

Fakultät für Maschinenwesen

Zur Entstehung und Auswirkung von Garnlücken in Carbonbiaxialgeflechten

Andreas Mierzwa

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Lieleg

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Thomas Gries

Die Dissertation wurde am 21.02.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.05.2019 angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: info@lcc.mw.tum.de

Web: www.lcc.mw.tum.de

DANKSAGUNG

Zuerst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler bedanken. Er gab mir die Möglichkeit, am Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München zu promovieren. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries vom Lehrstuhl für Textilmaschinenbau und Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen für seine Bereitschaft, die Arbeit als Zweitprüfer zu betreuen. Diese Dissertation fand im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts statt, weswegen mein Dank ebenso an das Ministerium für Wirtschaft und Energie gerichtet ist.

Natürlich möchte ich mich ebenfalls bei Dr. Elisabeth Ladstätter, Dr. Christoph Ebel und Dr. Swen Zaremba bedanken. Ihr habt Euch stets die Zeit für Diskussionen genommen, aus denen ich so viel mitgenommen habe.

Ebenso sage ich „Dankeschön“ an meine tollen Kollegen des Lehrstuhls für Carbon Composites, insbesondere Tobias Harbers, Philipp Kammerhofer, Maximilian Mitwalsky, Felix Michl, Bernhard Horn, Jan Krollmann, Luciano Avila-Gray, Kalle Kind, Maximilian Schäfer, Peter Kuhn, Reiner Rauch und Bastian Behrens. Die Zeit am Lehrstuhl war etwas ganz Besonderes. Weiterer Dank gebührt den Studenten Tobias Wolf, Julian Rauch, Matthias Froning, Wolfgang Weber und Olivia Kast.

An dieser Stelle bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern und meinem Bruder, die immer an mich glaubten und mir diesen Weg ermöglichten. Dieser Dank gilt selbstverständlich auch meiner Freundin Janina, die mich zu jeder Zeit unterstützte und mich motivierte. Dank Eurer Hilfe konnte ich diese Arbeit erst meistern.

Puchheim, im Februar 2019

Andreas Mierzwa

KURZFASSUNG

Fehlerarten, die in Carbonbiaxialgeflechten auftreten, unterscheiden sich in Größe, Typ und Ausprägung. Bekannte Fehlerarten in Geflechten sind unter anderem Flechtwinkelabweichungen, Garnlücken oder eine lokale Ansammlung an Filamenten. Dementsprechend können diese Fehlerarten unterschiedliche Auswirkungen auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechts haben. Mindert eine Fehlerart die mechanischen Eigenschaften eines Geflechtbauteils stark, wird dieses als Ausschuss deklariert. Um einen entscheidenden Beitrag zur Ausschussreduktion von Flechtbauteilen zu leisten, müssen die Auswirkungen der kritischsten Fehlerart auf die mechanische Leistungsfähigkeit von Geflechtverbunden identifiziert und die Fehlerursache festgestellt werden. Mehrere Geflechtfehler werden zu Anfang der Arbeit im Rahmen einer Fehler-, Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) theoretisch miteinander verglichen. Durch die Berücksichtigung von prozessrelevanten Aspekten, wird die Garnlücke als kritischste Fehlerart identifiziert. Durch die Analyse der Flechtprozesskette wird eine Fortpflanzung des Fehlers über mehrere Stufen von initialer Ursache bis finaler Ausprägung festgestellt. Die Garnlücke wird durch eine erhöhte Spannung eines Garns verursacht. Die Spannungserhöhung wird wiederum durch einen Filamentring an der Flechtspule erzeugt, welcher erneut auf eine erhöhte Ausgangsschädigung des umgespulten Garns zurückzuführen ist. Der Anstieg der Garnspannung bewirkt eine Verlaufsänderung des betroffenen Garns im Flechtprozess und führt zu einer Lücke zwischen zwei Garnen im Geflecht – der Garnlücke. Die Garnverlaufsänderung nimmt bei einer spezifischen Garnspannung ein Maximum an, was zu einer maximalen Garnlückenbreite führt. Somit hat jede Flechtkonfiguration in Abhängigkeit von den gewählten Flechtprozessparametern eine spezifische maximale Garnlückenbreite.

Mechanische Couponversuche (Zug-, Druck- und Schubversuche) werden auf Basis eines generischen Extremfalls durchgeführt. Die Garnlücken befinden sich in jeder Lage eines Coupons und werden übereinander positioniert. Dank dieser Methodik werden die mechanischen Lastfälle, welche besonders sensibel auf Garnlücken reagieren, eindeutig identifiziert. Die Garnlücken werden manuell in Geflechtcoupons eingebracht, welche im Rahmen von statischen Zug-, Druck- und Schubtests mechanisch geprüft werden. Dabei werden die Garnlücken senkrecht und parallel zur Lastrichtung ausgerichtet. Zudem werden die Prüfkörper sowohl mittels Vacuum-Assisted-Process (VAP) als auch mittels Resin-Transfer-Molding (RTM) hergestellt. Die unterschiedlichen Infiltrationsmethoden führen an der Position der Garnlücke im Falle des Halbschalenprozesses (VAP) zu einer lokalen Reduktion der Wandstärke bzw. zu einer Erhöhung der Garnondulation und im Falle des geschlossenen Werkzeugs (RTM) zu einer gebietsweisen Reduktion des Faservolumengehalts. Deutliche Abfälle in Zug- und Druckfestigkeiten konnten bei den Probenkonfigurationen festgestellt werden, welche eine Lückenausrichtung senkrecht zur Lastrichtung aufwiesen und mittels VAP infiltriert wurden. Es wurden ein 36-%iger Abfall der Zugfestigkeit und ein 33-%iger Abfall der Druckfestigkeit gegenüber der jeweiligen fehlerfreien Referenz festgestellt.

Im Falle der RTM-Prüflinge konnten negative Auswirkungen der Lücken im Schublastfall festgestellt werden. Es konnte kein Einfluss der Zugfestigkeit der RTM-Coupons durch parallel oder senkrecht verlaufende Lücken ausgemacht werden.

Der sensibelste mechanische Lastfall (Zuglast; Lücke senkrecht zur Lastrichtung; VAP-Verfahren) wird im Anschluss die Grundlage für Untersuchungen einzelner Garnlücken in Geflechtlaminaten. Einzelne Garnlücken werden in verschiedenen Lagen in unterschiedlich starken Geflechtlaminaten (zwei- bis sechslagig) eingebracht und die Wandstärkenreduktion an der Position der Garnlücke vermessen. In allen untersuchten Konfigurationen erzeugt eine Garnlücke eine Minderung der Wandstärke. Bei einem zweilagigen Geflechtverbund verringert die Garnlücke die Wandstärke um ca. 21 % und die Zugfestigkeit um ca. 20 %.

Mechanische Versuche an einer Torsionswelle bestätigten die Ergebnisse der Couponprüfung. Das maximale statische Torsionsmoment wird durch eine Garnlücke in einer dreilagigen Torsionswelle um 17 % reduziert. Dies setzt voraus, dass die Welle im VAP-Verfahren infiltriert wird und die Garnlücke das unter Drucklast stehende Garnsystem schwächt. Falls Garnlücken keine Wandstärkenreduktion sondern eine lokale Minderung des Faservolumengehalts hervorrufen, wird das maximale Torsionsmoment nicht abgeschwächt.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit leiten sich mehrere Möglichkeiten ab, um garnlückenbedingten Ausschuss zu reduzieren:

- Durch die Eliminierung von Garnen mit erhöhter Schädigung können Filamentringe an Flechtspulen und dadurch das Auftreten von Garnlücken in Geflechtem verhindert werden.
- Die spezifische maximale Garnlückenbreite sollte in die Auslegung von geflechtbasierten Verbunden einfließen.
- Lokale Wandstärkenreduktionen sind bezüglich der mechanischen Eigenschaften eines geflechtbasierten Verbunds kritischer als lokale Faservolumengehaltsreduktionen.

ABSTRACT

Defects in biaxial braids made of carbon fibers differ in size, type and shape. To that fact, the defects affect the mechanical performance of the braided composite differently. Common defects in biaxial braids are deviations of the braiding angle, yarn gaps and local accumulation of filaments. If the defect reduces the mechanical performance of a braided composite dramatically, the braided component will be declared as reject. In order to reduce reject rates in the production of braided composites, it is necessary to identify the effects of critical defects on the mechanical performance of braided composites and determine the cause of those critical defects. In the beginning of the thesis several defects are theoretically compared by means of a failure mode and effect analysis. By taking production relevant aspects into account, the yarn gap was identified as the most critical braiding defect. Due to the analysis of the braiding process chain it was found out that the defect propagates along the braiding process chain from its original cause to its final stage in the braided preform. The yarn gap is caused by increased tension of a single yarn. The rise of the yarn tension is therefore caused by a fibrous ring on the braiding spool which again is often initiated by enlarged yarn damage of the raw material. The increased yarn tension causes a change in the yarn run in the braiding process and leads to a gap between two yarns in the braided preform. At a specific yarn tension the change in yarn run reaches a maximum which therefore leads to a maximum in yarn gap width.

Mechanical coupon tests (tension, compression and shear tests) were based on a generic extreme case. Every coupon layer contains a yarn gap and the yarn gaps are positioned on top of each other. Due to this method the load case, which reacts the most sensitive to yarn gaps is identified. The yarn gaps were brought manually into the braided coupons and tested in static tensile, compression and shear tests. The yarn gaps run either parallel or perpendicular to the load direction. Moreover, coupons were manufactured in the Vacuum-Assisted-Process (VAP) and the Resin-Transfer-Molding (RTM) process. In the case of the VAP process, the yarn gap leads to a local thickness reduction and to an increase of yarn undulation. The RTM process however, induces a local reduction of fiber volume content. Significant drops in tensile and compression strength were recorded when the yarn gaps run perpendicular to the load direction and the coupons were manufactured in the VAP-process. The tensile strength is reduced by 36 % and the compression strength by 33 % in comparison to a gap-free reference. The RTM-coupons show drops in shear properties but no influence in tensile strength by yarn gaps running parallel or perpendicular to the load direction.

The most sensitive mechanical load case (tensile load; gap runs perpendicular to load direction; VAP processing) is then used for investigations of single gaps. Single yarn gaps were brought into preforms with different amount of layers (two to six layers) and the thickness of the specimens was measured. The yarn gaps led to a thickness reduc-

tion in every configuration. The thickness of a two-layered composite was reduced by 21 % and tensile strength by 20 %.

Mechanical trials of a torque shaft confirmed the results of the tests on coupon level. The maximal torque was reduced due to a single yarn gap by 17 % compared to a gap-free reference. Again, a thickness reduction and an increase in yarn undulation caused the drop in torque. This requires the impregnation by the VAP-process and a yarn run perpendicular to compression strength acting in the torque shaft. If a yarn gap induces a local reduction of fiber volume content, the maximum torque is not affected negatively.

From the results of this thesis several options may be deviate in order to reduce reject rates for braided composite:

- Fibrous rings and therefore yarn gaps may be avoided by eliminating yarns with enlarged yarn damage during the rewinding process.
- The specific maximal yarn gap width needs to be included in the design of braided composites.
- Local reduction in braided composites are more critical with regard to mechanical performance than local reduction of fiber volume content.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Nomenklatur	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Flechtprozesskette trockener Verstärkungsgarne	3
2.1.1 Umspulprozess.....	3
2.1.2 Flechtprozess	5
2.1.3 Liquid Composite Molding-Prozesse	11
2.2 Fehlerarten in geflochtenen Textilien	13
2.2.1 Einordnung von Geflechtfehlern	13
2.2.2 Bisherige Untersuchungen zu Geflechtfehlern und deren Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte von Geflechtverbunden.....	16
2.3 Fehlerarten in anderen faserverstärkten Kunststoffverbundtypen	20
2.3.1 Welligkeiten in gewebe- und gelegebasierten Verbunden	20
2.3.2 Defekte in AFP-Verbunden	24
2.3.3 Ondulationen in multiaxialen Prepreg-Verbunden.....	26
2.3.4 Ondulationen in unidirektionalen Prepreg-Verbunden.....	28
2.4 Zielsetzung der Arbeit.....	31
3 Geflechtfehleranalyse	33
3.1 Methoden des Qualitätsmanagements.....	33
3.2 Anwendung der Prozess-FMEA auf Geflechtfehler	33
3.2.1 Analyse der Fortpflanzungsstufen von Geflechtfehlern entlang der Prozesskette	34
3.2.2 Bewertung von Geflechtfehlern.....	41
3.2.3 Bewertung der Fortpflanzungsstufen einer Garnlücke.....	44
3.3 Rekonstruktion der Entwicklungsstufen von lokalen Garnlücken.....	49

4	Untersuchungen zur Filamentringentstehung	51
4.1	Prüfstand zur Charakterisierung von Filamentringen	52
4.2	Variation möglicher Ursachen der Filamentringentstehung	53
4.2.1	Versuchsparameter	53
4.2.2	Versuchsergebnisse	56
4.2.3	Filamentringkategorien	60
4.3	Einfluss unterschiedlicher Garnausgangsqualität auf die Filamentringentstehung	66
4.3.1	Untersuchte Garne	68
4.3.2	Versuchsergebnisse	69
4.4	Fazit	73
5	Untersuchungen zur Garnlückenentstehung	75
5.1	Methode zur Charakterisierung von Garnlücken	76
5.2	Flecht- und Umspulparameter	77
5.3	Messwertaufnahme	78
5.4	Garnlücken aufgrund schrittweise erhöhter Garnspannung	81
5.4.1	Definiert erhöhte Garnspannungen	81
5.4.2	Auswirkungen auf Prozesskräfte, Garnlücken und deren umgebenden Garne	83
5.5	Garnlückenentstehung aufgrund von provozierten Filamentringen	90
5.5.1	Prozesskraftanalyse	90
5.5.2	Auswirkungen auf Prozesskräfte, Garnlücken und deren umgebende Garne	91
5.6	Fazit	95
6	Auswirkungen von Garnlücken auf mechanische Kennwerte von Geflechtcoupons	97
6.1	Literaturübersicht Kompaktierung trockener Textilien und textilbasierter Verbunde	98
6.2	Couponkonfigurationen	101
6.3	Couponherstellung	104
6.3.1	Geflechtfertigung und Rekonstruktion von Garnlücken	104
6.3.2	LCM-Prozesse	106

6.3.3	Untersuchung der Garnstruktur und des Faservolumengehalts	108
6.3.4	Endbearbeitung der Prüfkörper	111
6.4	Mechanische Prüfung und Diskussion der Ergebnisse	111
6.4.1	Generischer Extremfall	112
6.4.2	Einzel-Lücken-Ansatz	125
6.5	Fazit	132
6.5.1	Generischer Extremfall	132
6.5.2	Einzel-Lücken-Ansatz	133
6.5.3	Abschätzung der Auswirkung von Garnlücken in Fatigueuntersuchungen	134
7	Auswirkungen von Garnlücken auf mechanische Kennwerte einer Torsionswelle	137
7.1	Untersuchungen auf dem Gebiet von Torsionswellen aus Verbundwerkstoffen	137
7.2	Vergleich der Spannungszustände in garnlückenbehafteten Torsionswellen und Coupons	140
7.3	Prüfkörperkonfigurationen	142
7.4	Prüfkörperherstellung	144
7.4.1	Geflechtherstellung und Lückeinbringung	144
7.4.2	Infiltration	146
7.4.3	Überprüfung der Prüfkörperqualität	147
7.4.4	Endbearbeitung der Prüfkörper	149
7.5	Torsionsprüfung	150
7.5.1	Durchführung der Prüfung	150
7.5.2	Ergebnisse der Torsionsprüfung	151
7.5.3	Diskussion der Ergebnisse	154
7.6	Fazit	162
8	Zusammenfassung und Ausblick	165
8.1	Zusammenfassung	165
8.2	Ausblick	168
	Literaturverzeichnis	169
A	Anhang	177

a	Experimentelle Daten.....	177
B	Veröffentlichungen.....	195
C	Betreute studentische Arbeiten	197

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
v_g	$\frac{mm}{s}$	Abzugsgeschwindigkeit Flechtgarn
v_k	$\frac{mm}{s}$	Abzugsgeschwindigkeit Flecht kern
$d_{au\beta en}$	mm	Au\ss endurchmesser
δ	$^\circ$	Bruchwinkel
ε	%	Dehnung
k	-	Faktor
U_k	mm	Flecht kernumfang
φ	$^\circ$	Flecht winkel
n_F	-	Fl\ss elradanzahl
U_F	$\frac{1}{min}$	Fl\ss elraddrehzahl
n_g	-	Garnanzahl
b_g	mm	Garnbreite
η	$^\circ$	Garnkreuzungswinkel
d_{innen}	mm	Innendurchmesser
F	N	Kraft
l	m	L\ss nge
l_{eff}	m	L\ss nge effektiv
σ	MPa	Normalspannung
A_o	mm	Ondulationsamplitude
L_o	mm	Ondulationsperiodenl\ss nge

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
α	°	Ondulationswinkel
A_F	N	Prozesskraftamplitude
r_{max}	mm	Radius maximal
γ	%	Schubdehnung
τ	MPa	Schubspannung
β	-	Verhältnis zwischen τ und φ
n	-	Spulenummer
c	mm	Stababstand
Tt	tex	Titer
J	mm ⁴	Torsionsflächenmoment
T	Nm	Torsionsmoment
T_{max}	Nm	Torsionsmoment maximal
U_U	$\frac{1}{min}$	Umspuldrehzahl
$t_{Kl\ddot{o}ppel}$	s	Zeit, die ein Klöppel benötigt, um den Flechtmaschinenrumpf zu umrunden

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AFP	Automated fiber placement
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVK	Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLT	Classical laminate theory
CV	Coefficient of variation
DIC	Digital image correlation
DMS	Dehnmessstreifen
FA	Fehlerauswirkung
FMEA	Fehler-, Möglichkeits- und Einflussanalyse
FR	Filamentring
FTA	Fehlerbaumanalyse
FU	Fehlerursache
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
HT	High tenacity
ILSS	Interlaminar shear strength
IM	Intermediate modulus
LCM	Liquid-Composite-Molding
M	Modifiziertes VAP
NASA	National Aeronautics and Space Administration

Abkürzung	Beschreibung
NCF	Non crimp fabric
PTFE	Polytetrafluorethylen
R	Garnlückenfreie Referenz
RIFT	Resin infusion under flexible tooling
RPZ	Risikoprioritätszahl
RTM	Resin-Transfer-Molding
UD	Unidirektional
VAP	Vaccum-Assisted-Process
ZGS	Zuggarnspannung

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Kosten pro Fehler in Abhängigkeit der Produktphasen.....	2
Abb. 2-1: Flechtprozesskette zur Verarbeitung von trockenen Verstärkungsgarnen	3
Abb. 2-2: Umspulanlage bestehend aus Gatter und Spulmaschine. Im Gatter ist nur eine Mutterspule dargestellt.....	4
Abb. 2-3: Traverse und Spindeln der Spulmaschine	5
Abb. 2-4: Detaillierte Ansicht einer eingespannten Flechtspule in der Umspulmaschine	5
Abb. 2-5: Manuell hergestellte Litze aus einem Kohlenstofffaser-, Glasfaser- und Commingled-Garn	6
Abb. 2-6: Ausschnitt einer Flechtmaschine mit radial ausgerichteten Flechtspulen	6
Abb. 2-7: Radialflechtmaschine mit robotergestützter Kernführung.....	8
Abb. 2-8: Axialer Schnitt eines Klöppels mit Hebelsystem. Abbildung auf Basis von Kyosev [13]	9
Abb. 2-9: Definition von Geflechtparametern anhand eines geschlossenen, biaxialen Geflechts.....	10
Abb. 2-10: Prinzip des VAP-Aufbaus.....	12
Abb. 2-11: Prinzip des RTM-Verfahrens	13
Abb. 2-12: Global abstehende Filamentfragmente eines mit zu hoher Garnspannung hergestellten Geflechts.....	14
Abb. 2-13: Lokale Filamentansammlung an einem Biaxialgeflecht.....	14
Abb. 2-14: Garnschlaufe eines Biaxialgeflechts (aus [20])	15
Abb. 2-15: Garnlücke	15
Abb. 2-16: Garnriss	15
Abb. 2-17: Flechtwinkelabweichung	16
Abb. 2-18: Unvollständiger Bedeckungsgrad	16
Abb. 2-19: Prüfkörperform (Seitenansicht).....	23
Abb. 2-20: Garnondulationen (in der xy-Ebene) eines sechslagigen Laminats hervorgerufen durch Kunststoffstäbe mit einem Durchmesser von 0,5 mm.	24
Abb. 2-21: Prüfkörperkonfigurationen mit eingebrachten Lücken (rot).....	25

Abb. 2-22: Messung Ondulationswinkel α	26
Abb. 2-23: Drei verschiedene Modelle eines Volumenelements mit abnehmendem Grad der Garnondulation	29
Abb. 2-24: Verschiedene Versagensmoden (rote Markierung)	30
Abb. 3-1: Mögliche initiale Fehlerursachen und -fortpflanzung im Fall von gebrochenen Filamenten (global)	34
Abb. 3-2: Mögliche initiale Fehlerursachen und -fortpflanzung im Fall von gebrochenen Filamenten (lokal)	36
Abb. 3-3: Lokale Filamentansammlung an einer 180°-Umlenkungen eines Klöpfels des Typs IFDA-100 (Fa. Herzog)	37
Abb. 3-4: Mögliche initiale Fehlerursachen und –fortpflanzung im Fall von Garnschlaufen.....	37
Abb. 3-5: Mögliche initiale Fehlerursachen einer Garnlücke während des Flechtprozesses.....	38
Abb. 3-6: Mögliche initiale Fehlerursachen einer Garnlücke, welche durch eine prozessbedingte Garnspannungserhöhung entsteht.....	39
Abb. 3-7: Mögliche initiale Fehlerursachen im Fall von unvollständiger Bedeckung und Flechtwinkelabweichung.....	40
Abb. 3-8: Fünf FMEAs entlang der Flechtprozesskette (x=1 bis x=5)	41
Abb. 3-9: Darstellung eines Filamentrings (rot) an einer Flechtspule.....	47
Abb. 3-10: Rekonstruktionsstufen an der Fehlerentwicklung und Flechtprozesskette	50
Abb. 4-1: Erste Stufe der Rekonstruktionsmethode: Rekonstruktion von Filamentringen.....	51
Abb. 4-2: Abspulprüfstand	52
Abb. 4-3: Modifizierte Umspulanlage inklusive einer Vorrichtung zur künstlichen Garnschädigung	54
Abb. 4-4: Traversenumkehrpunkte und Änderung der Form des Garnmaterials auf der Flechtspule (Flechtspule im Schnitt)	55
Abb. 4-5: Abzugslänge in Abhängigkeit der Garnschädigung.....	56
Abb. 4-6: Schnitt durch die Flechtspule während des Umspulprozesses	57
Abb. 4-7: Modell der Filamentringentstehung während des Abspulens der zweiten Lage Garnmaterial	57

Abb. 4-8: Filamentringentstehung während des Abspulens der zweiten Lage Garnmaterial.....	57
Abb. 4-9: Abzugslänge in Abhängigkeit der Verlegung.....	58
Abb. 4-10: Kreuzungswinkel zwischen Garnlagen in Abhängigkeit der Verlegung.....	58
Abb. 4-11: Abzugslänge in Abhängigkeit der Umspulgarnspannung.....	59
Abb. 4-12: Abzugslänge in Abhängigkeit des Traversenumkehrpunkts.....	60
Abb. 4-13: Garnspannung über Abzugslänge einer filamentringfreien Garnspule.....	61
Abb. 4-14: Garnspannung über Abzugslänge einer filamentringfreien Garnspule (kleinerer Achsenabschnitt)	61
Abb. 4-15: Filamentring der Kategorie 1 an unterem Spulenende. Spulenbezeichnung n7	62
Abb. 4-16: Filamentring der Kategorie 1 an oberem Spulenende. Spulenbezeichnung n6	62
Abb. 4-17: Garnspannung über Abzugslänge einer Spule mit einem Filamentring der Kategorie 1	62
Abb. 4-18: Detailaufnahme von FR 1 der Versuchsspule n49.....	63
Abb. 4-19: Detailaufnahme von FR 2 Versuchsspule n49.....	63
Abb. 4-20: Garnspannung über Abzugslänge einer Spule (n49) mit zwei Filamentringen (FR 1 und FR 2) der Kategorie 2.....	63
Abb. 4-21: Detailaufnahme von FR 1 der Versuchsspule n49.....	65
Abb. 4-22: Detailaufnahme von FR 2 der Versuchsspule n49.....	65
Abb. 4-23: Garnspannung über Abzugslänge einer Spule (n43) mit einem Filamentring der Kategorie 3	65
Abb. 4-24: Filamentring der Kategorie 3 (Spule n43)	66
Abb. 4-25: Filamentring der Kategorie 3 (Spule n86)	66
Abb. 4-26: Abspulprüfstand für Mutterspulen zur Messung von Garnschädigung mittels optischer Detektion	67
Abb. 4-27: Histogramm des T700 24k 60E-Garns (neu)	69
Abb. 4-28: Histogramm des T700 24k 50C-Garns (neu).....	70
Abb. 4-29: Histogramm des T700 24k 50C-Garns (alt).....	70
Abb. 4-30: Histogramm des IMS 65-Garns (neu).....	71
Abb. 4-31: Histogramm des IMS 65-Garns (alt).....	71

Abb. 4-32: Prozentualer Anteil an Flechtspulen, die aufgrund von natürlicher Garnschädigung Filamentringe ausbilden	73
Abb. 5-1: Zweite Stufe der Rekonstruktionsmethode: Rekonstruktion von lokalen Garnlücken.....	75
Abb. 5-2: Versuchsaufbau mittels Kraftsensorik an der Kerneinspannung einer Flechtanlage.....	76
Abb. 5-3: Prozesskraft über Weg des Referenzversuchs (kein Zuggarn).....	79
Abb. 5-4: Prozesskraft über Weg bei einer Garnspannung eines Zuggarns von 40 N	79
Abb. 5-5: Bezeichnungen innerhalb des Messfelds.....	80
Abb. 5-6: Klöppel erweitert mit zusätzlicher Umschlingungsbremse.....	82
Abb. 5-7: Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	85
Abb. 5-8: Garnverlauf in der Konvergenzzone bei unterschiedlichen Zuggarnspannungen (ZGS). Diese Abbildung basiert auf [62, p. 449]	86
Abb. 5-9: Garnlückenentstehung während der Geflechtbildung eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	86
Abb. 5-10: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch bei einer mittleren Prozesskraftamplitude von 51,78 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	87
Abb. 5-11: Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 50k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	89
Abb. 5-12: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 71,88 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	90
Abb. 5-13: Prozesskraftanstieg bei der Verarbeitung einer Zugspule der Kategorie 3 (Spulenbezeichnung: n8)	91
Abb. 5-14: Verlauf der Garnlückenbreiten über die Geflechtlänge bei einer Zugspule der Kategorie 2. (Spulenbezeichnung: n12)	92
Abb. 5-15: Zugspule der Kategorie 2 (Spulenbezeichnung: n12)	92
Abb. 5-16: Verlauf der Garnlückenbreiten über die Geflechtlänge bei einer Zugspule der Kategorie 3. (Spulenbezeichnung: n8)	93
Abb. 5-17: Zugspule der Kategorie 3 (Spulenbezeichnung: n8)	94

Abb. 5-18: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts bei einer Geflechtlänge von 859 mm und einer Zugspule der Kategorie 3. (Spulenbezeichnung: n8).....	94
Abb. 6-1: Dritte Stufe der Rekonstruktionsmethode: Rekonstruktion der Auswirkungen von Garnlücken auf die mechanischen Kennwerte eines Geflechtverbunds	97
Abb. 6-2: Einzellagendicke über Kompaktierungsdruck unter Berücksichtigung der Lagenanzahl. Qualitative Darstellung. Auf Basis von [29]	98
Abb. 6-3: Einzellagendicke über Kompaktierungsdruck unter Berücksichtigung unterschiedlicher Halbzeugtypen. Qualitative Darstellung. Auf Basis von [64]	98
Abb. 6-4: Bindungstypen: a) Leinwandbindung; b) Körperbindung 3/1; c) Atlasbindung	99
Abb. 6-5: Einzellagendicke über Kompaktierungsdruck von Geweben mit unterschiedlichen Abbindungsarten. Auf Basis von [65]	99
Abb. 6-6: Couponkonfigurationen	103
Abb. 6-7: Geflechtprobenplatte für die Herstellung von Zug- und Druckcoupons mit eingezeichnetem Probepplatten- und Couponkoordinatensystem	105
Abb. 6-8: Geflechtprobenplatte für die Herstellung von Schubcoupons mit eingezeichnetem Probepplatten- und Couponkoordinatensystem	105
Abb. 6-9: Überprüfung der Garnlückenbreite einer Zug-Lücke 0°-Konfiguration	106
Abb. 6-10: Untere Werkzeughälfte des RTM-Plattenwerkzeugs mit lückenfreier Preform und Einlegern	107
Abb. 6-11: VAP-Aufbauten der Zugprüfkörperkonfigurationen (Lücke 90°, Referenz, Lücke 0°)	108
Abb. 6-12: Mikroskopbilder lückenfreier Referenzproben hergestellt mittels VAP- und RTM-Verfahren	109
Abb. 6-13: Wandstärken der hergestellten VAP- und RTM-Probenplatten	109
Abb. 6-14: Faservolumengehalte der hergestellten VAP- und RTM-Probenplatten	109
Abb. 6-15: Mikroskopaufnahmen lückenbehafteter Coupons hergestellt mittels VAP- und RTM-Verfahren	110
Abb. 6-16: Druck-Lücke 0°-Prüfkörper im Klebewerkzeug.....	111
Abb. 6-17: Zugfestigkeit der geprüften VAP- und RTM-Zugproben	112

Abb. 6-18: Bruchdehnung der geprüften VAP- und RTM-Zugproben	112
Abb. 6-19: Zugsteifigkeit der geprüften VAP- und RTM-Zugproben	113
Abb. 6-20: Repräsentative Spannungs-Dehnungs-Kurven aller Konfigurationen der Zugprüfung.....	114
Abb. 6-21: Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Zugprobe	114
Abb. 6-22: Bruchbild einer VAP-Referenzzugprobe	115
Abb. 6-23: Dehnungsfeld einer VAP-Referenzzugprobe mit drei Schnitten in x- Richtung	115
Abb. 6-24: X-Dehnung über die x-Koordinate für Schnitt 1, 2 und 3 einer VAP- Referenzzugprobe.....	116
Abb. 6-25: Dehnungsfeld einer VAP-Lücke 90°-Zugprobe mit drei Schnitten in x-Richtung	117
Abb. 6-26: X-Dehnung über die x-Koordinate für Schnitt 1, 2 und 3 einer VAP- Lücke 90°-Zugprobe.....	117
Abb. 6-27: Dehnungsfeld einer VAP-Lücke 0°-Zugprobe mit drei Schnitten in y- Richtung	118
Abb. 6-28: X-Dehnung über die x-Koordinate für Schnitt 1, 2 und 3 einer VAP- Lücke 0°-Zugprobe.....	119
Abb. 6-29: Druckfestigkeit der geprüften VAP- und RTM-Druckproben	120
Abb. 6-30: Bruchstauchung der geprüften VAP- und RTM-Druckproben	120
Abb. 6-31: Drucksteifigkeit der geprüften VAP- und RTM-Druckproben	120
Abb. 6-32: Repräsentative Druckspannungs-Stauchungs-Kurven verschiedener RTM-Druckprobenkonfigurationen	121
Abb. 6-33: Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Druckprobe.....	122
Abb. 6-34: Bruchbild einer VAP-Referenzdruckprobe	122
Abb. 6-35: Bruchbilder der Druckprüfkörper: Probe 1 und Probe 2 der VAP- Lücke 0°-Konfiguration	122
Abb. 6-36: Schubfestigkeiten der geprüften VAP- und RTM-Schubproben	123
Abb. 6-37: Schubsteifigkeiten der geprüften VAP- und RTM-Schubproben	124
Abb. 6-38: Repräsentative Schubspannungs-Schubdehnungs-Verläufe aller RTM- und VAP-Couponkonfigurationen	125
Abb. 6-39: Darstellung der Probenkonfigurationen zur Untersuchung der Auswirkungen von einzelnen Garnlücken auf die Wandstärke	126
Abb. 6-40: Mikroskopaufnahmen der Proben 2_1-1 und 2_2-1.....	127

Abb. 6-41: Repräsentative Wandstärkenverläufe von lückenbehafteten Laminaten mit Garnlücken jeweils in der ersten und zweiten Lage	128
Abb. 6-42: Relative minimale Wandstärke zweilagiger Laminare ohne Garnlücke (Referenz) und mit einzelnen Garnlücken (in verschiedenen Lagen)	128
Abb. 6-43: Relative minimale Wandstärke dreilagiger Laminare ohne Garnlücke (Referenz) und mit einzelnen Garnlücken in verschiedenen Lagen	130
Abb. 6-44: Relative minimale Wandstärke vierlagiger Laminare ohne Garnlücke (Referenz) und mit einzelnen Garnlücken in verschiedenen Lagen	130
Abb. 6-45: Relative minimale Wandstärke sechslagiger Laminare ohne Garnlücke (Referenz), mit sechs Garnlücken (Extremfall) und einzelnen Garnlücken in verschiedenen Lagen	131
Abb. 6-46: Vergleich der Zugfestigkeiten der Extremfall- und Einzel-Lücken-Prüfkörper. Garnlückenverlauf senkrecht zur Zugrichtung	132
Abb. 6-47: Relative minimale Wandstärke bei einer Garnlücke in der ersten Lage bei Halbzeugen mit unterschiedlicher Lagenanzahl	134
Abb. 7-1: Schubspannungszustände und äquivalente Hauptspannungen einer Torsionswelle mit $\pm 45^\circ$ -Lagenaufbau bei positiven Drehmoment (a) und negativen Drehmoment (b)). Auf Basis von Schürmann [80, p. 666]	138
Abb. 7-2: Unterschiedliche Drehmomentrichtungen zweier Torsionswellen mit jeweils einer Garnlücke in -45° (Bauteilkoordinatensystem).	140
Abb. 7-3: Schubspannungszustand und äquivalenter Hauptspannungszustand bei positivem Drehmoment und einer in -45° verlaufenden Garnlücke (rot). Auf Basis von Schürmann [80, p. 666]	141
Abb. 7-4: Schubspannungszustand und äquivalenter Hauptspannungszustand bei negativem Drehmoment und einer in -45° verlaufenden Garnlücke (rot). Auf Basis von Schürmann [80, p. 666]	141
Abb. 7-5: Übertragung der Spannungszustände von Bauteilebene auf Couponebene	142
Abb. 7-6: Erste Geflechtlage eines Torsionswellen-Rohlings mit einer Garnlücke	145
Abb. 7-7: Lückenhafte Geflechtpreform umwickelt mit Druckblech	146
Abb. 7-8: Abreißband umwickelt um Geflechtpreform und Druckblech	146
Abb. 7-9: Modifizierter VAP-Aufbau mit angelegtem Vakuum vor der Infiltration	147

Abb. 7-10: Fertiger Rohling aus dem zwei Torsionswellen entnommen werden. Hergestellt im modifizierten VAP-Verfahren	147
Abb. 7-11: Wandstärken der Torsionswellen (im fehlerfreien Bereich)	148
Abb. 7-12: Wandstärken an der Position der Garnlücken	148
Abb. 7-13: Innendurchmesser der verschiedenen Torsionswellenkonfigurationen ...	149
Abb. 7-14: Zwei präparierte Krafteinleitungselemente und eine Torsionswelle vor dem Verkleben	150
Abb. 7-15: Messaufbau an der Torsionsprüfmaschine	151
Abb. 7-16: Detaillierte Aufnahme der gesprenkelten Torsionswelle	151
Abb. 7-17: Maximale Torsionsmomente aller Prüfkörperkonfigurationen	152
Abb. 7-18: Schubfestigkeit aller Prüfkörperkonfigurationen	152
Abb. 7-19: Schubdehnung über Laststufen und Epsilon ϵ_{xy} über Laststufen	153
Abb. 7-20: Schubdehnungen aller Prüfkörperkonfigurationen	154
Abb. 7-21: Zerstörte fehlerfreie Referenztorsionswelle (T700 R1) nach positivem Drehmoment und dem Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern	155
Abb. 7-22: Epsilon-xy-Feld der T700 R1-Probe eine Zeitstufe vor totalem Versagen. Drehung in positiver Richtung	156
Abb. 7-23: Zerstörte fehlerfreie Referenztorsionswelle (T700 R4) nach negativem Drehmoment und der Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern	157
Abb. 7-24: Zerstörte VAP-Probe (T700 V2) nach negativen Drehmoment und der Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern	158
Abb. 7-25: Epsilon-xy-Feld der T700 V2-Probe eine Zeitstufe vor totalen Versagen. Drehung in negativer Richtung	159
Abb. 7-26: Zerstörte VAP-Probe (T700 V1) nach positiven Drehmoment und der Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern	160
Abb. 7-27: Epsilon-xy-Feld der T700 V1-Probe eine Zeitstufe vor totalen Versagen. Drehung in positiver Richtung	161
Abb. 7-28: Zerstörte T700 M3-Probe nach positiven Drehmoment.....	161
Abb. 7-29: Zerstörte T700 M2-Probe nach negativem Drehmoment.....	162
Abb. A-1: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Referenzzugprobe	186
Abb. A-2: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 0°-Zugprobe	186

Abb. A-3: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Zugprobe.....	186
Abb. A-4: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Referenzzugprobe	187
Abb. A-5: Dehnungsfeld einer RTM-Referenzzugprobe mit drei Schnitten in x- Richtung	187
Abb. A-6: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 0°-Zugprobe	188
Abb. A-7: Dehnungsfeld einer RTM-Lücke 0°-Zugprobe mit drei Schnitten in y-Richtung.....	188
Abb. A-8: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 90°-Zugprobe	188
Abb. A-9: Dehnungsfeld einer RTM-Lücke 90°-Zugprobe mit drei Schnitten in x-Richtung.....	188
Abb. A-10: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Referenzdruckprobe	189
Abb. A-11: Repräsentative Bruchbilder von VAP-Lücke 0°-Druckproben	189
Abb. A-12: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Druckprobe	189
Abb. A-13: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Referenzdruckprobe.....	190
Abb. A-14: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 90°-Druckprobe	190
Abb. A-15: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 0°-Druckprobe	190
Abb. A-16: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Referenzschubprobe	191
Abb. A-17: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 45°-Schubprobe	191
Abb. A-18: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Referenzschubprobe	192
Abb. A-19: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 45°-Schubprobe	192

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Einstufung und Bewertung des Kriteriums „Aufretenswahrscheinlichkeit“	41
Tab. 3-2: Einstufung und Bewertung des Kriteriums „Bedeutung“	42
Tab. 3-3: Einstufung und Bewertung des Kriteriums „Entdeckungswahrscheinlichkeit“	42
Tab. 3-4: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Fehlerursachen (FMEA ₁)	43
Tab. 3-5: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für Garnlücken (FMEA ₂).....	45
Tab. 3-6: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für prozessbedingte Garnspannungserhöhungen (FMEA ₃).....	46
Tab. 3-7: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für Filamentringe an einer Flechtspule (FMEA ₄)	47
Tab. 3-8: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für schwankende Garnqualität (FMEA ₅).....	48
Tab. 4-1: Relevante Flechtparameter für Abspulversuche	52
Tab. 4-2: Parametersatz zur Spulenvorbereitung.....	54
Tab. 4-3: Übersicht der untersuchten 24k-Garne. Mit jeweiligen Charakteristika [55, 58] und ausgewerteter Garmlängen.....	68
Tab. 4-4: Umspulparametersatz zur Untersuchung unterschiedlicher Garnqualität.....	72
Tab. 4-5: Umfang der Abzugsversuche mit unterschiedlicher Garnausgangsqualität	72
Tab. 5-1: Umspulparameter des 24k- und 50k-Garns	77
Tab. 5-2: Flechtparameter für Flechtversuche auf Basis des 24k und 50k-Garns.....	78
Tab. 5-3: Parametereinstellungen zur Erreichung von Zuggarnspannungen für 24k-Flechtversuche. Verifizierung erfolgte am Abspulprüfstand.....	82
Tab. 5-4: Parametereinstellungen zur Erreichung von Zuggarnspannungen für 50k-Flechtversuche. Verifizierung erfolgte am Abspulprüfstand.....	83
Tab. 5-5: Prozesskraftamplitude in Abhängigkeit der Zuggarnspannung eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	84
Tab. 5-6: Parametereinstellung zur Erreichung der zusätzlichen Prozesskraftamplitude im Rahmen der 24k-Flechtversuche.....	84

Tab. 5-7:	Prozesskraftamplitude über Zuggarnspannung eines biaxialen 50k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	88
Tab. 5-8:	Parametereinstellungen zur Erreichung der Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} der 50k-Flechtversuche	88
Tab. 6-1:	Flechtparameter zur Herstellung von Geflechtcoupons	104
Tab. 6-2:	Übersicht des Einflusses von Garnlücken (generischer Extremfall) auf die Festigkeiten	133
Tab. 7-1:	Auflistung der Versuchsparameter	143
Tab. 7-2:	Flechtparameter zur Herstellung von Geflechtcoupons	144
Tab. 7-3:	Übersicht des Einflusses von Garnlücken auf das maximale Torsionsmoment einer Torsionswelle	163
Tab. A-1:	Umspulparameter der Versuchsspulen	177
Tab. A-2:	Daten der Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	179
Tab. A-3:	Daten zu Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 50k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	179
Tab. A-4:	Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 5,42 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	180
Tab. A-5:	Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 8,16 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	180
Tab. A-6:	Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 13,19 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	180
Tab. A-7:	Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 18,52 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	181
Tab. A-8:	Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 22,52 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel	181

Tab. A-9: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 30,88N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	181
Tab. A-10: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 40,21 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	182
Tab. A-11: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 51,78 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	182
Tab. A-12: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 14,76 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	183
Tab. A-13: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 28,99 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	183
Tab. A-14: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 39,19 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	183
Tab. A-15: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 45,81 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	184
Tab. A-16: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 53,72 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	184
Tab. A-17: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 71,88 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel.....	184
Tab. A-18: LCM-Prozessdaten zur Couponherstellung im VAP- und RTM- Verfahren	185
Tab. A-19: Übersicht über die Zugfestigkeiten, Zugsteifigkeiten und der Bruchdehnung der VAP-Zugprüfkörper	186
Tab. A-20: Übersicht über die Zugfestigkeiten, Zugsteifigkeiten und der Bruchdehnung der RTM-Zugprüfkörper	187
Tab. A-21: Übersicht über die Druckfestigkeiten, Drucksteifigkeiten und Bruchdehnung der VAP-Druckprüfkörper.....	189
Tab. A-22: Übersicht über die Druckfestigkeiten, Drucksteifigkeiten und Bruchdehnung der RTM-Druckprüfkörper	190

Tab. A-23: Übersicht über die Schubfestigkeiten, Schubsteifigkeiten und Bruchdehnung der VAP-Schubprüfkörper	191
Tab. A-24: Übersicht über die Schubfestigkeiten, Schubsteifigkeiten und Bruchdehnung der RTM-Schubprüfkörper	192
Tab. A-25: Prozessdaten zur Torsionswellenherstellung im VAP- und modifiziertem VAP-Verfahren	193
Tab. A-26: Übersicht über die maximalen Torsionsmomente, Schubfestigkeiten und Schubdehnungen der Torsionswellen	194

1 Einleitung

Nach einer Prognose von AVK (Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe) und Carbon Composites e.V. wird der Bedarf an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) zum Jahr 2022 im Automobilssektor größer sein als in der Luft- und Raumfahrtsparte. Der Bedarf wird in der Automobilbranche auf 72 Tst. t und in der Luft- und Raumfahrtbranche auf 65 Tst. t geschätzt. Das ist eine Steigerung im Luft- und Raumfahrtbereich um 71,4 % und eine Zunahme im Automobilssektor sogar um 158,2 % gegenüber den Zahlen aus dem Jahr 2016. Als Hauptantreiber dieses Trends ist die Elektromobilität zu nennen [1].

Es existieren verschiedene Prozessrouten, um Faserverbundbauteile herzustellen. Eine Möglichkeit besteht in der Herstellung eines trockenen Textils, welches im Anschluss mit einem polymeren Kunststoff getränkt wird. Zur Herstellung trockener Textilien bedient sich die Faserverbundindustrie alter textiler Herstellungsverfahren, wie dem Weben oder dem Flechten. Die industrielle Umsetzung dieser Verfahren sticht mit hohen Durchsatzraten und im Speziellen das Flechtverfahren mit einer endkonturnahen Faserablage hervor. Neben den hohen spezifischen Festigkeiten des kohlenstofffaserverstärkten Verbundes sind es auch diese produktionstechnischen Voraussetzungen, die die Serienproduktion von CFK-Komponenten ermöglichen. Faserverstärkte Elemente finden in den BMW i-Modellen und zu Letzt auch in der aktuellen BMW 7er-Reihe Anwendung [2–4].

Grundsätzlich gilt, dass während der Planung, Herstellung und dem Produkteinsatz Produktfehler auftreten können. Die Kosten, die ein Fehler verursacht, sind unter anderem abhängig vom Zeitpunkt der Fehlerentdeckung während der unterschiedlichen Produktphasen (Abb. 1-1). Diesen Zusammenhang der produktphasenabhängigen Kosten pro Fehler erfasst die sog. Zehnerregel der Fehlerkosten [5]. In Anlehnung an die Zehnerregel verursacht ein Produktionsfehler die höchsten Kosten, wenn das fehlerhafte Produkt bereits alle Fertigungsstufen durchlaufen hat, an den Kunden verschickt und der Fehler im Bauteileinsatz festgestellt wird. Mit jedem Prozessschritt, in dem ein Fehler unbemerkt weiterverarbeitet wird, steigen seine Kosten erheblich. Erstrebenswert ist, den Fehler in einem früheren Stadium zu entdecken, um schwerwiegendere finanzielle Konsequenzen zu vermeiden. Diese grundlegenden Zusammenhänge lassen sich sowohl allgemein für Fertigungsprozesse anwenden als auch auf die Herstellung von Faserverbundbauteilen mittels der Flechttechnologie.

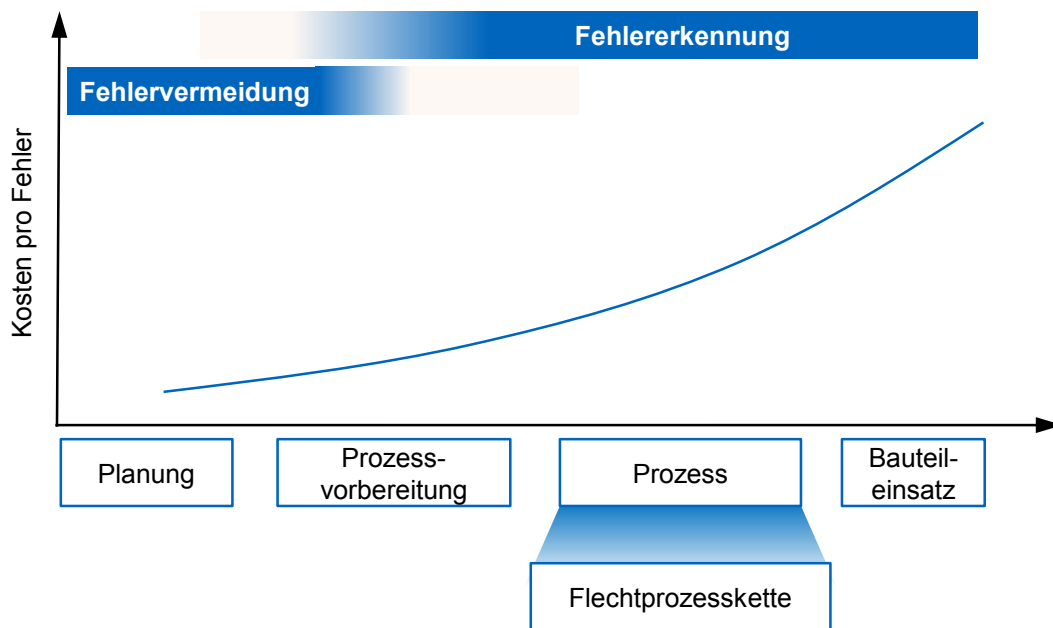


Abb. 1-1: Kosten pro Fehler in Abhängigkeit der Produktphasen

Die Flechtprozesskette besteht aus mehreren Prozessschritten, die sich vom Einzelgarn bis zum geflechtbasierten Verbundbauteil erstrecken. Üblicherweise werden Fehlerbilder erst im fertigen Geflecht erkannt, wo sie bereits hohe Kosten verursacht haben. So wie das Garn von einem Prozessschritt zum darauffolgenden verarbeitet wird, so können sich Geflechtfehler von ihrer Ursache bis zur finalen Ausprägung über mehrere Prozessschritte fortpflanzen. Mit der sukzessiven Zurückverfolgung des Geflechtfehlers über die Fortpflanzungsstufen entlang der Flechtprozesskette ist es möglich auf die initiale Fehlerursache zu stoßen. Dies ermöglicht es die Fehlerursache bereits zum Anfang der Prozesskette zu eliminieren, die Fortpflanzung zum finalen Geflechtfehler zu vermeiden und somit Ausschusskosten zu reduzieren.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Flechtprozesskette trockener Verstärkungsgarne

Zur Herstellung eines Bauteils aus einem geflechtbasierten Verbundwerkstoff, müssen mehrere Stufen der Flechtprozesskette durchlaufen werden. Die Darstellung in Abb. 2-1 symbolisiert die Einzelprozesse (graue Pfeilkontur) und die jeweiligen Zwischenstufen (rechteckige Kontur).

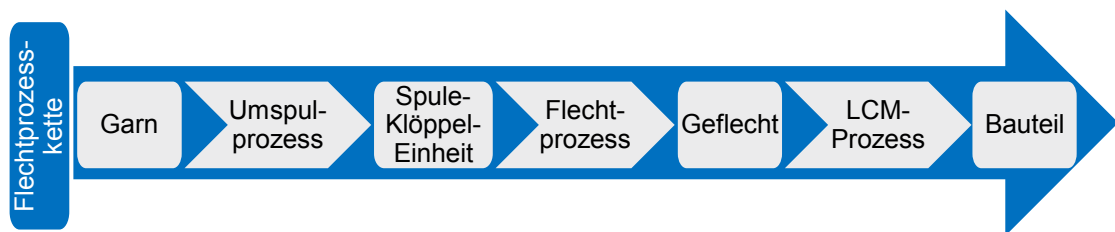


Abb. 2-1: Flechtprozesskette zur Verarbeitung von trockenen Verstärkungsgarnen

Der zentrale Schritt dieser Fertigungskette ist der Flechtprozess. Dieses direkte Preformingverfahren ermöglicht die unmittelbare Verarbeitung von Garnen zu einer endkonturnahen Geflechtpreform. Diesem Prozess ist der Umspulprozess vorgeschaltet, in dem die Garne für die Verarbeitung in der Spulen-Klöppel-Einheit der Flechtmaschine vorbereitet werden. Zur Finalisierung der Flechtprozesskette wird die trockene Geflechtpreform in einem LCM-Prozess (Liquid-Composite-Molding) mit einem polymeren Kunststoff getränkt. Nach der Aushärtung des Kunststoffs und ggf. Besäumungsarbeiten ist das Bauteil fertiggestellt.

2.1.1 Umspulprozess

Die vom Hersteller gelieferten Garne werden im Umspulprozess von Mutterspulen auf flechtmaschinenkompatible Spulen umgespult. Die Umspulanlage besteht aus dem Gatter und der Spulmaschine (Abb. 2-2).

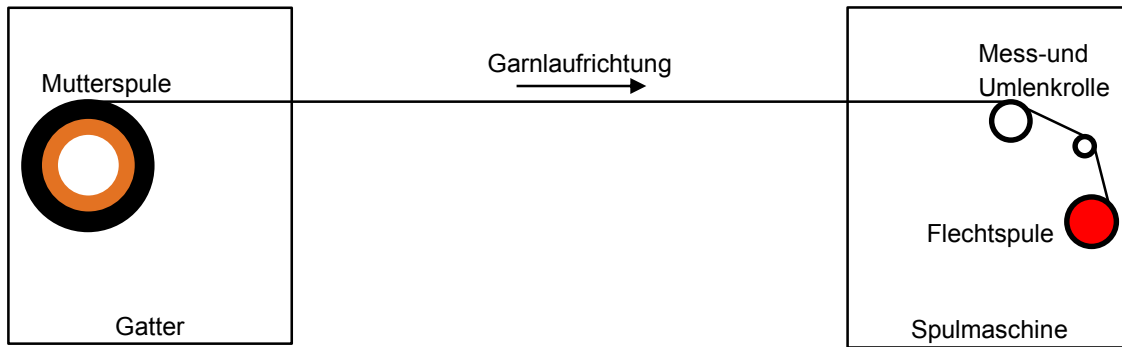


Abb. 2-2: Umspulanlage bestehend aus Gatter und Spulmaschine. Im Gatter ist nur eine Mutterspule dargestellt

Das Gatter besteht meist aus mehreren Abspulstellen, die die Mutterspulen aufnehmen und die Garnspannung während des Umspulvorgangs erzeugen. Dementsprechend verfügt die Spulmaschine über die gleiche Anzahl an Spindelpaaren, die die Flechtspulen aufnehmen und in Rotation versetzen. Durch die Spulenrotation wird das Garn von den Mutterspulen abgezogen. Die Spulmaschine ermöglicht es, in Abhängigkeit der Garneigenschaften (Material, Titer etc.) mit individuellen – meist auf Erfahrungswerten basierenden – Parametern (Garnspannung, Verlegung etc.) auf die Flechtspule umzuspulen. Aufgrund der Verlegung des Garns auf der Mutterspule bewegt sich das Garn während des Abspulvorgangs in axialer Spulenrichtung. Mit zunehmendem Abstand zwischen Gatter und Spulmaschine reduziert sich die axiale Garnbewegung und ermöglicht eine bessere Garnführung.

Das Garn wird während des Umspulvorgangs von zwei Umlenkrollen¹, die an einer Traverse befestigt sind, geführt (Abb. 2-3 und Abb. 2-4). Bei der Rotation der Flechtspule bewegt sich gleichzeitig die Traverse axial – relativ zur Flechtspulenachse – und erzeugt eine Verlegung des Garns. Die Traverse kehrt an zwei einstellbaren Umkehrpunkten um und ermöglicht eine mehrlagige Garnablage auf der Flechtspule. Diese Umkehrpunkte liegen üblicherweise an den Flanken der Flechtspule. Das Verhältnis zwischen Rotationsgeschwindigkeit der Flechtspule und Traversengeschwindigkeit resultiert in einer individuellen Verlegung des Garns. Mit Hilfe der Messrolle (Abb. 2-4) wird die Laufmeterzahl gemessen. Die Umlenkrolle wird an die individuelle Garnbreite angepasst.

¹ Diese Angabe ist spulmaschinenspezifisch. Diese Beschreibung trifft für die Spulmaschine SP 200 der Fa. Herzog GmbH zu, die sich am Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München befindet.

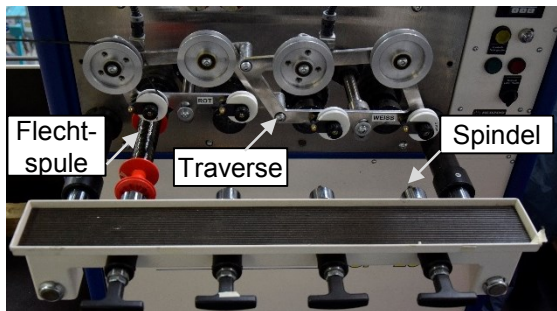


Abb. 2-3: Traverse und Spindeln der Spulmaschine

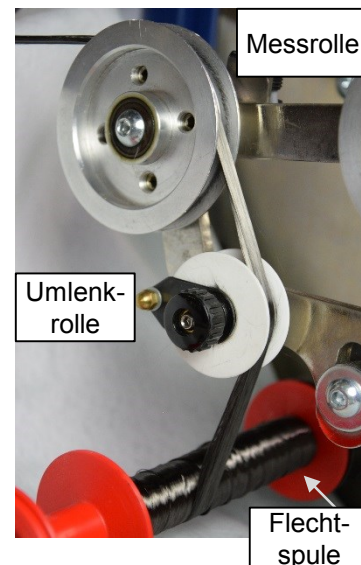


Abb. 2-4: Detaillierte Ansicht einer eingespannten Flechtspule in der Umspulmaschine

2.1.2 Flechtprozess

Nach DIN 60000 sind Geflechte *„Flächen- und Körpergebilde mit regelmäßiger Faden- (Garn-) Dichte und geschlossenem Warenbild, deren Flecht-Fäden(-Garne) sich in schräger Richtung zu den Warenkanten verkreuzen“*² [7]. Die Herstellung erster geflochtener Halbzeuge geht nach chinesischen und japanischen Schriften bis auf das 4. Jahrtausend v. Chr. zurück. Das erste Patent einer Flechtmaschine wurde im Jahr 1748 von Thomas Walford in Manchester angemeldet. Einige Jahre später (1767) entwickelte Johann Heinrich Bockmühl in Barmen (heutiger Stadtteil von Wuppertal) eine ähnliche Maschine. Ab dem 19. Jahrhundert wurde im Speziellen in Barmen die Entwicklung der Flechterei – als Teil der Schmalbandtextilherstellung – weiterentwickelt. [8, 9].

Prinzipiell beruht das Flechtverfahren auf der regelmäßigen Verkreuzung von mindestens drei Garnen miteinander. Abb. 2-5 zeigt die manuelle Herstellung eines Flachgeflechts (Litze) aus drei Garnen (Kohlenstofffaser-, Glasfaser- und Commingled-Garn).

² Der Begriff „Garn“ wurde nachträglich in dieses Zitat eingefügt. Der Begriff „Garn“ ist ein Sammelbegriff für alle linienförmigen textilen Gebilde [6]. Dieser Begriff wird in der vorliegenden Arbeit einheitlich als Synonym für Faden (Garnabschnitt) und Roving (Multifilamentgarn) verwendet.



Abb. 2-5: Manuell hergestellte Litze aus einem Kohlenstofffaser-, Glasfaser- und Commingled-Garn

2.1.2.1 Klöppelflechtmaschinen

Flechtmaschinen auf Basis der Klöppeltechnik werden vorwiegend in der Herstellung von Textilien verwendet.

Bauarten von Klöppelflechtmaschinen und deren Anwendung

Die maschinelle Umsetzung des Flechtprinzips im Rahmen der Klöppelflechttechnik basiert auf der Verkreuzung von zwei alternierenden Gangbahnen auf denen sich garnbevorragende Flechtspulen bewegen. Die Flechtspulen sind in Klöppeln positioniert, die durch die Rotation von Flügelrädern angetrieben werden. Da die Flügelräder gegenläufig rotieren, entstehen zwei ebenso gegenläufige Gangbahnen der Klöppel (Abb. 2-6). Werden die Flügelräder in einem ringförmigen Maschinenrumpf zusammengeschlossen, entsteht im Zentrum der Flechtmaschine ein schlauchförmiges Geflecht.

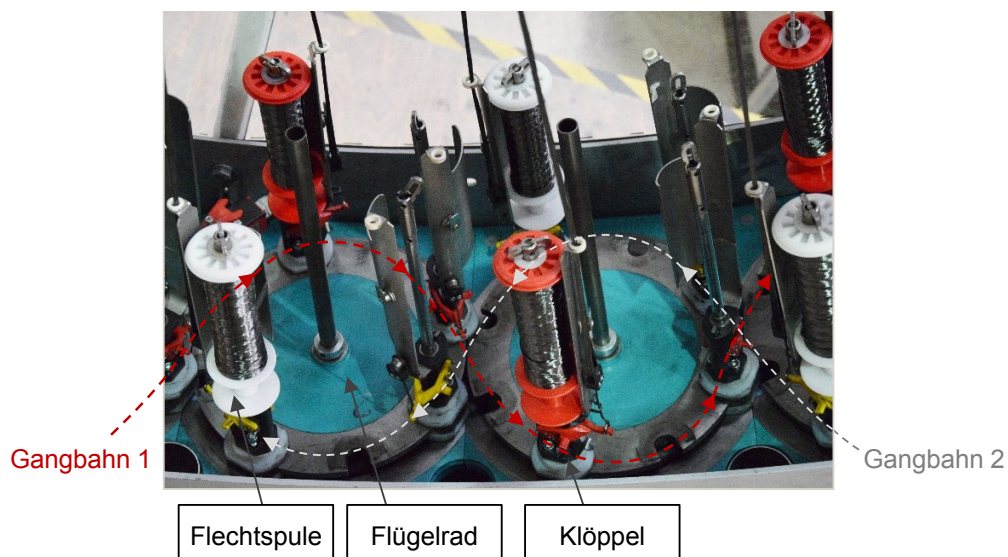


Abb. 2-6: Ausschnitt einer Flechtmaschine mit radial ausgerichteten Flechtspulen
Hervorgehoben sind Garnspule, Flügelrad, Klöppel und Gangbahnen (rot und weiß). Die Garnspulen bevorraten Kohlenstoffasergarne.

Dabei können die Klöppel axial oder radial bezüglich der ringförmigen Flechtmaschine angeordnet sein. Eine axiale Klöppelanordnung führt im Betrieb zu relativ großen Änderungen der Garnlänge zwischen den Klöppeln und dem Maschinenzentrum. Durch die Bewegung der Spulenträger auf alternierenden Gangbahnen kommt es zu einer zyklischen Änderung des Abstands zwischen der Flechtspule und dem Maschinenzentrum. Bei Radialflechtmaschinen fällt dieser Garnlängenunterschied deutlich geringer aus, was eine schonende Garnverarbeitung ermöglicht. Allerdings ist der Fertigungsaufwand von Radialflechtmaschinen aufgrund der maschinenbaulichen Unterschiede deutlich höher als der von Axialflechtmaschinen, weswegen Axialflechtmaschinen fast ausschließlich für die Herstellung von Massenprodukten wie Schmalbandtextilien verwendet werden. Dagegen werden Radialflechtmaschinen meist zur Verarbeitung von spröden Materialien (Kohlenstofffasergarnen) in der Umflechttechnik eingesetzt.

Die Methode der Umflechttechnik wird im Faserverbundbereich überwiegend zur Herstellung von Hohlbauteilen für die Automobil- und Luftfahrtbranche angewendet. Dabei legt sich das schlauchförmige Geflecht aus Verstärkungsgarnen auf einen Kern, welcher durch das Flechtmaschinenzentrum geführt wird, ab. Der Kern bildet die Innenkontur des finalen Hohlbauteils. Das Geflecht wird zu Anfang des Flechtprozesses am Kern fixiert, sodass die Kernbewegung zugleich einen Abzug des Geflechts ermöglicht. In industriellen Flechtanlagen wird der Kernabzug maschinell durchgeführt. Gerade Bauteile, beispielsweise zylindrische Bauteile, können mit Hilfe einer Linearachse geführt werden. Der Flechtmaschinenhersteller Körting Nachfolger Wilhelm Steeger GmbH & Co. KG bietet z.B. eine Flechtanlage mit integriertem Portal zum Kernabzug an. Für die Herstellung von komplexeren Flechtbauteilen existieren Flechtanlagen mit einer robotergestützten Kernführung. In Abb. 2-7 ist eine Flechtanlage bestehend aus Radialflechtmaschine (Herzog RF 128/100) und robotergestützter Kernführung (Kuka) dargestellt [9, 10].

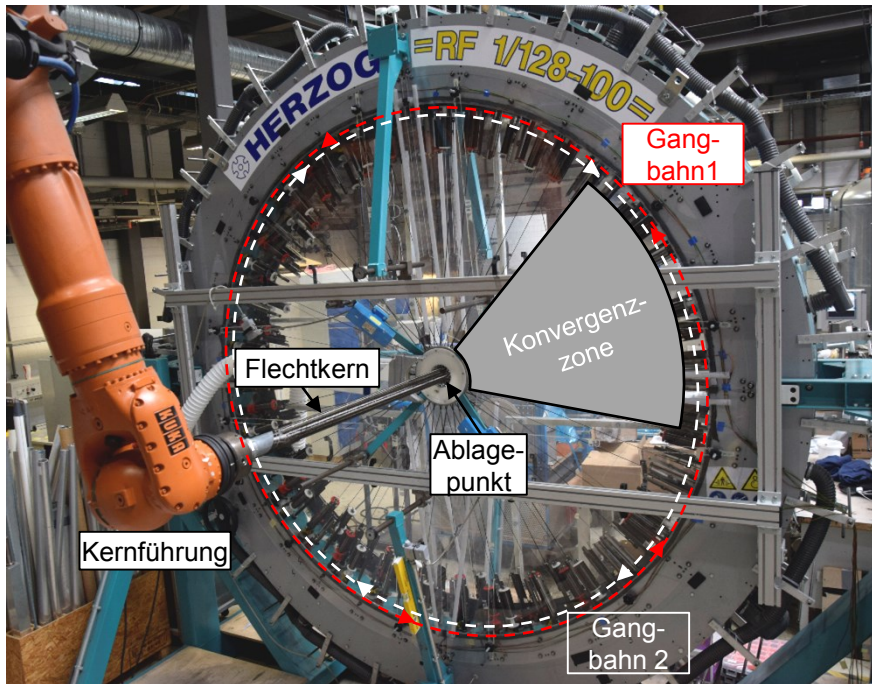


Abb. 2-7: Radialflechtmaschine mit robotergestützter Kernführung

Der Punkt an dem das Geflecht den Flechtkern umschließt, wird als Ablagepunkt bezeichnet. Der Bereich zwischen den Gangbahnen und dem Ablagepunkt wird als Konvergenzzone definiert.

Ebel [11] analysierte die Produktivität des Klöppel-Flechtverfahrens. In einem Berechnungsmodell untersuchte er die Auswirkungen unter anderem von der Flechtspulengröße und Flügelradrehzahl (Produktionsgeschwindigkeit) auf die Produktivität des Verfahrens. Seine Resultate zeigten, dass die Produktionsgeschwindigkeit den deutlichsten Einfluss auf die Produktivität besitzt. Maschinenbaulich kann die Produktionsgeschwindigkeit heutiger Klöppelflechtmaschinen kaum weiter gesteigert werden. Aus diesem Grund untersucht Ebel den Einsatz von Hebelarmflechtmaschinen, welche in der Lage sind höhere Produktionsgeschwindigkeiten zu erreichen.

Klöppeltechnik

Neben dem Transport der Flechtspulen erfüllt der Klöppel zwei weitere Aufgaben. Die Federmechanik des Klöppels erzeugt eine definierte Garnspannung und kompensiert gleichzeitig den prozessbedingten Garmlängenunterschied. Gängige Systeme sind der Schieber- und Hebelklöppel [12, 13].

In dieser Arbeit wird ausschließlich mit dem Typ „Hebelklöppel“ gearbeitet, weswegen detailliert auf dessen Mechanik eingegangen wird. Abb. 2-8 zeigt einen Hebelklöppel im Schnitt. Die Flechtspule sitzt auf einer Hohlwelle und wird durch einen Verschluss auf dem Klöppel axial gesichert. Der Hebelklöppel verfügt über zwei Umlenkelemente und ein Garnauge. Das Garn erfährt am sogenannten Tänzer eine Richtungsumkehr von 180°. Der Tänzer ist über den Drahtzug mit dem Hebel bzw.

Schwinghebel verbunden. Der Schwinghebel ist drehbar gelagert und sowohl mit einer in der Hohlwelle enthaltenen Druckfeder als auch mit einem Sperrbolzen verbunden. Durch den Abzug des Garns wird der Tänzer in axialer Klöppelrichtung (in Richtung des Garnauges) bewegt, wodurch der Schwinghebel rotiert. Diese Bewegung komprimiert die Druckfeder, die Garnspannung steigt an und der Sperrbolzen wird in Richtung des Klöppelfußes geschoben. Bei einer von der Federsteifigkeit abhängigen Garnspannung wird der Sperrbolzen komplett eingefahren, was eine Rotation der Flechtspule zulässt – Garnmaterial kann gefördert werden. Da die Spulenarretierung gelöst ist, fällt die Garnspannung ab. Eine zusätzliche kleinere Druckfeder schiebt den Bolzen zurück in Sperrposition. Dieser Zyklus wird beim Abspulen des Garns kontinuierlich wiederholt und erzeugt eine Garnspannung mit einem sägezahnartigen Verlauf (siehe hierzu Kap. 4.2.3). Im Betrieb führt der Tänzer eine zyklische Bewegung in einem Arbeitsbereich von wenigen Millimetern oberhalb vom unteren Anschlag aus.

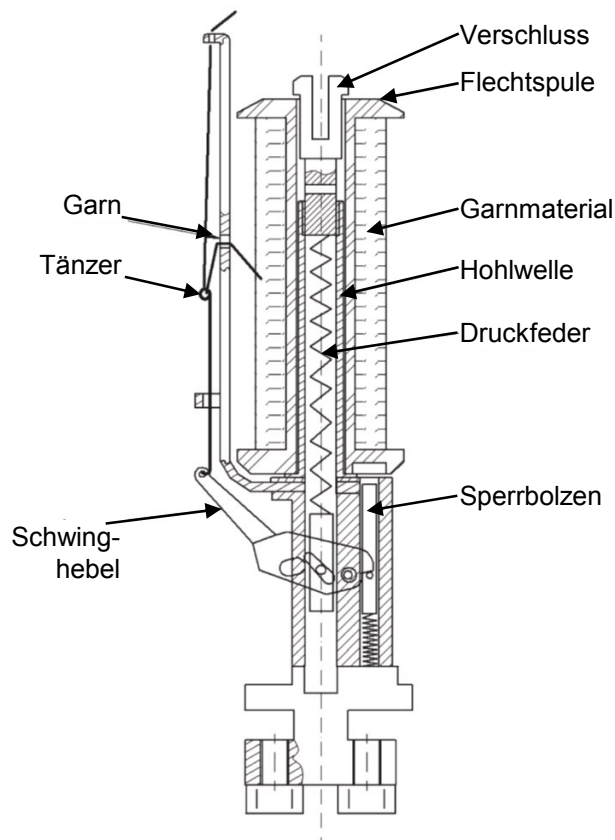


Abb. 2-8: Axialer Schnitt eines Klöppels mit Hebelsystem. Abbildung auf Basis von Kyosev [13]

2.1.2.2 Flechtprozessparameter

Abb. 2-9 stellt an einem geschlossenen Biaxialgeflecht mehrere Flechtparameter dar.

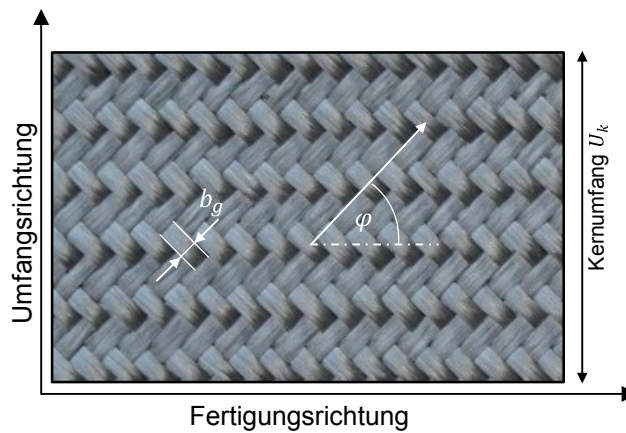


Abb. 2-9: Definition von Geflechtparametern anhand eines geschlossenen, biaxialen Geflechts

Der sogenannte Flechtwinkel φ ist definiert durch den Winkel zwischen einer Garnrichtung des Geflechts und der Fertigungsrichtung. Für eine bestimmte Garnbreite b_g , einen Flechtkernumfang U_k und einer Garnanzahl n_g stellt sich ein individueller Flechtwinkel ein. Dieser Parameterzusammenhang wird mittels der „Flechtformel“ beschrieben (2-1)³:

$$\cos(\varphi) = \frac{b_g \cdot n_g}{2 \cdot U_k} \quad (2-1)$$

Mit Zunahme des Flechtwinkels und konstant bleibender Flechtgarnanzahl n_g und Garnbreite b_g wird der maximal zu bedeckende Kernumfang U_k ebenso vergrößert. Bei der Reduktion des Flechtwinkels wird folglich der maximale Kernumfang verkleinert, vorausgesetzt die Garnbreite b_g und die Flechtgarnanzahl n_g ist unverändert.

Die Einstellung des Flechtwinkels geschieht über das Verhältnis zwischen Produktionsgeschwindigkeit der Flechtanlage, in Form der Flügelraddrehzahl, und der Abzugsgeschwindigkeit des Flechtkerns v_k . Die Zeit $t_{Kl\ddot{o}ppel}$ ist definiert als die Zeit, die ein Klöppel bzw. eine Flechtspule benötigt, um einen Umlauf um die Flechtmaschine durchzuführen.

$$\tan(\varphi) = \frac{U_k}{v_k \cdot t_{Kl\ddot{o}ppel}} \quad (2-2)$$

³ Der Flechtformel liegt ein lückenloses, geschlossenes Warenbild zu Grunde

2.1.2.3 Anwendung von geflechtbasierten Hohlbauteilen

In den späten sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurde begonnen die Flechttechnologie zur Herstellung von Hohlbauteilen aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen zu verwenden. Mit der sogenannten Umflechttechnik bot sich eine Möglichkeit der Herstellung geschlossener Profile aus faserverstärkten Kunststoffen. Die ersten Flechtbauteile fanden in relativ geringen Stückzahlen als Triebwerksummantelungen und Raketendüsen ihre Anwendung in der Luft- und Raumfahrt. Erste geflochtene Fanggehäuse eines Turbofantriebwerk (FJ44-A) wurden für die zivile Luftfahrt (Cessna Citation CJ4) produziert. In deutlich größeren Stückzahlen wird das GENx Turbofantriebwerk von General Electric hergestellt, das ebenso über ein Fanggehäuse aus geflochtenem Verbundwerkstoff verfügt. Diese Entwicklungen gehen vor allem auf die Kooperation von General Electric und der NASA zurück. [14]

In den vergangenen Jahren wurden im Rahmen der Entwicklung der BMW-i-Modelreihe die Anwendungsgebiete für Flechtbauteile im Automobilbau deutlich erweitert. Hier finden geflochtene Hohlbauteile Verwendung als Verstärkungselemente der A-Säule des BMWi3. Im Jahre 2017 wurden von Januar bis November ca. 28000 Fahrzeuge der i3-Reihe verkauft, was eine jährliche Stückzahl der A-Säulenverstärkung von ca. 60000 ergibt. Jüngst wird der Dachholm der derzeitigen BMW-Siebener-Baureihe mit einer jährlichen Stückzahl von ca. 100000 im Flechtverfahren produziert [2–4]. Weitere Automobilanwendungen finden geflochtene Hohlbauteile als Antriebswellen. Hier ist der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen besonders von Vorteil, da sie gegenüber Metallen ein höheres Steifigkeit-zu-Gewicht-Verhältnis und bessere Fatigue- und Korrosionseigenschaften besitzen. [15]

2.1.3 Liquid Composite Molding-Prozesse

Das Grundprinzip des LCM-Prozesse (Liquid-Composite-Molding) beschreibt die Tränkung eines trockenen endkonturnahen Faserhalbzeugs (Preform) in einem formgebenden Werkzeug. Die Tränkung der Preform mit einem Harz-Härter-Gemisch geschieht aufgrund eines anliegenden Druckunterschieds im Werkzeug. [16]

2.1.3.1 Vacuum-Assisted-Process

Der VAP-Prozess (Vacuum-Assisted-Process) gehört zu den RIFT-Prozessen (Resin Infusion Under Flexible Tooling). RIFT-Prozesse zeichnen sich durch eine flexible meist aus Hilfsfolien bestehende und einer zweiten steifen, formgebenden Werkzeughälfte aus. Die Gesamtheit der Hilfsfolien wird auch als „Folienaufbau“ bezeichnet. Beide Formhälften umschließen die Preform und dichten diese gegenüber der Umgebung ab. Das Volumen unter dem Aufbau wird evakuiert und die Preform wird aufgrund des wirkenden Umgebungsdrucks an die steife Werkzeughälfte gedrückt. Dabei wird die Preform kompaktiert und sie nimmt die finale Form des herzustellenden Bauteils an. Des Weiteren wird der Druckunterschied zwischen Preform und Umgebung

genutzt, um den Fluss des Harz-Härter-Gemisches zu ermöglichen und die trockenen Fasern zu tränken (infiltrieren).

Abb. 2-10 zeigt das Prinzip des VAP-Aufbaus. Die Preform wird mit einem Abreißgewebe bedeckt. Dieses Textil ist nötig, um den Folienaufbau nach der Harzaushärtung vom Verbundbauteil entfernen zu können. Daraufhin wird eine weitmaschige Fließhilfe auf das Abreißgewebe gelegt. Dieses Gewirk ermöglicht den Harzfluss auch bei anliegendem Vakuum. Anschließend wird dieser erste Teil des Aufbaus mit einer semipermeablen Membran (mikroporöses PTFE) auf dem formgebenden Werkzeug abgedichtet. Die Membran lässt Gasmoleküle passieren, wobei Harzmoleküle zu groß sind, um diese zu durchdringen. Sie ermöglicht somit eine Absaugung der Umgebungsluft aus der Preform und ist dabei harzundurchlässig. Die flächige Absaugung auf der Membran wird durch ein Saugvlies ermöglicht, an der eine Schlauchverbindung zur Vakuumpumpe angebracht wird. Durch Evakuieren des Volumens unter der Vakuumfolie, kann mit der Harzinfiltration begonnen werden [17].

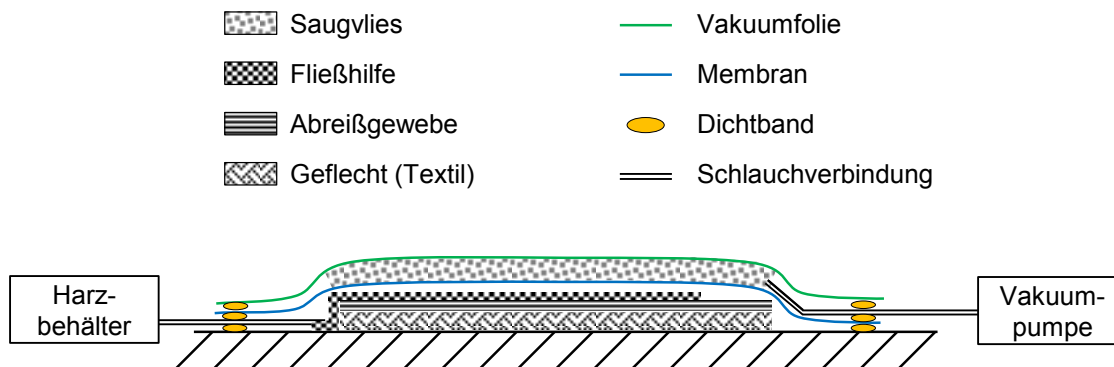


Abb. 2-10: Prinzip des VAP-Aufbaus

Das VAP-Verfahren ist für die Herstellung von Bauteilen mit geringen bis mittleren Stückzahlen geeignet. Dies ist auf die Erstellung und die spätere Entfernung des VAP-Aufbaus vom ausgehärteten Verbundbauteil zurück zu führen. Beide Schritte sind relativ komplex und sind nur schwierig automatisierbar, weswegen diese Arbeiten manuell durchgeführt werden müssen. Der Infiltrationsdruck ist auf ca. 1 bar begrenzt, was zu relativ geringen Fließgeschwindigkeiten und somit erhöhten Taktzeiten führt. Des Weiteren ist der Folienaufbau zum größten Teil nicht wiederverwendbar, weswegen die variablen Kosten relativ hoch sind.

2.1.3.2 Resin-Transfer-Molding

Das RTM-Verfahren (Resin-Transfer-Molding) zeichnet sich durch zwei geschlossene, steife Formhälften aus. Die zwei Formhälften erzeugen im geschlossenen Zustand eine Kavität, die die Preform ausfüllt (Abb. 2-11). Eine Werkzeugdichtung ermöglicht die Evakuierung der Kavität und verhindert das Austreten von Harz während der Infusion. Das Harz wird mit erhöhtem Druck in die Kavität infundiert und tränkt dabei die Preform. Der hohe Infusionsdruck im Werkzeuginneren macht hohe Werkzeug-

schließkräfte erforderlich. Diese Schließkräfte werden im industriellen Maßstab durch hydraulische Pressen erzeugt. Durch den Einsatz von Pressen kann ein höherer Druck auf die Preform ausgeübt werden, was zu einer stärkeren Kompaktierung im Vergleich zum VAP-Verfahren führt. Aufgrund einer stärkeren Kompaktierung sind geringere Wandstärken bei gleichbleibendem Preformgewicht und schließlich höhere Faservolumenhalte möglich.

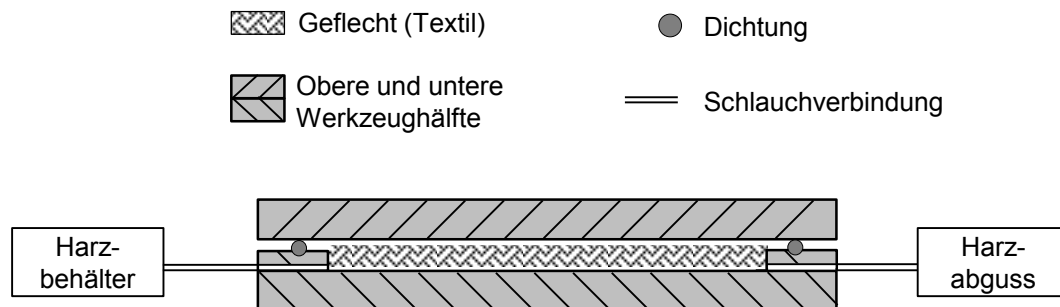


Abb. 2-11: Prinzip des RTM-Verfahrens

Das RTM-Verfahren ist für die Produktion hoher Stückzahlen geeignet. Die Investitionen in Form von hydraulischen Pressen, steifen Formhälften und Injektionsanlagen sind im Vergleich zum VAP-Verfahren relativ hoch. Das Verfahren lässt jedoch einen hohen Automatisierungsgrad und kurze Taktzeiten zu, was bei zunehmender Stückzahl die Stückkosten senkt.

2.2 Fehlerarten in geflochtenen Textilien

Während Verarbeitung von Verstärkungsgarnen zu Geflechtem können prozessbedingte Fehler auftreten, die meistens erst nach Fertigstellung des Geflechts erkannt werden.

2.2.1 Einordnung von Geflechtfehlern

Geflechtfehler sind im Allgemeinen als Unregelmäßigkeit im Geflechtbild definiert. In dieser Arbeit wird eine Kategorisierung von Geflechtfehlern durchgeführt. Die Geflechtfehler werden in Filament-, Garn und Geflechzebene eingeordnet. In diesem Abschnitt erfolgt nur die Einordnung und Beschreibung der Geflechtfehler. Die möglichen Ursachen werden in Abschnitt 3.2 diskutiert.

2.2.1.1 Fehlerbilder auf Filamentebene

Fehlerbilder auf Filamentebene können global oder lokal auftreten. Die globale Fehlerausbildung hat ihre Ursache in der mechanischen Belastung der Filamente während des Umspulens und des Flechtens. Darunter fallen Belastungen, welche an garnkontaktierenden Elementen und an Garninteraktionspunkten in der Konvergenzzone wirken. Diese Belastungen führen zu Brüchen der Garnfilamente und die dabei erzeugten Filamentfragmente ragen aus der Flechtstruktur heraus (Abb. 2-12). Globaler Fila-

mentbruch ist auf Ursachen zurückzuführen, die alle Garne gleichermaßen beeinflusst, wie beispielsweise eine zu hoch gewählte Garnspannung oder eine Garncharge mit einer minderwertigen Qualität. Ebel et al. [18] untersuchten verschiedene Ursachen von globalem Filamentbruch. Mittels verschiedener Prüfmethode wurde vor allem hohe Garnspannung während des Flechtprozesses als entscheidender Parameter für globale Garnschädigung identifiziert.



Abb. 2-12: Global abstehende Filamentfragmente eines mit zu hoher Garnspannung hergestellten Geflechts

Lokale Fehlerbilder auf Filamentebene treten in Form von Filamentansammlungen auf (Abb. 2-13). Ein Garn erfährt, bevor es ins Geflecht eingearbeitet wird, eine lokale Schädigung. Diese Schädigung entsteht in Form von Filamentabrieb, der beispielsweise an garnkontaktierenden Elementen einer Flechtspule initiiert oder auch verstärkt werden kann.



Abb. 2-13: Lokale Filamentansammlung an einem Biaxialgeflecht

2.2.1.2 Fehlerbilder auf Garnebene

Diese Fehlerkategorie umfasst Abweichungen in der Form und/oder im Verlauf des Garns. Eines dieser Fehlerbilder ist die Garnschleife (Abb. 2-14). Sie ist eine starke lokale Welligkeit eines Garns, welche aus der Geflechtstruktur herausragt. Dieses Fehlerbild entsteht, wenn die Spannung eines Garns geringer ist als die Spannung der restlichen Garne. Das betroffene Garn ist nicht so stark gespannt, was das Garn zwischen den Interaktionspunkten durchhängen lässt. Das Geflecht kontrahiert im Verlauf

der Konvergenzzone und die Interaktionspunkte wandern enger zueinander. Aus einem leichten Durchhängen des Garns entsteht so eine deutliche Welligkeit, welche in Form einer Garnschleife festzustellen ist. Ähnliche Schlaufenbildung konnte unter anderem von Reden [19] bei Stehgarnen eines triaxialen Geflechts feststellen. Er konnte dort ebenso eine zu geringe Garnspannung als Fehlerursache ausmachen.



Abb. 2-14: Garnschleife eines Biaxialgeflechts (aus [20])

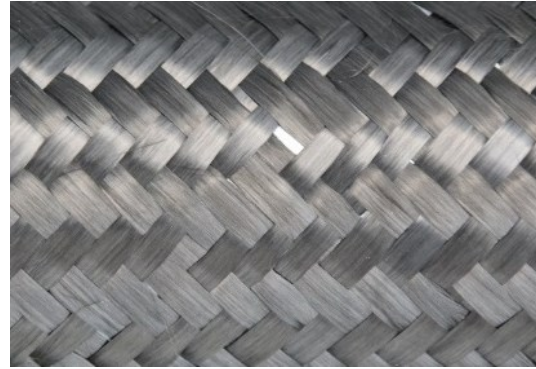


Abb. 2-15: Garnlücke

Eine Garnlücke ist eine Lücke zwischen zwei benachbarten Garnen (Abb. 2-15). Ihre Ursache liegt in einer erhöhten Spannung des betroffenen Garns, weswegen der Garnverlauf in der Konvergenzzone und somit auch das Ablageverhalten beeinflusst werden.

Bei drastisch erhöhten Garnspannungen und der Überschreitung der Garnfestigkeit kommt es zu einem Riss des Garns (Abb. 2-16). Der Garnriss ist dabei abhängig von mehreren Einflussfaktoren. So sind die Garnspannung, Garnfestigkeit, Garnfeinheit und die Garnschädigung entscheidend. Tendenziell kommt der Garnriss bei geringen Garntitern vor. Hier sind niedrigere Kräfte notwendig, um einen Riss zu induzieren. Bei höheren Titern und somit höheren Kräften werden eher Klöppel- oder Flechtmaschinenkomponenten beschädigt (z.B.: durch Bruch der Umlenkelemente am Klöppel)



Abb. 2-16: Garnriss

2.2.1.3 Fehlerbilder auf Geflechzebene

Diese Fehlerart beschreibt Änderungen des gesamten Geflechtbilds. Ein entscheidender Parameter, der Auswirkungen auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechts hat, ist der Flechtwinkel. Wie bereits im Abschnitt 2.1.2.2 beschrieben wurde, beeinflussen die Rotationsgeschwindigkeit der Garnspulen um das Flechtmaschinenzentrum und die Abzugsgeschwindigkeit des Flechtkerns den Flechtwinkel. Wenn beide Geschwindigkeiten nicht im geforderten Verhältnis stehen, kommt es zu Abweichungen vom Soll-Flechtwinkel (Abb. 2-17). Ebenso ist die Ursache für einen unvollständigen Bedeckungsgrad ein inkorrektes Verhältnis mehrerer Flechtparameter. Die Summe der umfangsanteiligen Garnbreiten ist in diesem Fall nicht ausreichend, um den Kernumfang bei einem konstanten Flechtwinkel zu bedecken. Dadurch bildet sich folglich zwischen jedem Garn und dem benachbarten Garn eine Lücke (Abb. 2-18).

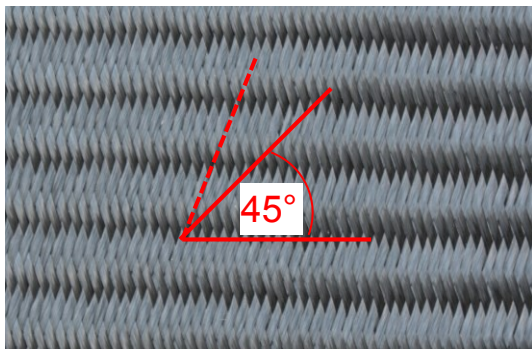


Abb. 2-17: Flechtwinkelabweichung

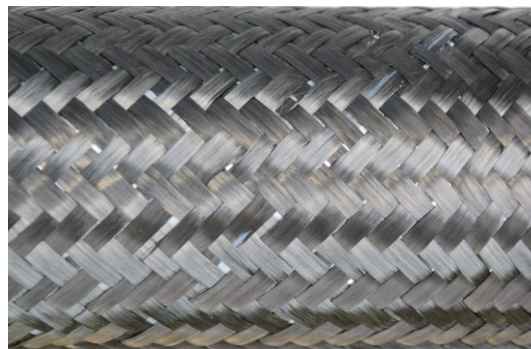


Abb. 2-18: Unvollständiger Bedeckungsgrad

2.2.2 Bisherige Untersuchungen zu Geflechtfehlern und deren Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte von Geflechtverbunden

Die Untersuchungen anderer Autoren auf dem Gebiet der Geflechtfehler wurden nach der Einteilung aus dem vorherigen Abschnitt gegliedert.

2.2.2.1 Filamentebene

Erber [21] untersuchte die mechanischen Eigenschaften eines Biaxialgeflechts unter Berücksichtigung von Fehlern auf Filamentebene. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Methoden angewendet, die eine kontrollierte Schädigung des Garns erzeugten. Es wurden zum einen garnkontaktierende Elemente des Klöppels und zum anderen der Flechtring als mögliche Positionen zur Einbringung der Garnschädigung festgelegt.

Folgende Methoden wurden angewendet:

- Präparation des Klöppelumlenkblechs mit Sandpapier
- Anbringung einer Klinge an der letzten Führungsöse des Klöppels
- Präparation des Flechtrings mit Sandpapier
- Verwendung eines zweiten Flechtrings, um das Geflecht beidseitig einer Reibkraft auszusetzen. Zusätzlich verfügte ein Flechtring über Oberflächenriffelungen

Die letzte Methode wurde als praktikabelste erachtet, da durch verschiedene Druckkräfte die Garnschädigung präziser als bei den anderen Methoden eingestellt werden konnte. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise wurden drei Schädigungsgrade – leicht, moderat und schwer – erzeugt. Es wurden daraufhin mehrlagige Geflechtverbunde auf Basis der unterschiedlichen Schädigungsgrade hergestellt. Im Rahmen eines modifizierten ILSS-Tests (interlaminar shear strength⁴) und eines Zugversuchs (in 0°-Garnrichtung) wurden die Geflechtverbunde geprüft. Die Modifikation des ILSS-Tests war nötig, da textile Verbundwerkstoffe häufig ein ungünstiges Versagensverhalten zeigen. Die Versuchsergebnisse wurden nicht auf die schadigungsfreien Referenzen bezogen sondern auf die Proben mit der geringsten Garnschädigung. Die interlaminare Schubfestigkeit stieg mit zunehmender Garnschädigung. Die aus den Einzellagen herausragenden Filamentfragmente führen im Lagenverbund zu lagenübergreifenden Verhakungen, die den interlaminaren Rissfortschritt behindern und so die interlaminare Schubfestigkeit erhöhen. Dabei stieg der ILSS-Wert um 7 %. Mikroskopaufnahmen der Bruchflächen bestätigten dieses Ergebnis. Die Bruchflächen zeigten im nicht geschädigten Fall verhakungsfreie und glatte Oberflächen, die den Rissfortschritt nicht behinderten. Dagegen zeigten die Bruchflächen der geschädigten Proben eine raue und „verhakungsreiche“ Oberfläche, die den Rissfortschritt beeinträchtigte und zu erhöhter interlaminarer Schubfestigkeit führte. Die Zugfestigkeit in Garnrichtung fiel um 11 % zwischen der schwächsten und stärksten Garnschädigung. Zu begründen ist dieser Effekt mit der hohen Anzahl an gebrochenen Filamenten, die keine Last in Garnrichtung übertragen können. Eine Aussage über die Zugsteifigkeit machte Erber nicht.

Zu ähnlichen Erkenntnissen bezüglich der Korrelation zwischen Garnschädigung und mechanischen Kennwerten kam ebenso Mitwalsky [22]. Unter anderem entwickelte Mitwalsky einen Prozess zur pneumatischen Onlinespreizung von Kohlenstoffasergarnen im Flechtprozess. Je nach Intensität des Spreizvorgangs erfuhren die Garne unterschiedliche Garnschädigungsgrade. Ein mehrlagiger Geflechtverbund basierend auf ungespreizten (Referenz) und unterschiedlich stark gespreizten Garnen wurde im Rahmen von Zug-, Druck und ILSS-Versuchen geprüft. Zylindrische Flechtkerne mit einem Durchmesser von 90 mm und 130 mm wurden hierzu mit einem 24k-Biaxialgeflecht umflochten. Um ein Geflecht mit 100 %iger Bedeckung zu erstellen, war im Fall des 130-mm-Kerns eine stärkere Spreizung als im Falle des 90-mm-Kerns

⁴ Interlaminare Schubfestigkeit

notwendig. Dies hatte zur Konsequenz, dass das Geflecht des 130-mm-Kerns stärkere Garnschädigung aufwies als das des 90-mm-Kerns. Obwohl die Garnspreizung zu geringerer Ondulation der Flechtgarne führt und eine Steigerung der mechanischen Kennwerte zu erwarten ist, überwiegt im Falle dieser starken Spreizung der Einfluss der globalen Garnschädigung auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechts. Die Zugfestigkeit des Geflechtverbunds wurde um 11 % und die Steifigkeit um 14 % reduziert. Eine weitere Parallele zwischen den Untersuchungen von Erber und Mitwalsky ergibt sich in den Ergebnissen der ILSS-Versuche. Auch in diesem Fall wurden erhöhte ILSS-Werte (+13 %) des stärker geschädigten Geflechtverbunds festgestellt.

Falzon et al. [23] beschäftigten sich unter anderem mit den Auswirkungen der flechtprozessinduzierten Garnschädigung auf die Garnfestigkeit. Die Garne wurden an einem Axialflechter der Firma Wardwell mit 72 Klöppeln zu einem triaxialen Geflecht verarbeitet. Die Autoren machen keine Angaben zur verwendeten Garnspannung. Die zu untersuchenden Garne wurden aus dem triaxialen Geflecht entnommen und daraufhin einzeln mit Matrix imprägniert. Ob Flecht- oder Stehgarn und welche Tränkungs-methode verwendet wurde, konnte der Veröffentlichung ebenso nicht entnommen werden. Die Autoren stellten einen bis zu 20 %igen Abfall der Garnfestigkeit im Vergleich zu ungeschädigten, nicht im Flechtprozess verarbeiteten Garnen fest. Zurückzuführen ist die Festigkeitsreduktion auf Prozess- und auf Reibkräfte, die die Garne auf Filamentebene schädigten. Im gleichen Zuge wiesen die Autoren daraufhin, dass die Festigkeitswerte einzelner Garne mit Bedacht zu interpretieren sind.

Archer et al. [24] untersuchte die Auswirkungen von im 3D-Webprozess induzierten Garnschädigungen auf die Zugfestigkeit eines Verbunds basierend auf Kohlenstoffgarnewebe. Die Untersuchungen von Rudov-Clark et al. [25] basierten auf einem 3D-Glasgarnewebe und fokussierten sich auf der Korrelation zwischen der im Prozess entstandenen Garnschädigung und dem Abfall der Zugfestigkeit der trockenen Garne. Beide Untersuchungen konnten einen deutlichen Zusammenhang zwischen Garnschädigung und Abfall mechanischer Kennwerte sowohl im trockenen als auch im imprägnierten Zustand feststellen.

2.2.2.2 Garnebene

Garnschlaufen sind extreme Ausprägungen von Garnwelligkeiten und Garnrisse eine extreme Form des Filamentbruchs. Die Garnschleife lenkt das Garn deutlich aus der Geflechzebene aus, was zu einer starken, lokalen Abweichung des Garns von der Belastungsrichtung führt. Wie im späteren Abschnitt 2.3.1 gezeigt wird, haben geringe Garnauslenkungen deutliche Auswirkungen auf die mechanische Belastungsfähigkeit des Verbundes, obwohl diese nur lokal auftreten. Der Garnriss ist die Konsequenz des Bruchs aller Filamente des Garns. Der Riss eines feineren Garns ist wahrscheinlicher als der Riss eines Garns mit einem höheren Titer. Ein feines Garn bricht bei geringeren Kräften und führt zu Verhedderungen des Garns in der Konvergenzzone. Der lokale Garnbruch senkt die Festigkeit des Geflechtverbunds und die Unregelmäßigkeiten

während der Geflechtbildung führen zu lokaler Flechtwinkeländerung und Bedeckungsgradreduktion, was ebenso die Festigkeit senkt. Die Bruchkräfte eines Garns mit höherem Titer übersteigen die Belastbarkeit von z.B. Klöppelbestandteilen und führen tendenziell zu Maschinenschäden.

2.2.2.3 Geflechzebene

Mitwalsky [22] untersuchte den Zusammenhang zwischen geringer werdendem Bedeckungsgrad eines Geflechts und den mechanischen Eigenschaften des Geflechtverbunds. Die Zugfestigkeit des biaxialen Geflechtverbunds (in Garnrichtung) fiel um bis zu 28 % bei einer Bedeckung von ca. 88 %. Zu diesem Zweck wurde ein 24k-Biaxialgeflecht statt mit einem 70 mm (100 % Bedeckung) auf einem 130 mm Kerndurchmesser hergestellt. Durch den geringeren Bedeckungsgrad entstand zwischen jedem Garnpaar eine Lücke mit einer Breite von rechnerisch $3,0 \text{ mm}^5$. Mit abnehmendem Kernumfang nimmt die Garnlückenbreite ab und die mechanischen Kennwerte nähern sich den Kennwerten des geschlossenen Geflechts an. Zu ähnlichen Erkenntnissen zwischen dem Bedeckungsgrad und den mechanischen Eigenschaften eines Geflechtverbunds kamen ebenso Heieck et al. [26]. Ihre mechanischen Untersuchungen enthielten unter anderem triaxiale Geflechtverbunde, die Zug- und Druckprüfungen unterzogen wurden. Ebenso traf Birkefeld [27] analoge Aussagen bezüglich dem Zusammenhang zwischen unvollständiger Bedeckung und dem Abfall mechanischer Kennwerte, welche sie in einer Richtlinie zusammenfasste.

Die Reduktion der mechanischen Eigenschaften bei unvollständiger Bedeckung ist auf die lokale Reduktion des Faservolumengehalts und auf die Erhöhung der Garnondulation zurückzuführen. Ein onduliertes Garn ruft eine ungünstige Garnquerbelastung hervor und mindert so nicht nur die Garnfestigkeit in Längsrichtung sondern auch lokal die Verbundfestigkeit [28]. Im Zuge des LCM-Verfahrens wird ein mehrlagiges textiles Halbzeug (Geflechte einschließend) in Dickenrichtung kompaktiert. Die Halbzeugdicke wird reduziert und die Dicke der einzelnen Lagen nimmt überproportional zu, was durch Setzeffekte (Nesting) begründet ist [29]. Der Setzeffekt fällt allerdings bei einem lückenhaften Textil stärker aus als bei einem geschlossenen. Garnlagen werden in die Lücken der benachbarten Lagen eingedrückt, weswegen die Garnondulation eine höhere Amplitude erfährt und das Garn stärker ausgelenkt wird.

Neben den Ondulationen (Welligkeit in Dickenrichtung) können ebenso sogenannte Off-Axis-Belastungen die mechanische Leistungsfähigkeit des Verbundes senken. Das Garn wird nicht aus der Laminebene gelenkt, sondern erfährt einen Winkelversatz in der Ebene. Dieser Fall liegt beispielsweise vor, wenn ein Geflecht eine Flechtwinkelabweichung besitzt. Mechanische Untersuchungen zu Off-Axis-Belastungen an Geflechten führte Cichosz [30] durch. Im Off-Axis-Fall kommt es ebenso auf den Quer-

⁵ Die Garnlückenbreite wurde auf Basis der modifizierten Flechtformel (nach Mitwalsky), welche die Garnlückenbreite berücksichtigt, bestimmt.

spannungszustand des Garns an. Je größer dort der Zugspannungsanteil ist, desto stärker werden die mechanischen Eigenschaften verschlechtert. Die Festigkeit des Verbunds bei einer Off-Axis-Belastung ist matrixdominierter, was zu einem ausgeprägteren nichtlinearen Werkstoffverhalten führt.

2.3 Fehlerarten in anderen faserverstärkten Kunststoffverbundtypen

Festigkeitsmindernde Defekte in faserverstärkten Kunststoffen können verschiedene Ausprägungen besitzen. Matrixseitig mindern beispielsweise Trockenstellen, Lufteinschlüsse (Poren) oder harzreiche Zonen die Verbundqualität. Garnseitig sind es meist Änderungen des Garnverlaufs, die die mechanischen Eigenschaften des Verbunds beeinflussen. Die meisten Untersuchungen, die sich mit den Auswirkungen von lokalen Garnwelligkeiten auf mechanische Kennwerte beschäftigen, basieren auf ebenen Coupons, die rekonstruierte Garnondulation besitzen. Diese Vorgehensweise bietet zum einen den Vorteil einzelne Spannungszustände (Zug, Druck, Schub) isoliert zu betrachten und zum anderen die Garnondulationen in ihrer Position und Größe kontrolliert einzubringen und auch zu variieren. Die Übertragung der in der Praxis auftretenden Garnwelligkeiten auf die Couponebene geschieht entweder durch formgebende Infiltrationswerkzeuge, die eine wellige Oberfläche besitzen, oder die Preform wird so präpariert, dass die Garne definierte Welligkeiten erfahren. Dies geschieht beispielsweise durch die Verwendung eines Preformwerkzeugs, das die Preformgestalt ändert oder durch das Hinzufügen von Lagenabschnitten, die bei der Preformkonsolidierung zu einer Garnlagenauslenkung führt [31].

Die Recherche umfasst sowohl statische als auch dynamische Untersuchungen in Form von Ermüdungsversuchen. Thematisch wird bei gewebebasierten (aus textiltechnischer Sicht mit Geflechten verwandt) und gelegebasierten Verbunden begonnen. Im weiteren Verlauf wird die Abstraktionsebene erhöht, indem multiaxiale Verbunde auf Basis von nicht ondulierten Halbzeugen und schließlich rein unidirektionale Verbunde betrachtet werden.

2.3.1 Welligkeiten in gewebe- und gelegebasierten Verbunden

Potter et al. [32] zeigen mögliche Ursachen, die zur Entstehung von Garnondulationen beispielsweise durch die Interaktion zwischen Gewebe und formgebenden Werkzeugen führen. Im Speziellen in Radiusbereichen und bei der Verwendung eines Vakuumsackaufbaus kann die Entstehung von starken Garnondulationen festgestellt werden.

Mandell et al. [33] untersuchten unter anderem den Effekt von Garnondulationen auf die Druckeigenschaften eines textilbasierten Verbundes. Die untersuchten Lamine

bestanden aus unidirektionalem NCF (non crimp fabric) aus Glas- und Kohlenstofffasergarnen und biaxialem Gewebe aus Glasfasergarnen. Die Ondulation der 0°-Garne wurde manuell, durch die Verwendung von zusätzlichen 90°-Lagen, erzeugt. Diese Welligkeit hatte eine Amplitude von ca. einer Lagendicke und zeigte ein Verhältnis von Amplitude zu Wellenlänge von 0,04. Aufgrund dieser Garnwelligkeit wurden Reduktionen der Bruchstauchung und Druckfestigkeit von annähernd 50 % verzeichnet.

Khan et al. [34] untersuchten unter anderem die Auswirkungen von Garnondulationen auf Druckeigenschaften eines Verbundes aus Kohlenstoffgarngewebe und Epoxidharz. Die Garnondulation wurde manuell zum Teil auch mit einem Preformingtool rekonstruiert. Somit wurde ein Ondulationswinkel von ca. 29° erzeugt. Die Druckkennwerte dieser ondulierten Proben fielen im Durchschnitt um 72 % gegenüber der fehlerfreien Referenz. Im Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm wurde eine signifikante Änderung des Kurvenverlaufs kurz vor dem totalen Versagen festgestellt. Durch die Auswertung von Bildaufnahmen (Aufnahme der Seitenfläche des Prüfkörpers) wurde die Unstetigkeit innerhalb des Druckspannungs-Stauchungs-Diagramms der Bildung von Delaminationen zugeordnet. Der finale Bruch der Druckproben verlief in Dickenrichtung an der Stelle der maximalen Garnauslenkung. Khan et al. gingen davon aus, dass dieser Bruch auf interlaminare Schubspannungen zurückzuführen ist. Eine Aussage über die Drucksteifigkeiten trafen sie nicht.

Es liegen Parallelen zwischen den Untersuchungsergebnissen von Khan et al. und denen von Altmann [35] vor. Altmann untersuchte die Auswirkungen von Garnondulationen auf die Zug- und Druckeigenschaften eines Glasfaser-NCF-basierten Laminats. Seine Untersuchungen wurden in Anlehnung an Defekte, die während der Windblattfertigung auftreten, durchgeführt. Die Prüfkörper wurden im VAP-Prozess hergestellt, wobei das formgebende Werkzeug eine sinusförmige Welligkeit aufwies. Da während der Versuche mit lokalen Dehnungskonzentrationen zu rechnen war, wurde das Dehnungsfeld optisch mittels DIC-Methode⁶ aufgenommen. Es wurde das Dehnungsfeld einer Seitenfläche des Prüfkörpers aufgezeichnet. Die künstlich hervorgerufene Garnondulation verursachte im Druckversuch einen Abfall der Festigkeit von bis zu 68 % und eine Reduktion der Steifigkeit von maximal 46 % verglichen mit nicht ondulierten Referenzproben. Die Garnauslenkung verursachte unter Drucklast interlaminare Schubspannungen und Normalspannungen in Dickenrichtung. Die Überlagerung beider Spannungszustände führt zu Delaminationen an der Position der maximalen Garnauslenkung, was durch die DIC-Aufnahmen bestätigt wurde. Schließlich versagten die Druckproben durch die Ausbildung eines „kink bands“ (Knickband) an der Stelle maximaler Schublast bzw. an der Position der maximalen Garnondulation. Unter Zuglast wurde ein Abfall der Zugfestigkeit von bis zu 15 % und der Zugsteifigkeit von maximal 19 % im Vergleich zu einer nicht ondulierten Probe festgestellt. Es kam bei der Zugbeanspruchung erneut zu einer Kombination aus interlaminaren Schubspannungen

⁶ DIC (digital image correlation)-Methode: Optische Messmethode zur Messung von Dehnungsfeldern.

und Normalspannungen in Dickenrichtung, was zu Delaminationen an der Position der größten Steigung der Garnwelligkeit führte. Schließlich versagten die Proben aufgrund von Garnbruch.

Auch Bloom et al. [36] untersuchten die Auswirkungen von Ondulationen auf Zugkennwerte von Glasgarngewebelaminaten. Die Ondulationen wurden in Anlehnung an Welligkeiten, die während des Einlegens von überdimensionierten Textillagen in ein Formwerkzeug entstehen, erzeugt. Hierzu wurden die Lagen einer Preform bewusst an einer Kante überdimensioniert zugeschnitten und anschließend mit dem überschüssigen Material eine Falte in der Mitte der Preform erzeugt. Die Prüfkörperherstellung erfolgte im Vakuumsackverfahren und einem ebenen Werkzeug. Die Garnfalten führten zu einer ungleichmäßigen Wandstärkenverteilung. Während der mechanischen Versuche wurde die DIC-Methode angewendet, um das Dehnungsfeld zu erfassen. Zusätzlich wurde die globale Dehnung mit einem Videoextensometer gemessen. Zu beobachten waren lokale Dehnungsspitzen, welche doppelt so groß waren als die Dehnungen im störungsfreien Bereich. Zurückzuführen war dieser Effekt auf einen Steifigkeitsabfall aufgrund der Garnondulation. Es wurde eine Reduktion der Zugkennwerte von bis zu 40 % verzeichnet. Dabei versagten die Proben an der Position der Garnondulation. Das dominierende Versagensverhalten war Garnbruch begleitet von Delaminationen. Die Steifigkeitskennwerte sind im Gegensatz zu den Untersuchungen von Altmann nicht signifikant beeinflusst worden.

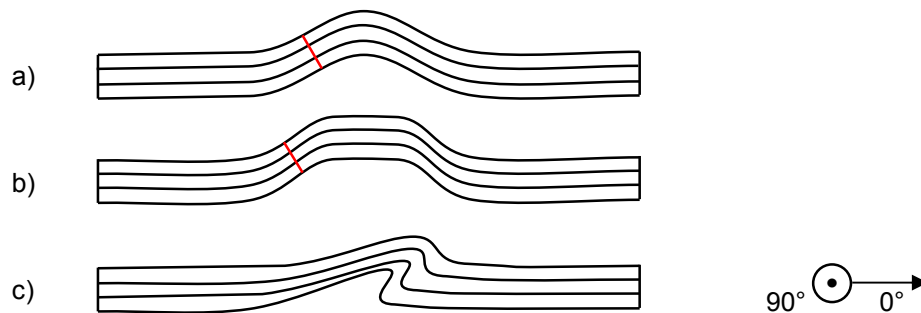


Abb. 2-19: Prüfkörperform (Seitenansicht)

a) Altmann; b) Khan et al.; c) Bloom et al.. Die rote Linie beschreibt den finalen Bruch der Probe. Bloom et al. zeigen keine Seitenansicht der Bruchflächen

Abb. 2-19 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Formen der Prüfkörper der genannten Veröffentlichungen⁷. Die Ergebnisse der aufgeführten Untersuchungen beweisen, dass ausgeprägte Garnondulationen garn-dominierte Kennwerte von Gewebe- und NCF-Proben unter statischer Last reduzieren. Selbst wenn die Garnondulationen in Verbunde eingebracht sind, die bereits ein relativ hohes Maß an „Grundondulation“ (wie Gewebe) verfügen, sind deutliche Auswirkungen zu erkennen. Die Versagensmechanismen ähneln sich bei den unterschiedlichen Untersuchungen. Alle Druckproben versagen an der Position der größten Ondulation. Altmann und Khan beschreiben initial ein interlaminares Versagen, das zu einem finalen Bruch in Dickenrichtung führt. Altmann spricht klar von einem Kink-Band-Bruch. Bei den Zugprüfungen konnten ebenso Parallelen zwischen den Untersuchungen von Altmann und Bloom festgestellt werden. Das endgültige Versagen tritt an der Position der Garnondulation auf. Es ist eine Kombination aus Garnbruch und Delaminationen festzustellen.

Hörrmann et al. [37] untersuchten die Auswirkungen von lokalen Welligkeiten auf die Lebensdauer eines gelegebasierten Laminats unter Druck-Druck- und Zug-Druck-Belastung. Sie untersuchten fünf verschiedene Lastebenen bei Frequenzen von 5 Hz und 10 Hz. Die künstlichen Garnondulationen wurden durch zusätzliche Kunststoffstäbe mit einem Durchmesser von 0,5 mm erzeugt. Die Stäbe wurden senkrecht zur Garnlängsrichtung in die Preform eingelegt und verursachten bei Druckbeaufschlagung (im RTM-Prozess) eine Garnondulation. Das Laminat bestand aus sechs Lagen und die Stäbe wurden sowohl zwischen erster und zweiter als auch zwischen fünfter und sechster Lage positioniert. Dabei wurde der horizontale Stababstand (c) variiert und somit auch der Winkel (δ), der sich zwischen der Vertikalen und der direkten Verbindungslinie ergab (siehe Abb. 2-20). Alle Prüfkörper versagten an der Position der Garnondulation bzw. an der Verbindungslinie zwischen den Kunststoffstäben.

⁷ In der Veröffentlichung von Mandell et al. [33] konnte keine Abbildung des Probenquerschnitts festgestellt werden. Altmann zeigt als Einziger Abbildungen der Bruchflächen (kink-band)

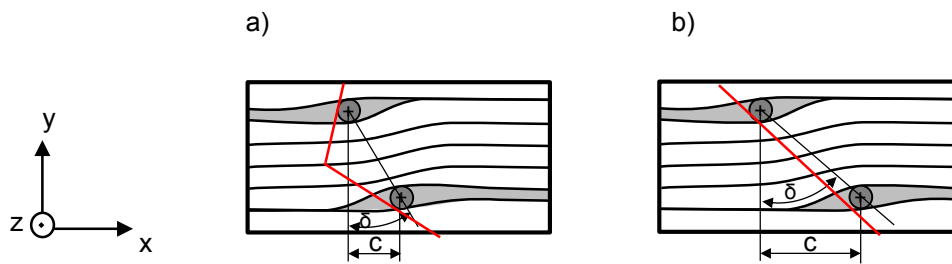


Abb. 2-20: Garnondulationen (in der xy -Ebene) eines sechslagigen Laminats hervorgerufen durch Kunststoffstäbe mit einem Durchmesser von 0,5 mm.
Das Versagen ist durch die rote Linie dargestellt. Die hellgrauen Flächen entsprechen den Reinharzgebieten. a) Zweiteiliger Bruch; b) Einteiliger Bruch. Auf Basis von [37]

Hörrmann et al. konnten anhand unterschiedlicher δ -Werte, verschiedene Versagensmoden der ondulierten Proben ausmachen. Lag δ in einem Bereich zwischen 0° und 20° , kam es zu einer Biegung um die z -Achse und zu einem „zweiteiligen“ Bruch (Abb. 2-20 a)). Bei einem Winkel δ von 20° bis 65° (Abb. 2-20 b)) kam es zum Matrixversagen in den harzreichen Zonen, was zu Delaminationen in den äußeren Lagen führte. Nach wenigen weiteren Zyklen kam es zum Bruch der inneren Lagen in Form eines Kink-Bands. Die Zyklenzahl wurde bei einem Winkel von $\delta=45^\circ$ um ca. 50 % reduziert verglichen mit einer fehlerfreien Referenz.

2.3.2 Defekte in AFP-Verbunden

Aufgrund von Ablageungenauigkeiten während des AFP (automated fiber placement)-Verfahrens kann es zu lokalen Lücken zwischen zwei Prepreg-Bändern bzw. zu Überlappung von Bändern kommen. Durch die Relevanz des AFP-Verfahrens in der Serienproduktion von Luftfahrtbauteilen, existiert eine Vielzahl von Untersuchungen, die Fehler in AFP-Laminaten thematisieren [38]. Zum Beispiel führten Rhead et al. [39] Compression-After-Impact-Versuche von lückenbehafteten AFP-Laminaten durch. Durch verschiedene Lückenarrangements wurde der Aufprall des Impaktors unterschiedlich stark gedämpft und Änderungen der Delaminationsflächen wurden festgestellt. Fayazbakhsh et al. [40] entwickelten ein numerisches Modell, das die Existenz von Lücken und Überlappungen in AFP-Laminaten berücksichtigt. Dieser Ansatz verfügt über eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Steifigkeit und Beullast als bisherige numerische Modelle. Falcó et al. [41] untersuchten verschiedene Defekte, wie sie in gekrümmten Ablagepfaden zwischen benachbarten Bändern auftreten. Es wurden die Auswirkungen von Lücken, Überlappungen und gestaffelten Bänderanordnungen auf mechanische Eigenschaften untersucht. Croft et al. [42] untersuchten neben Lücken, Überlappungen ebenso Verdrehungen der vorimprägnierten Bänder. Coupons wurden mit einzelnen Fehlern versehen und mechanisch getestet. Aufgrund des geringen Einfluss der Fehler auf die Garnondulation im Laminat konnten auch nur schwache Minderungen der mechanischen Kennwerte festgestellt werden.

Lan et al. [43, 44] führten detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen von lokalen Lücken (mit konstanter Breite) auf Zug-, Druck- und Schubkennwerte durch. Da sich das methodische Vorgehen und die geprüften Couponlastfälle zwischen Lan et al. und dieser vorliegenden Dissertation ähneln, wird auf die Ergebnisse der zwei betreffenden Veröffentlichung intensiv eingegangen. Die Prüfkörper basierten auf Prepreg-Material, das sowohl mittels eines standardisierten als auch eines modifizierten (Verwendung eines Druckblechs an der Position der Lücke) Vakuumsackaufbaus verarbeitet wurde. Bei den Untersuchungen der Zugeigenschaften wurde in jede 90°-Lage [0°/90°₅/0°] des Laminates eine Lücke in Garnrichtung eingebracht, die zusätzlich übereinander positioniert wurden. Bei den Druckprüfkörpern [90°₄/0°₃/90°₄] wurden in alle acht 90°-Lagen ebenso Lücken übereinander eingebracht. Dieses Vorgehen des generischen Extremfalls sollte die Auswirkungen von Lücken auf die Mechanik möglichst deutlich herausstellen. Die Schubprüfkörper [(-45°/+45°)₃/-45°] verfügten über Garnlücken in der dritten Lage in -45° und in der vierten Lage in +45° (siehe Abb. 2-21).

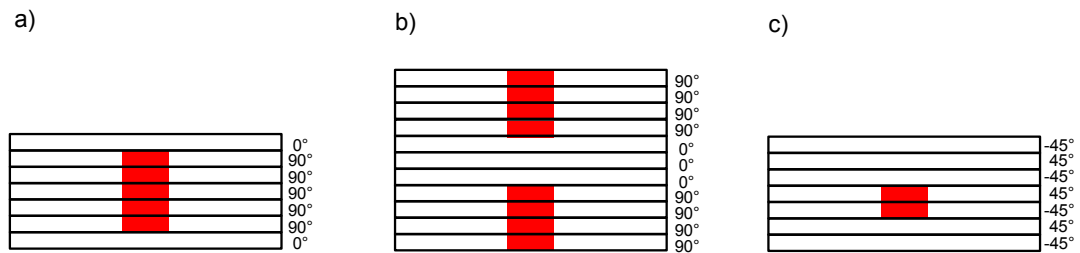


Abb. 2-21: Prüfkörperkonfigurationen mit eingebrachten Lücken (rot)

a) Zugprüfkörper; b) Druckprüfkörper; c) Schubprüfkörper. Auf Basis von [43, 44]

Im Rahmen des standardisierten Vakuumsackaufbaus und einer Autoklavprozessierung (Autoklavdruck von 7 bar) konnte an der Position der Lücken eine Wandstärkereduktion und eine Ondulationserhöhung der benachbarten Bänder festgestellt werden. Da die Prüfkörper der verschiedenen mechanischen Tests unterschiedliche Lagenkonfigurationen und auch unterschiedliche relative Lückenanteile hatten, entstanden unterschiedliche Wandstärkereduktionen. Die Zugprüfkörper zeigten eine Minderung der Wandstärke von ca. 70 %, die Druckprüfkörper von 35 % und die Schubproben einen geringen einstelligen Prozentbetrag. Durch die Verwendung des Druckblechs im Rahmen des modifizierten Vakuumaufbaus konnte die Wandstärkereduktion an der Position der Lücken verhindert werden. Das Eindringen der Vakuumfolie aufgrund des wirkenden Druckunterschieds (ca. 8 bar) zwischen Vakuumaufbau und Autoklavatmosphäre wurde durch die Steifigkeit des Druckblechs gehemmt. Stattdessen bildete sich dort ein Reinharzgebiet und somit eine lokale Faservolumengehaltsreduktion, was das Aufschwimmen der verbleibenden 0°-Bänder verursachte. Die Proben mit konstanter Wandstärke zeigten keine Einbußen in der Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit im Vergleich zur Referenz. Die Proben mit lokaler Wandstärkereduktion zeigten dagegen eine deutliche Abnahme der mechanischen Zugkennwerte. Bei der Betrachtung

des auf die Probenbreite normalisierten Lastflusses wurden Einbußen in den mechanischen Eigenschaften festgestellt. Die Zugfestigkeit fiel um ca. 30 % verglichen mit einer fehlerfreien Referenz. Hier spielten zwei Faktoren eine entscheidende Rolle: die Ondulation der Bänder und die Wandstärkenreduktion aufgrund der lokalen Lücke. Die Wandstärkenreduktion führte zu einer lokalen Spannungserhöhung und die Ondulation der Bänder erzeugte eine ungünstige Querbelastung dieser. Somit war auch das Versagen der Zugprüfkörper an exakt der Stelle der Lücken zu erklären. Die Referenzproben versagten stochastisch entlang der Prüfkörperlänge. Die Druckprüfkörper mit eingebrachten lokalen Lücken (Aushärtung ohne Druckblech) zeigten aufgrund der lokalen Inhomogenität ein Stabilitätsversagen in Form von Beulen. Die Schubprüfkörper versagten alle in einem 45°-Riss unter Ausbildung von ausgeprägten Delaminationen. Die lückenbehafteten Proben – ob mit Druckblech oder ohne – versagten stets an der Position der Lücke. Die Referenzproben versagten regellos über die freie Prüflänge verteilt. Die Schubsteifigkeit, welche auf die Wandstärke an der Lücke bezogen wurde, fiel zwischen 5 % und 10 % im Vergleich zur fehlerfreien Referenz. Die Schubspannung (bei 5-%iger Dehnung) wurde ebenso auf die Wandstärke an der Lücke bezogen. Die Proben, welche ohne Druckplatte hergestellt wurden, zeigten einen Abfall von ca. 20 %. Die Schubspannung (bei 5-%iger Dehnung) der Prüfkörper mit konstanter Wandstärke (Herstellung mit Druckplatte) fiel um 13 % im Vergleich zur lückenlosen Referenz. Die lokalen Imperfektionen des AFP-Verbunds in Form von Wandstärkenreduktion bzw. Ondulationszunahme der Bänder und Minderung des lokalen Faservolumengehalts haben die Änderungen in der Schubeigenschaften zur Konsequenz.

2.3.3 Ondulationen in multiaxialen Prepreg-Verbunden

Mukhopadhyay et al. [45–47] führten zahlreiche mechanische Untersuchungen von multiaxialen Prepreg-Laminaten mit eingebetteten Garnondulationen durch. Auf Basis eines quasiisotropen multiaxialen Prepreg-Lagenaufbaus $[+45_2/90_2/-45_2/0_2]_{3s}$ wurden sowohl statische axiale (in 0°) Zug- und Druck- als auch Ermüdungsversuche durchgeführt. Die Garnondulationen in den 0°-Lagen wurden durch zusätzliche Prepreg-Streifen, welche in 90° verliefen, eingebracht.

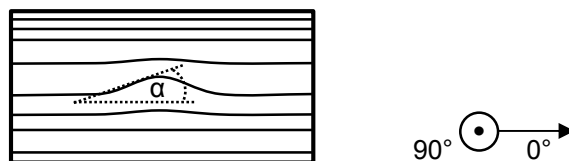


Abb. 2-22: Messung Ondulationswinkel α
Auf Basis von [46]

Durch die Breite und die Dicke der 90°-Streifen konnte der Grad der Ondulation und somit der Ondulationswinkel α eingestellt werden (siehe Abb. 2-22). Folgende drei Ondulationsgrade wurden festgelegt:

- Grad 1 mit einem Ondulationswinkel von 4,9°-5,6°
- Grad 2 mit einem Ondulationswinkel von 7,5°-9,9°
- Grad 3 mit einem Ondulationswinkel von 11,4°-12,1°

Prüfkörper aller drei Ondulationsgrade zeigten geringere Zugfestigkeiten als die fehlerfreie Referenz. Ondulationsgrad 1 erzeugte eine 4-%ige, Ondulationsgrad 2 eine 13-%ige und Ondulationsgrad 3 eine 22-%ige Abnahme der Zugfestigkeit. Das Versagen der Prüfkörper wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet und zeigte im Falle von Ondulationsgrad 2 und 3 Delaminationen zwischen den 45°- und 90°-Lagen. Dieses Versagen konnte ebenso einem kleinen aber rapiden Festigkeitsabfall zugeordnet werden, das vom finalen Versagen in Form von Garnbruch gefolgt wurde. Zusätzlich wurden Mikro-CT-Untersuchungen von ondulierten, teilweise geschädigten Laminaten durchgeführt. Dazu wurden die Prüfkörper kontrolliert geschädigt, indem sie nur bis zum Erreichen des initialen Versagens geprüft wurden. Die Aufnahmen zeigten großflächige Delaminationen und Matrixbrüche im Bereich der Garnondulation, welche sich über die komplette Probenbreite erstreckten. Anhand von numerischen Untersuchungen konnte das initiale Versagen interlaminare Schubspannungen zugeordnet werden, die konzentriert in Bereichen von Garnondulationen entstehen. Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 aufgeführt wurde, erzeugen Garnondulationen interlaminare Schubspannungen, die initiales Versagen in Form von Delaminationen hervorrufen.

Die unterschiedlich stark ondulierten Prüfkörper zeigten im Druckversuch unterschiedliche Versagensverhalten. Mit Hilfe von Aufnahmen, die erneut mit einer Hochgeschwindigkeitskamera erstellt worden sind, konnte das Versagensverhalten analysiert werden. Vier von sechs Prüfkörpern mit einem Ondulationsgrad 1 versagten initial durch Garnbruch in einer Lage. Gefolgt wurde dieses lokale Versagen von Delaminationen der benachbarten Lagen, was auch zum finalen Versagen der Probe führte. Die restlichen Prüfkörper mit dem Ondulationsgrad 1 delaminierten, bevor es zum Garnbruch kam. Die Autoren vermuten, dass dieser Ondulationsgrad nahe des Übergangspunkts der Versagensverhalten liegt. Somit können geringe Abweichungen im Ondulationsgrad – bedingt durch Herstelltoleranzen – zur Änderung des Versagensverhaltens führen. Die Proben des Ondulationsgrads 2 und 3 zeigten initial Matrixbrüche im ondulierten Bereich, die zu Delaminationen führten und schließlich das finale Versagen in Form von Garnbruch (unter Drucklast) einleiteten. Die Änderung des Versagensverhaltens wurde auch in der prozentualen Abnahme der Druckfestigkeit festgestellt. Der Ondulationsgrad 1 rief eine Reduktion von ca. 19 % hervor, während Ondulationsgrad 2 und 3 jeweils die Druckfestigkeit um ca. 35 % im Vergleich zur fehlerfreien Referenz minderten.

Die Ermüdungsversuche wurden ausschließlich auf Basis von Proben mit dem Ondulationsgrad 2 durchgeführt. Die Fatiguelasten entsprachen verschiedenen Abstufungen der Zugfestigkeit des statischen Falls (Belastungsgrad). Das Spannungsverhältnis (R) betrug 0,11 und es wurde mit einer Frequenz von 3 Hz geprüft. Mit zunehmender Fatiguelast nahm die Anzahl an maximalen Belastungszyklen drastisch ab:

- 70 % Belastungsgrad; 87 Zyklen (29,03 % CV)
- 60 % Belastungsgrad; 965 Zyklen (68,16 % CV)
- 50 % Belastungsgrad; 6768 Zyklen (25,66 % CV)
- 40 % Belastungsgrad; 181302 Zyklen (39,18 % CV)

Das initiale Versagen war delaminationsdominiert, was sowohl durch optische Inspektion als auch durch Mikro-CT-Untersuchungen festgestellt wurde. Die Delaminationen lokalisierten sich in der Nähe der Garnondulation. Das finale Versagensverhalten war der Bruch der in 0°-Richtung verlaufenden Garne.

2.3.4 Ondulationen in unidirektionalen Prepreg-Verbunden

UD (unidirektionale)-Verbunde bieten die Möglichkeit Garnondulationen isoliert zu betrachten, da sie sensibel auf Garnwinkelabweichungen reagieren. Der unidirektionale Verbundtyp verfügt im Gegensatz zu Textilien (Gewebe, Geflechte) über keine oder über nur eine minimale „Grundondulation“, weswegen geringe Winkelabweichungen von wenigen Grad für die mechanische Leistungsfähigkeit entscheidend sein können. Untersuchungen zu Versagensmechanismen von kontrolliert ondulierten UD-Laminaten liefern somit einen wertvollen Beitrag zum Verständnis des Versagensverhaltens von kontrolliert onduliert textiltbasierten Verbunden.

Piggott [48] zeigt eine umfassende Zusammenfassung der Auswirkungen von Garnondulationen auf Druck-, Fatigue- und Schubkennwerte. Er verweist unter anderem auf Untersuchungen von Mrse et al. [49], die einen linearen Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Garnwinkelabweichung bei kohlenstofffaserverstärkten PEEK-Verbunden festgestellt haben. Bei Abweichungen bereits von 6° konnte eine Reduktion der Druckfestigkeit um 16 % festgestellt werden. Ebenso hat die Garnwelligkeit einen Effekt in Lebensdaueruntersuchungen. Ondulierte Proben zeigten bei Zug-Fatigue-Beanspruchungen zu Beginn des Versuchs eine leichte Abnahme der Zugfestigkeit, die im Laufe des Versuchs stetig größer wurde. Piggott nennt hierzu keine konkreten Zahlen. Er stellt allerdings ein Versagensmodell auf, das das vorzeitige Versagen von ondulierten Proben erklärt. Unter der alternierenden Zuglast werden die Garne gestreckt und relaxiert, dabei kommt es zu einem Schaden im Bereich der unmittelbar umgebenden Matrix. Mit zunehmenden Belastungszyklen nimmt dieser Matrixschaden zu. Piggott präsentierte ein analytisches Modell zur Bestimmung der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Garnondulation. Er postuliert, dass die Schubfestigkeit des Reinharzes gleich der Schubfestigkeit eines perfekten UD-Verbundes ist.

Der durch die Schubbeanspruchung verursachte Riss wandert durch die Reinharzbereiche. Sobald Garne aufgrund ihrer Ondulation in die Rissfläche reichen, muss eine höhere Beanspruchung aufgebracht werden, um die Garne zusätzlich zum Versagen zu bringen.

Hsiao, Daniel und Chun [50–52] beschäftigten sich in mehreren Veröffentlichungen mit den Auswirkungen von Garnondulationen auf Steifigkeiten und Festigkeiten im Rahmen von unterschiedlichen Lastfällen. Zusätzlich wurden diese Ergebnisse mit analytischen Modellen abgeglichen, die drei verschiedene Ondulationsgrade (gleichmäßig, abgestuft und lokal) beschreiben (siehe Abb. 2-23). Die Ondulationen wurden mit der Periodenlänge L_O und der Amplitude A_O charakterisiert. Das erste Modell (a)) beinhaltet gleichmäßige (gleiche Amplitude und Periodenlänge) sinusförmige Schwingungen aller Garnlagen eines Volumenelements. Das b)-Modell enthält sinusförmige Schwingungen der Garnlagen bei gleicher Periodenlänge und unterschiedlicher Amplitude. In der Mittelebene des Volumenelements befindet sich eine Lage mit maximaler Ondulationsamplitude, welche symmetrisch zu den Rändern des Volumenelements abnehmen. Die äußersten Garnlagen des Elements besitzen keine Ondulation. Das Modell c) beschreibt lokale Garnondulationen, die nicht über die gesamte Länge des Volumenelements verlaufen. Ebenso nimmt die Amplitude der Ondulationen zum Rand des Elements ab. Zusätzlich zum analytischen Ansatz wurden mechanische Druckversuche durchgeführt. Mittels verschiedener Herstellungsverfahren wurden die Prüfkörper entsprechend der unterschiedlichen Ondulationsgrade der Volumenelemente hergestellt, die ebenso Abstufungen der Garnondulation identisch zu den drei Modellen, aufwiesen.

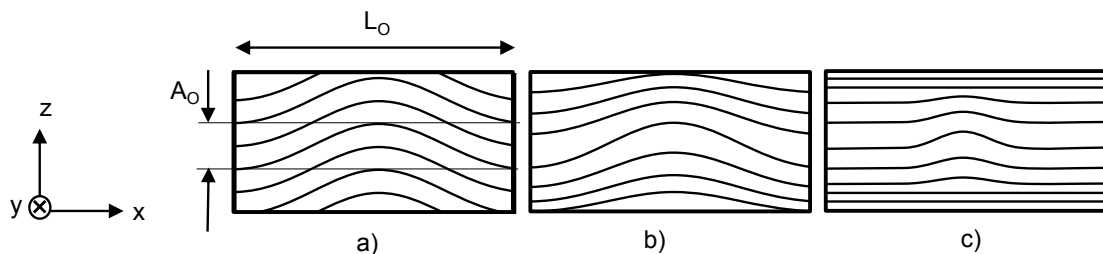


Abb. 2-23: Drei verschiedene Modelle eines Volumenelements mit abnehmendem Grad der Garnondulation

a) Gleichmäßig; b) Abgestuft; c) Lokal. Abbildungen auf Basis von Hsiao, Daniel und Chun [50–52]

Die analytischen Modelle zeigten, dass mit zunehmendem Garnondulationswinkel bei gleichzeitig konstantem Verhältnis von A_O/L_O die Drucksteifigkeit abnimmt. Je geringer die Anzahl an ondulierten Lagen ist, desto geringer sind die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften in diesem Fall der Drucksteifigkeit. Nimmt das Verhältnis von A_O/L_O zu, zeigt das gleichmäßig ondulierte Modell die größten Einbußen, wobei das lokal ondulierte Modell die geringste Reduktion zeigt. Zusätzlich wurde ein Experiment auf Basis des „gleichmäßigen“ Garnondulationsgrades durchgeführt, dass

ein Verhältnis von $A_0/L_0 = 0,043$ und einer maximalen Garnondulation von 15° aufwies. Die Drucksteifigkeit fiel in diesem Fall um 43 %, was in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der analytischen Untersuchungen ist. Der dominierende Versagensmodus ondulierter Proben unter Drucklast ist, wie bereits in den anderen Untersuchungen festgestellt, die interlaminare Schubspannung. Dieser Spannungszustand führt zu Delaminationen und schließlich zum Beulen ganzer Garnlagen. Weiterhin wurde das analytische Modell zur Untersuchung der Schubeigenschaften verwendet. Das Modell a) zeigt bei der Erhöhung von A_0/L_0 eine Steigerung des Schubmoduls G_{12} sowohl im Schub-Druck- als auch im Schub-Zug-Versuch. Die Autoren geben hierzu keine Erklärung, aber eine mögliche Begründung ist die erhöhte Verschränkung der Lagen bei ausgeprägter Welligkeit. Mit zunehmendem A_0/L_0 ist mehr Kraft nötig, um ein Verscheren der Garnlage zu ermöglichen. Diese Erkenntnis ergänzt Piggotts Theorie, dass mit zunehmender Garnondulation mehr Kraft aufgebracht werden muss, um eine Schubversagen eines Verbundes herbeizuführen.

Davidson et al. [53] befassten sich im Rahmen von Untersuchungen zu den Effekten der Garnondulationen auf die Druckfestigkeit intensiv mit den entstandenen Bruchbildern. Abb. 2-24 zeigt die dokumentierten Bruchbilder. Die Ergebnisanalyse ergab, dass eine deutliche Korrelation zwischen der Druckfestigkeit und dem Ondulationswinkel α existiert, während der Kink-Band das dominierende Versagensbild darstellt. Das Versagensbild ist abhängig vom Verhältnis A_0/L_0 , welches durch vorgeformte Kunststoffelemente während der Probenfertigung eingestellt werden konnte. Ein Delaminationsversagen wurde bei kleinen Verhältnissen beispielsweise 3 mm/120 mm oder 2 mm/60 mm erzeugt. Ein Kink-Band resultierte aus Verhältnissen wie z.B.: 3 mm/12 mm. Davidsons Beobachtungen liegen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Hörrmann et al., die eine ähnliche Korrelation zwischen verschiedenen Versagensformen bei unterschiedlichen geometrischen Verhältnissen der Ondulation feststellten. Bei der Kombination von beiden Versagensformen, ist ein klarer Rückschluss auf das Verhältnis von A_0/L_0 möglich.

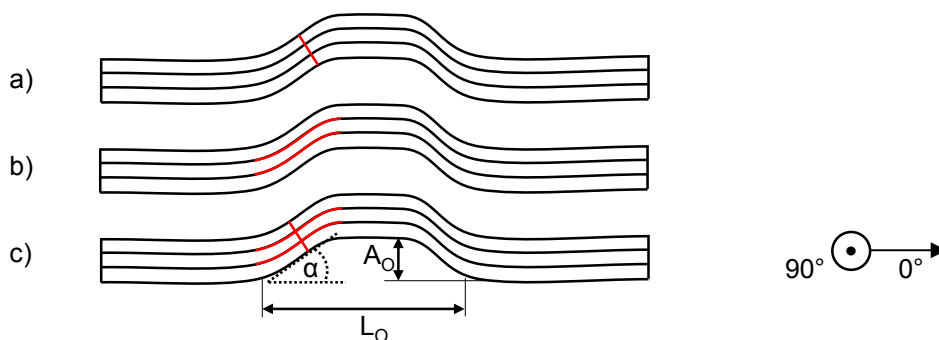


Abb. 2-24: Verschiedene Versagensmoden (rote Markierung)

a) Kink-Band; b) Delamination; c) Kink-Delaminations-Bruch. Abbildung auf Basis von Davidson et al. [52].

2.4 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Entstehung und der Auswirkungen von Geflechtfehlern in geflechtbasierten Kunststoffverbunden. Geflechtfehler unterscheiden sich in Typ, Größe und der Auftretenswahrscheinlichkeit während der Produktion von geflechtbasierten Verbunden. Um einen ausgeprägten Beitrag zur Reduktion der Ausschussquote zu erreichen, werden die Geflechtfehler nach produktionsrelevanten Gesichtspunkten verglichen. Mit Hilfe einer methodischen Analyse aus dem Qualitätsmanagement, die auf Basis von Erfahrungswerten einer Expertengruppe und der vorangegangenen Literaturrecherche erstellt wird, wird der Fokus auf den produktionskritischsten Fehler gelegt. Nach Identifikation des kritischsten Fehlers bedarf es der Untersuchung der initialen Fehlerursache, um eine frühe Fehlereliminierung in der Prozesskette zu ermöglichen. Zwischen finalen Stadium und initialer Ursache des Geflechtfehlers werden die einzelnen Fortpflanzungsstufen des Fehlers untersucht und somit die Fehlerentstehung im Detail analysiert. Der Geflechtfehler wird im Anschluss bezüglich der Auswirkungen auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Geflechtverbunds untersucht. Diese Analyse soll eine klare Unterscheidung zwischen unkritischer Unregelmäßigkeit und festigkeitsminderndem Fehler treffen. Eine Eingrenzung der kritischen Geflechtfehler konkretisiert die Ausschussdefinitionen. Wobei die Untersuchung zur Geflechtfehlerentstehung es ermöglicht den Fehler bereits am Anfang der Prozesskette zu eliminieren. Beide Teilaspekte der Arbeit leisten einen Beitrag sowohl zur Ausschussreduktion in der Herstellung von Geflechtbauteilen als auch zur Senkung der damit verbundenen Fehlerkosten⁸.

⁸ Fehlerkosten ist der Überbegriff für Kosten, die den Ausschuss, Mehr- und Nacharbeit und Untersuchungen zur Fehlerursachenfindung umfassen [5].

3 Geflechtfehleranalyse

Um den Fokus der Untersuchungen auf den kritischsten Geflechtfehler zu legen, müssen die Geflechtfehler nach bestimmten prozessrelevanten Kriterien miteinander verglichen werden. Um ebenso die initiale Geflechtfehlerursache bzw. die Entwicklung des Geflechtfehlers entlang der Prozesskette zu untersuchen, wird eine Methode des präventiven Qualitätsmanagements angewandt.

3.1 Methoden des Qualitätsmanagements

Zwei Methoden des präventiven Qualitätsmanagements sind die Fehler- Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und die Fehlerbaumanalyse (FTA), welche sich in ihren Betrachtungsweisen unterscheiden. Die FMEA geht von möglichen Fehlern aus und ein Expertenteam bewertet deren Ursachen, Auftretenswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen. Die FTA dagegen geht von Auswirkungen der Fehler aus, die zu nicht tragbaren Ergebnissen führen und untersucht deren mögliche Ursachen. Da zu Beginn dieser Arbeit die Auswirkungen von Geflechtfehlern auf die mechanischen Eigenschaften zum Teil nicht bekannt waren, mussten diese bewertet werden. Aus diesem entscheidenden Grund wurde die FMEA als geeignete Untersuchungsmethode ausgewählt [5].

Für jede Produktphase gibt es einen individuellen FMEA-Typ. In der Definitions- und Entwicklungsphase wird die System-FMEA angewendet, wohingegen in der Produktherstellung, darunter fällt ebenso die Herstellung von Verbundbauteilen mittels der Flechttechnik, die Prozess-FMEA Anwendung findet [5]. Der Fertigungsprozess für Flechtbauteile besteht aus mehreren Fertigungsschritten, welche bereits im Abschnitt Flechtprozesskette (Abschnitt 2.1) beschrieben worden sind. Analog zur Fertigung eines Flechtbauteils, das jeden Prozessschritt durchläuft, können sich Geflechtfehler ebenso entlang der Prozesskette fortpflanzen.

3.2 Anwendung der Prozess-FMEA auf Geflechtfehler

Eine FMEA ist zweigeteilt und beginnt mit der Analyse der Fehler, welche im zweiten Schritt einer Bewertung unterzogen werden. Die vorgestellte FMEA wurde in einer Gruppe aus drei Experten durchgeführt [54].

3.2.1 Analyse der Fortpflanzungsstufen von Geflechtfehlern entlang der Prozesskette

Ein Geflechtfehlertyp kann unterschiedliche Ursachen besitzen, welche unterschiedlichen Schritten in der Flechtprozesskette zuzuordnen sind. In diesem Abschnitt werden verschiedene Ursachen für Geflechtfehler und die entsprechenden Fortpflanzungsstufen vorgestellt. Die Fehlerfortpflanzungen werden in die drei Kategorien aus Abschnitt 2.2.1 (Filament-, Garn-, Geflechtebene) eingeteilt.

3.2.1.1 Fehlerbilder auf Filamentebene

Globale Ausprägung

Im Flussdiagramm der Abb. 3-1 ist die Entwicklung von Filamentbrüchen (in globaler Form bzw. auf das gesamte Geflecht bezogen) aufgrund dreier möglicher Ursachen zu erkennen. Die drei möglichen initialen Fehlerursachen, welche zu unterschiedlichen Prozessschritten stattfinden, führen zu drei individuellen Fehlerfortpflanzungen. Da sich der Fehler über das gesamte Geflecht erstreckt, beziehen sich die Fehlerursachen stets auf alle Garne im Prozess.

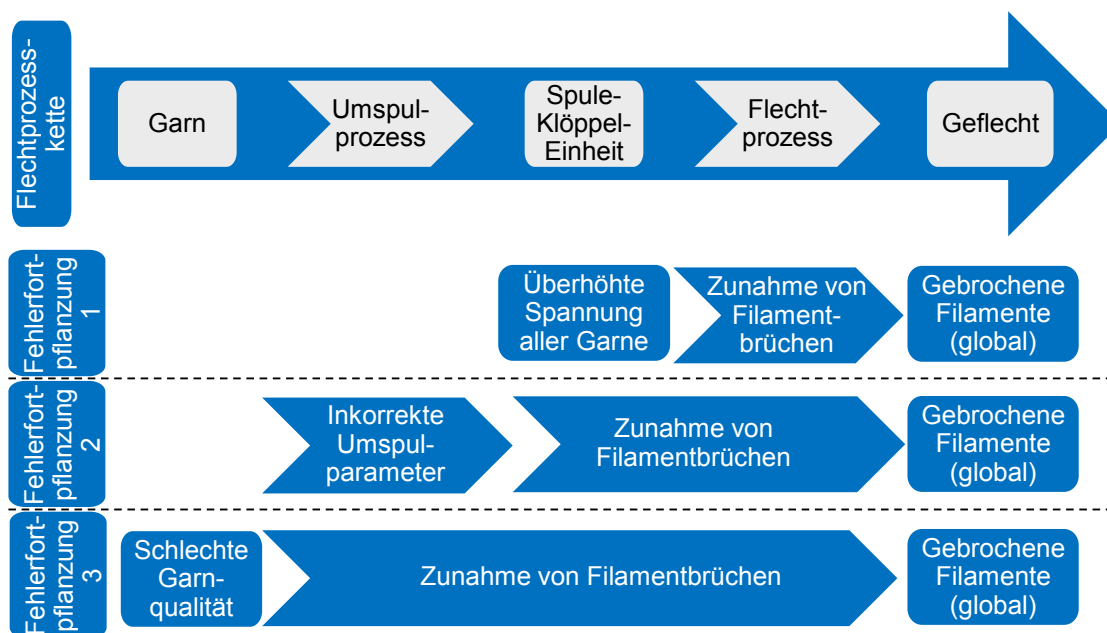


Abb. 3-1: Mögliche initiale Fehlerursachen und -fortpflanzung im Fall von gebrochenen Filamenten (global)

Detaillierte Ergänzungen zu den drei möglichen Fehlerfortpflanzungen:

- Fehlerfortpflanzung 1: Überhöhte Garnspannung aller Garne (in Bezug auf den Garntiter¹):
Die aufgebrauchte Garnspannung ist in Abhängigkeit des Garntiters und des Garnmaterials zu wählen. Mit einer Erhöhung der Garnspannung auf beispielsweise ≈ 10 N muss mit höheren mechanischen Belastungen des Garns und somit auch der Filamente gerechnet werden. Durch erhöhte Reibungskräfte kommt es an Umlenkelementen des Klöppels, an den Garnen der anderen Gangbahn und am Flechtring überdurchschnittlich häufig zu Filamentbrüchen. Deren verbleibende Fragmente ragen aus der Flechtstruktur heraus und sind als globaler Filamentbruch sichtbar.
- Fehlerfortpflanzung 2: Umspulparameter:
Ebenso haben sich auf Basis von Erfahrungswerten individuelle Umspulparameter für verschiedene Garne bzw. Garntiter ergeben. Grundsätzlich gilt, das Garn möglichst schonend im Umspulprozess zu verarbeiten. Bei Verwendung einer überhöhten Garnspannung kommt es bereits während des Umspulprozesses zu ausgeprägten Filamentbrüchen. Zu begründen ist dies erneut durch größere Reibungskräfte an garnkontaktierenden Elementen wie den Umlenkrollen. Diese initiale Garnschädigung wird im nachfolgenden Flechtprozess an weiteren garnkontaktierenden Elementen verstärkt. Schließlich resultieren ungünstig gewählte Umspulparameter in einem Geflecht, das global Filamentbrüche aufweist.
- Fehlerfortpflanzung 3: Garneigenschaften:
Das Garn kann bereits mit einer minderwertigen Qualität – im Sinne von erhöhtem Filamentbruch – vom Hersteller angeliefert werden. Die Verarbeitung von Garnen mit minderwertiger Qualität kann zu weiterer Schädigung und schließlich zu globalen Filamentbrüchen führen. Des Weiteren können der Schlichteanteil und die Art des Schlichteauftrags maßgeblich für die Garnqualität sein.

¹ In der Praxis wird die Garnspannung für ein Garn mit einem größeren Titer höher als für ein Garn mit einem kleineren Titer gewählt.

Lokale Ausprägung

Die Ursachen lokaler bzw. flächig begrenzter Fehler auf Filamentebene können erneut verschiedenen Prozessschritten zugewiesen werden (Abb. 3-2):

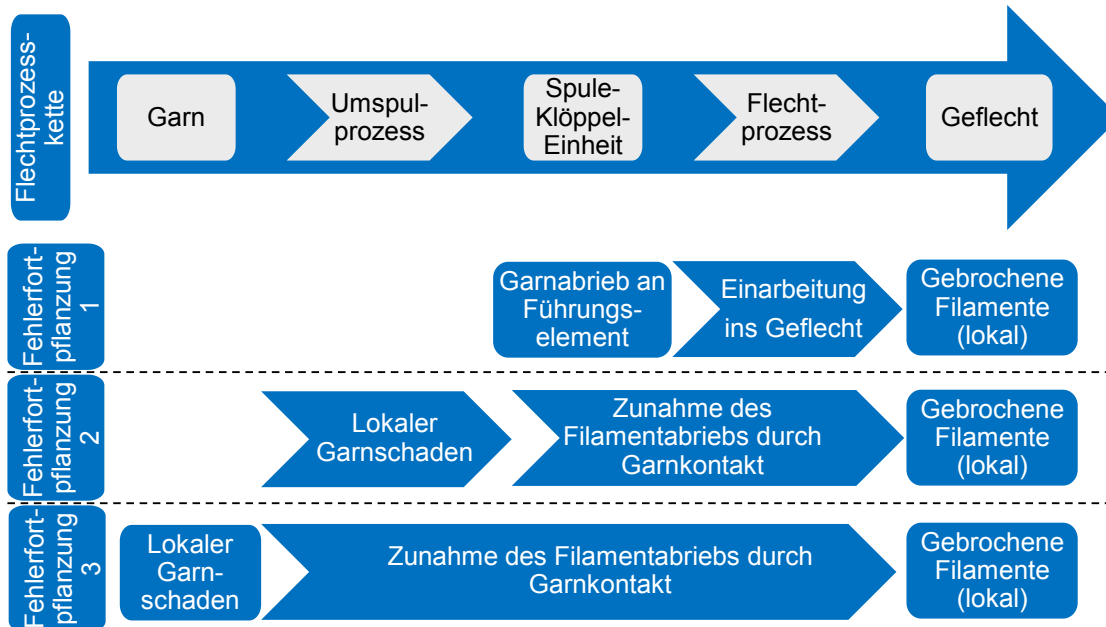


Abb. 3-2: Mögliche initiale Fehlerursachen und -fortpflanzung im Fall von gebrochenen Filamenten (lokal)

- Fehlerfortpflanzung 1: Garnabrieb an Führungselementen
Filamente sammeln sich an garnkontaktierenden Elementen in Form von Abrieb an und können sich im Verlauf des Flechtprozesses als „Filamentbündel“ vom garnkontaktierenden Element lösen und ins Geflecht eingezogen werden. Einzelne Unregelmäßigkeiten am garnkontaktierenden Element reichen aus, um Garnabrieb zu initiieren. Der Klöppel IFDA-100 der Fa. Herzog² verfügt über eine (nicht gelagerte) Garnumlenkung mit einem großen Umschlingungswinkel von 180°, welche besonders anfällig für Filamentansammlungen ist (Abb. 3-3). Wenn im Laufe des Flechtprozesses die Reibung zwischen Garn und Filamentansammlung größer als die Reibung zum fadenkontaktierenden Element wird, löst sich die Filamentansammlung vom Umlenkelement und wird schließlich in das Geflecht gezogen.

² Dieser Klöppeltyp stand während der Untersuchungen am Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München zur Verfügung.

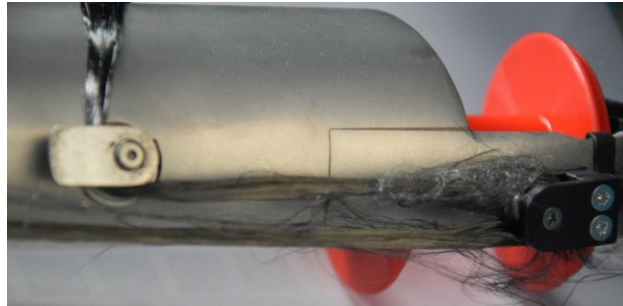


Abb. 3-3: Lokale Filamentansammlung an einer 180°-Umlenkungen eines Klöppels des Typs IFDA-100 (Fa. Herzog)

- Fehlerfortpflanzung 2 und 3: Eine lokale Schädigung des Garns zu unterschiedlichen Prozessschritten:
Ebenso wie ein Garn oder eine Garncharge ganzheitlich eine erhöhte Schädigung aufweisen können, kann eine erhöhte Garnschädigung auch nur in einem begrenzten Garnbereich auftreten. Die Ursache hierfür kann erneut im Umspulprozess oder auch in der Garnherstellung liegen.

3.2.1.2 Fehlerbilder auf Garnebene

Begünstigt wird die Entstehung der Garnschleufe und Garnlücke durch eine Abweichung (Unter- oder Überschreitung) von der Soll-Garnspannung. Abb. 3-4 zeigt die Entstehung und die Entwicklung der Garnschleufe.

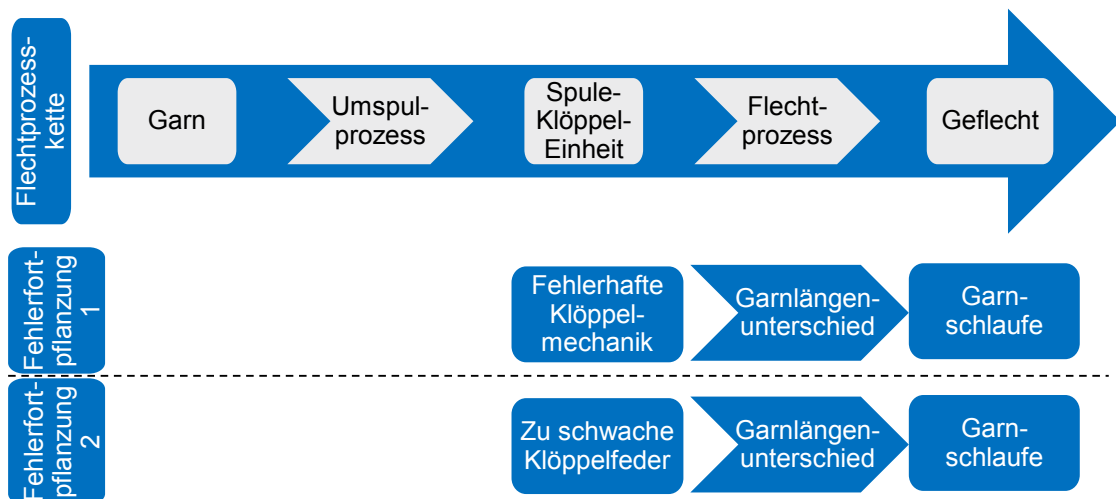


Abb. 3-4: Mögliche initiale Fehlerursachen und –fortpflanzung im Fall von Garnschlaufen

- Fehlerfortpflanzung 1:
Die initiale Ursache für eine Garnschleufe befindet sich im Prozessschritt Spule-Klöppel-Einheit. Aufgrund einer fehlerhaften Klöppelmechanik rastet der Sperrbolzen nicht mehr in den Nuten der Flechtspule ein und die Feder-Tänzer-Mechanik setzt aus. Die Flechtspule dreht sich unkontrolliert, das Garn wird

nicht gespannt und es kommt zu einem Garnlängenunterschied, der in einer Garnschleufe resultiert.

- Fehlerfortpflanzung 2:
Der Wechsel bzw. die Montage der Klöppelfedern wird manuell durchgeführt. Bei der Umrüstung einer Flechtmaschine, die möglicherweise eine große Klöppelanzahl besitzt, besteht die Möglichkeit, dass Fehler bei der Federmontage auftreten. Ist die Ist-Garnspannung deutlich geringer als die Soll-Garnspannung, kommt es zu einer Garnlängendifferenz und erneut zu einer Garnschleufe.

Eine Garnlücke kann ihre initiale Ursache im Flechtprozess oder in einem früheren Prozessschritt besitzen. Liegt die Fehlerursache einer Garnlücke in einem der ersten drei Prozessschritte, tritt eine Fehlerfortpflanzung über mehrere Stufen auf.

In Abb. 3-5 sind mögliche initiale Ursachen einer Garnlücke aufgetragen, welche im Prozessschritt „Flechtprozess“ auftreten – eine Fehlerfortpflanzung findet hier nicht statt.

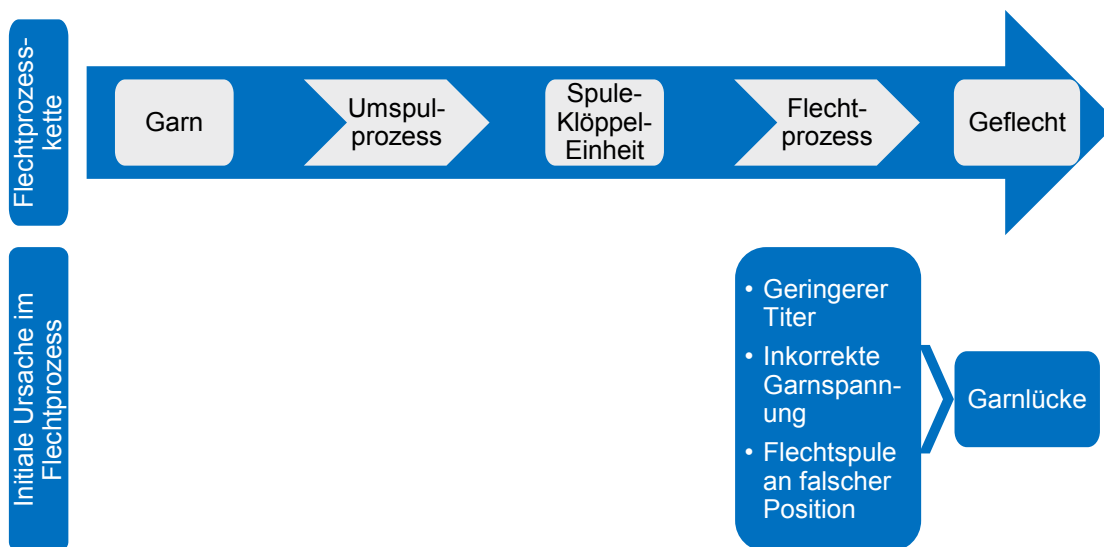


Abb. 3-5: Mögliche initiale Fehlerursachen einer Garnlücke während des Flechtprozesses

Eine Garnlücke kann aufgrund eines Garns entstehen, welches einen geringeren Titer und somit eine geringere Ablegbreite als die restlichen Garne des Geflechts besitzt. Ebenso führen eine zu hohe Garnspannung – aufgrund einer inkorrekten Klöppel-druckfeder – und eine inkorrekte Position der Flechtspule (relevant bei einer Teilbesetzung der Flechtmaschine) zu einer Garnlücke.

Häufig entsteht eine Garnlücke aufgrund einer prozessbedingten Garnspannungserhöhung. Diese kann mehrere Ursachen haben, welche zu verschiedenen Stufen der Flechtprozesskette entstehen, und somit mehrere Fortpflanzungsstufen besitzen.

Abb. 3-6 zeigt eine Übersicht der Fehlerursachen und Fehlerfortpflanzungsstufen, die zu einer prozessbedingten Garnspannungserhöhung und zu einer Garnlücke führen.

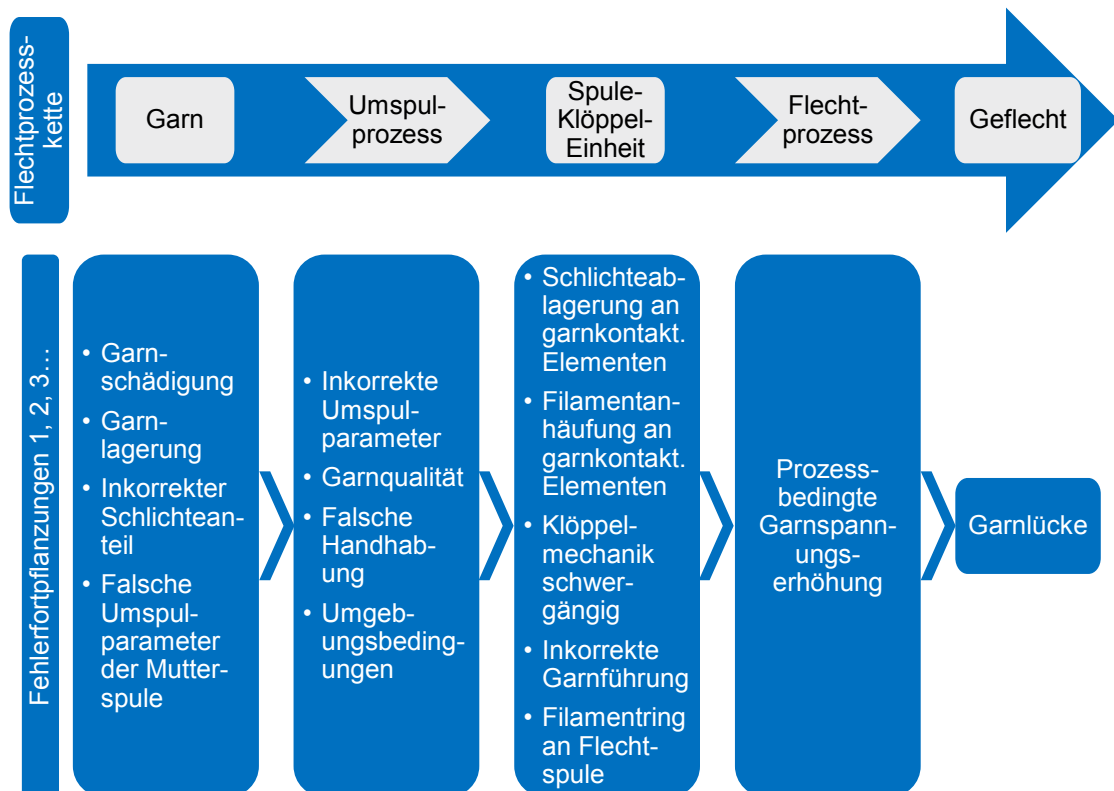


Abb. 3-6: Mögliche initiale Fehlerursachen einer Garnlücke, welche durch eine prozessbedingte Garnspannungserhöhung entsteht

Die Garnlücke und der Garnriss besitzen häufig die gleichen Ursachen. Der Riss eines Garns, das einen hohen Titer besitzt, bedarf einer sehr hohen Garnspannung. Bevor ein Garn mit einem hohen Titer (z.B. 24k) reißt, entsteht eine Garnlücke und tendenziell ein Schaden an der Flechtmaschine.

3.2.1.3 Fehlerbilder auf Geflechzebene

Die Fehlerbilder auf Geflechzebene (unvollständige Bedeckung und Flechtwinkelabweichung) sind beide zurückzuführen auf inkorrekte Parametereinstellungen im Flechtprozess (siehe Abb. 3-7). Es ist das Zusammenspiel aus Garnbreite, Flechtkern-durchmesser, Garnanzahl und Flechtwinkel (Abzugsgeschwindigkeit des Flecht-kerns), die in Form der „Flechtformel“ (2-1) zu berücksichtigen sind. Die inkorrekte Einstellung eines Flechtparameters führt unmittelbar zu einem Defekt auf Geflechzebene.

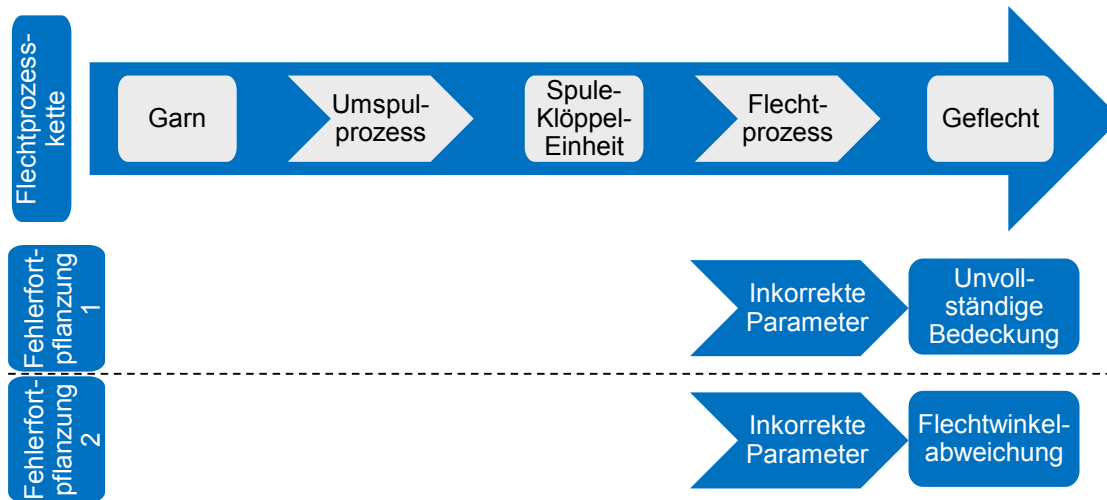


Abb. 3-7: Mögliche initiale Fehlerursachen im Fall von unvollständiger Bedeckung und Flechtwinkelabweichung

3.2.1.4 Verkettung mehrerer FMEAs entlang der Prozesskette

Der Analyseschritt einer FMEA beinhaltet die Definition von potentiellen Fehlern (PF_x), potentiellen Fehlerursachen (FU_x) und potentiellen Auswirkung der Fehler (FA_x). Mit Hilfe der Erkenntnisse zu den Fortpflanzungsstufen werden pro Flechtprozessschritt PF_x , FU_x und FA_x abgeleitet. Dies führt zu mehreren FMEAs, welche miteinander verkettet sind (siehe Abb. 3-8). In der ersten FMEA ($FMEA_1$) soll der kritischste Geflechtfehler ermittelt werden. Da in einer FMEA stets die Fehlerursachen bewertet werden (siehe hierzu nächsten Abschnitt „Bewertung von Geflechtfehlern“), werden die im Grundlagenteil genannten Geflechtfehler in $FMEA_1$ als Fehlerursachen FU_1 definiert. Dort gilt folgende Zuordnung:

- Potentielle Fehlerursachen (FU_1) im Prozessschritt „Gefecht“
- Potentielle Fehler (PF_1) im Prozessschritt „LCM-Prozess“
- Potentielle Auswirkung des Fehlers (FA_1) im Prozessschritt „Bauteil“

Die darauffolgenden vier FMEAs werden entgegen dem Prozesskettenverlauf aufgestellt, um die initiale Ursache des kritischen Geflechtfehlers zu Anfang der Prozesskette auszumachen. Bei der Verkettung der einzelnen FMEAs gilt folgender Zusammenhang:

$$PF_1 = FA_2 \quad (3-1)$$

$$FU_x = PF_{x+1} = FA_{x+2} \quad (3-2)$$

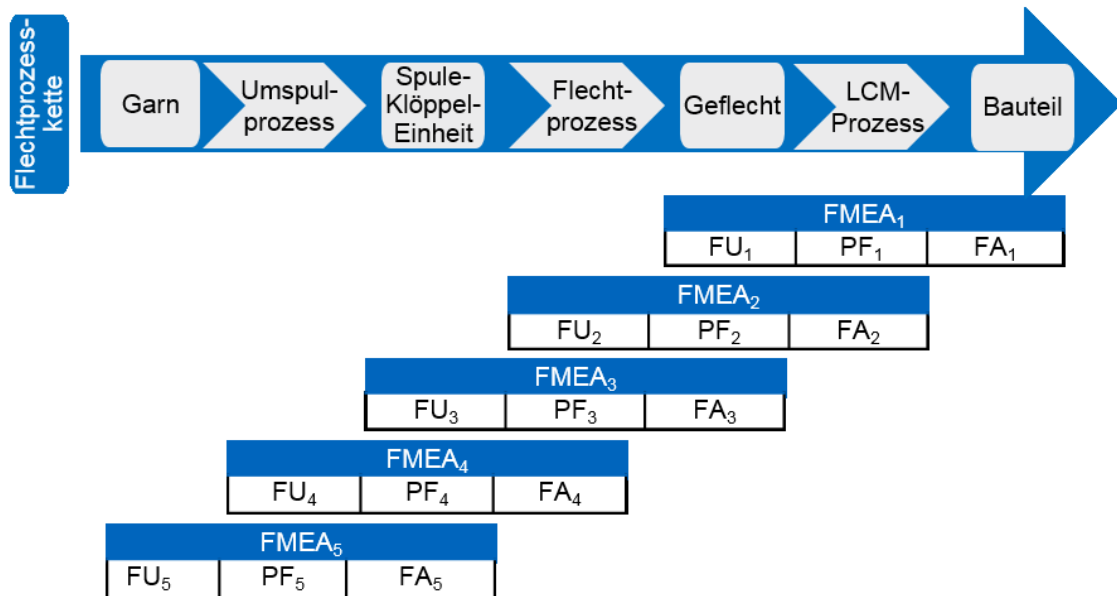


Abb. 3-8: Fünf FMEAs entlang der Flechtprozesskette ($x=1$ bis $x=5$)

3.2.2 Bewertung von Geflechtfehlern

Im zweiten Schritt der FMEA werden die Fehlerursachen (FU_x) hinsichtlich folgender Kriterien auf einer Skala von 1 bis 10 bewertet³:

- Auftretenswahrscheinlichkeit (A)
Eine Übersicht über die Einstufungen des Kriteriums „Auftrittswahrscheinlichkeit“ gibt Tab. 3-1.

Tab. 3-1: Einstufung und Bewertung des Kriteriums „Auftrittswahrscheinlichkeit“

Einstufung	Bewertung
Unwahrscheinlich	1
Sehr gering	2 bis 3
Gering	4 bis 6
Mäßig	7 bis 8
Hoch	9 bis 10

- Bedeutung (B)
In dieser Kategorie wird die Bedeutung des Fehlers auf den nachfolgenden Prozessschritt abgeschätzt. Eine Übersicht über die Einstufungen des Kriteriums „Bedeutung“ gibt Tab. 3-2.

³ Die Bewertung der Fehlerursachen geschieht in Anlehnung an [5, p. 173]

Tab. 3-2: Einstufung und Bewertung des Kriteriums „Bedeutung“

Einstufung	Bewertung
Keine Auswirkung	1
Unbedeutend	2 bis 3
Mittelschwer	4 bis 6
Schwer	7 bis 8
Äußerst schwer	9
Sicherheitskritisch	10

- Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)
Eine Übersicht über die Einstufungen des Kriteriums „Entdeckungswahrscheinlichkeit“ gibt Tab. 3-3

Tab. 3-3: Einstufung und Bewertung des Kriteriums „Entdeckungswahrscheinlichkeit“

Einstufung	Bewertung
Hoch	1
Mäßig	2 bis 5
Gering	6 bis 8
Sehr gering	9
Unwahrscheinlich	10

Das Produkt der drei Kriterien (A; B; E) ergibt die Risikoprioritätszahl (RPZ), die es ermöglicht, die Fehlerursachen miteinander zu vergleichen. In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 3-4) werden die Fehlerursachen der FMEA₁ durch individuelle Risikoprioritätszahlen miteinander verglichen. Die potentiellen Auswirkungen der Fehler beziehen sich auf einen Festigkeitsabfall des Geflechtverbunds. Die Bewertung der Kriterien (A,B,E) geschah ebenso in der bereits erwähnten Expertenrunde [54].

Als Bewertungsgrundlage gilt eine große Flechtmaschine (z.B. 128 Klöppel) zur Verarbeitung von Verstärkungsgarnen (> 800 tex) in der Serienproduktion.

Tab. 3-4: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Fehlerursachen (FMEA₁)

Potentielle Fehlerursachen (FU ₁)	Potentieller Fehler (PF ₁)	Potentielle Auswirkungen des Fehlers (FA ₁)	A	B	E	RPZ
Gebrochene Filamente - global	Unterbrochener Filamentverlauf	Festigkeitsabfall des Geflechtverbunds	8	2	4	64
Filamentansammlung - lokal			4	2	6	48
Garnriss			3	8	2	48
Garnschleufe	Garnschleufe (aus der Ebene) kippt in die Ebene		1	7	9	63
Garnlücke	Garn wird ausgelenkt oder Lücke mit Harz gefüllt		8	7	6	336
Bedeckungsgrad < 1	Garn wird ausgelenkt oder Lücke mit Harz gefüllt		4	10	4	160
Flechtwinkelabweichung	Abweichung vom Sollwinkel		4	10	4	160

Dem Filamentbruch, ob lokal oder global, wird eine geringe Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften zugeordnet (jeweils B=2). Realistische Ausmaße dieser Fehlerursache werden unter den Experten als geringer erachtet, als in Literaturquellen zu finden war. Mitwalsky [22] und Erber [21] tragen aktiv eine überdurchschnittliche Schädigung in das Geflecht ein, weswegen ein deutlicher Abfall in den mechanischen Kennwerten des Verbunds zu erkennen ist. Demgegenüber zeichnet sich der globale Filamentbruch durch eine mäßige Auftretenswahrscheinlichkeit aus (A=8). Der Filamentbruch auf globaler Ebene ist im Flechtprozess im Prinzip unausweichlich. Durch die zahlreichen Umlenkungen im Umspul- und Flechtprozess und die dadurch induzierten Reib-, und Biegekräfte erfahren die Garne immer eine Schädigung. Das Ausmaß ist natürlich abhängig von Parametern wie der wirkenden Garnspannung. Eine lokale Filamentansammlung hat dagegen eine geringe Auftretenswahrscheinlichkeit (A=4), da hier eine ausgeprägte lokale Schädigung des Garns vorhanden sein muss. Globale Filamentbrüche, die sich über die Gesamtheit des Flechtbauteils erstrecken, sind tendenziell einfacher zu erkennen (E=4) als eine lokal, flächig begrenzte Filamentanhäufung (E=6).

Die Fehler auf Garnebene besitzen größere Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften des Verbunds als Fehler auf Filamentebene. Die höchste Bewertung der Fehler auf Garnebene erhält der Garnriss, was auf eine komplette Unterbrechung (lokal) der Lastübertragung zu begründen ist (B=8). Die Garnschleufe ist eine starke Welligkeit des Garns, die aus dem Geflecht heraussteht. Im Zuge des LCM-Verfahrens wird das Geflecht (inkl. Schleufe) kompaktiert, die Schleufe (starke Garnauslenkung aus der Ebene) klappt in die Ebene und erzeugt eine starke ebene Welligkeit. Bei der Belastung des Garns erfolgt die Lasteinleitung nicht in Garnlängsrichtung, was zu einer Minderung der mechanischen Leistungsfähigkeit des Verbunds führt (B=7). Die Garnlücke führt im Geflecht zu einer lokalen Reduktion des Bedeckungsgrads. Im Verbund äußert sich dieser Defekt, je nach LCM-Prozess, als lokale Abnahme des Faservolumenanteils und/oder einer lokalen Zunahme der Garnondulation. Wie Untersuchungen auf Basis von gewebebasierten Verbunden zeigten, sind aufgrund von lokalen Garnondulationen zum Teil deutliche negative Auswirkungen auf die mechanischen Kennwer-

te festzustellen [33, 34, 36]. Da Gewebe und Geflechte sich textiltechnisch ähneln, wird die Auswirkung von lokalen Garnlücken auf die mechanischen Kennwerte des Geflechtverbunds relativ hoch bewertet ($B=7$).

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Garnrisses ist hoch, weswegen dieser Fehler in dieser Kategorie eine niedrige Bewertung erhält $E=2$. Beim Riss eines Garns verfangen sich die Garnenden häufig in den restlichen Garnen der Konvergenzzone, was die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers erhöht. Die Garnschleufe und die Garnlücke sind lokale Fehler und beeinflussen die restlichen Garne weniger bis gar nicht, was deren Entdeckung erschwert. Da die Garnlücke sich über eine längere Garnlänge erstreckt, ist die Bewertung in dieser Kategorie geringer ($E=6$) als die der Garnschleufe ($E=9$). In der Auftretenswahrscheinlichkeit erhält die Garnlücke die höchste Punktzahl. Dieser Fehler ist einer der häufigsten, der in einer laufenden Produktion auftreten kann ($A=8$).

Die Fehler auf Geflechtebene erhalten in allen Kategorien (A, B, E) die gleichen Punktzahlen. Es sind Fehler, die selten in der laufenden Produktion auftreten ($A=4$), sondern tendenziell häufiger in der Entwicklung von geflochtenen Bauteilen. Die Entdeckung einer nicht vollständigen Bedeckung und einer Flechtwinkelabweichung sind relativ einfach, da sich diese Fehler über den kompletten Geflechtumfang und meistens über eine größere Geflechtlänge erstrecken ($E=4$). Allerdings sind die Effekte dieser Fehler auf die mechanische Belastbarkeit sicherheitskritisch ($B=10$). Ein inkorrekt Flechtwinkel führt zu zunehmenden Garnquerbelastungen und zu deutlichen Verlusten in der Festigkeit und Steifigkeit des Verbunds. Ebenso führt eine unvollständige Bedeckung zur Reduktion des Faservolumengehalts, zu sog. Nesting benachbarter Lagen und zu erhöhter globaler Garnondulation.

Nach abschließender Produktbildung kann festgestellt werden, dass die Garnlücke aus prozesstechnischer Sicht mit einer Risikoprioritätszahl von 336 am kritischsten ist. Dieses Ergebnis zeigt die Relevanz von lokalen Fehlstellen in Geflechtverbunden und steht in guter Analogie zu den zahlreiche Untersuchungen, die z.B. auf dem Gebiet des Automated-Fiber-Placements durchgeführt worden sind. Im Rahmen dieser Studien wurden die Auswirkungen von lokalen Fehlerbildern (wie Lücken und Überlappungen) auf die Mechanik untersucht und zum Teil deutliche Reduktionen von Zugkennwerten festgestellt [38–40, 42–44].

3.2.3 Bewertung der Fortpflanzungsstufen einer Garnlücke

Wie bereits im Abschnitt 3.2 erklärt wurde, kommt es bei fast allen Geflechtfehlern (der unterschiedlichen Ebenen) zu einer oder mehrerer Fehlerfortpflanzungen entlang der Prozesskette. Werden die einzelnen Entwicklungsstufen beginnend beim finalen

Fehlerstadium zurückverfolgt und mittels der FMEA-Methode bewertet, kann die kritischste Fehlerursache identifiziert werden.

Basierend auf den Ergebnissen der FMEA₁, welche zur Bewertung und dem Vergleich mehrerer Geflechtfehler durchgeführt wurde, wurde die Garnlücke als kritischster Fehler bewertet. Um ebenso die relevanteste Ursache der Garnlücke zu ermitteln, wurde für jeden Fehlerfortpflanzungsschritt der Flechtprozesskette eine FMEA_x durchgeführt. Dabei überschneiden sich die einzelnen FMEAs (siehe hierzu Abb. 3-8).

3.2.3.1 Analyse der Garnlückenentstehung

FMEA₂

Laut Flechtprozesskette muss die unmittelbare Ursache der Garnlücke im Flechtprozess liegen (präziser: im Laufe der Geflechtbildung). Dazu wurde die FMEA₂ für den Prozessschritt „Flechtprozess“ durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle (Tab. 3-5) fasst sowohl die Bewertungen der Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung, Entdeckungswahrscheinlichkeit als auch die Risikoprioritätszahlen der FMEA₂ zusammen.

Tab. 3-5: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für Garnlücken (FMEA₂)

Potentielle Fehlerursachen (FU ₂)	Potentieller Fehler (PF ₂)	Potentielle Auswirkungen des Fehlers (FA ₂)	A	B	E	RPZ
Prozessbedingte Garnspannungserhöhung	Garnlücke	Garn wird ausgelenkt oder Lücke mit Harz gefüllt	7	6	6	252
Geringerer Titer			2	9	6	108
Einstellung einer inkorrekten Garnspannung			2	6	6	72
Einbau der Garnspule an einer falschen Position (relevant bei Teilbesetzungen)			4	6	6	144

Das Risiko einer einzelnen inkorrekten Klöppelfeder ist relativ gering (A=2). Wenn die Anzahl der Klöppelfedern vor dem Einbau in eine bestimmte Anzahl an Klöppeln bekannt ist, können Fehler dieser Art mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden. Kommt es allerdings zu einem inkorrekten Einbau, ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit mäßig bis tendenziell niedrig (E=6). Im eingebauten Zustand ist die Federstärke nicht mehr nachzuvollziehen. Falls der Effekt so ausgeprägt ist, dass sich eine deutliche Unregelmäßigkeit im Geflecht ausbildet, kann z.B. eine fehlerhafte Federstärke zurückverfolgt werden. Die Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit mit sechs Punkten trifft für diesen und die restlichen Fehler dieser FMEA ebenso zu. Die Wahrscheinlichkeit des Einbaus eines Garns mit geringerem Titer ist als sehr gering einzustufen (A=2). Garne verschiedener Typen, Titer, Hersteller etc. werden nach dem Spulvorgang separat aufbewahrt, was eine Vermischung von unterschiedlichen Garnspulen verhindert. Der Einbau einer Garnspule an einer inkorrekten Position ist mit einer geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit zu bewerten. Voraussetzung ist eine Teilbesetzung der Flechtmaschine und ein unregelmäßiges Besetzungsmuster dieser. Die Besetzung der Maschine geschieht manuell und ist besonders bei einer großen

Spulenzahl fehleranfällig. Der höchste B-Wert ist dem Punkt „Geringer Titer“ zuzuschreiben, was auf zwei Tatsachen zurückzuführen ist. Bei Kohlenstofffasern sind Titer in 400 tex; 800 tex; 1600 tex und 3300 tex üblich. Bei einer irrtümlichen Benutzung eines geringeren Titers ist mit mindestens der Halbierung des Titers zu rechnen. Neben der damit einhergehenden geringeren Ablegebreite, der lokalen Garnlücke, enthält das Geflecht lokal weniger tragende Filamente. Eine prozessbedingte Garnspannungserhöhung ist häufig eine Fehlerquelle, die zu lokalen Garnlücken führt (A=7). Bei einer erhöhten Spannung eines einzelnen Garns ändert sich der Garnverlauf in der Konvergenzzone und eine Garnlücke entsteht. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit einer prozessbedingten Garnspannungserhöhung ist wie bei den restlichen Fehlerursachen mit sechs zu bewerten. Somit ergibt sich für die prozessbedingte Garnspannungserhöhung der höchste RPZ-Wert von 252.

FMEA₃

Die dritte FMEA (siehe Tab. 3-6) konzentriert sich auf die „Spulen-Klöppel-Einheit“ und beleuchtet die Entstehung einer prozessbedingten Garnspannungserhöhung.

Tab. 3-6: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für prozessbedingte Garnspannungserhöhungen (FMEA₃)

Potentielle Fehlerursachen (FU ₃)	Potentieller Fehler (PF ₃)	Potentielle Auswirkungen des Fehlers (FA ₃)	A	B	E	RPZ
Schlichteablagerungen an garnkontaktierenden Elementen	Prozessbedingte Garnspannungserhöhung	Garnlücke (Breite)	2	3	8	48
Filmanetanhäufungen an garnkontaktierenden Elementen			3	2	5	30
Klöppelmechanik schwergängig			7	5	8	280
Inkorrekte Garnführung			9	3	4	108
Filamentring an Flechtspule			8	8	6	384

Den Ablagerungen in Form von Filamentabrieb und Schlichte ist hinsichtlich einer Garnspannungserhöhung ein geringes Risiko zuzuschreiben. Vor allem die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit mindert den RPZ-Wert. Die niedrige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Schlichteablagerung (E=8) fällt damit nicht mehr ins Gewicht. Im Gegensatz dazu tritt eine inkorrekte Garnführung sehr häufig auf. Das Bestücken von Klöppeln mit Flechtspulen wird in der Regel manuell durchgeführt. Das Einfädeln der Garne in Fadenführungselemente ist eine filigrane Tätigkeit, die kaum automatisiert durchführbar ist. Eine hohe Anzahl an Fadenführungselementen (z.B. 64 Klöppel je 3 Führungselemente) birgt somit ein hohes Risiko (A=9), dass ein Garn inkorrekt eingefädelt wird. Allerdings ist die dadurch entstehende Garnspannungserhöhung relativ gering (B=3) – das Garn erfährt stattdessen eine höhere Schädigung. Die meisten Klöppeltypen funktionieren mechanisch (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Diese Mechanik ist Verschleiß unterworfen (A=7), wie beispielsweise eine schwergängige Bewegung des Sperrbolzens oder ein verbogener Drahtzug. Diese Verschleißerscheinungen führen zur Schwergängigkeit der gesamten Klöppelmechanik, was zu einer Erhöhung der Garnspannung führen kann (B=5). Die Detektion eines schwergängigen Klöppels ist mit

manuellen Aufwand verbunden. Falls der betroffene Klöppel keine ausgeprägte Garnlücke verursacht, kann der beschädigte Klöppel meist auch nur im stehenden Maschinenzustand festgestellt werden ($E=8$). Das Abspulverhalten der Flechtspule ist essentiell für die Qualität des Geflechts. Durch häufig auftretende Filamentringe ($A=8$) wird das Abspulen erschwert oder kann sogar unterbrochen werden (siehe Abb. 3-9). Der Filamentring legt sich um den Umfang der Flechtspule und hindert das Garn von der Spule abgezogen zu werden. Das Garn wird eingeschnürt und erfährt eine höhere Garnspannung ($B=8$). Die Entdeckung eines Filamentrings ist als mäßig einzuschätzen. Die Entdeckung ist stark davon abhängig, wie ausgeprägt der Filamentring und wie groß die Spulenanzahl der Flechtmaschine ist.

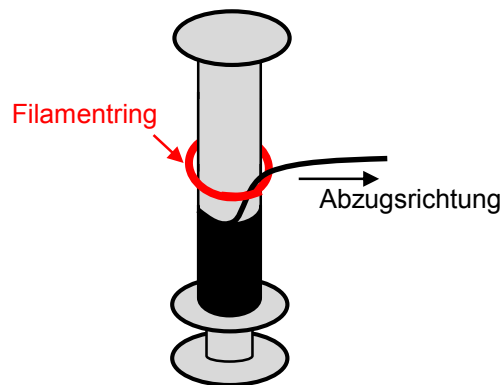


Abb. 3-9: Darstellung eines Filamentrings (rot) an einer Flechtspule

Der Vergleich der RPZ-Werte dieser dritten FMEA ergibt, dass der Filamentring mit einer Risikopriorität von 384 die risikoreichste Fehlerursache für Garnspannungserhöhungen im Flechtprozess ist.

3.2.3.2 Analyse der Filamentringentstehung

FMEA₄

Die vierte FMEA (siehe Tab. 3-7) konzentriert sich auf den Umspülprozess. Neben den Prozessparametern werden die Garnqualität, die Umgebungsbedingungen der Garnlagerung und die falsche Handhabung von Garnen/Mutterspulen näher betrachtet.

Tab. 3-7: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für Filamentringe an einer Flechtspule (FMEA₄)

Potentielle Fehlerursachen (FU ₄)	Potentieller Fehler (PF ₄)	Potentielle Auswirkungen des Fehlers (FA ₄)	A	B	E	RPZ
Inkorrekte Umspülparameter	Filamentring an Flechtspule	Prozessbedingte Garnspannungserhöhung	3	10	2	60
Garnqualität			7	7	8	392
Falsche Handhabung			2	7	5	70
Umgebungsbedingungen			8	6	2	96

Umspülparameter sind extrem wichtig für die fehlerfreie Prozessierung eines Garns im Flechtprozess und somit auf die Qualität des Geflechts ($B=10$). Für jeden Garntyp existiert ein – meist auf Erfahrungswerten basierender – Satz an Umspülparametern.

Aus diesem Grund sind Änderungen der Umspulparameter äußerst selten ($A=3$). Die Entdeckungswahrscheinlichkeit falscher Umspulparametern ist recht hoch ($E=2$). Zum einen werden in den meisten Fällen Umspulparameter dokumentiert und Änderungen können zurückverfolgt werden. Zum anderen ändert sich mit deutlich veränderten Umspulparametern die Form, die Kompaktierung und Schädigung des Garnmaterials, das sich auf der Flechtspule befindet. Die falsche Handhabung von Garnen/Mutterspulen kommt relativ selten vor ($A=2$) und kann in den meisten Fällen optisch festgestellt werden ($E=5$). Der Effekt einer Druckstelle an einer Mutterspule – hervorgerufen durch z.B. einen Transportschaden – kann durchaus in einer erhöhten Garnschädigung oder an einem veränderten Abspulverhalten des Garns von der Mutterspule festgestellt werden ($B=7$). Die Bedeutung von Umgebungsbedingungen auf das Abspulverhalten von der Mutterspule oder der Flechtspule wurde nach Wissen des Autors wissenschaftlich noch nicht untersucht. Die Korrelation wurde allerdings bereits praktisch nachgewiesen und als relativ häufig eingestuft ($A=8$). Im Gegensatz zu anderen Fehlerursachen wird den Umgebungsbedingungen weniger Bedeutung zugeschrieben ($B=6$). Die Änderung von Umgebungsbedingungen kann mit einfachen Messmethoden festgestellt werden ($E=2$). Die Fehlerursache mit der höchsten Risikopriorität ist die Garnqualität ($RPZ=392$). Die Garnqualität ist ausschlaggebend für die weitere Verarbeitung des Garns. Das gilt nicht nur für den Flechtprozess sondern für alle textilen Prozesse ($B=7$). Die Garnqualität unterliegt gewissen Schwankungen. Sie ist abhängig von Garntyp, Schlichteanteil aber auch von Herstellparametern ($A=7$). Eine quantitative Beurteilung der Garnqualität ist eine immer noch sehr anspruchsvolle Aufgabe. Eine prozessbegleitende Überwachung ist bisher nicht auf dem Markt erhältlich, was die Beurteilung der Garnqualität schwierig gestaltet ($E=8$).

FMEA₅

Die fünfte Analyse (siehe Tab. 3-8) beschäftigt sich mit den Ursachen schwankender Garnqualität. Hierunter fallen falsche Umspulparameter des Mutterspule, Faserlagerung, inkorrekt Schlichteanteil und die Garnschädigung.

Tab. 3-8: Risiko-Prioritäts-Zahlen potentieller Ursachen für schwankende Garnqualität (FMEA₅)

Potentielle Fehlerursachen	Potentieller Fehler	Potentielle Auswirkungen des Fehlers	A	B	E	RPZ
Garnschädigung	Garnqualität	Filamentring an Flechtspule	8	9	8	576
Faserlagerung			3	9	9	243
Inkorrekter Schlichteanteil			7	8	9	504
Falsche Umspulparameter der Mutterspule			2	7	5	70

Nach der Herstellung des Garns muss das Garn auf Mutterspulen gespult werden. Im Falle einer Änderung der Umspulparameter ist der Einfluss auf weiterverarbeitende Prozesse groß ($B=7$). Die Änderung dieser Parameter ist relativ unwahrscheinlich ($A=2$). Bezüglich der Auswirkungen auf die Garnqualität sind die Faserlagerung

(B=9), ein inkorrekt Schlichteanteil (B=8) und die Garnschädigung (B=9) hoch einzuschätzen. Alle drei Fehlerursachen sind relativ schwierig zu entdecken, wobei ein Garnschaden einfacher zu detektieren ist als Abweichungen im Schlichtegehalt. Da das Garn eine Vielzahl an Führungselementen kontaktiert, die auch Verschleiß unterworfen sind, ist die Garnschädigung etwas wahrscheinlicher als ein inkorrekt Schlichteauftrag. Schließlich kommt diese FMEA zu dem Ergebnis, dass die kritischste Entstehungsursache eines Filamentrings ein Garn mit einer erhöhten Garnschädigung (RPZ=576) ist. Allerdings sind die anderen Fehlerursachen dieses Analyseschritts (inkorrekt Schlichteanteil und die Faserlagerung) nicht zu vernachlässigen. Es ist sogar wahrscheinlich, dass alle drei Parameter miteinander wechselwirken.

3.3 Rekonstruktion der Entwicklungsstufen von lokalen Garnlücken

Die Kombination aus mehreren FME-Analysen hat ergeben, dass eine Verknüpfung zwischen erhöhter Garnschädigung im ersten Schritt der Flechtprozesskette bis zu einer lokalen Garnlücke im Geflecht besteht. Am Ende der Flechtprozesskette, bedarf es der Tränkung des Geflechts im Rahmen eines LCM-Verfahrens (Abb. 3-10 oberes Drittel). Hier werden zwei unterschiedliche Prozesse betrachtet. Zum einen ein vakuumunterstützter Halbschalenprozess (VAP) und zum anderen ein Prozess mit geschlossenem Werkzeug und hohen Kompaktierungsdrücken (RTM). Basierend auf dem gleichen lückenhaften Geflecht entstehen in Abhängigkeit unterschiedlicher LCM-Prozesse verschiedene Inhomogenitäten im Verbund. Es wird davon ausgegangen, dass diese Inhomogenitäten unterschiedliche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Geflechtverbunds besitzen.

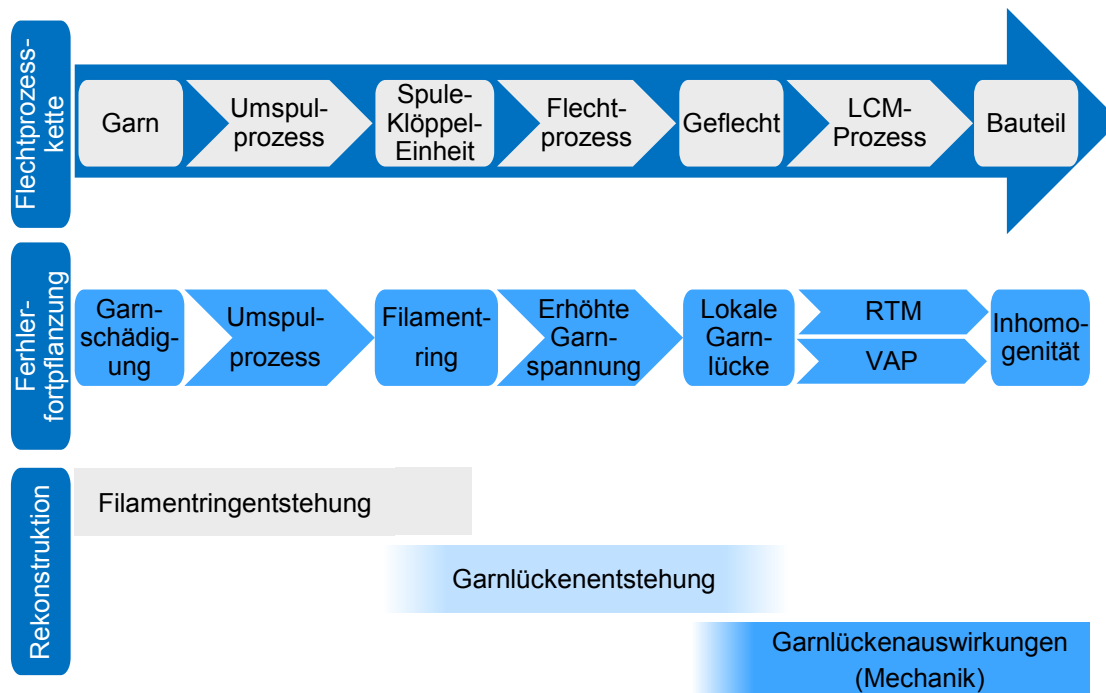


Abb. 3-10: Rekonstruktionsstufen an der Fehlerentwicklung und Flechtprozesskette

Um sowohl die theoretischen Verknüpfungen zwischen den einzelnen Stufen der Fehlerentwicklung und die Auswirkungen der Inhomogenitäten auf die mechanischen Eigenschaften zu bestätigen, werden die Stufen der Fehlerentwicklung rekonstruiert. Die Rekonstruktion wird in drei Stufen durchgeführt (Abb. 3-10 unteres Drittel) und hat folgende Inhalte:

- **Filamentringentstehung:**
Es werden Flechtspulen mit verschiedenen Umspulparametern und zusätzlich einer künstlichen Garnschädigung umgespult. Das Abspulverhalten und die Filamentringentstehung werden in einem Prüfstand beurteilt und Rückschlüsse auf die jeweiligen Umspulparameter gezogen. Es soll die Korrelation zwischen Filamentringentstehung und Garnspannungserhöhung untersucht werden.
- **Garnlückenentstehung:**
Im Rahmen der zweiten Rekonstruktionsstufe wird die Entstehung von Garnlücken untersucht. Zu diesem Zweck werden Flechtversuche durchgeführt, bei denen ein Garn eine erhöhte Spannung besitzt. Aus diesen Versuchen soll der quantitative Zusammenhang zwischen Garnspannungserhöhung und Garnlückenbreite abgeleitet werden.
- **Auswirkungen lokaler Garnlücken auf die Mechanik des Geflechtverbunds:**
Auf Basis der vorherigen Rekonstruktionsstufe werden lokale Garnlücken in fehlerfreien Geflechten rekonstruiert. Es sollen die Auswirkungen der lokalen Garnlücken sowohl unter verschiedenen mechanischen Lastfällen als auch auf Coupon- und Bauteilebene untersucht werden. Hier soll im Speziellen der Einfluss des LCM-Prozesses untersucht werden.

4 Untersuchungen zur Filamentringentstehung

Die FMEA der Flechtprozesskette hatte zum Ergebnis, dass der kritischste Geflechtfehler eine durch einen Filamentring erzeugte lokale Garnlücke ist. Die theoretischen Überlegungen der FMEA₅ ergaben, dass der Filamentring oft aufgrund von erhöhter Garnschädigung erzeugt wird. In diesem Abschnitt werden Versuche beschrieben, die diese theoretischen Überlegungen bestätigen sollen. Es wurde das Abspulverhalten von Garnen mit unterschiedlich ausgeprägter Schädigung untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Garnschädigung künstlich erzeugt (rekonstruiert). Abb. 4-1 zeigt, dass die erste Rekonstruktionsstufe (Filamentringentstehung) im Fokus dieses Abschnitts liegt. Als Referenzgarn wurde in den Versuchen dieser Rekonstruktionsstufe das T700 SC 24k 60E-Garn von Fa. Toray Industries, Inc. verwendet [55]¹. Ein Teil der in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse, wurde bereits teilweise von Mierzwa et al. [56] veröffentlicht.

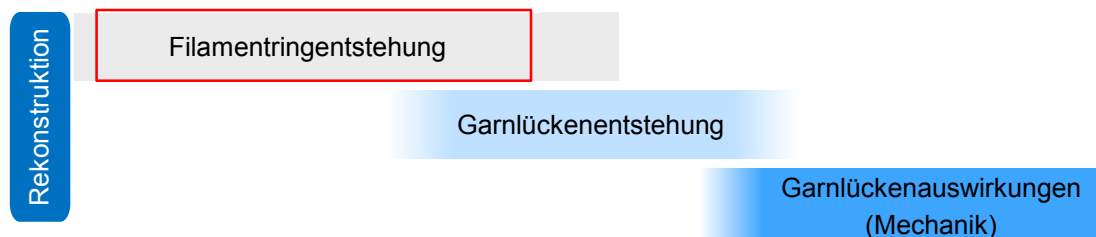


Abb. 4-1: Erste Stufe der Rekonstruktionsmethode: Rekonstruktion von Filamentringen

Der Versuchsaufbau ist zweigeteilt und besteht aus der Vorbereitung von Flechtspulen an einer modifizierten Umspulanlage. Die vorbereiteten Flechtspulen werden anschließend in einem Abspulprüfstand mit konstanter Geschwindigkeit v_G abgespult. Diese Geschwindigkeit entspricht der Geschwindigkeit, mit der das Garn im Flechtprozess abgezogen wird. Als Grundlage zur Berechnung dieser Garngeschwindigkeiten dienen die Flechtparameter aus Tab. 4-1. Der Abspulprüfstand verfügt über Sensorik, welche in der Lage ist, Filamentringe zu detektieren und zu charakterisieren.

¹ Ein Teil der Versuche und Ergebnisse entstanden im Rahmen der Semesterarbeit von Tobias Wolf und Matthias Froning [S10, S11].

Tab. 4-1: Relevante Flechtparameter für Abspulversuche

Flechtparameter	Größe und Einheit
Flechtwinkel φ	45°
Flechtkerndurchmesser d_k	65 mm
Flügelraddrehzahl U_F	130 $\frac{1}{min}$
Flügelradanzahl n_F	32

4.1 Prüfstand zur Charakterisierung von Filamentringen

Abb. 4-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Abspulprüfstandes.

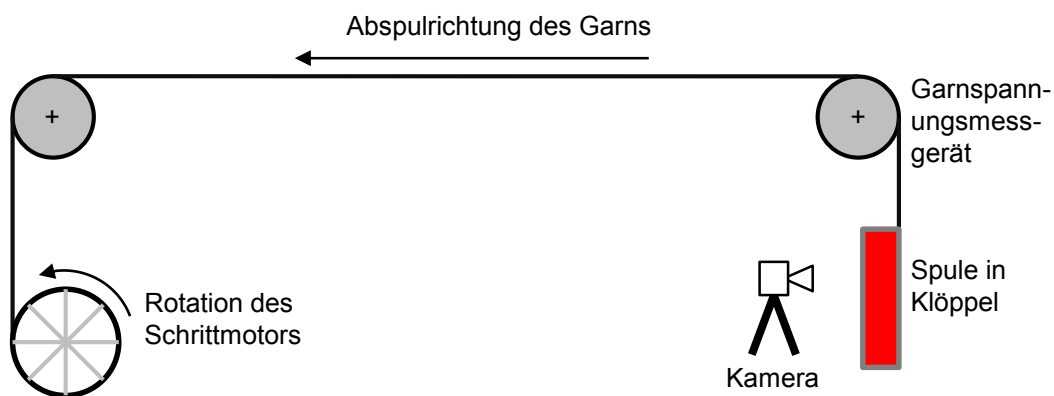


Abb. 4-2: Abspulprüfstand

Der Prüfstand besteht aus einem Klöppel (IFDA-100 der Fa. Herzog), in den die Versuchsspulen einzeln eingesetzt werden. Über einen Schrittmotor wird das Garn mit der Garngeschwindigkeit v_G abgezogen. Des Weiteren verfügt der Prüfstand über ein Garnspannungsmessgerät (Typ M-1391 von Tensometric Messtechnik GmbH) mit dem die Garnspannung während des Abspulprozesses aufgezeichnet wird. Der Sensor befindet sich an der ersten Garnumlenkung. Darüber hinaus wird das Abspulverhalten der Flechtspule mit einer Kamera aufgezeichnet, um das Ausbilden von Filamentringen zu dokumentieren. Der Aufbau aus Garnspannungsmessgerät und Videoaufnahme ermöglicht eine Korrelation zwischen Garnspannungsveränderung und Filamentringausbildung.

Das Garnspannungsmessgerät hat einen Messbereich bis max. 21 N. Dies wird als Abbruchkriterium der Versuche verwendet. Wird die Garnspannung aufgrund eines Fila-

mentrings auf bis 21 N erhöht, wird der Versuch abgebrochen und die abgespulte Garnabzugslänge dokumentiert.

Die Flechtanlage RF 128 verfügt über 32 Flügelräder, weswegen 16 Umdrehungen nötig sind, damit ein Klöppel die Flechtmaschine umrundet. Die dafür benötigte Zeit $t_{Kl\ddot{o}ppel}$ kann mit Hilfe der Drehzahl U_F der Flügelräder (siehe Tab. 4-1) bestimmt werden.

$$t_{Kl\ddot{o}ppel} = \frac{16}{U_F} = \frac{60 \text{ s}}{130} \cdot 16 = 7,38 \text{ s} \quad (4-1)$$

Die Garngeschwindigkeit v_G berechnet sich auf Basis der Kernabzugsgeschwindigkeit v_K und dem Flechtwinkel φ . v_K wird definiert durch:

$$v_K = \frac{\pi \cdot d_k}{t_{Kl\ddot{o}ppel} \cdot \tan(\varphi)} = \frac{\pi \cdot 65 \text{ mm}}{7,38 \text{ s} \cdot \tan(45^\circ)} = 27,67 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (4-2)$$

Die Abzugsgeschwindigkeit des Garns v_g wird wie folgt bestimmt:

$$v_g = \frac{v_k}{\cos(\varphi)} = \frac{27,67 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{\cos(45^\circ)} = 39,13 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (4-3)$$

Die Schrittzahl pro Sekunde des Schrittmotors beträgt damit $3131 \frac{1}{\text{s}}$.

4.2 Variation möglicher Ursachen der Filamentringentstehung

Neben der Garnschädigung wurden auch Umspulparameter, die einen großen Effekt (in FMEA₄ B=10) auf das Abspulverhalten haben, als Versuchsparameter aufgenommen.

4.2.1 Versuchsparameter

In Form eines D-optimalen² Versuchsplans wurden die Auswirkungen sowohl von mehreren Umspul- als auch eines Garnparameters auf die Ausbildung von Filamentringen untersucht. Die statistische Versuchsplanung wurde mittels Modde 11 (von Umetrics) durchgeführt. Tab. 4-2 fasst die verwendeten Versuchsparameter zusammen.

² D-optimale Versuchspläne werden für die Bestimmung von eindeutigen Effekten bei gleichzeitigem minimalem Versuchsaufwand verwendet. Basierend auf den Parametern und dessen Stufen wird eine Matrix erstellt. D in „D-optimal“ steht für die Determinante der Versuchsmatrix. Mit höherer D-Effizienz steigt die Güte des Versuchsplans [57].

Tab. 4-2: Parametersatz zur Spulenvorbereitung

Umspulparameter	Einheit	Größen
Umspuldrehzahl	$\frac{1}{min}$	20 200
Verlegung	mm	4 8 10
Garnspannung	N	4 8 16
Traversenumkehrpunkt	mm	6 3 0 -3 -6
Garnschädigung	-	0 1

Auf Basis dieses Versuchsplans wurden insgesamt 87 Spulen vorbereitet, wobei jeweils drei Wiederholungen pro Parametersatz vorgesehen wurden. Die Spulen hatten eine Laufmeterzahl von 50 m. Eine genaue Auflistung der Umspulparameter der Versuchsspulen ist aus Tab. A-1 zu entnehmen.

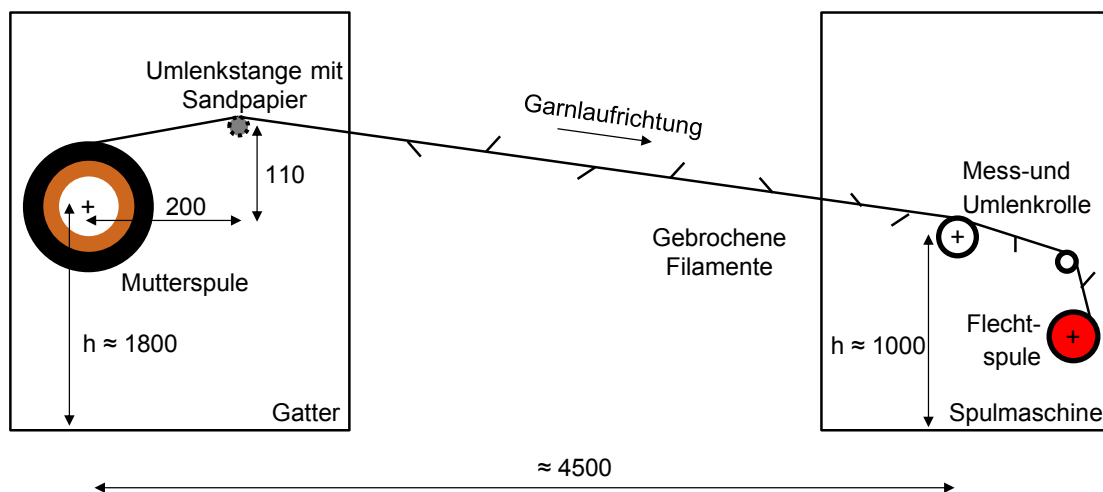


Abb. 4-3: Modifizierte Umspulanlage inklusive einer Vorrichtung zur künstlichen Garnschädigung

Die Parameterstufe „4 mm“ der Verlegung entspricht ca. der Ablegebreite des 24k-Garns und „10 mm“ ist das Maximum, welches an der Umspulanlage einstellbar ist. Die Umspuldrehzahl mit $20 \frac{1}{min}$ liegt in einem sehr niedrigen Bereich, wobei $200 \frac{1}{min}$ einem mittleren Drehzahlbereich entspricht.

Die Garnschädigung „0“ beschreibt die natürliche Garnschädigung, mit welcher das Garn vom Hersteller geliefert wird. Garnschädigung „1“ umschreibt den Zustand des Garns mit einer künstlich eingebrachten Schädigung. Eine mit Sandpapier präparierte Umlenkstange wurde in dem Bereich zwischen Gatter und Umspulmaschine positioniert und schädigte das Garn kontrolliert (Abb. 4-3). Der horizontale und vertikale Abstand der Umlenkstange zur Mutterspule blieben während der Spulenvorbereitung konstant. Das Sandpapier mit einer SiC-Körnung von 2400 wurde nach jeder dritten Spule ersetzt. Die Körnung wurde so gewählt, dass eine sichtbare aber nicht überdurchschnittlich hohe Schädigung in das Garn eingebracht wurde.

Die Position der Traversenumkehrpunkte beeinflusst die Form des Garnmaterials auf der Flechtspule (siehe Abb. 4-4). Beim Umkehrpunkt „0 mm“ fährt die Traverse die komplette Länge der Garnspule ab und kehrt an den Flanken der Flechtspule um. Bei negativen Vorzeichen des Umkehrpunkts fährt die Traverse nicht die vollständige Länge der Flechtspule ab und es bildet sich eine Lücke von entweder 3 mm oder 6 mm zwischen Garnmaterial und Spulenflanke. Bei positiven Traversenumkehrpunkt fährt die Traverse (entweder 3 mm oder 6 mm) über die Flanke der Garnspule hinweg, weswegen sich eine Materialanhäufung an den Flanken bildet. Die Wert „-6 mm“ und „6 mm“ stellen dabei minimal- und maximalmögliche Positionen der Traversenumkehrpunkte dar.

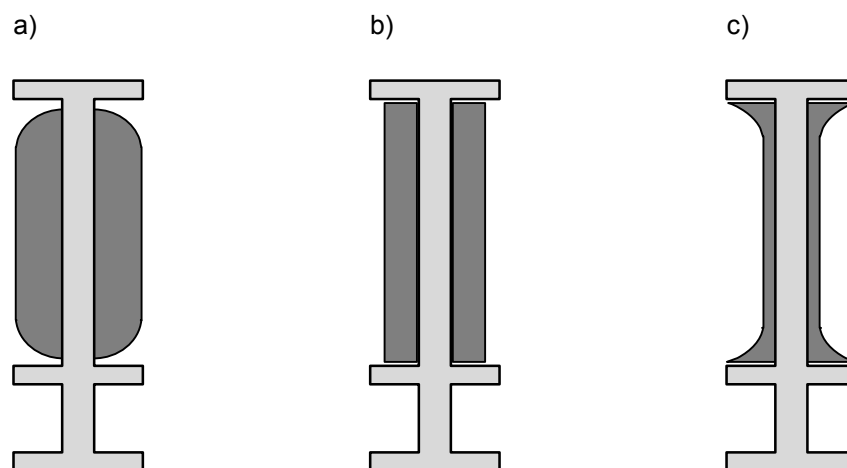


Abb. 4-4: Traversenumkehrpunkte und Änderung der Form des Garnmaterials auf der Flechtspule (Flechtspule im Schnitt)

a) Traversenumkehrpunkt „negatives Vorzeichen; b) Traversenumkehrpunkt „0 mm“; c) Traversenumkehrpunkt „positives Vorzeichen“

4.2.2 Versuchsergebnisse

Nach der Vorbereitung der 87 Flechtspulen wurden diese im Abspulprüfstand getestet. Der Parameter, der die Filamentringbildung am deutlichsten begünstigt, ist die Garnschädigung. Abb. 4-5 zeigt die maximale Abzugslänge in Abhängigkeit der Garnschädigung. Im Falle der Garnschädigung „0“ werden keine Filamentringe gebildet und die Flechtspule wird komplett abgespult (50 m). Im Falle der Garnschädigung „1“ ist die Abzugslänge aufgetragen, bei welcher eine Garnspannung von 21 N erreicht wurde (Abbruchkriterium). Die maximale Abzugslänge einer Spule auf Basis eines geschädigten Garns wird im Durchschnitt um 15 m im Vergleich zu einem ungeschädigten Garn reduziert. Ein Einfluss der Garnschädigung ist trotz des Konfidenzintervalls deutlich zu erkennen (Konfidenzintervall 95 %).

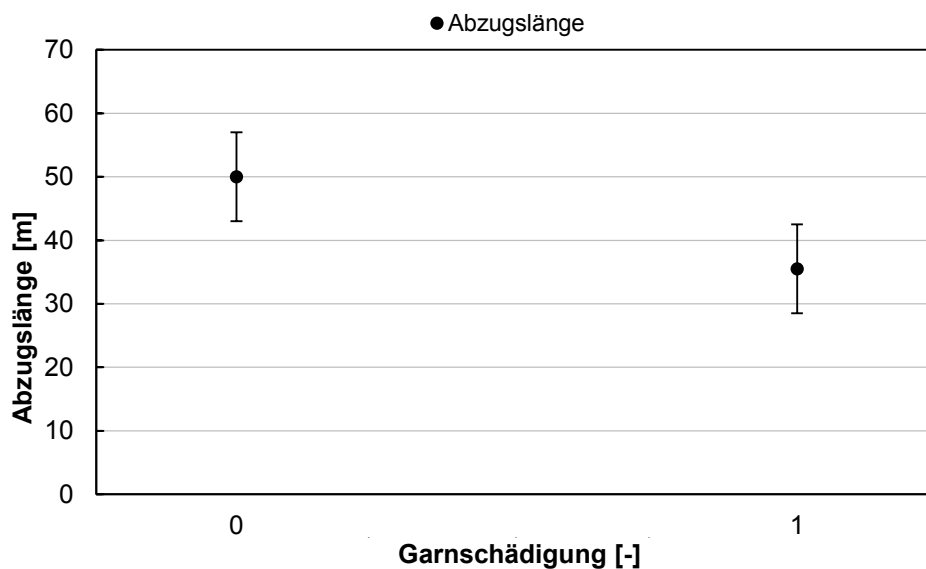


Abb. 4-5: Abzugslänge in Abhängigkeit der Garnschädigung

Die Garnschädigung in Form von abstehenden Filamentfragmenten hat einen deutlichen Einfluss auf die Abzugslänge. In Abb. 4-6 ist der Schnitt einer Flechtspule während des Umspulvorgangs eines geschädigten Garns gezeigt. Im Detail ist der Zeitpunkt zu erkennen, an dem die äußere Lage Garnmaterial beginnt, die innere Lage zu bedecken. Die abstehenden Filamentfragmente beider Lagen verhaken sich während des Umspulvorgangs.

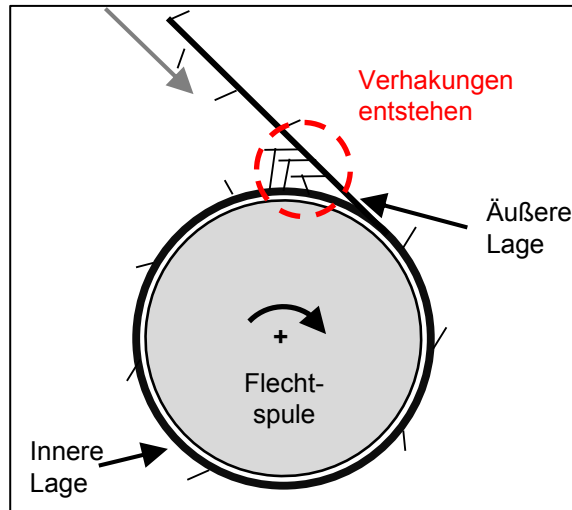


Abb. 4-6: Schnitt durch die Flechtspule während des Umspülens

Verhakung von Filamentfragmenten benachbarter Lagen während des Umspülens.

Abb. 4-7 zeigt eine modellhafte Darstellung des Abspulvorgangs einer Flechtspule, welche einen Filamentring bildet (Flechtspule im Schnitt). Die Abbildung zeigt den Zeitpunkt, zu dem die zweite Lage Garnmaterial abgezogen wird. Die Verhakungen, welche sich während des Umspülens gebildet haben, lösen Filamente aus dem abgezogenen Garn, die daraufhin auf dem Umfang der Spule verbleiben. Diese ringförmige Filamentansammlung liegt auf der ersten Garnlage auf und hindert das Garn vom Abspulen – ein Filamentring entsteht. Abb. 4-8 zeigt eine Momentaufnahme während des Abspulvorgangs eines geschädigten Garns. Deutlich sind auch dort die Filamentverhakungen zu erkennen, die zu einem Filamentring führen.

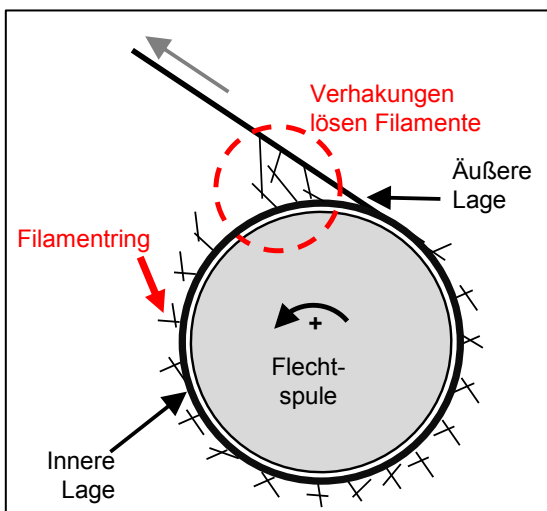


Abb. 4-7: Modell der Filamentringentstehung während des Abspülens der zweiten Lage Garnmaterial

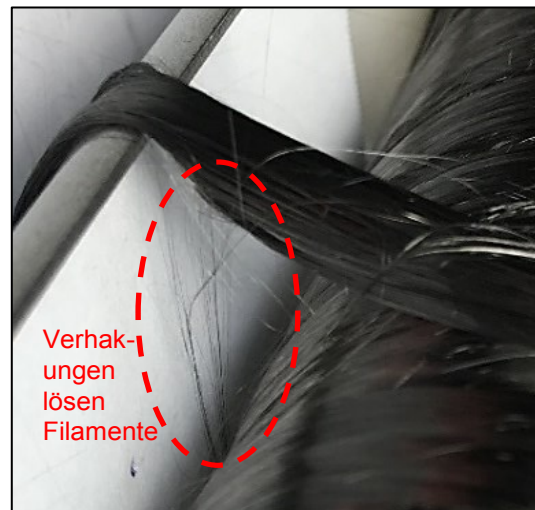


Abb. 4-8: Filamentringentstehung während des Abspülens der zweiten Lage Garnmaterial

Ein weiterer filamentringbeeinflussender Parameter ist die Garnverlegung. Abb. 4-9 zeigt den Zusammenhang zwischen der Abzugslänge und der Garnverlegung. Mit zunehmender Verlegung ist eine Tendenz einer erhöhten Abzugslänge festzustellen.

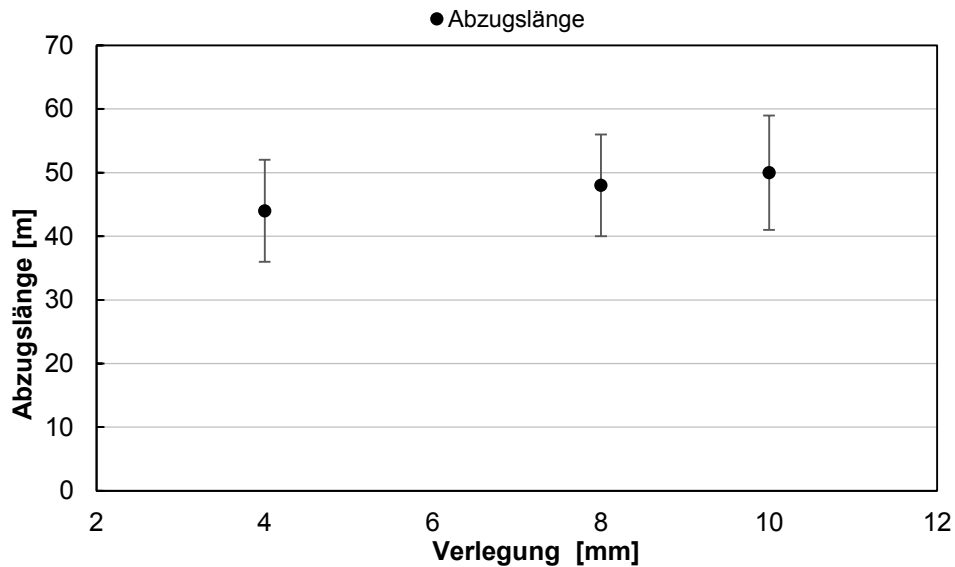


Abb. 4-9: Abzugslänge in Abhängigkeit der Verlegung

Die Beziehung zwischen abspulbarer Garnlänge und der Verlegung kann anhand der Tendenz der Filamente in die darunterliegende Lage einzudringen, erklärt werden. Abb. 4-10 illustriert die Zusammenhänge.

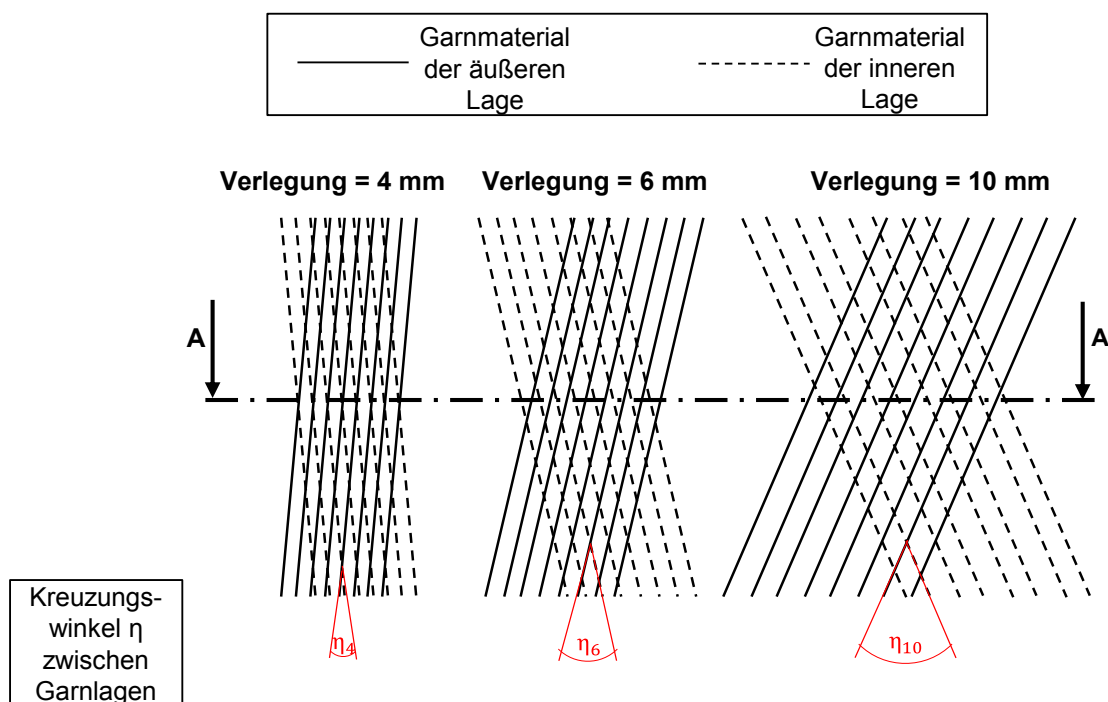


Abb. 4-10: Kreuzungswinkel zwischen Garnlagen in Abhängigkeit der Verlegung

Der Winkel η wird als Kreuzungswinkels zwischen Garnen verschiedener Lagen definiert. Bei geringer Verlegung dringen Garne bzw. Filamente aufgrund der nahezu parallelen Ablage leichter zwischen die Garne bzw. Filamente der darunterliegenden (benachbarten) Lage ein. Es kann dadurch zu einer Interaktion zwischen den Lagen – ähnlich zu den Verhakungen im Fall der Garnschädigung – kommen. Interaktionen zwischen den Garnlagen jeglicher Form können zur Bildung von Filamentringen während des Abspulvorgangs führen. Mit zunehmender Verlegung nimmt diese Tendenz aufgrund des größeren Winkels η ab.

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 4-11) zeigt die Abzugslänge in Abhängigkeit der Umspulgarnspannung. Bewusst wurde ein großer Garnspannungsbereich gewählt, welcher von 4 N bis 16 N reicht, um mögliche Effekte deutlicher hervorzuheben. Aufgrund der Streuung der Messwerte kann keine verlässliche Aussage zwischen der Abzugslänge und der Umspulgarnspannung getroffen werden.

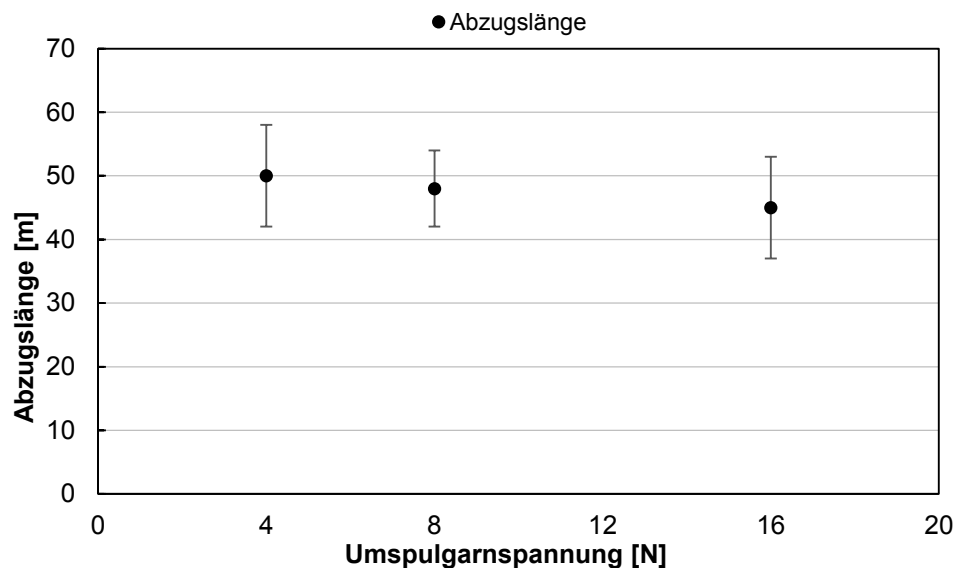


Abb. 4-11: Abzugslänge in Abhängigkeit der Umspulgarnspannung

Ebenso kann aufgrund der großen Ergebnisstreuung keine klare Abhängigkeit der Abzugslänge vom Traversenumkehrpunkt erkannt werden (Abb. 4-12).

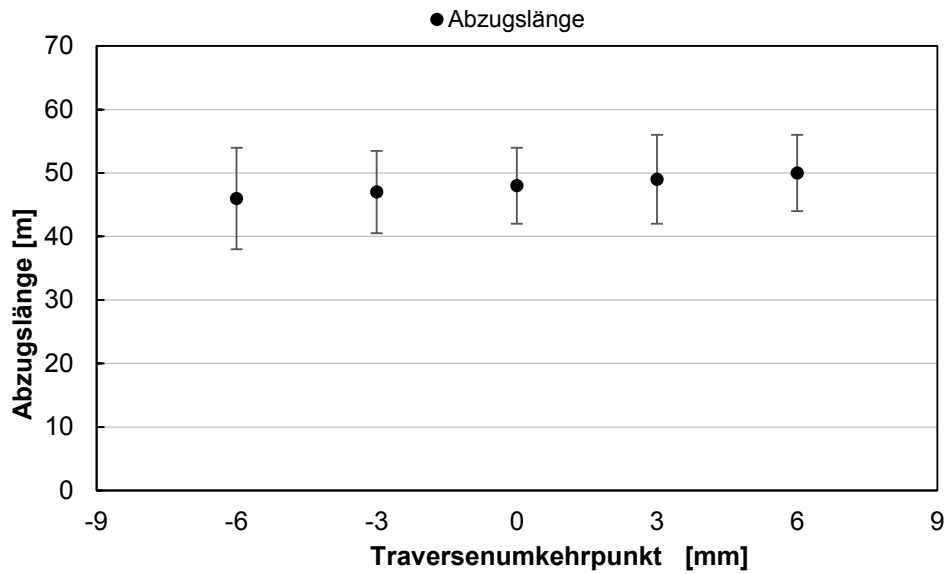


Abb. 4-12: Abzugslänge in Abhängigkeit des Traversenumkehrpunkts

4.2.3 Filamentringkategorien

Während der Abspulversuche konnten verschiedene Arten von Filamentringen dokumentiert werden, die unterschiedlich auf die Spannung des abgespulten Garns wirkten. Es wurden – neben der fehlerfreien Referenz – drei Kategorien an Filamentringen eingeführt, welche im Folgenden näher erläutert werden.

4.2.3.1 Filamentringfreie Garnspule (Referenz)

In Abb. 4-13 ist die Aufzeichnung der Garnspannung über die maximale Abzugslänge von 50 m einer Referenzgarnspule dargestellt. Es sind keine Anomalien über die Abzugslänge festzustellen. Die Garnspannung wird über eine 350 g Druckfeder im Klöppel erzeugt. Die Garnspannung schwankt in einem Bereich von 2,5 N bis 4 N, was auf das mechanische Feder-Tänzer-System des IFDA-100 Klöppels zurückzuführen ist.

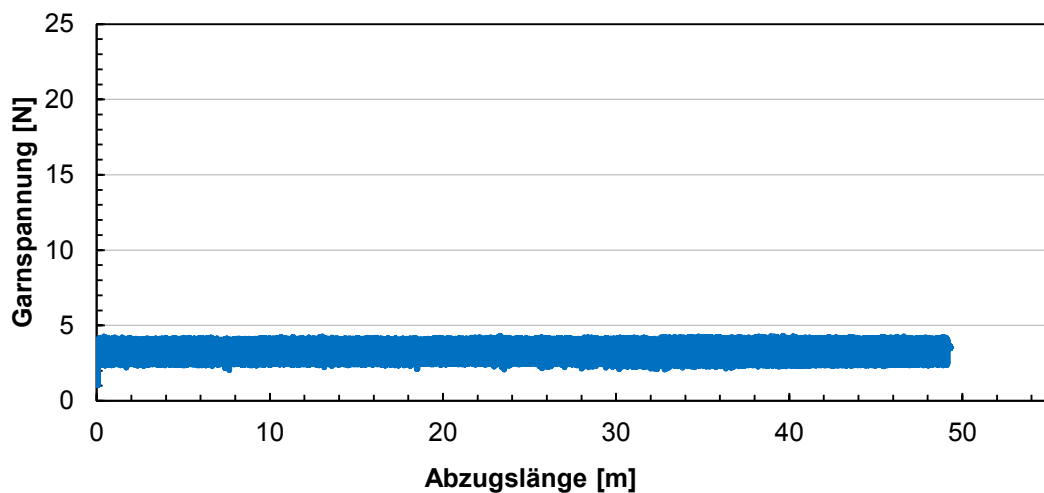


Abb. 4-13: Garnspannung über Abzugslänge einer filamentringfreien Garnspule

Die Garnspannung, die diese Mechanik erzeugt, besitzt einen Sägezahnverlauf, welcher in Abb. 4-14 mit kleineren Intervallen in der Abzugslänge zu erkennen ist.

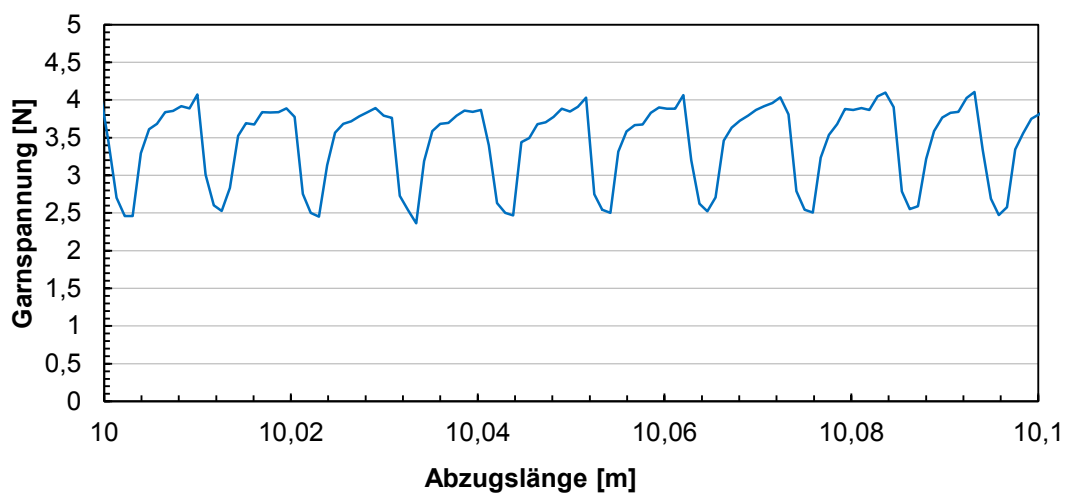


Abb. 4-14: Garnspannung über Abzugslänge einer filamentringfreien Garnspule (kleinerer Achsenabschnitt)

4.2.3.2 Filamentringkategorie 1

Der Filamentring der Kategorie 1 besitzt einen größeren Durchmesser als die Garnspule, weswegen dieser dünne Filamentring locker um die Flechtspule sitzt. Er kann sich zu Anfang des Abspulvorgangs von der Garnspule lösen und wird durch das abgespulte Garn an die Flanken der Flechtspule gedrängt, an denen der Filamentring meistens verbleibt. Abb. 4-15 zeigt einen Filamentring der Kategorie 1, welcher am unteren Spuleneende sitzt. Der Filamentring kann sich auch im späteren Verlauf des Abspulvorgangs bilden (Abb. 4-16), hat aber aufgrund seiner geringen „Wandstärke“ und seines großen Durchmessers keinen oder nur einen geringen – nicht messbaren Einfluss – auf die Garnspannung.

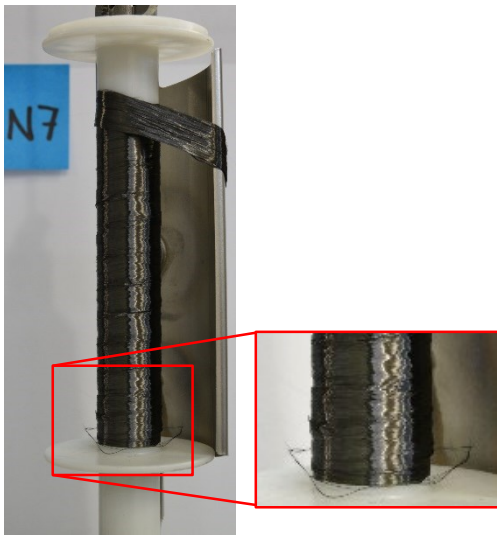


Abb. 4-15: Filamentring der Kategorie 1 an unterem Spulenende. Spulenbezeichnung n7

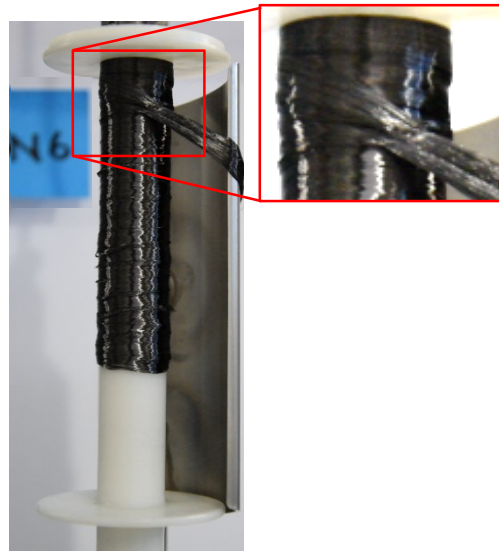


Abb. 4-16: Filamentring der Kategorie 1 an oberem Spulenende. Spulenbezeichnung n6

Der Filamentring der Kategorie 1 beeinflusst die Garnspannung entweder nicht oder in einem sehr geringen Maße und ist in der Streuung der Garnspannung nicht zu erkennen. Deshalb unterscheidet sich dieses Diagramm nicht von einer filamentringfreien Referenzmessung (Abb. 4-17).

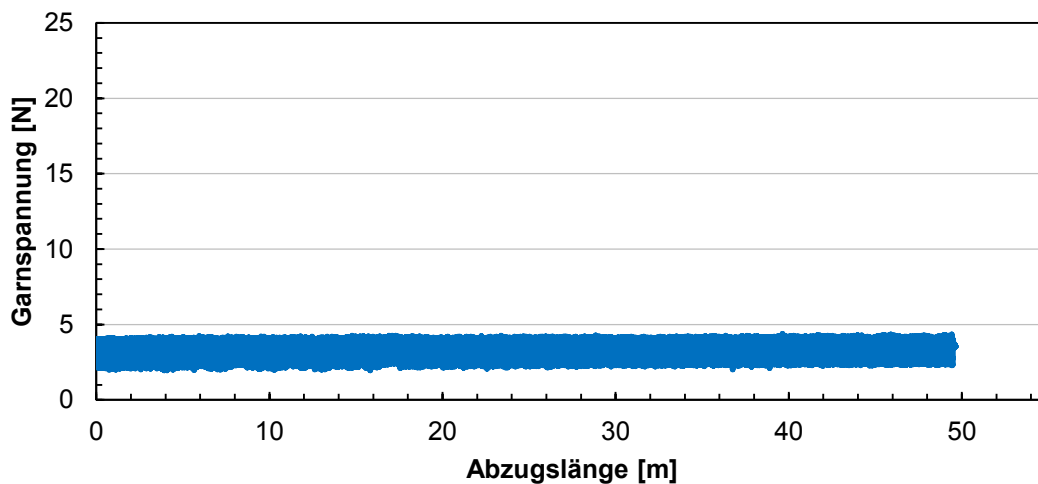


Abb. 4-17: Garnspannung über Abzugslänge einer Spule mit einem Filamentring der Kategorie 1

4.2.3.3 Filamentringkategorie 2

Die Filamentringkategorie 2 liegt eng an der Flechtspule, kann in seiner Größe anwachsen und zu Garnspannungsspitzen während des Abspulvorgangs führen. Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 4-18 und Abb. 4-19) zeigen zwei Filamentringe der Kategorie 2 (FR 1 und FR 2), die an der Versuchsspule n49 entstehen. Bei ca. 12 m bilden sich merklich FR 1 (Abb. 4-18) und bei ca. 15 m FR 2 (Abb. 4-19) aus. Beide Filamentringe besitzen zu diesem Zeitpunkt eine genaue Außenkontur, die im weiteren Versuchsverlauf undefinierter wird.

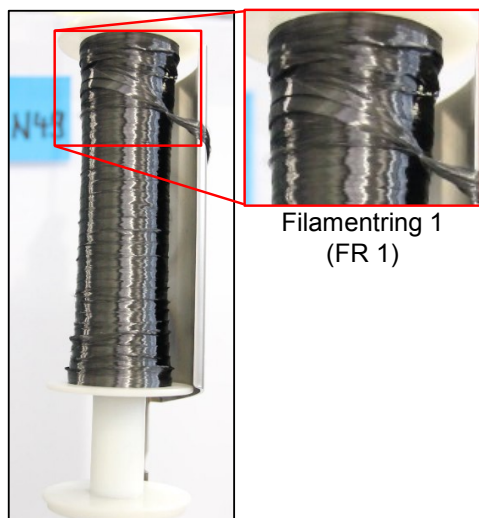


Abb. 4-18: Detailaufnahme von FR 1 der Versuchsspule n49
Bei einer Abzugslänge von ca. 12 m

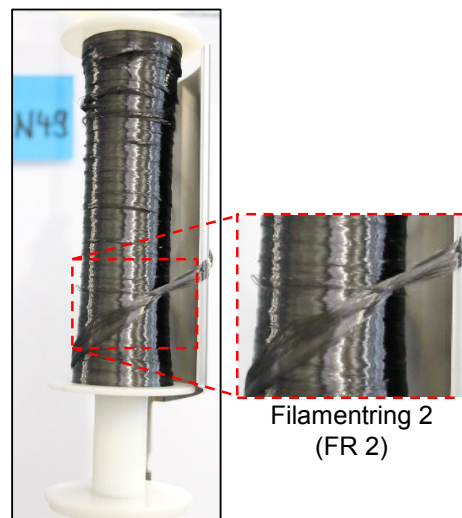


Abb. 4-19: Detailaufnahme von FR 2 Versuchsspule n49
Bei einer Abzugslänge von ca. 15 m

Abb. 4-20 zeigt das Garnspannungs-Abzugslängen-Diagramm der Spule n49.

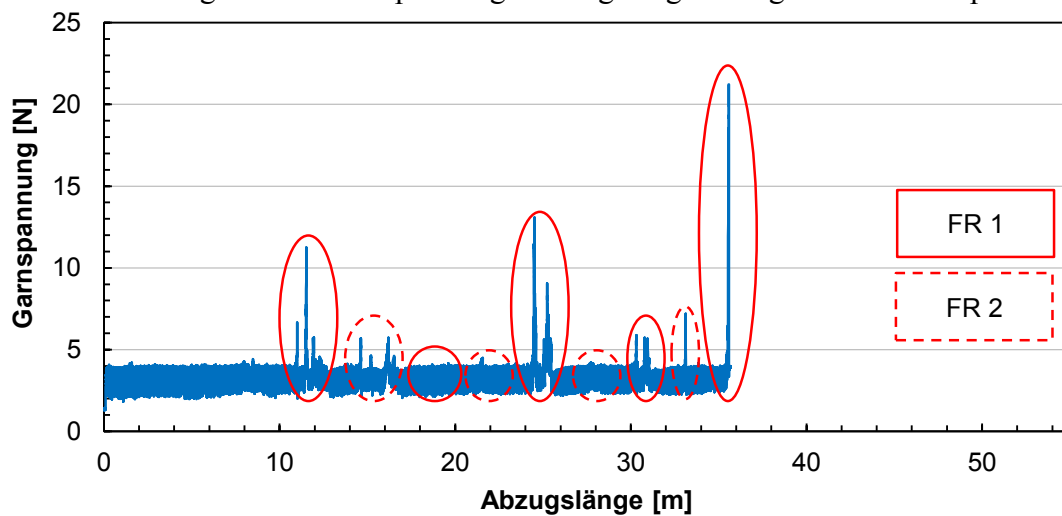


Abb. 4-20: Garnspannung über Abzugslänge einer Spule (n49) mit zwei Filamentringen (FR 1 und FR 2) der Kategorie 2

FR 2 beeinflusst die Garnspannung während des Abspulvorgangs vereinzelt und auch nur geringfügig. Bei einer Abzugslänge von 15 m und 33 m werden leichte Erhöhungen der Garnspannung festgestellt. FR 1 erzeugt deutliche Garnspannungserhöhungen, die im Laufe des Abspulversuchs anwachsen. Diese Garnspannungserhöhungen erstrecken sich über eine Garmlänge von ca. 1 m bis 1,5 m. Bei ca. 35 m Abzugslänge erzeugt FR 1 eine Garnspannung von 21 N, was zu einem Versuchsabbruch führt.

Während der Versuche wurde festgestellt, dass sich die Filamentringe in der Mitte der Flechtspule ausbilden und zum Spulenrand wandern. In der Spulenmitte befindet sich das abgezogene Garn fast senkrecht zur Spulenachse, was das Herauslösen von Filamenten aus dem Garnmaterial begünstigt. Je nach aktueller Bewegungsrichtung des Garns wird der Filamentring in das obere oder untere Drittel der Flechtspule gedrängt, wo dieser auch verbleibt. Vermutlich ist hier der Winkel zwischen Garn und Spulenachse entscheidend. Wird ein gewisser Winkel unterschritten, kann der Filamentring nicht mehr nach außen gedrängt werden und das Garn läuft unter dem Filamentring hinweg. Nach mehreren Umdrehungen bzw. Garndurchläufen schließen sich die in der Mitte neu generierten Filamentringe mit den oberen oder unteren Filamentringen zusammen. Somit passiert das Garn beim Abspulen den Filamentring unmittelbar vor und nach dem Umkehrpunkt an der Spulenflanke. Dies resultiert in einer Garnspannungserhöhung, die sich über eine Garmlänge von 1 m bis 1,5 m erstrecken kann.

In Abb. 4-21 und Abb. 4-22 sind Detailaufnahmen von FR 1 und FR 2 bei 35 m und 33 m Lauflänge dargestellt. Neu generierte Filamentringe schließen sich beiden Filamentringen an, weswegen FR 1 und FR 2 größer und deren Kontur diffuser werden. FR 2 erhöht bei dieser Lauflänge die Garnspannung auf 6,6 N, wobei FR 1 einen Anstieg auf 21 N und somit einen Versuchsabbruch erzeugt. Die durchschnittliche Abzugslänge einer Spule, die einen Filamentring der Kategorie 2 ausbildet, liegt bei 37,0 m.



Abb. 4-21: Detailaufnahme von FR 1 der Versuchsspule n49
Bei einer Abzugslänge von 35 m



Abb. 4-22: Detailaufnahme von FR 2 der Versuchsspule n49
Bei einer Abzugslänge von 33 m

Der Zusammenschluss zwischen neuen und alten Filamentringen unterliegt einer gewissen Toleranz bezüglich der Position entlang der Spulenachse. Durch diese Positionstoleranz sind die Garnspannungsspitzen nicht perfekt periodisch und die Abzugslängendifferenz zwischen den einzelnen Filamentringen leicht unterschiedlich.

4.2.3.4 Filamentringkategorie 3

Die Filamentringe der Kategorie 3 sind bereits bei ihrer Entstehung so fest, dass sie eine rapide Erhöhung der Garnspannung erzeugen. Der sprunghafte Garnspannungsanstieg ist auf eine starke Garneinschnürung zurückzuführen, die das Garn unmittelbar am Abspulen hindert. Abb. 4-23 zeigt ein exemplarisches Garnspannungs-Abzugslängen-Diagramm eines Filamentrings der Kategorie 3.

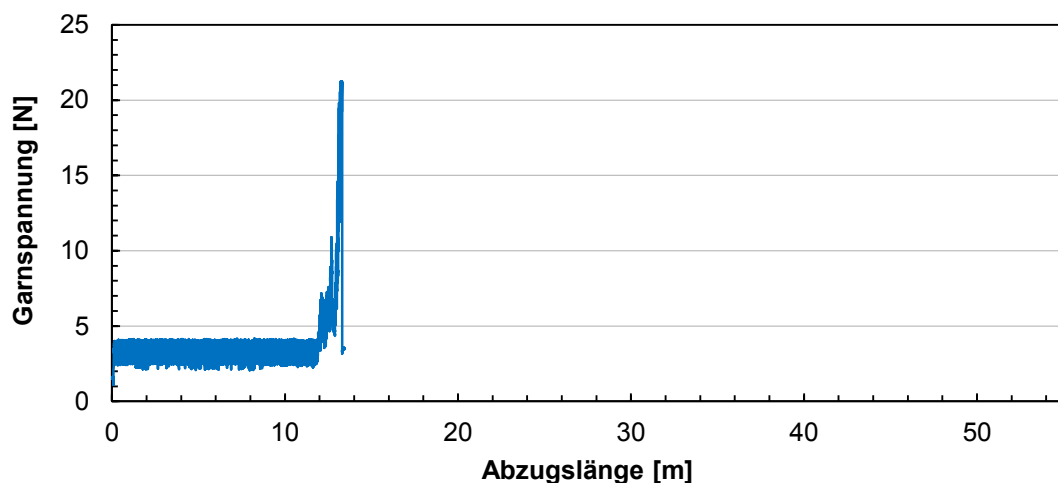


Abb. 4-23: Garnspannung über Abzugslänge einer Spule (n43) mit einem Filamentring der Kategorie 3

Die Filamentringe dieser Kategorie bilden sich ebenso in der Mitte der Garnspule aus. Allerdings ist die Einschnürung des Garns zu Beginn der Filamentringentstehung so stark, dass kaum weiteres Garnmaterial abgespult wird. Ein Anwachsen des Filament-

rings bleibt bei dieser Kategorie aus, weswegen die maximalen Abzugslängen relativ gering sind. Die durchschnittliche Abzugslänge einer Spule mit einem Filamentring der Kategorie 3 beträgt 14,0 m. Abb. 4-24 bis Abb. 4-25 zeigen exemplarisch Filamentringe der Kategorie 3 an drei verschiedenen Versuchsspulen mit den jeweiligen maximalen Abzugslängen.

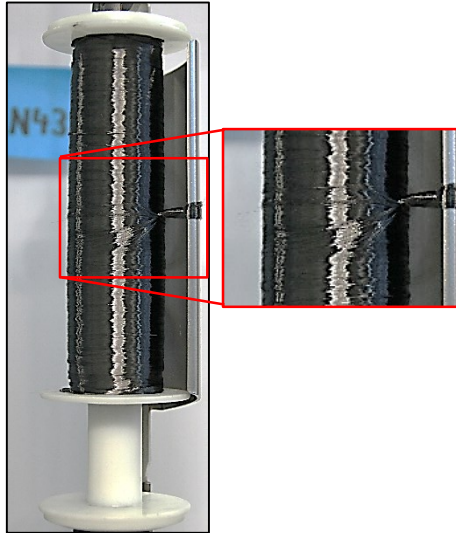


Abb. 4-24: Filamentring der Kategorie 3 (Spule n43)
Abbruch bei einer Abzugslänge von 13,3 m

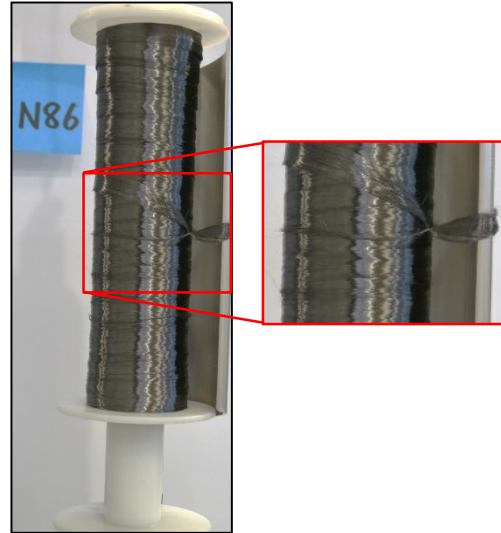


Abb. 4-25: Filamentring der Kategorie 3 (Spule n86)
Abbruch bei einer Abzugslänge von 9,2 m

4.3 Einfluss unterschiedlicher Garnausgangsqualität auf die Filamentringentstehung

Wie in Abschnitt 4.2 festgestellt wurde, hat die Garnschädigung den größten Einfluss auf die Entstehung von Filamentringen. In diesen Versuchen wurde die Schädigung des T700-Garns mit Hilfe von Sandpapier eingebracht, um ein Garn mit einer schlechteren Ausgangsqualität zu rekonstruieren³. Daraufhin soll in diesem Abschnitt die „natürliche“ Ausgangsqualität verschiedener Garne und deren Einfluss auf die Filamentringbildung verglichen werden. Es wurden sowohl Garne verschiedener Hersteller als auch Garne mit unterschiedlichen Schlichtegehalten und Produktionsdaten untersucht. Die durchgeführte Versuchsreihe war zweigeteilt. Zum einen wurde die Garnausgangsqualität mit Hilfe eines Abspulprüfstands für Mutterspulen beurteilt. Zum anderen wurden Flechtspulen der verschiedenen Garne vorbereitet und mittels des Ab-

³ Als Ausgangsqualität soll hier die Garnqualität bzw. Garnschädigung beschrieben werden, die das Garn direkt von der Mutterspule besitzt.

spulprüfstands für Flechtspulen (siehe Abschnitt 4.1) auf Filamentringe hin untersucht. Beide Untersuchungen wurden im Zeitraum zwischen Frühjahr und Sommer 2016 durchgeführt. Mit Hilfe dieser Angabe und den Herstelldaten aus Tab. 4-3 kann das Garnalter bestimmt werden.

Die Ausgangsqualität des Garns wird anhand der abstehenden Filamente bzw. Filamentfragmente pro Meter beurteilt. Zu diesem Zweck wurde Garnmaterial von der Mutterspule abgezogen und die Anzahl der abstehenden Filamentfragmente mit Hilfe von Lichtschranken festgestellt. Abb. 4-26 zeigt einen Abspulprüfstand für Mutterspulen mit zwei Bereichen zur optische Detektion.

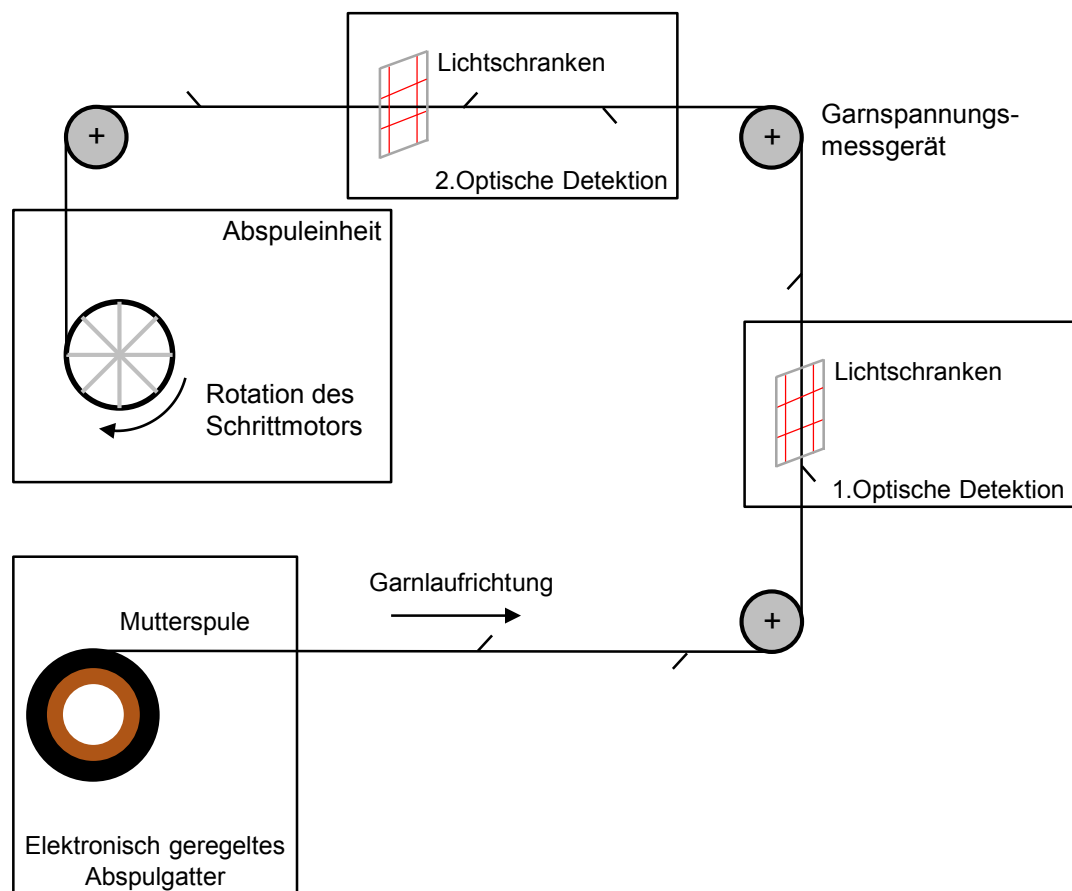


Abb. 4-26: Abspulprüfstand für Mutterspulen zur Messung von Garnschädigung mittels optischer Detektion

Das Garn besitzt eine Verlegung auf der Mutterspule. Dies führt dazu, dass sich das Garn während des Abspulvorgangs in axialer Mutterspulenrichtung bewegt. Zur korrekten Detektion gebrochener Filamentfragmente ist ein konstanter Abstand zwischen Lichtschranke und Garn entscheidend. Zu diesem Zweck wurde das Garn vor dem Durchlaufen der Lichtschranken um eine gelagerte Umlenkrolle gelenkt. Dies fixierte das Garn in axialer Richtung (bezüglich der Mutterspule) und ermöglichte dadurch einen konstanten Abstand zwischen Garn und Lichtschranken. Allerdings wird das Garn durch die erste Umlenkung geschädigt. Durch die Verwendung von zwei opti-

schen Detektionen konnte die Garnschädigung nach einer zweiten Umlenkrolle durch den Vergleich der Messergebnisse festgestellt werden. Diese bekannte Garnschädigung gab wiederum Rückschluss auf die Ausgangsschädigung des Garnmaterials vor der ersten Umlenkrolle. Voraussetzung für diese Annahme ist, dass die Schädigung der zweiten Umlenkrolle vergleichbar mit der Schädigung der ersten Umlenkrolle ist.

Die Detektion der Filamente wurde mit Lichtschranken (FS-11 Neo) der Fa. Keyence durchgeführt, die für die Detektion von Kohlenstofffilamenten von 5 bis 7 μm geeignet sind. Hierzu wurden insgesamt vier Lichtschranken in unmittelbaren Umgebung des Garns angebracht. Dabei wurde ein Abstand von ca. 7 mm zwischen Garn und Lichtschranken eingestellt. Zwei Lichtschranken überprüfen Filamentfragmente, die horizontal abstehen während zwei weitere Lichtschranken die vertikal abstehenden detektieren. Der Abstand zwischen Garn und Lichtschranken wurde empirisch ermittelt. Ein geringerer Abstand führte primär zu Abschattungen der Lichtschranken aufgrund des Garns und nicht mehr aufgrund der abstehenden Filamente.

4.3.1 Untersuchte Garne

Neben dem T700 24k 60E-Garn wurden vier weitere 24k-Garne auf ihre Ausgangsschädigung überprüft. Tab. 4-3 bietet einen Überblick über die Charakteristika der Garne und die untersuchte Garmlänge.

Tab. 4-3: Übersicht der untersuchten 24k-Garne. Mit jeweiligen Charakteristika [55, 58] und ausgewerteter Garmlängen

Garn und Charakteristika	Festigkeit [MPa]	Steifigkeit [GPa]	Titer [tex]	Filamentdurchmesser [μm]	Ausgewertete Garmlänge
T700 60E (0,3% Schlichte) (hergestellt 08.2014)	4900	230	1650	7	262 m
T700 50C (neu) (1,0% Schlichte) (hergestellt 11.2013)					279 m
T700 50C (alt) (1,0% Schlichte) (hergestellt 11.2005)					265 m
IMS65 (neu) (1,3% Schlichte) (hergestellt 11.2015)	6000	290	830	5	457 m
IMS65 (alt) (1,3% Schlichte) (hergestellt 09.2009)					459 m

Das in dieser Arbeit verarbeitete T700 24k-Garn ist ein HT-Garn mit einer Zugfestigkeit von 4900 MPa und eine Zugsteifigkeit von 230 GPa. Dabei sind drei Garnausführungen mit verschiedenen Schlichtegehalten vom Hersteller Toray Industries, Inc erhältlich. Das T700 24k 60E-Garn verfügt über einen relativ geringen Schlichtegehalt (Epoxid) von 0,3 %. Die anderen zwei Versionen besitzen 0,7 % (T700 24k F0E) und 1,0 % (T700 24k 50C). Um den Aufwand und den Materialeinsatz gering zu halten, wurden die zwei „Schlichteextrema“ – 60E und 50C – in die Untersuchungen mit einbezogen. Falls die Schlichtemenge einen Effekt auf die Filamentringbildung hat, würde dieser bei den Schlichteextrema auftreten [55].

Neben dem HT-Garn wurde ebenso ein IM-Garn untersucht. Ein häufig verwendetes 24k IM-Garn ist das IMS65 E23 von Toho Tenax. Das Garn hat eine deutlich höhere Zugfestigkeit (6000 MPa) und ebenso eine höhere Zugsteifigkeit von 290 GPa als die T700. Die IMS65 E23 besitzt einen Schlichtegehalt von 1,3 % (Epoxid) und einen Garntiter von 830 tex bei einem Filamentdurchmesser von 5 μm [58].

Ein weiterer Aspekt, der Einfluss auf die Ausgangschädigung des Garns haben kann, ist das Garnalter. Mit zunehmendem Garnalter härtet die Epoxidschlichte aus, was das Abspulverhalten und vor allem die Anbindung des Garns an die Matrix negativ beeinflusst. Toray gibt eine zweijährige Garantie auf das T700-Garn, wobei Toho Tenax eine dreijährige Verarbeitbarkeit auf die Garnqualität garantiert [59, 60]. Die Herstellungsdaten der Garne sind Tab. 4-3 zu entnehmen. Die Garne wurden dabei nicht unter definierten Bedingungen gelagert. Die Garne wurden in Folie verschweißt und im Herstellerkarton in einer großen Versuchshalle gelagert.

4.3.2 Versuchsergebnisse

4.3.2.1 Bestimmung der Ausgangsqualität

Die detektierten Filamentfragmente der untersuchten Garne werden in Histogrammen dargestellt. Die vertikale Achse repräsentiert den prozentualen Anteil der Häufigkeit, wobei die horizontale Achse die gemessenen Filamentfragmente pro Meter (F/m) darstellt.

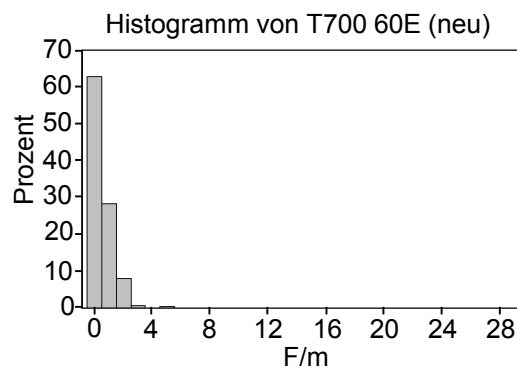


Abb. 4-27: Histogramm des T700 24k 60E-Garns (neu)

Das T700 60E-Garn zeigt einen sehr hohen Anteil (ca. 62 %) an ungeschädigten Bereichen (Abb. 4-27). Ca. 28 % der Garmlänge ist mit 1 F/m geschädigt, wobei 2 F/m nur zu ca. 8 % der Garmlänge festgestellt werden. Höhere Garnschädigungen (>2 F/m) bewegen sich im unteren einstelligen Prozentbereich.

Das Histogramm der T700 50C (neu) (Abb. 4-28) unterscheidet sich deutlich vom Histogramm der T700 60E. Es ist festzustellen, dass das 50C-Garn im Vergleich zum 60E-Garn einen geringeren Anteil an fehlerfreier Garmlänge besitzt (ca. 28 %). Folglich sind die geschädigten Bereiche des 50C-Garns ausgeprägter. 1 F/m hat einen höheren prozentualen Anteil als die ungeschädigten Garnanteile. 2 F/m und 3 F/m bewegen sich im Bereich von 15 % und 25 %. Erst bei 4 F/m ist ein deutlicher Abfall am prozentualen Anteil festzustellen.

Das Histogramm der T700 50C (alt) (Abb. 4-29) unterscheidet sich dagegen nur leicht vom Histogramm der T700 50C (neu). Der filamentbruchfreie Bereich besitzt den größten Anteil mit ca. 35 %. Erneut sind ausgeprägte Schädigungen nur im Bereich von 1 F/m bis 3 F/m zu erkennen. Ab 4 F/m sind nur noch einstellige Prozentbereiche der Garnschädigung festzustellen.

Das 60E-Garn besitzt weniger gebrochene Filamente pro Meter als das 50C-Garn. Dies kann möglicherweise auf den hohen Schlichteanteil und die daraus resultierende Klebrigkeit des 50C-Garns zurückgeführt werden. Auf einer Mutterspule liegen stets mehrere Garnlagen übereinander. Wenn das Garn bzw. die Garnlagen klebrig sind, können während des Abspulvorgangs Filamente des abgezogenen Garns an der darunterliegenden Lage haften bleiben. Bei diesem Vorgang können Filamente aufgrund von wirkenden Zug- oder Scherkräfte brechen, was an einer höheren Garnschädigung festzustellen ist.

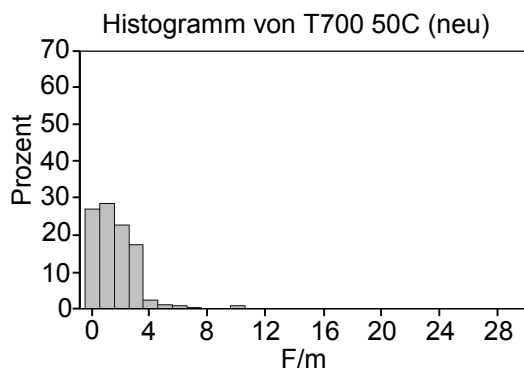


Abb. 4-28: Histogramm des T700 24k 50C-Garns (neu)

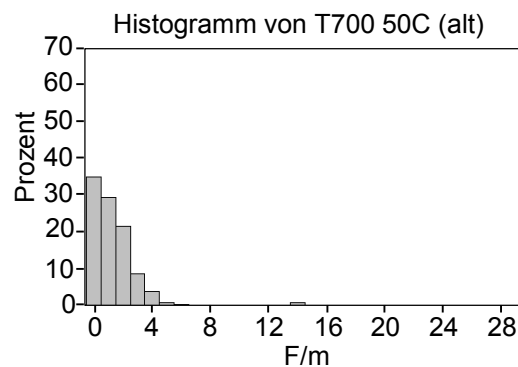


Abb. 4-29: Histogramm des T700 24k 50C-Garns (alt)

Das Garnalter hat in diesem Fall auf die Garnschädigung des T700 50C-Garns kaum einen Einfluss. Aufgrund des sehr hohen Garnalters von über 10 Jahren muss davon ausgegangen werden, dass die Epoxidschlichte ausgehärtet ist. Möglicherweise ist die

Integrität der Filamente im Garn verbessert, was zu einem erschwerten Herauslösen der Filamente und zu geringerer Garnschädigung führen kann.

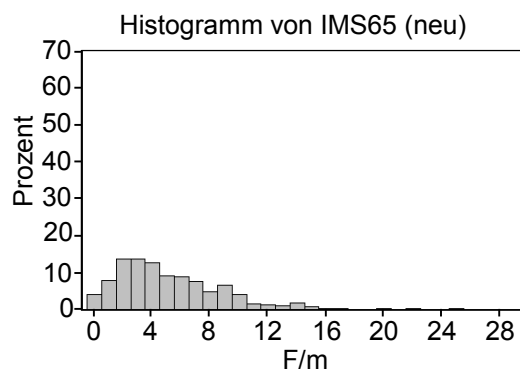


Abb. 4-30: Histogramm des IMS 65-Garns (neu)

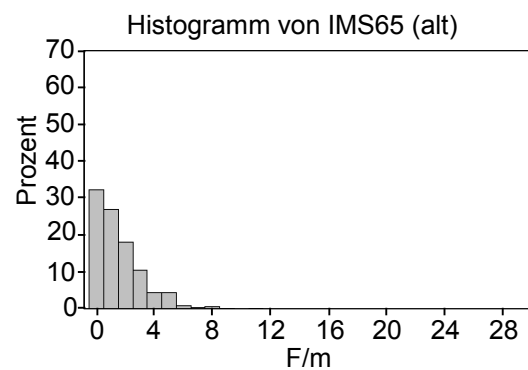


Abb. 4-31: Histogramm des IMS 65-Garns (alt)

Das IMS65-Garn (neu) (Abb. 4-30) zeigt die deutlichste Schädigung aller untersuchten Garne. Das Histogramm zeigt eine breite Verteilung der Schädigung, welche sich vereinzelt bei über 20 F/m bewegt. Der größte prozentuale Anteil der Schädigung liegt zwischen 2 F/m und 7 F/m. Möglicherweise spielen hier zwei Faktoren eine entscheidende Rolle. Zum einen der hohe Schlichteanteil von (1,3 %), zum anderen der geringe Filamentdurchmesser von 5 μm . Möglicherweise führt der hohe Schlichteanteil zu ähnlichen Mechanismen während des Abspulvorgangs, wie es beim T700 50C-Garn angenommen wird. Vermutlich sind es Biege- und Scherbelastungen und keine Zugkräfte, die verantwortlich für den Filamentbruch sind. Daher hat die hohe Zugfestigkeit keinen positiven Effekt auf die Garnschädigung. Stattdessen begünstigen im Vergleich zum T700-Garn der um ca. 30 % kleinere Filamentdurchmesser und die ca. 10 % geringere Bruchdehnung den hohen prozentualen Anteil an Filamentbruch.

Das IMS65-Garn, das im Jahre 2009 hergestellt wurde, zeigt eine schmalere Verteilung der Schädigung und einen höheren Anteil an schädigungsfreien Bereichen (Abb. 4-31). Erneut wird hier vermutet, dass bei einem hohen Aushärtegrad der Schlichte die Integrität des Garns verbessert wird.

4.3.2.2 Untersuchung zur Filamentringbildung

Die Garne wurden nach den Untersuchungen am Abspulprüfstand für Mutterspulen auf Flechtspulen umgespult und im Abspulprüfstand für Flechtspulen (siehe Abschnitt 4.1) untersucht. Die Garne wurden mit folgenden Parametern umgespult (Tab. 4-4):

Tab. 4-4: Umspulparametersatz zur Untersuchung unterschiedlicher Garnqualität

Umspulparameter	Größe und Einheit
Umspuldrehzahl	$20 \frac{1}{min}$
Verlegung	10 mm
Garnspannung	4 N
Traversenumkehrpunkt	0 mm
Garnlaufmeter pro Spule	100 m

Die Abspulparameter sind identisch zu den Parametern, welche bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben worden sind.

Es wurden die Garne am Abspulprüfstand für Flechtspulen untersucht, die die deutlichsten Unterschiede in den Garnschädigungshistogrammen zeigten. Tab. 4-5 fasst den Umfang der Messungen zusammen.

Tab. 4-5: Umfang der Abzugsversuche mit unterschiedlicher Garnausgangsqualität

Garn	Anzahl der Flechtspulen	Gesamte Garmlänge
IMS65 (neu)	15	2100 m
T700 60E (neu)	6	600 m
T700 50C (neu)	6	600 m

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 4-32) zeigt den prozentualen Anteil an Spulen, die einen Filamentring ausgebildet haben. Dabei wird erneut zwischen den unterschiedlichen Filamentringkategorien unterschieden.

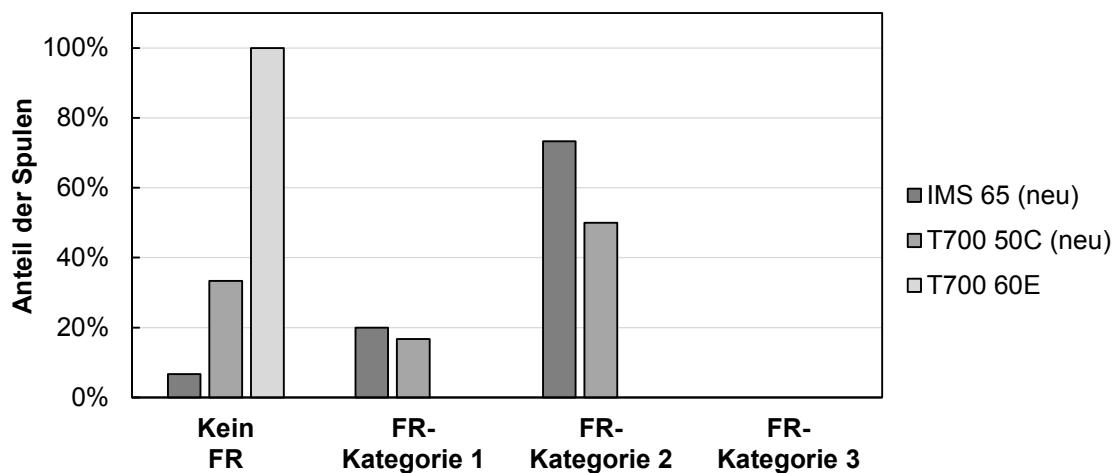


Abb. 4-32: Prozentualer Anteil an Flechtspulen, die aufgrund von natürlicher Garnschädigung Filamentringe ausbilden

Ein Filamentring der Kategorie 3 wurde bei keinem Abspulversuch festgestellt. Kein Garn besaß die dazu notwendige exzessive Schädigung. Deutlich zu erkennen ist, dass das IMS65 (neu)-Garn, bei ca. 73 % aller Flechtspulen Filamentringe der Kategorie 2 ausbildet. Ca. 50 % der T700 50C-Spulen erzeugen ebenso Filamentringe der Kategorie 2. Filamentringe der Kategorie 1 entstehen bei ungefähr 20 % der IMS65 (neu)-Garne, was ungefähr zu gleichem Anteil für die T700 50C-Garne gilt. Das T700 60E-Garn mit der geringsten Garnschädigung zeigt als einziges Garn in der Untersuchung ein zu 100 % filamentringfreies Abspulergebnis. Diese Ergebnisse decken sich gut mit den Erkenntnissen der Ausgangsschädigung, die in den Histogrammen dargestellt wurden.

4.4 Fazit

Die Garnschädigung, die aufgrund des Sandpapiers eingebracht wurde, ist ausgeprägter als die natürliche Schädigung der untersuchten Garne. Dafür spricht, dass während der Untersuchungen ohne künstlich verursachte Schädigung keine Filamentringe der Kategorie 3 entstanden sind. Diese Tatsache muss bei der Bewertung dieser Ergebnisse berücksichtigt werden. Im Abschnitt 4.2 wurden die Umspulparameter in einem breiten Bereich verändert, aber einen deutlicheren Effekt als die Garnschädigung konnte dort nicht festgestellt werden.

Die Untersuchung der „natürlichen Ausgangsschädigung“ bestätigen die Ergebnisse der Versuche, in denen das Garn künstlich geschädigt wurde. Die Garnschädigung bzw. die Ausgangsqualität des Garns hat deutlichen Einfluss auf die Filamentringbildung während des Abspulprozesses von Flechtspulen.

Die Entstehung von Filamentringen während des Abspulens eines Garns ist grundsätzlich auf die Interaktion von Filamenten unterschiedlicher Lagen zurückzuführen. Dazu

wurde ein Modell der Filamentringentstehung erstellt. Im Rahmen der Versuche dieses Abschnitts wurde die Interaktion aufgrund von Garnschädigung hervorgerufen. Die Interaktion von Filamenten unterschiedlicher Lagen kann allerdings weitere Ursachen haben. Darunter fallen eine geringe Garnverlegung, erhöhte Garnklebrigkeit oder ein hoher Schlichtegehalt.

5 Untersuchungen zur Garnlückentstehung

Wie in Abschnitt 4 bewiesen wurde, erhöhen Filamentringe unter bestimmten Randbedingungen die Spannung eines Flechtgarns. Aufgrund dieser Erhöhung einer einzelnen Garnspannung kommt es zu einer Lücke zwischen zwei Garnen im Geflecht – der Garnlücke. Um eine Korrelation zwischen Garnspannungserhöhung und Garnlückenbreite herzustellen, wurden lokale Garnlücken während des Flechtverfahrens provoziert. In Abb. 5-1 ist erneut die Übersicht der Rekonstruktionsmethodik dargestellt. Für die Versuche dieser Rekonstruktionsstufe wurde erneut das T700 SC 24k 60E-Garn von Toray Industries, Inc. verwendet. Die Ergebnisse dieses Abschnitts wurden teilweise von Mierzwa et al. [56] veröffentlicht.¹

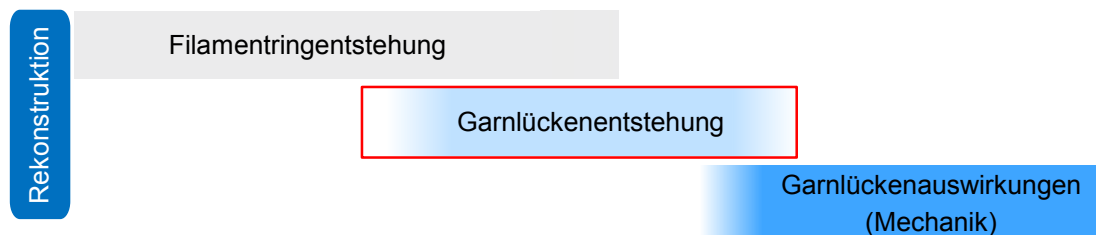


Abb. 5-1: Zweite Stufe der Rekonstruktionsmethode: Rekonstruktion von lokalen Garnlücken

Die Erhöhung der Garnspannung aufgrund eines Filamentrings ist ein dynamischer Prozess (siehe hierzu Abb. 4-20). Um die Wirkmechanismen dieser Garnspannungserhöhung auf das Geflecht zu analysieren, wird das dynamische Verhalten der Garnspannung durch definiert erhöhte Garnspannungsniveaus nachgebildet. Diese diskreten Garnspannungen werden im Flechtprozess durch einen modifizierten Klöppel erzeugt. Je nach Spannungsniveau werden stärkere Federvorspannungen, höhere Federsteifigkeiten und/oder eine zusätzliche Umschlingungsbremse verwendet. Zu Anfang dieses Abschnitts werden die Flechtversuche mit definiert erhöhter Garnspannung beschrieben, bevor auf Flechtversuche mit filamentringbildenden Flechtspulen eingegangen wird. Somit besitzt eine Flechtspule der Maschinenbesetzung eine erhöhte Garnspannung – verursacht durch die Klöppelmodifikationen oder einen Filamentring – wobei die restlichen Flechtspulen eine reguläre Garnspannung von ≈ 3 N (basierend auf einer Klöppelfederstärke von 350 g) aufweisen.

¹ Ein Teil der Versuche und Ergebnisse entstanden im Rahmen der Semesterarbeiten von Tobias Wolf und Julian Rauch [S10, S13]

5.1 Methode zur Charakterisierung von Garnlücken

Eine Flechtspule, die einen **Filamentring** ausbildet, wird im weiteren Verlauf als **Zugspule** bezeichnet. Sowohl das Garn der Zugspule als auch des modifizierten Klöppels wird als **Zuggarn** definiert (siehe Abb. 5-2).

Zur Charakterisierung der Garnlücke kam eine kraftbasierte und eine optische Messmethode zum Einsatz. Die Garnspannungserhöhung des Zuggarns hat Einfluss auf die Kräfte, die im sich bildenden Geflecht und somit auf den Kern wirken. Eine mögliche Position zur Messung dieser Prozesskräfte bzw. Prozesskraftänderungen ist die Flechtkerneinspannung. Zu diesem Zweck wurde ein Kraftsensor an der Einspannung des Flechtkerns montiert. Die Breite der Garnlücke wurde anschließend mittels des F-Scan-Sensors der Fa. Profactor GmbH vermessen. Da das System eine begrenzte Tiefenschärfe besitzt, wurde ein Flechtkern mit quadratischem Querschnitt und ebenen Seitenflächen verwendet. Dies ermöglicht eine korrekte Vermessung der Garnlücke mit dem zur Verfügung stehenden Messsystem. Der Flechtkern ist ein Vierkantrrohr aus Aluminium mit einer Kantenlänge von 50 mm und einer Wandstärke von 2 mm. Eine Biegung des Flechtkerns war aufgrund seiner Steifigkeit nicht zu erwarten, weswegen dieser Faktor vernachlässigt wurde. Mit Hilfe des Messaufbaus bestehend aus Kraftsensorik und optischer Breitenmessung war es möglich eine Korrelation zwischen Garnlückenbreite und Spannung des Zuggarns zu erzeugen. Abb. 5-2 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau an der Flechtmaschine und die Ausrichtung des Koordinatensystems der Kraftmessdose.

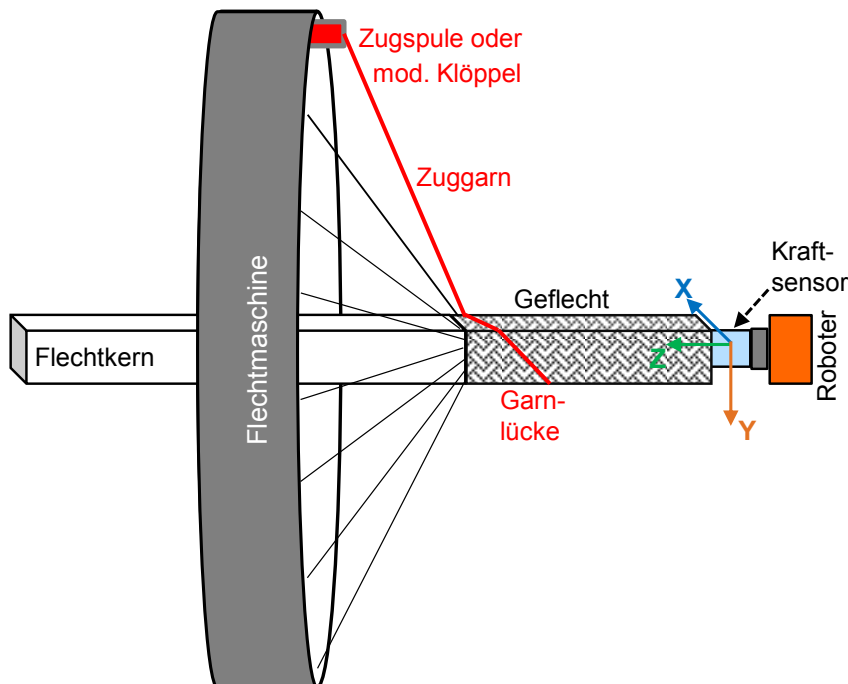


Abb. 5-2: Versuchsaufbau mittels Kraftsensorik an der Kerneinspannung einer Flechtanlage

Die z-Koordinate zeigt in entgegengesetzter Flechtrichtung bzw. Kernstoßrichtung während die x- und y-Koordinaten in der Horizontalen und Vertikalen verlaufen.

5.2 Flecht- und Umspulparameter

Die Flechtversuche wurden an einer Radialflechtmaschine (Herzog RF 128/100) durchgeführt. Eine volle Maschinenbesetzung (128 Flechtspulen) führt zu einem biaxialen 4x4-Geflecht, weswegen zur Erstellung eines biaxialen 2x2-Geflechts jeder zweite Klöppel mit einer Flechtspule (64 Flechtspulen) bestückt wurde. Die Flechtversuche wurden mit dem bereits in Abschnitt 4 verwendeten 24k-Garn (T700 SC 24k 60E von Fa. Toray Industries, Inc.) und zusätzlich mit einem 50k-Garn (CT50-4.0/240-E100 von Fa. SGL Carbon SE [61]) durchgeführt. Auf Basis der zwei unterschiedlichen Garne bzw. Garntiter sollen Resultate der Flechtversuche, die titerunabhängig sind, erkannt werden.

Die Umspulparameter des 24k und 50k-Garns fasst Tab. 5-1 zusammen:

Tab. 5-1: Umspulparameter des 24k- und 50k-Garns

Garne	24k	50k
Umspulparameter		
Umspuldrehzahl	$20 \frac{1}{min}$	$20 \frac{1}{min}$
Verlegung	10 mm	10 mm
Garnspannung	4 N	8 N
Traversenumkehrpunkt	0 mm	0 mm
Garnlaufmeter pro Spule	50 m	50 m

Tab. 5-2 fasst die relevanten Flechtparameter beider Garne zusammen. Die Flechtversuche wurden mit einem Vierkantrohr als Flecht kern durchgeführt.

Tab. 5-2: Flechtparameter für Flechtversuche auf Basis des 24k und 50k-Garns

Garne	24k	50k
Flechtparameter		
Flechtspulenanzahl	64	64
Flechtwinkel φ	45°	45°
Flecht kernkantenlänge	50 mm	70 mm
Flecht kernlänge	1500 mm	1500 mm
Klöpplfederstärke	350 g	350 g
Flechtringdurchmesser	90 mm	110 mm
Flügelraddrehzahl	$30 \frac{1}{min}$	$30 \frac{1}{min}$
Kernabzugsgeschwindigkeit	$6,4 \frac{mm}{s}$	$9,2 \frac{mm}{s}$

Die Garnspannung der Zugspule kann relativ hohe Werte erreichen, weswegen eine geringe Flügelraddrehzahl gewählt wurde, um bei Bedarf die Flechtmaschine zu stoppen und mögliche Defekte an Klöppeln oder anderen Flechtmaschinenkomponenten zu vermeiden.

5.3 Messwertaufnahme

Zur Untersuchung der Zuggarnspannung werden einzelne Komponenten aus den Prozesskraftaufzeichnungen ausgewertet. Aus diesem Grund werden die Kräfte, die an der Kerneinspannung gemessen werden (im Weiteren „Prozesskraftverläufe“ genannt) in diesem Abschnitt detailliert vorgestellt. Die Aufzeichnung der Prozesskräfte begann mit Start des Flechtprozesses und wurde mit einer Rate von 10 s^{-1} durchgeführt. Der Flechtprozess und die Datenaufnahme waren nicht miteinander gekoppelt und wurden jeweils manuell gestartet. Mit Hilfe der Kernabzugsgeschwindigkeit und der Zeit der Prozesskraftaufzeichnung wurde die hergestellte Geflechtlänge kalkuliert.

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 5-3) zeigt die Kraftverläufe einer fehlerfreien Referenzmessung über die Geflechtlänge. Die Kraftkomponenten in x- und y-Richtung

bewegen sich im Bereich von 0 N. Da alle Flechtgarne die gleichen Garnspannungen (≈ 3 N) besitzen und der Flechtkern zentrisch durch die Flechtmaschine geführt wird, gleichen sich die Kräfte am Flechtkern aus. Zu Beginn des Prozesses wird das Geflecht gespannt, was bei einem Weg von ca. 100 mm eine Zugkraft von durchschnittlich 115 N verursacht. F_z zeigt dabei einen zyklischen Verlauf, was auf die Rotation der Flügelräder zurückzuführen ist.

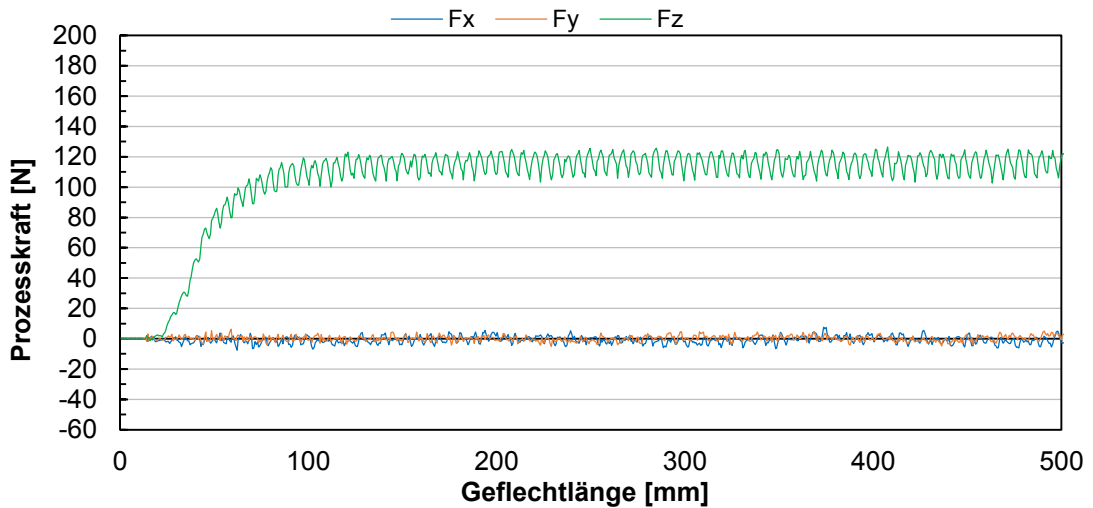


Abb. 5-3: Prozesskraft über Weg des Referenzversuchs (kein Zuggarn)

Das nachfolgende Diagramm (Abb. 5-4) zeigt beispielhaft den Prozesskraftverlauf, bei der Erhöhung der Spannung eines Zuggarns auf 40 N. Die 63 restlichen Spulen besitzen weiterhin eine Garnspannung von ≈ 3 N.

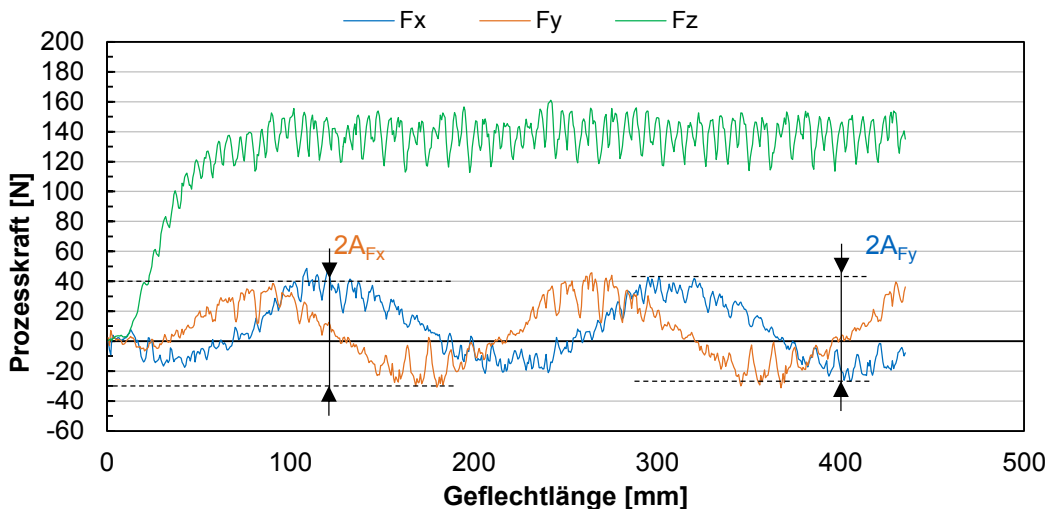


Abb. 5-4: Prozesskraft über Weg bei einer Garnspannung eines Zuggarns von 40 N

Die Kräfte in der x- und y-Richtung beschreiben einen periodischen Verlauf bezüglich des Wegs und sind um ein Viertel der Periodenlänge zueinander verschoben. Die wegbezogene Periodenlänge entspricht der Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügelräder.

Dabei ist die Phasenverschiebung durch die Kraftanteile in der x- und y-Richtung zu erklären. Befindet sich das Zuggarn parallel zur x-Achse, wirkt kein Kraftanteil in y-Richtung. Ist der maximale Kraftanteil der Garnspannungserhöhung parallel zur y-Achse, wirkt folglich keine Komponente in x-Richtung. Dem periodischen Verlauf werden die Amplituden (A_{F_x} und A_{F_y}) der F_x - und F_y -Kraftverläufe entnommen, die direkt von der Höhe der Zuggarnspannung abhängen. In Abb. 5-4 oszillieren die Kraftverläufe von F_x - und F_y nicht exakt relativ zu einer Prozesskraft von 0 N. Eine Exzentrizität des Flechtkerns ist wahrscheinlich die Ursache für diesen Unterschied.

Das Zuggarn erzeugt lokal eine Garnlücke – die primäre Garnlücke – und hat ebenso einen Einfluss auf sowohl die umgebenden Garne als auch auf die sekundären Garnlücken. Sekundäre Garnlücken sind Lücken eines Geflechts, die nicht durch ein Zuggarn erzeugt werden, sondern durch Ungenauigkeiten in der Garnablage entstehen. Die Bezeichnungen dieses Messfelds sind Abb. 5-5 zu entnehmen. Es wird eine Nummerierung der sekundären Garnlücken und restlichen Garne eingeführt. Das Zuggarn und die primäre Garnlücke erhalten die Ziffer 0. Die Garne und die entsprechenden sekundären Garnlücken in Flechtrichtung werden mit positiven Nummern versehen. Entgegen der Flechtrichtung erhalten die Positionen ein negatives Vorzeichen. Jeweils drei Garne bzw. sekundäre Garnlücken werden sowohl in als auch entgegen der Flechtrichtung mittels des F-Scan-Sensors vermessen.

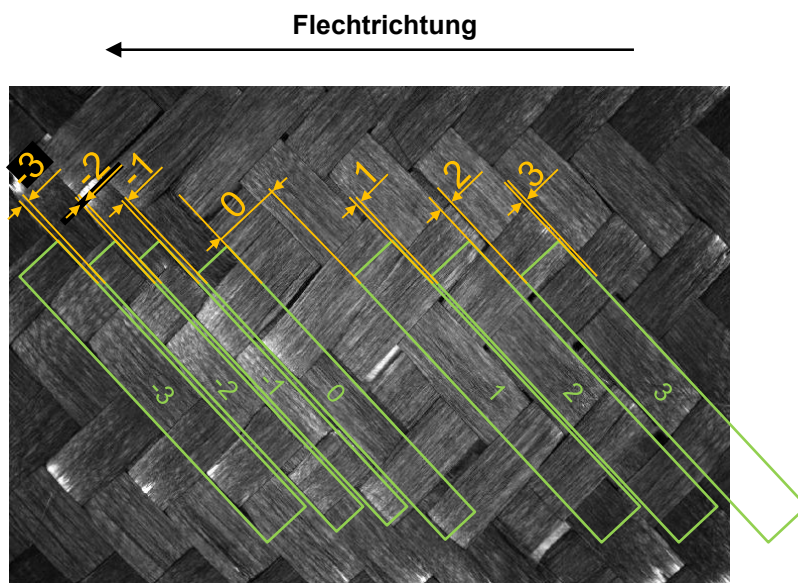


Abb. 5-5: Bezeichnungen innerhalb des Messfelds

Nummerierung der lokalen Garnlücke (0), der umgebenden Garne (grün: -3 bis 3) und der sekundären Garnlücken (gelb: -3 bis 3)

Das Messfeld wurde bei Spannungen des Zuggarns bis 12 N einmal pro Flechtkernseitenfläche vermessen. Dies geschah an acht hintereinanderliegenden Seitenflächen. Hohe Zuggarnspannungen (> 12 N) belasten die Flechtmaschinenkomponenten überdurchschnittlich stark. Um die „Belastungszeit“ zu reduzieren, wurde bei Spannungen

größer als 12 N der Flecht kern nicht komplett umflochten. In Abb. 5-4 ist zu erkennen, dass der 1500 mm lange Flecht kern bei einer Zuggarnspannung von 40 N nur 400 mm umflochten wurde. Deshalb wurden sowohl die primären und sekundären Garnlücken und die umgebenden Garnbreiten an einer Flecht kernseitenfläche dreimal vermessen. Dies wurde daraufhin an drei hintereinanderliegenden Seitenflächen wiederholt.

5.4 Garnlücken aufgrund schrittweise erhöhter Garnspannung

Die Versuche, die in diesem Abschnitt beschrieben werden, bestehen aus mehreren Teilen. Anfangs wurden Versuche am Abspulprüfstand für Flechtspulen durchgeführt. Dort wurden verschiedene Klöppelparameter unter anderem am modifizierten Klöppel ermittelt, um erhöhte Zuggarnspannungen zu erzeugen. Eine Messung der Zuggarnspannung erfolgte dort ebenso. Als nächsten Schritt wurden diese zuggarnzeugenden Parameter auf einen Klöppel in der Flechtmaschine übertragen und mit Hilfe der Kraftsensorik an der Flechtkerneinspannung die Prozesskraftamplituden (A_{Fx} und A_{Fy}) ermittelt. Mit Hilfe des Vergleichs von Zuggarnspannungen und Prozesskraftamplituden war es möglich zu überprüfen, ob die Prozesskraftamplituden den tatsächlichen Zuggarnspannungen entsprechen. Schließlich wurden die durch die Zuggarnspannungen erzeugten Garnlücken sowie die Breiten der umgebenden Garne vermessen und den Prozesskraftamplituden gegenübergestellt.

5.4.1 Definiert erhöhte Garnspannungen

Die definiert erhöhte Spannung des Zuggarns wurde im Bereich bis 8 N durch verschiedene Federstärken realisiert, die standardmäßig für den Klöppel IFDA-100 zur Verfügung standen. Der höhere Garnspannungsbereich wurde mittels Modifikationen am Klöppel realisiert. Die Garnspannung von 11,8 N wurde erreicht, indem ein zusätzliches Distanzstück die Vorspannkraft der Klöppeldruckfeder erhöhte. Höhere Garnspannungen wurden durch eine zusätzliche Umschlingungsbremse am Klöppel ermöglicht (Abb. 5-6). Die Ermittlung der individuellen Distanzstücklängen, Umschlingungsanzahlen und der entsprechenden Zuggarnspannungen wurde im Rahmen von Versuchen am Abspulprüfstand für Flechtspulen durchgeführt. Garnspannungen unter 20 N konnten mit dem in Kap. 4 bereits verwendeten Garnspannungsmessgerät aufgenommen werden. Höhere Garnspannungen wurden mit einem weiteren zur Verfügung stehenden Drei-Rollen-Handmessgerät (DTBX-5000-20 von Hans Schmidt & Co GmbH) überprüft. Mit diesem Gerät war es nicht möglich Daten aufzuzeichnen. Die Garnspannung wurde anhand der Ist-Anzeige am Messgerät abgelesen. Diese Messwerte verhielten sich relativ konstant.

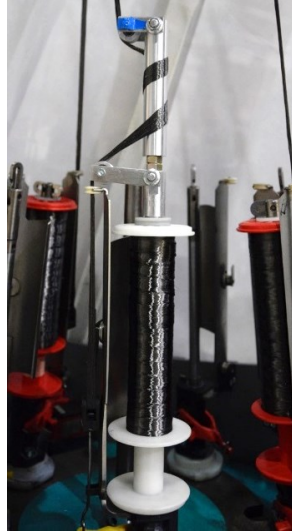


Abb. 5-6: Klöppel erweitert mit zusätzlicher Umschlingungsbremse

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 5-3) zeigt die Parametereinstellungen (Klöppelfederstärke, Distanzstücklänge und Anzahl an Umschlingungen), um die geforderten Zuggarnspannungen zu erreichen. Die Einstellung der Umschlingungsbremse konnte nur in ganzen Umdrehungen realisiert werden. Durch partielle Umdrehungen würde der Verlauf des Garns zusätzlich verändert werden, was zu einer Verfälschung der Garnlückenbreiten führen würde.

Tab. 5-3: Parametereinstellungen zur Erreichung von Zuggarnspannungen für 24k-Flechtversuche. Verifizierung erfolgte am Abspulprüfstand

Klöppelfederstärke / Distanzstück / Umschlingungsanzahl	Zuggarnspannungen ermittelt am Abspulprüfstand [N]
600 g Feder	$5,5 \pm 0,7$
950 g Feder	$8 \pm 0,7$
600 g Feder + 23,8 mm Distanzstück	$11,8 \pm 2,3$
350 g Feder + 2 Umschlingungen	≈ 20
950 g Feder + 2 Umschlingungen	≈ 30
950 g Feder + 23,8 mm Distanzstück + 2 Umschlingungen	≈ 40
350 g Feder + 3 Umschlingungen	≈ 50

Tab. 5-4 führt die Parametereinstellungen zur Erreichung der Zuggarnspannungsniveaus des 50k-Flechtgarns auf.

Tab. 5-4: Parametereinstellungen zur Erreichung von Zuggarnspannungen für 50k-Flechtversuche. Verifizierung erfolgte am Abspulprüfstand

Klöppelfederstärke / Distanzstück / Umschlingungsanzahl	Zuggarnspannungen Ermittelt am Abspulprüfstand [N]
350 g Feder + 2 Umschlingungen	≈ 30
600 g Feder + 2 Umschlingungen	≈ 40
130 g Feder + 3 Umschlingungen	≈ 50

5.4.2 Auswirkungen auf Prozesskräfte, Garnlücken und deren umgebenden Garne

Die einzelnen Parametereinstellungen, die in Tab. 5-3 und Tab. 5-4 vorgestellt sind, wurden auf einen Klöppel in der Flechtmaschine übertragen und Flechtversuchen (inkl. Prozesskraftmessung) unterzogen. In diesem Abschnitt werden Mittelwerte von Prozesskraftamplituden vorgestellt, welche auf mindestens drei Amplituden basieren.

5.4.2.1 Versuche basierend auf 24k-Garnen

In Tab. 5-5 sind die Amplituden (A_{Fx} und A_{Fy}) der F_x - und F_y -Kraftverläufe (ermittelt am Flecht kern mittels Kraftsensorik) in Abhängigkeit der Zuggarnspannungen (ermittelt am Abspulprüfstand) aufgetragen. Mit zunehmender Zuggarnspannung nehmen A_{Fx} und A_{Fy} nahezu linear zu. Dieser Zusammenhang ermöglicht es mittels der Analyse der x- und y-Komponente der Prozesskräfte auf die Zuggarnspannung zu schließen. Besitzen alle Garne des Flechtprozesses die gleiche Spannung, gleichen sich die Kräfte, die auf den Flecht kern wirken aus. Eine Erhöhung der Spannung eines einzelnen Garns von 3 N (350 g) auf ca. 5,5 N (600 g) erzeugt bereits ein messbares Ungleichgewicht am Flecht kern.

Tab. 5-5: Prozesskraftamplitude in Abhängigkeit der Zugarnspannung eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Ermittelt am Abspulprüfstand	Ermittelt am Flecht kern mittels Kraftsensorik		
	Zugarnspannung [N]	Prozesskraftamplitude A_{Fx} [N]	Prozesskraftamplitude A_{Fy} [N]
$5,5 \pm 0,7$	5,91 ($\pm 0,43$)	4,93 ($\pm 0,78$)	5,42 ($\pm 0,79$)
$8 \pm 0,7$	8,09 ($\pm 0,63$)	8,24 ($\pm 0,82$)	8,16 ($\pm 0,73$)
$11,8 \pm 2,3$	13,99 ($\pm 1,12$)	12,39 ($\pm 0,63$)	13,19 ($\pm 1,21$)
≈ 20	19,16 ($\pm 0,31$)	17,88 ($\pm 0,96$)	18,52 ($\pm 0,92$)
≈ 30	30,94 ($\pm 2,65$)	30,83 ($\pm 2,45$)	30,88 ($\pm 2,55$)
≈ 40	40,07 ($\pm 1,23$)	40,35 ($\pm 1,42$)	40,21 ($\pm 1,33$)
≈ 50	50,24 ($\pm 1,81$)	53,32 ($\pm 3,88$)	51,78 ($\pm 3,40$)

Im Rahmen der Flechtversuche zur Untersuchung der Garnlückenbreiten wurde noch eine zusätzliche Prozesskraftamplitude analysiert – ohne vorhergehende Untersuchung am Abspulprüfstand. Tab. 5-6 zeigt den Mittelwert der zusätzlich untersuchten Prozesskraftamplitude (22,52 N) und die dazugehörigen Einstellung des modifizierten Klöppels.

Tab. 5-6: Parametereinstellung zur Erreichung der zusätzlichen Prozesskraftamplitude im Rahmen der 24k-Flechtversuche

Klöppelfederstärke / Umschlingungsanzahl	Prozesskraftamplitude A_{Fx} [N]	Prozesskraftamplitude A_{Fy} [N]	Mittelwert der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} [N]
700 g Feder + 2 Umschlingungen	22,15 ($\pm 2,21$)	22,89 ($\pm 0,88$)	22,52 ($\pm 1,78$)

Das nachfolgende Diagramm in Abb. 5-7 zeigt die Garnlückenbreiten über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} (basierend auf den Mittelwert der Prozesskraftamplituden aus Tab. 5-5 und Tab. 5-6). Der Verlauf der Kurve in Abb. 5-7 ist nichtlinear. Die Kurvensteigung nimmt mit zunehmender Zugarnspannung ab und nähert sich einem Maximum an. Ab einem Prozesskraftamplitudenniveau von ca. 40 N wächst die Garnlücke nicht weiter an und besitzt eine Breite von ca. 4,3 mm.

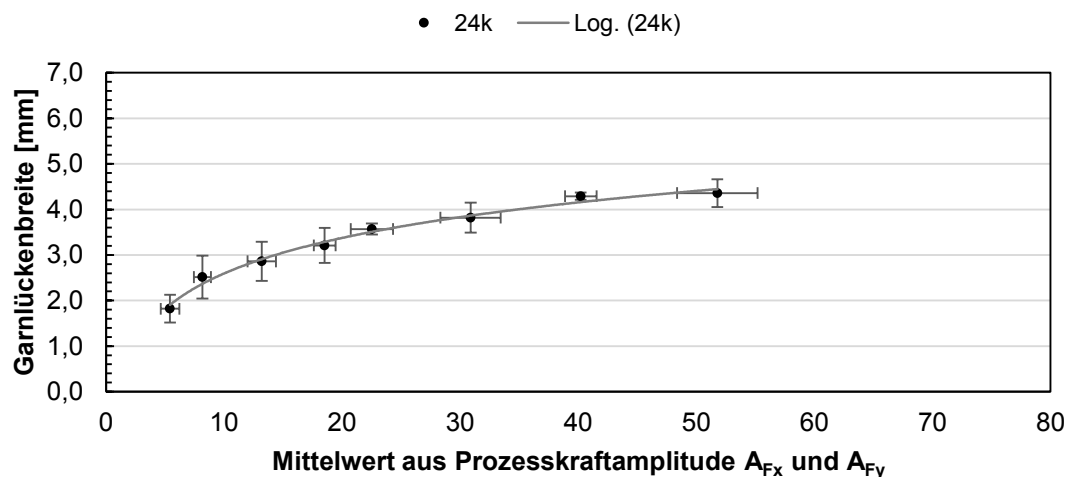


Abb. 5-7: Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Werden Garne im Flechtprozess verarbeitet, besitzen diese von Haus aus, auch wenn keine Zuggarne vorhanden sind, einen nichtlinearen Verlauf in der Konvergenzzone². Die Ausprägung des Garnverlaufs ist abhängig von folgenden Parametern:

- Spannung der Flechtgarne
- Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Garnen der gegenläufigen Gangbahnen
- Garnspezifische Parameter, wie Feinheit und Schlichtegehalt

Ravenhorst [62] analysierte mittels eines mathematischen Modells den Garnverlauf in der Konvergenzzone der Flechtmaschine. Seine Untersuchungen basierten auf unterschiedlichen Reibungskräften, die an den Garn-Garn-Interaktionspunkten wirken. Mit Abnahme der Reibungskräfte wird der Garnverlauf geglättet und die effektive Garnlänge (l_{eff}) nimmt ab. Dieser Zusammenhang kann auf die Entstehung lokaler Garnlücken übertragen werden.

Abb. 5-8 zeigt exemplarisch vier Garne mit verschiedenen Zuggarnspannungen (ZGS). Zum Zweck der Übersichtlichkeit sind die Garne der zweiten Gangbahn ausgeblendet. Bei einer geringen Garnspannung verläuft das Garn in einer ausgeprägten Kurvenform (ZGS_1). Mit zunehmender Garnspannung wird der Verlauf geglättet, bis sich der kürzeste Abstand zwischen Klöppel und Ablagepunkt in Form einer Gerade bzw. die kürzeste effektive Garnlänge l_{eff} ergibt. ZGS_4 wird als kritische Zuggarnspannung bezeichnet. Diese Zuggarnspannung ist abhängig von den zu Anfang dieses Abschnitts erwähnten Parametern, die ebenso den allgemeinen Garnverlauf beeinflussen. Falls eine Zugspule, die geflechtspezifische kritische Zuggarnspannung erreicht, stellt sich eine maximale Garnlückenbreite ein.

² Konvergenzzone: Der Bereich der Flechtmaschine zwischen den Klöppeln und dem Ablagepunkt (siehe Abb. 2-7 und Abb. 5-8)

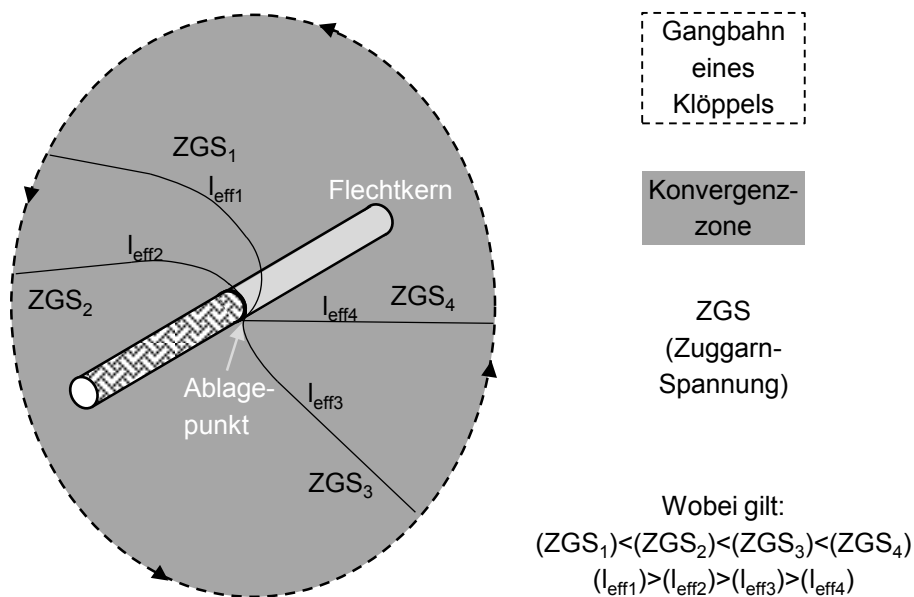


Abb. 5-8: Garnverlauf in der Konvergenzzone bei unterschiedlichen Zuggarnspannungen (ZGS). Diese Abbildung basiert auf [62, p. 449]

Die Glättung des Garnverlaufs führt während der Geflechtbildung zu einer Verschiebung des Zuggarns in die jeweilige Klöppelbewegungsrichtung. Durch die Verschiebung aus dem ursprünglichen Garnverlauf entsteht die primäre Garnlücke. Abb. 5-9 zeigt eine Momentaufnahme während eines Flechtversuchs (24k) mit einer mittleren Prozesskraftamplitude von 51,78 N.

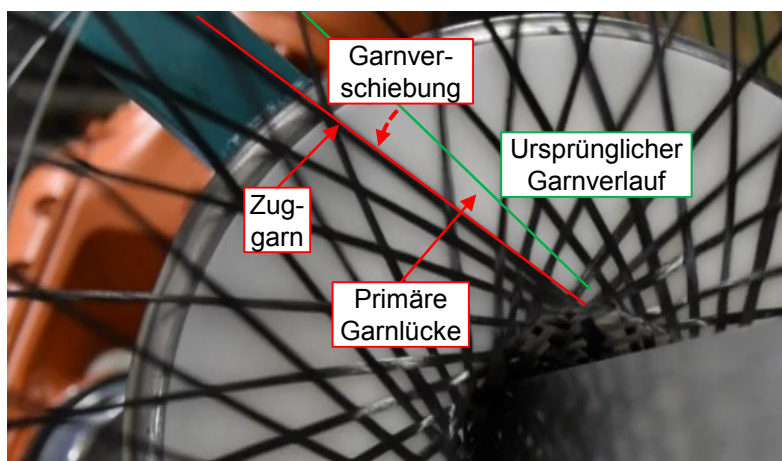


Abb. 5-9: Garnlückenentstehung während der Geflechtbildung eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Abb. 5-10 zeigt exemplarisch die Garn- und Garnlückenbreiten bei einer mittleren Prozesskraftamplitude von 51,78 N. Die theoretische (ungestörte) Garnbreite dieser Flechtkonfiguration beträgt 4,4 mm. Die durch das Zuggarn erzeugte primäre Garnlücke besitzt eine Breite von 4,3 mm, was ca. der ungestörten Garnbreite entspricht. Aufgrund der hohen Garnspannung wird das Zuggarn auf eine Breite von 2,9 mm ein-

geschnürt. Die primäre Garnlücke entsteht zum größten Teil aufgrund der Garnverschiebung, wird aber auch von der Einschnürung des Zuggarns beeinflusst.

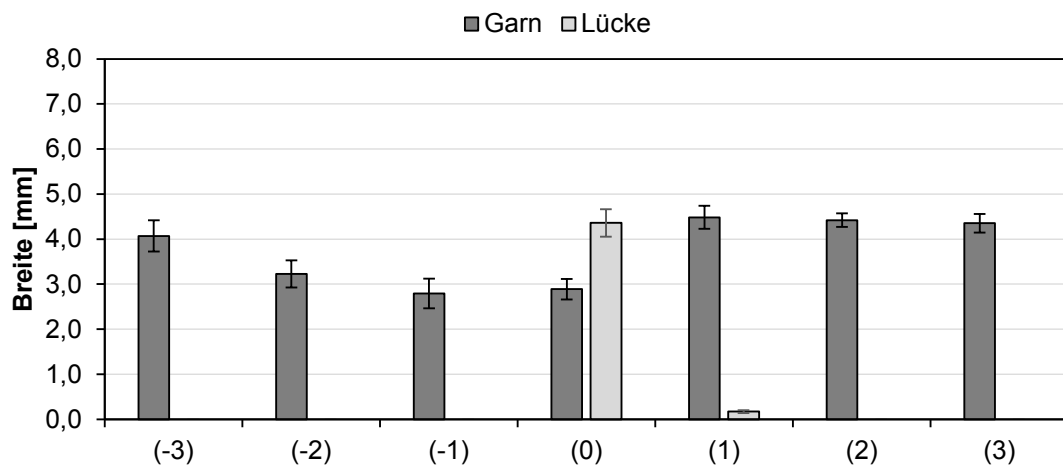


Abb. 5-10: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch bei einer mittleren Prozesskraftamplitude von 51,78 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Die Verschiebung des Zuggarns geschieht in Klöppelbewegungsrichtung, weswegen die Garne und sekundäre Garnlücken, welche sich vor dem Zuggarn befinden, beeinflusst werden (-3; -2; -1). Das Zuggarn schiebt diese Garne enger zueinander, die Garnbreiten werden schmaler und alle sekundären Garnlücken bis zur Position (-3) werden geschlossen. Die Garnbreiten nehmen mit größer werdendem Abstand vom Zuggarn zu. Möglicherweise normalisiert sich die Garnbreite nach der Position (-3) wieder. Da die Garnverschiebung sich nur in eine Richtung auswirkt, können keine Änderungen der Breite der nachlaufenden Garne (1; 2; 3) festgestellt werden.

In den durchgeführten Versuchen konnte bereits bei einer mittleren Prozesskraftamplitude von 8,16 N festgestellt werden, dass die sekundäre Garnlücke an der Positionen (-1) geschlossen wird (siehe hierzu Tab. A-5). Ebenso besitzt das Garn (-1) in diesem Fall eine unterdurchschnittliche Breite. Eine definierte Zuggarnspannung ab welcher die sekundäre Garnlücke geschlossen wird, konnte in diesen Versuchen nicht ermittelt werden.

5.4.2.2 Versuche basierend auf 50k-Garnen

Am Abspulprüfstand wurden verschiedene Klöppelparameter ermittelt, um definierte Zuggarnspannungen zu erzeugen (siehe Tab. 5-4). Diese Parameter wurden ebenso auf einen Klöppel in der Flechtmaschine übertragen und die Prozesskraftamplituden (A_{Fx} und A_{Fy}) ermittelt. Auch bei einem biaxialen 50k-Geflecht kann ein relativ linearer Zusammenhang zwischen den Prozesskraftamplituden und den Zuggarnspannungen festgestellt werden (Tab. 5-7).

Tab. 5-7: Prozesskraftamplitude über Zuggarnspannung eines biaxialen 50k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Ermittelt am Abspulprüfstand	Ermittelt am Flecht kern mittels Kraftsensorik		
	Zuggarnspannung [N]	Prozesskraftamplitude A_{Fx} [N]	Prozesskraftamplitude A_{Fy} [N]
≈ 30	28,34 (±1,95)	29,44 (±1,19)	28,89 (±1,74)
≈ 40	38,95 (±2,62)	39,43 (±2,24)	39,19 (±2,49)
≈ 50	51,70 (±3,69)	55,73 (±5,63)	53,72 (±5,61)

Im Rahmen der Flechtversuche zur Untersuchung der Garnlückenbreiten eines 50k-Geflechts wurden ebenso zusätzliche Prozesskraftamplituden analysiert – ohne diese zuvor am Abspulprüfstand untersucht zu haben. Tab. 5-8 zeigt die vier Mittelwerte der Prozesskraftamplituden (A_{Fx} und A_{Fy}) und die entsprechenden Einstellungen des modifizierten Klöppels.

Tab. 5-8: Parametereinstellungen zur Erreichung der Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} der 50k-Flechtversuche

Klöppelfederstärke / Umschlingungsanzahl	Mittelwert der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} [N]
130 g Feder + 2 Umschlingungen	14,76 (±1,46)
700 g Feder + 2 Umschlingungen	45,81 (±2,98)
350 g Feder + 3 Umschlingungen	71,88 (±3,51)

In Abb. 5-11 ist der Zusammenhang zwischen den mittleren Prozesskraftamplituden (basierend auf Tab. 5-7 und Tab. 5-8) und den Breiten der primären Garnlücken des 50k-Geflechts dargestellt. Hier ist ebenso eine nichtlineare Kurve festzustellen, die sich einer maximalen Garnlückenbreite von ca. 6 mm ab einer mittleren Prozesskraftamplitude von 55 N annähert. Im Vergleich zum untersuchten 24k-Geflecht ist die maximale Garnlücke breiter und bildet sich bei einer höheren Prozesskraftamplitude aus. Bei der Verarbeitung der 50k-Garne wurden Klöppelfederstärken von 350 g verwendet – ebenso wie beim 24k-Geflecht. Aufgrund des höheren Titers ist das 50k-Garn in der Konvergenzzone nicht so stark gespannt und der Verlauf ist gekrümmter als der des 24k-Garns. Bei der Zunahme der Zuggarnspannung wird der Garnverlauf stärker geglättet, das Zuggarn wird weiter verschoben und es bildet sich eine größere

Garnlücke. Zusätzlich spielen ebenso die Einschnürung des Zuggarns, die Veränderungen der Reibeffekte und der natürlichen Garnablagebreite eine Rolle.

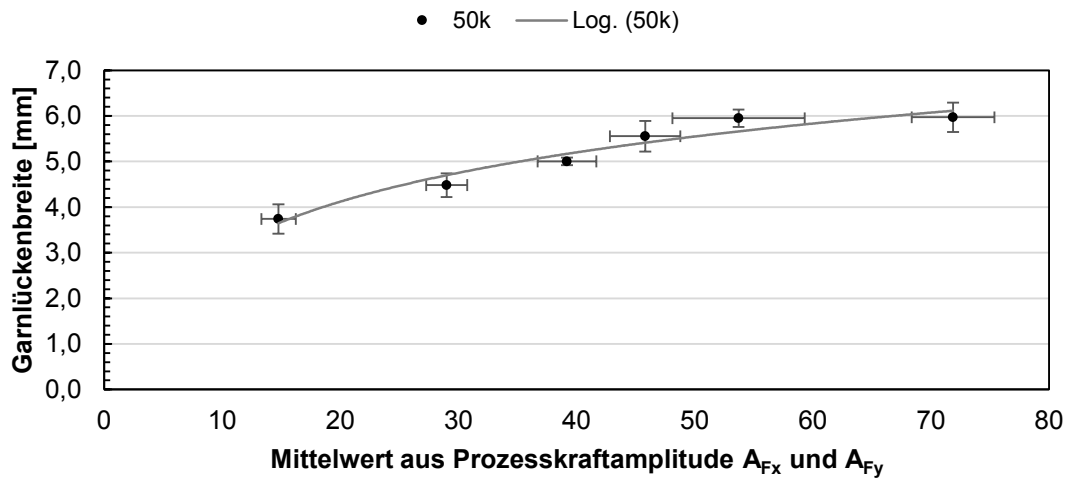


Abb. 5-11: Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 50k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

In Abb. 5-12 sind sowohl die Breiten der primären und sekundären Garnlücken als auch die entsprechenden Garnbreiten eines 50k-Geflechts mit einer mittleren Prozesskraftamplitude von 71,88 N dargestellt. Wie im Falle des 24k-Geflechts hat die Garnverschiebung aufgrund des Zuggarns ausschließlich Auswirkungen auf die vorlaufenden Garne und die korrespondierenden Garnlücken an den Positionen (-2) und (-1). Die Position (-3) wurde in dieser Versuchsreihe nicht vermessen. Erneut ist das gleiche Verhalten festzustellen, wie beim 24k-Geflecht. Die Garne an den Positionen -1 und -2 werden in der Breite komprimiert und die dazwischenliegenden Lücken geschlossen. Die nachfolgenden Garne an den Positionen 1 bis 3 werden nicht beeinflusst und zeigen Garnbreiten von ca. 6,6 mm. Die theoretische Garnbreite beträgt 6,2 mm. Des Weiteren bilden sich zwischen diesen Garnen Lücken von bis zu 2 mm aus. Eine eindeutige Erklärung hierfür konnte nicht festgestellt werden.

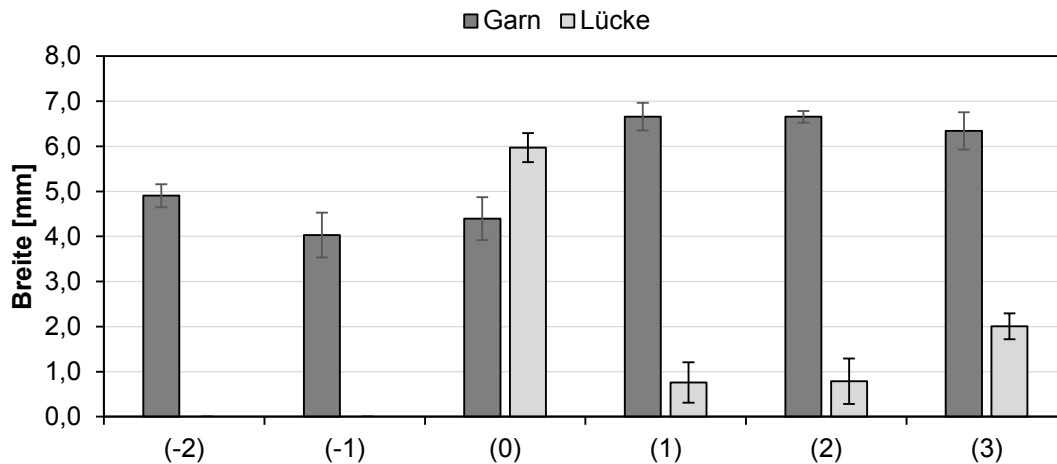


Abb. 5-12: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 71,88 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Die reduzierten Garnbreiten und das Schließen der sekundären Garnlücke an den Positionen (-1) und (-2) sind bereits bei einer mittleren Prozesskraftamplitude von 14,76 N zu erkennen. Eine definierte Zuggarnspannung ab welcher die sekundäre Garnlücke geschlossen wird, konnte in diesen Versuchen nicht ermittelt werden.

5.5 Garnlückenentstehung aufgrund von provozierten Filamentringen

In diesem Abschnitt werden Garnlücken, die von Filamentringen erzeugt werden, untersucht. Um Filamentringe während des Flechtprozesses kontrolliert zu erzeugen, wurden entsprechende Umspulparsätze aus den Versuchen aus Abschnitt 4 gewählt³. Im Laufe des Abspulvorgangs entstehen so Filamentringe der Kategorien 2 und 3, die – um die Kategoriebezeichnungen beizubehalten – die Zugspulenkategorien 2 und 3 erzeugen. Die Zugspule der Kategorie 2 erhöht die Prozesskräfte, welche sich wieder im Laufe des Prozesses zwischenzeitlich normalisieren. Die Zugspulenkategorie 3 dagegen zeichnet sich durch eine Erhöhung der Prozesskräfte aus, welche nicht wieder abfällt.

5.5.1 Prozesskraftanalyse

Da die Garnspannung, die eine Zugspule erzeugt, nicht konstant ist, können keine konstanten Amplituden aus den Prozesskraftverläufen entnommen werden. Um trotzdem Rückschlüsse auf die Zuggarnspannung ziehen zu können, wird aus der x- und y-Komponente eine resultierende Prozesskraft F_{res} bestimmt (5-1):

³ Die Spulenbezeichnungen und Umspulparsätze befinden sich im Anhang (Tab. A-1)

$$F_{res} = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2} \quad (5-1)$$

In Abb. 5-13 sind die Prozesskräfte und der Verlauf der F_{res} einer Zugspule der Kategorie 3 dargestellt. Das Garn wurde während des Umspulprozesses einer künstlichen Schädigung unterzogen (Spulenbezeichnung: n8).

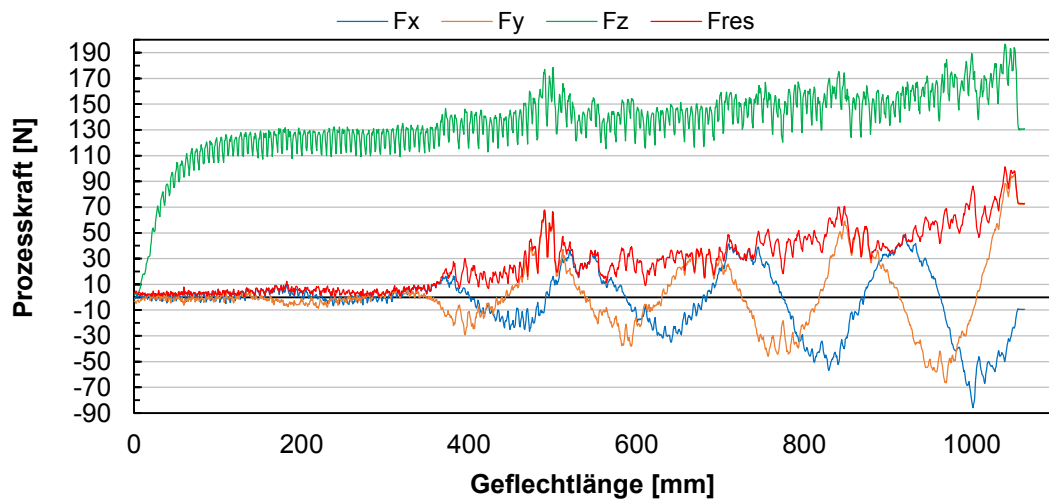


Abb. 5-13: Prozesskraftanstieg bei der Verarbeitung einer Zugspule der Kategorie 3 (Spulenbezeichnung: n8)

Die x- und y-Kraftkomponenten zeigen ab einer Geflechtlänge von ca. 100 mm eine periodische Kraftauslenkung, deren Amplitude stetig anwächst. Folglich steigt die resultierende Kraft F_{res} ebenso. Bei einem Wert von $F_{res}=100$ N wird der Flechtversuch abgebrochen, um Schäden an der Flechtmaschine zu vermeiden. Die Abzugskraft F_z zeigt erst ab einer Geflechtlänge von 370 mm eine Änderung des Verlaufs. Die prozessbedingten Signalschwankungen lassen keine genaueren Ergebnisse zu.

5.5.2 Auswirkungen auf Prozesskräfte, Garnlücken und deren umgebende Garne

Die Breiten der (primären/sekundären) Garnlücken und der umgebenden Garne ändern sich im Zuge der dynamischen Zugarnspannung. Um eine statistische Aussage dieser Werte zu ermöglichen, wird folgende Vereinfachung getroffen: Die Garn- und Garnlückenbreiten einer einzelnen Flechtseitenfläche werden als konstant angenommen. Somit werden pro Flechtseitenfläche drei Messwerte dokumentiert und daraus die in den Diagrammen gezeigten Mittelwerte gebildet.

5.5.2.1 Zugspulenkategorie 2

Charakteristisch für Zugspulen der Kategorie 2 ist eine Garnspannungserhöhung, die wieder auf Normalniveau absinkt. Dieses Merkmal dieser Zugspule ist ebenso im Ver-

lauf der resultierenden Kraft F_{res} und im Verlauf der Garnlückenbreite in Abb. 5-14 zu sehen.

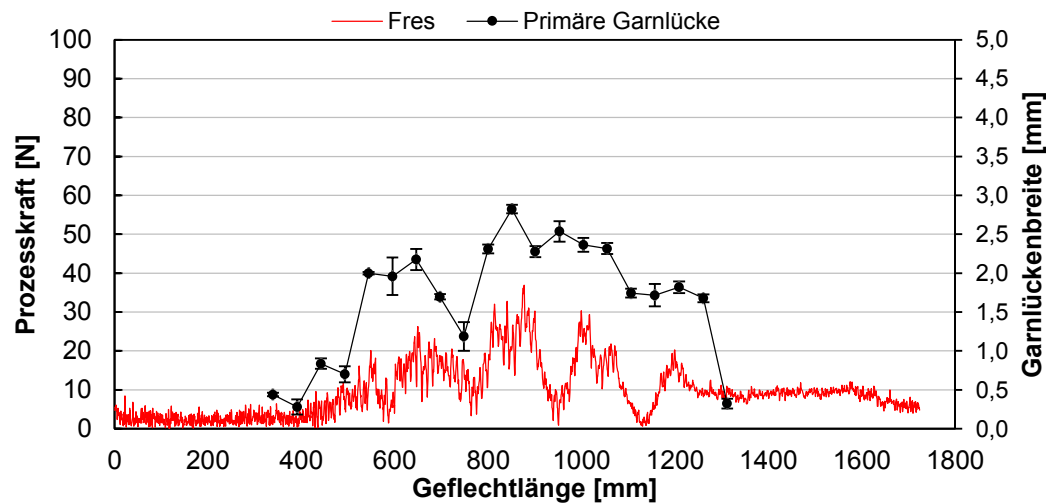


Abb. 5-14: Verlauf der Garnlückenbreiten über die Geflechtlänge bei einer Zugspule der Kategorie 2. (Spulenbezeichnung: n12)

Bei einer Geflechtlänge von ca. 400 mm steigt F_{res} und es entsteht an dieser Position ebenso eine lokale Garnlücke. Das Maximum der resultierenden Kraft von 35 N liegt bei ca. 870 mm und erzeugt eine 2,8 mm breite Garnlücke. Bei ca. 1300 mm schließt sich die Garnlücke, da auch die resultierende Kraft auf ein konstantes Kraftniveau fällt⁴. Die Garnspannungserhöhung erstreckt sich somit ca. über eine Geflechtlänge von 850 mm, was bei einem Flechtwinkel von 45° einer Garnlänge von 1200 mm entspricht. In den Versuchen des Abschnitts 4.2.3.3 (Filamentringkategorie 2) wurden erhöhte Garnspannungen ebenso über eine Garnlänge von ca. 1200 mm bis 1500 mm dokumentiert.

In Abb. 5-15 ist die Zugspule (Spulenbezeichnung: n12) abgebildet. Diese Spule bildete zwei Filamentringe im oberen und unteren Drittel der Spulenlänge aus.

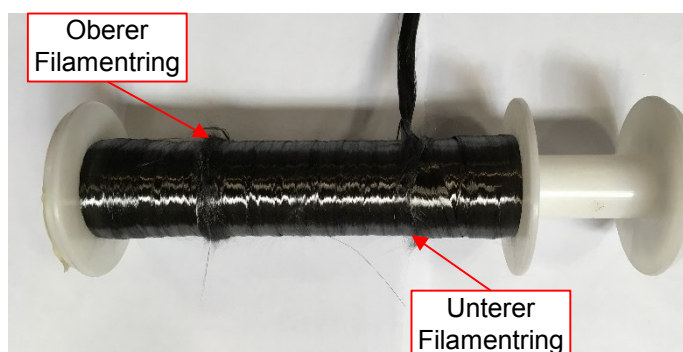


Abb. 5-15: Zugspule der Kategorie 2 (Spulenbezeichnung: n12)

⁴ Wahrscheinlich verursachte die Zugkraft der Zugspule einen Versatz des Flechtkerns aus dem Zentrum der Flechtmaschine, was in einem Versatz der F_{res} resultiert.

5.5.2.2 Zugspulenkategorie 3

Bereits in Abb. 5-13 wurde die Prozesskraftaufnahme einer Zugspule der Kategorie 3 (Spulenbezeichnung: n8) dargestellt. Diese Zugspulenkategorie erzeugt eine stetige Garnspannungserhöhung. Ein nachträglicher Abfall auf die Ausgangsgarnspannung ist bei dieser Zugspulenkategorie nicht möglich. Nach Herstellung des Geflechts wurden sowohl die Breiten der primären und sekundären Garnlücken als auch der umgebenden Garne an insgesamt 19 Positionen vermessen. In Abb. 5-16 werden nur die Werte der primären Garnlücke dargestellt. Von Beginn der Garnlückenentstehung (Geflechtlänge ≈ 100 mm) bis zum Abbruch des Flechtversuches bei 100 N (Geflechtlänge ≈ 1050 mm), kann die Garnlücke somit über 19 Seitenflächen verfolgt werden.

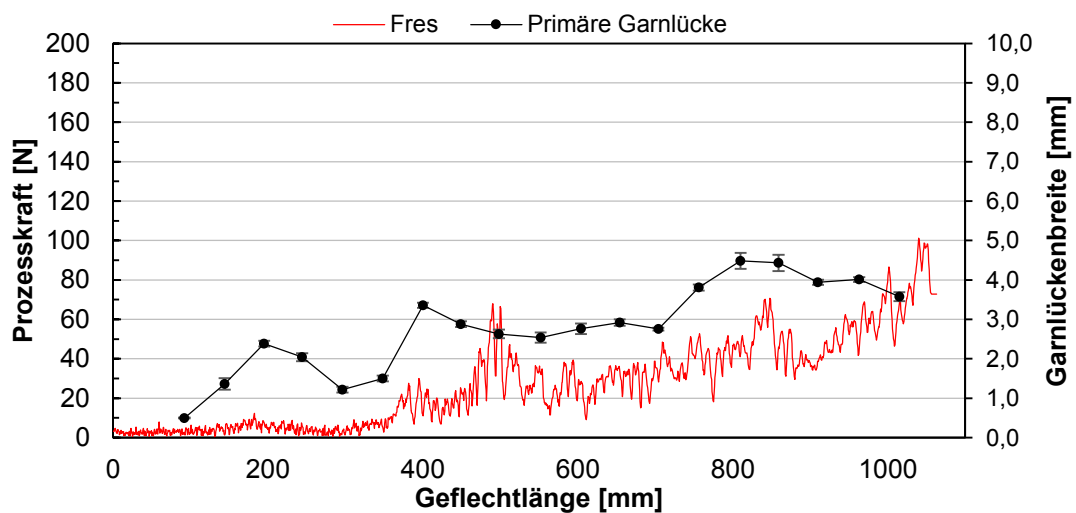


Abb. 5-16: Verlauf der Garnlückenbreiten über die Geflechtlänge bei einer Zugspule der Kategorie 3. (Spulenbezeichnung: n8)

In Abb. 5-16 wird die F_{res} und Garnlückenbreite entlang der Geflechtlänge dargestellt. Beide Kurven besitzen einen ansteigenden Trend. Vereinzelt sind Sprünge im Verlauf der Garnlücke und der F_{res} zu erkennen, die nicht direkt miteinander korrelieren. Dies ist z.B. der Fall an der Geflechtlänge von 500 mm und bei ca. 1000 mm, an denen ein Sprung im F_{res} -Verlauf zu erkennen ist. Bei einem einzelnen Kraftsprung benötigt das Zuggarn eine bestimmte „Reaktionszeit“, um seinen Verlauf zu strecken. Ist der Kraftsprung zeitlich sehr kurz, kann die Garnlücke nicht vollständig ausgeprägt sein. Bei einer Geflechtlänge von ca. 550 mm bis 700 mm schwankt F_{res} in einem Bereich von 17 N bis 35 N, was zu einer Garnlückenbreite von 2,5 mm bis 3 mm führt. In den Versuchen mit dem modifizierten Klöppel lagen aufgrund der relativ konstanten Zuggarnspannung bessere Bedingungen vor, weswegen breitere Garnlücken zu verzeichnen waren. An einer Geflechtlänge von 200 mm ist eine vergrößerte Garnlücke festzustellen. Dort ist zwar ein leichter Anstieg der F_{res} zu verzeichnen, aber wahrscheinlich kann diese Garnlücke auf gestörtes Abgleiten während der Geflechtbildung zurückgeführt werden.

Der Filamentring (Kategorie 3) der Flechtspule n8 liegt eng und zentral auf der Flechtspulenachse an (Abb. 5-17). Dieser Filamentring unterbindet ein Passieren des Garns, weswegen die Garnspannung stark ansteigt. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4 über die Position des Filamentrings der Kategorie 3 konnten somit bestätigt werden.

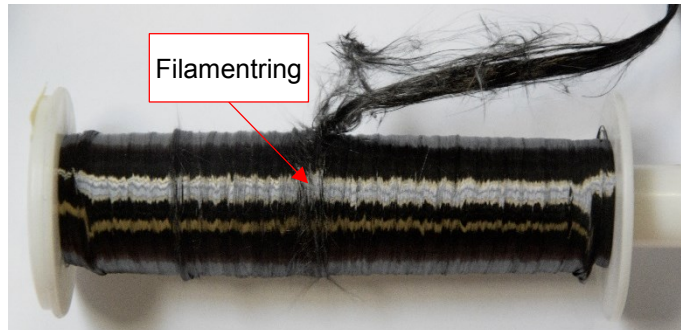


Abb. 5-17: Zugschule der Kategorie 3 (Spulenbezeichnung: n8)

Es wurden an allen 19 Messpositionen ebenso die Breiten der sekundären Garnlücken und benachbarten Garne dokumentiert. Exemplarisch werden in Abb. 5-18 die Breiten der Garnlücken (primär/sekundär) und die der benachbarten Garne bei einer Geflechtlänge von 859 mm dargestellt. Anhand des Prozesskraftverlaufs liegt die Zuggarnspannung bei ca. 45-50 N. Die dem Zuggarn vorlaufenden Garne an den Positionen (-1), (-2) und (-3) werden in der Breite komprimiert und die dazwischen liegenden sekundären Garnlücken geschlossen. Die nachlaufenden Garne der Positionen (1), (2) und (3) werden vom Zuggarn nicht beeinflusst. Diese Resultate bestätigen die Ergebnisse aus Abschnitt 5.4.2 erneut.

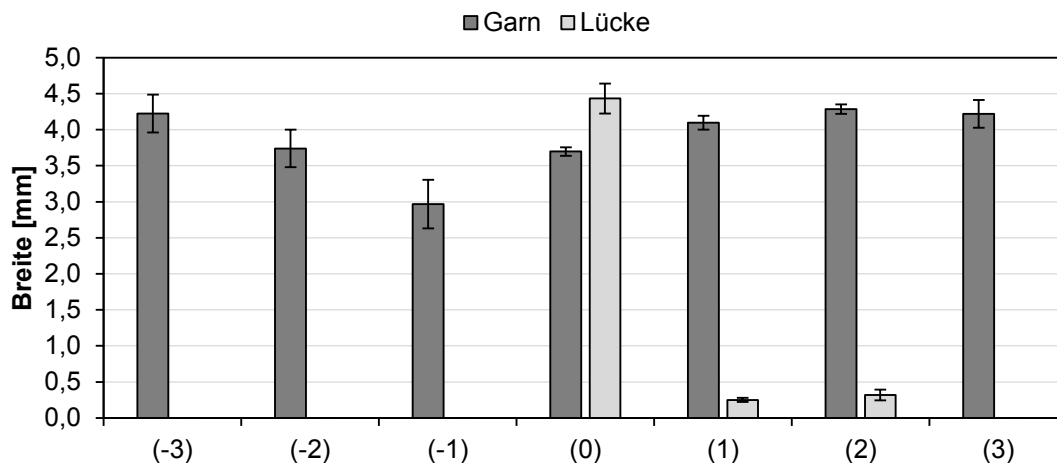


Abb. 5-18: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts bei einer Geflechtlänge von 859 mm und einer Zugschule der Kategorie 3. (Spulenbezeichnung: n8)

5.6 Fazit

Die Erhöhung der Zuggarnspannung, die ein Filamentring verursacht, ist ein dynamischer Prozess. Mit Hilfe eines modifizierten Klöppels konnten definiert erhöhte Garnspannungen, somit auch definierte Garnlücken erzeugt und damit das dynamische Verhalten stufenweise rekonstruiert werden. Die Spannung des Zuggarns wurde während der Versuche mittels einer Kraftmessung an der Kerneinspannung aufgenommen. Zusätzlich dazu wurde die Garnlückenbreite mit einem optischen System vermessen. Mit Hilfe beider Methoden konnte die Garnlückenbreite in Abhängigkeit der Zuggarnspannung untersucht werden. Es wurde herausgefunden, dass die untersuchten Biaxialgeflechte individuelle maximale Garnlückenbreiten besitzen. Abhängig von geflechtspezifischen Parametern bildet sich für z.B. das in dieser Arbeit verwendete 24k-Biaxialgeflecht eine maximale Garnlückenbreite von ca. 4,3 mm aus. Das untersuchte 50k-Biaxialgeflecht besitzt eine maximale Garnlückenbreite von ca. 6 mm. Neben diesen Erkenntnissen wurden auch typische Auswirkungen des Zuggarns auf die umgebenden Garne festgestellt. Garne, die sich vor der Garnlücke (in Flechtrichtung) befinden, werden durch das Zuggarn in ihrer Breite geschmälert und die dazwischenliegenden Lücken geschlossen.

6 Auswirkungen von Garnlücken auf mechanische Kennwerte von Geflechtcoupons

Als abschließender Schritt der Rekonstruktionsmethodik werden die Auswirkungen von Garnlücken auf die mechanischen Kennwerte von Verbunden auf Basis eines 24k-Biaxialgeflechts untersucht. Dieses Themengebiet wird in zwei Teile unterteilt. Im vorliegenden Abschnitt 6 werden die Effekte von Garnlücken auf die Mechanik von Coupons betrachtet (Abb. 6-1). Ein Teil der Ergebnisse der Extremfalluntersuchungen wurden bereits von Mierzwa et al. veröffentlicht [63]¹. Anschließend werden in Abschnitt 7 die Auswirkungen von Garnlücken auf die Mechanik auf Bauteileben anhand einer Torsionswelle analysiert.

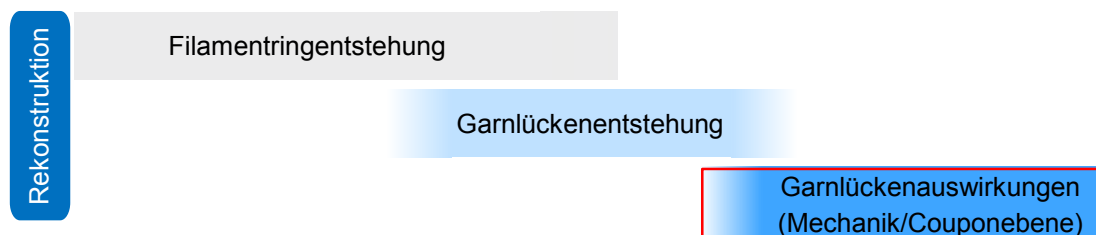


Abb. 6-1: Dritte Stufe der Rekonstruktionsmethode: Rekonstruktion der Auswirkungen von Garnlücken auf die mechanischen Kennwerte eines Geflechtverbunds

Bei der Laminatherstellung in Preforming- und LCM-Prozessen werden textile Halbzeuge in Dickenrichtung kompaktiert. Dies hat unter anderem das Ziel geforderte Faserservolumengehalte durch entsprechende Bauteilwandstärken zu erreichen. Die Kräfte, die während der Kompaktierung auf das Halbzeug wirken, beeinflussen dessen Garnondulation bzw. die mechanischen Eigenschaften des späteren Verbundes. Dadurch hat dieser Prozessschritt, neben anderen Faktoren (z.B. Garnfestigkeit, Laminataufbau etc.), ebenso Einfluss auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Verbunds. Einleitend für dieses Kapitel wird eine Literaturrecherche zum Kompaktierungsverhalten textiler Halbzeuge gegeben.

¹ Ein Teil der Ergebnisse dieses Abschnitts entstanden in Rahmen der Bachelor's Thesis von Olivia Kast [S12]

6.1 Literaturübersicht Kompaktierung trockener Textilien und textilbasierter Verbunde

Baoxing et al. [29, 64] stellten in ihren Untersuchungen fest, dass bei einer Druckbeaufschlagung die Mikrostruktur eines Halbzeugs stufenweise verändert wird. Zu Beginn des Kompaktierungsprozesses werden die Querschnitte der Einzelgarne deformiert, Garnlücken geschlossen, Garnondulationen geglättet, und benachbarte Garnlagen ineinander gedrückt – das sog. Nesting. Mit zunehmender Lagenanzahl wird ein ausgeprägter Nestingeffekt festgestellt, der dazu führt, dass die Einzellagendicke bei höherer Lagenanzahl kleiner ist als bei einer geringeren Lagenanzahl. Ab einer halbzeugspezifischen Lagenanzahl n nimmt die Einzellagendicke nicht mehr ab. Die Garnlagen legen sich nur bis zu einem maximalen Grad ineinander und es wird ein gesättigter Nestingzustand erreicht (siehe Abb. 6-2).

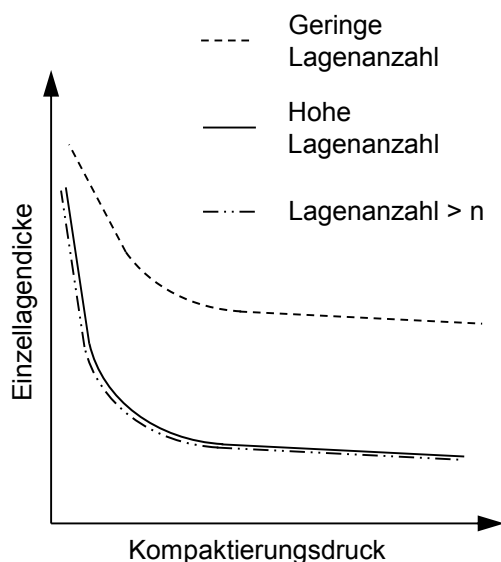


Abb. 6-2: Einzellagendicke über Kompaktierungsdruck unter Berücksichtigung der Lagenanzahl. Qualitative Darstellung. Auf Basis von [29]

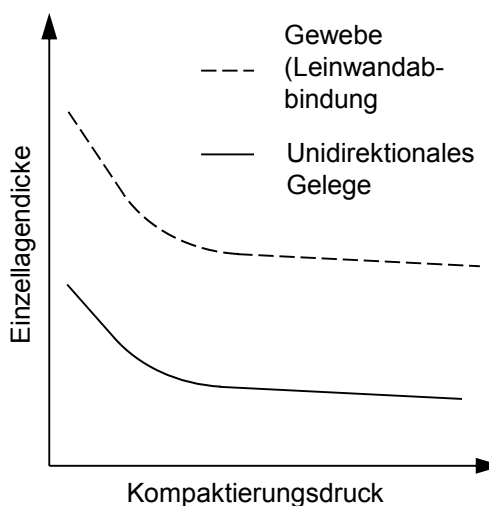


Abb. 6-3: Einzellagendicke über Kompaktierungsdruck unter Berücksichtigung unterschiedlicher Halbzeugtypen. Qualitative Darstellung. Auf Basis von [64]

Ein weiterer Parameter, der das Nesting beeinflusst ist der Halbzeugtyp. Halbzeugtypen die Garnverkreuzungen besitzen (z.B.: Kett- und Schussgarnen bei Geweben und Geflechtes), verfügen über eine höhere Resistenz gegenüber Nesting als unidirektionale Gelege, deren Garne parallel ausgerichtet sind und keine Garnverkreuzungen aufweisen (s. Abb. 6-3). Yousaf et al. [65] befassten sich vertieft mit dem Nestingverhalten unterschiedlicher Halbzeugtypen mit verschiedenen Garnarchitekturen. Das Prüfprogramm umfasste unter anderem Gewebe mit Leinwand-, Köper- und Atlasbindungen (Abb. 6-4).

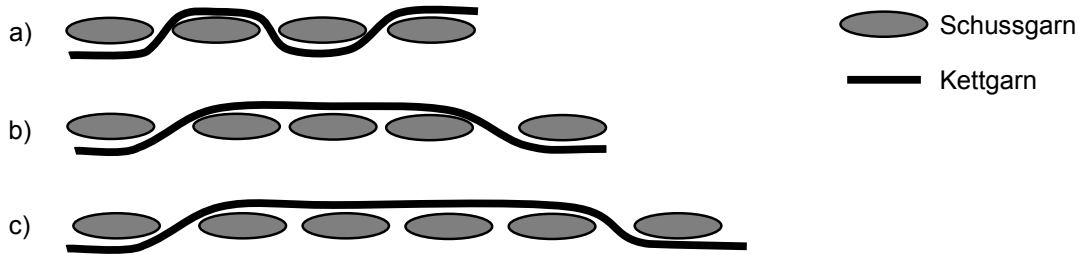


Abb. 6-4: Bindungstypen: a) Leinwandbindung; b) Köperbindung 3/1; c) Atlasbindung

Die Leinwandbindung verfügt über das „dichteste“ und die Atlasbindung über das „lockerste“ Warenbild. Die Leinwandbindung besitzt die engste Verkreuzung zwischen Kett- und Schussgarnen, weswegen es eine hohe Resistenz gegenüber Nesting hat. Folglich weist dieser Abbindestyp die größte Einzellagedicke auf (Abb. 6-5). Die Atlasbindung hat die weiteste Verkreuzung zwischen Kett- und Schussgarnen. Die Kettgarne verlaufen über eine größere Länge ungestört, was die Garnbiegung in Folge der Druckbeaufschlagung erleichtert. Dies ermöglicht ausgeprägteres Nesting und führt somit zu geringen Einzellagedicken. Die Köperbindung verfügt über weniger Kreuzungspunkte als die Leinwandabbindestyp, aber über mehr als die Atlasbindung, was das Ergebnis der Einzellagedicken erklärt.

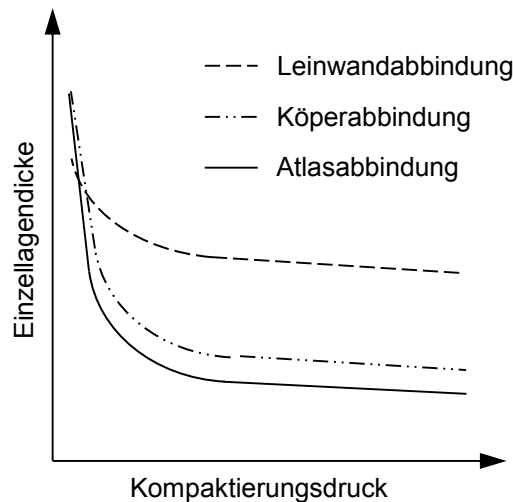


Abb. 6-5: Einzellagedicke über Kompaktierungsdruck von Geweben mit unterschiedlichen Abbindestypen. Auf Basis von [65]

Saunders et al. [66, 67] widmeten sich in ihren Untersuchungen sowohl dem Einfluss von unterschiedlicher Kompaktierungsdrücke bzw. unterschiedlicher Lagenanzahl auf den Faservolumengehalt. Ebenso untersuchten sie die Änderungen der Mikrostruktur des Halbzeugs. Die Kompaktierung des Halbzeugs wurde mit Hilfe eines kreisförmigen Stempels ($D=120$ mm) und einer Druckprüfmaschine erzeugt. Dazu wurde das zu untersuchende Garnmaterial mit der entsprechenden Harzmenge in einem quaderförmigen Behälter (obere Fläche offen) gelegt, kompaktiert und anschließend ausgehärtet. Der Behälter hat eine Grundfläche von 180 mm auf 180 mm, wobei das Halbzeug eine

Größe von 150 mm x 150 mm besitzt. Mit zunehmenden Kompaktierungsdruck konnte ein erhöhter Faservolumengehalt festgestellt werden. Ebenso erhöht sich der Faservolumengehalt bei konstantem Kompaktierungsdruck und zunehmender Lagenanzahl. Beide Ergebnisse sind auf reduzierte Einzellagendicken und somit auf ein ausgeprägtes Nestingverhalten zurückzuführen. Die Garnstruktur wird bei einer Erhöhung des Kompaktierungsdrucks verändert:

- Es nehmen die Garnquerschnittsflächen trotz relativ großer Variation ab, die Abstände der Filamente werden reduziert, weswegen sich höhere Faservolumenanteile auch in den Garnen einstellen.
- Die Garnhöhe wird kleiner und die Garnbreite nimmt zu, weswegen die Garnondulation abnimmt.
- Eine Änderung der Wellenlänge der Garnondulation konnte aufgrund ausgeprägter Ergebnisstreuung nicht festgestellt werden.
- Es ist davon auszugehen, dass die Zunahme der Breiten der einzelnen Garne in Summe zu einer Zunahme der Halbzeugbreite führt – von dem Saunders allerdings nicht berichtet.

Lomov et al. [68] untersuchten in numerischen Simulationen das Kompaktierungsverhalten von Halbzeugen in Abhängigkeit des Scherwinkels. Bei einer Verscherung eines Gewebes wurde ein abnehmender Nestingeffekt festgestellt. Bei verscherten Garnen wird das Ineinanderlegen benachbarter Lagen erschwert, weswegen auch die Einzellagendicken zunehmen. Im gleichen Zuge wird eine Reduktion des Faservolumenanteils festgestellt, der auf eine größere Wandstärke bei konstanter Garnmenge zurückzuführen ist. Somit bestätigen Lomov et al. indirekt die Ergebnisse von Baoxing et al. und Saunders et al.

Olave et al. [69, 70] stellen fest, dass schwach ausgeprägtes Nesting zu einer leichten Verbesserung der interlaminaren Eigenschaften führen kann. Unterschiedliches Nestingverhalten wurde ermöglicht, indem Gewebelagen mit einem Versatz von einem bzw. zwei Schussgarnen aufeinander gelegt wurden. Im Falle eines 12k-basierten Gewebes wurde bei erhöhtem Nestingverhalten eine leicht erhöhte G_I -Bruchzähigkeit (Mode I) festgestellt. Im Rahmen von Mode II-Versuchen wurde keine Wechselwirkung zwischen Nesting und der G_{II} -Bruchzähigkeit (Mode II) festgestellt. Die teilweise nur geringfügigen Auswirkungen auf die interlaminaren Eigenschaften sind auf den geringen Nestinggrad zurückzuführen, der aus dem Schussgarnversatz resultierte.

Li et al. [71] untersuchten die Garnstrukturen gelegebasierter Verbunde. Die Verbunde wurden unter verschiedenen Kompaktierungsdrücken hergestellt – allerdings gehen Li et al. nicht näher auf die Art des LCM-Verfahrens ein. Der Kompaktierungsdruck ermöglichte es, die Wandstärken und somit den Faservolumenanteil des Verbundes einzustellen. Li et al. konnten die Ergebnisse anderer Forscher bestätigen: Mit Zunahme des Kompaktierungsdrucks kommt es zu Nesting, was bei mehrlagigen Preforms ausgeprägter ausfällt als bei einer geringeren Lagenanzahl. Zusätzlich betrachten Li et al.

die Garnarchitektur (im Verbund) bei unterschiedlichen Kompaktierungsdrücken bzw. bei unterschiedlichen Faservolumengehalten. Bei geringen Druckerhöhungen werden harzreiche Zonen zwischen den Garnlagen geschlossen. Bei weiterer Druckerhöhung werden Garne in Lücken² benachbarter Lagen gedrückt und verlieren dabei ihre ursprüngliche elliptische Garnform. Dieser Prozess der Lückenfüllung führt zu einer Erhöhung von Garnondulationen. Die Garne werden durch den transversalen Druck in benachbarte Garnlücken gedrückt, weshalb die Garnlage lokal eine Zunahme des Ondulationsgrads erfährt. Li et al. postulieren daraufhin, dass diese Erhöhung der Garnondulationen zum Verlust von mechanischen Eigenschaften des Verbundes führen kann.

6.2 Couponkonfigurationen

Die Auswirkungen der Garnlücke auf mechanische Kennwerte des Verbundes sind abhängig von mehreren Parametern. In diesem Kapitel werden verschiedene Einflussfaktoren vorgestellt, die schließlich in unterschiedlichen Couponkonfigurationen untersucht werden. Die **Garnlückenbreite** der Coupons wird mit **4 mm** festgelegt. Dieser Wert liegt im Bereich der größten Garnlückenbreite für das untersuchte biaxiale 24k-Geflecht (siehe hierzu Abb. 5-7).

Bereits in anderen Faserverbundherstellungsprozessen wie dem Automated-Fiber-Placement wurden Effekte von Fertigungsfehlern auf mechanische Eigenschaften untersucht. Dabei konnten Unterschiede in den Kennwerten bei unterschiedlicher Fehlerausrichtung und verschiedenen Belastungsarten festgestellt werden [42]. Des Weiteren ist die Art des Harztränkungsprozesses ebenso entscheidend. Preforms, die eine lokale Garnlücke besitzen, können in Abhängigkeit des nachgeschalteten LCM-Prozesses unterschiedliche Defekte im Verbund verursachen [43].

Folgende Parameter fließen in die Konfiguration der Coupons ein:

- Art der mechanischen Prüfungen:
 - Zug- und Druckprüfung:
In Anlehnung an DIN-EN-ISO-527-4 und ASTM D6641 wurden die Geflechte mit einer 0°/90°-Garnorientierung geprüft. Die Last wird in 0°-Richtung eingeleitet [72, 73].
 - Schubprüfung:
In Anlehnung an die ASTM-D3518 werden die Coupons unter Schubbelastung geprüft. Die Prüfkörper besitzen eine ±45°-Garnorientierung. Die Belastung der Prüfkörper erfolgte in 0°-Richtung. Die freie Weglänge wurde mit 110 mm festgelegt, wobei keine Krafteinleitungselemente verwendet wurden [74].

² Aufgrund der Vernähung besitzt das NCF-Gelege Lücken zwischen den Garnen

- LCM-Prozess:
 - VAP:

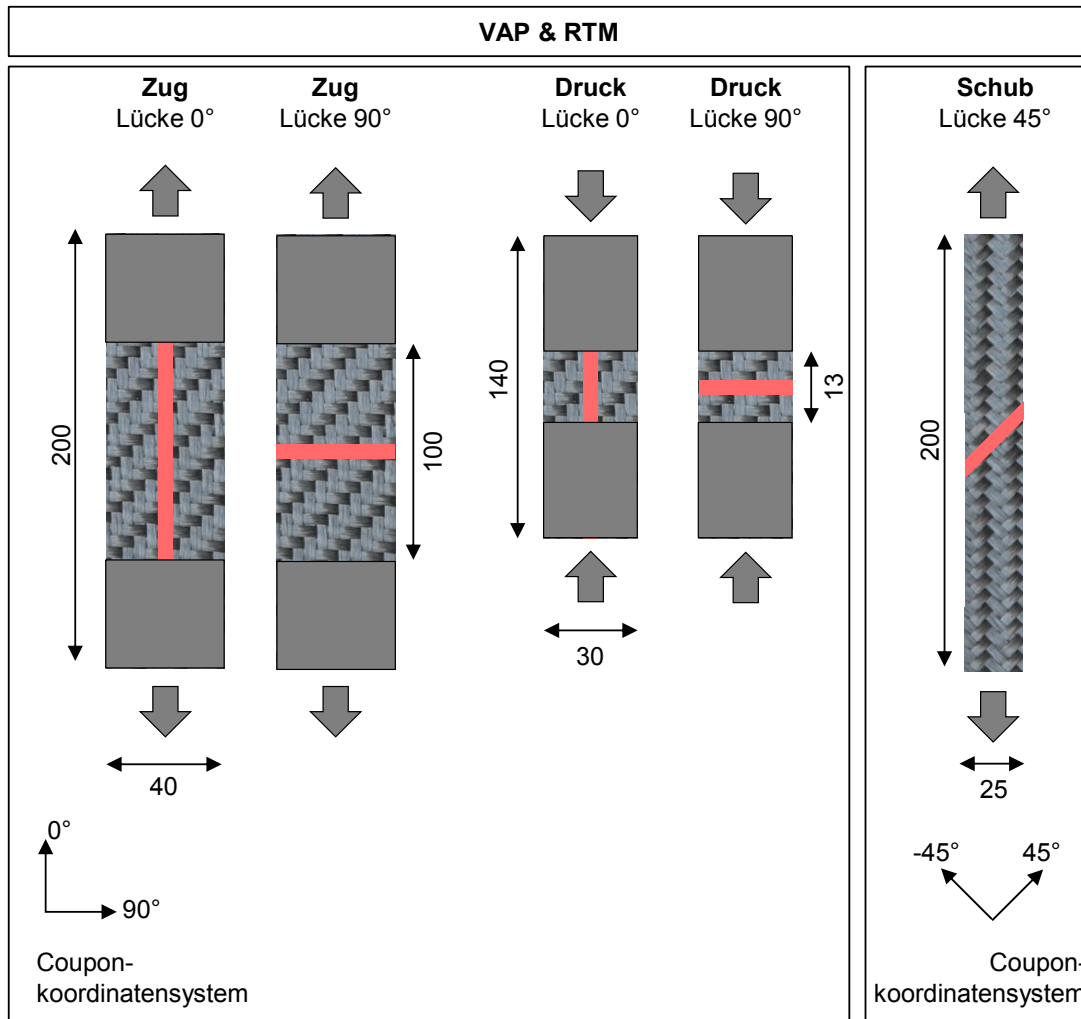
Dieses Verfahren ist ein Halbschalenprozess, der unter anderem durch einen flexiblen Folienaufbau und ein steifes Werkzeug definiert wird. Aufgrund der anliegenden Vakuumfolie verursacht eine lokale Garnlücke eine Garnondulationserhöhung des zweiten – lückenfreien – Garnsystems und dadurch eine Wandstärkenreduktion des Verbundes (bei ca. konstantem Faservolumengehalt).
 - RTM:

Die entscheidende Eigenschaft des RTM-Verfahrens ist ein steifes, zweiteiliges Werkzeug. Falls das Textil eine lokale Garnlücke besitzt, wird aufgrund der konstanten Werkzeugkavität die Garnlücke mit Harz gefüllt und es entsteht ein lokal geringerer Faservolumenanteil.
- Lückenausrichtung:
 - Parallel und senkrecht zur Lastrichtung:

Die Lücke wird bei den Zug- und Druckprüfkörpern jeweils parallel und senkrecht zur Lastrichtung ausgerichtet. Die Lücke wird hierbei stets mittig bezogen auf die Prüfkörperlänge und –breite positioniert.
 - +45° zur Lastrichtung:

Die Schubproben verfügten über nur eine Lückenausrichtung in +45° zur Lastrichtung (entlang des +45°-Garnsystems).

Die finalen Coupondimensionen und die dazugehörigen Lückenausrichtungen sind in Abb. 6-6 dargestellt. Die Orientierung der Garne und der Lücken sind relativ zum Couponkoordinatensystem ausgerichtet, dessen 0°-Richtung parallel zur Couponlängskante verläuft. Die Couponkonfigurationen besitzen Kurzbezeichnungen wie „Zug Lücke 0°“. Der erste Begriff (Zug, Druck, Schub) steht für die jeweilige mechanische Prüfung. Der restliche Teil der Couponbezeichnung (Lücke 0°, 90°, 45°) repräsentiert die Garnlückenausrichtung bezüglich des Couponkoordinatensystems. Die vorgestellten Couponkonfigurationen wurden im VAP- und RTM-Verfahren hergestellt. Es wurden ebenso fehlerfreie Referenzproben angefertigt.

**Abb. 6-6: Couponkonfigurationen**

Dimensionen der unterschiedlichen Coupons und Ausrichtungen der Garnlücken

Um die Couponkonfiguration, die am sensibelsten auf die Garnlücken reagiert, festzustellen, basieren die ersten Couponuntersuchungen auf einem **generischen Extremfall**. Jede Lage des sechslagigen Coupons enthält eine Garnlücke, die übereinander positioniert werden. Falls die Garnlücke sich negativ auf die Mechanik der unterschiedlichen Couponkonfigurationen auswirkt, sollen die Effekte durch diese Methodik deutlich zu erkennen sein.

Daraufhin wird die garnlückensensibelste Couponkonfiguration Basis für Untersuchungen an einer einzelnen Garnlücke im gesamten Lagenverbund. Der **Einzel-Lücken-Ansatz** ist deutlich wahrscheinlicher als der zuvor erläuterte Extremfall. Die Auswirkungen einer einzelnen Garnlücke auf die Struktur des Geflechtverbunds sind abhängig von geometrischen Faktoren, wie der Couponlagenanzahl und der Position der Garnlücke im Laminat. Die garnlückensensibelste Couponkonfiguration soll hinsichtlich dieser beiden Einflussparameter untersucht werden.

6.3 Couponherstellung

6.3.1 Geflechtfertigung und Rekonstruktion von Garnlücken

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten basieren die Versuche dieses Kapitels auf einem 2x2-Carbonbiaxialgeflecht. Erneut wurde das T700SC 24k 60E-Garn von Toray Industries mittels der Radialflechtmaschine (FR 128/100) der Fa. Herzog GmbH verarbeitet. Die in Tab. 6-1 gelisteten Flechtparameter wurden für die Herstellung der Geflechtcoupons verwendet:

Tab. 6-1: Flechtparameter zur Herstellung von Geflechtcoupons

Flechtparameter	Größe und Einheit
Flechtspulenzahl (jeder zweite Klöppel bestückt)	64
Flechtwinkel φ	45°
Flechtkerndurchmesser	65 mm
Flechtkernlänge	1500 mm
Klöpplfederstärke	350 g
Flechtringdurchmesser	90 mm
Flügelraddrehzahl	130 $\frac{1}{min}$
Kernabzugsgeschwindigkeit	28 $\frac{mm}{s}$

Um ebene Coupons zu erzeugen, wurde der zylindrische Flecht kern umflochten und die Geflechtlage längs der Kernachse aufgetrennt. Die Schnittkanten wurden vor dem Auftrennen mit einem temperaturbeständigen Klebeband fixiert. Abb. 6-7 zeigt ein fehlerfreies 2x2-Biaxialgeflecht für die Herstellung von Zug- und Druckcoupons. Die Abbildung zeigt nur die Couponumrisse. Parallel zur Fertigungsrichtung verläuft die 0°-Richtung des Probestplattenkoordinatensystems. Bezogen auf dieses Koordinatensystem ist der Flechtwinkel φ definiert. Die Längskante der Zug- und Druckcoupons verläuft parallel zu einem Garnsystem und ist die 0°-Richtung im Couponkoordinatensystem. Dies ergibt eine geforderte 0°/90°-Garnausrichtung der Zug- und Druckprüfkörper. Probestplatten- und Couponkoordinatensysteme sind somit um 45° zueinander verdreht.

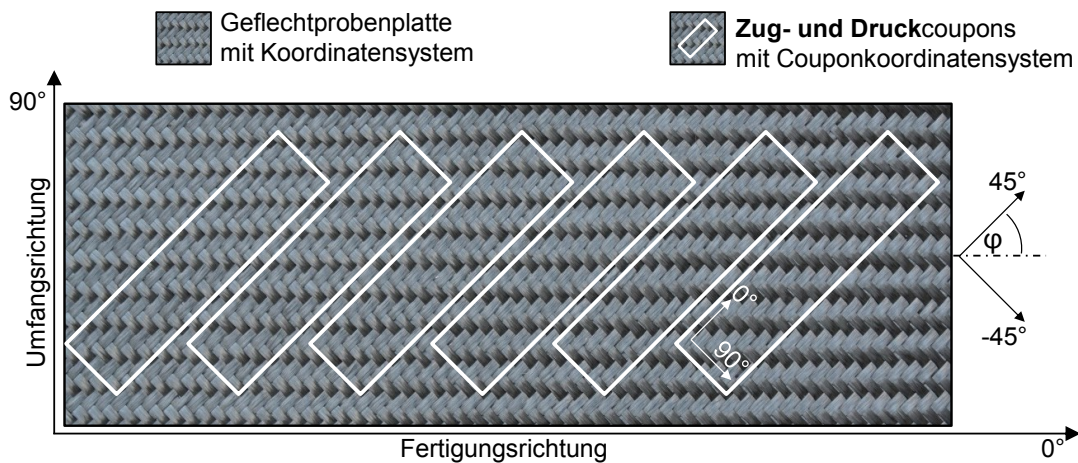


Abb. 6-7: Geflechtprobenplatte für die Herstellung von Zug- und Druckcoupons mit eingezeichnetem Probepplatten- und Couponkoordinatensystem

Die Schubprüfkörper werden parallel zur Fertigungsrichtung ausgerichtet und besitzen somit eine $\pm 45^\circ$ -Garnorientierung (Abb. 6-8). Die Ausrichtung des Probepplatten- und Couponkoordinatensystems sind somit identisch.

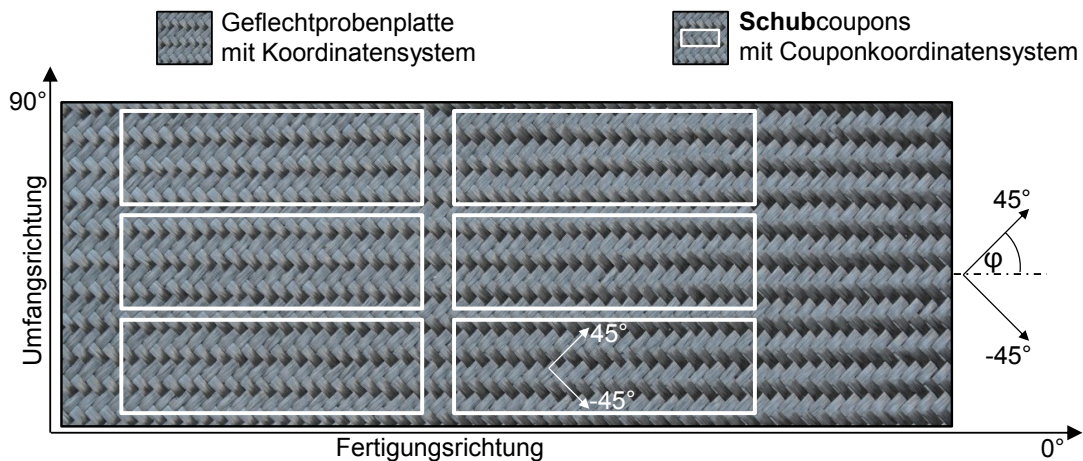


Abb. 6-8: Geflechtprobenplatte für die Herstellung von Schubcoupons mit eingezeichnetem Probepplatten- und Couponkoordinatensystem

Die Garnlücken wurden händisch in fehlerfreie Geflechte eingebracht. Dies gibt die Möglichkeit den Fehler kontrolliert und an einer bestimmten Position einzubringen. Die entsprechenden Garne wurden mit Hilfe einer Pinzette senkrecht zu ihrer Längsausrichtung verschoben. Um die Vorgabe zu erfüllen, dass alle Garnlücken einer Probe übereinander liegen, mussten die Garne stets in die gleiche Richtung verschoben werden. Innerhalb einer Couponkonfiguration blieb diese Richtung gleich. Da das Garn keine feste Struktur besitzt, wird beim Verschieben des Garns die Garnbreite kleiner und dadurch die Garndicke größer. Diese Dickenunterschiede im trockenen Geflecht spiegeln sich ebenso im Geflechtverbund wieder (siehe Abschnitt 6.3.3 mit Abb. 6-15).

Die Garnlückenbreite wurde mittels eines optischen Sensors (F-Scan-Sensor der Fa. Profactor GmbH) überprüft. Abb. 6-9 zeigt eine Geflechtlage einer Probenplatte für Zugcoupons (Zug-Lücke 0°). Daneben befindet sich eine Aufnahme mit einer höheren Auflösung, die der F-Scan-Sensor ausgibt. Die Zug-Lücke 0°-Coupons besitzen eine freie Länge von 100 mm, was mit zwei Sensoraufnahmen überprüft werden konnte. Entsprechend war bei einer Lücke 90°-Couponkonfiguration eine Sensoraufnahme ausreichend, um die gesamte Garnlücke zu kontrollieren – die Couponbreite beträgt 40 mm. Pro Sensoraufnahme wurde die Lücke an drei Stellen vermessen.

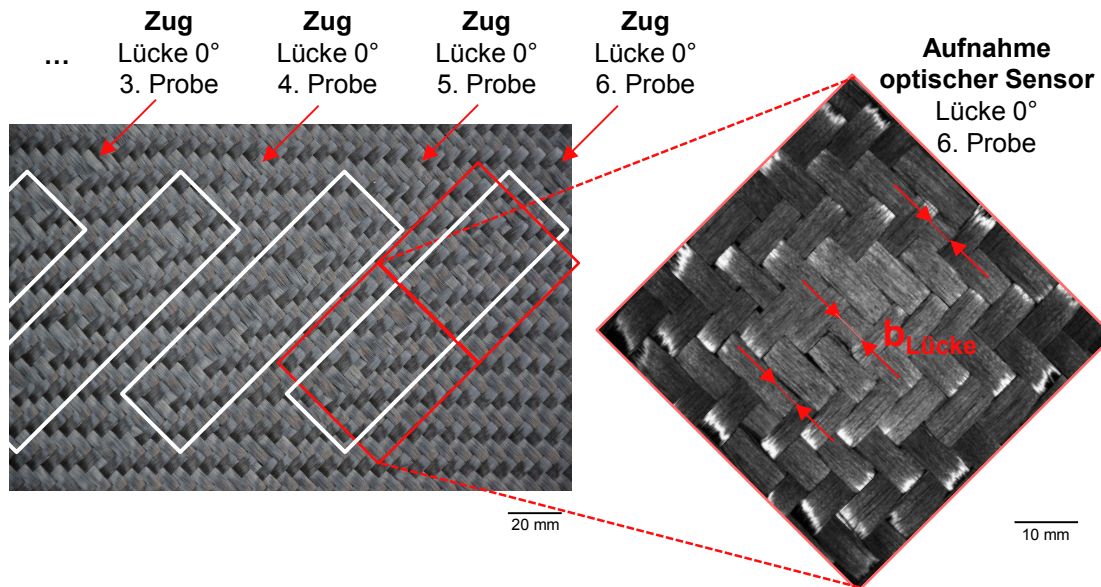


Abb. 6-9: Überprüfung der Garnlückenbreite einer Zug-Lücke 0°-Konfiguration

Um die Veränderung der Lückenbreite und -position während der Preformhandhabung zu verhindern, wurden die Geflechtpreforms stabilisiert. Zu diesem Zweck wurde zwischen jeder Geflechtlage jeweils eine Lage thermoplastisches Bindervlies (Spunfab 1300 Flächengewicht=12 g/m²) eingelegt [75]. Zur gleichmäßigen Kompaktierung der Preforms wurde die Binderaktivierung in einem Vakuumaufbau durchgeführt. Dabei wurde eine Aktivierungstemperatur von 150°C für 20 min gehalten. Zur Überwachung der Aktivierungstemperatur wurde je Preform ein Thermoelement verwendet. Die Preforms für die VAP- und die RTM-Coupons verfügten über die gleiche Menge Binder. Ebenso wurde die gleiche Art und Menge Binder bei den Referenzcoupons (VAP und RTM) verwendet.

6.3.2 LCM-Prozesse

Alle LCM-Prozesse wurden mit HexFlow® RTM 6 (Fa. Hexcel) durchgeführt. Die Infiltrations- und Aushärteparameter wurden gemäß der Vorgaben des Aushärtezyklus N°1 (Aushärtetemperatur 180°C; Aushärtezeit 2 h) des Datenblatts durchgeführt [76]. Eine Übersicht der LCM-Prozessdaten ist Tab. A-18 zu entnehmen.

6.3.2.1 RTM

Das verwendete RTM-Werkzeug ist zweiteilig. In der unteren Werkzeughälfte befindet sich die Kavität, wobei die obere Werkzeughälfte plan ist. Die Kavität besitzt folgende Abmaße: 500 mm x 250 mm x 4,1 mm. Der Harzan- und abguss sind linienförmig, um ein besseres Tränkungsergebnis zu erhalten und befinden sich an der schmalen Werkzeughälfte. Mit den in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen Flechtparametern war eine maximale Geflechtbreite von 65π mm (ca. 204 mm) möglich. Da das hergestellte Geflecht somit schmaler als die Kavität war, wurden Einleger angefertigt, die das Umspülen und die Verschiebung der Preform während des RTM-Prozesses verhinderten (Abb. 6-10).

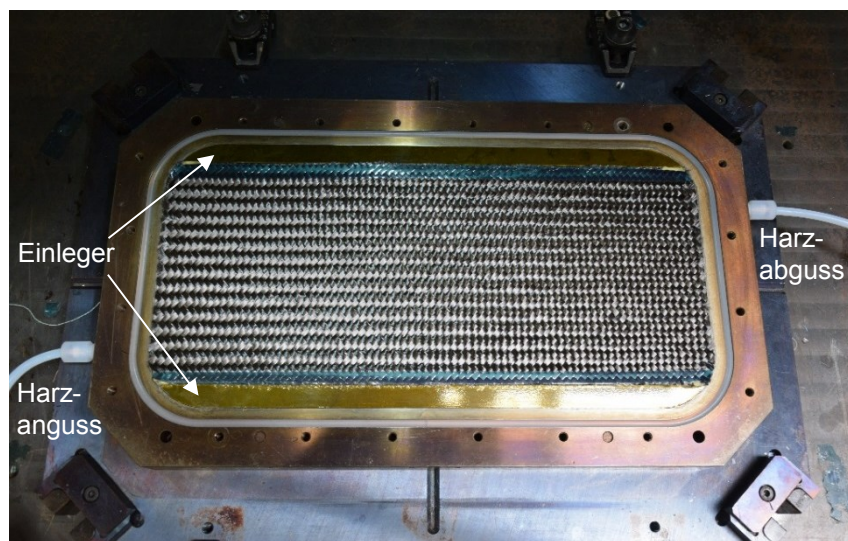


Abb. 6-10: Untere Werkzeughälfte des RTM-Plattenwerkzeugs mit lückenfreier Preform und Einlegern

Die stabilisierte Preform wurde mit Hilfe eines Stanzeisens besäemt, um die Kavität passgenau auszufüllen. Dies soll mögliches Racetracking [77] (voreilende Harzfront am Rand der Kavität) unterbinden. Nach dem Einlegen der Preform und dem Schließen beider Werkzeughälften durch eine hydraulische Presse wurde der Injektionsprozess durchgeführt. Der exakte Ablauf der RTM-Infusion und die Prozessparameter sind dem Anhang zu entnehmen. Es wurde jeweils ein Thermoelement an jeder Werkzeughälfte angebracht.

6.3.2.2 VAP

Abb. 6-11 zeigt drei evakuierte VAP-Aufbauten auf einer ebenen Glasplatte. Meist wurden mehrere Preforms gleichzeitig infiltriert. In diesem Fall sind die VAP-Zugcoupons (Lücke 90°, Referenz, Lücke 0°) dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Vertiefungen der Vakuumfolie bzw. des Saugvlieses an den Positionen der Garnlücken. Zur Temperaturüberwachung wurde pro Preform ein Thermoelement verwendet.

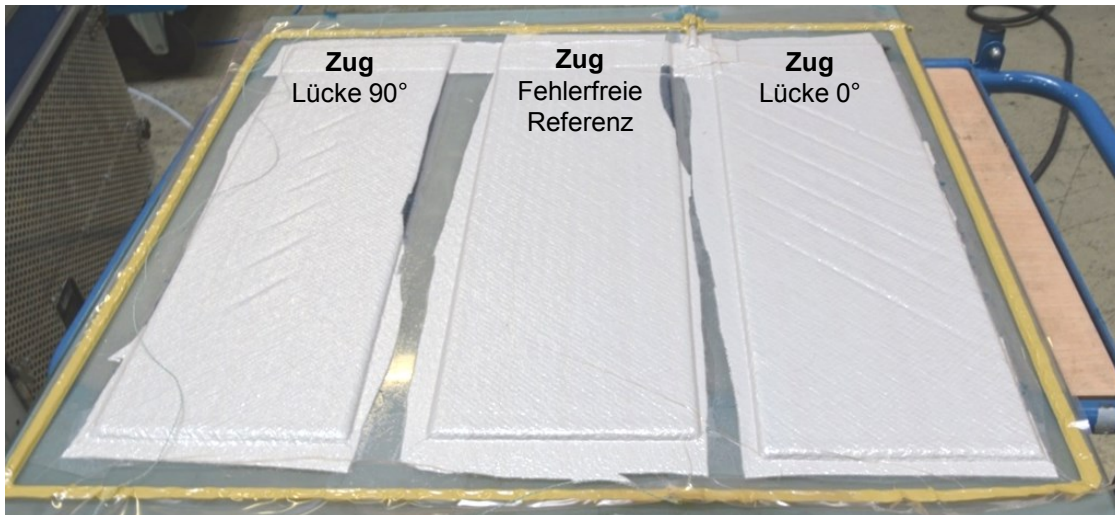


Abb. 6-11: VAP-Aufbauten der Zugprüfkörperkonfigurationen (Lücke 90°, Referenz, Lücke 0°)

6.3.3 Untersuchung der Garnstruktur und des Faservolumengehalts

Nach der Fertigung der VAP- und RTM-Coupons wurden Schliffproben hergestellt und unter einem Stereo-Mikroskop (Olympus SZX10) untersucht. Die Schliffe wurden entlang des 0°-Garns angefertigt. Zusätzlich dazu wurden die Faservolumengehalte aller Prüfkörper auf Basis der Prüfkörperwandstärken und der Grammaturn des Geflechts berechnet. Hierzu wurden sowohl Referenzproben als auch lückenbehaftete Proben (Messung im lückenfreien Bereich) vermessen – insgesamt 96 Coupons.

6.3.3.1 Referenzcoupons

In Abb. 6-12 sind die Schliffproben der Referenzcoupons dargestellt. Die RTM-Probe zeigt eine ausgeprägtere Ondulation des 0°-Garns als die VAP-Probe, obwohl beide Konfigurationen auf den gleichen Preforms basieren, die den gleichen Preformingprozess durchlaufen haben. Verantwortlich für den Unterschied in der Garnondulation ist der Kompaktierungsdruck der LCM-Prozesse und die Interaktion zwischen Preform und RTM-Werkzeug. Die VAP-Infusion wird mit einem Kompaktierungsdruck von ca. 1 bar durchgeführt. Aufgrund der transversalen Krafteinwirkung setzen sich sowohl die Garne als auch die gesamte Preform. Die Längen- und Breitenzunahme (Dehnung) der Preform wird in diesem Fall nicht behindert³. Im RTM-Prozess wird die Preform mit umgerechnet 60 bar kompaktiert, was zu einer ausgeprägteren Preformdehnung führt als beim VAP-Prozess. Aufgrund des begrenzten Kavitätsumfanges wird die Preformdehnung behindert. Dies führt wiederum zu einer Stauchung der Preform in der Ebene und in dessen Folge zu einem ausgeprägten Nestingverhalten. Beides resultiert

³ Ein Setzen der Geflechtlagen ist trotz der Verwendung eines Binders möglich. Die Aushärtung der RTM 6-Matrix geschieht bei 180°C, was oberhalb der Binderschmelztemperatur (135°C) liegt.

schließlich bei den RTM-Coupons in einer stärkeren Ondulation als im Fall der VAP-Proben.

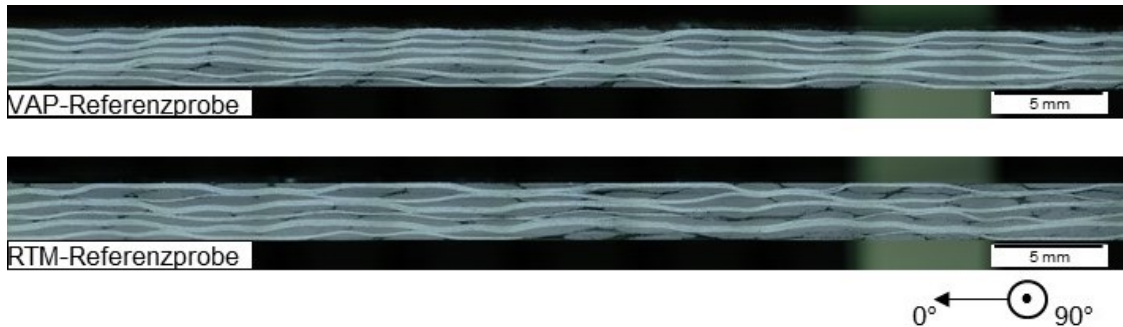


Abb. 6-12: Mikroskopbilder lückenfreier Referenzproben hergestellt mittels VAP- und RTM-Verfahren

Die Prüfkörper, die mittels des RTM-Verfahrens hergestellt wurden, besitzen aufgrund des höheren Kompaktierungsdrucks eine geringere durchschnittliche Wandstärke als die VAP-Proben. Da die VAP und RTM-Coupons auf Basis der gleichen Preforms (gleiche Grammat) hergestellt wurden, ist ebenso der Faservolumengehalt der RTM-Proben im Vergleich zu den VAP-Proben höher. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Saunders et al [66, 67]. Die Ergebnisse der Wandstärkenmessung und der darauf basierenden Faservolumengehaltsberechnung sind in Abb. 6-13 und Abb. 6-14 dargestellt.

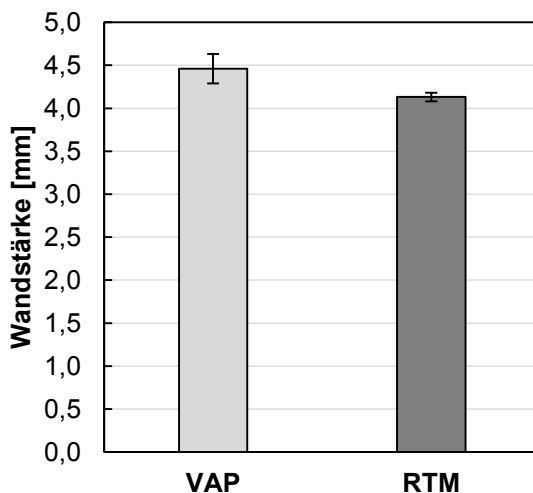


Abb. 6-13: Wandstärken der hergestellten VAP- und RTM-Probenplatten

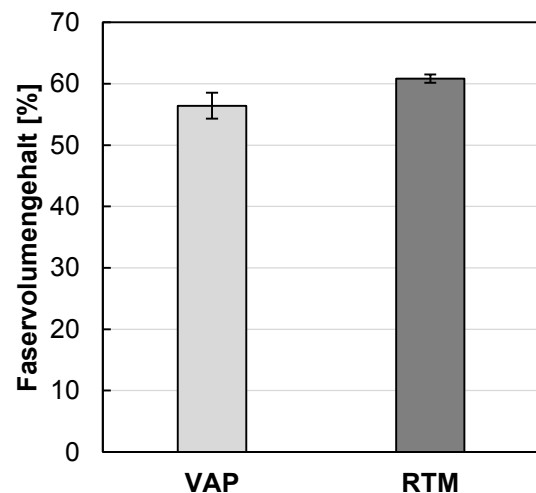


Abb. 6-14: Faservolumengehalte der hergestellten VAP- und RTM-Probenplatten

Die VAP-Prüfkörper besitzen durchschnittlich eine Wandstärke von 4,5 mm, was einen Faservolumengehalt von 56 % ergibt. Die Wandstärke der RTM-Proben besitzen dagegen einen Durchschnittswert von 4,1 mm und somit einen Faservolumengehalt von 61 %. Die Unebenheit des Warenbilds des Geflechts überträgt sich über den flexiblen

Folienaufbau auf den Verbund, weswegen höhere Standardabweichungen der Wandstärken und des Faservolumengehalts zu verzeichnen sind. Die ebenen Oberflächen der RTM-Coupons führen im Gegensatz dazu zu geringen Streuungen in beiden Werten.

6.3.3.2 Lückenbehaftete Coupons

Abb. 6-15 zeigt Mikroskopaufnahmen einer VAP- und RTM-Lücke 90°-Probe. Die Aufnahmen wurden entlang des 0°-Garns angefertigt. Der lückenbehaftete VAP-Coupon unterscheidet sich deutlich von der Referenzprobe. An der Position der Garnlücke ist die Wandstärke reduziert und der Garnverlauf deutlich onduliert. Das verschobene 90°-Garn führt dazu, dass die 0°-Garne eine Strecke von 4 mm ungestützt verlaufen. In Folge der Druckbeaufschlagung und der Flexibilität des VAP-Folienaufbaus werden die 0°-Garne gebogen und in die darunterliegende Garnlage gedrückt (Nesting). Ähnliche Beobachtungen stellten bereits Yousaf et al. [65] fest. Dabei zeigen die oberen Lagen einen deutlicheren Nestingeffekt als die unteren, welche direkt auf dem ebenen Werkzeug aufliegen. Die lückenhaften RTM-Proben zeigen dagegen an der Garnlückenposition keine Wandstärkenreduktion, sondern eine Änderung des Faservolumengehalts. Das RTM-Werkzeug ist für die Herstellung von ebenen Platten mit konstanter Wandstärke ausgelegt. Die zwei steifen Hälften sind nicht in der Lage die 0°-Garne in die Garnlücke zu drücken, weswegen an dieser Position der Faservolumengehalt reduziert wird. Es wird ein Faservolumengehalt von 30 % angenommen (lokale Reduktion des Garnvolumens um 50 %). Die 0°-Garne erfahren keine Änderung der Garnondulation. Aufgrund des Harzüberschusses wird allerdings ein lokales Aufschwimmen der Garne festgestellt.

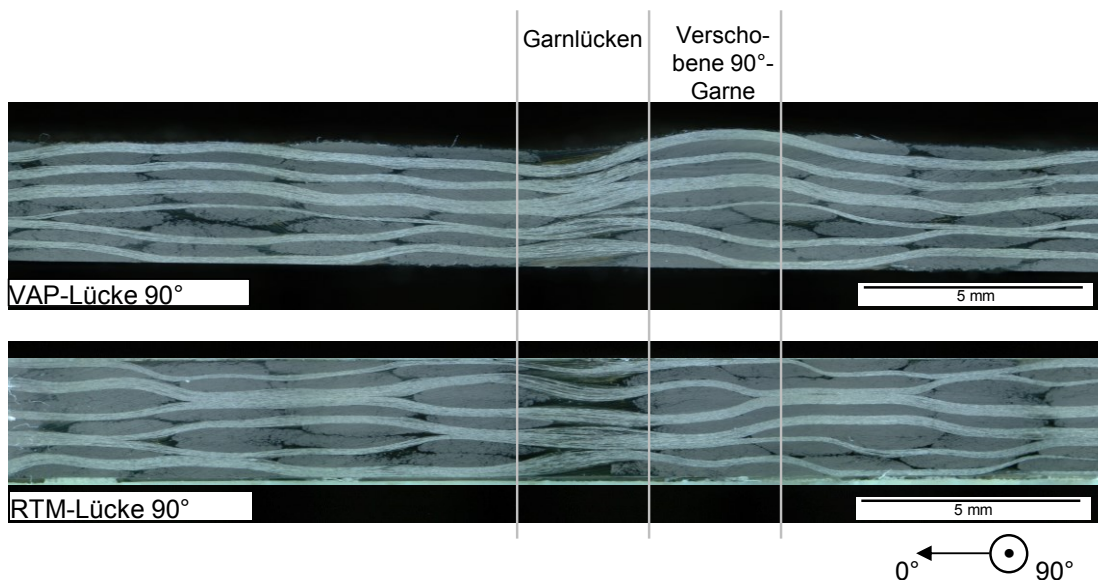


Abb. 6-15: Mikroskopaufnahmen lückenbehafteter Coupons hergestellt mittels VAP- und RTM-Verfahren

6.3.4 Endbearbeitung der Prüfkörper

Nach Beendigung der LCM-Prozesse wurden die Coupons grob mit einer wassergekühlten Diamantsäge aus den Geflechtprobeplatten entnommen. Nach diesem Zuschnitt wurden glasfaserverstärkte Krafteinleitungselemente (Aufleimer) beidseitig (mit einer Dicke von jeweils 1,8 mm) aufgebracht. Als Klebstoff wurde UHU Plus Endfest 300 verwendet. Dieser wurde für 2 h bei 70°C in einem Klebewerkzeug ausgehärtet. Abb. 6-16 zeigt sechs Grobzuschnitte einer 0°-Lückenkonfiguration mit aufgelegten Aufleimern.

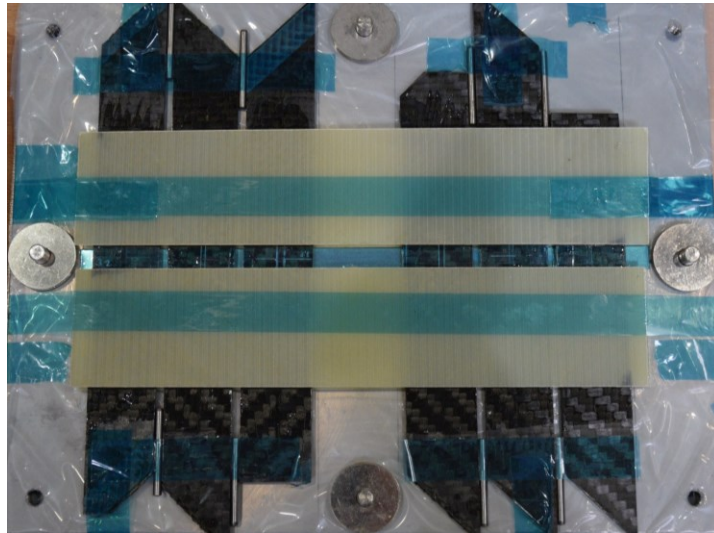


Abb. 6-16: Druck-Lücke 0°-Prüfkörper im Klebewerkzeug

Nach der Klebstoffaushärtung wurden die Prüfkörper auf Endmaß entsprechend der Couponlängen und -breiten in Abb. 6-6 zugeschnitten.

6.4 Mechanische Prüfung und Diskussion der Ergebnisse

Die Zug- und Schubversuche wurden an einer Prüfmaschine (UPM 250) der Fa. Hege-
wald & Peschke durchgeführt. Die Druckprüfungen erfolgten an einer UPM 100 des
gleichen Herstellers. Die Resultate der faserdominierten Versuche (Zug- und Druck)
wurden auf einen FVG von 61 % normiert, da die RTM-Proben diesen FVG besitzen.
Die in den Abbildungen dargestellten Spannungen beziehen sich stets auf die Proben-
wandstärke des ungestörten Couponbereichs (außerhalb der Garnlücke). Die Dehnun-
gen während der Zug- und Schubversuche wurden mit Hilfe der DIC (digital image
correlation)-Methode bestimmt. Gegenüber Dehnmessstreifen (DMS) bietet diese Me-
thode den Vorteil ein Dehnungsfeld über die gesamte freie Länge des Prüfkörpers auf-
zunehmen. Zu diesem Zweck wurde der Messaufbau Aramis 4M der Fa. GOM GmbH
verwendet. Eine Bildrate von maximal $2 \frac{\text{Bilder}}{\text{s}}$ liegt den Messungen zu Grunde. Bei

der Druckprüfung wurden die Dehnungen nur mit Hilfe von DMS aufgenommen. Aufgrund des begrenzten Raums zwischen den Einspannungen war ein Aufbau des Aramissystems nicht möglich. Es wurden sechs Prüfkörper pro Konfiguration geprüft.

6.4.1 Generischer Extremfall

6.4.1.1 Zugversuche

Abb. 6-17 und Abb. 6-18 zeigen die Zugfestigkeit und Bruchdehnungen der fehlerfreien Referenz, der Lücke 0°- und Lücke 90°-Konfiguration. Die hellen und dunklen Balkenschattierungen repräsentieren die VAP- und RTM-Proben.

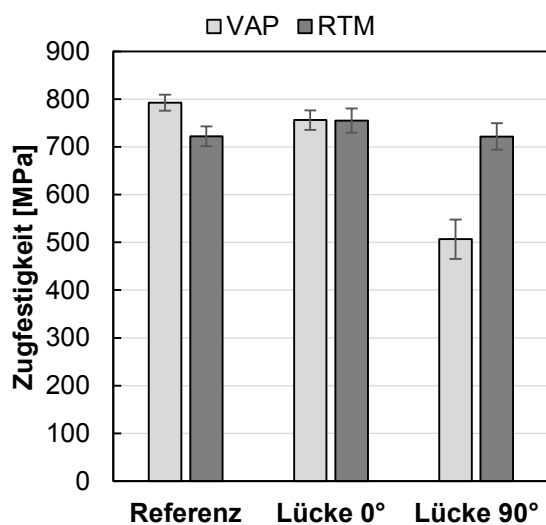


Abb. 6-17: Zugfestigkeit der geprüften VAP- und RTM-Zugproben

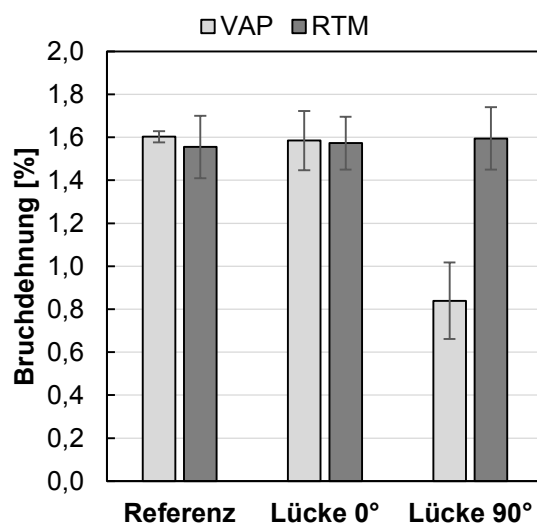


Abb. 6-18: Bruchdehnung der geprüften VAP- und RTM-Zugproben

Den deutlichsten Effekt auf die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung ist bei der VAP-Lücke 90°-Reihe zu erkennen. Die Zugfestigkeit sinkt hier um 36 % und die Bruchdehnungen um 48 % verglichen mit der fehlerfreien VAP-Referenz. Hier spielen zwei Einflussgrößen eine entscheidende Rolle, die bereits in den Mikroskopaufnahmen in Abschnitt 6.3.3 zu erkennen waren. Durch die Garnlücke in 90° erfahren die 0°-Garne eine lokale Ondulationszunahme, was ein vorzeitiges Erstversagen und somit zur Reduktion von Zugfestigkeit und Bruchdehnung führt. Diesen Effekt stellten bereits Bloom et al. [36] auf Basis kontrolliert-ondulierter Gewebelamine fest. Des Weiteren erzeugen die übereinander angeordneten Garnlücken eine Wandstärkenreduktion, die unter Zuglast zu einer Spannungslokalisierung führt.

Die VAP-Lücke 0°-Couponkonfiguration zeigt keine signifikante Reduktion der Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Die 0°-Garne besitzen im Vergleich zur fehlerfreien Referenz keine zusätzliche Ondulation. Die Garnlücke in 0°-Richtung wird durch die Verschiebung der 0°-Garne in 90°-Richtung ermöglicht (siehe Abb. 6-6). Aus diesem Grund erfahren die 0°-Garne keine Ondulationszunahme und auch die Anzahl der un-

ter Last stehenden Garne bleibt unverändert. Die Couponbreite wurde mit 40 mm so groß gewählt, dass eine Verschiebung eines 0°-Garns um 4 mm (in der Couponmitte) zu keiner geringeren Anzahl an 0°-Garnen im Coupon führt.

Bei den RTM-Proben lässt sich in keiner der Couponkonfigurationen eine Reduktion der Zugfestigkeit oder der Bruchdehnung feststellen. Bereits in Abschnitt 6.3.3 wurde erläutert, dass aufgrund der konstanten Kavitätstiefe eine konstante Couponwandstärke entsteht. Aufgrund dieser Gegebenheit wird eine lokale Garnondulation aufgrund einer Wandstärkenreduktion vermieden. Dem RTM-Werkzeug fehlt die Flexibilität, um Garne in die Garnlücken einzudrücken. Diese Ergebnisse stimmen gut mit den Erkenntnissen, die bereits Lan et al. gewonnen haben, überein [43]. Lan et al. konnten ebenso eine Wandstärkenreduktion bei einem lückenhaften AFP-Laminat verhindern. Durch die Verwendung eines Druckblechs, das auf den Lücken positioniert wurde, konnte ein Eindringen des Vakuumaufbaus vermieden werden. Diese Probenkonfiguration zeigte keine geringeren Zugkennwerte als die fehlerfreie Referenz.

In Abb. 6-19 sind die Steifigkeitskennwerte aller Zugproben aufgetragen. Trotz Garnlücken in 0°- und 90°-Richtung wird kein Abfall des Steifigkeitsmoduls im Vergleich zur fehlerfreien Referenz festgestellt. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Bloom et al., die lokal ondulierte Glasfasergewebelaminat auf Zug geprüft und keine Reduktion der Steifigkeiten festgestellt haben [36].

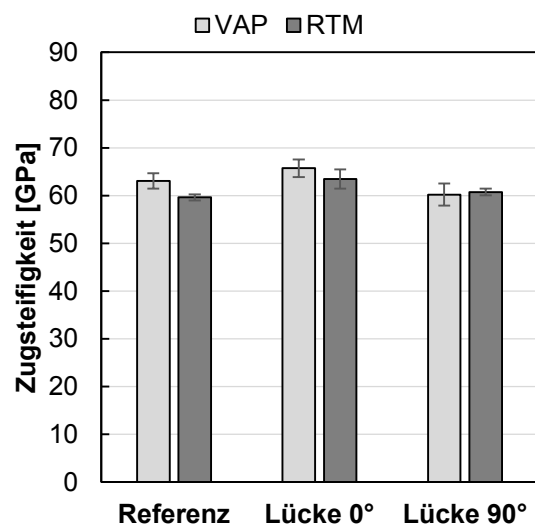


Abb. 6-19: Zugsteifigkeit der geprüften VAP- und RTM-Zugproben

Das nachfolgende Diagramm fasst repräsentative Spannungs-Dehnungs-Kurven aller Konfigurationen der Zugprüflinge zusammen (Abb. 6-20). Alle Graphen zeigen einen Steifigkeitsabfall im Kurvenverlauf, der durch ein Erstversagen der Probe zu begründen ist. Die Couponkonfiguration VAP-Lücke 90° zeigt einen Steifigkeitsabfall bei bereits ca. 0,4 % Dehnung, wobei die restlichen Konfigurationen diesen Punkt bei ca. 0,6 % besitzen. Das frühe Einsetzen des Erstversagens der VAP-Lücke 90°-Proben ist durch die lokale Garnondulationserhöhung begründet, weswegen diese Konfigura-

tion lediglich durchschnittlich eine Bruchdehnung von 0,9 % und eine Zugfestigkeit von 471 MPa besitzt.

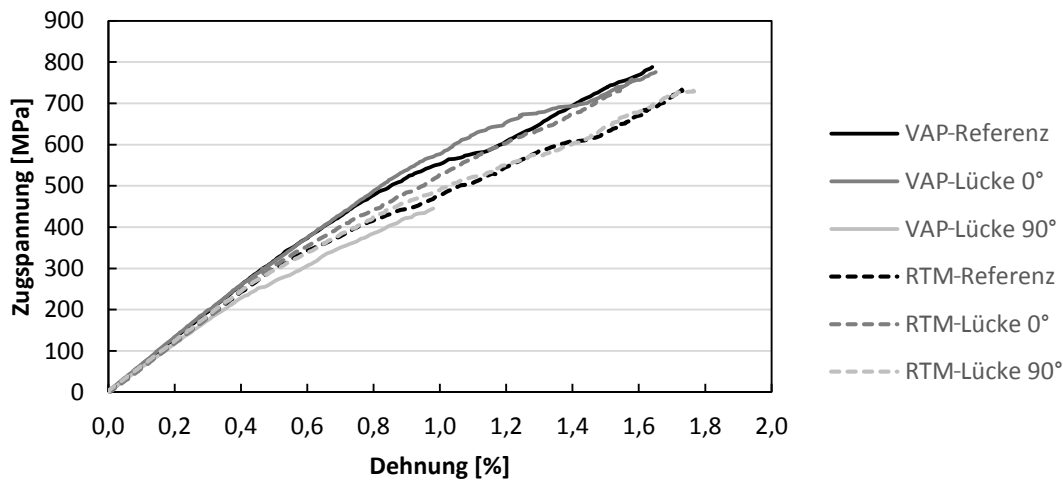


Abb. 6-20: Repräsentative Spannungs-Dehnungs-Kurven aller Konfigurationen der Zugprüfung

Der Steifigkeitsabfall eines Laminats mit unterschiedlich ausgerichteten Verstärkungsgarnen wird nach Ehrenstein als „Knie“ im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bezeichnet [28, p. 136]. Wird ein biaxiales Geflecht längs (in 0°) eines Garnsystems belastet, wird das zweite Garnsystem senkrecht zur Zugrichtung (in 90°) beansprucht. Dieser Spannungszustand führt zu einem Versagen der senkrecht verlaufenden Garne, während die Garne in 0° -Richtung weiterhin Last übertragen. Dennoch schwächen die Querrisse das Laminat, was die Gesamtsteifigkeit abfallen lässt. Verfügt das Laminat aufgrund von Garnlücken über eine lokale Ondulationszunahme der 0° -Garne, wird dieses Garnsystem zusätzlich geschwächt. Dadurch sind die Bruchbilder zweier repräsentativer Proben in Abb. 6-21 und Abb. 6-22 zu erklären. Die Referenzprobe zeigt ausgeprägte Delaminationen, wobei der VAP-Lücke 90° -Coupon lokal an der Position der Garnlücke versagt.

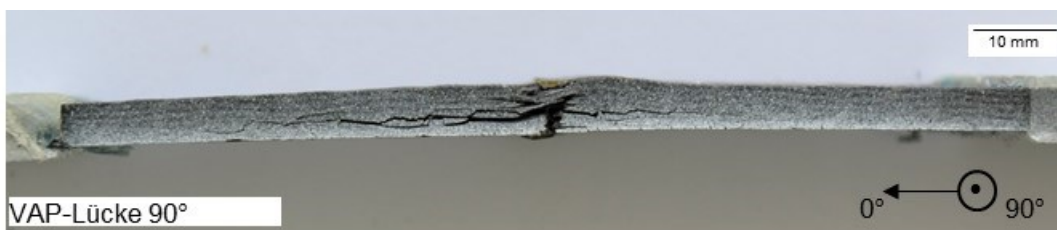


Abb. 6-21: Bruchbild einer VAP-Lücke 90° -Zugprobe

Die Bruchflächen der VAP-Lücke 0° -Zugproben zeigen keine Unterschiede zu den Bruchflächen der Referenzprüfkörper, was die mechanischen Kennwerte bestätigt. Ein repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 0° -Zugprobe ist im Anhang (Abb. A-2) zu finden.

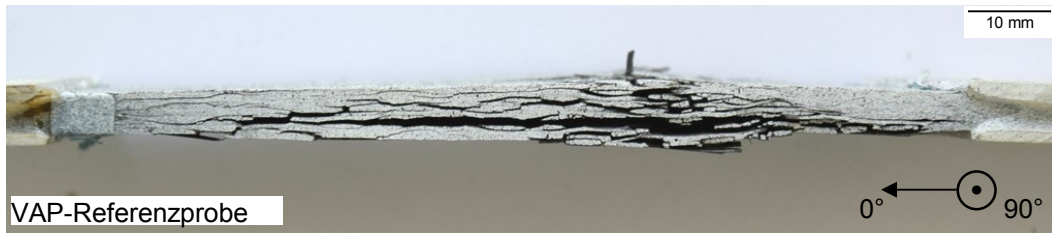


Abb. 6-22: Bruchbild einer VAP-Referenzzugprobe

Die fehlerfreien Referenzkonfigurationen (RTM, VAP) unterscheiden sich sowohl in der Zugfestigkeit als auch in der Zugsteifigkeit. Bereits in 6.3.3 wurde auf die Unterschiede in der Garnondulation beider Couponkonfigurationen eingegangen. Diese Änderungen in der Garnstruktur haben Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften des Verbunds. Die stärker ausgeprägte Garnondulation der RTM-Proben, bedingt durch den LCM-Prozess, verursacht eine Minderung der Zugfestigkeit um ca. 8,9 % und der Zugsteifigkeit um 5,5 % im Vergleich zu den VAP-Coupons.

Über die DIC-Methode war es möglich das Dehnungsfeld der Prüfkörper während der Zugversuche aufzuzeichnen. In Abb. 6-23 ist das Feld der x-Dehnung der VAP-Referenzprobe kurz vor dem Versagen dargestellt. Das Feld misst 40 mm auf 40 mm und befindet sich im Zentrum der freien Weglänge der Coupons. Die x-Koordinate des DIC-Koordinatensystems verläuft in 0°Richtung des Couponkoordinatensystems und die y-Koordinate entspricht der 90°-Richtung. Die Zuglast wurde in 0° eingeleitet (dargestellt durch graue Pfeile in Abb. 6-23). Die Farbverteilung im Messfeld entspricht verschiedenen Dehnungen, die der Legende auf der rechten Seite der Abbildung zu entnehmen sind. Zusätzlich ist dort ein Histogramm dargestellt. Das Feld zeigt eine inhomogene Verteilung der x-Dehnung, die auf die textile Struktur des Geflechts zurückzuführen ist. Das diagonal verlaufende Farbmuster im Dehnungsfeld entspricht dem Grat des Geflechts, an dem sich die beiden Garnsysteme kreuzen.

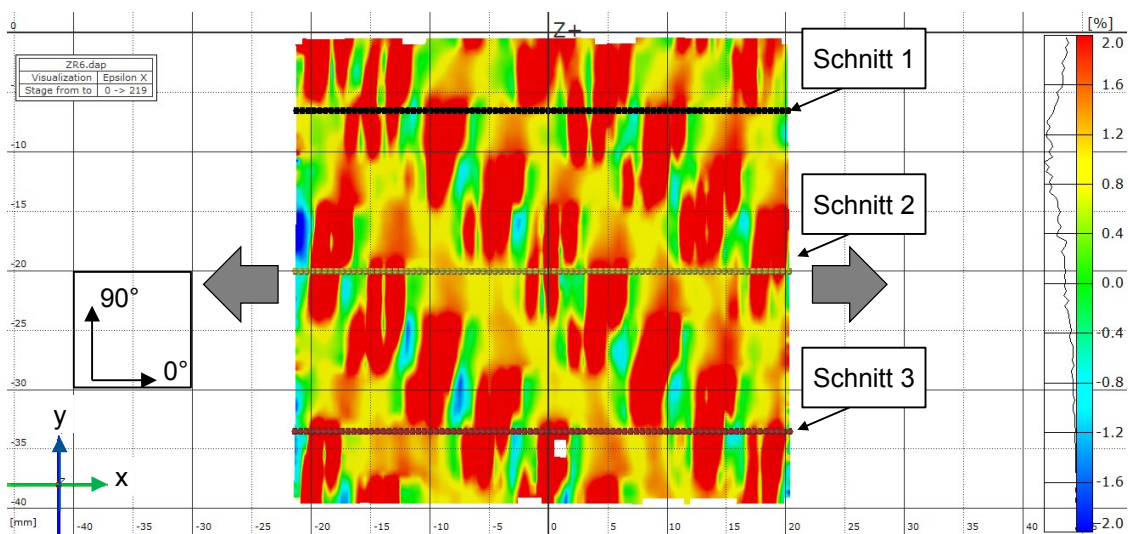


Abb. 6-23: Dehnungsfeld einer VAP-Referenzzugprobe mit drei Schnitten in x-Richtung

Die Dehnung kann über die x-Koordinate (entlang der Schnitte) detailliert ausgegeben werden. Es wurden drei Schnitte an ca. $y=-7$ mm; $y=-20$ mm $y=-33$ mm erzeugt. Der x-Dehnungsverlauf entlang dieser Schnitte ist in Abb. 6-24 dargestellt. Der Verlauf der x-Dehnung schwankt stark aufgrund des textilen Aufbaus in Bereichen von $-1,0$ % (Druck) bis $8,0$ % (Zug). Nur geringe Bereiche des Dehnungsfelds zeigen Stauchungen (neg. Dehnung). Der Großteil zeigt deutlich positive Dehnungen.

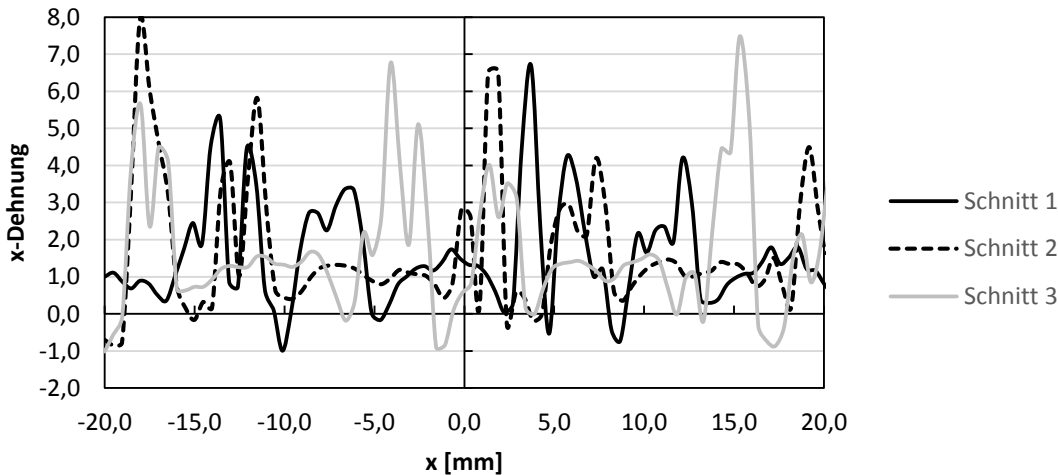


Abb. 6-24: X-Dehnung über die x-Koordinate für Schnitt 1, 2 und 3 einer VAP-Referenzzugprobe

Das Dehnungsfeld bei lückenbehafteten Coupons wurde entsprechend so ausgerichtet, dass die Garnlücke ungefähr mittig bezüglich der x-Koordinate (im Fall von Lücke 90° -Coupons) oder bezüglich der y-Koordinate (bei Lücke 0° -Proben) ausgerichtet war. In Abb. 6-25 ist ein repräsentatives Dehnungsfeld (Dehnung in x-Richtung) einer VAP-Lücke 90° -Zugprobe kurz vor dem Versagen bei einer Dehnung von ca. $1,0$ % zu erkennen. Bei $x=-5$ mm sind einzelne Bereiche weiß dargestellt. Dort konnte das System keine Fassetten erfassen, weil das Bruchbild bereits zu fortgeschritten war und das Sprengelmuster Schaden genommen hatte. Die Garnlücke befindet sich in einem Bereich zwischen $x=-2$ mm und $x=-6$ mm. Um die Garnlücke zu erstellen, wurden die 90° -Garne in negativer x-Richtung verschoben. Aufgrund der starken Garnondulation und Wandstärkenreduktion erfährt das Material einen lokalen Steifigkeitsabfall, der zu erhöhten Dehnungen führt. In der Region der verschobenen 90° -Garne sind vermehrt Bereiche mit negativer Dehnung (Stauchung) zu erkennen. Eine exakte Erklärung konnte hierfür nicht gefunden werden. Wohlmöglich erzeugen Deformationen in Dickenrichtung aufgrund der Streckung der ondulierten Garne lokale Druckspannungen.

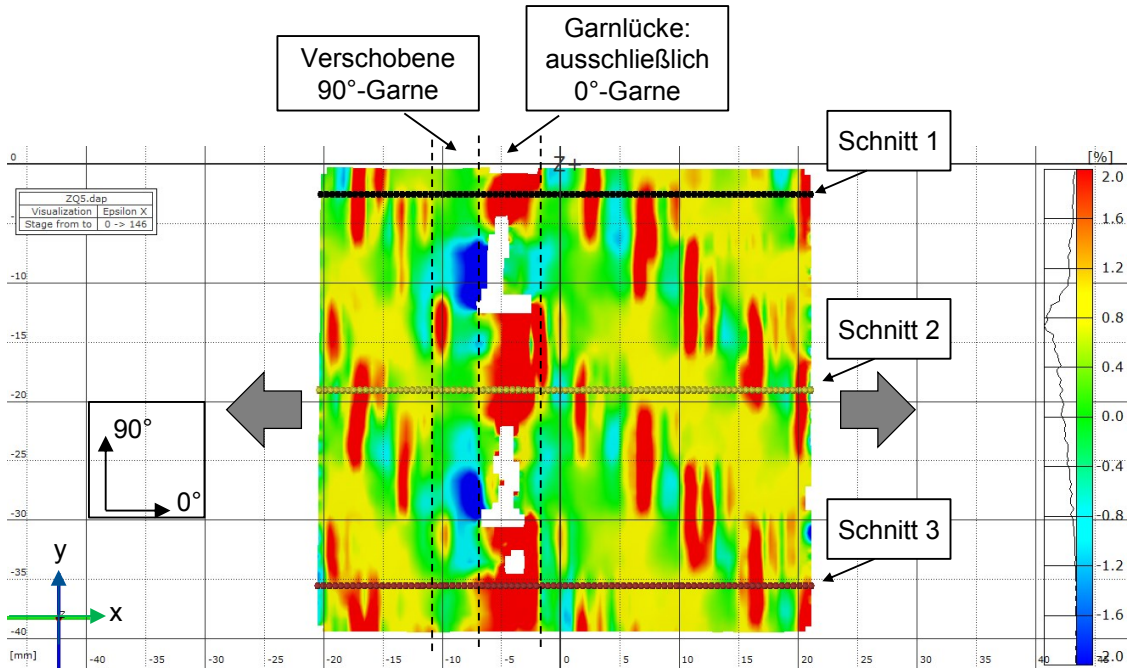


Abb. 6-25: Dehnungsfeld einer VAP-Lücke 90°-Zugprobe mit drei Schnitten in x-Richtung

Es wurden erneut drei Schnitte ($y=-3$ mm; $y=-19$ mm; $y=-36$ mm) in das Dehnungsfeld eingefügt und entlang dieser Schnitte die x-Dehnungen ausgegeben. Es wurden mit Absicht die Bereiche der nicht erkannten Fassetten ausgelassen. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Dehnungen in x-Richtung (0°-Richtung) entlang der x-Koordinate.

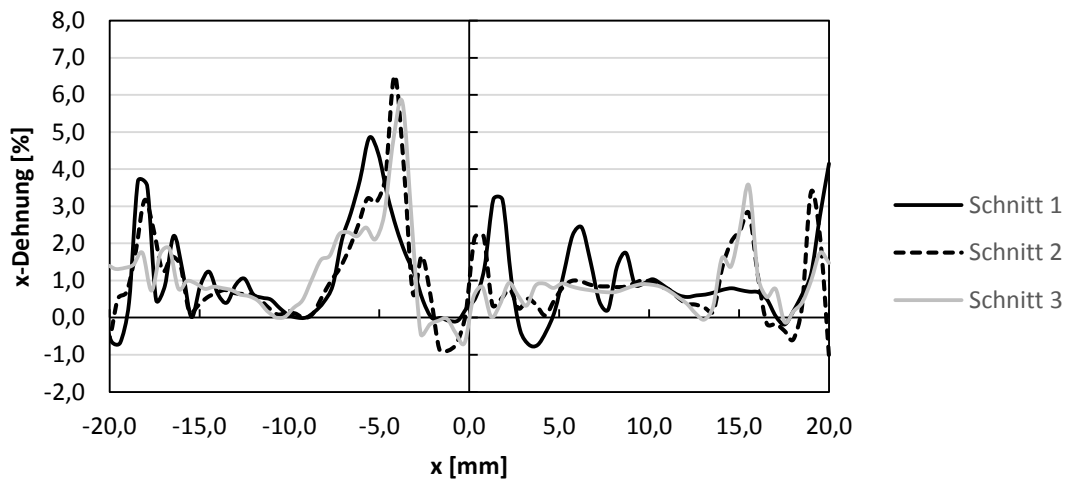


Abb. 6-26: X-Dehnung über die x-Koordinate für Schnitt 1, 2 und 3 einer VAP-Lücke 90°-Zugprobe

Die x-Dehnungen in allen drei Schnitten zeigen ähnliche Verläufe. Die Dehnungswerte schwanken in einem Bereich zwischen $-1,0$ % und $4,0$ % bis auf die Stelle der lokalen Garnlücke. Bei $x=-5,0$ mm erhöhen sich die x-Dehnungen auf Werte zwischen $5,0$ % und $6,5$ %. Folglich versagt die VAP-Lücke 90°-Zugprobe an der Stelle erhöhter Deh-

nung, was auch das Bruchbild bestätigt (Abb. 6-21). Diese Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit denen von Bloom et al. [36]. Sie konnten ebenso mittels der DIC-Methode Dehnungsüberhöhungen an Positionen erhöhter Garnwelligkeit feststellen.

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 6-27) zeigt das Dehnungsfeld eines repräsentativen VAP-Lücke 0°-Zugcoupons. Die Garnlücken verlaufen in einem Bereich von $y=-17$ mm bis $y=-21$ mm und erstrecken sich über die gesamte x -Koordinate des Dehnungsfelds. Die VAP-Lücke 0°-Zugprobe erreicht höhere Dehnungen als die VAP-Lücke 90°-Zugprobe. Dementsprechend zeigt das Dehnungsfeld einer VAP-Lücke 0°-Zugprobe mehr Bereiche mit höheren Dehnungen.

Im Fall der VAP-Lücke 0°-Zugcoupons befinden sich in der Garnlücke ausschließlich 90°-Garne, da die dortigen 0°-Garne in 90°-Richtung bzw. positiver y -Richtung verschoben worden sind (siehe hierzu Abb. 6-27). Das Dehnungsfeld zeigt in der Garnlücke rote Bereiche und in der Region „verschobenen 0°-Garne“ häufiger gelbe Flächen (lokal kleinere Dehnung).

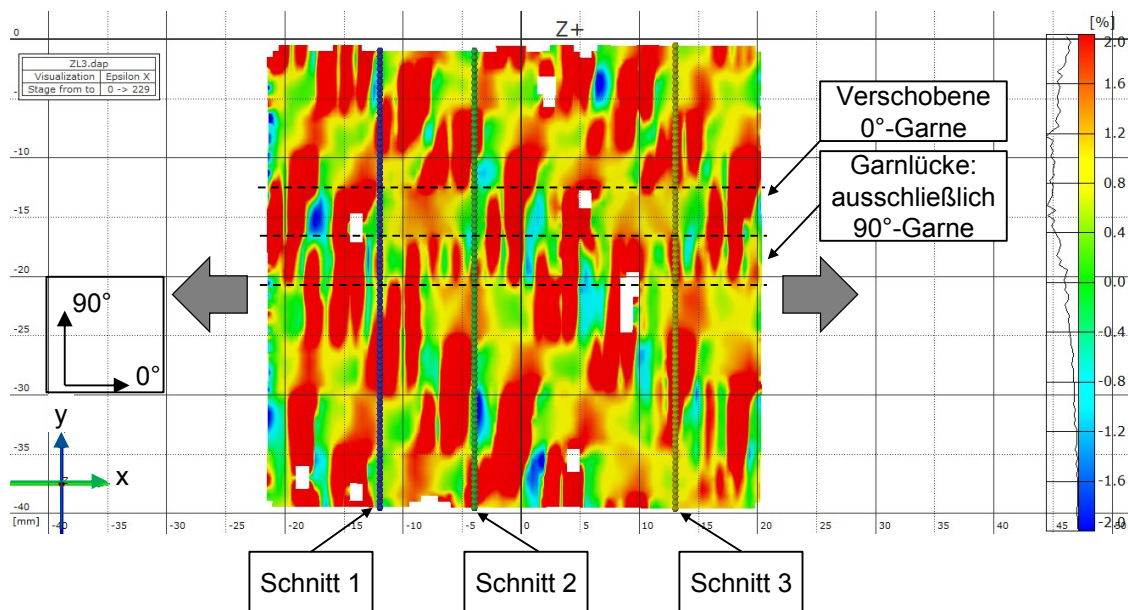


Abb. 6-27: Dehnungsfeld einer VAP-Lücke 0°-Zugprobe mit drei Schnitten in y -Richtung

In Abb. 6-27 sind drei Schnitte zu erkennen, die parallel zur y -Achse an $x=-12$ mm; $x=-4$ mm und $x=13$ mm gesetzt wurden. In Abb. 6-28 sind die x -Dehnung entlang dieser drei Schnitte aufgetragen. In der Region der verschobenen 0°-Garne ($y=-12$ mm bis $y=-17$ mm) sind geringe Dehnungen von maximal 1,0 % zu erkennen. Die 0°-Garne werden in 0°-Richtung belastet, zeigen dadurch lokal höhere Steifigkeiten und geringe Dehnung. Im Bereich der Garnlücke, welche sich von $y=-17$ mm bis $y=-21$ mm erstreckt, wird eine maximale Dehnung von 3 % erreicht. In der Garnlücke werden die 90°-Garne in 0°-Richtung belastet, was einen lokalen Steifigkeitsabfall erzeugt. Allerdings sind die dort erreichten Dehnungen geringer als die Dehnungen in vereinzelt

garnlückenfreien Bereichen. Bei $y=-7$ mm oder $y=-26$ mm werden lokale Dehnungen von 7 % und 6,3 % erreicht. Diese Bereiche hoher Dehnungen initiieren das Versagen des Prüfkörpers und nicht der Bereich der Garnlücke.

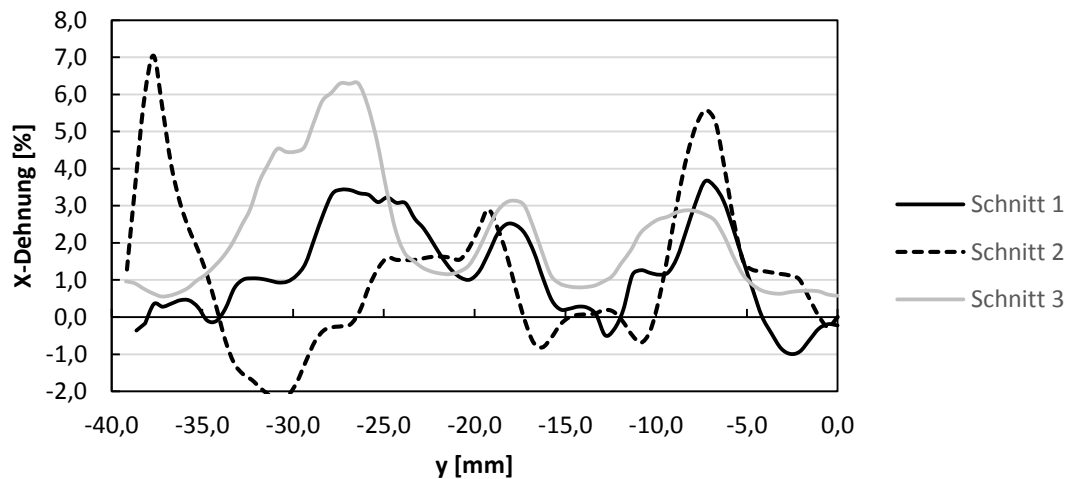


Abb. 6-28: X-Dehnung über die x-Koordinate für Schnitt 1, 2 und 3 einer VAP-Lücke 0°-Zugprobe

Die Dehnungsfelder der RTM-Prüfkonfigurationen sind dem Anhang hinzugefügt (Abb. A-5; Abb. A-7; Abb. A-9). Die Dehnungsfelder der lückenbehafteten RTM-Proben (0° und 90°) zeigen gegenüber der RTM-Referenzprobe keine Unterschiede. Sie ähneln, wie zu erwarten war, den Feldern der VAP-Referenzproben. Es sind erneut geflechttypische heterogene Dehnungsverteilungen zu erkennen, die keine garnlückenbasierte Unregelmäßigkeiten zeigen. Diese Resultate bestätigen die Ergebnisse der mechanischen Prüfung, die sich nicht in den Bruchdehnungen unterschieden.

6.4.1.2 Druckversuche

Ebenso wie im Zugversuch stellen sich die VAP-Lücke 90°-Proben im Druckversuch als kritischste Konfiguration dar. Der Abfall der Druckfestigkeit beträgt ca. 33 % im Vergleich zur fehlerfreien VAP-Referenz (Abb. 6-29). Ausgelöst wird dieser Effekt ebenso wie bei den Zugproben durch die Garnondulationszunahme und die Wandstärkenreduktion an der Stelle der Garnlücke. Diese Ergebnisse stehen in guter Korrelation mit den Ergebnissen anderer Autoren, wie beispielsweise Khan et al. [34].

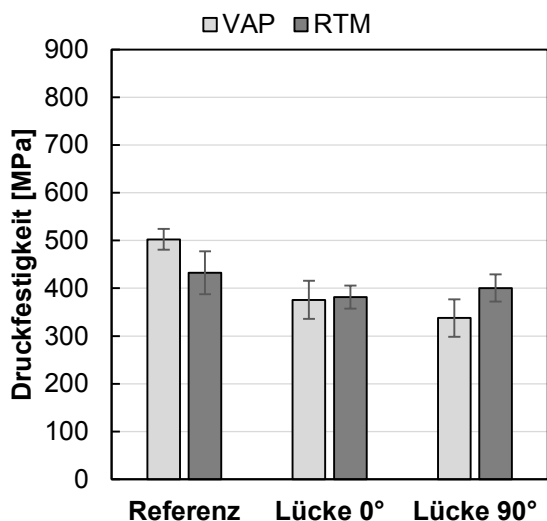


Abb. 6-29: Druckfestigkeit der geprüften VAP- und RTM-Druckproben

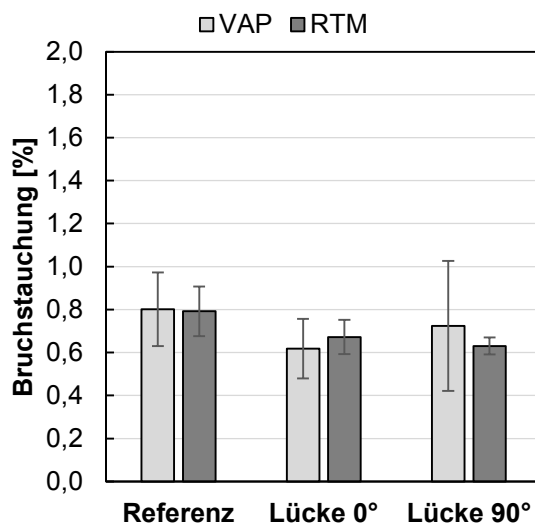


Abb. 6-30: Bruchstauchung der geprüften VAP- und RTM-Druckproben

Die VAP-Lücke 0°-Druckcouponkonfiguration zeigt ebenso eine deutliche Reduktion der Druckfestigkeit von 25 % im Vergleich zur Referenz. Die Garnlücke erzeugt zwar keine weitere Ondulation der 0°-Garne, aber den verschobenen Garnen fehlt der Stützeffekt der umgebenden Garne. Durch diese fehlende Stützwirkung kann die Reduktion der Bruchfestigkeit erklärt werden. Ebenso weisen die Bruchbilder, die sich vom Versagen der Referenzproben unterscheiden und dem der Lücke 90°-Druckproben ähneln, auf eine Änderung der Lastverteilung hin (siehe Abb. 6-35). Im Falle der RTM-Proben sind aufgrund der Streuungen der Druckfestigkeiten nur Tendenzen zu erkennen. Die Druckfestigkeit wird im Durchschnitt um 12 % (Lücke 90°) und um 7 % (Lücke 0°) reduziert. Die Bruchbilder aller Konfigurationen der RTM-Druckproben zeigen besenartiges Versagen (siehe Abb. A-13 bis Abb. A-15)

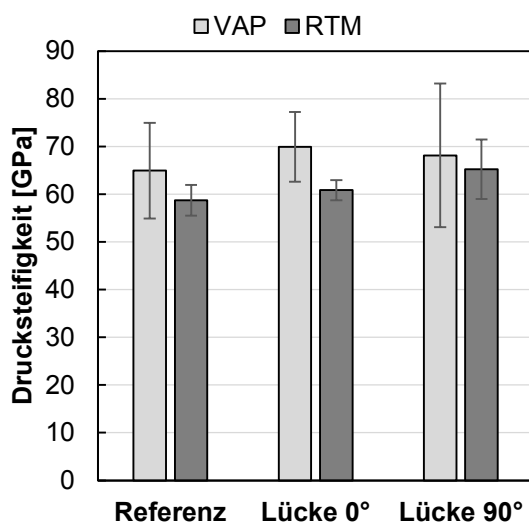


Abb. 6-31: Drucksteifigkeit der geprüften VAP- und RTM-Druckproben

Da zwischen den beiden Hälften der Druckprüfvorrichtung nicht ausreichend Raum zur Installation des DIC-Messaufbaus zur Verfügung stand, wurde die Dehnungsmessung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) durchgeführt. DMS besitzen eine begrenzte Messfläche, was nur eine relativ lokale Dehnungsmessung zulässt. Je nach Position des DMS auf einem groben textilbasierten Verbund, wie einem 24k-Biaxialgeflecht, werden unterschiedliche Dehnungen gemessen. Besitzen die Prüfkörper zusätzliche Inhomogenitäten in Form von lokalen Ondulationen und Wandstärkereduktionen wie im Fall der lückenbehafteten VAP-Prüfkörper, wird die Streuung der Dehnungsmessung größer. Abb. 6-30 zeigt die große Streuung der Bruchstauchungen der VAP-Druckproben. In Konsequenz daraus werden ebenso die Drucksteifigkeiten der VAP-Druckproben mit großen Streuungen erhoben (siehe Abb. 6-31). Abb. 6-32 zeigt daher ausschließlich Druckspannungs-Stauchungs-Kurven der drei verschiedenen RTM-Druckprobenkonfigurationen.

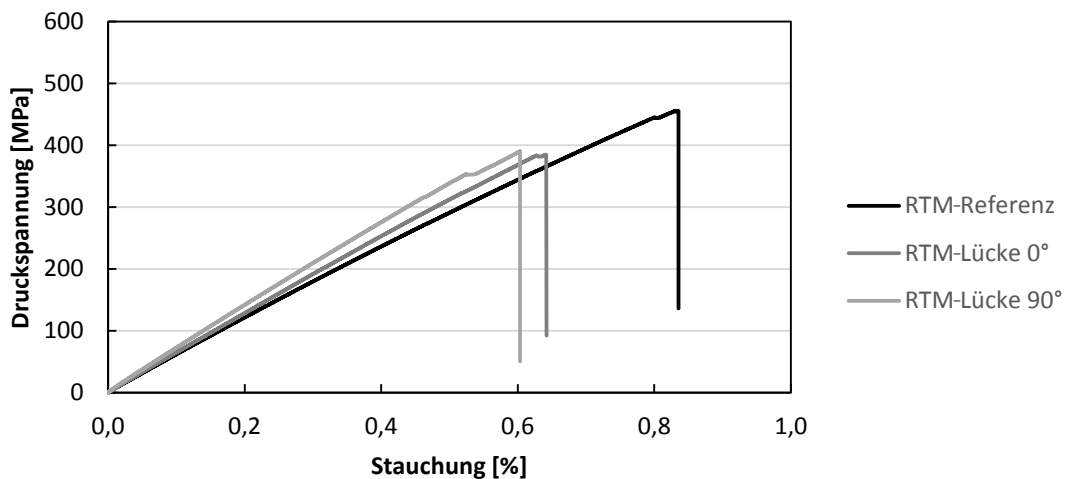


Abb. 6-32: Repräsentative Druckspannungs-Stauchungs-Kurven verschiedener RTM-Druckprobenkonfigurationen

Die Verläufe der Druckspannungs-Stauchungs-Kurven in Abb. 6-32 zeigen eine Unstetigkeit vor dem totalen Versagen der Proben. Dieser Steifigkeitsabfall kann, so wie in den Zugspannungs-Dehnungs-Kurven, einem Erstversagen bzw. einer Versagensinitiierung zugeordnet werden. Ebenso stellten Heieck und Khan Unstetigkeiten im Kurvenverlauf von Druckspannungs-Stauchungs-Kurven fest [26, 34], die sie auf die gleichen Effekte zurückführten.

Die Bruchflächen der verschiedenen Konfigurationen der VAP-Druckproben unterscheiden sich deutlich. Markant ist das Versagen der Lücke 90°-Druckproben in Form eines schrägen Bruchs in Dickenrichtung – des sog. Kink-Band-Bruchs (Abb. 6-33). Diese Art von Versagen konnten bereits Khan et al. feststellen, dabei wird der Bruch an der Stelle der größten Ondulation initiiert bzw. verläuft ebenso durch diese Position [34]. Des Weiteren stellten Hörrmann et al. [37] und Davidson et al. [78] bei großen Ondulationswinkeln ein Prüfkörperversagen in Form eines Kink-Band-Bruchs fest.

Die Drucklast induziert in den ondulierten Garnen eine Biegung um die 90°-Achse, was schließlich zu einem ausgeprägten Dickenriss führt.

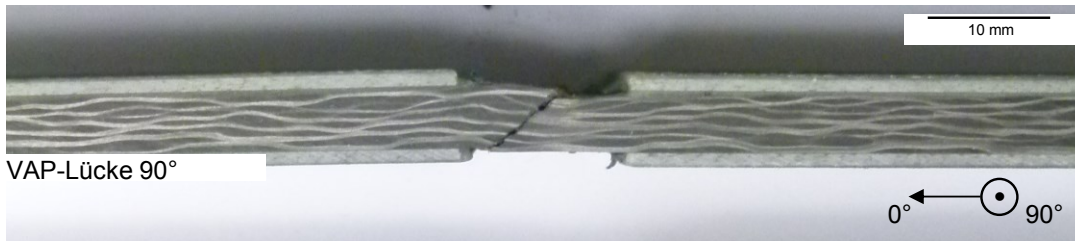


Abb. 6-33: Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Druckprobe

Die Referenzproben zeigen überwiegend ein besenartiges Versagen (Abb. 6-34), was auf die Existenz von interlaminaren Schubspannungen und Normalspannungen in Dickenrichtung schließen lässt. Diese Beobachtungen konnte Altmann [35] ebenso machen.

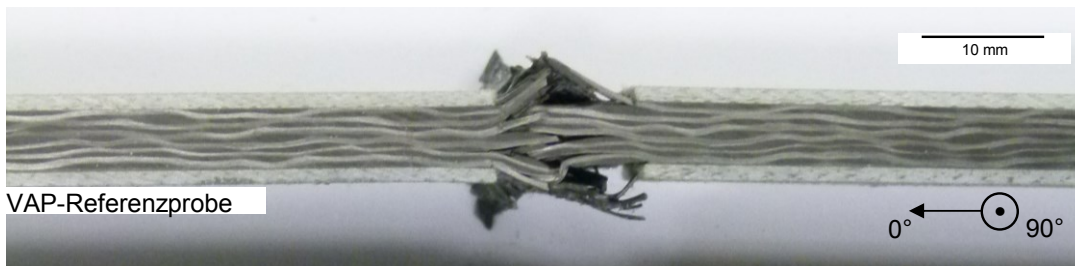


Abb. 6-34: Bruchbild einer VAP-Referenzdruckprobe

Die VAP-Lücke 0°-Proben verfügen über verschiedene Bruchflächen, die sich von einem besenartigen Versagen bis hin zu markanten Rissen eines Kink-Bands erstrecken (Abb. 6-35). Dabei sind beide Versagensfälle im Vergleich zu den anderen Prüfkonfigurationen nicht so stark ausgeprägt. Das interlaminare (besenartige) Versagen ist weniger ausgebildet als bei den Referenzproben. Ebenso verläuft der Garnbruch in einem flacheren Winkel durch die Prüfkörperdicke.

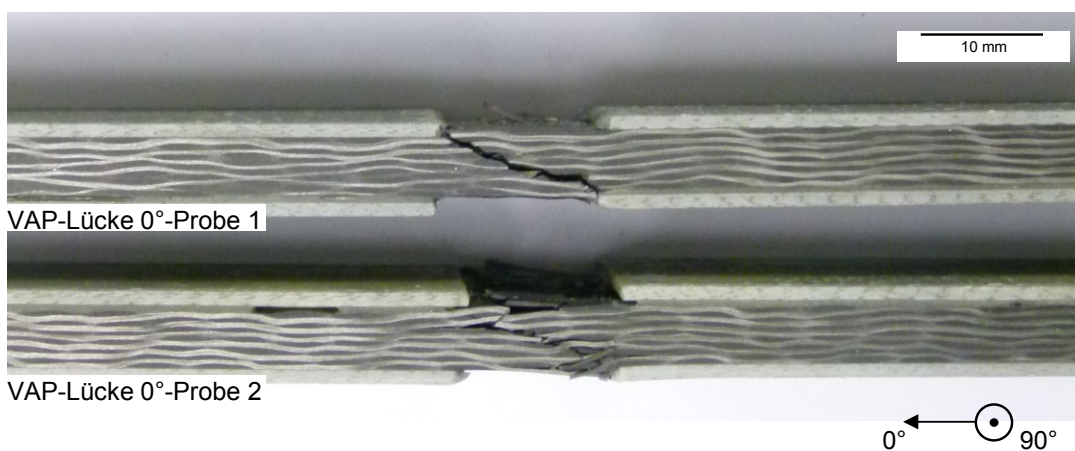


Abb. 6-35: Bruchbilder der Druckprüfkörper: Probe 1 und Probe 2 der VAP-Lücke 0°-Konfiguration

Erneut unterscheiden sich die Druckeigenschaften der RTM- und VAP-Referenzprüfkörper. Die durchschnittliche Druckfestigkeit der RTM-Referenzprüfkörper ist ca. 14 % geringer als die der VAP-Coupons. Wieder ist der Unterschied der Garnondulationen, bedingt durch den Fertigungsprozess, entscheidend.

6.4.1.3 Schubversuche

Wie bereits im Abschnitt Couponkonfigurationen (6.2) beschrieben wurde, enthält die lückenbehaftete Schubprobe ausschließlich Lücken in $+45^\circ$. Abb. 6-36 zeigt die Schubfestigkeiten der Referenz- und lückenbehafteten VAP- und RTM-Schubcouponkonfigurationen.

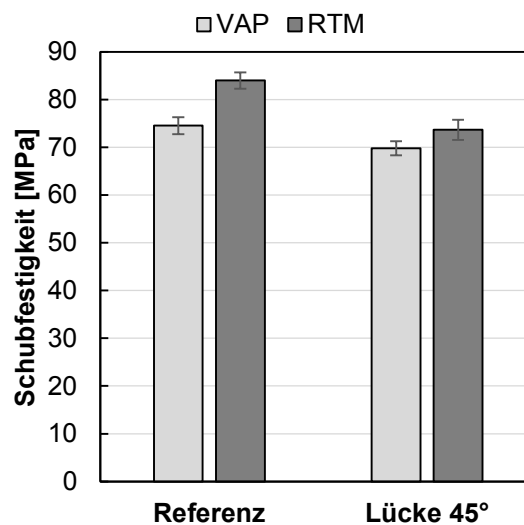


Abb. 6-36: Schubfestigkeiten der geprüften VAP- und RTM-Schubproben

Die garnlückenbehafteten RTM-Schubproben zeigen im Vergleich zur fehlerfreien Referenz einen Schubfestigkeitsabfall von 12 % (Abb. 6-36). Dieser Abfall wird auf das ausgeprägte Reinharzgebiet an der Position der Garnlücke zurückgeführt. Idealerweise liegt in diesem Bereich ein UD-Laminat mit einem Faservolumengehalt von 30 % vor. Indem die Garne in der Garnlücke verschoben wurden, wurde das Flächen-gewicht an dieser Stelle halbiert. Dies und die konstante Couponwandstärke ergeben eine Halbierung des Faservolumengehalts. Da UD-Laminare schlechtere Schubeigen-schaften besitzen als Verbunde aus ondulierten Textilien, sinkt die Schubfestigkeit der lückenbehafteten RTM-Coupons [48]. Die VAP-Konfiguration zeigt dagegen ein we-niger sensibles Verhalten bei Garnlücken. Die betroffenen Prüfkörper zeigen eine Reduktion der Schubfestigkeit von 6 % und der Schubsteifigkeit von 4 % (Abb. 6-37).

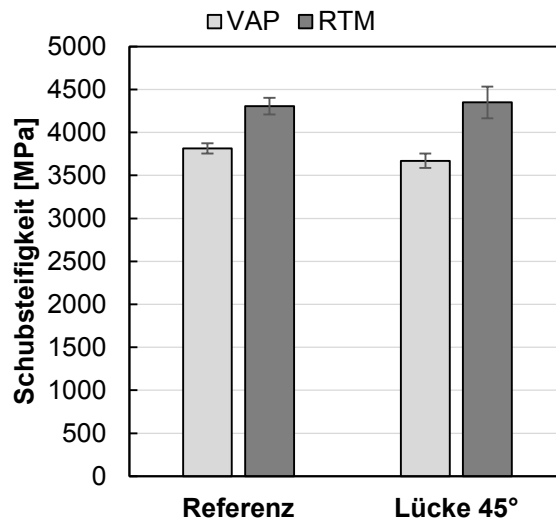


Abb. 6-37: Schubsteifigkeiten der geprüften VAP- und RTM-Schubproben

Erneut wurde ein Unterschied in den mechanischen Eigenschaften zwischen den RTM- und VAP-Referenzproben festgestellt. Die RTM-Proben zeigen sowohl eine 11 % höhere Schubfestigkeiten als auch eine 11 % größere Schubsteifigkeit im Vergleich zur VAP-Referenzkonfiguration. Ebenso wird hier der Unterschied in den Garnondulationen als mögliche Erklärung vermutet. Die RTM-Konfiguration verfügt über stärker ineinander verschränkte Garnlagen, weswegen eine höhere Kraft nötig ist, um das Abgleiten der Garnlagen zu ermöglichen.

Basan [79] untersuchte die Schubeigenschaften unter anderem von Laminaten auf Basis von Kohlenstofffasergeweben. Es zeigen sich Parallelen zwischen den Untersuchungsergebnissen von Basan und den Resultaten dieser Schubuntersuchungen. Das nachfolgende Diagramm in Abb. 6-38 zeigt die Schubspannungs-Schubdehnungsverläufe der lückenbehafteten Prüfkörpern und Referenzproben, welche sowohl im RTM- als auch im VAP-Verfahren hergestellt wurden. Die Verläufe können in die gleichen vier typischen Abschnitte eingeteilt werden, welche bereits Basan in seiner Arbeit vorgestellt hat. Der erste Abschnitt beschreibt ein lineares Verhältnis zwischen der Schubspannung und Schubdehnung aller Probenkonfigurationen. Bei ca. 1,5 % Schubdehnung knickt der Kurvenverlauf ab. Hier endet das elastische Verhalten und die Proben werden plastisch verformt. Die RTM-Referenzprobe zeigt an diesem markanten Punkt einen geringeren Abfall der Kurvensteigung im Vergleich zu den anderen Konfigurationen. Daraufhin beginnt der Bereich geringer Steigung, in dem bei kleiner Spannungszunahme gleichzeitig die Schubdehnung stark zunimmt. Im Anschluss erreicht die Probe die maximale Schubspannung (Beanspruchungsgrenze). Vor allem die lückenbehafteten Proben zeigen an dieser Position geringere Dehnungswerte als die lückenfreien Proben. Eine genauere Aussage über die Schubdehnungen an der Position der Schubfestigkeit kann aufgrund der Ergebnisstreuung nicht getroffen werden. Nach dem Überschreiten der Beanspruchungsgrenze sinkt die Schubspannung und die Dehnung nimmt nur noch geringfügig zu.

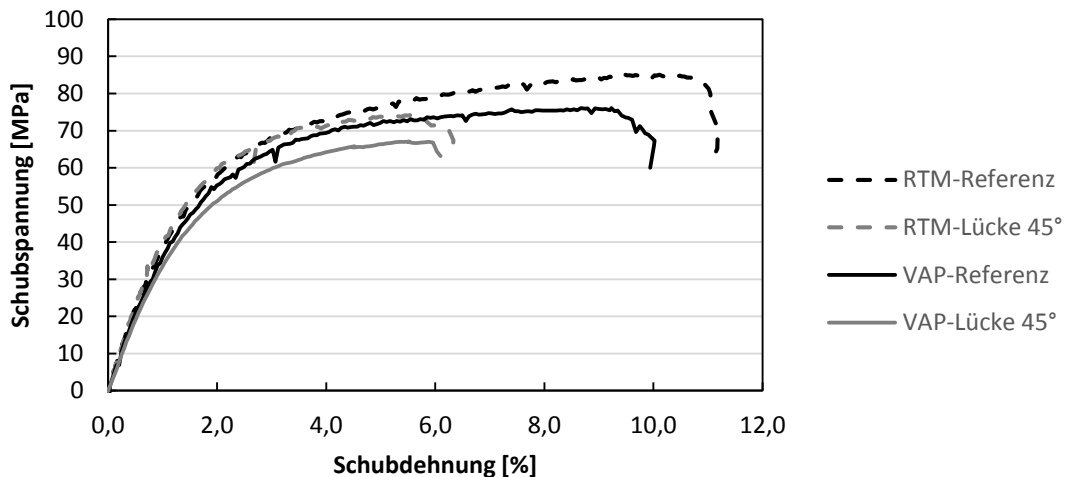


Abb. 6-38: Repräsentative Schubspannungs-Schubdehnungs-Verläufe aller RTM- und VAP-Couponkonfigurationen

In den Abbildungen Abb. A-16 bis Abb. A-19 sind repräsentative zerstörte Schubproben dargestellt. Alle Proben zeigen eine mittige Einschnürung. Die Proben erfahren während der mechanischen Prüfung große Dehnungen, was zu einem markanten Versagensbild führt. Im Allgemeinen lösen sich ganze Garnstränge voneinander und eine Lokalisierung des Bruchs bei den lückenbehafteten Proben ist zu erkennen.

6.4.2 Einzel-Lücken-Ansatz

Wie im generischen Extremfall gezeigt wurde, haben Garnlücken negative Auswirkungen auf verschiedene mechanische Eigenschaften eines Geflechtverbunds. Der Extremfall (sechs Garnlücken in sechs Geflechtlagen) wurde genutzt, um den sensibelsten mechanischen Lastfall festzustellen. Die deutlichsten Festigkeitsreduktionen sind bei Probenkonfigurationen zu erkennen, die Garnlücken enthalten und im VAP-Verfahren hergestellt wurden. Die Minderung der Zug- und Druckkennwerte ist auf eine lokale Wandstärkenreduktion und auf die lokale Zunahme der Garnondulation zurückzuführen. Um ein realistischeres Szenario zu betrachten, wurde in diesem Abschnitt nur eine Garnlücke in ein mehrlagiges Geflecht eingebracht und im VAP-Verfahren infiltriert. In diesem Einzel-Lücken-Ansatz sind zwei Parameter entscheidend für die Wandstärkenreduktion und die Beeinflussung der Garnondulation: die Gesamtanzahl der Geflechtlagen des Verbundes und in welcher Geflechtlage die Garnlücke positioniert ist (vertikale Positionierung). Aus diesem Grund wurden einzelne Garnlücken in verschiedenen Lagen unterschiedlich dicker Preforms (zwei bis sechs Lagen) eingebracht und im standardisierten VAP-Verfahren auf einem ebenen Werkzeug infiltriert. Die Wandstärkenreduktionen der verschiedenen Konfigurationen wurden anschließend mit Hilfe eines Mikroskops vermessen und miteinander verglichen. Die Messung der Garnondulation wurde in diesen Untersuchungen nicht durchgeführt – dies hatte zwei

Gründe: Die Vermessung der Garnondulation unterliegt einer relativ hohen Ergebnisstreuung, wie dies bereits andere Autoren (Saunders et al.) festgestellt haben. Besonders die Messung von lokalen Ondulationserhöhungen bei einer großen Lagenanzahl war nicht eindeutig messbar, was in Vorversuchen festgestellt wurde. Aus diesen Gründen wurden die unterschiedlichen Einzel-Lücken-Konfigurationen ausschließlich hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wandstärkenreduktion untersucht.

Die Einbringung der Garnlücke und die Infiltration der Preforms waren beim Einzel-Lücken-Ansatz und dem Extremfall identisch (siehe Abschnitt 6.3.2). Eine Garnlücke mit einer Breite von 4 mm wurde in einer Lage einer zwei-, drei- und vierlagigen Geflechtpreform eingebracht (vgl. Abb. 6-39). Als erste Lage wird die Lage bezeichnet, die unmittelbar auf dem Plattenwerkzeug aufliegt. Eine sechslagige Probenkonfiguration verfügte über eine Garnlücke in der ersten, dritten, vierten und sechsten Geflechtlage.

Nach der Infiltration wurden Proben mit einer Breite von 30 mm eingebettet, poliert und unter einem Stereomikroskop untersucht. Der Zuschnitt geschah mit einer wassergekühlten Diamantsäge. Es wurde versucht, die Schnitte so zu setzen, dass sich die Garnlücke mittig in der Probe befand. Die Probenbreite von 30 mm war beschränkt durch die Größe der Einbettformen. Die Wandstärke bzw. der Verlauf der Wandstärke jeder Mikroskopprobe wurde an ca. 150 Messpunkten mittels der Software (Stream Motion von Olympus) erhoben. Es wurden jeweils drei Proben für jede Konfiguration angefertigt. Die Probenbezeichnung wurde wie folgt festgelegt:

Lagenanzahl des Laminats_Lagennummer, in der sich die Garnlücke befindet – fortlaufende Probenbezeichnung.

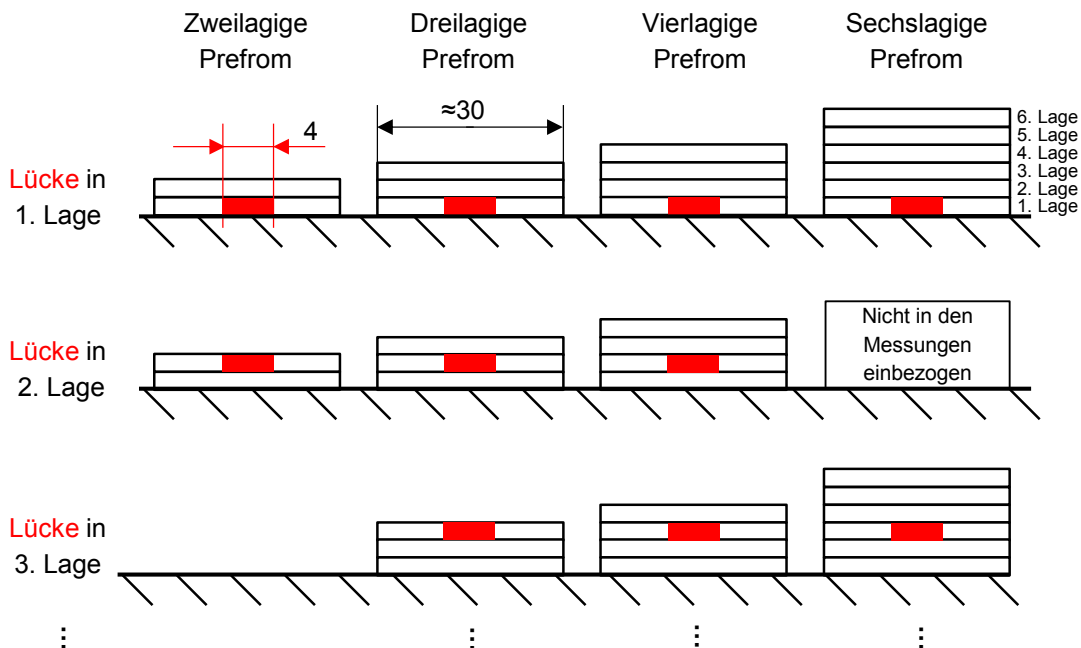


Abb. 6-39: Darstellung der Probenkonfigurationen zur Untersuchung der Auswirkungen von einzelnen Garnlücken auf die Wandstärke

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden die Wandstärken der lückenbehafteten Proben in Relation zur Wandstärke eines lückenfreien Laminats gesetzt. Dazu wurden im Vorfeld die Wandstärken der garnlückenfreien Proben vermessen. Die Balkendiagramme zeigen neben der fehlerfreien Referenz die Minima der relativen Wandstärke der lückenbehafteten Lamine (z.B.: Abb. 6-42).

6.4.2.1 Zweilagige Lamine

Abb. 6-40 zeigt die Mikroskopaufnahme der 2_1-1 und 2_2-1-Proben. Die beiden Garnsysteme einer Garnlage verlaufen dabei in 0° - und 90° -Richtung. Die Bereiche in denen sich die Garnlücken und die dazugehörige Wandstärkenminderung befinden, sind weiß eingegrenzt. Es ist ein deutlicher Unterschied der Wandstärkenreduktionen beider Proben festzustellen.

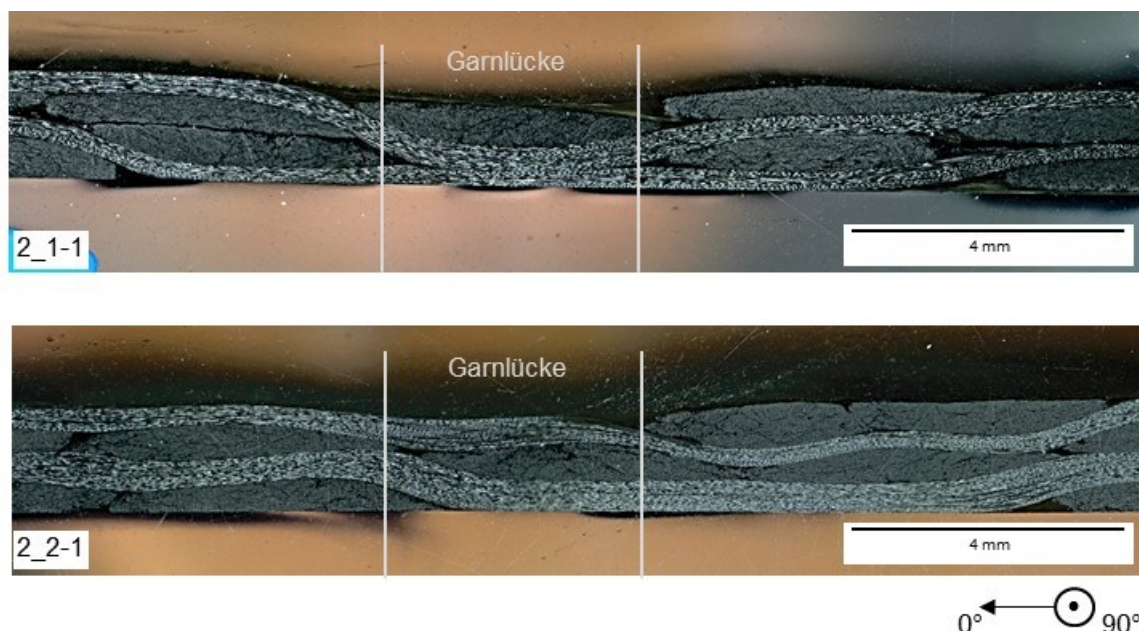


Abb. 6-40: Mikroskopaufnahmen der Proben 2_1-1 und 2_2-1

Abb. 6-41 stellt die gemessenen Wandstärkenverläufe der Proben 2_1-1 und 2_2-1 dar. Im Bereich der Garnlücken, welche bei einer Probenlängenposition von 13 mm (2_2-1) und 18 mm (2_1-1) liegen, sind deutliche Wandstärkenminima zu erkennen. 2_1-1 zeigt ein Wandstärkenminimum von 75 %, dahingegen weist 2_2-1 ein Minimum von 86 % der garnlückenfreien Probendicke (Referenz) auf. Außerhalb der Garnlücke ist bei beiden Proben ein welliger Verlauf der Wandstärke festzustellen. Diese Unebenheiten sind ein typisches Ergebnis einer VAP-Infiltration auf Basis eines ondulierten Textils.

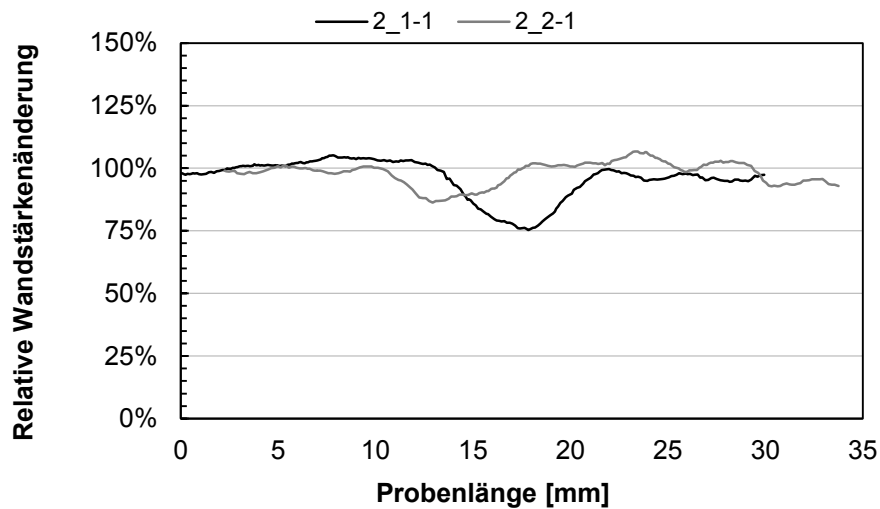


Abb. 6-41: Repräsentative Wandstärkenverläufe von lückenbehafteten Laminaten mit Garnlücken jeweils in der ersten und zweiten Lage

In Abb. 6-42 sind die minimalen relativen Wandstärken der 2_1 und 2_2-Probenreihen dargestellt. Die Garnlücke in der ersten Lage erzeugt eine durchschnittliche Wandstärkenreduktion von 19,89 % wobei die Lücke in der zweiten Lage eine Minderung von 12,80 % im Mittel hervorruft. Die Ergebnisstreuung ist ausreichend klein, um festzustellen, dass eine Garnlücke in der ersten Lage eines zweilagigen Geflechts eine größere Wandstärkenreduktion verursacht als eine Lücke in der zweiten Lage.

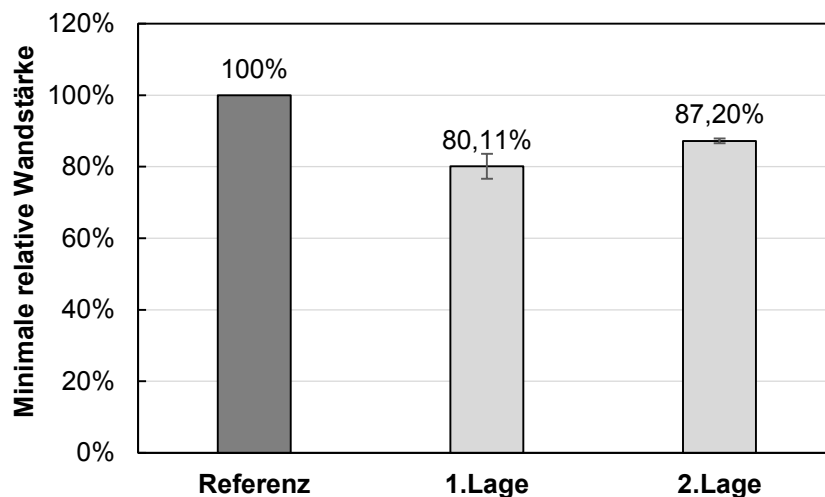


Abb. 6-42: Relative minimale Wandstärke zweilagiger Laminat ohne Garnlücke (Referenz) und mit einzelnen Garnlücken (in verschiedenen Lagen)

Da ein biaxiales Geflecht aus zwei sich kreuzenden Garnsystemen besteht, liegen an jeder Stelle eines einlagigen Geflechts zwei Garne übereinander. Daher setzt sich die Dicke einer einzelnen Geflechtlage stets aus der Dicke zweier Einzelgarne zusammen. Im eingegrenzten Bereich in Abb. 6-40 liegt eine Garnlücke vor, was bei einem zweilagigen Laminat eine theoretische Reduktion der Garnmenge und somit Laminatdicke um 25 % bedeutet. Obwohl beide Proben im Bereich der Garnlücke die gleiche

Garnanzahl und somit das gleiche Garnvolumen aufweisen, unterscheiden sich die jeweiligen Wandstärkenreduktionen, was auf unterschiedlich stark ausgeprägte Nestingeffekte zurückzuführen ist.

Die Probenkonfiguration 2_2 besitzt eine Garnlücke in der zweiten Garnlage. Bei der Kompaktierung dieses lückenbehafteten Geflechts setzt sich ausschließlich das 0° -Garn der zweiten Lage in die Garnlücke. Das Nestingverhalten der ersten Garnlage ändert sich nicht. Die Probenkonfiguration 2_1 mit einer Garnlücke in der ersten Lage verursacht einen Setzeffekt sowohl des 0° -Garns der ersten Lage als auch beider Garne der zweiten Lage. Wie bereits zahlreiche Autoren (Baoxing et al. [29, 64] und Yousaf et al. [65]) feststellten, ist der Nestingeffekt bei zunehmender Anzahl der sich setzenden Einzellagen bzw. Garnlagen ausgeprägter. Bei der Probenkonfiguration 2_1 verursacht die Lücke das Nesting von insgesamt 3 Garnen (1,5 Lagen) und die Konfiguration 2_2 von nur einem Garn (0,5 Lagen).

6.4.2.2 Dreilagige Laminat

Abb. 6-43 zeigt die relative minimale Wandstärke eines dreilagigen Laminates mit einer Garnlücke jeweils in der ersten, zweiten und dritten Lage. Eine Garnlücke in einem dreilagigen Geflecht laminat erzeugt theoretisch eine Wandstärkenreduktion von 16 %. Die Garnlücke in der ersten Lage ruft die größte Wandstärkenminderung von 15,74 % hervor. Dieser Wert entspricht annähernd der theoretischen Wandstärkenabnahme. Die Lücken in der zweiten und dritten Lage erzeugen jeweils eine Reduktion der Wandstärke von im Schnitt 11 %. Somit erzeugt die Garnlücke unmittelbar am Plattenwerkzeug, eine größere Wandstärkenminderung als die der restlichen Proben. Zu erklären ist das erneut durch Unterschiede im Nestingverhalten. Eine Lücke in der ersten Garnlage erzeugt einen ausgeprägteren Nestingeffekt der oberen fünf Garnlagen als eine Lücke in der zweiten und dritten Lage, die Nesting von drei bzw. eines Garns hervorrufen.

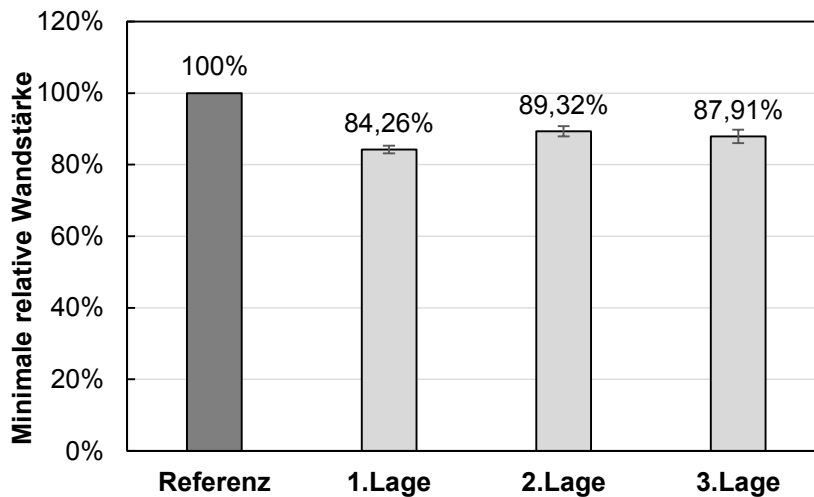


Abb. 6-43: Relative minimale Wandstärke dreilagiger Laminats ohne Garnlücke (Referenz) und mit einzelnen Garnlücken in verschiedenen Lagen

6.4.2.3 Vierlagige Laminats

Die theoretische Wandstärkenabnahme aufgrund einer Garnlücke im Fall eines vierlagigen Geflechtlaminats liegt bei 12,5 %. Die reale Wandstärkenminderung beträgt im Fall einer Lücke in der ersten Lage (4_1) im Mittel 9,36 %. Die restlichen Konfigurationen verringern die Wandstärke durchschnittlich um 8,11 % (4_2), 7,41 % (4_3) und 6,68 % (4_4) (siehe Abb. 6-44). Der Trend, der bei den vorherigen Probenkonfigurationen festgestellt wurde, ist hier weniger ausgeprägt. Erneut erzeugt die Garnlücke in der ersten Lage aufgrund von stärkeren Nestingeffekten leicht größere Wandstärkenabnahmen als die restlichen Probenkonfigurationen.

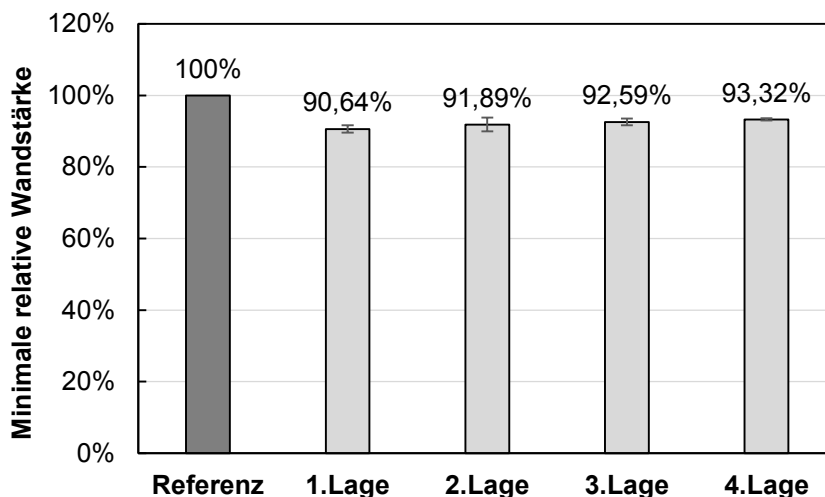


Abb. 6-44: Relative minimale Wandstärke vierlagiger Laminats ohne Garnlücke (Referenz) und mit einzelnen Garnlücken in verschiedenen Lagen

6.4.2.4 Sechslagiges Laminat

In Abb. 6-45 werden die Wandstärkenreduktionen bei sechslagigen Geflechtlaminaten mit jeweils einer Garnlücke in der ersten, dritten, vierten und sechsten Lage zusammengefasst. Die theoretische Wandstärkenreduktion, die durch eine Garnlücke im Falle eines sechslagigen Geflechtlaminats verursacht wird, beträgt 8,2 %.

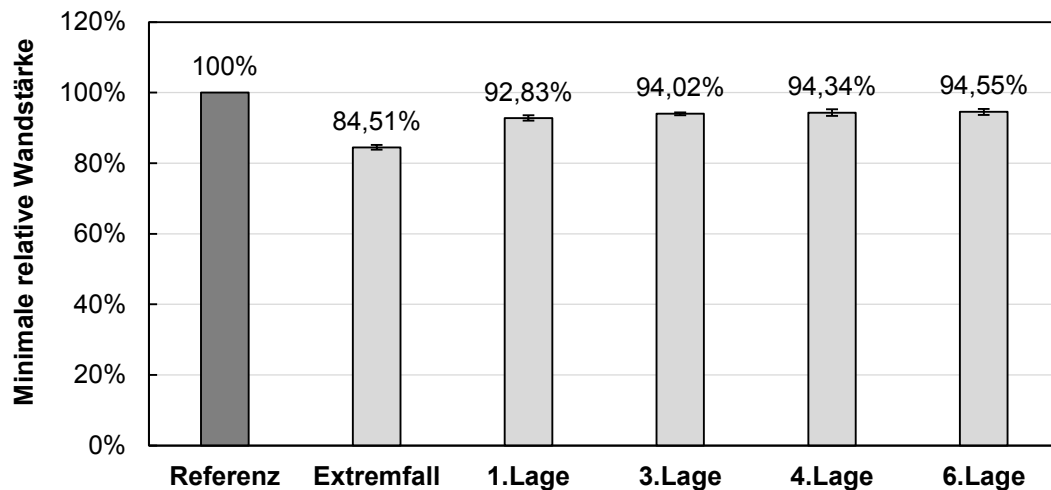


Abb. 6-45: Relative minimale Wandstärke sechslagiger Laminats ohne Garnlücke (Referenz), mit sechs Garnlücken (Extremfall) und einzelnen Garnlücken in verschiedenen Lagen

Die Garnlückenkonfigurationen des sechslagigen Geflechtlaminats zeigen erneut einen leichten Trend der Korrelation zwischen relativer Wandstärkenminderung und Garnlückenposition. Die Lücke in der ersten Lage reduziert die Wandstärke um bis zu ca. 7,17 %, wobei die restlichen Garnlückenkonfigurationen Wandstärkenabnahmen von 5,98 % bis 5,45 % zeigen.

Zu Vergleichszwecken wurde die minimale relative Wandstärke des Extremfalls betrachtet. Hier wurden ebenso drei Proben mit jeweils 150 Messpunkten vermessen. Die Überlagerung von sechs Garnlücken bei einem sechslagigen Geflechtlaminat führt zu einer Reduktion der Wandstärke von ca. 15,49 %. Dieser Wert ist somit geringer als die relative Wandstärkenverkleinerung, welche durch eine Garnlücke in der ersten Lage eines zweilagigen Geflechtlaminats erzeugt wird.

6.4.2.5 Mechanische Untersuchungen

Neben den Auswirkungen einzelner Garnlücken auf die Laminatwandstärke wurden ebenso deren Einflüsse auf mechanische Kennwerte untersucht. In Abschnitt 6.4.1 wurden bereits zahlreiche mechanische Untersuchungen auf Basis eines generischen Extremfalls durchgeführt: Die größten Einbußen in mechanischen Kennwerten wurden bei VAP-Zugprüfkörpern festgestellt, die über senkrecht zur Zugrichtung verlaufende Garnlücken verfügten (VAP-Lücke 90°-Zugprobe). Daher bietet diese Probenkonfigu-

ration das größte Potential, um die Auswirkungen in Folge einer einzelnen Garnlücke auf die mechanischen Eigenschaften eines Geflechtverbunds sicher abzubilden.

Somit wurden zwei- und sechslagige Geflechtcoupons hergestellt, die jeweils über eine Garnlücke in der ersten Geflechtlage verfügten (Couponbezeichnung 2_1 und 6_1). Die Garne der Coupons waren erneut in 0° und 90° ausgerichtet, wobei die Lücke in 90° verlief und eine Zuglast in 0° eingebracht wurde. Erneut wurden sechs Proben pro Couponkonfiguration geprüft. Abb. 6-46 zeigt einen Vergleich der Zugfestigkeiten sowohl zwischen den zwei- und sechslagigen Referenzlaminaten, welche fast exakt gleiche Ergebnisse zeigen, als auch zwischen den Extremfällen, der 2_1- und 6_1-Coupons.

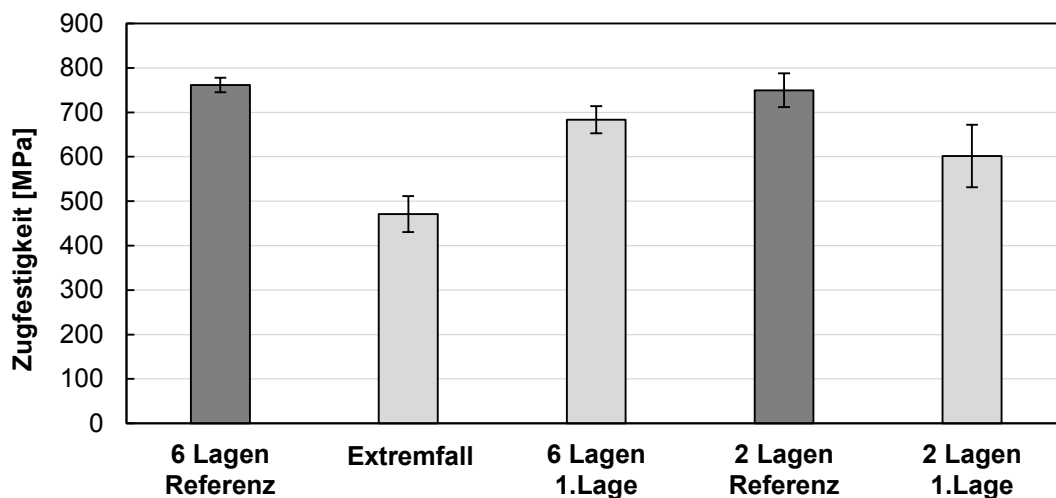


Abb. 6-46: Vergleich der Zugfestigkeiten der Extremfall- und Einzel-Lücken-Prüfkörper. Garnlückenverlauf senkrecht zur Zugrichtung

Die Zugfestigkeiten der sechs- und zweilagigen lückenfreien Referenzen liegen in einem Bereich von ca. 750 MPa bis 760 MPa. Die Zugfestigkeit im Extremfall fällt im Vergleich zur sechslagigen Referenz um 36 %. Die Zugfestigkeit der 2_1-Proben fällt um ca. 20 % verglichen zur zweilagigen Referenz. Analog dazu fällt die Zugfestigkeit der 6_1-Probe um ca. 11 % relativ zur fehlerfreien sechslagigen Probe.

6.5 Fazit

6.5.1 Generischer Extremfall

In diesem Kapitel wurden die Auswirkungen von lokalen Garnlücken auf die mechanischen Eigenschaften eines Geflechts überprüft. Zu diesem Zweck wurde ein Extremfall-Ansatz verfolgt. Es wurden sechs Garnlücken (Breite=4 mm) übereinander in sechs Geflechtlagen eingebracht und in verschiedenen mechanischen Lastfällen geprüft. Diese Methode ermöglichte es die Konfiguration zu identifizieren, die am sensibelsten auf Garnlücken reagiert. Tab. 6-2 fasst die untersuchten Prüfkonfigurationen

zusammen. Die Spalten repräsentieren die Lastfälle (Zug, Druck, Schub), zusätzlich sind dort ebenso die Garn- und Lückenausrichtung vermerkt. Die Zeilen stellen dagegen die Herstellungsmethoden (RTM, VAP) dar. Die Farbgebung soll die Auswirkungen auf die individuellen Festigkeiten wiedergeben. Die garndominierten Eigenschaften wie Zug- und Drucklasten werden unter anderem durch Änderungen der Mikrostruktur des Verbundes beeinflusst. Garnlücken erzeugen, wenn sie in einem vakuumbasierten Infiltrationsverfahren (VAP) hergestellt werden, Reduktion der Bauteilwandstärke und in Folge dessen eine Erhöhung der Garnondulation. Verläuft die Garnlücke senkrecht zur Zug- oder Drucklastrichtung (Lücke in 90°), wird der tragende Probenquerschnitt reduziert und die unter Last stehenden Garne stärker onduliert, was zu deutlichem Verlust der mechanischen Leistungsfähigkeit des Geflechtverbunds führt. Falls Lücken in 0° -Richtung verlaufen und in 0° -Richtung die Wandstärke mindern (VAP-Fall), hat das nur einen Effekt auf die Druckfestigkeit. Die Zugfestigkeit bleibt in diesem Lastfall unbeeinflusst, da die unter Last stehenden Garne nicht stärker onduliert werden.

Tab. 6-2: Übersicht des Einflusses von Garnlücken (generischer Extremfall) auf die Festigkeiten

		$0^\circ/90^\circ$				$\pm 45^\circ$
		Zug in 0° Lücke in 0°	Zug in 0° Lücke in 90°	Druck in 0° Lücke in 0°	Druck in 0° Lücke in 90°	Schub in 0° Lücke in 45°
RTM		Keine Reduktion von σ_{max}		Negativer Trend (hohe Ergebnisstreuung)	Negativer Trend (hohe Ergebnisstreuung)	Deutliche Reduktion von σ_{max} um 12%
			Deutliche Reduktion von σ_{max} um 36%	Deutliche Reduktion von σ_{max} um 25%	Deutliche Reduktion von σ_{max} um 33%	Kaum Reduktion von σ_{max}
VAP			Deutliche Reduktion von σ_{max} um 36%	Deutliche Reduktion von σ_{max} um 25%	Deutliche Reduktion von σ_{max} um 33%	Kaum Reduktion von σ_{max}

Alle Angabe im Vergleich zur fehlerfreien Referenz

Falls Garnlücken nicht die Wandstärke mindern, sondern den Faservolumengehalt reduzieren (RTM-Fall) bleiben Zugfestigkeiten im Rahmen dieser Versuche gänzlich unbeeinflusst. Zurückzuführen ist das auf die Probenwandstärke und die Garnondulation der unter Last stehenden Garne, welche beide nicht beeinflusst werden. Die Druckversuche der RTM-Coupons zeigen einen negativen Trend bei Vorhandensein von lokalen Garnlücken. Eine genauere Aussage ist aufgrund der hohen Ergebnisstreuung nicht möglich. Die Schubfestigkeit der RTM-Prüfkörper zeigt eine eindeutige Reduktion, da die interlaminare Eigenschaften durch eine lokale Minderung des Faservolumengehalts abnehmen.

6.5.2 Einzel-Lücken-Ansatz

Einzelne Garnlücken mit einer Breite von 4 mm, die in Geflecht laminaten von bis zu sechs Lagen vorhanden sind, haben immer einen Einfluss auf die Wandstärke. Der Einfluss der Garnlücke auf die Wandstärke ist abhängig von der Lagenanzahl und von der Position der Lücke im Laminat bzw. dem Abstand der Garnlücke vom formgeben-

den Werkzeug. Je kleiner die Lagenanzahl des Laminats ist, desto größer ist der relative Einfluss auf die Wandstärke. Abb. 6-47 zeigt die relative Wandstärkenreduktion durch eine Garnlücke in der ersten Geflechtlage bei unterschiedlicher Gesamtlagenanzahl.

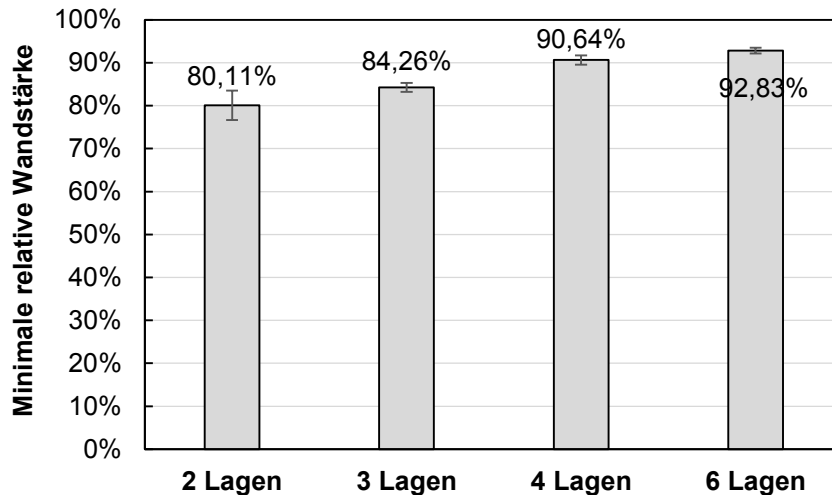


Abb. 6-47: Relative minimale Wandstärke bei einer Garnlücke in der ersten Lage bei Halbzeugen mit unterschiedlicher Lagenanzahl

Bei geringer Lagenanzahl gilt, dass eine Garnlücke, die sich näher am Werkzeug befindet, größere Reduktionen in der Laminatwandstärke erzeugt als eine Garnlücke deren Abstand zum Werkzeug größer ist. Bei zwei- und dreilagigen Laminaten kann ein eindeutiger Trend verzeichnet werden. Bei vier- und sechslagigen Laminaten ist nur ein leichter Trend zu beobachten. Einzelne Garnlücken mit einer Breite von 4 mm, die in der ersten Geflechtlagen liegen und senkrecht zur Zugbelastungsrichtung verlaufen, setzen immer die Zugfestigkeit eines Geflechtlaminats (mit bis zu sechs Lagen) herab. Eine einzelne Garnlücke in einem sechslagigen Geflechtlaminat reduziert die Zugfestigkeit um 11 %, wobei eine Lücke in einem zweilagigen Laminat eine Minderung von 20 % nach sich zieht.

6.5.3 Abschätzung der Auswirkung von Garnlücken in Fatigueuntersuchungen

Es ist damit zu rechnen, dass lokale Ondulationen auf Couponebene auch zur Reduktionen der Lebensdauer im Rahmen von Fatiguebelastungen führen. Bereits Hörrmann et al. [37] konnten anhand kontrolliert ondulierter Coupons diese Hypothese bestätigen. Sowohl die ondulierten Garne als auch die Reinharzgebiete – bedingt durch die Prüfkörperherstellung – sind Initiatoren für frühzeitiges Versagen. Dieses Versagen reichte von Garnbruch bis hin zu Delaminationen. Die Delamination war das dominierende Versagensverhalten, das auch Mukhopadhyay et al. [45–47] in Versuchen zu

Lebensdauerversuchen von ondulierten Prepreg-Proben feststellten. Initiiert wurde dieses Versagen erneut durch Garnondulationen.

Wandstärkenreduktion und Garnondulationen der VAP-Proben wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Reduktionen der Fatigueeigenschaften führen. Identisch zu den statischen Versuchen werden die Extremfall-Proben unter Fatiguelast deutlich größere Einbußen verzeichnen als die Proben des Einzel-Lücken-Ansatzes. Eine einzelne Garnlücke hat geringere Auswirkungen auf die Garnstruktur als mehrere übereinanderliegende Garnlücken. Es ist ebenso davon auszugehen, dass lückenbehaftete RTM-Prüfkörper unter Fatiguelast geringere Zyklenzahlen erreichen als fehlerfreie Referenzen. Hörrmann et al. [37] dokumentierten Matrixversagen an harzreichen Zonen, was im weiteren Verlauf der Fatiguelast zu Delaminationen führte. Die lückenbehafteten RTM-Proben, die in dieser Arbeit behandelt werden, werden ein ähnliches Versagensbild unter Fatiguelast (Zug, Druck) zeigen. Die Extremfall-RTM-Proben werden allerdings deutlich größere Minderungen in der Zyklenzahl verzeichnen, als Einzel-Lücken-Proben. Mit geringerer Lückenanzahl wird ebenso die Größe der Reinharzgebiete reduziert. Es ist damit zu rechnen, dass ebenso die Zugeigenschaften von lückenbehafteten RTM-Proben unter dynamischer Last – im Gegensatz zu statischer Belastung – reduziert werden.

7 Auswirkungen von Garnlücken auf mechanische Kennwerte einer Torsionswelle

Aufbauend auf den isolierten Couponprüfungen wird der Einzel-Lücken-Ansatz auf Bauteilebene und somit in einem komplexeren Spannungszustand untersucht. Ein für das Flechtverfahren geeignetes Bauteil ist die Torsionswelle, die in diesem Abschnitt über eine kontrolliert eingebrachte Garnlücke verfügt. Torsionswellen sind rotations-symmetrische Bauteile, die idealerweise über Verstärkungsfasern in biaxialer Ausrichtung verfügen¹. Je nach durchgeführtem LCM-Prozess entstehen verschiedene Imperfektionen in der Torsionswelle, die sich unterschiedlich auf die mechanische Leistungsfähigkeit der geflochtenen Torsionswellen auswirken.²

7.1 Untersuchungen auf dem Gebiet von Torsionswellen aus Verbundwerkstoffen

Schürmann [80] bietet einen grundlegenden Überblick über die Spannungszustände in Wellen, welche unter Torsion belastet werden. Wird ein Drehmoment in eine Torsionswelle eingeleitet, werden in dieser Schubspannungen erzeugt, die wiederum in äquivalente Hauptspannungen aufgeteilt werden können. Die Hauptspannungen (Zug- und Druckspannung) verlaufen in $+45^\circ$ und -45° zur Wellenachse. Aus diesem Grund eignet sich bei einer Welle aus Verbundwerkstoff, die rein auf Torsion belastet wird, ein $\pm 45^\circ$ -Lagenaufbau. Daher ist ein biaxiales Geflecht mit einem Flechtwinkel von $\pm 45^\circ$ ideal für diese Anwendung. Eine fehlerfreie biaxiale Torsionswelle besitzt bei Torsion in positiver und in negativer Drehrichtung gleiche mechanische Eigenschaften³. Abb. 7-1 zeigt die Schubspannungs- und die äquivalenten Hauptspannungszustände bei positivem und negativem Drehmoment. Bei positivem Drehmoment werden die Garne in $+45^\circ$ auf Längszug und Querdruck belastet, was einem günstigen Lastfall entspricht. Währenddessen werden die Garne in -45° ungünstiger in Form von Längs-

¹ Hier wird eine reine Torsionslast angenommen. Biegemomenten werden ausgeschlossen.

² Ein Teil der Ergebnisse dieses Abschnitts entstanden im Rahmen der Master's Thesis von Wolfgang Weber [S17]

³ Vorausgesetzt beide Garnrichtungen bestehen aus dem gleichen Material mit den gleichen mechanischen Eigenschaften

druck und Querkzug belastet. Bei der Rotation in negativer Richtung kehren sich die Spannungszustände der äquivalenten Hauptspannungen um.

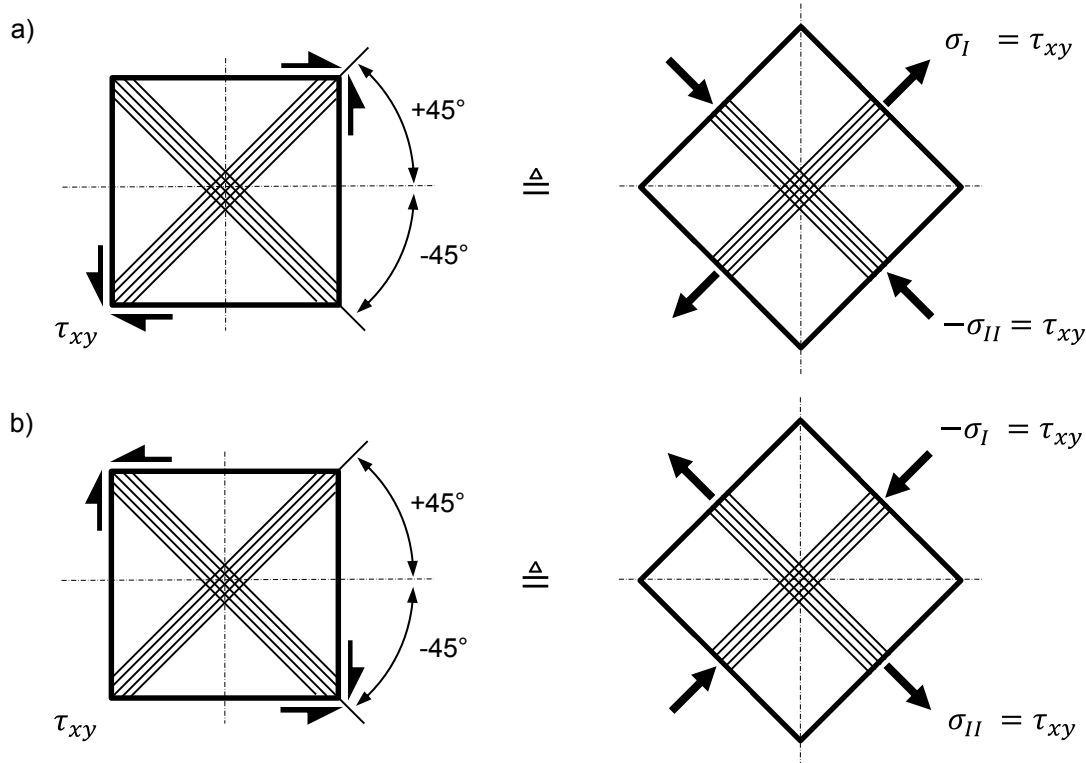


Abb. 7-1: Schubspannungszustände und äquivalente Hauptspannungen einer Torsionswelle mit $\pm 45^\circ$ -Lagenbau bei positiven Drehmoment (a) und negativen Drehmoment (b). Auf Basis von Schürmann [80, p. 666]

Brandmayr et al. [81] untersuchten die Versagensformen von Torsionswellen verschiedener Herstellungsarten. Die Prüfkörper mit einem Garnwinkel von $\pm 45^\circ$ wurden statisch belastet. Es zeigte sich ein Druckversagen unter allen Prüfkörperkonfigurationen. Die Garne, welche unter Längsdruck bzw. Querkzug belastet wurden, versagten, während das zweite – unter Längszug/Querkdruck stehende – Garnsystem intakt blieb. Es wurden zusätzlich die Festigkeiten beider Garnsysteme auf Basis der CLT (classical laminate theory) bestimmt. Es konnte festgestellt werden, dass die „Längsdruck/Querkzug“-Garne bei deutlich geringeren Festigkeiten versagten als analytisch bestimmt wurde. Brandmayr führte diese Diskrepanz auf zwei Ursachen zurück. Zum einen führt die Druckbelastung zum Ausknicken – also einem Stabilitäts- und keinem Festigkeitsversagen – der unter Längsdruck belasteten Garne. Zum anderen führen geometrische Imperfektionen wie Garnondulationen zu lokaler Reduktion der Druckfestigkeit, was zu einer Initiierung des ganzheitlichen Versagens der Torsionswelle führt.

Erber et al. [82] untersuchten die Auswirkungen unterschiedlich starker Garnondulationen auf das maximale Torsionsmoment von geflochtenen Torsionswellen. Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Geflechtkonfigurationen erzeugt – ein biaxiales, tri-

axiales und ein biaxiales Geflecht mit nicht eingeflochtenen Längsgarnen. Die letzte Konfiguration zeichnet sich dadurch aus, dass die Stehgarnen zwischen den biaxialen Geflechtlagen eingeführt worden sind (NOBRAZED: Non Braided Zero Degree fibers). Im Fall eines triaxialen Geflechts erzeugen die eingeflochtenen Stehgarnen zusätzliche Ondulationen der Flechtgarnen im Vergleich zum Biaxialgeflecht und dem NOBRAZED-Geflecht. Diese zusätzliche Ondulationen verursacht eine Reduktion des maximalen Torsionsmoments um ca. 20 %.

Schmidt et al. [83] untersuchten die Lebensdauer von gewickelten glasfaserverstärkten Rohren mit kontrolliert eingebrachten ebenen (in-plane) Garnwelligkeiten. Die Prüfkörper wurden im Wickelverfahren hergestellt und verfügten über einen symmetrischen Lagenaufbau $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$. Die Garnwelligkeit wurde erzeugt, indem während der Herstellung der äußersten Lage die Garnspannung kurzzeitig reduziert wurde. Im RTM-Prozess führte diese Stelle geringerer Garnspannung zur Aufschwemmung des Garns⁴, was in einer in-plane Garnwelligkeit im Verbund resultierte. Schmidt et al. wählten als Fatigue-Belastung einen komplexen Spannungszustand bestehend aus Axial- und Schublast mit einem Spannungsverhältnis von $R=-1$. Gleichzeitig zu axialen Lasten (Zug- und Drucklasten), die Normalspannungen σ induzierten, wurde der Prüfkörper tordiert, was zusätzlich Schubspannungen τ verursachte. Beide Spannungen wurden anhand folgender Gleichung (7-1) in Relation gesetzt.

$$\beta = \arctan\left(\frac{\tau}{\sigma}\right) \quad (7-1)$$

Daraufhin untersuchten Schmidt et al. die Lebensdauer der kontrolliert ondulierten Torsionswellen bei Spannungsverhältnissen von $\beta=30^\circ$ und $\beta=60^\circ$. Die Belastungsfrequenz betrug dabei 3 Hz. Ein Verhältnis von $\beta=30^\circ$ beschreibt einen größeren Zug-/Druckanteil, wobei $\beta=60^\circ$ einen größeren Anteil an Torsionslast besitzt. Aufgrund der lokalen Garnwelligkeit kommt es sowohl bei $\beta=60^\circ$ als auch bei $\beta=30^\circ$ zu einer Reduktion der Lebensdauer von jeweils 9 %. Das Versagen wurde an der lokalen Garnwelligkeit in Form von Delaminationen initiiert. Im weiteren Verlauf der Fatigue-Belastung wuchsen diese Delaminationen an und führten zum finalen Bruch der Probe.

Wie die gelisteten Literaturquellen zeigen, führen sowohl globale Unterschiede in der Garnstruktur als auch lokale Imperfektionen im Verbund zur Reduktion der Torsioneigenschaften. Entscheidend ist in beiden Fällen erneut der erhöhte Grad der Garnondulation. Werden Garne nicht entlang ihrer Längsausrichtung belastet, reduziert sich deren Festigkeit, was ein frühzeitiges Versagen der Gesamtstruktur initiieren kann.

⁴ Garnaufschwemmung (fiber washing): Veränderung des in-plane Garnverlaufs durch den Injektionsprozess. Mögliche Ursachen: zu hoher Injektionsdruck, eine ungenügend stabilisierte Preform oder eine Preform, deren Garne unter zu geringer Spannung stehen.

7.2 Vergleich der Spannungszustände in garnlückenbehafteten Torsionswellen und Coupons

Wie in Abschnitt 7.1 erklärt, kann der Schubspannungszustand einer tordierten Welle in äquivalente Hauptspannungen unterteilt werden. Diese isolierten Hauptspannungszustände entsprechen den Lastfällen, welche bereits auf Couponebene (Abschnitt 6) im Rahmen der unterschiedlichen Konfigurationen betrachtet wurden. Dies bietet die Möglichkeit die Ergebnisse der Torsionsprüfung mit denen der Coupontests zu vergleichen.

Abb. 7-2 zeigt zwei geflochtene Torsionswellen mit einem Flechtwinkel von $\pm 45^\circ$ (bezüglich des Bauteilkoordinatensystems) mit jeweils einer Garnlücke in -45° .

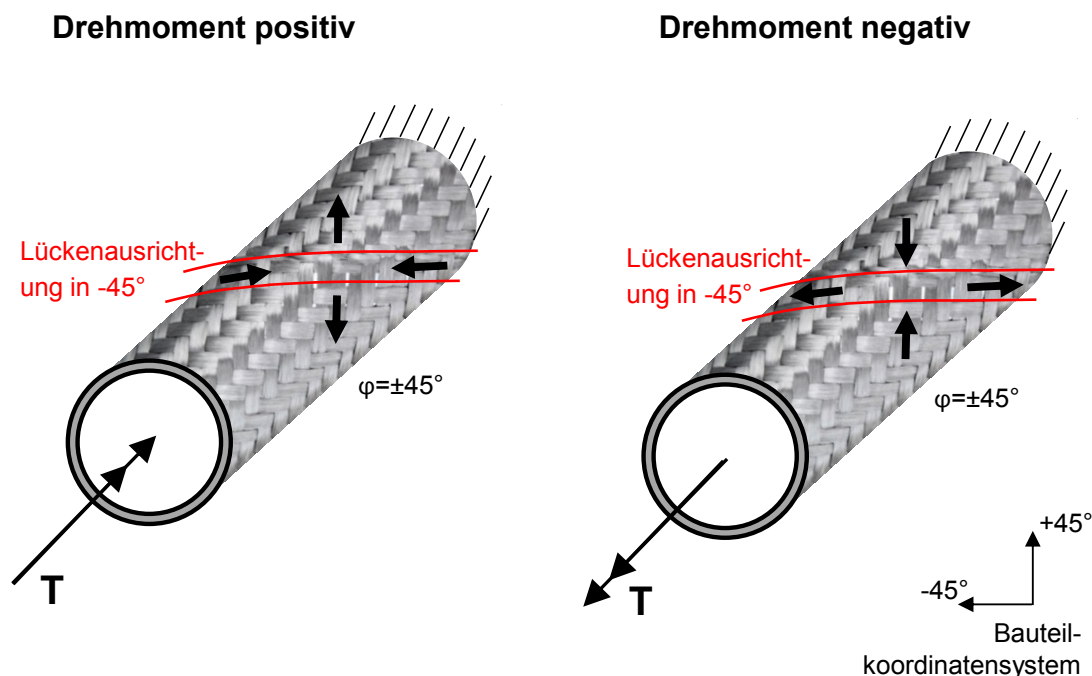


Abb. 7-2: Unterschiedliche Drehmomentrichtungen zweier Torsionswellen mit jeweils einer Garnlücke in -45° (Bauteilkoordinatensystem).

Bei einem positiven Drehmoment werden die -45° -Garne auf Druck und die $+45^\circ$ -Garne auf Zug belastet. Bei einem negativen Drehmoment kehren sich die Belastungen relativ zur Lücke um. In Abb. 7-2 werden die Belastungszustände relativ zur Garnlücke durch Pfeile symbolisiert.

Eine detaillierte Darstellung der Schub- und äquivalenten Hauptspannungszustände bei positiven und negativen Drehmoment zeigen Abb. 7-3 und Abb. 7-4. Die Garnlücke verläuft ebenso in -45° und ist rot hervorgehoben.

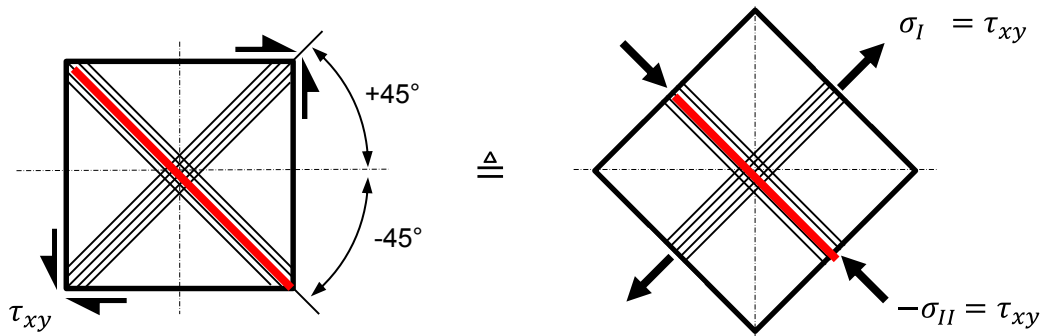


Abb. 7-3: Schubspannungszustand und äquivalenter Hauptspannungszustand bei positivem Drehmoment und einer in -45° verlaufenden Garnlücke (rot). Auf Basis von Schürmann [80, p. 666].

Die Hauptspannungszustände bezüglich der Garnlücke bei einem positiven Drehmoment lauten wie folgt:

- Zugspannung (in $+45^\circ$) senkrecht zur Garnlücke
- Druckspannung (in -45°) parallel zur Garnlücke

Abb. 7-4 zeigt die Schub- und die äquivalenten Hauptspannungszustände im Falle eines negativen Drehmoments bei einer Garnlücke in -45° -Richtung.

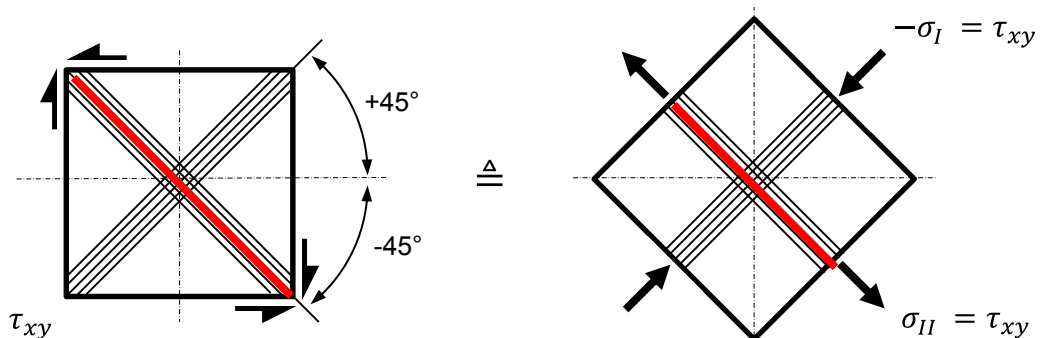


Abb. 7-4: Schubspannungszustand und äquivalenter Hauptspannungszustand bei negativem Drehmoment und einer in -45° verlaufenden Garnlücke (rot). Auf Basis von Schürmann [80, p. 666].

Bei negativem Drehmoment ergeben sich folgende Hauptspannungszustände relativ zur Garnlücke:

- Druckspannung (in $+45^\circ$) senkrecht zur Garnlücke
- Zugspannung (in -45°) parallel zur Garnlücke

Abb. 7-5 fasst die Hauptspannungszustände der Torsionswelle relativ zur Garnlücke unter Berücksichtigung beider Torsionsrichtungen zusammen. Die verschiedenen Spannungszustände in der Torsionswelle (Bauteilebene), werden den einzelnen mechanischen Versuchsreihen auf Couponebene zugeordnet. Dies ermöglicht die Ergebnisse der Torsionsprüfung durch die in den Coupontests gewonnenen Erkenntnisse zu erklären.

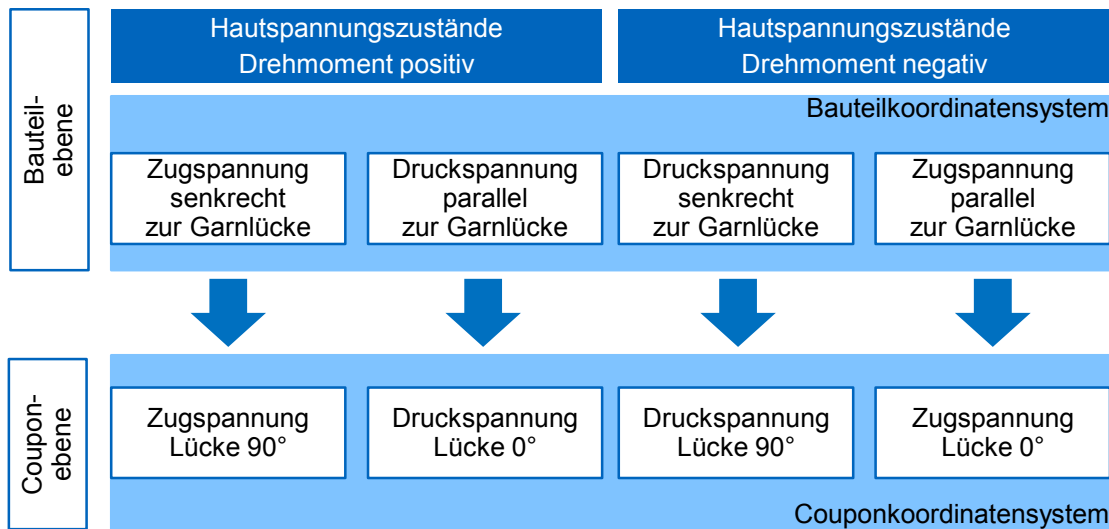


Abb. 7-5: Übertragung der Spannungszustände von Bauteilebene auf Couponebene

Die Spannungszustände bei positiver und negativer Drehrichtung gelten ebenso bei einer fehlerfreien Referenz.

7.3 Prüfkörperkonfigurationen

Die Auswirkungen der Garnlücke auf mechanische Kennwerte der Torsionswelle sind abhängig von mehreren Parametern. Die Parameter werden folgendermaßen eingruppiert:

- **Lückenposition und -einbringung:**
Es wurde ein Einzel-Lücken-Ansatz verfolgt. Dazu wurde eine Garnlücke in die innerste Lage der dreilagigen Torsionswelle eingebracht. Dies entspricht der dreilagigen Einzel-Lücken-Konfiguration aus Abschnitt 6.4.2. Die Untersuchungsergebnisse ergaben, dass eine Garnlücke in der ersten Lage die größte Wandstärkenreduktion eines dreilagigen Geflechts erzeugt. Um die Garnlücke kontrolliert einzubringen, wurde der modifizierte Klöppel aus Abschnitt 5.4 verwendet.
- **Art der mechanischen Prüfungen:**
Die Hohlwellen wurden einer Torsionslast in Anlehnung an ASTM D5448/D5448M – 16 unterzogen [84]. Um verschiedene Lasten relativ zur Garnlücke zu erzeugen, wurden die Torsionswellen in zwei unterschiedliche Drehrichtungen (positiv/negativ) belastet.
- **LCM-Prozess:**
 - **VAP:**
Um eine Wandstärkenminderung und eine lokale Ondulationserhöhung aufgrund der Garnlücke hervorzurufen, wurde eine gewöhnliche VAP-Infiltration durchgeführt.

- Modifizierter VAP (M):
Um die Wandstärkenreduktion aufgrund der Garnlücke zu verhindern und stattdessen eine Faservolumengehaltsreduktion zu erzeugen, wurde die VAP-Infiltration modifiziert. Das RTM-Verfahren wurde aufgrund des hohen Aufwands im Rahmen dieser Anwendung nicht durchgeführt. Im modifizierten VAP-Prozess wurde ein metallisches Blech zwischen Geflechtpreform und Membran eingelegt. Aufgrund der Steifigkeit des Blechs wird bei angelegtem Vakuum das Eindringen des Folienaufbaus in die Garnlücke und somit eine lokale Garnondulation verhindert. Diese modifizierte VAP-Methode ist dem RTM-Verfahren nicht gleichzusetzen, da sie sich in den Kompaktierungsdrücken grundlegend unterscheiden. Allerdings wird mit dieser Methode wie bei den Couponprüflingen eine Wandstärkenreduktion an der Stelle der Garnlücke verhindert.

Die Ergebnisse der verschiedenen Konfigurationen wurden mit fehlerfreien Referenzen verglichen, welche im standardisierten VAP-Verfahren hergestellt wurden. Es wurde angenommen, dass eine garnlückenfreie Referenzprobe, die im Standard-VAP-Verfahren hergestellt wurde, die gleichen mechanischen Eigenschaften besitzt, wie eine Referenzprobe des modifizierten VAP-Verfahrens. Die Kompaktierungsdrücke dieser beider Verfahren sind identisch. Tab. 7-1 fasst alle Versuchsparameter zusammen:

Tab. 7-1: Auflistung der Versuchsparameter

Herstellungsart	Drehmomentrichtung	Garnlücke
VAP (V)	Positiv	Ja
Modifiziertes VAP (M)	Negativ	Nein (Referenzprobe (R))

Je Probenkonfiguration wurden drei Torsionswellen geprüft. Die Referenzkonfiguration wurde pro Drehrichtung mit zwei Prüfkörpern getestet. Es wurde bei den fehlerfreien Referenzen davon ausgegangen, dass die Drehrichtung keine Auswirkungen auf das maximale Torsionsmoment besitzt, da in beiden Richtungen das gleiche Material verwendet wurde. Die Probenbezeichnung besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Garnbezeichnung
 - Diese ist stets T700 und steht für das T700SC 24k 60E-Garn von Toray Industries
- Herstellungsmethode bzw. das Vorhandensein einer Garnlücke:
 - **R**: garnlückenfreie Referenz hergestellt im Standard-VAP-Verfahren
 - **V**: garnlückenbehaftete Proben, die im Standard-VAP-Verfahren hergestellt wurden

- **M:** garnlückenbehaftete Proben, die im modifizierten VAP-Verfahren hergestellt wurden
- Fortlaufende Probennummerierung

7.4 Prüfkörperherstellung

Die Torsionswellen hatten folgende Dimensionen:

- Innendurchmesser $d_i=65$ mm
- Wandstärke $t\approx 2$ mm (Geflechtlagenanzahl: 3)
- Länge $l=300$ mm

7.4.1 Geflechtherstellung und Lückeinbringung

Die Torsionswellen basierten auf einem 2x2-Carbonbiaxialgeflecht. Dazu wurde das Garn mittels der Radialflechtmaschine (FR 128/100) der Fa. Herzog GmbH verarbeitet. Die in Tab. 7-2 gelisteten Flechtparameter wurden für die Herstellung der Torsionswellen verwendet:

Tab. 7-2: Flechtparameter zur Herstellung von Geflechtcoupons

Flechtparameter	Größe und Einheit
Flechtspulenanzahl (jeder zweite Klöppel bestückt)	64
Flechtwinkel φ	45°
Flechtkerndurchmesser entsprechend Torsionswelleninnendurchmesser	65 mm
Flechtkernlänge	1500 mm
Klöppelfederstärke	350 g
Flechtringdurchmesser	90 mm
Flügelraddrehzahl	30 $\frac{1}{min}$
Kernabzugsgeschwindigkeit	6,4 $\frac{mm}{s}$

Der Großteil der flechtspezifischen Parameter sind identisch zu denen, die für die Couponherstellung in Abschnitt 6 verwendet wurden. Aufgrund der Verwendung des modifizierten Klöppels (siehe Abb. 5-6) wurde die Flügelradumdrehungsgeschwindigkeit und somit die Kernabzugsgeschwindigkeit reduziert. Diese Parameter

sind identisch mit denen aus Abschnitt 5.4. Es wurden drei Umschlingungen an der Umschlingungsbremse des modifizierten Klöppels eingestellt, um eine Garnlückenbreite von ca. 4 mm zu erzeugen

Zwischen den Geflechtlagen wurde erneut thermoplastisches Bindervlies PA 1300 verwendet, um Vergleichbarkeit mit den Coupontests aus Abschnitt 6 zu wahren. Abb. 7-6 zeigt die erste Lage einer Torsionswelle mit einer Garnlücke.

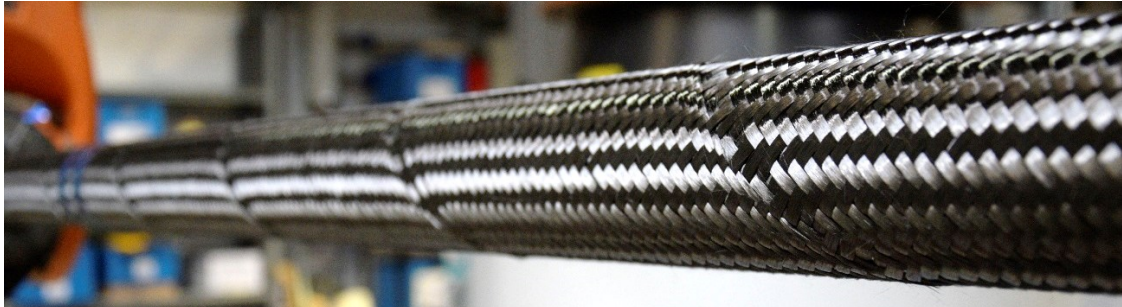


Abb. 7-6: Erste Geflechtlage eines Torsionswellen-Rohlings mit einer Garnlücke

Durch das Umflechten des Kerns entstand ein Rohling aus dem zwei Torsionswellen erzeugt wurden. Nach Beendigung des Flechtvorgangs wurde das Geflecht auf eine Länge von 1000 mm getrimmt, um genügend Klebefläche auf dem Flechtkern für das Dichtband des VAP-Aufbaus zu gewährleisten. Beim Preformbeschnitt wurde temperaturbeständiges Klebeband verwendet, um definierte Schnittkanten zu erzeugen. Aus dem infiltrierten Rohling wurden zwei Torsionswellen mit je einer Länge von 300 mm (freie Prüflänge 170 mm; Länge beider Kraftereinleitungselemente jeweils 65 mm) geschnitten. Diese Methode reduzierte den Flecht- und Infiltrationsaufwand. Die angefallenen Zuschnittreste wurden für weitere Analysen (Wandstärkenmessung, Mikroskopuntersuchungen) verwendet.

Als Flecht kern wurde ein Kolbenrohr aus Stahl verwendet. Diese Wahl hatte zwei Gründe: Das Kolbenrohr besaß mit einer f7-Passung eine hohe Außendurchmessertoleranz, weswegen nach der Matrixaushärtung mit einem exakten Innendurchmesser der Torsionswelle zu rechnen war. Dies ermöglichte bei der Einklebung der Kraftereinleitungselemente einen exakten Klebespalt. Des Weiteren ermöglichte der Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kohlenstoffverbund und Stahl eine problemlose Entformung. Der Aushärtezyklus der Epoxidmatrix fand bei 180°C statt [76], dabei dehnte sich der Flecht kern aus und besaß bei dieser Temperatur einen größeren Außendurchmesser als bei Raumtemperatur. Der Verbund härtete bei diesem größeren Kernaußendurchmesser aus. Nach der Aushärtung kühlten beide Materialien ab, wobei das Metall stärker schrumpfte als der Verbund. So ergab sich eine leichte Differenz zwischen Kernaußendurchmesser und Torsionswelleninnendurchmesser. Dieses Spiel ermöglichte eine problemlose Entformung des zylindrischen Verbundrohrs auch mit einer relativ großen Länge von 1000 mm. Der Flecht kern wurde vor dem Umflechten mit Frekote 700NC von Loctite nach der Gebrauchsanweisung des Datenblatts eingetrennt [85].

7.4.2 Infiltration

Nach Beendigung des Flechtvorgangs und dem Beschnitt der Geflechtpreform wurde der VAP-Aufbau vorbereitet. Die nachfolgende Bilderserie (Abb. 7-7 bis Abb. 7-9) zeigt die stufenweise Erstellung des modifizierten VAP-Aufbaus. Der Standard-VAP-Aufbau wurde identisch zum modifizierten Aufbau durchgeführt, allerdings ohne Verwendung des Druckblechs. Dieses hatte eine Breite von 30 mm und wurde entlang der Garnlücke spiralförmig um das Geflecht gewickelt (Abb. 7-7). Zuvor wurde es ebenso mit Frekote 700NC von Loctite eingetrennt. Zur korrekten Ausrichtung des Blechs wurde nach der Herstellung der ersten Geflechtlage die exakte Position der Garnlücke auf dem Flecht kern markiert. Das Druckblech wurde mit Klebeband am Flecht kern fixiert.

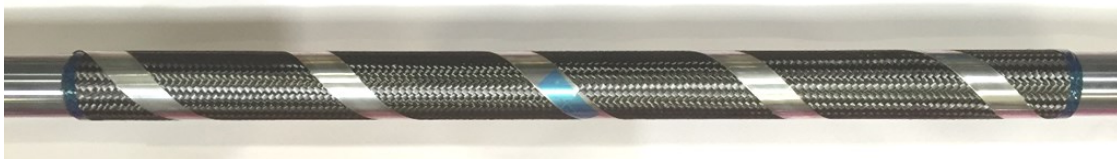


Abb. 7-7: Lückenhafte Geflechtpreform umwickelt mit Druckblech

Im darauffolgenden Schritt wurde ein Abreißband mit einer Breite von 40 mm mit leichter Überlappung um das Geflecht und das Druckblech gewickelt. Um während der Vakuumbeaufschlagung Faltenbildung zu vermeiden, wird das Abreißband straff um die Preform gewickelt. Die Enden des Bands wurden mit temperaturbeständigem Klebeband am Flecht kern befestigt. Der Anguss wurde in der Mitte der Preform positioniert und verlief um den kompletten Preformumfang (Abb. 7-8).



Abb. 7-8: Abreißband umwickelt um Geflechtpreform und Druckblech

Daraufhin wurde eine rechteckig zugeschnittene semipermeable Membran um die Preform und den Flecht kern gelegt. Dabei wurde die Membran mit temperaturbeständigem Dichtband verschlossen und ebenso auf den freien Flächen des Flecht kerns abgedichtet. Anschließend wurde die Membran mit Saugvlies bedeckt, um eine Absaugung aus dem Folienaufbau zu ermöglichen. Der dazu benötigte Absaugkanal befand sich dabei nicht direkt auf der Preform, sondern in den auslaufenden Bereichen der Membran bzw. des Saugvlieses (Abb. 7-9).



Abb. 7-9: Modifizierter VAP-Aufbau mit angelegtem Vakuum vor der Infiltration

Nachdem der VAP-Aufbau fertiggestellt wurde, wurde der Binder zwischen den Geflechtlagen aktiviert. Um eine gleichmäßige Kompaktierung zu erreichen, wurde der Aufbau während der Binderaktivierung bei 150°C evakuiert. Die Aktivierungstemperatur wurde in Anbetracht der thermischen Trägheit des Flecht-kerns für 40 min gehalten. Die Aktivierungszeit der Couponpreforms betrug 20 min. Die anschließende Infiltration wurde mit den gleichen Parametern durchgeführt, wie die Herstellung der Couponproben bzw. in Übereinstimmung mit den Temperaturvorgaben des Aushärtezyklus 1 des RTM6-Datenblatts [76]. Die genauen Infiltrationsparameter sind dem Anhang zu entnehmen (Tab. A-25).



Abb. 7-10: Fertiger Rohling aus dem zwei Torsionswellen entnommen werden. Hergestellt im modifizierten VAP-Verfahren

Nach Entfernung der Hilfstextilien, des Druckblechs und der Entformung des Flecht-kerns entstand ein Torsionswellenrohling. Abb. 7-10 zeigt einen Rohling, der im modifizierten VAP-Verfahren hergestellt wurde. Deutlich zu sehen sind die glatten Bereiche, die durch das anliegende Druckblech entstanden sind. Darunter befindet sich die Garnlücke, die parallel zu einem Garn eines Garnsystems verläuft. Wie ebenfalls in Abb. 7-10 zu erkennen ist, wurden aus einem Rohling zwei Torsionswellen mit je 300 mm gefertigt.

7.4.3 Überprüfung der Prüfkörperqualität

Nach dem Beschnitt der Prüfkörper wurden die Wandstärken und die Rohri-nnendurchmesser vermessen. Die Wandstärke jedes Prüfkörpers wurde an fünf Stellen mittels eines Messschiebers aufgenommen. Die durchschnittlichen Wandstärken sind in Abb. 7-11 gezeigt. Der Wert für die fehlerfreie Referenz basiert auf der Vermessung von vier Proben (viermal fünf Messwerte). Die weiteren zwei gezeigten Mittelwerte (VAP und mod. VAP) sind auf jeweils sechs Prüfkörper zurückzuführen. Diese Prüfkörperanzahl setzt sich aus jeweils drei Rohren unter positivem und negativem Drehmoment zusammen. Die Wandstärken der lückenbehafteten Proben wurden im fehler-

freien Bereich – mindestens zwei Zentimeter von der Garnlücke entfernt – erhoben. Das Gleiche gilt ebenso für die Prüfkörper, die im mod. VAP-Verfahren hergestellt wurden. Zu erkennen ist eine konstante Wandstärke aller Proben im Mittel von 2,04 mm.

Abb. 7-12 zeigt die Wandstärken, die im Bereich der Garnlücke erhoben wurden. Im Fall der VAP-Proben kann eine Wandstärkenreduktion von ca. 9 % gegenüber der Referenz verzeichnet werden. Der Unterschied zu den Ergebnissen in Abb. 6-37 (Kapitel 6) liegt zum einen in den verwendeten Messmitteln unterschiedlicher Messgenauigkeit (Mikroskop und Messschieber) und zum anderen an der Form der Prüfkörper (ebene und zylindrische Prüfkörper). Die Verwendung des Druckblechs im Rahmen der modifizierten VAP-Proben führt zu keiner Wandstärkenreduktion sondern ebenfalls zu einer durchschnittlichen Wandstärke von 2,04 mm.

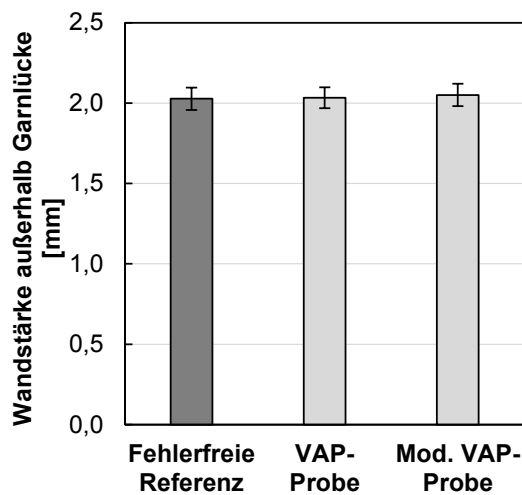


Abb. 7-11: Wandstärken der Torsionswellen (im fehlerfreien Bereich)

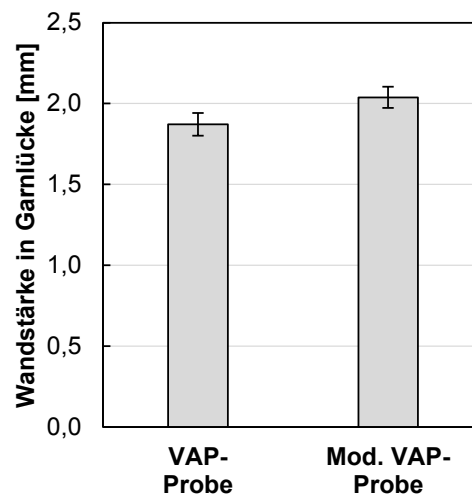


Abb. 7-12: Wandstärken an der Position der Garnlücken

Der Welleninnendurchmesser wurde ebenso vermessen. Es wurden vier Messwerte pro Torsionswelle mit einem Messschieber erhoben. Die Anzahl an vermessenen Prüfkörpern war identisch mit der Anzahl an Prüfkörpern, die der Vermessung der Wandstärken zugrunde lag. Die Innendurchmesser aller Prüfkörper liegen im Bereich von 65,1 mm (Abb. 7-13).

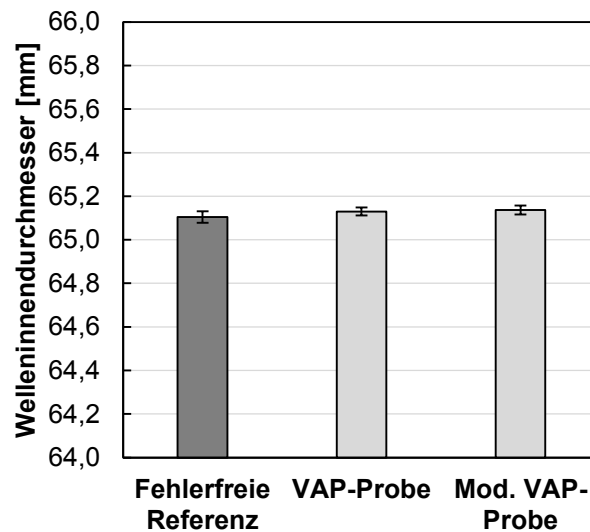


Abb. 7-13: Innendurchmesser der verschiedenen Torsionswellenkonfigurationen

Sowohl die Messungen der Wandstärken als auch der Innendurchmesser ergaben geringe Streuungen. Die Wandstärken variieren im Bereich von 3,4 % bis 3,7 % wobei die Innendurchmesser um 0,3 % bis 0,4 % schwanken. Im Speziellen konnten die Innendurchmesser durch Verwendung des Kolbenrohrs als Flecht kern mit einer hohen Präzision gefertigt werden. Dies ist unter anderem eine Voraussetzung, um einen konstanten Spalt bei der Einklebung der Krafteinleitungselemente zu erzeugen. Die Streuung der Wandstärken ist ein typischer Effekt eines vakuumunterstützten Infusionsprozesses auf Basis von Geflech ten.

7.4.4 Endbearbeitung der Prüfkörper

Um das Torsionsmoment einzuleiten, wurden pro Torsionswelle zwei Vollwellen aus Stahl als Krafteinleitungselemente innenseitig eingeklebt. Die Klebelänge der Stahlwelle betrug dabei 65 mm und entsprach dem Außendurchmesser der Krafteinleitungselemente. Aus Habenicht [86] ist zu entnehmen, dass eine Klebelänge, welche größer als der Wellendurchmesser ist, keine zusätzliche Kraftübertragung ermöglicht⁵. Um bei allen Proben eine konstante Klebelänge zu gewährleisten, verfügten die Krafteinleitungselemente über einen zusätzlichen Bund. Dieser fungierte als Anschlag während der Einführung der Elemente in die Torsionswelle.

Sowohl die Krafteinleitungselemente als auch die Torsionswellen wurden vor dem Verkleben präpariert (Abb. 7-14), um eine optimale Klebung zu gewährleisten. Hierzu wurden die Oberflächen der beiden Fügepartner angeraut. Die Krafteinleitungselemente wurde mit Edelmetall (Durchmesser 100 µm) sandgestrahlt. Demgegenüber wurden die Torsionswellen mit Hilfe von Sandpapier (Körnung 320) innenseitig bearbeitet. Beide Fügeflächen wurden nachträglich mit Aceton gereinigt. Die Bearbeitung der

⁵ Habenicht nimmt ein linear-elastisches Verformungsverhalten der Klebeschicht an.

Fügepartner geschah maximal einen Tag vor dem Klebevorgang, um die Oxidation beider Fügeflächen gering zu halten.

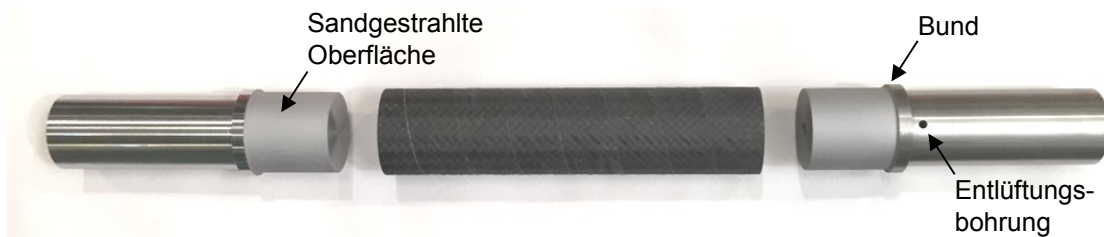


Abb. 7-14: Zwei präparierte Kraftübertragungselemente und eine Torsionswelle vor dem Verkleben

Die Verklebung wurde mit einem Zwei-Komponenten-Epoxid DP490 der Fa. 3M [87] durchgeführt. Um einen konstanten Klebespalt zu gewährleisten, wurden Glasperlen mit einem Durchmesser von 110 μm dem Klebstoff beigemischt. Zusätzlich wurde der Innendurchmesser der Kraftübertragungselemente auf 64,8 mm dimensioniert. Das Klebstoff-Glasperlen-Gemisch wurde sowohl auf die angerauten Rohrinneisen als auch auf die sandgestrahlten Oberflächen der Kraftübertragungselemente aufgebracht. Nach dem Fügen beider Partner wurde der Klebstoff in einem Umluftofen für 2 h bei 65°C ausgehärtet. Dieser Aushärtezyklus führt zu einer maximalen Scherfestigkeit des Klebers von 30 MPa [87]. Durch das beidseitige Verschließen der Torsionswellen mit den Kraftübertragungselementen wurde mit einer Ausdehnung der eingeschlossenen Luft während der Heißaushärtung gerechnet. Durch die Erhöhung des Innendrucks könnte es zu einer axialen Verschiebung der Kraftübertragungselemente kommen. Um dies zu vermeiden, verfügte ein Kraftübertragungselement pro Torsionswelle über eine Entlüftungsbohrung.

Während der Torsionsprüfung wurden die Dehnungsfelder der Torsionswellen mittels der DIC-Methode optisch gemessen. Zu diesem Zweck wurden die Torsionswellen nach dem Klebevorgang mit einem weißschwarzen Sprengmuster versehen (Abb. 7-16). Das Sprengmuster ermöglicht das Dehnungsfeld von ca. einem Drittel des Wellenumfangs zu vermessen.

7.5 Torsionsprüfung

7.5.1 Durchführung der Prüfung

Die Torsionsprüfungen erfolgten an einer statischen Torsionsprüfmaschine der Firma Walter+Bai AG mit einem maximalen statischen Torsionsmoment von 16 kNm. Zur Aufnahme der Dehnungsfelder wurde das 3D-Messsystem Aramis 4M (Fa. GOM GmbH) verwendet. Das nachfolgende Bild (Abb. 7-15) zeigt den Messaufbau bestehend aus Aramismesssystem, Prüfmaschine und einseitig eingespannter Torsionswelle

(unteres Prismaspannbackenfutter). Abb. 7-16 zeigt eine detaillierte Aufnahme der Torsionswelle (ebenso nur einseitig eingespannt).



Abb. 7-15: Messaufbau an der Torsionsprüfmaschine



Abb. 7-16: Detaillierte Aufnahme der gesprenkelten Torsionswelle

In Anlehnung an die ASTM D5448/D5448M – 16 wurde eine Verdrehgeschwindigkeit von $2 \frac{\circ}{min}$ gewählt. Die Dehnungsfeldmessung wurde mit einer Bildrate von $2 s^{-1}$ durchgeführt.

7.5.2 Ergebnisse der Torsionsprüfung

In Abb. 7-17 sind die maximalen Torsionsmomente aller Torsionswellenkonfigurationen aufgetragen. Das maximale Torsionsmoment der Referenzproben liegt bei ca. 3438 Nm. Da die Drehrichtung im Falle der Referenzproben keinen Einfluss auf die mechanische Leistungsfähigkeit hat, setzt sich der Durchschnittswert aus den vier Referenzproben zusammen. Die größten Einbußen des Torsionsmoments von ca. 17 % (gegenüber der Referenz) auf 2864 Nm wurden bei den VAP-Proben verzeichnet, die durch ein Drehmoment in negativer Drehrichtung belastet wurden. Die restlichen Probenkonfigurationen zeigen ähnliche Werte wie die fehlerfreie Referenz.

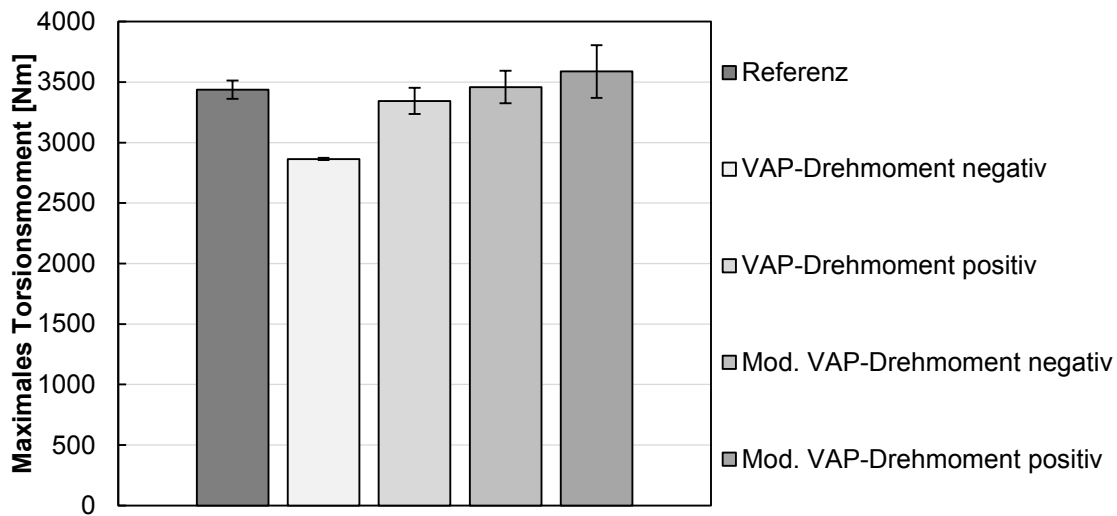


Abb. 7-17: Maximale Torsionsmomente aller Prüfkörperkonfigurationen

Da durch die Torsion grundsätzlich eine Schubbelastung induziert wird, wurden im Zuge der Auswertung die Schubfestigkeiten τ_{max} auf Basis des maximalen Torsionsmoments und der geometrischen Daten der Torsionswellen bestimmt [72]:

$$\tau_{max} = \frac{T_{max} \cdot r_{max}}{J} \quad (7-2)$$

Wobei das Torsionsflächenmoment nach folgender Formel berechnet wurde:

$$J = \frac{\pi}{32} \cdot (d_{au\beta en}^4 \cdot d_{innen}^4) \quad (7-3)$$

Somit ergeben sich folgende Schubfestigkeiten der verschiedenen Prüfkörperkonfigurationen (Abb. 7-18):

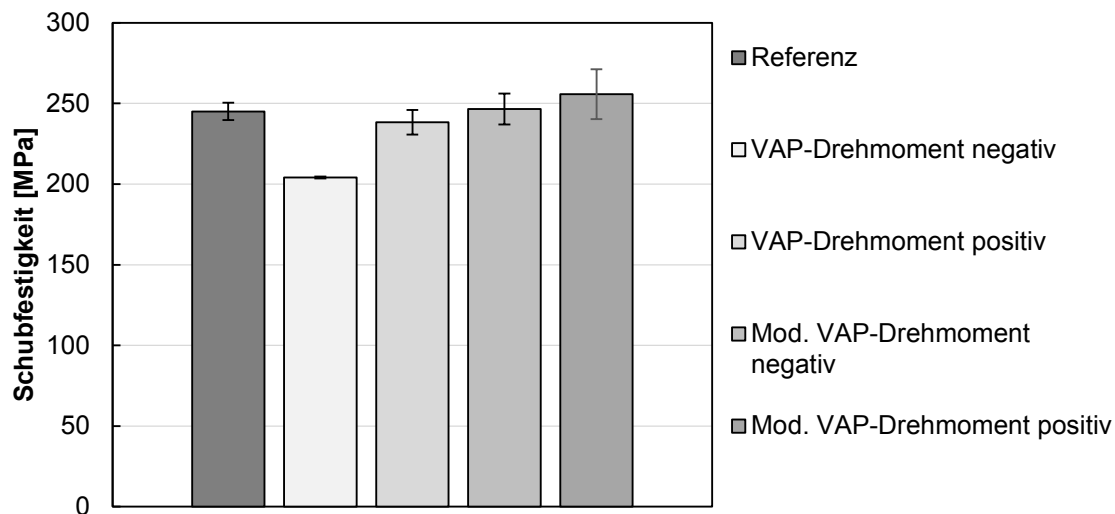


Abb. 7-18: Schubfestigkeit aller Prüfkörperkonfigurationen

Aufgrund der konstanten Messwerte der Innendurchmesser und der Wandstärken der Torsionsproben (siehe hierzu Abb. 7-11 und Abb. 7-13) ergeben sich die gleichen Tendenzen, wie bei der Betrachtung der maximalen Torsionsmomente. Dies bestätigt die Güte der Prüfkörper.

Mit Hilfe des Aramissystems können verschiedene Dehnungen visualisiert werden. Das Programm kann den Wert der Schubdehnung allerdings nicht direkt ausgeben. Die Schubdehnung kann aber auf zwei Arten bestimmt werden:

- Nach ASTM-Norm D5448 wird die Schubdehnung, wie folgt bestimmt [84]:

$$\gamma_{12} = \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7-4)$$

Zur Ausgabe der Dehnung in 1- und 3-Richtung muss das Koordinatensystem in Aramis gedreht werden.

- Für kleine Schubdehnung kann folgende Näherung ebenso verwendet werden:

$$\gamma_{12} = 2 \cdot \varepsilon_{xy} \quad (7-5)$$

ε_{xy} ist ein Winkel und setzt sich aus der Dehnung in x- und y-Richtung zusammen, was direkt von Aramis ausgegeben werden kann.

Die Schubdehnung wurde auf beide Arten bestimmt und es wurden exakt gleiche Ergebnisse erzielt, wie in Abb. 7-19 zu erkennen ist. Es wurden zwei Laststufen pro Sekunde aufgenommen.

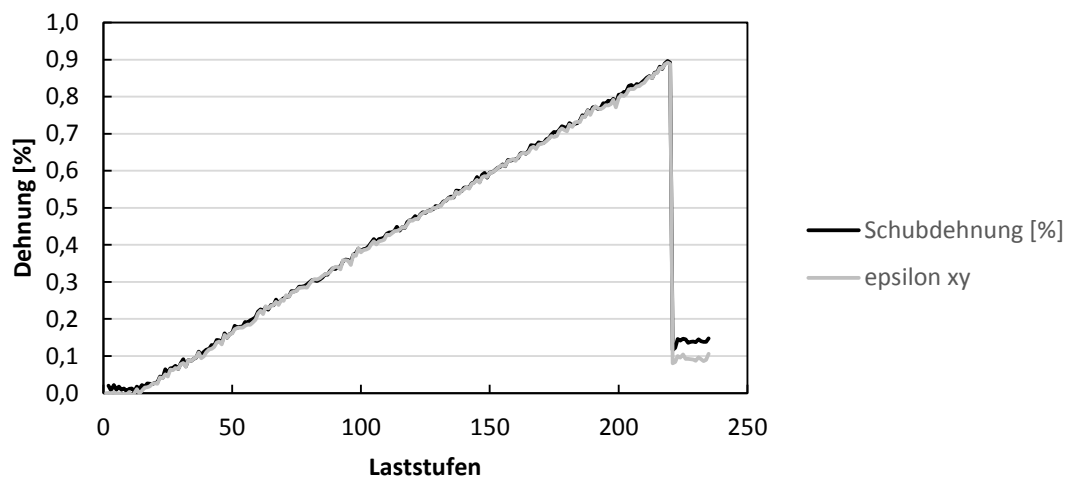


Abb. 7-19: Schubdehnung über Laststufen und Epsilon xy über Laststufen

In Abb. 7-20 werden die Schubdehnungen der verschiedenen Konfigurationen dargestellt. Der Abfall der mechanischen Kennwerte der „VAP-Drehmoment negativ“-Probenkonfiguration kann, trotz größerer Ergebnisstreuung, ebenso in den Schubdeh-

nungswerten festgestellt werden. Die relativ großen Streuungen können auf die Inhomogenität des Textils zurückgeführt werden.

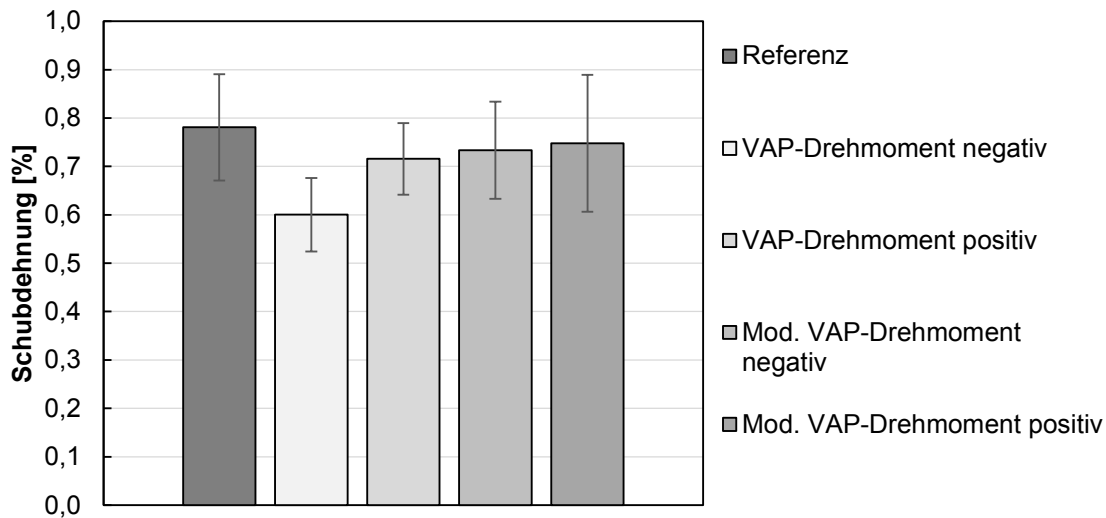


Abb. 7-20: Schubdehnungen aller Prüfkörperkonfigurationen

7.5.3 Diskussion der Ergebnisse

Zur Deutung der Ergebnisse der Torsionstests werden Vergleiche mit den Coupontests durchgeführt. Die Coupontests basierten auf einem generischen Extremfall (sechs Garnlücken in sechs Geflechtlagen), wobei die Torsionswellen über eine Garnlücke in drei Geflechtlagen verfügten. Obwohl dadurch die Wandstärkenreduktion und die Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte nicht exakt gleich sind, können trotzdem qualitative Vergleiche zwischen beiden Untersuchungen gezogen werden.

7.5.3.1 Garnlückenfreie Referenzen hergestellt im VAP-Verfahren – positives/negatives Drehmoment

Die fehlerfreien Referenztorsionswellen erreichen durchschnittlich ein maximales Torsionsmoment von ca. 3438 Nm bzw. eine Schubfestigkeit von 245 MPa. Abb. 7-21 (oben) zeigt eine repräsentative Referenztorsionswelle (T700 R1), die in positiver Drehrichtung belastet wurde. Die Drehrichtung wurde durch Pfeile an den Rohrenden markiert. Die Probe versagte bei einem Drehmoment von 3544 Nm in Form eines in $+45^\circ$ verlaufenden Bruchs. Eine genaue Erklärung für diesen Sachverhalt gibt der Vergleich mit den Ergebnissen den mechanischen Prüfungen der Referenzcoupons. Hier wird auf Abschnitt 6 verwiesen, wo die Ergebnisse der Coupontests genauer ausgeführt werden.

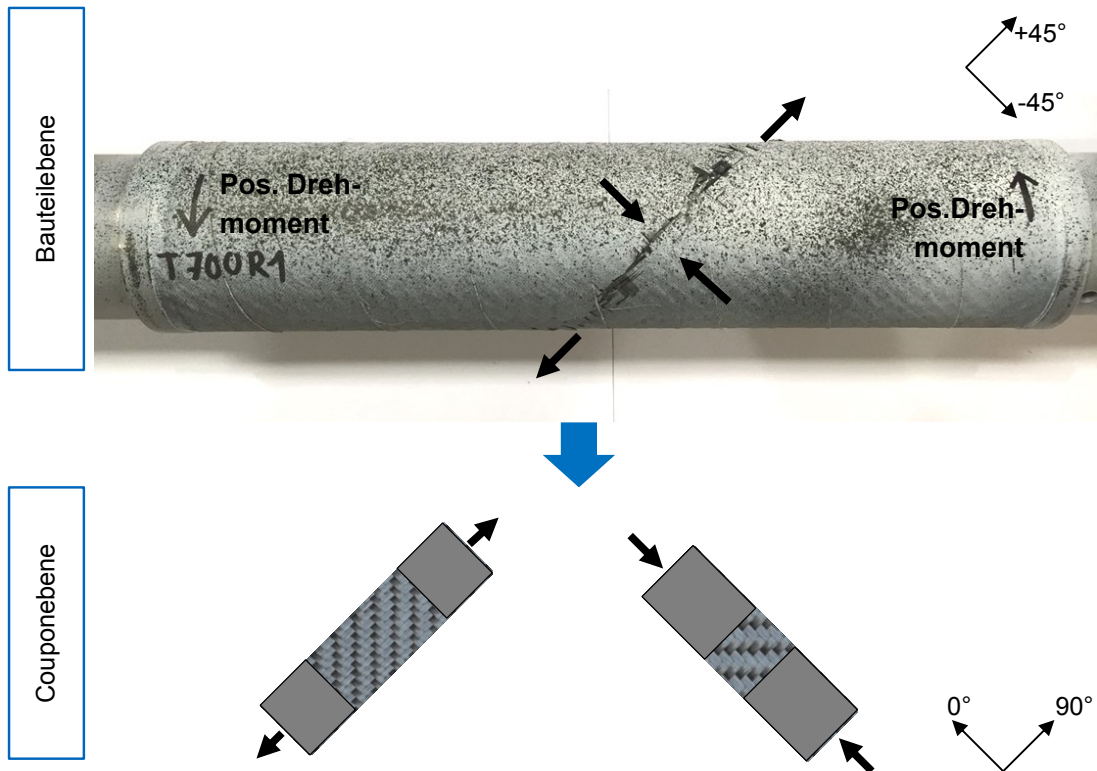


Abb. 7-21: Zerstörte fehlerfreie Referenztorsionswelle (T700 R1) nach positivem Drehmoment und dem Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern

Die fehlerfreien Referenzcoupons zeigen eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 502 MPa und eine durchschnittliche Zugfestigkeit von 792 MPa. Die Druckfestigkeit des Geflechts ist somit kleiner als seine Zugfestigkeit. Der Schubspannungszustand in einer Torsionswelle kann auf zwei Hauptspannungszustände aufgeteilt werden. Im Fall einer positiven Drehrichtung werden in den $+45^\circ$ -Garnen Zugspannungen und in den -45° -Garnen Druckspannungen induziert. Diese Lasten in der Torsionswelle sind in Abb. 7-21 (oben) durch Pfeile am Bruch dargestellt. Betragsmäßig sind die beiden Zug- und Druckspannungen gleich, da die spannungsverursachende Verformung in beiden Garnrichtungen identisch ist. Die Spannungen in beiden Garnrichtungen steigen während der Verformung simultan an, bis die Festigkeit einer der Garnrichtungen erreicht ist – in diesem Fall der Druckfestigkeit. Somit versagen die unter Drucklast stehenden -45° -Garne in einem Bruch senkrecht zur Belastungsrichtung (in $+45^\circ$ -Richtung).

Abb. 7-22 zeigt einen Ausschnitt aus der Software „Aramis“ und visualisiert die Verteilung von ε_{xy} der T700 R1-Probe eine Zeitstufe vor dem Bruch der Welle. Dort ist ein Ausschnitt der Wellenlänge von ca. 200 mm dargestellt, welcher die freie Prüfkörperlänge von 170 mm enthält. Der ε_{xy} -Wert besitzt bei positiver oder negativer Torsionsrichtung ebenso ein positives oder negatives Vorzeichen. In diesem Fall entstehen bei positiver Drehrichtung positive ε_{xy} -Werte. Die äußeren blauen Bereiche repräsentieren die Verklebung der Krafteinleitungselemente an denen keine oder nur geringe

Dehnungen festzustellen sind. Im Bereich der freien Länge ergibt sich aufgrund der Inhomogenität der textilen Struktur des Geflechts eine breite Verteilung der ε_{xy} -Werte, die anhand der Farbverteilung visualisiert werden.

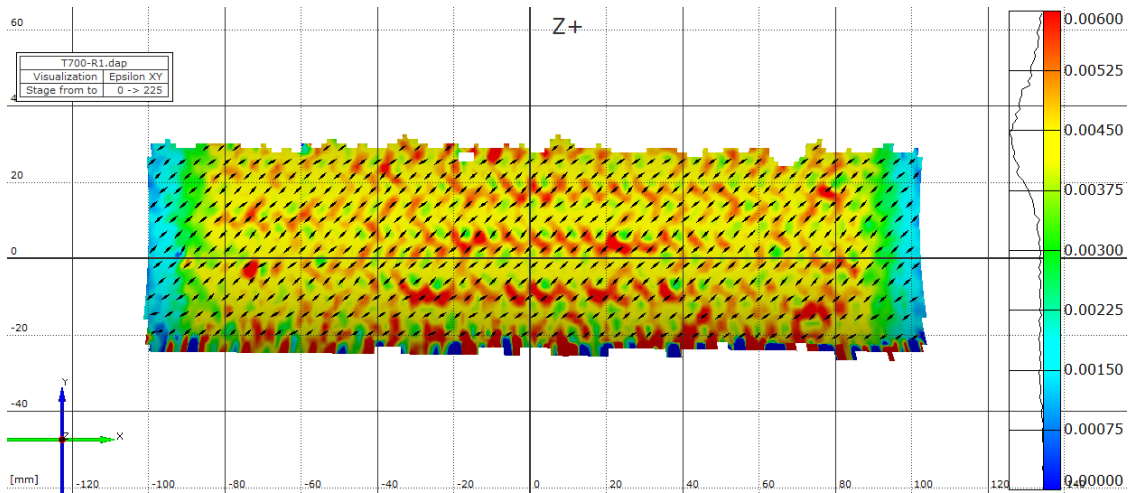


Abb. 7-22: Epsilon-xy-Feld der T700 R1-Probe eine Zeitstufe vor totalem Versagen. Drehung in positiver Richtung

Abb. 7-23 zeigt eine Referenztorsionswelle (T700 R4), die mit einem negativen Drehmoment belastet wurde. Dementsprechend wurden die Garne in $+45^\circ$ -Richtung auf Druck belastet, während die -45° -Garne auf Zug beansprucht wurden. Erneut wurde ein Druckversagen des Rohrs festgestellt. In diesem Fall versagen die in $+45^\circ$ -Richtung verlaufenden Garne unter einem -45° -Bruch. Es greift hier die gleiche Erklärung wie bei der T700 R1-Probe, wobei sich die Bruchverläufe entsprechend ändern. Die Festigkeiten einer fehlerfreien Torsionswelle sind unter positiven und negativen Drehmoment gleich, daher erreicht auch die T700 R4-Probe ein maximales Torsionsmoment von 3383 Nm.

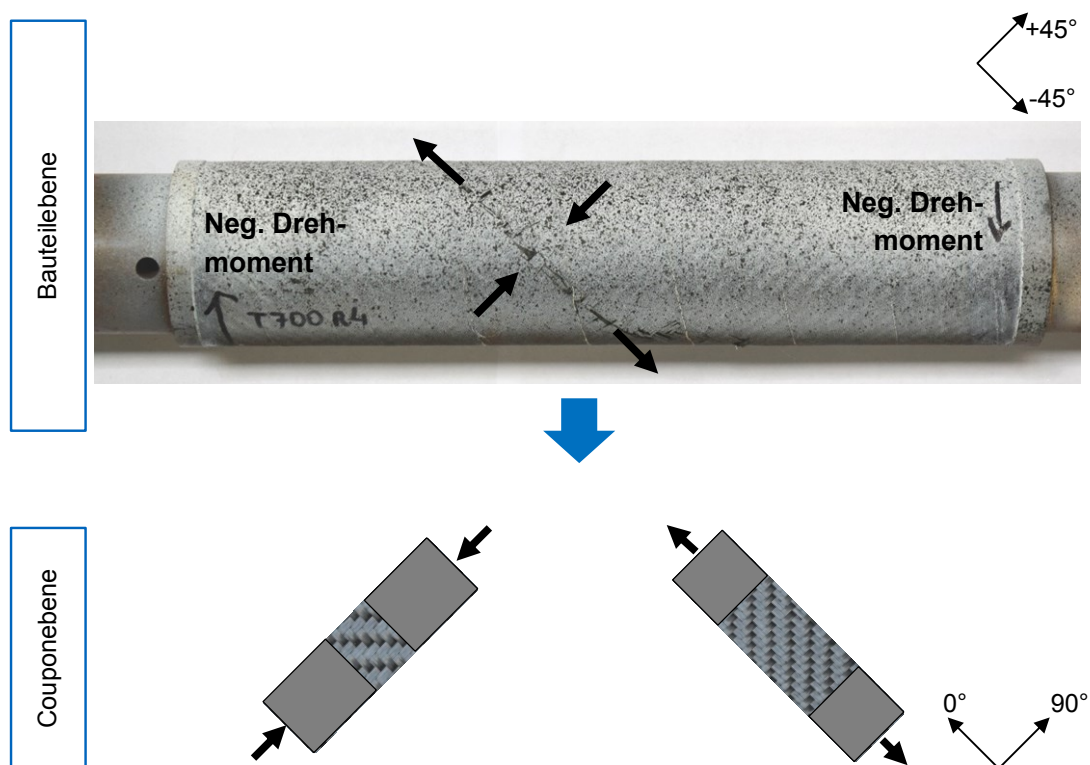


Abb. 7-23: Zerstörte fehlerfreie Referenztorsionswelle (T700 R4) nach negativem Drehmoment und der Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern

Unabhängig von der Drehrichtung versagen die Referenztorsionswellen stets unter Drucklast. Diese Beobachtungen konnten auch Brandmayr et al. feststellen, allerdings konnte aus der vorliegenden Veröffentlichung keine exakte Erklärung für diesen Sachverhalt gezogen werden [81].

7.5.3.2 Lückenbehaftete Torsionswellen hergestellt im VAP-Verfahren – negatives Drehmoment

Im Falle der lückenbehafteten Torsionswellen (Garnlücke in -45°), die im standardisierten VAP-Verfahren hergestellt und mit negativem Drehmoment beaufschlagt wurden, wurden Reduktionen des maximalen Torsionsmoments festgestellt. Durchschnittlich sinkt das Torsionsmoment um 17 % auf 2864 Nm im Vergleich zur fehlerfreien Referenz. Abb. 7-24 (oben) zeigt eine zerstörte Torsionswelle (T700 V2) mit einer Garnlücke in -45° nach einer Torsionsbelastung in negativer Drehrichtung. Dieser Belastungszustand führt zu einem Bruch entlang der Garnlücke in -45° . Hier bieten die Coupontests ebenso eine Erklärung für das Versagenverhalten der Torsionswelle. Die relevanten Couponprüfungen sind in Abb. 7-24 (unten) abgebildet.

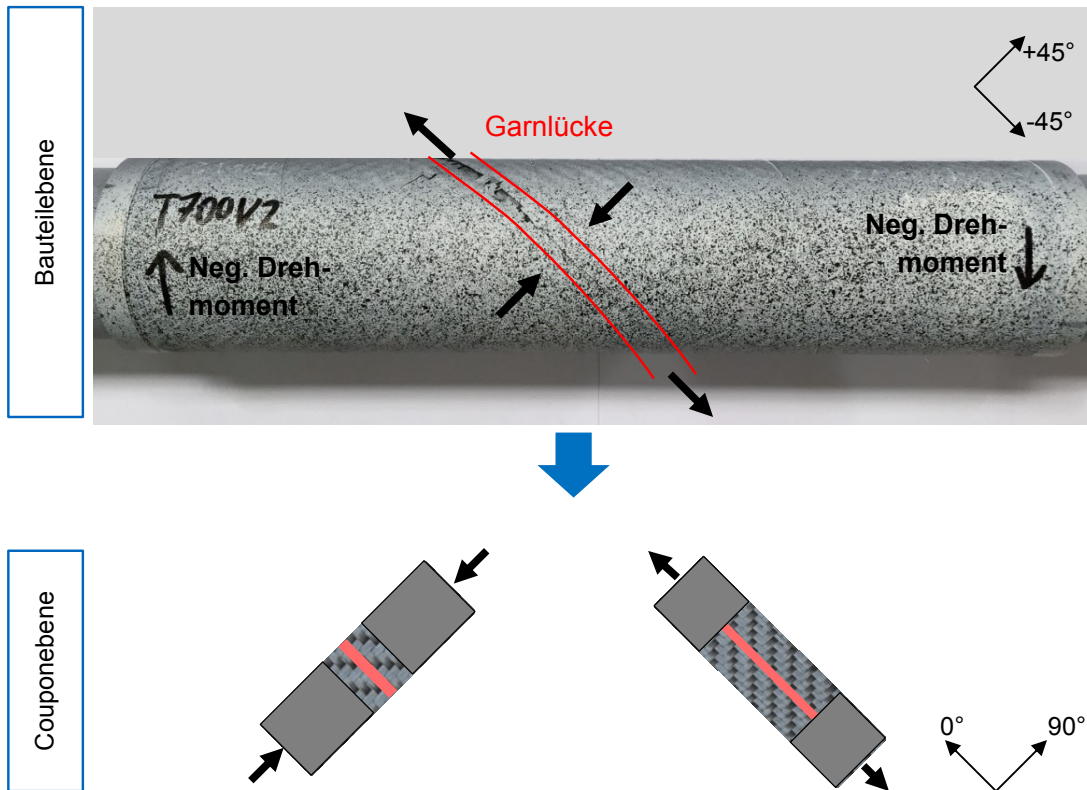


Abb. 7-24: Zerstörte VAP-Probe (T700 V2) nach negativen Drehmoment und der Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern

Die Druckfestigkeit des Lücke 90°-Druckcoupons ist deutlich geringer als die Zugfestigkeit des Lücke 0°-Zugcoupons. Diese Resultate der Couponprüfungen wurden bereits in Abschnitt 6 erwähnt. Es ist damit zu rechnen, dass bei einer einzelnen Garnlücke die Verhältnisse der Festigkeiten ähnlichen sind. Bei der Torsion der Welle werden die gleichen Verformung und somit die gleichen Spannungen in beiden Garnrichtungen eingebracht. Da bei dieser Torsionswellenkonfiguration die Druckfestigkeit der +45°-Garne geringer ist als die Zugfestigkeit der -45°-Garne, versagt die Welle aufgrund eines Bruchs der unter Druck stehenden +45°-Garne. Der Bruch verläuft in -45°-Richtung entlang der Garnlücke bzw. senkrecht zu den Druckgarnen. In diesem Fall ist die Druckfestigkeit aufgrund der Garnlücke noch geringer als die Druckfestigkeit der Referenz, weswegen ein Abfall des Torsionsmoments von 17 % zu erklären ist. Die Garnlücke führt zu einer lokalen Schwächung des Laminats. Die Wandstärke wird reduziert und die Garnondulation erhöht. Diese Untersuchungsergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit den Resultaten von Brandmayr, Erber und Schmidt [81–83]. Alle drei Literaturquellen bestätigen eine Reduktion der Leistungsfähigkeit von Torsionswellen bei lokalen Erhöhungen der Garnondulation.

Das ε_{xy} -Feld der T700 V2-Probe ist in Abb. 7-25 dargestellt, welches eine Stufe vor dem Versagen aufgenommen wurde. Erneut sind nur geringe ε_{xy} -Werte an den Krafteinleitungselementen und eine inhomogene Verteilung von ε_{xy} in der freien Prüf-

körperlänge zu erkennen. Da in negativer Richtung gedreht wurde, besitzen die ε_{xy} -Werte ein negatives Vorzeichen. Obwohl das Kraftniveau in der gesamten Welle gleich ist, erfährt das Material an der Stelle der Garnlücke im Betrag deutlich höhere Dehnungen als in der restlichen Welle. Diese Dehnungserhöhungen weist auf einen Steifigkeitsabfall hin, der wiederum auf die Wandstärkenabnahme und die Garnondulationserhöhung zurückzuführen ist.

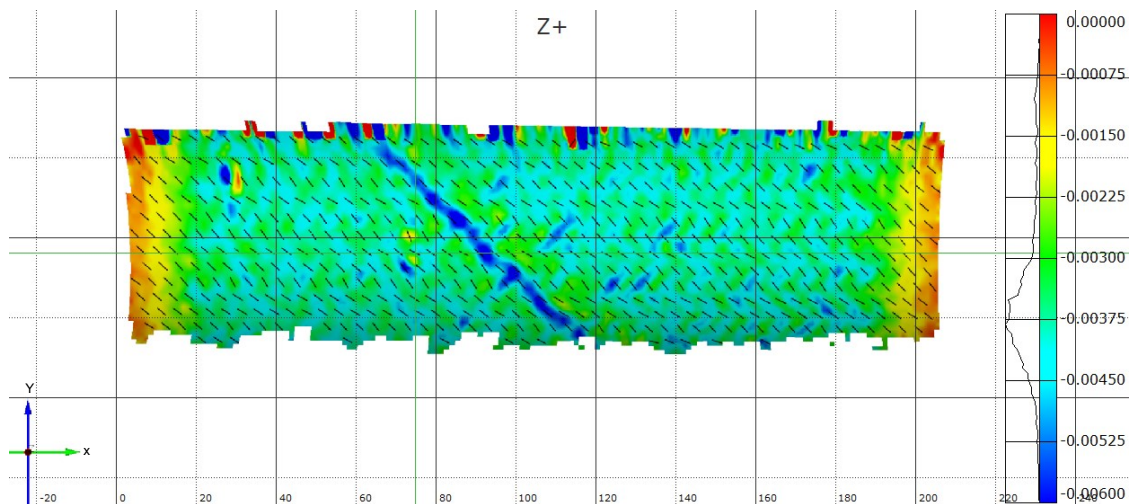


Abb. 7-25: Epsilon-xy-Feld der T700 V2-Probe eine Zeitstufe vor totalen Versagen. Drehung in negativer Richtung

7.5.3.3 Lückenbehaftete Torsionswellen hergestellt im VAP-Verfahren – positives Drehmoment

Die lückenbehafteten VAP-Torsionswellen, welche mit einem positiven Drehmoment beaufschlagt wurden, zeigen eine leichte aber nicht eindeutige Minderung des maximalen Torsionsmoments. Diese Probenkonfiguration verfügt über eine Garnlücke in -45° -Richtung, versagt aber senkrecht dazu in $+45^\circ$ (Abb. 7-26 oben). Dieses Ergebnis kann erneut mit den Resultaten der entsprechenden Coupontests (vgl. Abb. 7-26 unten) erklärt werden. Erneut ist auf Kapitel 6 zu verweisen, in dem die Ergebnisse der Coupontests genau beschrieben sind.

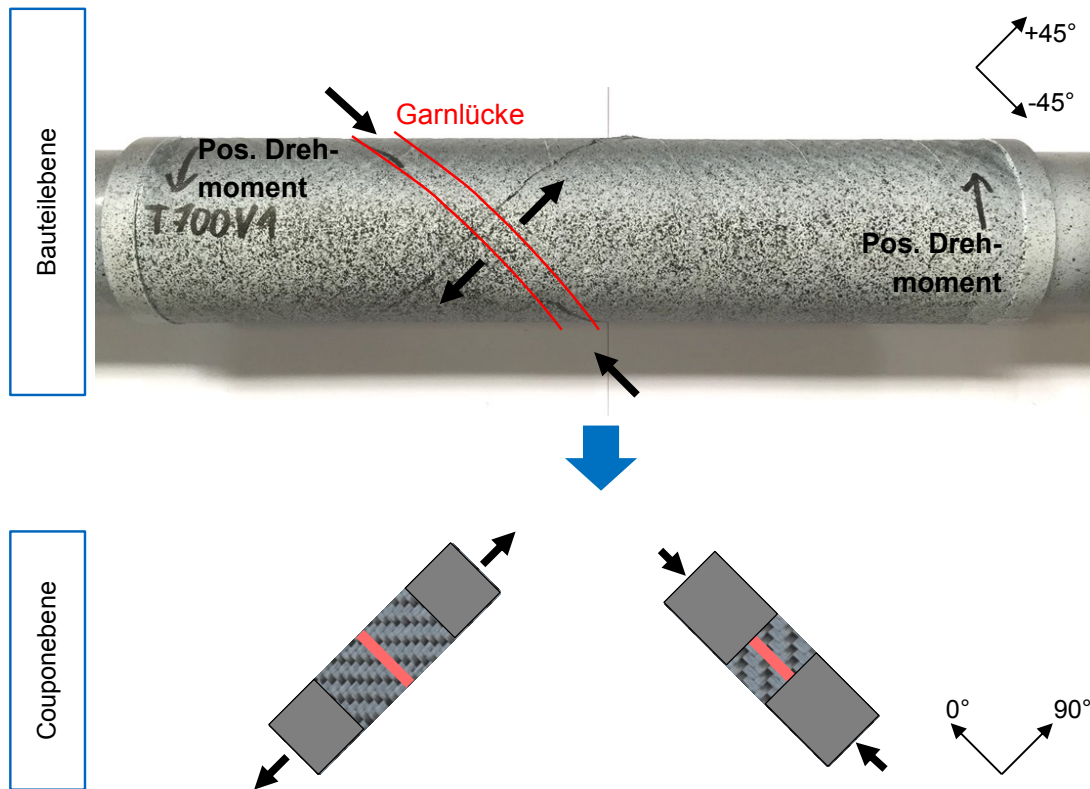


Abb. 7-26: Zerstörte VAP-Probe (T700 V1) nach positiven Drehmoment und der Vergleich zu den entsprechenden Couponprüfkörpern

Eine Zuglast senkrecht zur Längsausrichtung der Garnlücke führt zu einer 36-%igen Reduktion der Couponzugfestigkeit (im Vergleich zur Referenz) auf 506,9 MPa. Eine Druckbelastung parallel zur Längsausrichtung der Garnlücke ergibt eine Druckfestigkeitsminderung der Coupons durchschnittlich um 25,2 % (verglichen zur Referenz) auf 375,7 MPa. Die Coupondruckfestigkeit ist somit kleiner als die Couponzugfestigkeit. Bei einer einzelnen Garnlücke ist mit geringeren Reduktionen aber mit den gleichen Verhältnissen der Festigkeiten zu rechnen. Bei der Belastung der Torsionswelle erfahren beide Garnrichtungen die gleichen Verformungen und somit die gleichen Spannungen. Es versagen die Garne der Torsionswelle, die auf Druck belastet werden, da diese eine geringere Festigkeit besitzen. Allerdings ist der relative Abfall des maximalen Torsionsmoments deutlich geringer als der relative Abfall der Druckfestigkeit der lückenbehafteten Druckcoupons. Die einzelne Garnlücke hat geringere Einflüsse auf die Garnstruktur und die Mechanik als mehrere übereinanderliegende Garnlücken.

Das nachfolgende Bild (Abb. 7-27) zeigt die Verteilung der ε_{xy} -Werte eine Zeitstufe vor dem Versagen der Welle. Der überwiegende Teil der Torsionswelle zeigt ein ε_{xy} von ca. 0,004, wobei im Bereich der Garnlücke höhere Werte von mindestens 0,006 vorhanden sind.

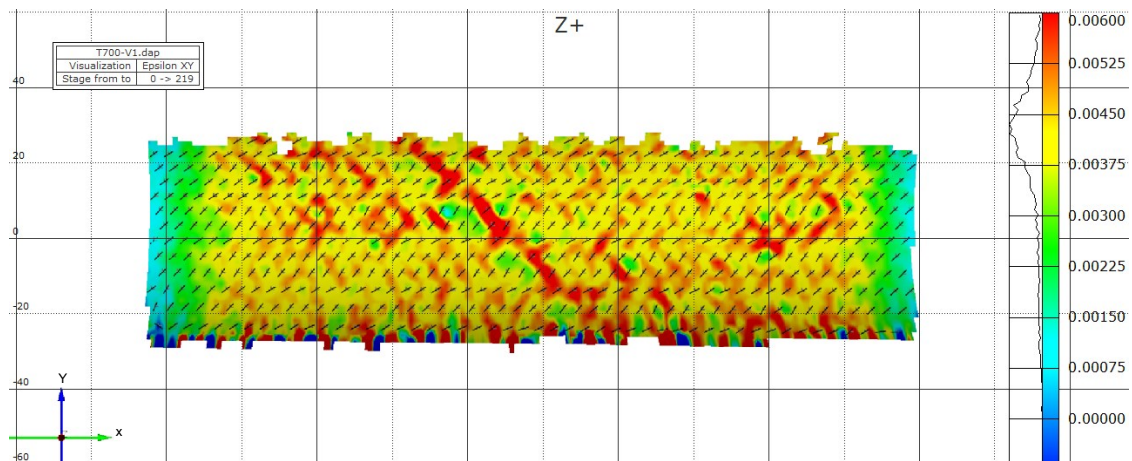


Abb. 7-27: Epsilon-xy-Feld der T700 V1-Probe eine Zeitstufe vor totalen Versagen. Drehung in positiver Richtung

7.5.3.4 Lückenbehaftete Torsionswellen hergestellt im modifizierten VAP-Verfahren – positives /negatives Drehmoment

Die lückenbehafteten Torsionswellen, die im modifizierten VAP-Verfahren hergestellt wurden, zeigen sowohl bei einem positiven als auch bei einem negativen Drehmoment keinen Abfall des maximalen Torsionsmoments. Während dieser Infiltrationsmethode verhindert das Druckblech eine lokale Wandstärkenreduktion und somit eine lokale Garnondulationszunahme der Torsionswelle. Es bildet sich stattdessen an der Stelle der Garnlücke ein Reinharzgebiet. Wie bereits die Ergebnisse der Coupontests gezeigt haben, ist ein lokales Reinharzgebiet hinsichtlich statischer mechanischer Belastungsfähigkeit (in den Hauptspannungszuständen: Zug und Druck) eines Geflechts unkritisch. Dieses Ergebnis wird somit auch im komplexeren Schubspannungszustand einer geflochtenen biaxialen Torsionswelle bestätigt. Erneut ist das Druckversagen der Wellen die dominierende Versagensform. Bei positiver Drehrichtung versagt die T700 M3-Probe in $+45^\circ$ -Richtung (Abb. 7-28) aufgrund von Drucklast.

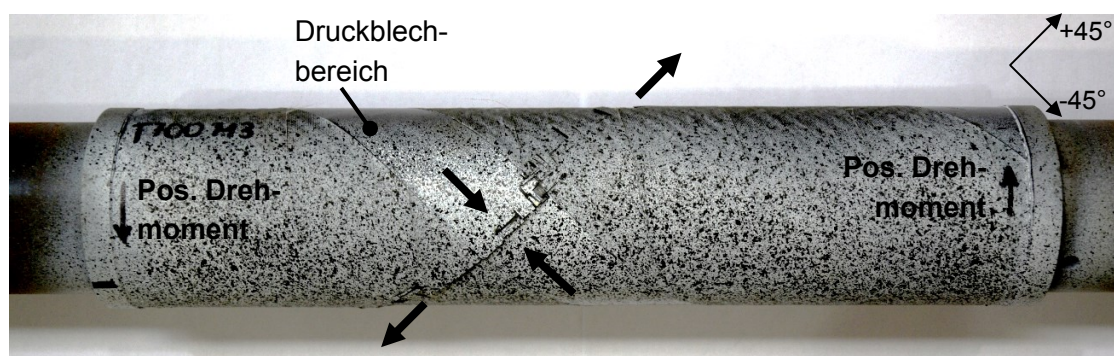


Abb. 7-28: Zerstörte T700 M3-Probe nach positiven Drehmoment

Im Fall einer negativen Drehrichtung verläuft der Bruch T700 M2-Probe in -45° (Abb. 7-29), was erneut ein Druckversagen darstellt. Der Bruch dieser Probe verläuft nicht durch die Garnlücke sondern parallel dazu. In beiden Abbildungen (Abb. 7-28; Abb. 7-29) kann der Bereich des Druckblechs deutlich von der restlichen Probe unterschieden werden.

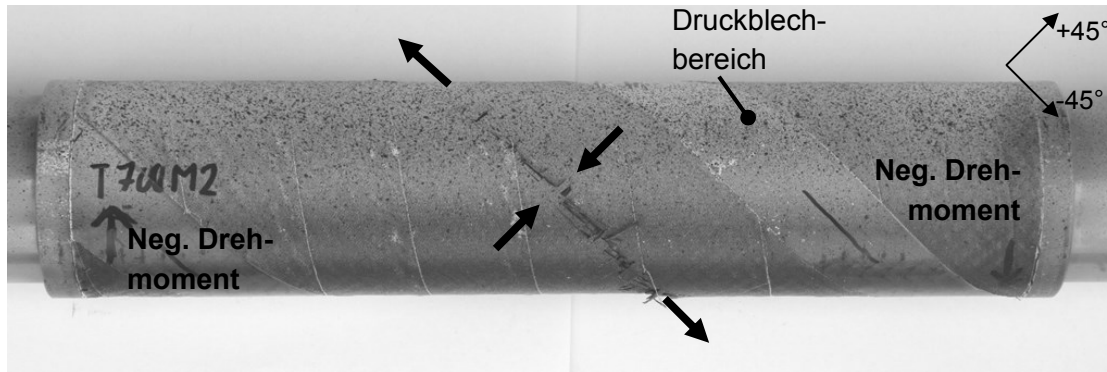


Abb. 7-29: Zerstörte T700 M2-Probe nach negativem Drehmoment

Das Bruchverhalten der T700 M-Torsionswellen unterscheidet sich nicht von den Referenztorsionswellen. Ebenso sind keine Unterschiede in der Schubdehnung zu erkennen, weswegen die Aramisdaten hier nicht gezeigt werden.

7.6 Fazit

Auf Basis der Resultate der Coupontests konnten die Ergebnisse der mechanischen Prüfung der Torsionswellen erklärt werden. Bei der Prüfung einer Torsionswelle werden die gleichen Verformung und somit die gleichen Spannungen in beiden Garnrichtungen des biaxialen Geflechts eingebracht. Die Druckfestigkeit eines Garnsystems ist dabei stets geringer als die Zugfestigkeit des korrespondierenden Garnsystems. Das gilt sowohl bei einer fehlerfreien als auch einer lückenbehafteten Torsionswelle, weswegen alle Wellen einheitlich aufgrund eines Bruchs der Garne, die unter Druck belastet werden, versagen.

Tab. 7-3 führt die wichtigsten Ergebnisse der Torsionswellenversuche zusammen. Die Torsionswellen, die im modifizierten VAP-Aufbau hergestellt wurden, zeigen im Vergleich zur fehlerfreien Referenz keine Änderungen des maximalen Torsionsmoments – dies gilt in beiden Drehrichtungen. Dieses Ergebnis ist auf die konstante Wandstärke und die Verhinderung einer lokalen Zunahme der Garnondulation zurückzuführen. Eine Reduktion des Faservolumengehalts ist unter diesen Belastungen unkritisch. Auswirkungen von Garnlücken auf die Mechanik konnten somit nur bei Wellen festgestellt werden, die im standardisierten VAP-Verfahren hergestellt worden sind. In diesem Fall führen die Garnlücken zu einer Wandstärkenreduktion und einer Erhöhung der Garnondulation. Bei einem positiven Drehmoment verläuft diese Inhomogenität parallel zu den Garnen, die unter Druck belastet werden. Diese Konstellation führt zu

vernachlässigbaren Reduktionen des maximalen Torsionsmoments. Verläuft die Garnlücke senkrecht zu den unter Druck belasteten Garnen (Drehmoment negativ) sind deutliche Reduktionen des maximalen Torsionsmoments festzustellen (-17 %).

Tab. 7-3: Übersicht des Einflusses von Garnlücken auf das maximale Torsionsmoment einer Torsionswelle

	Drehmoment positiv	Drehmoment negativ
Mod. VAP	Keine Reduktion von T_{\max}	Keine Reduktion von T_{\max}
VAP	Leichte Reduktion von T_{\max} (-4 %)	Deutliche Reduktion von T_{\max} (-17 %)

Alle Angabe im Vergleich zur fehlerfreien Referenz

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Entstehung und die Auswirkung von Garnlücken auf die mechanische Leistungsfähigkeit von Faserverbunden auf Basis von Carbonbiaxialgeflechten untersucht.

Durch die Untersuchung von gängigen Geflechtfehlern mittels der Fehler-, Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) wurde die Garnlücke als kritischster Fehler, welcher während der Produktion von Geflechtbauteilen auftritt, identifiziert. Die Analyse der Flechtprozesskette ergab, dass sich Geflechtfehler entlang der Flechtprozesskette fortpflanzen. Die Folge eines Fehlers, der während eines Schrittes der Flechtprozesskette auftritt, ist gleichzeitig die Ursache eines weiteren Fehlers, der während des darauffolgenden Prozessschritts entsteht. Für jeden einzelnen Prozessschritt wurde eine FMEA durchgeführt, welche sich aufgrund der Interaktionen der Fehler zwischen den Prozessschritten ebenso überschneiden. Dies ermöglichte es die unterschiedlichen Fortpflanzungsstufen zu bewerten und die kritischste initiale Fehlerursache der Garnlücke herauszufinden – die Garnschädigung.

Die Schädigung eines Garns ist anhand von gebrochenen und aus der Garnstruktur ragenden Filamentfragmenten festzustellen. Während des Umspulprozesses erzeugen die abstehenden Filamentfragmente Verhakungen zwischen den Garnlagen auf der Flechtspule. Während des Abspulvorgangs werden aufgrund der Verhakungen Filamenten aus dem abgezogenen Garn herausgelöst und verbleiben auf dem Umfang der Flechtspule in Form eines Filamentrings. Diese Ergebnisse wurden mit Versuchen untermauert, bei denen das Garn künstlich geschädigt und somit die Garnschädigung rekonstruiert wurde. Neben der Garnschädigung ist die Verlegung des Garns auf der Flechtspule entscheidend für die Bildung von Filamentringen.

Ein Filamentring behindert das Abspulen des Flechtgarns. Die Spannungserhöhung dieses Zuggarns verhält sich dynamisch. Um dieses dynamische Verhalten während des Flechtprozesses besser zu studieren, wurde die Garnspannungserhöhung stufenweise rekonstruiert. Ein Klöppel wurde mit einer Umschlingungsbremse ausgestattet, die es erlaubte, definiert erhöhte Garnspannungen zu erzeugen. Im Rahmen dieser Versuche wurde festgestellt, dass das Zuggarn in der Konvergenzzone der Flechtmaschine einen flacheren Verlauf als die restlichen Garne beschreibt. Der Unterschied im Garnverlauf resultiert in einer Garnlücke zwischen dem Zuggarn und dem benachbarten Garn. Die Erhöhung der Garnspannung wurde mit Hilfe einer Prozesskraftmessung

erfasst und die Garnlücke mittels eines optischen Messgeräts vermessen. Die Korrelation beider Messwerte ermöglichte die Charakterisierung der Garnlücke. Die Änderung des Garnverlaufs nimmt bei einer spezifischen Garnspannung ein Maximum an, was ebenso als maximale Garnlückenbreite im Geflecht resultiert. Es wurden zwei Biaxialgeflechte untersucht und beide besaßen ein individuelles Maximum der Garnlückenbreite. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurden Flechtspulen im Flechtprozess verarbeitet, welche entsprechend präpariert waren, damit diese Filamentringe erzeugen. Es konnten die Ergebnisse der definiert erhöhten Garnspannungen bestätigt werden.

Die Auswirkungen von Garnlücken auf die mechanischen Eigenschaften eines Geflechtverbunds wurden sowohl auf Coupon- als auch auf Bauteilebene untersucht. Die Coupons wurden im Rahmen von Zug-, Druck- und Schubversuchen geprüft. Als weitere Versuchsparameter dienten zwei LCM-Prozesse und verschiedene Ausrichtungen der Garnlücke. In Abhängigkeit des LCM-Prozesses entstanden auf Basis eines lückenbehafteten Geflechts unterschiedliche Inhomogenitäten. In einem Halbschalenprozess, wie dem VAP-Prozess, erzeugt die Garnlücke eine Wandstärkenreduktion und somit eine Erhöhung der Garnondulation. Beim RTM-Verfahren hingegen, das auf zwei steifen Werkzeughälften basiert, werden an der Position der Garnlücke eine konstante Wandstärke und eine lokale Minderung des Faservolumengehalts erzeugt. Da die Garnlücke eine längliche Ausprägung besitzt, war die Lückenausrichtung ein weiterer Versuchsparameter. Im Rahmen der Zug- und Druckprüfungen (Garnausrichtung $0^\circ/90^\circ$) verliefen die Garnlücken entweder parallel oder senkrecht zur Belastungsrichtung. Die Schubprüfkörper basierten auf $\pm 45^\circ$ -Garnen und besaßen Garnlücken mit einer $+45^\circ$ -Ausrichtung. Um die Auswirkungen, die die Garnlücken auf mechanische Eigenschaften eines Geflechtverbunds besitzen, deutlich zu erkennen, wurde ein generischer Extremfall verfolgt. Die Prüfkörper verfügten über Garnlücken, die übereinander in allen Lagen des Prüfkörpers eingebracht wurden. Die Garnlücken wurden händisch in fehlerfreie Geflechte eingebracht. Lückenbehaftete Geflechte, welche im VAP-Verfahren verarbeitet werden und zu Wandstärkenreduktionen bzw. starker Garnondulation führen, sind kritisch für die Mechanik des Geflechtverbunds. Besonders sensibel reagiert ein Geflechtverbund, wenn diese Inhomogenität senkrecht zur Zug- und Drucklast verläuft. Hier werden die Festigkeiten um 36 % bzw. 33 % reduziert. Wird das gleiche lückenbehaftete Geflecht mittels des RTM-Verfahrens weiterverarbeitet, sind keine Änderungen der Zugeigenschaften und nur geringe Änderungen der Druckeigenschaften zu verzeichnen. Eine lokale Minderung des Faservolumengehalts ist unter diesen Umständen unkritisch für garndominierte Verbundkennwerte. Der sensibelste Lastfall (VAP-Probe mit senkrecht verlaufender Garnlücke) war Grundlage für Untersuchungen von einzelnen Garnlücken. Eine Garnlücke in einer Lage reduziert die Zugfestigkeit eines zweilagigen Verbunds um 20 % und eines sechslagigen Verbunds um 11 %. Die Garnlücken wurden daraufhin in einem komplexeren Spannungszustand auf Bauteilebene untersucht. Es wurde eine Garnlücke in eine einzelne Lage einer Torsionswellen eingebracht und auf zwei unterschiedliche Arten infiltriert. Das maximale Torsionsmoment einer lückenbehafteten Torsionswelle, die über eine lokale

Wandstärkenreduktion aufgrund einer Garnlücke verfügt, wird um 17 % im Vergleich zu einer fehlerfreien Torsionswelle reduziert. Im Gegensatz dazu wird keine Minderung des Torsionsmoments festgestellt, wenn die Torsionswelle über eine lokale Faservolumengehaltsminderung aufgrund einer Garnlücke verfügt. Die Ergebnisse der Couponprüfungen wurden durch die Untersuchungen auf Bauteilebene bestätigt.

Um den Kreis zur FMEA zu schließen, muss der B-Wert der Garnlücke in der FMEA₁ (Tab. 3-4 in 3.2.2) konkretisiert werden¹. Hier ist eine deutliche Abgrenzung zwischen RTM- und VAP-Prozessierung zu treffen. Garnlückenbehaftete RTM-Coupons zeigen nur im Schubversuch klare aber nicht überdurchschnittlich große Abfälle der mechanischen Eigenschaften. Im Rahmen der Zugversuche sind keine und in den Druckversuchen nur bedingte Reduktionen im Vergleich zur fehlerfreien Referenz erkennbar ($B_{RTM}=2$). Die VAP-Prüfkörper zeigen hingegen besonders in den Zug- und Druckkennwerten deutliche Abfälle verglichen mit der lückenfreien Referenz. Der Wert B_{VAP} wird auf 8 festgelegt.

Die Untersuchungen dieser Arbeit beweisen, dass unter prozessrelevanten Aspekten die Garnlücke als kritischster Geflechtfehler zu erachten ist. Die initiale Ursache der Garnlücke liegt zumeist im ersten Schritt der Flechtprozesskette. Dies ermöglicht es die Fehlerursache zu einem frühen Zeitpunkt in der Prozesskette zu identifizieren und auch zu eliminieren. Diese Arbeit liefert des Weiteren einen Beitrag zu den Untersuchungen von Auswirkungen von Geflechtfehlern auf die mechanischen Eigenschaften eines Geflechtverbunds. Die Auswirkungen eines garnlückenbehaftetes Geflechts hängen vom LCM-Prozess ab, in dem das Geflecht mit Harz getränkt wird. Auf der einen Seite reagiert ein Geflechtverbund unter statischer Zug- und Drucklast kritisch auf Wandstärkenreduktion bzw. Garnondulationserhöhungen. Auf der anderen Seite reagiert ein Geflechtverbund unter statischer Zug- und Drucklast unkritisch auf lokale Faservolumengehaltsreduktionen.

¹ Diese neue Bewertung wurde nicht innerhalb der in Abschnitt 3 erwähnten Expertengruppe durchgeführt.

8.2 Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen zur Entstehung von Filamentringen wurde die Garnschädigung als kritischste Fehlerursache identifiziert. Allerdings zeigt die FMEA, dass die Garnlagerung und der Schlichtegehalt ebenso Ursachen für die Filamentringbildung sein können. Entscheidend sind die Interaktionen zwischen den Garnlagen auf der Flechtspule, welche ebenso durch den Schlichtegehalt und das Garnalter beeinflusst werden. Untersuchungen zur Bildung von Filamentringen mit kontrolliertgealterten und Garnen mit unterschiedlichen Schlichtegehalten sollten durchgeführt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass beide untersuchten Biaxialgeflechte eine maximale Garnlückenbreite besitzen. Prinzipiell besitzt jedes Geflecht eine maximale Garnlückenbreite. Diese ist abhängig von Geflechttyp, Bindungsart, Flechtwinkel, Garnliter, Garnspannung, etc.. Es bedarf weiterer Untersuchungen, die die Ausprägung der Garnlücke in Abhängigkeit dieser Parameter in den Fokus setzen. Ist die maximale Garnlückenbreite für ein spezifisches Geflecht bekannt, kann dieses entsprechend dieser Garnlückenbreite ausgelegt werden.

In dieser Arbeit wurden lückenbehafteten Geflechte (auf Coupon- und Bauteilebene) ausschließlich unter statischer Last geprüft. Da Bauteile im Betrieb Fatiguelasten ausgesetzt sind, müssen garnlückenbehaftete Prüfkörper auch dahingehend charakterisiert werden. Speziell lokale Reinharzgebiete, die im statischen Fall kaum oder nur geringe Auswirkungen besitzen, werden im Rahmen von Lebensdaueruntersuchungen deutlicherer Auswirkungen zeigen. Dies konnte bereits in anderen Forschungsvorhaben unter Beweis gestellt werden [37]. Reinharzgebiete sind Bereiche, die anfällig sind für die Initiierung von Rissen, die im weiteren Verlauf der Fatigueuntersuchungen zu Delaminationen und vorzeitigem Versagen des Prüfkörpers führen.

Die Fehlerfortpflanzung entlang der Flechtprozesskette ermöglicht die indirekte Detektion von Geflechtfehlern. Vorherige Forschungsvorhaben detektierten Geflechtfehler zum Teil mit optischer Sensorik [88]. Dies birgt die Nachteile, dass diese Fehler sich bereits im Endstadium befinden und die optische Detektion meist kostenintensiv ist. Durch die Detektion einzelner Fehlerentwicklungsstufen ist es möglich günstigere Sensorik zu verwenden und den Fehler zu erkennen, bevor dieser sein finales Stadium im Geflecht erreicht hat.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Sauer, M. Kühnel, and E. Witten, *Composites-Markt 2017: Marktentwicklungen, Trends Ausblicke und Herausforderungen*.
- [2] BMW Group, *BMW Group Vertriebsmeldung November 2017*. München, 2017.
- [3] R. Abele, *Keine Angst vor hohen Stückzahlen*. [Online] Available: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/bei-bmw-wird-carbon-erstmal-in-serie-produziert-15076765/boerse-sgl-aktie-auf-neuem-15084881.html>. Accessed on: Nov. 07 2017.
- [4] S. Schaper, “Braided preforms for the BMW i3,” Symposium on the occasion of the 5th anniversary of the Institute for Carbon Composites. Garching, Sep. 2014.
- [5] Hering, Triemel, Blank, E. Hering, and J. Braun, Eds., *Qualitätsmanagement für Ingenieure_2003 // Qualitätsmanagement für Ingenieure: Mit 116 Tabellen*, 5th ed. Berlin, Heidelberg, New York, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer, 2003.
- [6] *Garne*, 60900 Teil 1.
- [7] *Textilien - Grundbegriffe*, 60 000.
- [8] J. Goodwin, “Optimal design of a high speed rotary braider,” Dissertation, The Department of Mechanical, Marine and Production Engineering, Liverpool Polytechnic, Liverpool, 1990.
- [9] T. Gries, D. Veit, and B. Wulfhorst, Eds., *Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung*, 2nd ed. München: Hanser, 2015.
- [10] N.A., *Horizontalflechtmaschine HS 216*. [Online] Available: http://www.steeger-online.de/deutsch/programm_horizontal_hs216.php. Accessed on: Feb. 09 2018.
- [11] C. Ebel, “Hochgeschwindigkeitsumflechten für die Fertigung von Faserverbundbauteilen,” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2017.
- [12] E. Laourine, “Geflochtene Halbzeuge und Flechttechniken,” in *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken, Verfahren ; Materialien, Eigenschaften*, C. Cherif, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, pp. 307–325.
- [13] Y. Kyosev, *Braiding technology for textiles*. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2015.
- [14] C. Scarponi, “Applications of braided structures in aerospace engineering,” in *Composite Materials : analysis and design, Braided structures and composites: Productions, properties, mechanics and technical applications*, S. Rana and R. Figueiro, Eds., Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016, pp. 231–253.

- [15] K. Bilisik, N. S. Karaduman, N. E. Bilisik, “Applications of braided structures in transportation,” in *Composite Materials : analysis and design, Braided structures and composites: Productions, properties, mechanics and technical applications*, S. Rana and R. Figueiro, Eds., Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016, pp. 255–295.
- [16] R. S. Parnas, *Liquid composite molding*. Munich, Cincinnati: Hanser; Hanser Gardner Publications, 2000.
- [17] J. Filsinger, T. Lippert, F. Stadler, S. Utecht, “Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mittels eines Injektionsverfahrens,” DE10140166 B4, Deutschland DE2001140166, Sep 3, 2009.
- [18] C. Ebel, A. Mierzwa, and K. Kind, “Yarn damage during braiding of reinforcement fibers for composites,” in *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*, Y. Kyosev, Ed., San Diego: Elsevier Science, 2016, pp. 319–354.
- [19] T. von Reden, “Erweiterung der Systemgrenzen der Flechttechnik durch elektronisch gesteuerte Klöppel,” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [20] Y. Kyosev, Ed., *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*. San Diego: Elsevier Science, 2016.
- [21] A. Erber, A. Weng, K. Drechsler, “Effect of designed yarn damages on the out-of-plane properties of braided composite parts,” in *Recent advances in textile composites: October 26-28, 2010, Lille Grand Palais, Lille, France*, 2010, pp. 490–497.
- [22] M. Mitwalsky, “Strategien zur Steigerung der Variabilität bei der Herstellung von geflochtenen Hohlbauteilen,” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [23] P. J. Falzon, I. Herszberg, “Mechanical performance of 2D braided carbon/epoxy composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 58, pp. 253–265, 1998.
- [24] E. Archer, S. Buchanan, A. T. McIlhagger, and J. P. Quinn, “The effect of 3D weaving and consolidation on carbon fiber tows, fabrics, and composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, no. 20, pp. 3162–3170, 2010.
- [25] S. Rudov-Clark, A. P. Mouritz, L. Lee, and M. K. Bannister, “Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, no. 10, pp. 963–970, 2003.
- [26] F. Heieck, F. Hermann, P. Middendorf, and K. Schladitz, “Influence of the cover factor of 2D biaxial and triaxial braided carbon composites on their in-plane mechanical properties,” *Composite Structures*, vol. 163, pp. 114–122, 2017.

- [27] K. Birkefeld, "Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten," Dissertation, Institut für Flugzeugbau, Universität von Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [28] G. W. Ehrenstein, *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*, 2nd ed. München [u.a.]: Hanser, 2006.
- [29] C. Baoxing and T.-W. Chou, "Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation," *Composites Science and Technology*, vol. 60, 2000.
- [30] J. Cichosz, "Experimental Characterization and Numerical Modeling of the Mechanical Response for Biaxial Braided Composites," Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [31] J. Wang, K. D. Potter, K. Hazra, and Wisnom, "Experimental fabrication and characterization of out-of-plane fiber waviness in continuous fiber-reinforced composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 46, no. 17, pp. 2041–2053, 2011.
- [32] K. D. Potter, M. Campbell, C. Langer, and M. R. Wisnom, "The generation of geometrical deformations due to tool/part interaction in the manufacture of composite components," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 2, pp. 301–308, 2005.
- [33] J.F. Mandell, D.D. Samborsky, L.Wang, "Effect of fiber waviness on composites for wind turbine blades," Department of Chemical Engineering, Montana State University.
- [34] B. Khan, K. D. Potter, M. R. Wisnom, "Simulation of process induced defects in resin transfer moulded woven carbon fibre laminates and their effect on mechanical behaviour," in *The 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM8)*, Douai, France, 2006.
- [35] A. Altmann, "Matrix dominated effects of defects on the mechanical properties of wind turbine blades," Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [36] L.D. Bloom, J. Wang, K. D. Potter, "Damage progression and defect sensitivity: An experimental study of representative wrinkles in tension," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 449–458, 2013.
- [37] S. Hörrmann, A. Adumitroaie, C. Viechtbauer, M. Schagerl, "The effect of fiber waviness on the fatigue life of CFRP materials," *International Journal of Fatigue*, vol. 90, pp. 139–147, 2016.
- [38] D. H.-J. Lukaszewicz, C. Ward, and K. D. Potter, "The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 997–1009, 2012.

- [39] A. T. Rhead, T. J. Dodwell and R. Butler, "The effect of tow gaps on compression after impact strength of robotically laminated structures," Composites Research Unit Department of Mechanical Engineering, University of Bath.
- [40] K. Fayazbakhsh, A. N. Mahdi, P. Damiano, L. Lessard, "Defect layer method to capture effect of gaps and overlaps in variable stiffness laminates made by Automated Fiber Placement," *Composite Structures*, vol. 97, pp. 245–251, 2013.
- [41] O. Falcó, "Variable-Stiffness Composite Panels: Defect tolerance under in-plane tensile loading," *Preprint submitted to Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014.
- [42] K. Croft, L. Lessard, D. Pasini, M. Hojjati, J. Chen, A. Yousefpour, "Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 5, pp. 484–491, 2011.
- [43] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, C. Baley, "Microstructure and tensile properties of carbon–epoxy laminates produced by automated fibre placement: Influence of a caul plate on the effects of gap and overlap embedded defects," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, pp. 124–134, 2015.
- [44] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, and C. Baley, "Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon–epoxy laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 82, pp. 198–207, 2016.
- [45] S. Mukhopadhyay, M. I. Jones, and S. R. Hallett, "Tensile failure of laminates containing an embedded wrinkle; numerical and experimental study," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 77, pp. 219–228, 2015.
- [46] S. Mukhopadhyay, M. I. Jones, and S. R. Hallett, "Compressive failure of laminates containing an embedded wrinkle; experimental and numerical study," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 73, pp. 132–142, 2015.
- [47] S. Mukhopadhyay, O. J. Nixon-Pearson, and S. R. Hallett, "An experimental and numerical study on fatigue damage development in laminates containing embedded wrinkle defects," *International Journal of Fatigue*, vol. 107, pp. 1–12, 2018.
- [48] M. R. Piggott, "The effect of fibre waviness on the mechanical properties of unidirectional fibre composites: A review," *Composites Science and Technology*, vol. 53, pp. 201–205, 1995.
- [49] A. M. Mrse and M. R. Piggott, "Compressive properties of unidirectional carbon fibre laminates: I. A compact flexure beam for compression testing," *Composites Science and Technology*, vol. 46, no. 3, pp. 213–217, 1993.

- [50] H. M. Hsiao, I.M. Daniel, "Effect of fiber waviness on stiffness and strength reduction of unidirectional composites under compressive loading," *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 581–593, 1996.
- [51] H.M. Hsiao, I. M. Daniel, "Elastic properties of composites with fiber waviness," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 10, pp. 931–941, 1996.
- [52] H.J. Chun, J.-Y. Shin, I. M. Daniel, "Effects of material and geometric nonlinearities on the tensile and compressive behavior of composite materials with fiber waviness," *Composites Science and Technology*, vol. 61, pp. 125–134, 2001.
- [53] P. Davidson and A. M. Waas, "The effects of defects on the compressive response of thick carbon composites: An experimental and computational study," *Composite Structures*, vol. 176, pp. 582–596, 2017.
- [54] O. Ruger and K. Kind, *Interview zu: FMEA der Flechtprozesskette*. Ottobrunn, 2016.
- [55] Toray, "Torayca® T700S technical data sheet," 2016. Accessed on: 2016.
- [56] A. Mierzwa, C. Ebel, T. Harbers, K. Drechsler, "Investigation on creation of fibrous rings and their influence on the braided preform quality," in *ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials*, Munich, Germany, 2016.
- [57] S. Johne, *Kurzinformation zu D-optimalen Versuchsplanen: Software - Schulungen und Workshops*. Statgraphics™.
- [58] Toho Tenax, "IMS65 E23 technical data sheet," 2016. Accessed on: 2016.
- [59] S. Beverungen, "IMS 65 E23", E-Mailverkehr mit Toho Tenax, Feb. 2016.
- [60] R. Klinger, "T700 50C", E-Mailverkehr mit Toray, Feb. 2016.
- [61] SGL Group, "SIGRAFIL® technical data sheet," 2016. Accessed on: 2016.
- [62] J. H. van Ravenhorst and R. Akkerman, "Overbraiding simulation," in *Advances in Braiding Technology*, pp. 431–455.
- [63] A. Mierzwa, C. Ebel, K. Drechsler, "Auswirkungen lokaler Garnlucken auf die mechanischen Eigenschaften geflochtener Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde," *Kunststofftechnik*, vol. 14, no. 2, pp. 146–173, 2018.
- [64] C. Baoxing, E. J. Lang, and T.-W. Chou, "Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 317, no. 1-2, pp. 188–196, 2001.
- [65] Z. Yousaf, P. Potluri, and P. J. Withers, "Influence of Tow Architecture on Compaction and Nesting in Textile Preforms," *Applied Composite Materials*, vol. 24, no. 2, pp. 337–350, 2017.

- [66] R. Saunders, C. Lekakou, and M. Bader, "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, no. 7, pp. 983–993, 1999.
- [67] R. A. Saunders, C. Lekakou, and M. G. Bader, "Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, no. 4, pp. 443–454, 1998.
- [68] S. V. Lomov, I. Verpoest, T. Peeters, D. Roose, M. Zako, "Nesting in textile laminates: Geometrical modelling of the laminate," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 7, pp. 993–1007, 2003.
- [69] M. Olave *et al.*, "Nesting effect on the mode I fracture toughness of woven laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 74, pp. 166–173, 2015.
- [70] M. Olave *et al.*, "Nesting effect on the mode I fracture toughness of woven laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 74, pp. 166–173, 2015.
- [71] L. Li, Y. Zhao, J. Yang, J. Zhang, and Y. Duan, "An experimental investigation of compaction behavior of carbon non-crimp fabrics for liquid composite molding," *Journal of Materials Science*, vol. 50, no. 7, pp. 2960–2972, 2015.
- [72] *Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture*, D6641/D6641M – 09, 2009.
- [73] *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*, DIN-EN-ISO-527-4.
- [74] *Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45 Laminate*, ASTM-D3518.
- [75] Spunfab Ltd., "Spunfab ® PA1300 technical data sheet," Accessed on: 2016.
- [76] Hexcel Corporation, "HexFlow® RTM6: 180°C mono-component epoxy system for Resin Transfer Moulding and Infusion technologies," Product Data, Dec. 2014. Accessed on: 2016.
- [77] S. Bickerton, "Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 15, pp. 2215–2229, 1999.
- [78] P. Davidson, A. M. Waas, "Effect of fiber waviness on the compressive strength of unidirectional carbon fiber composites," in *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 2012.

- [79] R. Basan, “Untersuchung der intralaminaren Schubeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen mit Epoxidharzmatrix unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte,” Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2011.
- [80] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen*, 1st ed. Berlin: Springer, 2004.
- [81] F. Brandmayr, R. Thomas, H. Rapp, “Hochbeanspruchte CFK-Torsionsrohre in verschiedenen Fertigungsverfahren: Test und Versagensformen,” Augsburg, Dec. 2 2015.
- [82] A. Erber, A. Weng, K. Drechsler, “The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts,” in *Composites - innovative materials for smarter solutions: SEICO 09 ; SAMPE Europe 30th international jubilee conference and forum ; March 23-25th 2009, Paris ; proceedings 2009*, 2009, pp. 364–371.
- [83] F. Schmidt, M. Rheinforth, P. Horst, and G. Busse, “Effects of local fibre waviness on damage mechanisms and fatigue behaviour of biaxially loaded tube specimens,” *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 10, pp. 1075–1082, 2012.
- [84] *Test Method for Inplane Shear Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders*, 2016.
- [85] LOCTITE®, “LOCTITE® FREKOTE 700NC-EN,” Accessed on: 2016.
- [86] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [87] 3M, “Scotch-Weld™ DP 490,” 2016.
- [88] F. Hees, “Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben: "Wirtschaftliche Serienfertigung textiler Preforms mittels Umflechtverfahren durch Integration automatisierter Handlingsmethoden und online Qualitätssicherung": IGF-Vorhaben 17158 N,” Institut für Unternehmenskybernetik e. V.r

A Anhang

a Experimentelle Daten

Umpulparameter (4. Abschnitt)

Tab. A-1: Umpulparameter der Versuchsspulen

Versuchsspule	Umpulparameter					Ergebnisse	
	Umpulrehzahl [1/min]	Verlegung [mm]	Garnspannung [N]	Travesenumkehrpunkt [mm]	Garnschädigung [-]	Abzugslänge [m]	Abbruch [-]
N1	0,2	4	G	-6	0	50	0
N2	2	10	4	-6	0	50	0
N3	2	4	8	-6	0	6,75	1
N4	2	4	16	-6	0	13,46	1
N5	0,2	10	16	-6	0	50	0
N6	0,2	4	4	0	0	50	0
N7	2	8	16	0	0	50	0
N8	2	4	4	6	0	50	0
N9	0,2	10	4	6	0	50	0
N10	0,2	4	16	6	0	43,21	1
N11	2	10	16	6	0	50	0
N12	2	4	4	-6	1	4,46	1
N13	0,2	10	4	-6	1	50	0
N14	0,2	4	8	-6	1	4,74	1
N15	2	8	8	-6	1	37,59	1
N16	0,2	4	16	-6	1	6,53	1
N17	2	4	16	-6	1	4,81	1
N18	2	10	16	-6	1	21,18	1
N19	0,2	10	8	0	1	8,72	1
N20	2	4	4	3	1	29,42	1
N21	0,2	4	4	6	1	50	0
N22	0,2	8	4	6	1	50	0
N23	2	10	4	6	1	34,63	1
N24	2	4	16	6	1	2,82	1
N25	2	8	16	6	1	37,41	1
N26	0,2	10	16	6	1	5,87	1
N27	2	8	8	0	1	11,79	1
N28	2	8	8	0	1	32,69	1
N29	2	8	8	0	1	49,19	1
N30	0,2	4	4	-6	0	50	0
N31	2	10	4	-6	0	50	0
N32	2	4	8	-6	0	22,25	1
N33	2	4	16	-6	0	50	0
N34	0,2	10	16	-6	0	50	0
N35	0,2	4	4	0	0	50	0

Versuchsspule	Umspulparameter					Ergebnisse	
	Umspuldrehzahl [1/min]	Verlegung [mm]	Garn- spannung [N]	Travesenum- kehrpunkt [mm]	Garn- schädigung [-]	Abzugslänge [m]	Abbruch [-]
N36	2	8	16	0	0	50	0
N37	2	4	4	6	0	50	0
N38	0,2	10	4	6	0	50	0
N39	0,2	4	16	6	0	50	0
N40	2	10	16	6	0	50	0
N41	2	4	4	-6	1	9,12	1
N42	0,2	10	4	-6	1	50	0
N43	0,2	4	8	-6	1	9,24	1
N44	2	8	8	-6	1	43,51	1
N45	0,2	4	16	-6	1	2,23	1
N46	2	4	16	-6	1	4,5	1
N47	2	10	16	-6	1	16,64	1
N48	0,2	10	8	0	1	36,56	1
N49	2	4	4	3	1	35,45	1
N50	0,2	4	4	6	1	50	0
N51	0,2	8	4	6	1	50	0
N52	2	10	4	6	1	50	0
N53	2	4	16	6	1	3,48	1
N54	2	8	16	6	1	19,24	1
N55	0,2	10	16	6	1	50	0
N56	2	8	8	0	1	3,03	1
N57	2	8	8	0	1	49,3	1
N58	2	8	8	0	1	42,5	1
N59	0,2	4	4	-6	0	50	0
N60	2	10	4	-6	0	50	0
N61	2	4	8	-6	0	50	0
N62	2	4	16	-6	0	24	1
N63	0,2	10	16	-6	0	50	0
N64	0,2	4	4	0	0	50	0
N65	2	8	16	0	0	50	0
N66	2	4	4	6	0	50	0
N67	0,2	10	4	6	0	50	0
N68	0,2	4	16	6	0	50	0
N69	2	10	16	6	0	50	0
N70	2	4	4	-6	1	13,24	1
N71	0,2	10	4	-6	1	50	0
N72	0,2	4	8	-6	1	4,11	1
N73	2	8	8	-6	1	29,25	1
N74	0,2	4	16	-6	1	3,62	1
N75	2	4	16	-6	1	7,33	1
N76	2	10	16	-6	1	22,29	1
N77	0,2	10	8	0	1	50	0
N78	2	4	4	3	1	50	0
N79	0,2	4	4	6	1	50	0
N80	0,2	8	4	6	1	50	0
N81	2	10	4	6	1	50	0
N82	2	4	16	6	1	12,09	1
N83	2	8	16	6	1	28,13	1
N84	0,2	10	16	6	1	29,86	1
N85	2	8	8	0	1	36,79	1
N86	2	8	8	0	1	6,04	1
N87	2	8	8	0	1	36,4	1

Daten der Prozesskraftmessung (5. Abschnitt)

Tab. A-2: Daten der Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 24k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Mittlere Amplitude [N]		Lückenbreite [mm]	
Wert	STABW	Wert	STABW
5,42	0,79	1,82	0,305
8,16	0,73	2,52	0,469
13,19	1,21	2,86	0,428
18,52	0,92	3,21	0,38
22,52	1,78	3,57	0,12
30,88	2,55	3,82	0,33
40,21	1,33	4,29	0,08
51,78	3,40	4,36	0,30

Tab. A-3: Daten zu Garnlückenbreite über die Mittelwerte der Prozesskraftamplituden A_{Fx} und A_{Fy} eines biaxialen 50k-Geflechts. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Mittlere Amplitude [N]		Lückenbreite [mm]	
Wert	STABW	Wert	STABW
14,76	1,46	3,74	0,32
28,99	1,74	4,48	0,26
39,19	2,49	5,00	0,08
45,81	2,98	5,55	0,34
53,72	5,61	5,95	0,19
71,88	3,51	5,97	0,32

Daten der Garn- und Garnlückenbreiten (5. Abschnitt)

Tab. A-4: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 5,42 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert		4,26	3,81	4,02	4,00	3,95	4,08
	STABW		0,31	0,18	0,35	0,20	0,31	3,57
Lücke [mm]	Wert	0,66	0,30	0,04	1,82	1,24	0,57	1,38
	STABW	0,34	0,22	0,11	0,31	0,41	0,47	0,40

Tab. A-5: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 8,16 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert		3,84	3,62	3,73	3,79	4,19	4,19
	STABW		0,38	0,26	0,12	0,27	0,39	0,36
Lücke [mm]	Wert	1,33	0,02	0,00	2,52	1,14	0,26	1,10
	STABW	0,51	0,06	0,00	0,47	0,42	0,36	0,36

Tab. A-6: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 13,19 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert		3,87	3,50	3,74	3,93	4,09	4,39
	STABW		0,24	0,33	0,11	0,17	0,42	0,29
Lücke [mm]	Wert	0,89	0,00	0,00	2,86	1,12	0,24	1,27
	STABW	0,38	0,00	0,00	0,43	0,34	0,31	0,38

Tab. A-7: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 18,52 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	4,22	3,88	3,18	3,69	4,08	4,47	4,45
	STABW	0,25	0,26	0,26	0,23	0,33	0,17	0,12
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	0,00	3,21	0,31	0,52	0,50
	STABW	0,00	0,00	0,00	0,38	0,33	0,13	0,10

Tab. A-8: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 22,52 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(0)	(1)
Garn [mm]	Wert	3,93	3,44
	STABW	0,30	0,34
Lücke [mm]	Wert	3,57	0,29
	STABW	0,12	0,06

Tab. A-9: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 30,88 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	4,18	3,80	2,98	3,49	4,24	4,48	4,90
	STABW	0,30	0,24	0,30	0,25	0,20	0,20	0,17
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	0,00	3,82	0,00	0,00	0,62
	STABW	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,25

Tab. A-10: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 40,21 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	4,03	3,42	2,86	3,10	4,47	4,73	4,42
	STABW	0,23	0,27	0,35	0,21	0,28	0,08	0,18
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	0,00	4,29	0,44	0,68	0,00
	STABW	0,00	0,00	0,00	0,08	0,17	0,12	0,00

Tab. A-11: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 24k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 51,78 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-3)	(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	4,07	3,23	2,79	2,89	4,48	4,42	4,35
	STABW	0,35	0,30	0,33	0,23	0,26	0,15	0,21
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	0,00	4,36	0,17	0,00	0,00
	STABW	0,00	0,00	0,00	0,30	0,24	0,00	0,00

Tab. A-12: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 14,76 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	6,18	4,93	5,29	6,49	7,04	6,82
	STABW	0,24	0,40	0,39	0,39	0,31	0,35
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	3,74	0,09	0,00	0,00
	STABW	0,00	0,00	0,32	0,13	0,00	0,00

Tab. A-13: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 28,99 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	5,71	4,53	5,09	6,13	6,43	6,70
	STABW	0,40	0,47	0,39	0,20	0,29	0,26
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	4,48	0,14	0,18	0,14
	STABW	0,00	0,00	0,26	0,21	0,27	0,11

Tab. A-14: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 39,19 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	5,73	4,42	4,96	6,26	6,35	6,93
	STABW	0,44	0,50	0,44	0,25	0,39	0,38
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,36
	STABW	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,52

Tab. A-15: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 45,81 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	5,21	4,18	4,56	6,56	7,33	6,37
	STABW	0,31	0,47	0,40	0,25	0,20	0,30
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	5,55	0,00	0,00	1,23
	STABW	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,29

Tab. A-16: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 53,72 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	5,11	4,23	4,12	6,46	7,25	6,67
	STABW	0,38	0,50	0,30	0,33	0,26	0,75
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	5,95	0,10	0,10	0,20
	STABW	0,00	0,00	0,19	0,16	0,14	0,29

Tab. A-17: Garn- und Garnlückenbreiten eines biaxialen 50k-Geflechts. Exemplarisch für eine mittlere Prozesskraftamplitude von 71,88 N. Spannungserhöhung erzeugt durch modifizierten Klöppel

Position		(-2)	(-1)	(0)	(1)	(2)	(3)
Garn [mm]	Wert	4,91	4,03	4,40	6,66	6,65	6,34
	STABW	0,26	0,50	0,48	0,31	0,13	0,41
Lücke [mm]	Wert	0,00	0,00	5,97	0,76	0,79	2,01
	STABW	0,00	0,00	0,32	0,45	0,50	0,29

Prozessdaten zur Couponherstellung (Abschnitt 6.3.2)

Tab. A-18: LCM-Prozessdaten zur Couponherstellung im VAP- und RTM-Verfahren

Parameter	VAP-Verfahren	RTM-Verfahren
Entgasung Harz (Harz bei T=80°C)	$p_{abs} \leq 2 \text{ mbar}$ für 3 min	
Druckabfall	$p_{abs} \leq 2 \text{ mbar}$ $\Delta p \leq 1 \frac{\text{mbar}}{\text{min}}$	
Infiltrationsdruck	$p_{Absaugung} = 5 \text{ mbar}$ $p_{Anguss} = 1000 \text{ mbar}$	$p_{Absaugung} = 5 \text{ mbar}$ $p_{Anguss} = 5000 \text{ mbar}$

Aushärtezyklus (inkl. Harz- und Werkzeugtemperatur) laut Vorgaben des Aushärtezyklus N°1 (Aushärtetemperatur 180°C; Aushärtezeit 2 h) des Datenblatts durchgeführt [76]

Daten der VAP-Zugproben (normiert auf einen FVG=61 %)

Tab. A-19: Übersicht über die Zugfestigkeiten, Zugsteifigkeiten und der Bruchdehnung der VAP-Zugprüfkörper

Probenbezeichnung	Zugfestigkeit [MPa]		Zugsteifigkeit [GPa]		Bruchdehnung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
VAP-Referenz	792,61	16,26	63,09	1,55	1,60	0,03
VAP-Lücke 0°	756,14	20,40	65,74	1,85	1,58	0,14
VAP-Lücke 90°	506,85	41,21	60,20	2,31	0,84	0,18

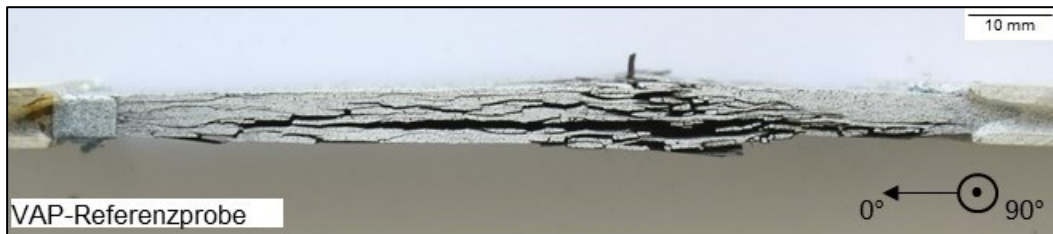


Abb. A-1: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Referenzzugprobe



Abb. A-2: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 0°-Zugprobe

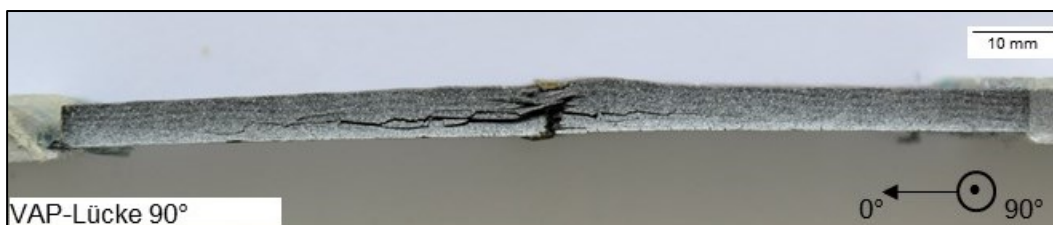


Abb. A-3: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Zugprobe

Daten der RTM-Zugproben (normiert auf einen FVG=61 %)

Tab. A-20: Übersicht über die Zugfestigkeiten, Zugsteifigkeiten und der Bruchdehnung der RTM-Zugprüfkörper

Probenbezeichnung	Zugfestigkeit [MPa]		Zugsteifigkeit [GPa]		Bruchdehnung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
RTM-Referenz	722,16	20,49	59,63	0,63	1,55	0,15
RTM-Lücke 0°	755,00	25,35	63,46	1,99	1,57	0,12
RTM-Lücke 90°	721,83	25,89	60,75	0,78	1,59	0,14



Abb. A-4: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Referenzzugprobe

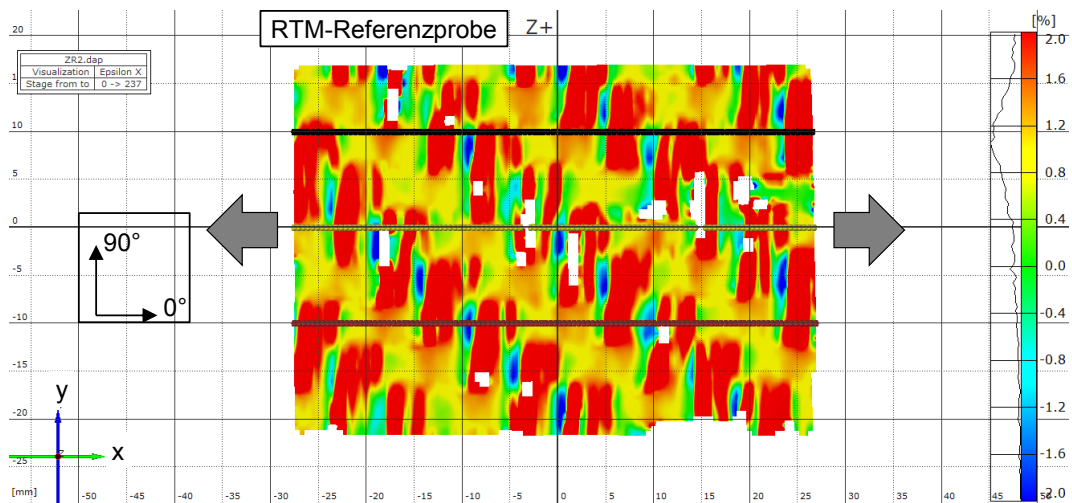


Abb. A-5: Dehnungsfeld einer RTM-Referenzzugprobe mit drei Schnitten in x-Richtung

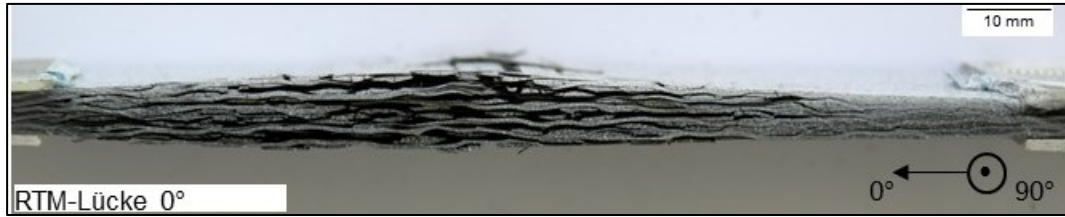


Abb. A-6: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 0°-Zugprobe

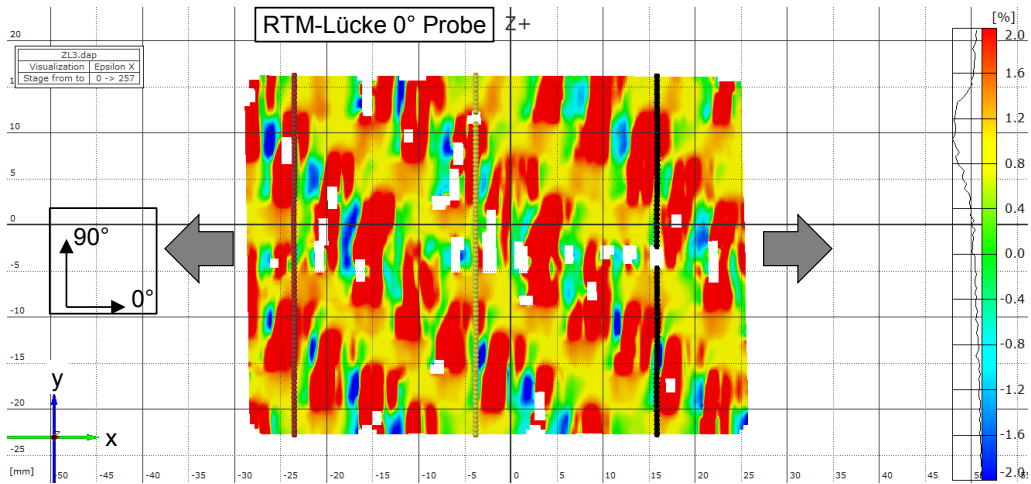


Abb. A-7: Dehnungsfeld einer RTM-Lücke 0°-Zugprobe mit drei Schnitten in y-Richtung

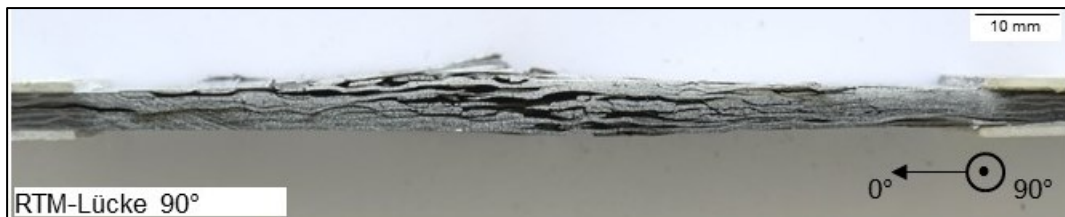


Abb. A-8: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 90°-Zugprobe

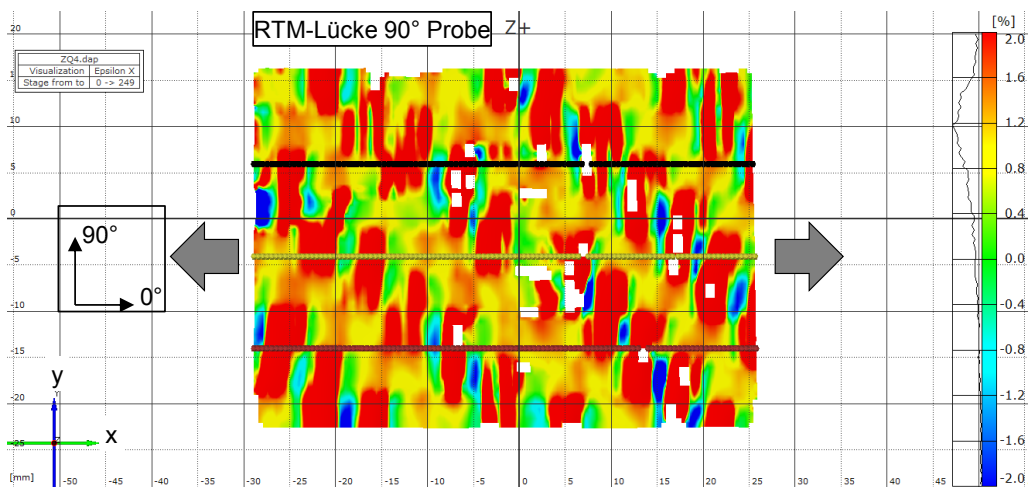


Abb. A-9: Dehnungsfeld einer RTM-Lücke 90°-Zugprobe mit drei Schnitten in x-Richtung

Daten der VAP-Druckproben (normiert auf einen FVG=61 %)

Tab. A-21: Übersicht über die Druckfestigkeiten, Drucksteifigkeiten und Bruchdehnung der VAP-Druckprüfkörper

Probenbezeichnung	Druckfestigkeit [MPa]		Drucksteifigkeit [GPa]		Bruchstauchung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
VAP-Referenz	502,52	21,83	64,93	10,04	0,80	0,17
VAP-Lücke 0°	375,74	39,96	69,93	7,34	0,62	0,14
VAP-Lücke 90°	337,68	39,27	68,13	15,04	0,72	0,30



Abb. A-10: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Referenzdruckprobe

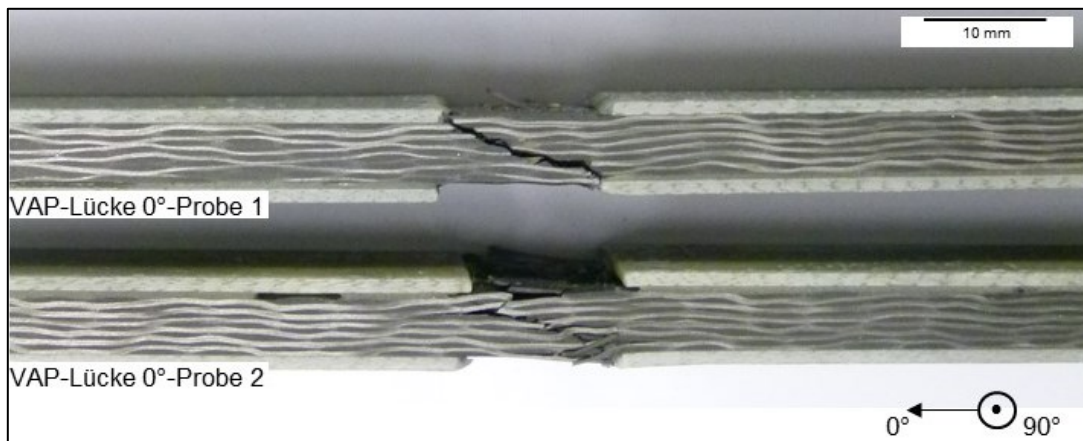


Abb. A-11: Repräsentative Bruchbilder von VAP-Lücke 0°-Druckproben

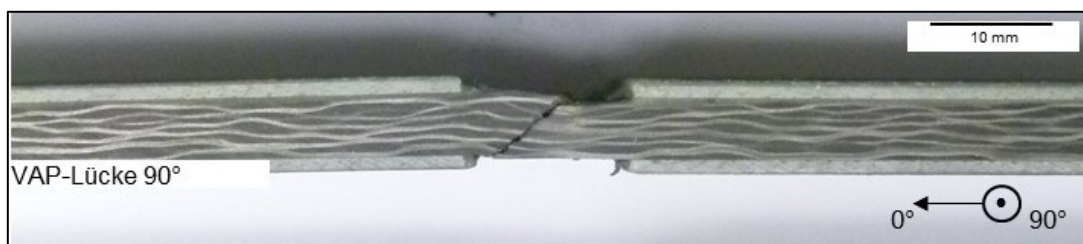


Abb. A-12: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 90°-Druckprobe

Daten der RTM-Druckproben (normiert auf FVG=61 %)

Tab. A-22: Übersicht über die Druckfestigkeiten, Drucksteifigkeiten und Bruchdehnung der RTM-Druckprüfkörper

Probenbezeichnung	Druckfestigkeit [MPa]		Drucksteifigkeit [GPa]		Bruchstauchung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
RTM-Referenz	432,31	44,88	58,72	3,20	0,79	0,12
RTM-Lücke 0°	381,59	28,61	60,85	2,12	0,67	0,08
RTM-Lücke 90°	400,42	24,07	65,22	6,22	0,63	0,04



Abb. A-13: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Referenzdruckprobe



Abb. A-14: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 90°-Druckprobe



Abb. A-15: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 0°-Druckprobe

Daten der VAP-Schubproben

Tab. A-23: Übersicht über die Schubfestigkeiten, Schubsteifigkeiten und Bruchdehnung der VAP-Schubprüfkörper

Probenbezeichnung	Schubfestigkeit [MPa]		Schubsteifigkeit [GPa]		Bruchdehnung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
VAP-Referenz	70,50	1,01	3,81	0,06	8,32	1,20
VAP-Lücke 45°	69,80	1,49	3,67	0,08	6,53	0,79



Abb. A-16: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Referenzschubprobe



Abb. A-17: Repräsentatives Bruchbild einer VAP-Lücke 45°-Schubprobe

Daten der RTM-Schubproben

Tab. A-24: Übersicht über die Schubfestigkeiten, Schubsteifigkeiten und Bruchdehnung der RTM-Schubprüfkörper

Probenbezeichnung	Schubfestigkeit [MPa]		Schubsteifigkeit [GPa]		Bruchdehnung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
RTM-Referenz	84,00	1,71	4,31	0,10	9,45	0,67
RTM-Lücke 45°	73,67	2,12	4,35	0,18	5,48	0,66



Abb. A-18: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Referenzschubprobe



Abb. A-19: Repräsentatives Bruchbild einer RTM-Lücke 45°-Schubprobe

Prozessdaten zur Torsionswellenherstellung

Tab. A-25: Prozessdaten zur Torsionswellenherstellung im VAP- und modifiziertem VAP-Verfahren

Parameter	VAP-Verfahren / mod. VAP-Verfahren
Entgasung Harz (Harz bei T=80°C)	$p_{abs} \leq 2 \text{ mbar}$ für 3 min
Druckabfall im VAP-Aufbau	$p_{abs} \leq 2 \text{ mbar}$ $\Delta p \leq 1 \frac{\text{mbar}}{\text{min}}$
Infiltrationsdruck VAP-Aufbau	$p_{Absaugung} = 5 \text{ mbar}$ $p_{Anguss} = 1000 \text{ mbar}$
Rücksaugen	$p_{Absaugung} = 5 \text{ mbar}$ $p_{Anguss} = 300 \text{ mbar}$ $t_{Rücksaugen} = 5 \text{ min}$

Aushärtezyklus (inkl. Harz- und Werkzeugtemperatur) laut Vorgaben des Aushärtezyklus N°1 (Aushärtetemperatur 180°C; Aushärtezeit 2h) des Datenblatts durchgeführt [76]

Daten zur mechanischen Prüfung der Torsionswellen

Tab. A-26: Übersicht über die maximalen Torsionsmomente, Schubfestigkeiten und Schubdehnungen der Torsionswellen

Probenbezeichnung	Maximales Torsionsmoment [Nm]		Schubfestigkeit [MPa]		Schubdehnung [%]	
	Wert	STABW	Wert	STABW	Wert	STABW
Fehlerfreie Referenz (VAP T700 R1, R2, R3, R4)	3437,60	75,64	245,03	5,39	0,76	0,12
VAP Drehmoment negativ (VAP T700 V2, V4, V6)	2864,35	8,16	204,17	0,58	0,60	0,08
VAP Drehmoment positiv (VAP T700 V1, V3, V5)	3343,59	108,09	238,32	7,70	0,72	0,07
Mod. VAP Drehmoment negativ (T700 M2, M4, M6)	3458,99	135,31	246,55	9,64	0,73	0,10
Mod. VAP Drehmoment positiv (T700 M1, M3, M5)	3587,47	217,20	255,71	15,48	0,75	0,14

B Veröffentlichungen

Buchbeiträge

- [B1] C. Ebel, A. Mierzwa, and K. Kind, “Yarn damage during braiding of reinforcement fibers for composites,” in *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*, Y. Kyosev, Ed., San Diego: Elsevier Science, 2016, pp. 319–354.

Zeitschriftenartikel

- [A1] P. J. Hine, M. Bonner, I. M. Ward, Y. Swolfs, I. Verpoest, A. Mierzwa, “Hybrid carbon fibre/nylon 12 single polymer composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 65, pp. 19–26, 2014.
- [A2] A. Mierzwa, C. Ebel, K. Drechsler, “Auswirkungen lokaler Garnlücken auf die mechanischen Eigenschaften geflochtener Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunde”, *Kunststofftechnik*, vol. 14, no. 2, pp. 146–173, 2018.

Konferenzbeiträge

- [K1] A. Mierzwa, C. Ebel, M. Brand, K. Drechsler, “A manufacturing method of a thermoplastic semi-finished product as reinforcement in laminate thickness direction“ in *ICCM20 - 20th International Conference on Composite Materials*, Copenhagen, Denmark, 2015.
- [K2] A. Mierzwa, C. Ebel, T. Harbers, K. Drechsler, “Investigation on creation of fibrous rings and their influence on the braided preform quality,” in *ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials*, Munich, Germany, 2016.
- [K3] S. Maidl, A. Mierzwa, C. Ebel, K. Drechsler, “Development of a novel type of online monitoring system for the braiding process,” in *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*, Athens, Greece, 2018.

C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl für Carbon Composites wurde die Betreuung der nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten unterstützt.

- [S1] F. Sassl, "Geflochtene Litzen aus technischen Fasern", Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2013.
- [S2] D. Arnold, "Untersuchung des Spreizverhaltens von Carbonfasern in Abhängigkeit verschiedener Garnparameter", Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2013.
- [S3] E. Pichlmeier, "Entwicklung von Hilfsmitteln zur Fertigung von Aussparungen im Flechtprozess", Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S4] A. Lehnhardt, "Auswirkungen von verschiedenen Matrixsystemen auf das dynamische Verhalten von Crashstrukturen", Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S5] F. Krause, "Herstellung und Einbringung von z-Verstärkungen in Flechtbauteile", Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S6] F. Föbel, "Untersuchung des Potentials von z-verstärkten Flechtbauteilen", Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S7] B. Fella, "Untersuchung des Spreizverhaltens von Carbonfasern in Abhängigkeit verschiedener Garnparameter", Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [S8] A. Detzner, Nicht-öffentliche Master's Thesis in Zusammenarbeit mit der BMW AG, gesperrt bis 2018, 2015.
- [S9] S. Weber, Nicht-öffentliche Master's Thesis in Zusammenarbeit mit Airbus Group Innovations, gesperrt bis 2019, 2016.
- [S10] T. Wolf, "Ursachen von Ablagelücken und deren Auswirkungen auf den Flechtprozess und die Geflechtsqualität", Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S11] M. Froning, "Einfluss von Faserqualität auf die Entstehung von Filamentringen", Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.

-
- [S12] O. Kast, “Auswirkung von Ablagelücken auf die mechanischen Kennwerte eines Geflechts,“ Bachelor’s Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S13] J. Rauch, “Auswirkung von Faserringen auf die Stabilität des Flechtprozesses“, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S14] W. Weber, “Auswirkung von Ablagelücken auf die mechanischen Eigenschaften von Carbon-Geflechtes“, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S15] M. Kainz, Nicht-öffentliche Master’s Thesis in Zusammenarbeit mit der BMW AG, gesperrt bis 2020, 2017.
- [S16] J. Rauch, Nicht-öffentliche Master’s Thesis in Zusammenarbeit mit der BMW AG, gesperrt bis 2020, 2017
- [S17] W. Weber, “Mechanische Untersuchung von geflochtenen Carbon-Antriebswellen mit Fertigungsabweichungen.“, Master’s Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2017.

Teile des Inhalts folgender Arbeiten haben in die vorliegende Dissertationsschrift Eingang gefunden: [S10], [S11], [S12], [S13], [S17]