft 3, 1997, S. 242-254

- [77] Matsudaira, M., Qin, H.: Features and mechanical parameters of a fabric's compressional property. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 86, Heft 3, 1995, S. 476-486
- [78] Kim, Y. R., McCarthy, S. P., Fanucci, J. P.: Compressibility and relaxation of fiber reinforcements during composite processing. *Polymer composites*, Vol. 12, Heft 1, 1991, S. 13-19
- [79] Saunders, R. A., Lekakou, C., Bader, M. G.: Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins. *Composites Science and Technology*, Vol. 59, Heft 7, 1999, S. 983-993
- [80] Kruckenberg, T., Ye, L., Paton, R.: Static and vibration compaction and microstructure analysis on plain-woven textile fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, Heft 3, 2008, S. 488-502
- [81] Becker, D., Brzeski, M., Linster, D., Mitschang, P.: Preform compaction and deformation during through-the-thickness impregnation. In: *International Conference on Composite Materials 19*, Montreal, 2013
- [82] Hammami, A., Gebart, B. R.: Analysis of the vacuum infusion molding process. *Polymer composites*, Vol. 21, Heft 1, 2000, S. 28-40
- [83] Liu, X., Falzon, P., Sweeting, R., Paton, R.: Effective compressibility and permeability of multi-layer non-crimp fiberglass reinforcements. *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 23, Heft 8, 2004, S. 861-879
- [84] Somashekar, A. A., Bickerton, S., Bhattacharyya, D.: Exploring the non-elastic compression deformation of dry glass fibre reinforcements. *Composites Science and Technology*, Vol. 67, Heft 2, 2007, S. 183-200
- [85] Klunker, F., Aranda, S., Ziegmann, G., Fideu, P., Baisch, P., Hermann, A.: Permeability and compaction models for non crimped fabrics to perform 3D filling simulations of vacuum assisted resin infusion. In: *Flow Processes in Composite Materials 9*, Montréal, 2008
- [86] Lomov, S. V., Belov, E., Bischoff, T., Ghosh, S. B., Truong Chi, T., Verpoest, I.: Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 1. Geometry of the preform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, Heft 9, 2002, S. 1171-1183
- [87] Kelly, P., Umer, R., Bickerton, S.: Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, Heft 6, 2006, S. 868-873
- [88] Bickerton, S., Buntain, M., Somashekar, A.: The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, Heft 5, 2003, S. 431-444
- [89] Floeck, M., Stadtfeld, H. C., Mitschang, P., Bickerton, S.: Impact of stitching processes on the compaction behavior of glass fiber reinforcements. *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 36, Heft 2/10, 2006, S. 151-165
- [90] Pearce, N., Summerscales, J.: The compressibility of a reinforcement fabric. *Composites Manufacturing*, Vol. 6, Heft 1, 1995, S. 15-21



- [91] Robitaille, F., Gauvin, R.: Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: Reorganization of the fiber network. *Polymer composites*, Vol. 20, Heft 1, 1999, S. 48-61
- [92] Endruweit, A., Gehrig, S., Ermanni, P.: Mechanisms of hydrodynamically induced in-plane deformation of reinforcement textiles in resin injection processes. *Journal of composite materials*, Vol. 37, Heft 18, 2003, S. 1675-1692
- [93] Comas-Cardona, S., Le Grogne, P., Binetruy, C., Krawczak, P.: Unidirectional compression of fibre reinforcements. Part 1: A non-linear elastic-plastic behaviour. *Composites Science and Technology*, Vol. 67, Heft 3, 2007, S. 507-514
- [94] Berg, D. C., Dickert, M., Aranda, S., Ziegmann, G., Drechsel, M.: Influence of shear on the permeability tensor and compaction behaviour of a non-crimp fabric. In: *European Conference on Composite Materials 15, Venice, 2012*
- [95] Wu, W., Jiang, B., Xie, L., Klunker, F., Aranda, S., Ziegmann, G.: Effect of compaction and preforming parameters on the compaction behavior of bindered textile preforms for automated composite manufacturing. *Applied Composite Materials*, Vol. 20, Heft 5, 2013, S. 907-926
- [96] Aranda, S., Klunker, F., Ziegmann, G.: Influence of the binding system on the compaction behaviour of ncf carbon fibre reinforcements. In: *International Conference on Composite Materials 18, Jeju, 21.-26.08.2011*
- [97] Czichos, H., Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. 3. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- [98] Köhler, M.: *Beitrag zur Bestimmung des Coulomb'schen Haftreibungskoeffizienten zwischen zwei metallischen Festkörpern*. Cuvillier Verlag, 2005
- [99] Popov, V. L.: *Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*. Springer-Verlag, 2010
- [100] Peirce, F.: The "handle" of cloth as a measurable quantity. *Journal of the Textile Institute Transactions*, Vol. 21, Heft 9, 1930, S. 377-416
- [101] Howell, H.: Inter-fiber-friction. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 42, Heft 1951, S. 521-533
- [102] Wilson, D.: A study of fabric-on-fabric dynamic friction. *Journal of the Textile Institute Transactions*, Vol. 54, Heft 4, 1963, S. 143-155
- [103] Kawabata, S., Niwa, M.: Fabric performance in clothing and clothing manufacture. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 80, Heft 1, 1989, S. 19-50
- [104] Lima, M., Silva, L. F., Seabra, E., Vasconcelos, R.: FRICTORQ, design and development of an add-on function to measure fabric friction in a liquid environment. In: *XIV International Congress on Project Engineering, Madrid, 2010*
- [105] Hasani, H.: *Analyse der physikalischen Grundlagen zur Entwicklung eines integralen Messverfahrens für die Bestimmung des Warengriiffs an Maschenwaren*. Dissertation Universität Stuttgart, 2007

- [106] Ramkumar, S., Leaf, G., Harlock, S.: A study of the frictional properties of 1×1 rib-knitted cotton fabrics. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 91, Heft 3, 2000, S. 374-382
- [107] Michielsen, S.: Device for measuring sliding friction on highloft nonwovens. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Vol. 1, Heft 2006, S. 23-31
- [108] Virto, L., Naik, A.: Frictional behavior of textile fabrics part I: sliding phenomena of fabrics on metallic and polymeric solid surfaces. *Textile Research Journal*, Vol. 67, Heft 11, 1997, S. 793-802
- [109] Carr, W., Posey, J., Tincher, W.: Frictional characteristics of apparel fabrics. *Textile Research Journal*, Vol. 58, Heft 3, 1988, S. 129-136
- [110] Ramkumar, S.: Method for determining the frictional properties of materials. United States patent, US 6,397,672 B1. 2002
- [111] Ramkumar, S. S., Shastri, L., Tock, R. W., Shelly, D. C., Smith, M. L., Padmanabhan, S.: Experimental study of the frictional properties of friction spun yarns. *Journal of applied polymer science*, Vol. 88, Heft 10, 2003, S. 2450-2454
- [112] Das, A., Kothari, V., Vandana, N.: A study on frictional characteristics of woven fabrics. *AUTEX Research Journal*, Vol. 5, Heft 3, 2005, S. 133-140
- [113] Hermann, D. B.: Mathematical characterization of frictional properties. Thesis Texas Tech University, 2003
- [114] Bertaux, E., Lewandowski, M., Derler, S.: Relationship between friction and tactile properties for woven and knitted fabrics. *Textile Research Journal*, Vol. 77, Heft 6, 2007, S. 387-396
- [115] Thorndike, G., Varley, L.: Measurement of the coefficient of friction between samples of the same cloth. *Journal of the Textile Institute Proceedings*, Vol. 52, Heft 6, 1961, S. 255-271
- [116] Kovar, R., Gupta, B. S., Kus, Z.: *Friction in Textile Materials - Stick-slip phenomena in textiles*. Woodhead Publishing, 2008
- [117] Gupta, B. S., Ajayi, J. O., Kutsenko, M.: *Friction in Textile Materials - Experimental methods for analyzing friction in textiles*. Woodhead Publishing 2008
- [118] Roselman, I., Tabor, D.: The friction of carbon fibres. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 9, Heft 17, 1976, S. 2517-2532
- [119] Roselman, I., Tabor, D.: The friction and wear of individual carbon fibres. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 10, Heft 8, 1977, S. 1181-1194
- [120] Cornelissen, B., Rietman, B., Akkerman, R.: Frictional behaviour of high performance fibrous tows: Friction experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 44, Heft 2013, S. 95-104
- [121] Cornelissen, B., de Rooij, M., Rietman, B., Akkerman, R.: Frictional behaviour of high performance fibrous tows: A contact mechanics model of tow-metal friction. *Wear*, Vol. 305, Heft 1, 2013, S. 78-88

- [122] Cornelissen, B., Sachs, U., Rietman, B., Akkerman, R.: Dry friction characterisation of carbon fibre tow and satin weave fabric for composite applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 56, Heft 2014, S. 127-135
- [123] Chakladar, N. D., Mandal, P., Potluri, P.: Effects of inter-tow angle and tow size on carbon fibre friction. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 65, Heft 2014, S. 115-124
- [124] Lomov, S. V., Verpoest, I., Barburiski, M., Laperre, J.: Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms, Part 2: KES-F characterisation of the deformability of the preforms at low loads. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, Heft 4, 2003, S. 359-370
- [125] Yüksekaya, M. E., Howard, T., Adanur, S.: Influence of the fabric properties on fabric stiffness for the industrial fabrics. *Tekstil ve Konfeksiyon*, Vol. 4, Heft 2008, S. 263-267
- [126] De Bilbao, E., Soulat, D., Hivet, G., Launay, J., Gasser, A.: Bending test of composite reinforcements. *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, Heft 1, 2008, S. 835-838
- [127] Zhou, N., Ghosh, T. K.: On-line measurement of fabric-bending behavior: background, need and potential solutions. *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 10, Heft 2, 1998, S. 143-156
- [128] De Bilbao, E., Soulat, D., Hivet, G., Gasser, A.: Experimental study of bending behaviour of reinforcements. *Experimental Mechanics*, Vol. 50, Heft 3, 2010, S. 333-351
- [129] Grosberg, P.: The mechanical properties of woven fabrics part II: the bending of woven fabrics. *Textile Research Journal*, Vol. 36, Heft 3, 1966, S. 205-211
- [130] Ngoc, C. N., Bruniaux, P., Castelain, J.: Modeling friction for yarn/fabric simulation Application to bending hysteresis. In: 14th European Simulation Symposium, Dresden, 2002
- [131] Lahey, T., Heppler, G.: Mechanical modeling of fabrics in bending. *Journal of applied mechanics*, Vol. 71, Heft 1, 2004, S. 32-40
- [132] Köckritz, U.: In-situ Polymerbeschichtung zur Strukturstabilisierung offener nähgewirkter Gelege. 2007
- [133] Ly, N. G.: Frictional effects in glass fabric. *Textile Research Journal*, Vol. 56, Heft 1, 1986, S. 22-26
- [134] Peirce, F. T.: The geometry of cloth structure. *Journal of the Textile Institute Transactions*, Vol. 28, Heft 3, 1937, S. 45-96
- [135] Hu, J.: Structure and mechanics of woven fabrics. Woodhead Publishing, 2004
- [136] Ghosh, T., Batra, S., Barker, R.: The bending behaviour of plain-woven fabrics part I: A critical review. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 81, Heft 3, 1990, S. 245-254

- [137] Ghosh, T., Batra, S., Barker, R.: The bending behaviour of plain-woven fabrics part II: the case of linear thread-bending behaviour. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 81, Heft 3, 1990, S. 255-271
- [138] Backer, S.: The mechanics of bent yarns. *Textile Research Journal*, Vol. 22, Heft 10, 1952, S. 668-681
- [139] Abbott, N., Coplan, M., Platt, M.: Theoretical considerations of bending and creasing in a fabric. *Journal of the Textile Institute Transactions*, Vol. 51, Heft 12, 1960, S. 1384-1397
- [140] Abbott, G. M., Grosberg, P., Leaf, G. A. V.: The elastic resistance to bending of plain-woven fabrics. *Journal of the Textile Institute*, Vol. 64, Heft 6, 1973, S. 346-362
- [141] Shi, F. J., Hu, J., Yu, T.: Modeling the creasing properties of woven fabrics. *Textile Research Journal*, Vol. 70, Heft 3, 2000, S. 247-255
- [142] Jiang, Y., Hu, J., Ko, F.: Characterizing and modeling bending properties of multi-axial warp knitted fabrics. *Textile Research Journal*, Vol. 69, Heft 9, 1999, S. 691-697
- [143] Syerko, E., Comas-Cardona, S., Binetruy, C.: Models of mechanical properties/behavior of dry fibrous materials at various scales in bending and tension: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, Heft 8, 2012, S. 1365-1388
- [144] Norm DIN 53362, Bestimmung der Biegesteifigkeit: Verfahren nach Cantilever. 2003
- [145] Seif, M.: Bereitstellung von Materialkennwerten für die Simulation von Bekleidungsprodukten. Dissertation TU Dresden, 2007
- [146] DÖRFEL, A.: [Zugriff: 05.06.2014]. URL: [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_maschinenwesen/itm/institut/tech\\_aus/textiles\\_prueflabor/sonderpruefgeraete/index\\_html/document\\_view?set\\_language=de](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/itm/institut/tech_aus/textiles_prueflabor/sonderpruefgeraete/index_html/document_view?set_language=de).
- [147] Pabst, S., Krzywinski, S., Schenk, A., Thomaszewski, B.: Seams and bending in cloth simulation. In: *Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulations*, 2008
- [148] Kawabata, S., Gakki, N. S. i. K.: The standardization and analysis of hand evaluation. 2. Auflage, *Textile Machinery Society of Japan*, 1980
- [149] Chen, Q.: Biegeeigenschaften von Rechts-Rechts-Gestricken. 1. Auflage, *Cuvillier Verlag*, 2004
- [150] Eckers, V., Janetzko, S., Gries, T.: Drape study on textiles for concrete applications. *AUTEX Research Journal*, Vol. 12, Heft 2, 2012, S. 50-54
- [151] Vallons, K.: The behaviour of carbon fibre-epoxy NCF composites under various mechanical loading conditions. Dissertation Katholieke Universiteit Leuven, 2009
- [152] Truong, T. C.: The mechanical performance and damage of multi-axial multi-ply carbon fabric reinforced composites. Dissertation Katholieke Universiteit Leuven, 2005

- [153] Cripps, D.: Composite Materials Handbook [Zugriff 15.05.2014]. <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>.
- [154] Fan, J., Hunter, L.: Engineering apparel fabrics and garments. Elsevier Science, 2009
- [155] Angerer, A., Ehinger, C., Hoffmann, A., Reif, W., Reinhart, G.: Design of an automation system for preforming processes in aerospace industries. In: International Conference on Automation Science and Engineering Trieste, 2011
- [156] Degischer, H. P., Lüftl, S.: Leichtbau: Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren. John Wiley & Sons, 2009
- [157] Mersmann, C.: Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faserverbundleichtbau. Apprimus Verlag, 2012
- [158] Schlarb, A. K.: Potential Solutions for the Automotive Industry Lightweight Design. Kunststoffe international, Vol. 7, Heft 2011, S. 68-74
- [159] Weimer, C.: Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde. IVW Schriftenreihe, Band 31, Kaiserslautern: IVW GmbH, 2002
- [160] Grieser, T., Mitschang, P.: Investigation of the Compaction Behavior of Carbon Fiber NCF for Continuous Preforming Processes (in press). Polymer Composites. 2015
- [161] Polyethylenterephthalat (Polyester, PET, PETP) Materialinformationen [Zugriff: 10.02.2015]. URL: <http://www.goodfellow.com/G/Polyethylenterephthalat.html>.

## 8 Anhang

Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der kontinuierlichen Profil-Preforming Systeme Continuous Composite Preforming Unit, Automated Continuous Preforming Unit und Automated Preform Machine

	Continuous Composite Preforming System (CCPS)	Automated Continuous Preforming Unit (ACPU)	Automated Preform Machine (APM)
<b>Fixierungstechnologie</b>	Bindertechnik	Bindertechnik	Bindertechnik
Bindermaterial	Pulverbinder	Vlies	Vlies
Aktivierungstechnologie Binder	Infrarot	Induktion	Induktion
<b>Materialien</b>	Schmaltextilien	Schmaltextilien	Textile Halbzeuge
Zwickel	Roving, Flechtschlauch Vollautomatisiert	Roving, Flechtschlauch Vollautomatisiert	Roving, Flechtschlauch Vollautomatisiert
<b>Automatisierungsgrad</b>	Ja	Ja	/
<b>Endkonturnahe Fertigung</b>	Rollen-/ Schienensystem	Rollen-/ Schienensystem	Rollen-/ Schienensystem
<b>Formgebungseinheit</b>	2 m/min	1,2 m/min	/
<b>Produktionsgeschwindigkeit (max.)</b>	Endlos	0,52 m - 1,21 m	Endlos
<b>Faserorientierung (belastungsgerecht)</b>	Eingeschränkt	Eingeschränkt	Ja
<b>Herstellbare Profilformen</b>	LCF-Profil*	I-Profil	H-Profil
Flexibilität Profilform	Möglich	Eingeschränkt	Eingeschränkt
Variabilität Profiquerschnitt (in-line)**	Nicht möglich	Möglich	Nicht möglich
Profilkrümmung (Radius)	1,9 m - 4,3 m	Nicht möglich	Nicht möglich
<b>Preformaufbau</b>	2 * S-Preform 1 * C-Preform	2 * C-Preform	2 * U-Preform 2 * Decklagen (flach)
<b>Profilhöhe</b>	< 0,1 m	0,01 - 0,035 m	/
<b>Investitionskosten</b>	Mittel	Mittel	Mittel
<b>Anwendungsbereich</b>	Luftfahrt: Stringer, Spante, Holme	Automobil: Säulen	Luftfahrt: Trägerstrukturen

\* Weiterer Fügeschritt der 3-Sub-Preforms zur finalen Preform benötigt.

\*\* Profiquerschnitt während des laufenden Betriebs der Anlage einstellbar.

/ keine Angabe

Tabelle 8.2: Gegenüberstellung der kontinuierlichen Profil-Preforming Verfahren (kontinuierliche Preforming Systeme, Profilrollformen und BraF) und kontinuierlichen FKV-Herstellungsverfahren (Pultrusion RTM, Pultrusion und Intervallheißpressen)

	Kontinuierliche Preforming Verfahren			Kontinuierliche FKV-Herstellungsverfahren		
	Kont. Preforming (CCPS, APM, ACPU)	Profilrollformen am Drapierkern	BraF	Pultrusion RTM	Pultrusion	Intervall- heißpressen
<b>Prozessgeschwindigkeit</b>	< 2 m/min	/	< 1m/min	< 0,1 m/min	≤ 10 m/min	≤ 1 m/min
<b>Automatisierungsgrad</b>	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel - Hoch	Hoch	Hoch
<b>Endkonturnaher Fertigung</b>	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja
<b>Formgebungseinheit</b>	Rollen-/ Schienensystem	Endeffektor mit Rollformeinheit	Flechten, Wickeln, Ablegen auf Kern	Rollen-/ Schienensystem	Beheiztes Formwerkzeug	Rollen-/ Schienensystem
<b>Investitionskosten</b>	Mittel	Mittel - hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
<b>Energieverbrauch</b>	Mittel	Mittel	Mittel - hoch	Mittel - hoch	Mittel - hoch	Mittel - hoch
<b>Abzugskräfte</b>	< 80 N	/	/	<< Pultrusion	< 60.000 N	/
<b>Profilgeometrie</b>	U-, C-, S-, H-, I-	JF-, C-, L-, Ω-	C-, Z-, JF-, E-	Abhängig von der Preforminganlage	Vielzahl von Profilquerschnitten	Vielzahl von Profilquerschnitten
<b>Variabilität Höhe / Breite (in-line)</b>	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
<b>Variabile Krümmung (in-line)</b>	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
<b>Profillänge</b>	Endlos	Eingeschränkt	Eingeschränkt	Endlos	Endlos	Endlos
<b>Materialien</b>	Schmaltextilien	Schmaltextilien	Rovings, Schmaltextilien	Rovings, Schmaltextilien	Rovings, Schmaltextilien	Halbzeuge, Organobleche
<b>Mögliche Faserorientierung</b>	Nahezu beliebig	Eingeschränkt	Nahezu beliebig	Nahezu beliebig	Eingeschränkt	Nahezu beliebig
<b>Produkteigenschaften</b>	Mittel - hoch	Mittel	Hoch	Mittel - hoch	Mittel	Mittel - hoch
<b>Anwendungsbereich</b>	Automobil, Luftfahrt	Luftfahrt	Luftfahrt	Luftfahrt	Sport, Automobil, Luftfahrt, Bauindustrie	Automobil, Bauindustrie

Tabelle 8.3: Lastenheft zur kontinuierlichen Herstellung von Profil-Preforms inklusive der erzielten Eigenschaften des entwickelten Preforming Systems CPPS; Grün = Anforderung erreicht, gelb = Anforderung nahezu erreicht, orange = Erreichung der Anforderung möglich, rot = Erreichung der Anforderung nicht möglich ohne maßgebliche Modifikationen

Kategorie	Anforderungen an den Prozess	CPPS
<b>Prozess</b>		
Materialkapazität	Produzierbare Profillaufänge $\geq 30$ m; Anzahl textiler Halbzeuge für den Lagenaufbau $> 6$ Stück	Profillaufänge $\geq 30$ m; Anzahl $\leq 8$ Stück
Formgebung	Variables Formgebungskonzept für unterschiedliche Profilformen (T, I etc.)	Derzeit T- und I-Profile; Weitere Profile möglich
Fixierung Preforms	Kontinuierlich, effizient und flexibel	Nähtechnik entspricht den Anforderungen
Zuschnitt Preforms	Niedrige Materialeinsatzquote (Verschnitt $< 10$ %)	Verschnitt $< 10$ %
Modularität	Kurze Rüstzeiten bzgl. Anpassung an verschiedene Profildesigns, Aus- tauschen von Hilfs- und Betriebsstoffen und Integration von zusätzlichen Anlagenkomponenten	Modulares Anlagen- konzept verwirklicht; Rüstzeiten $< 30$ min
Automatisierungsgrad	Manueller Aufwand für Material- bestückung und Preformmentnahme $< 10$ %	Manueller Aufwand ca. 10 %
Prozessgeschwindigkeit	$> 2$ m/min	Derzeit $\leq 4$ m/min
Transporteinheiten und Materialführung	Keine Oberflächenbeschädigungen oder Zerstörungen der Materialien; Keine Faltenbildung und kein Verzug	Möglich, jedoch abhängig von Material- und Prozessparameter
Prozessstabilität	Störungsfreie Fertigung, geringe Wartungsintensität	Erfüllt (keine Langzeit- versuche durchgeführt)
Reproduzierbarkeit	Ausschuss $< 5$ %	Ausschuss ca. 10 %
Lebensdauer	Geringer Anlagenverschleiß (z. B. Führungsschienen)	Erfüllt (keine Langzeit- versuche durchgeführt)
<b>Produkt</b>		
Geometrie	Fertigungstoleranzen der Preforms $\Delta$ FVG $\leq \pm 2$ %	Fertigungstoleranzen $\Delta$ FVG $\pm 2$ %
Materialien	Verwendung von Standardmaterialien → Schmaltextilien und Standard- halbzeuge	Erfüllt; Verwendung von Schmaltextilien und Standardhalbzeugen
Eigenschaften	Beliebige Faserorientierung möglich; FVG der Preforms $> 40$ %	Faserorientierung nahezu beliebig ( $0^\circ$ , ca. $20^\circ$ - $90^\circ$ ); Maximaler FVG $\leq 60$ %
<b>Kosten</b>		
Ressourcen	Kostengünstige Hilfs- und Betriebsstoffe	Erfüllt, aufgrund des Einsatzes der Nähtechnik (allerdings wurde keine Kosten- analyse durchgeführt)
Kapitalbindung	Geringe Investitionskosten	
Energieverbrauch	Geringer Stromverbrauch (Vermeidung von Aufheiz- / Kühlstationen)	



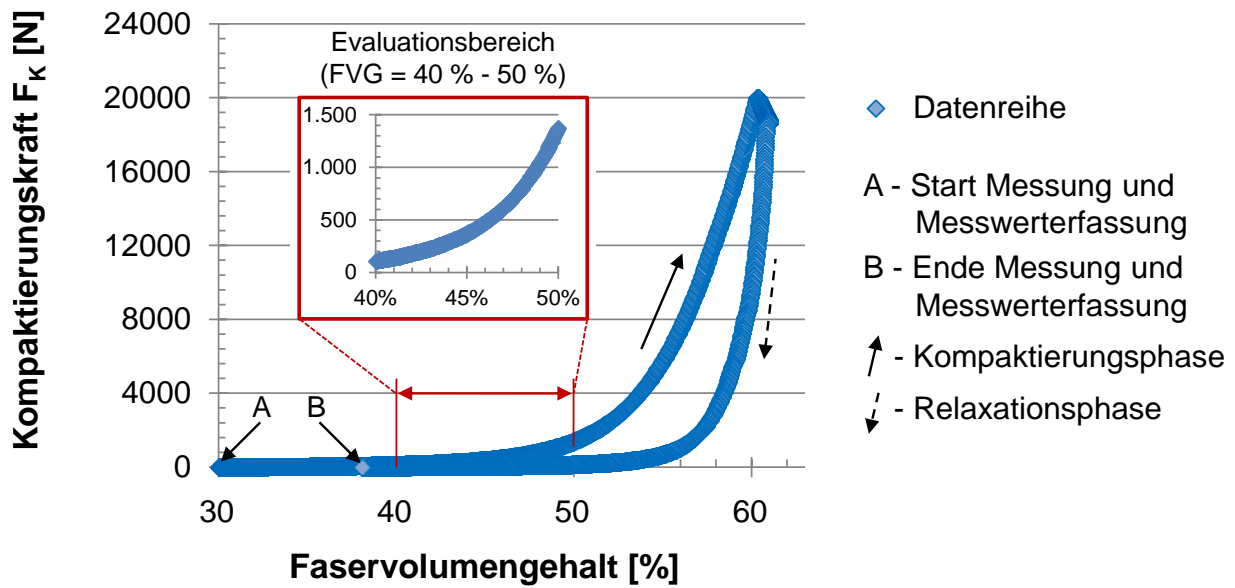


Abbildung 8.1: Beispiel einer Messkurve zur Bestimmung der Kompaktierungskraft trockener textiler Halbzeuge mit dazugehörigem Evaluationsbereich bei 40 % - 50 % FVG

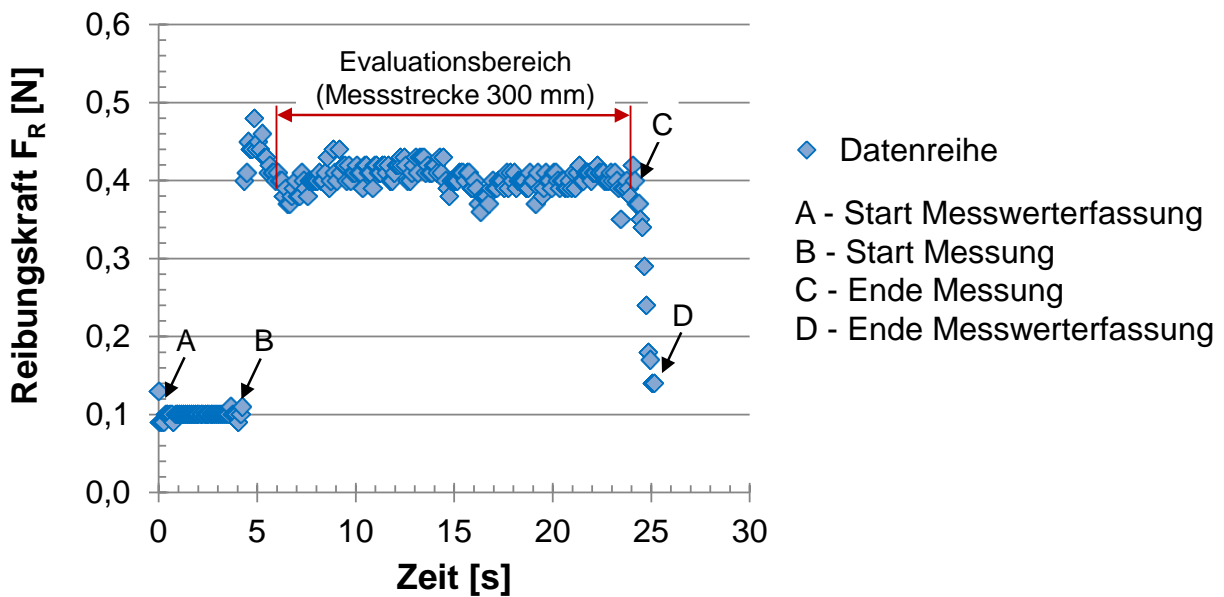


Abbildung 8.2: Beispiel einer Messkurve zur Bestimmung der Reibungskraft trockener textiler Halbzeuge mit dazugehörigem Evaluationsbereich von 300 mm Messstrecke

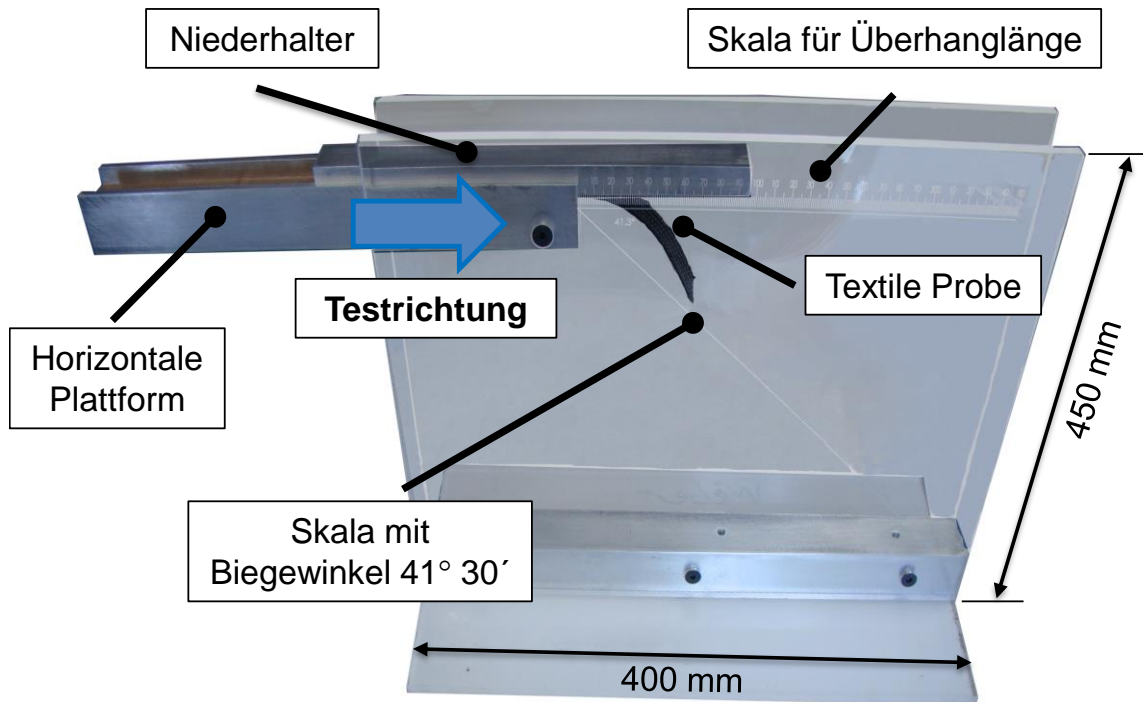


Abbildung 8.3: Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Biegesteifigkeit (Einzellagen) nach Cantilever; DIN 53362

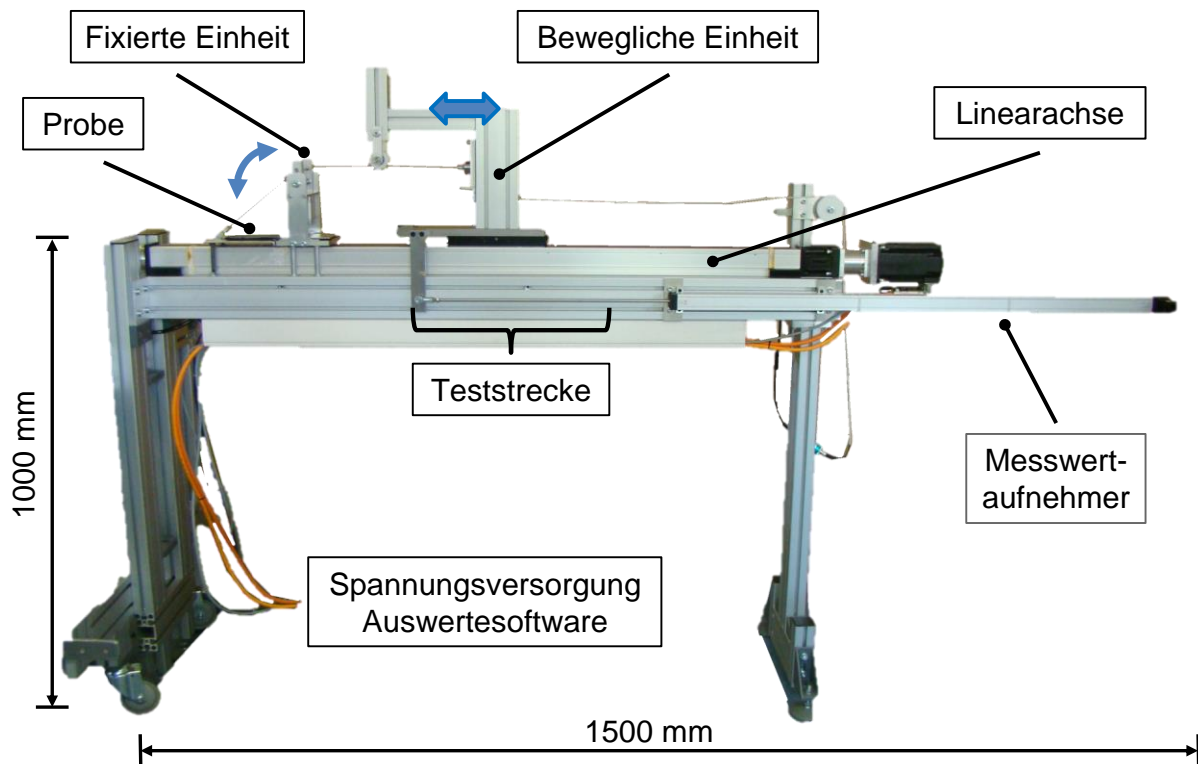


Abbildung 8.4: Gesamtansicht des Messsystems zur Untersuchung des Biegeverhaltens von trockenen Mehrlagenaufbauten

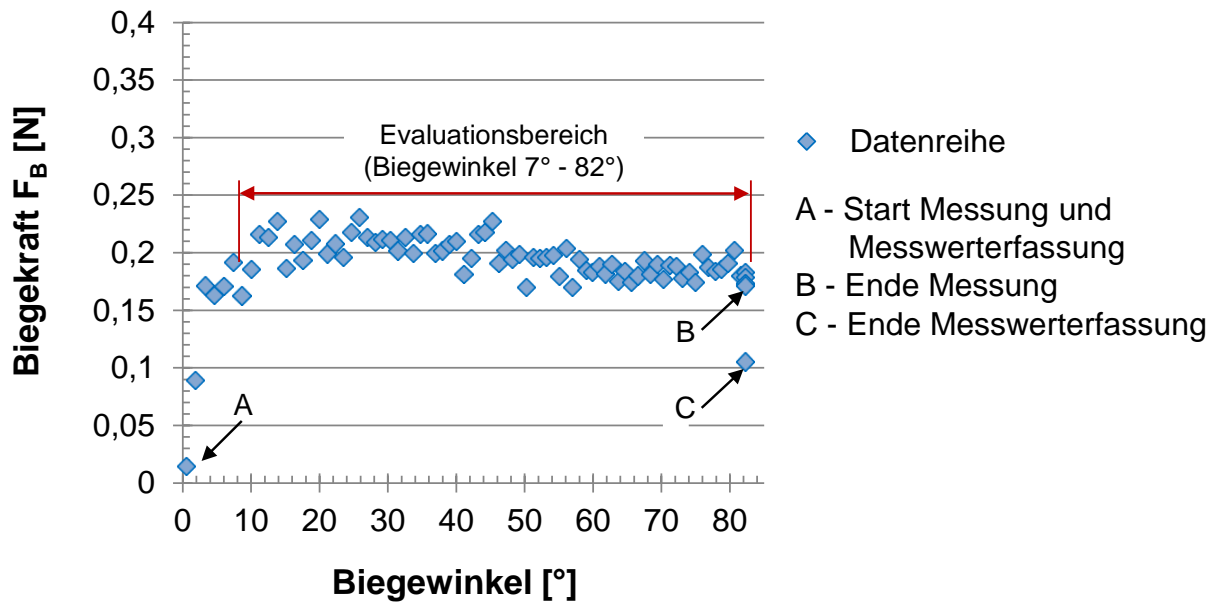


Abbildung 8.5: Beispiel einer Messkurve zur Bestimmung der Biegekraft trockener textiler Halbzeuge mit dazugehörigem Evaluationsbereich von 7° - 82° Biegewinkel

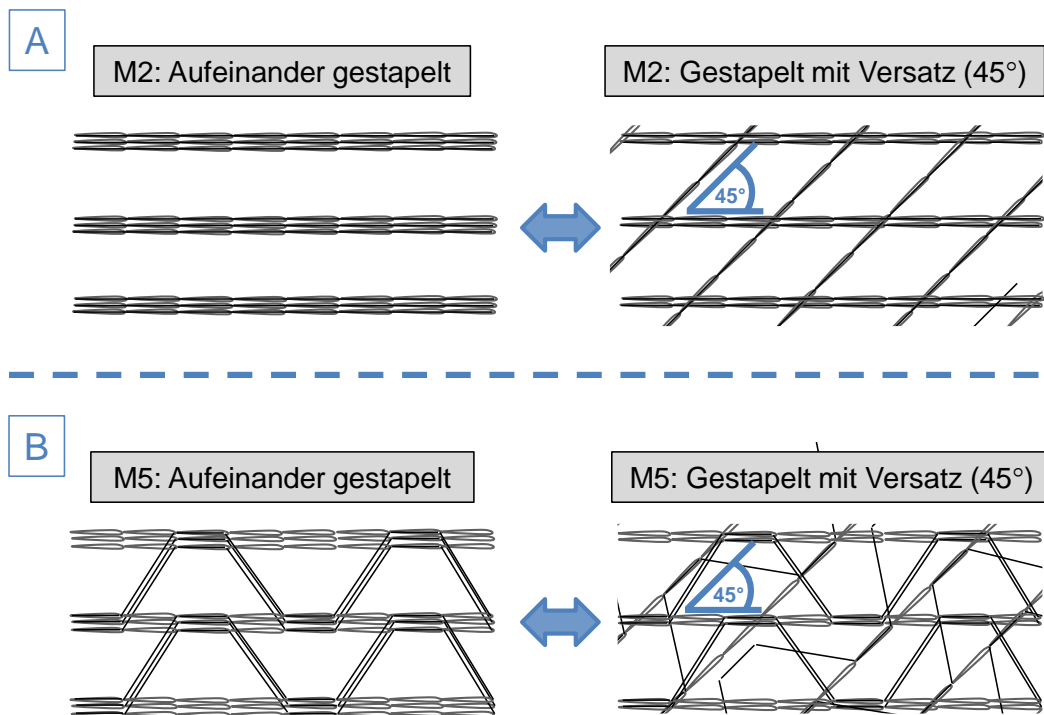


Abbildung 8.6: Schematische Verwirkungsgarnmuster der Franse-Bindung (M2) und der Hybrid-Bindung (M5): Verwirkungsgarnmuster vom M2-Preforms ohne und mit Versatz von 45° bei jeder zweiten Lage (A); Verwirkungsgarnmuster von M5-Preforms ohne und mit Versatz von 45° bei jeder zweiten Lage (B)

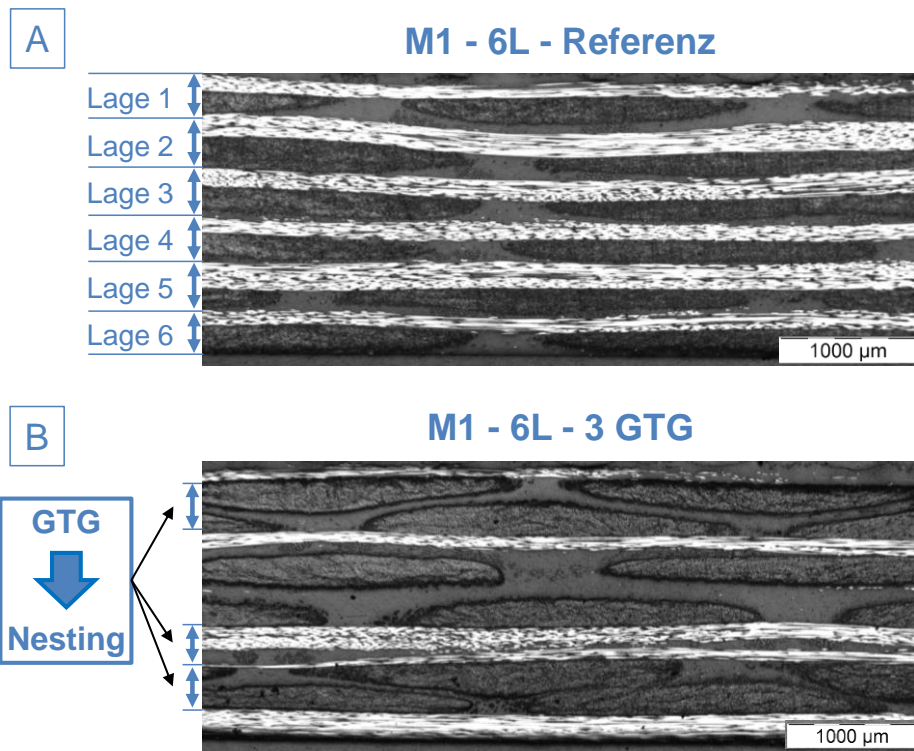


Abbildung 8.7: Lichtmikroskopie-Aufnahmen von 6-Lagenpreforms bestehend aus dem 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M1: Referenz (A) und Lagenaufbau mit 3 GTG (B); Vergrößerung 25X

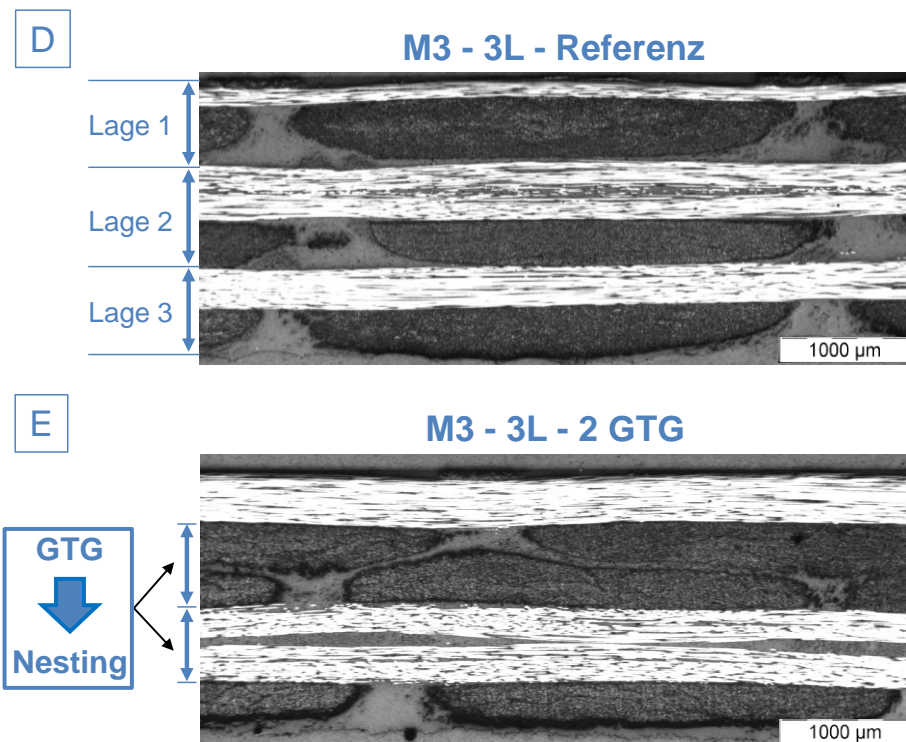


Abbildung 8.8: Lichtmikroskopie-Aufnahmen von 3-Lagenpreforms bestehend aus dem 600 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Gelege M3: Referenz (D) und Lagenaufbau mit 2 GTG (E); Vergrößerung 25X

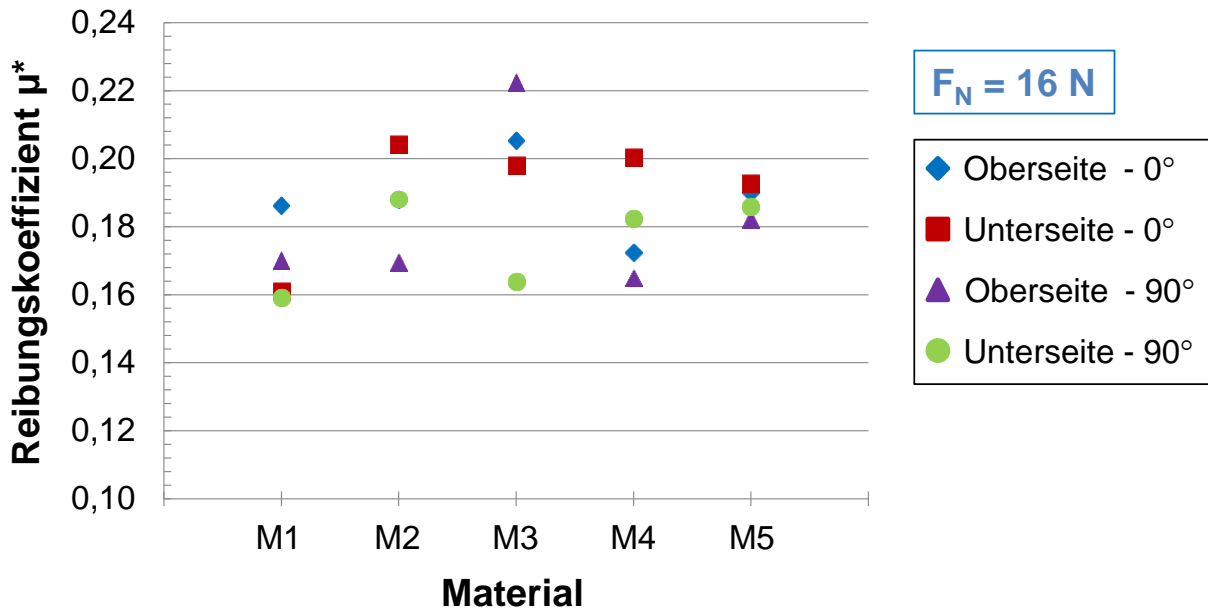


Abbildung 8.9: Übersicht der Reibungskoeffizienten  $\mu^*$  von M1 und M2 (je 300 g/m<sup>2</sup>) sowie M3 - M5 (je 600 g/m<sup>2</sup>) bei einer Normalkraft von 16 N in Abhängigkeit von der Testrichtung (0° und 90°) und Gelegeorientierung (Ober- und Unterseite)

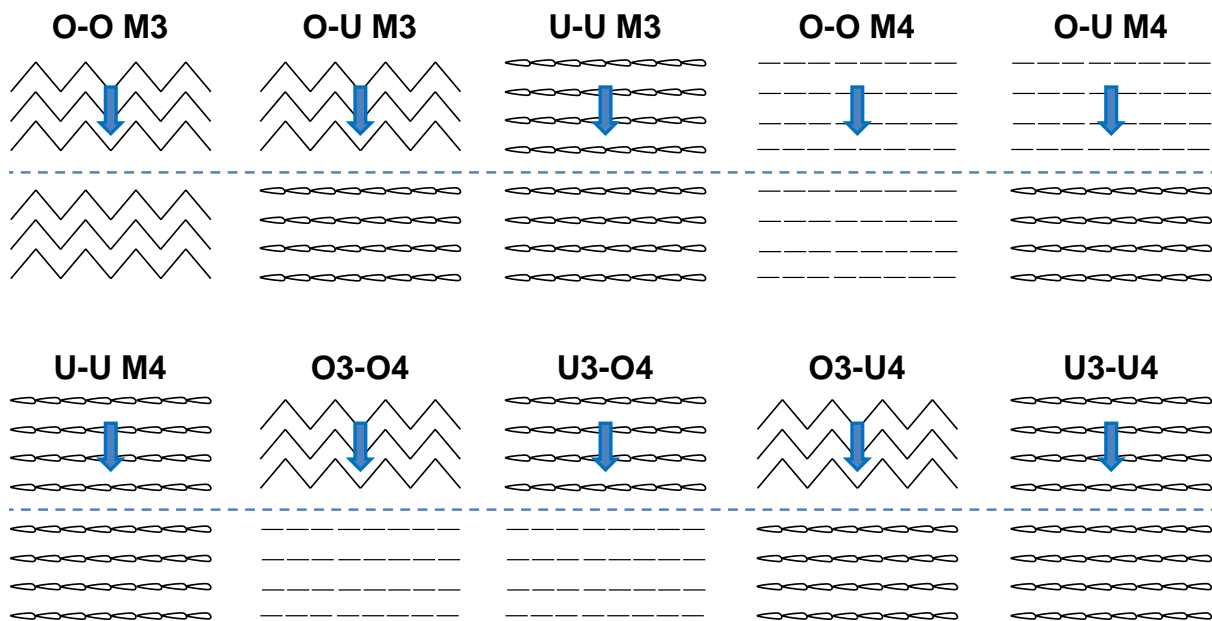


Abbildung 8.10: Schematische Darstellung der Reibungsflächen (nur Verwirkungsgarne) bei der Gelege-Gelege Reibung von M3 (Trikot), M4 (Franse) und M3/M4 (Trikot/Franse) Kombinationen; Die blauen Pfeile zeigen die Testrichtung an; U = Unterseite; O = Oberseite

### Oberfläche des 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Geleges M1

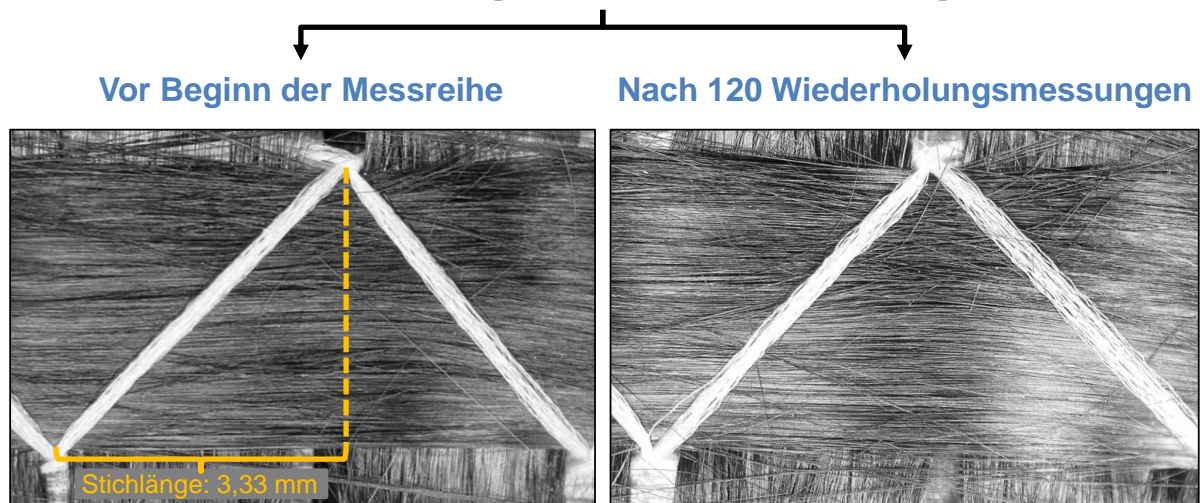


Abbildung 8.11: Mikroskopie-Aufnahmen eines Materialausschnitts des 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Geleges M1 vor Beginn der Messreihe (links) und nach 120 Messungen (rechts) zur Untersuchung des Einflusses der Dauerbelastung; Testgeschwindigkeit = 3 m/min; FVG = 40 %; Werkzeug-/Schlitteneroberfläche = Stahl

Tabelle 8.4: Übersicht der Biegesteifigkeiten von M1 - M5 (Einzellagen, Ober- und Unterseiten) ermittelt im Cantilever-Verfahren inklusive des Einflusses der Faserorientierung und des Einzellagenflächengewichts bei unterschiedlichen Testrichtungen (0°, 90°)

Proben mit Oberseite nach oben geprüft (Zugbelastung auf Oberseite)						
Material - Testrichtung	Biegesteifigkeit [mN*cm]	SA	Einfluss Faserorientierung	Prozentualer Unterschied [%]	Einfluss Flächengewicht	Prozentualer Unterschied [%]
M1 - 0°	97,03	16,46	M1 vs. M2 (bei 0°)	80	M1 vs. M3 (0°)	74
M2 - 0°	19,54	2,77				
M1 - 90°	72,51	11,62	M1 vs. M2 (bei 90°)	75	M1 vs. M3 (90°)	77
M2 - 90°	18,37	3,14				
M3 - 0°	367,89	69,01	M3 vs. M4 (bei 0°)	84	M2 vs. M4 (0°)	67
M4 - 0°	59,08	17,83				
M3 - 90°	312,6	44,61	M3 vs. M4 (bei 90°)	85	M2 vs. M4 (90°)	62
M4 - 90°	48,26	5,11				
M5 - 0°	247,87	82,39				
M5 - 90°	57,98	6,08				
Proben mit Unterseite nach oben geprüft (Zugbelastung auf Unterseite)						
Material - Testrichtung	Biegesteifigkeit [mN*cm]	SA	Einfluss Faserorientierung	Prozentualer Unterschied [%]	Einfluss Flächengewicht	Prozentualer Unterschied [%]
M1 - 0°	90,29	13,39	M1 vs. M2 (bei 0°)	75	M1 vs. M3 (0°)	74
M2 - 0°	22,24	4,75				
M1 - 90°	63,07	13,37	M1 vs. M2 (bei 90°)	71	M1 vs. M3 (90°)	78
M2 - 90°	18,03	3,01				
M3 - 0°	341,17	69,88	M3 vs. M4 (bei 0°)	82	M2 vs. M4 (0°)	63
M4 - 0°	60,87	22,42				
M3 - 90°	290,96	20,23	M3 vs. M4 (bei 90°)	84	M2 vs. M4 (90°)	60
M4 - 90°	45,37	2,29				
M5 - 0°	223,95	75,11				
M5 - 90°	40,87	8				

Tabelle 8.5: Überblick der Biegekräfte (Mehrlagentests) von M1 - M5 für die Winkelgeschwindigkeiten 0,136 rad/s und 0,273 rad/s inklusive der prozentualen Steigerung der Biegekraft von 0,136 rad/s auf 0,273 rad/s; Der Evaluationsbereich ist 10° - 82° Biegewinkel

Material	Lagenanzahl	Einfluss der Winkelgeschwindigkeit auf die Biegekraft		
		Biegekraft [N]		Prozentuale Änderung der Biegekraft [%] (0,136 auf 0,273 rad/s)
		0,136 rad/s	0,273 rad/s	
M1	6	0,26	0,27	4,5
M2	6	0,24	0,23	-3,7
M3 <sup>A</sup>	3	0,37	0,38	2,4
M4	3	0,27	0,28	4,1
M5	3	0,22	0,21	-3,7

<sup>A</sup> Der Evaluationsbereich wurde hier auf 45° - 82° eingeschränkt

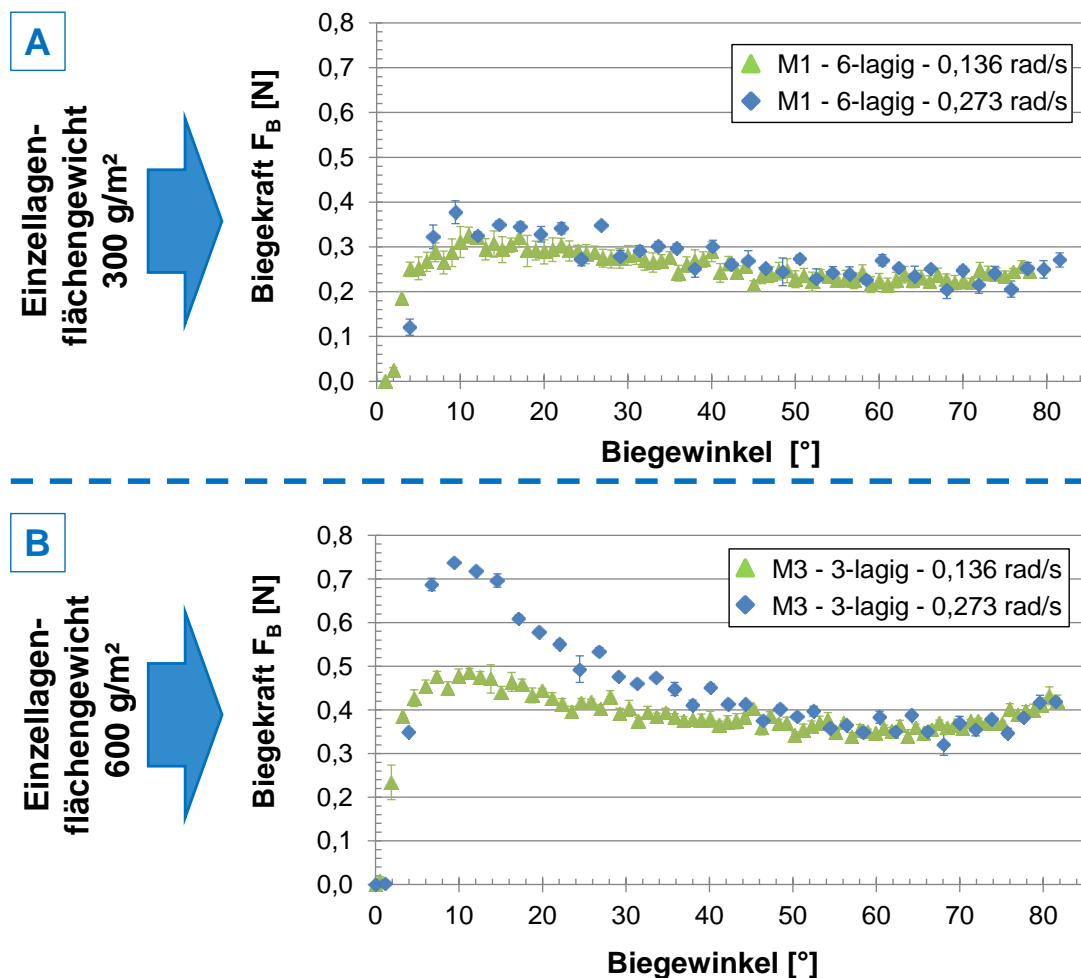


Abbildung 8.12: Einfluss der Winkelgeschwindigkeit (0,136 rad/s und 0,273 rad/s) auf die Biegekraft bei Mehrlagentests des 300 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Geleges M1 (A, 6-lagig) sowie des 600 g/m<sup>2</sup> schweren 0°/90°-Geleges M3 (B, 3-lagig)

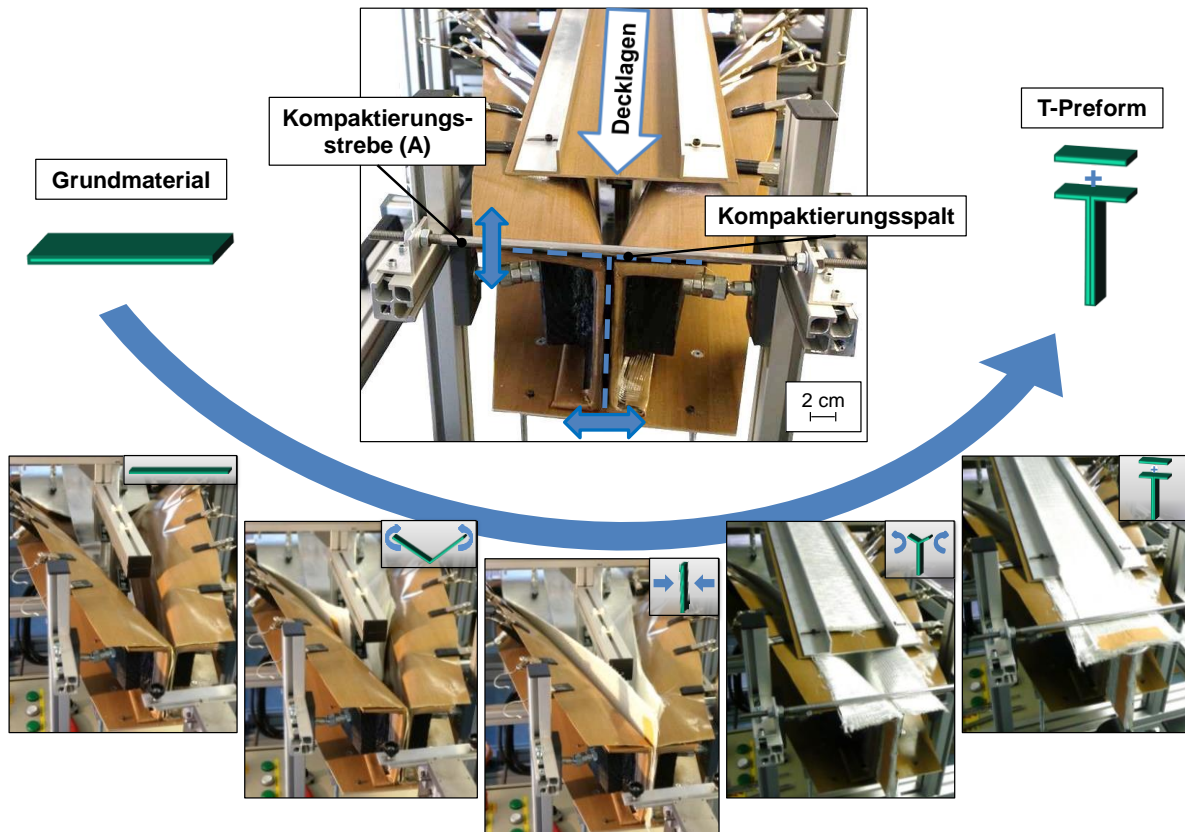


Abbildung 8.13: Entstehung einer T-Profil-Preform in der modifizierten Formgebungseinheit des CPPS

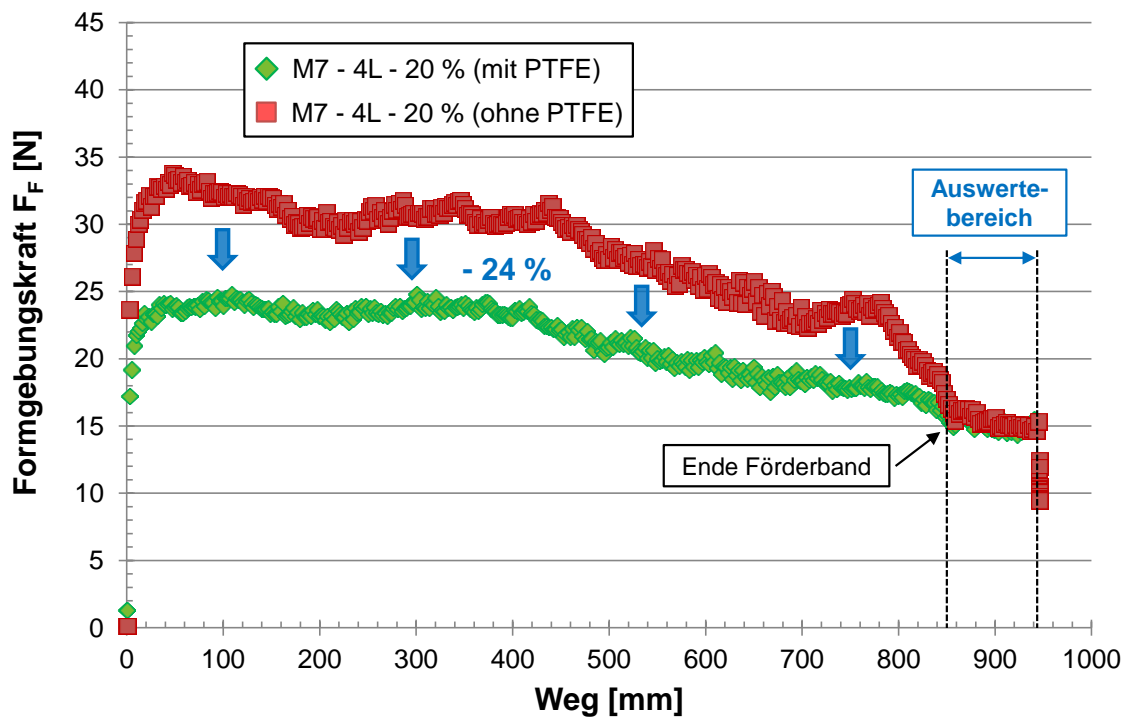


Abbildung 8.14: Einfluss der Förderbandreibung (Förderbandmaterial ist PVC) auf die kontinuierliche Formgebungskraft bei einem  $400 \text{ g/m}^2$  schweren  $\pm 45^\circ$ -Gelege (4 Lagen, FVG = 20 %) mit und ohne PTFE-Auflage



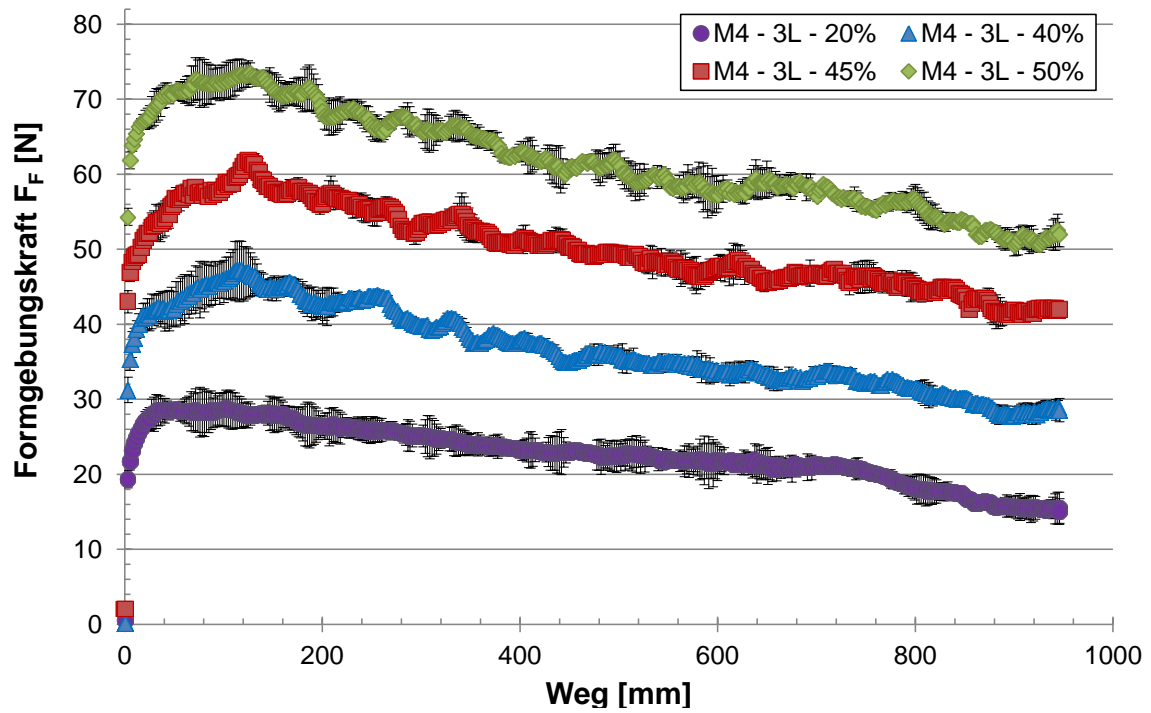
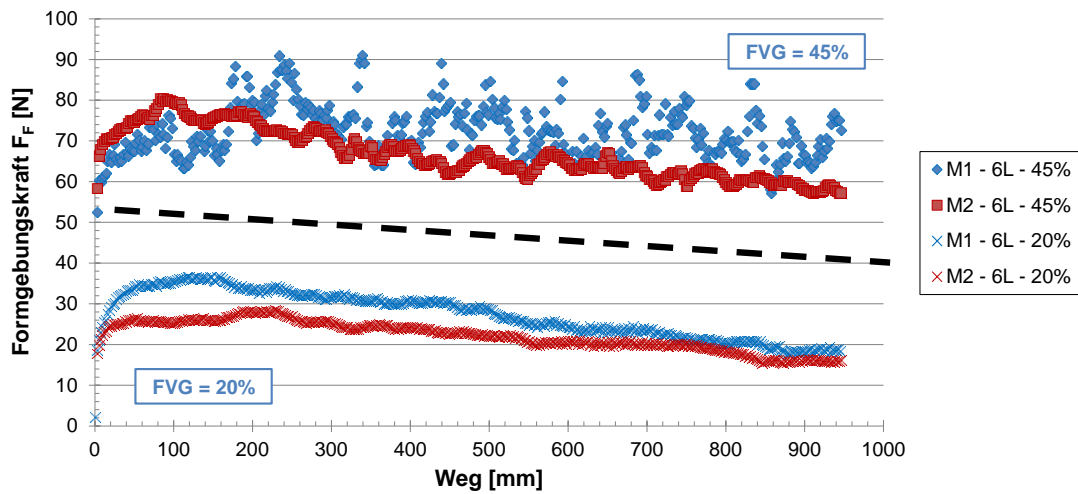
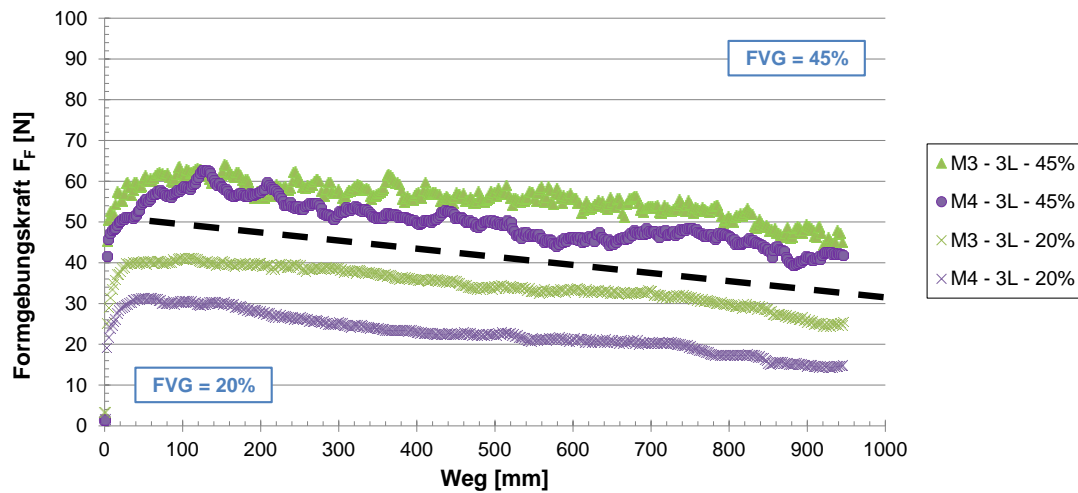


Abbildung 8.15: Kraftverläufe des 600 g/m<sup>2</sup> schweren  $\pm 45^\circ$ -Geleges M4 während der kontinuierlichen Formgebung zu einer T-Profil-Preform bei 20 % (unkompakter Zustand), 40 %, 45 % und 50 % FVG

Kraftverläufe der 300 g/m<sup>2</sup> Gelege M1 und M2 (6-lagig) bei 20 % und 45% FVG



Kraftverläufe der 600 g/m<sup>2</sup> Gelege M2 und M4 (6-lagig) bei 20 % und 45 % FVG



Kraftverläufe des 600 g/m<sup>2</sup> Geleges M5 (3-lagig) bei 20 % und 45 % FVG

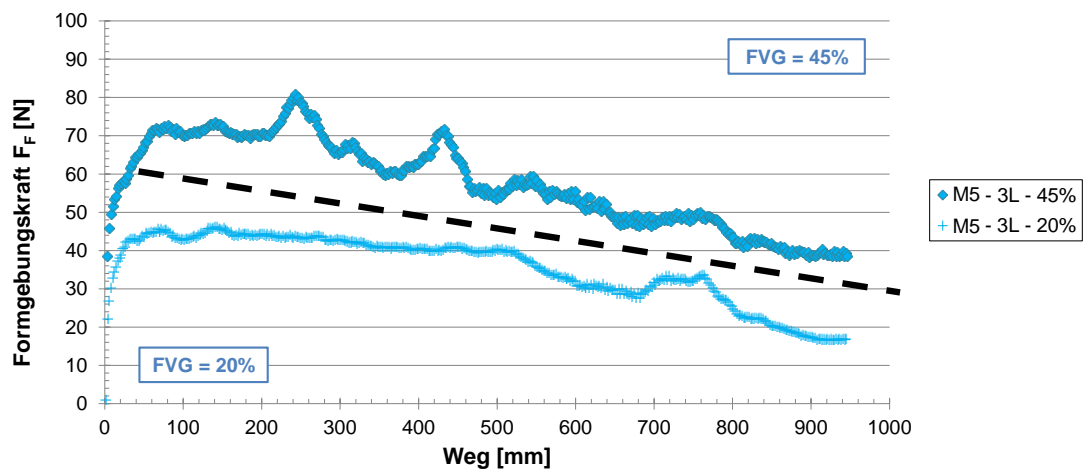


Abbildung 8.16: Kraftverläufe der fünf Ein-Materialkombinationen (M1 - M5) während der kontinuierlichen Formgebung zu einer T-Profil-Preform bei 20 % (unkompakter Zustand) und bei 45 % FVG

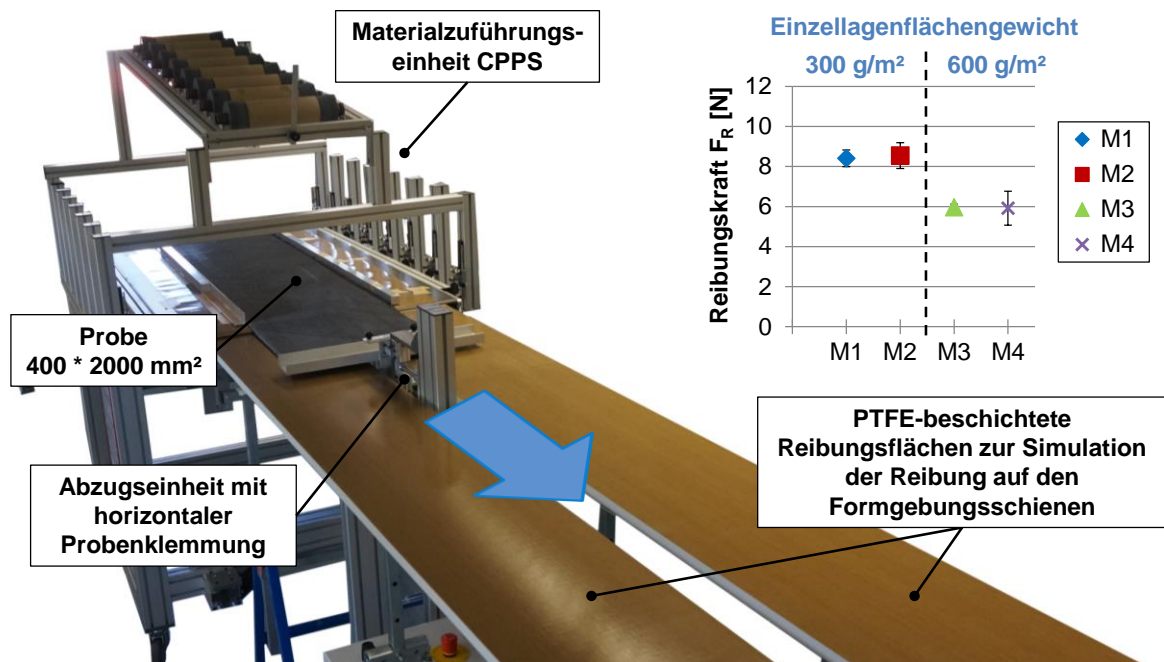


Abbildung 8.17: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Reibungskraftanteile ohne Kraftanteile von Biegung und Kompaktierung (links); Übersicht der resultierenden Reibungskräfte der 300 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M1 und M2 sowie der 600 g/m<sup>2</sup> schweren Gelege M3 und M4 (rechts)

## 9 Betreute studentische Arbeiten

Niedens, Helena: Vergleich eines neuartigen Fertigungsprozesses für die Herstellung kontinuierlich vernähter FKV-Profil-Preforms mit dem Stand der Technik. IVW-Bericht 12-074, 2012

Grabowski, Pawel: Analyse und Darstellung der Ausfilterungseffekte von Kohlenstoffnanotubes (CNTs) aus CFK und GFK-Laminaten durch experimentelle Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit. IVW-Bericht 13-020, 2013

Scholl, Henning: Quantifizierung von Prozesskräften zur Optimierung von Drapiersimulationen und kontinuierlichen Produktionsverfahren textiler Faserverbundwerkstoffe. IVW-Bericht 13-024, 2013

Weyh, Julian: Untersuchung des Einflusses von Tränkung auf die Kompaktierungs- und Reibeigenschaften von technischen Textilien. IVW-Bericht 13-051, 2013

Azizi, Siawasch: Einfluss von Material- und Prozessparametern auf Reibvorgänge bei sequenziellen und kontinuierlichen Preformingverfahren. IVW-Bericht 13-052, 2013

Seitz, Sebastian: Untersuchung des Einflusses der Preformtechnik auf die Imprägnier- und Reibeigenschaften von technischen Textilien. IVW-Bericht 13-055, 2013

Cassola, Stefano: Untersuchung des Einflusses der Nähetechnologie auf die Handlingeigenschaften von textilen Preforms. IVW-Bericht 13-065, 2013

Müller, Christian: Untersuchung von Preformingprozessen und deren Einflüsse auf das Materialverhalten in der Gesamtprozesskette Preform-LCM. IVW-Bericht 14-025, 2014

Özen, Süleyman: Analyse und Darstellung der Ausfilterungseffekte in Dickenrichtung von CNT dotierten Faserkunststoffverbunden. IVW-Bericht 14-027, 2014

Böhm, Christian: Einfluss des Biegeverhaltens trockener textiler Halbzeuge beim kontinuierlichen Preforming. IVW-Bericht 14-059, 2014

Yilmaz, Mehmet: Einfluss von Material- und Prozessparametern auf textiles Reib- und Drapierverhalten beim kontinuierlichen Preforming. IVW-Bericht 14-076, 2014

Collet, Pascal: Untersuchung des Reibverhaltens von technischen Textilien für sequenzielle und kontinuierliche Preformingverfahren. IVW-Bericht 14-082, 2014

Mao, Mao: Modellbildung für die Ermittlung von Reibkoeffizienten textiler Faserstrukturen für die Prozessoptimierung des Preform-RTM. IVW-Bericht 14-086, 2014

Cassola, Stefano: Herstellung und Evaluierung von Eigenschaftsprofiländerungen bei RTM-Demobauteilen basierend auf vernähten Preforms. IVW-Bericht 14-079, 2014

Spanier, Miriam: Einfluss des Kompaktierungsverhaltens trockener textiler Halbzeuge beim kontinuierlichen Preforming. IVW-Bericht 14-087, 2014

Backes, Kathrin: Entwicklung und Validierung einer Vorrichtung zur Ermittlung von Textil-Textil Reibkoeffizienten. IVW-Bericht 14-093, 2014

Cassola, Stefano: Analyse des Textilverhaltens von CF-Gelegen beim kontinuierlichen Preforming. IVW-Bericht 15-040, 2015

Kappis, Paul: Modellbildung von Reib-, Biege- und Kompaktierungsversuchen textiler Halbzeuge zur Prozessoptimierung des Preform-RTM. IVW-Bericht 15-046, 2015

## 10 Publikationen

### Zeitschriften (mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung)

Kadlec, M., Hron, R., Grieser, T.: Damage tolerance of composite T-sections made of cost-effective carbon fibre preforms. Composite Structure Journal, 2014

Grieser, T., Mitschang, P.: Investigation of the Compaction Behavior of Carbon Fiber NCF for Continuous Preforming Processes. DOI: 10.1002/pc.23854, Polymer Composites, 2015

### Zeitschriften (ohne wissenschaftliche Qualitätssicherung)

Grieser, T., Mitschang, P.: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH entwickelt Preforminganlage für die kontinuierliche Herstellung vernähter FKV-Profile. CCEV News, 2012

Becker, D., Grieser, T., Arnold, A., Mitschang, P.: Preform-LCM: Schlüsselemente zur Effizienzsteigerung. Werkstoffe in der Fertigung, 2013

Grieser, T., Mitschang, P.: Entwicklung eines Profil-Preforming Systems für die Herstellung von Versteifungsstrukturen. Composite World (MaschinenMarkt), 2014

Grieser, T., Mitschang, P.: Kontinuierliches Profil-Preforming für Versteifungsstrukturen. Lightweight Design, 2014

### Symposien- und Konferenzbeiträge (Vorträge)

Grieser, T., Rieber, G., Mitschang, P.: Processing and Evaluating CNT Doped Glass Fiber Epoxy Laminates Produced by RTM. Sampe Conference, Long Beach, 2011

Grieser, T., Mitschang, P.: Production of continuously formed high performance preforms for FRPC profiles. ECCM 15, Venedig, 2012

Becker, D., Arnold, M., Grieser, T., Rieber, G., Mitschang, P.: Cutting edge developments for RTM: preforming, draping, injection. IVW Kolloquium, Kaiserslautern, 2012

Grieser, T., Mitschang, P., Bonduel, D., Delgado, S., Ebenhoch, A., Vandeuren, M.: Production and analysis of CNT doped CFRPC laminates according to different manufacturing technologies. Nano Symposium, Leuven, 2013

Grieser, T., Mitschang, P.: Influence of textile parameters on the manufacturing of continuously formed preform profiles. TexComp11, Leuven, 2013

Grieser, T., Mitschang, P.: Investigation of CNT filtering according to in-plane and out-of-plane LCM injection strategies. ICCM19, Montreal, 2013

Grieser, T., Mitschang, P.: Herstellung und Analyse von CNT dotierten glas- und kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen unter Verwendung verschiedener Harzinjektions-verfahren. Inno.CNT Jahreskongress, Karlsruhe, 2014

### **Symposien- und Konferenzbeiträge (Poster)**

Grieser, T., Mitschang, P.: Textile Reinforced Thermosets - Development of a Continuous Profile Preforming System for FRPC. IVW-Kolloquium, Kaiserslautern, 2012