



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen
Institut für Textilmaschinen und
Textile Hochleistungswerkstofftechnik



Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

Entwicklung von Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern und
Polyamid 6-Fasern für thermoplastische Verbundbauteile mit hohem
Leistungsvermögen

eingereicht von

Dipl.-Ing. Martin Hengstermann

geb. am 26. Dezember 1986 in Sondershausen

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Ch. Cherif Prof. Dr.-Ing. T. Weide
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. A. Wagenführ
Mitglieder der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. habil. S. Krzywinski Prof. Dr.-Ing. habil. Y. Kyosev
Datum der Einreichung:	05. Dezember 2019
Datum der Verteidigung:	18. September 2020

„Wir wissen heute natürlich, dass dieser Film im wissenschaftlichen Sinn in vielem danebenlag. Aber das kann man ja praktisch über alles sagen. Wissenschaft entwickelt sich. Unser Verständnis entwickelt sich. Was immer du vor 20 Jahren getan hast, ist aus heutiger Sicht meistens falsch.“

David Attenborough

Britischer Tierfilmer und Naturforscher

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Dissertationsschrift ist die Entwicklung und Umsetzung von neuartigen Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern (rCF) und Polyamid (PA) 6-Fasern für thermoplastische Verbundbauteile mit hohem Leistungsvermögen. Diese Hybridgarne können die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der rCF im Gegensatz zu bisherigen Lösungen auf Basis von Spritzguss und Vliesstoffen in hohem Maße ausnutzen. Bedingt durch deren spezielle Fasereigenschaften (insbesondere hohe Querkraftempfindlichkeit, Sprödigkeit und fehlende Kräuselung) wurde dafür die Prozesskette der konventionellen Stapelfasergarnherstellung, bestehend aus Krempel, Strecke und Flyer, umfangreich analysiert und technologisch-konstruktiv weiterentwickelt, wodurch erstmalig eine schonende und gleichmäßige Herstellung der Hybridgarne ermöglicht werden konnte. Für eine reproduzierbare und effiziente Prüfung der Faserlänge der rCF wurde zudem ein anforderungsgerechtes Faserlängenmesssystem auf Basis der Fibrographmethode entwickelt. Die im Rahmen der Arbeit abschließend durchgeführten Verbundprüfungen belegen das enorm hohe Potential der Hybridgarne, die über 80 % der Verbundzugfestigkeit von vergleichbaren Referenzprüfkörpern aus Carbon-Filamentgarn und PA 6-Matrix erreichen. Das entwickelte analytische Modell bietet zudem die Möglichkeit zur Berechnung der Verbundzugkennwerte in Abhängigkeit wesentlicher Faser- und Hybridgarnparameter.

Abstract

This thesis addresses the development and manufacturing of novel hybrid yarns made from recycled carbon fibres (rCF) and polyamide (PA) 6 fibres for high-performance thermoplastic composites. This type of hybrid yarn employs the excellent mechanical properties of rCF as opposed to previous solution approaches based on injection moulding and nonwovens. According to their specific fibre properties (high shear sensitivity, brittleness, lacking crimp), the process chain for conventional staple fibre production, including a roller card, draw frame and roving frame, was thoroughly analysed; moreover, it was modified in terms of technology and construction, thus enabling a gentle and homogenous production of hybrid yarn for the first time. For the reproducible and efficient testing of rCF length, a suitable fibre length measuring system based on the fibrograph method was established. Composite testing concluded this research, proving the enormous potential of hybrid yarns, which achieve more than 80 % of the composite tensile strength of reference samples made from carbon filament yarn and PA 6 matrix. The developed analytical model allows for predicting characteristic tensile properties depending on significant fibre and hybrid yarn parameters.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Dresden, 05.12.2019

Martin Hengstermann

Thesen

1. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden immer häufiger im Leichtbau eingesetzt, deshalb entsteht gleichzeitig eine immer größere Menge an carbonfaserhaltigen Abfällen.
2. Durch geeignete Recyclingverfahren können aus carbonfaserhaltigen Abfällen recycelte Carbonfasern (rCF) gewonnen werden.
3. Bisher werden rCF hauptsächlich in Spritzgussbauteilen und in Verbundbauteilen auf der Basis von Vliesstoffen eingesetzt, dabei können deren mechanische Zugeigenschaften allerdings prinzipbedingt kaum ausgenutzt werden.
4. Die Herstellung von Verbundbauteilen auf der Basis von versponnenen Stapelfasergarnen aus rCF ermöglicht hingegen eine nahezu vollständige Ausnutzung der mechanischen Zugeigenschaften der rCF.
5. Die rCF weisen ein von herkömmlichen Spinnfasern deutlich abweichendes Verarbeitungsverhalten auf, wodurch eine gleichmäßige und faserschonende Garnherstellung massiv erschwert wird.
6. Die Verspinnbarkeit der rCF kann durch das gezielte Hinzufügen von thermoplastischen Fasern erheblich verbessert werden.
7. Die Entwicklung von Hybridgarnen aus rCF und thermoplastischen Fasern ermöglicht darüber hinaus die Herstellung von thermoplastischen Verbundbauteilen.
8. Zur Entwicklung und Umsetzung solcher Hybridgarne können die konventionellen Textilmaschinen Krempel, Strecke und Flyer eingesetzt werden.
9. An den eingesetzten Textilmaschinen sind Modifikationen zur anforderungsgerechten Verarbeitung der rCF zwingend erforderlich.
10. Geeignete Prüftechnik zur Faserlängenmessung der eingesetzten rCF ist am Markt nicht verfügbar und muss daher erst entwickelt werden.
11. Die Verspinnung anforderungsgerechter Hybridgarne mit den modifizierten Spinnmaschinen und der entwickelten Prozesskette ist möglich.
12. Die aus den Hybridgarnen hergestellten Verbundprüfkörper weisen im Vergleich zu Spritzguss- und Vliesstoffverbundbauteilen deutlich höhere mechanische Zugkennwerte auf.
13. Die im Labormaßstab entwickelte Prozesskette der rCF-Hybridgarne kann in den Technikumsmaßstab transferiert werden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden.

Herrn Prof. Dr. Ch. Cherif gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit und die großzügige und vielseitige Unterstützung.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. T. Weide für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Bei Herrn Dr. A. Nocke bedanke ich mich herzlich für die großzügige Unterstützung sowie für die wertvollen Anregungen und Diskussionen, die für die Anfertigung der Dissertation sehr hilfreich waren.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. A. Abdkader sowie allen Kollegen der Forschungsgruppe *Multimaterial-Garnstrukturen für Hightech-Anwendungen* für die freundliche und intensive Zusammenarbeit.

Mein Dank geht weiterhin an alle technischen, wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Mitarbeitern des ITM, insbesondere Frau T. Anders, Frau Dr. I. Kruppke und Herrn F. Krzywinski für die umfangreiche Unterstützung, sowie Frau Dr. C. Scheffler vom Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. für die Durchführung der Einzelfilamentauszugsversuche.

Nicht zuletzt gilt mein Dank Herrn Dr. W. Trümper, der mich maßgeblich zur Aufnahme eines Promotionsstudiums bewegt hat.

Ein besonderes Dankeschön gilt meiner Frau, meinen beiden Kindern sowie meiner gesamten Familie und meinen Freunden, die mich ebenfalls umfangreich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	viii
Formelverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	4
2.1 Überblick zu Carbonfasern und carbonfaserverstärkten Kunststoffen	4
2.2 Überblick zu recycelten Carbonfasern	7
2.3 Verwendung von recycelten Carbonfasern in CFK-Bauteilen	10
2.4 Zusammenfassende Betrachtung	12
3 Prozessanalyse zur Verarbeitung von rCF mittels konventioneller Stapelfaserspinntechnik	14
3.1 Vorbetrachtung	14
3.2 Analyse der Maschinen- und Prozesstechnik	15
3.2.1 Krempelprozess	15
3.2.2 Streckprozess	21
3.2.3 Spinnprozess	24
3.3 Analyse relevanter Fasereigenschaften	30
3.3.1 Einfluss der Faserlänge und der Faserlängenverteilung	30
3.3.2 Einfluss der Faserfeinheit bzw. des Faserdurchmessers	31
3.3.3 Einfluss der Faserzugfestigkeit und der Faserdehnung	32
3.3.4. Einfluss der Faserkräuselung	32
3.3.5. Einfluss der Faser-Hybridisierung	33
4 Prüftechnik zur Faser-, Band-, Garn- und Verbundcharakterisierung	34
4.1 Prüfung der Faserlänge von langen rCF	34
4.1.1 Vorbetrachtung	34
4.1.2 Stand der Technik zu Faserlängenmessverfahren bzw. -methoden	34
4.1.3 Entwicklung von Prüftechnik zur Faserlängenmessung von langen rCF	39
4.1.4 Kalibrierung der entwickelten Faserlängenmessverfahren	44
4.1.5 Exemplarische Faserlängenmessung von rCF mit unbekannter Länge mit der Referenz- und Fibrographmethode	50
4.2 Prüfung des Biegungsverhaltens und des Öffnungsgrads von rCF beim Krempelprozess	52
4.3 Konventionelle Prüftechnik zur Faser-, Band-, Garn- und Verbundprüfung	53

5	Technologisch-konstruktive Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung von Hybridgarnkonstruktionen aus rCF und PA 6-Fasern	58
5.1	Vorbetrachtung.....	58
5.2	Faserauswahl und -charakterisierung.....	58
5.2.1	Faserauswahl.....	58
5.2.2	Fasercharakterisierung.....	59
5.3	Krempelprozess	63
5.3.1	Modifikation der eingesetzten Krempel zur Spezialkrempel	63
5.3.2	Anforderungen an den Krempelprozess	64
5.3.3	Versuchsdurchführung	64
5.3.4	Prüfergebnisse	66
5.3.5	Herstellung von Krempelbändern für die Weiterverarbeitung zu Streckenbändern.....	74
5.4	Streckprozess	76
5.4.1	Modifikation der eingesetzten Strecke zur Spezialstrecke	76
5.4.2	Anforderungen an den Streckprozess	77
5.4.3	Versuchsdurchführung	78
5.4.4	Prüfergebnisse	80
5.4.5	Herstellung von Streckenbändern für die Weiterverarbeitung zu rCF-Hybridgarnen	82
5.5	Spinnprozess	83
5.5.1	Modifikation des eingesetzten Flyers zum Spezialflyer	83
5.5.2	Anforderungen an den Spinnprozess	84
5.5.3	Versuchsdurchführung	84
5.5.4	Prüfergebnisse	86
5.6	Zusammenfassende Betrachtung und aktueller Entwicklungsstand	91
6	Experimentelle Ermittlung der Verbundzugkennwerte und Entwicklung eines analytischen Modells zu deren Vorhersage	93
6.1	Vorbetrachtung.....	93
6.2	Herstellung der Verbundprüfkörper	93
6.3	Ergebnisse der Verbundzugprüfung sowie Entwicklung eines analytischen Modells.....	94
6.3.1	Einfluss der Faserlänge der rCF auf die Verbundzugeigenschaften	95
6.3.2	Einfluss der Garndrehung auf die Verbundzugeigenschaften	99

6.3.3 Entwicklung eines analytischen Modells für die Berechnung der Verbundzugkennwerte	101
6.3.4 Anwendung des Modells für die Berechnung der Verbundzugkennwerte	103
6.3.5 Einfluss der verschiedenen rCF-Varianten auf die Verbundzugeigenschaften und Vergleich mit Referenzprüfkörpern	104
7 Zusammenfassung	107
8 Ausblick	110
Literaturverzeichnis	112
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	V
Liste der Veröffentlichungen	VII
Anlagen	XII
Anlage 1 Krempelprozess	XII
Anlage 2 Streckprozess.....	XVII
Anlage 3 Spinnprozess	XVIII
Anlage 4 Verbundprüfung.....	XIX

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AFIS	Advanced Fiber Information System der Firma Uster Technologies AG
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CF	Carbonfasern bzw. Carbon-Filamentgarn
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
Co	Baumwolle
CV	Variationskoeffizient
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DITF Denkendorf	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
dpi	engl. <i>dots per inch</i>
FOREL	Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität
HF	Hochfest
HiPerDiF	engl. <i>High Performance-Discontinuous Fibre</i>
HM	Hochsteif
HTP	engl. <i>high temperatures and pressures</i>
HVD	Hauptverzugsdistanz
HVI	High Volume Instrument der Firma Uster Technologies AG
IFSS	engl. <i>interlaminar shear strength</i>
ITA Augsburg	Institut für Textiltechnik Augsburg
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
LTP	engl. <i>low temperatures and pressures</i>
ML	engl. <i>mean length</i>
NBR	Nitril-Butadien-Kautschuk
OI	engl. <i>Orientation Index</i>
PA 6	Polyamid 6
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyester
PP	Polypropylen
Prepreg	engl. <i>preimpregnated fibres</i>
rCF	recycelte Carbonfasern
rCF-E	recycelte Carbonfasern mit Schlichte für duroplastische Matrices
rCF-P	recycelte Carbonfasern, pyrolysiert
rCF-T	recycelte Carbonfasern mit Schlichte für thermoplastische Matrices
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTM	Resin Transfer Molding
SFPO-Test	engl. <i>single-fibre pull-out test</i>
STFI	Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V.

UHML	engl. <i>upper half mean length</i>
UI	engl. <i>uniformity index</i>
UD	unidirektional
VVD	Vorverzugsdistanz

Formelverzeichnis

Indizes	Bezeichnung
F	Längenmessverfahren nach der Fibrographmethode
PA 6	Polyamid 6
R	Referenzlängenmessverfahren
rCF	recycelte Carbonfaser
Formelzeichen	Bezeichnung mit Einheit
α	Faseroberflächenwinkel des Garns in °
γ_D	dispenser Teil der freien Oberflächenenergie in mN/m
γ_P	polarer Teil der freien Oberflächenenergie in mN/m
η_L	Effizienzfaktor der Faserlänge der rCF
η_o	Effizienzfaktor der Faserorientierung der rCF
η_s	Effizienzfaktor für die rCF-Zugfestigkeit
v_F	Verstärkungsfaser-Volumenanteil in %
ρ	Dichte in g/cm ³
σ	Zugfestigkeit in MPa
σ_{0T}	Verbundzugfestigkeit aus den jeweiligen Hybridgarnen bei 0 T/m in MPa
σ_c	Verbundzugfestigkeit in MPa
σ_F	Verstärkungsfaser-Zugfestigkeit in MPa
σ_G	Garnfestigkeit in cN/tex
σ_M	Matrix-Zugfestigkeit in MPa
T_{app}	scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit (IFSS) in MPa
T_f	Friktionsscherspannung in MPa
ϕ	Packungsdichte des Garns in %
ψ	Gewichtsmassenverhältnisses in %
C	Grenzen des Konfidenzintervalls in %
CV	Variationskoeffizient in %
CV _m	Variationskoeffizient der Band- und Garnfeinheit auf 1 m in %
CV _R	Variationskoeffizient der mittleren Faserlänge in %
d _f	Durchmesser der Fasern in μm
e	Eulersche Zahl
E	Zugmodul in GPa
E _{0T}	Verbundzugmodul aus den jeweiligen Hybridgarnen bei 0 T/m in GPa
E _C	Verbundzugmodul in GPa
E _F	Verstärkungsfaser-Zugmodul in GPa

E_M	Matrix-Zugmodul in GPa
f	Durchbiegung in mm
F_{max}	Kraft zum Ablösen der Faser von der Matrix in N
F_{min}	Kraft nach dem Ablösen der Faser von der Matrix in N
L	Faserlänge in mm
L_B	Bündellänge in mm
L_c	kritische Faserlänge in mm
L_E	effektive Faserlänge in mm
l_{el}	Einbettungslänge in μm
L_{Emin}	effektive Mindestfaserlänge in mm
L_m	Mindestfaserlänge in mm
L_s	Spannlänge in mm
L_{sm}	Spannlänge der längsten Faser in der Probe in mm
m_E	Masse der herausstehenden gekämmten Fasern in mg
m_N	Masse der in der Klemme verbliebenen Fasern in mg
N	Gesamtzahl der Fasern im Faserbart
n	Anzahl der Faserbartproben
N_B	Anzahl der Fasern im Bündel
n_F	Gesamtzahl der Fasern in der Probe
R_K	Kritischer Biegeradius in mm
R^2	Bestimmtheitsmaß
S	Gesamtanzahl an Bündeln
s_{mlr}	Standardabweichung der mittlerer Faserlänge der Referenzlängenmessung in mm
T	Drehung (im Garn)
T_t	Garnfeinheit in tex
W_A	thermodynamische Arbeit der Adhäsion in $\text{mN}\cdot\text{mm}$
W_{debond}	Ablösungsarbeit in $\text{mN}\cdot\text{mm}$
$W_{pullout}$	Auszugsarbeit in $\text{mN}\cdot\text{mm}$
W_{total}	Gesamtarbeit ($W_{debond} + W_{pullout}$) in $\text{mN}\cdot\text{mm}$
X	Abstand in mm

1 Einleitung

Carbonfasern (CF) werden aufgrund ihrer hervorragenden Materialkennwerte immer häufiger in Leichtbaukomponenten bzw. in carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK), z. B. in den Automobil-, Luftverkehrs- und Windenergiebranchen sowie im Maschinen- und Anlagenbau eingesetzt. Der für das Jahr 2018 ermittelte globale Bedarf an CF von etwa 78,5 Tsd. Tonnen, ausgehend vom Jahr 2013, ergibt eine jährliche Wachstumsrate von etwa 11,1 % [1], siehe Abbildung 1-1. Aufgrund der Megatrends Elektromobilität, Materialeffizienz und Ökologie wird dieses Wachstum in den kommenden Jahren tendenziell weiter zunehmen.

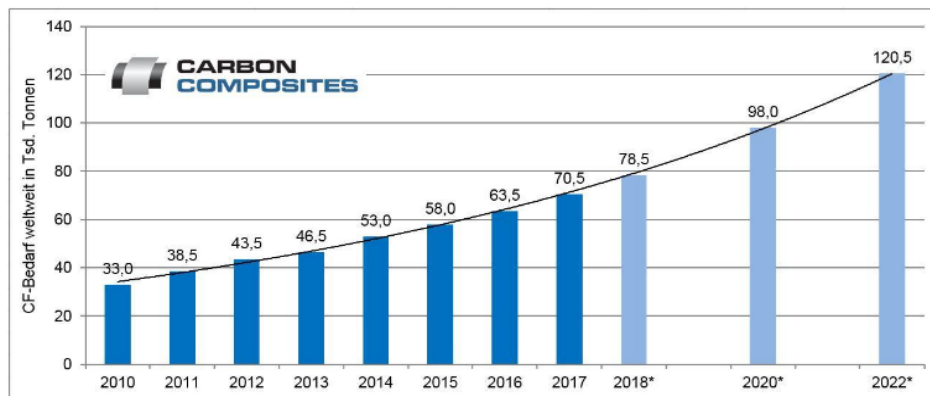


Abbildung 1-1: Entwicklung des globalen CF-Bedarfes in Tsd. t vom Jahr 2010 bis 2022 [1] (*Schätzungen; 11/2018)

Mit dem zunehmenden Bedarf rückt auch die Frage nach der Entsorgung der CF bzw. der CFK-Bauteile in den Vordergrund. Ungefähr 20 Tsd. t CFK-Abfälle fallen jährlich in Europa an, allein 6.000 bis 8.000 Flugzeuge mit hohem Anteil an CFK werden bis 2030 in den USA und in Europa ausgesondert [2]-[4]. Auch moderne Rotoren von Windkraftanlagen bestehen in hohem Maße aus CFK. Die Ausmusterung solcher Anlagen erfolgt in der Regel nach 20 Jahren. Deshalb wird prognostiziert, dass künftig allein in Deutschland etwa 30 Tsd. t Rotorblätter jährlich entsorgt werden müssen [5]. Darüber hinaus fallen bei der Verarbeitung von CF zu Textilstrukturen sowie beim Preforming und der Konfektionierung je nach Anwendungsgebiet hohe Mengen an Verschnitt an. Für die daraus entstehenden CF-Abfälle sind sinnvolle Recyclingverfahren erforderlich, da diese weder thermisch verwertet noch deponiert werden dürfen. Das Recycling, das in Deutschland nach der EU-Richtlinie 2008/98/EG [6] geregelt ist, führt allerdings zu hohen technischen Herausforderungen und kann nur mit innovativen industrietauglichen Lösungsansätzen umgesetzt werden [7]. Deshalb besteht die zunehmende Gefahr, dass der fest etablierte Gebrauch von CF rückläufig wird, wenn die Entsorgungsproblematik nicht gelöst wird [2]. Die Herstellung von CF ist zudem mit ca. 35,5 GJ/t äußerst energieintensiv und somit teuer und wird von einem hohen CO₂-Ausstoß begleitet [8].

Die Wiederverwendung von CF-Abfällen bzw. der Einsatz von recycelten Carbonfasern (rCF) bietet deshalb die Möglichkeit zur drastischen Reduktion des Gesamt-CO₂-Ausstoßes sowie der Kosten bei der Herstellung von CFK-Bauteilen. Somit existieren nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Gründe für das Recycling von CFK-Bauteilen.

Aktuell werden rCF im industriellen Maßstab hauptsächlich als Verstärkungsfasern im Spritzguss sowie in Vliesstoffen eingesetzt, siehe Abbildung 1-2. Solche Anwendungen nutzen jedoch das vorhandene Leistungspotential der rCF bei Weitem nicht aus. Die Ursachen dafür liegen beim Spritzguss vor allem in der geringen Faserorientierung in Belastungsrichtung sowie in der niedrigen Faser-Matrix-Haftung. Da prinzipbedingt nur kurze Verstärkungsfasern (≤ 10 mm Faserlänge) eingesetzt werden können und diese im Prozess z. B. durch hohe Prozessdrücke zusätzlich geschädigt werden, kann damit keine vollständige Kraftübertragung zwischen Fasern und Matrix ermöglicht werden. In Vliesstoffen ist neben der ebenfalls geringen Faserorientierung der rCF deren Wirrlage bzw. die sich daraus ergebende hohe Voluminösität für die vergleichsweise niedrigen erzielbaren Faservolumengehalte im späteren Verbundbauteil (max. 40 % [11]-[12]) verantwortlich. Zudem verringern sich auch hier die Faserlängen der rCF z. B. beim Vernadeln.

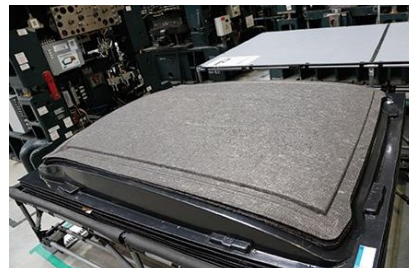


Abbildung 1-2: Spritzgegossene Pedalen (links) und Vliesstoffdach (rechts) aus recycelten Carbonfasern für die Automobilindustrie [9]-[10]

Im Gegensatz dazu bietet die Entwicklung von Garnkonstruktionen aus rCF die Möglichkeit, eine hohe Orientierung und Kompaktierung der rCF zu realisieren sowie deren hohe Faserlängen (> 40 mm) zu nutzen. Damit könnten auch mit rCF wieder sehr hohe Verbundeigenschaften erzielt werden, wodurch ein hochwertiges Recycling ermöglicht wird. Die moderne Spinnmaschinenteknik ermöglicht zudem eine hochproduktive und -automatisierte Fertigung der Garne, gleichzeitig bietet der Einsatz von Stapelfasern im Garn die Möglichkeit zu einer deutlich besseren Drapier- bzw. Umformbarkeit der textilen Halbzeuge im Vergleich zu Carbon-Filamentgarne.

Neben der zunehmenden Recyclingproblematik bestehen bei der industriellen Herstellung von CFK-Bauteilen zudem weitere wesentliche Hürden, insbesondere bei den Themen *Fügbarkeit*, *Umformbarkeit* und *Gesamtkosten* [13]. So sind aktuell gefertigte CFK-Bauteile auf der Basis duroplastischer Matrizes vergleichsweise schwierig füg- und umformbar sowie sehr kostenintensiv. Als äußerst vielversprechende Möglichkeit zur Beseitigung dieser Hürden gilt deshalb der Einsatz von thermoplastischen Matrizes [14]. Insbesondere aufgrund der (mehrfachen) Aufschmelzbarkeit von Thermoplasten kann die Füg- und Umformbarkeit deutlich verbessert werden, gleichzeitig können die Herstellungskosten durch geringere Taktzeiten und einen hohen Automatisierungsgrad erheblich reduziert werden. Die Kombination von rCF und Thermoplastfasern (z. B. Polyamid (PA) 6) zu einem innovativen Hybridgarn ermöglicht die Fertigung solcher thermoplastischen CFK-Bauteile. Damit kann die Forderung der Industrie von CFK-Bauteilen mit guter Fügbarkeit, hoher Umformbarkeit, geringen Gesamtkosten und der Möglichkeit zum hochwertigen Recycling erstmals in hohem Maße erfüllt werden.

Bisher ist am Markt allerdings keine industrielle Prozesskette bekannt, welche die rCF und PA 6-Fasern zu qualitativ hochwertigen Garnkonstruktionen verarbeiten kann. Bedingt durch die speziellen Eigenschaften der rCF, insbesondere hohe Querkraftempfindlichkeit, Sprödigkeit und fehlende Kräuselung, weisen diese ein von herkömmlichen Faserstoffen (z. B. Baumwolle) deutlich abweichendes Verarbeitungsverhalten auf. Weiterhin ist die breite Verteilung der Faserlänge bedingt durch den Recyclingprozess als kritisch zu beurteilen, was u. U. zu Verzugsstörungen und damit zu ungleichmäßigen Garnen führen kann. Zudem ist eine schnelle und reproduzierbare Charakterisierung der Faserlängen in den jeweiligen Prozessschritten momentan kaum möglich, da am Markt kein geeignetes Prüfverfahren zur Bestimmung der Faserlängen der rCF (> 40 mm Faserlänge) vorhanden ist.

Aus diesem Grund ist das Konzept zur Verspinnung von rCF und PA 6-Fasern zu Hybridgarnen völlig neuartig in der bestehenden Stapelfaserspinnerei und erfordert eine tiefgreifende wissenschaftliche Untersuchung der gesamten Prozesskette. Dafür werden in dieser Dissertationsschrift sowohl umfangreiche Recherchearbeiten zum aktuellen Stand der Technik und theoretische Grundlagen in der Verspinnung der spröden rCF erarbeitet, als auch neue Prüftechniken entwickelt sowie technisch-technologische und konstruktive Maschinenanpassungen der konventionellen Fadenbildungstechnologien durchgeführt. Anschließend erfolgt die Verbundbauteilherstellung aus den entwickelten Hybridgarnen und die Formulierung eines analytischen Modells zur Berechnung der Verbundzugeigenschaften.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Überblick zu Carbonfasern und carbonfaserverstärkten Kunststoffen

Carbon- bzw. Kohlenstofffasern (CF) sind anorganische Hochleistungsfasern, die aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften immer häufiger als Verstärkungsfasern in Faser-Kunststoff-Verbunden eingesetzt werden. Der strukturelle Aufbau, die Herstellung und die Eigenschaften von CF bzw. den daraus hergestellten carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sind mit Verweis auf Sekundärliteratur (z. B. [15]-[16]) hier nur auszugsweise dargestellt.

CF können aus verschiedenen Ausgangsstoffen hergestellt werden, der dabei am häufigsten eingesetzte Precursor ist Polyacrylnitril, welcher lösungsmittel-nassgesponnen und verstreckt wird. Aus den Precursor-Filamenten werden anschließend durch Stabilisierung, Carbonisierung und Graphitisierung CF in Form von endlosen Filamentgarnen gefertigt. Je nach den eingestellten Prozessparametern können verschiedene Arten von CF hergestellt werden, die sich in ihren mechanischen Eigenschaften unterscheiden, z. B. Standard (S), hochfeste (HF) und hochsteife (HM) CF. In Abbildung 2-1 sind die Zugeigenschaften von verschiedenen Hochleistungsfasern dargestellt.

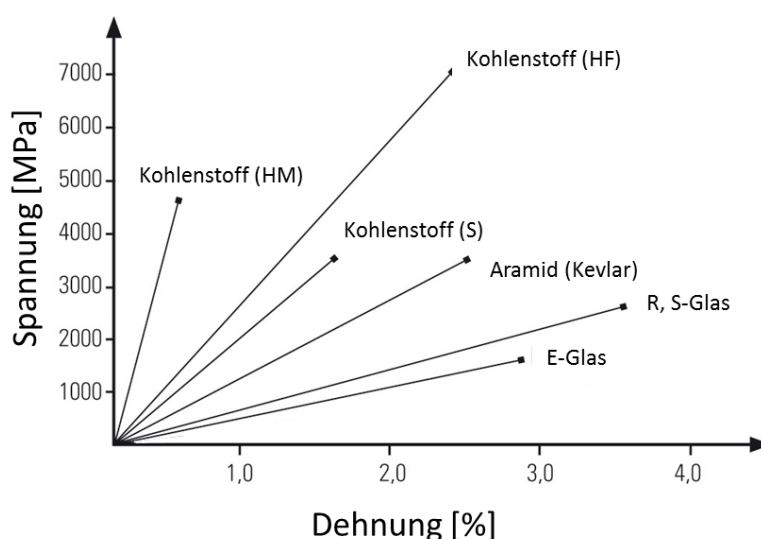


Abbildung 2-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von verschiedenen Hochleistungsfasern [17]

Aus der Abbildung 2-1 ist zu erkennen, dass die CF über eine sehr hohe Zugfestigkeit (> 3500 MPa) verfügen, bei gleichzeitig geringer Bruchdehnung ($< 2,5$ %). Daraus resultiert ein ebenfalls sehr hohes Zugmodul (> 200 GPa). Zudem weisen die CF u. a. eine geringere Dichte (ca. $1,8$ g/cm³) im Vergleich zu Aluminium ($2,7$ g/cm³) und Stahl ($7,8$ g/cm³) auf. Nachteilig sind insbesondere ihre hohe Sprödigkeit und Knickempfindlichkeit sowie der hohe Herstellungspreis.

Auf kommerziell erhältlichen CF befinden sich anforderungsgerechte Schichten, die im Wesentlichen aus zwei Gründen aufgebracht werden. Einerseits schützt die Schichte die spröden Filamente vor Faserschäden, die beim Herstellungsprozess und bei der anschließenden Textilmaschinen- und Verbundverarbeitung verursacht werden [18]-[19]. Andererseits ermöglicht erst die Schichte eine hohe Haftung an der Polymermatrix in den Verbundwerkstoffen. Aufgrund der unzureichenden Grenzflächenhaftung zwischen unbehandelten CF und eingesetzter Polymermatrix wurden in den letzten Jahrzehnten u. a. verschiedene Schichten entwickelt, um die Bindungskräfte zwischen Faser und Matrix zu erhöhen [20]-[25]. Deshalb sind derzeit CF mit unterschiedlichen Schichten für die jeweilige Polymermatrix auf dem Markt erhältlich, z. B. auf Basis von funktionellen Epoxid- oder Urethangruppen.

CF werden hauptsächlich in Form von endlosen Carbon-Filamentgarnen zu carbonfaserverstärkten-Kunststoff-(CFK-)Bauteilen verarbeitet. Die Herstellung von komplexen Bauteilstrukturen aus textilen CF-Halbzeugen ist allerdings aufgrund der geringen Bruchdehnung und der hohen Steifigkeit der Carbon-Filamentgarne zumeist nur mit hohem (manuellen) Aufwand realisierbar. Deshalb wurde Mitte der 1980er Jahre das Streckreißen (engl. „Stretch Breaking“) entwickelt, dabei werden die CF zu einzelnen Segmenten konvertiert. Dazu durchlaufen die CF mehrere unterschiedlich schnell drehende Walzenpaare, wodurch die Filamente stufenweise an den Stellen mit der geringsten lokalen Höchstzugkraft zerreißen [15]. Anschließend wird eine zusätzliche Schichte bzw. Avivage zur Faserfixierung aufgebracht. Damit lässt sich die Drapier- und Umformbarkeit der CF-Halbzeuge deutlich verbessern, die mechanischen Eigenschaften bleiben im Verbund aber nahezu erhalten. So werden auch mit streckgerissenen CF über 90 % der Zugeigenschaften im Verbund im Vergleich zu Carbon-Filamentgarn erreicht [26]. Ursächlich dafür ist die umhüllende Polymermatrix, die eine Lastein- und Lastausleitung in die einzelnen Carbonfasersegmente ermöglicht. Dazu müssen die streckgerissenen CF allerdings eine materialspezifische Mindestfaserlänge aufweisen, damit eine vollständige Kraftübertragung ermöglicht werden kann. Dies wird beim Streckreißen über den Abstand der Walzenpaare sichergestellt, wobei die resultierenden Faserlängen der einzelnen Carbonfasersegmente im Bereich von 40 bis 200 mm liegen [26]. Verschiedene Hersteller bieten solche oder ähnliche streckgerissenen CF, auch in Kombination mit weiteren Fasermaterialien an: Schappe Techniques Sàrl (La Croix-aux-Mines, Frankreich) [27]-[29], Hexcel Corp. (Stamford, USA) [30] und Pharr Yarns, LLC (McAdenville, USA) [31]. Diese streckgerissenen CF fristen bisher allerdings aufgrund des mehrstufigen Herstellungsprozesses und des daraus resultierenden nochmals höheren Beschaffungspreises für die CF ein Nischendasein. Im Gegensatz dazu bietet der Einsatz von recycelten Carbonfasern aufgrund ihres deutlich niedrigeren Beschaffungspreises im Vergleich zu primären CF bei nahezu

gleichwertigen Werkstoffeigenschaften ein großes Potential zur Substitution solcher streckgerissenen CF bzw. von primären Carbon-Filamentgarnen im Allgemeinen. Damit könnten auch die Herstellungskosten für CFK-Bauteile signifikant gesenkt werden.

Als Polymermatrix im CFK-Bauteil werden mehrheitlich flüssige duroplastische Kunststoffe eingesetzt, insbesondere Epoxidharze. Diese niedrigviskosen Harze (üblicherweise $< 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) werden mittels verschiedener Verfahren (z. B. Resin Transfer Molding (RTM)) in die textilen CF-Halbzeuge (z. B. in Form von Geweben oder Gelegen) eingebracht und härten anschließend aus. In den letzten Jahren werden auch zunehmend thermoplastische Kunststoffe (z. B. PP, PA 6, PEEK) als Matrices für CFK-Bauteile eingesetzt [1]. Besonders die Eigenschaften von Thermoplasten hinsichtlich (mehrfacher) Aufschmelzbarkeit bieten große Vorteile gegenüber nicht-schmelzbaren Duroplasten, z. B. in Bezug auf Fügbarkeit, erzielbare Taktzeiten und Recyclingfähigkeit. Da die meisten Thermoplasten allerdings im aufgeschmolzenen Zustand hochviskos sind (100 bis 5000 $\text{Pa}\cdot\text{s}$), sind alternative Fertigungsverfahren zur Herstellung von thermoplastischen CFK-Bauteilen erforderlich, z. B. durch Spreizen der CF sowie durch den Einsatz von Hybridgarnen. Letztere bestehen aus miteinander vermischten CF und Thermoplastfasern, wodurch die bei der Konsolidierung notwendigen kurzen Matrix-Fließwege realisiert werden. Verschiedene Varianten von Hybridgarnen sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

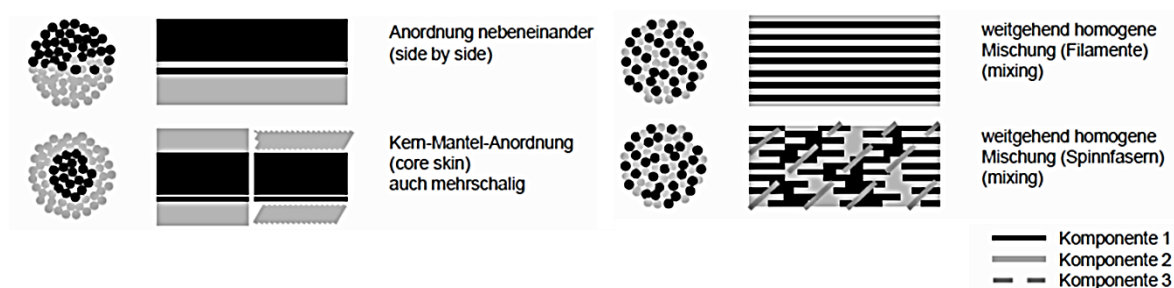


Abbildung 2-2: Verschiedene Varianten von Hybridgarnen, nach [15]

Zur Herstellung von Hybridgarnen aus CF und Thermoplastfasern stehen zwei konventionelle Verfahren zur Verfügung, das Lufttexturier-Verfahren („Commingling-Prozess“) und das Friktionsspinnen („DREF-Spinnen“). Beim Commingling-Prozess werden beide Fasertypen in Form von Filamentgarnen mittels Luftdüsen weitestgehend homogen vermischt, dies wurde u. a. in [32] untersucht. Eine Verarbeitung von rCF ist mit diesem Verfahren prinzipbedingt nicht möglich, da die losen Fasern durch die Druckluft ausgeschieden werden würden. Die Herstellung von Garnen mit Kern-Mantel-Anordnung mittels DREF-Spinnen aus Carbon-Filamentgarn und thermoplastischen Fasern wurde u. a. in [33]-[34] erforscht. Mit diesem Verfahren können prinzipiell auch Hybridgarne aus rCF hergestellt werden, dies bedingt allerdings zuvor der Herstellung eines zusammenhängenden Faserbands,

z. B. mittels Karde oder Krempel. Dieses Band kann anschließend der DREF als Kern- oder Mantelmaterial zugeführt werden.

2.2 Überblick zu recycelten Carbonfasern

Einleitend wird zunächst der Begriff *recycelte Carbonfasern* definiert und ein kurzer Überblick über die verschiedenen Herkunftstypen gegeben. Als recycelte Carbonfasern (rCF) werden in dieser Dissertationsschrift alle CF bezeichnet, die zunächst als Abfall deklariert wurden und anschließend als Sekundärrohstoff eingesetzt werden sollen. Die rCF können je nach deren Herkunft prinzipiell in drei verschiedene Typen gegliedert werden, siehe Abbildung 2-3 [35]. Trockene Fasern, z. B. aus Produktionsrückständen, Verschnittresten, Restspulen oder Webkanten-Resten (Typ 1), vorimprägnierte Fasern aus Resten bzw. Verschnitt von Prepregs (Typ 2) sowie Fasern aus defekten bzw. ausgesonderten CFK-Bauteilen (Typ 3). Um die rCF aus den Prepregs (Typ 2) sowie aus den CFK-Bauteilen (Typ 3) zu gewinnen, muss die umhüllende Polymermatrix durch einen zusätzlichen Prozessschritt entfernt werden. Dazu sind verschiedene Separationsverfahren verfügbar. Auch die rCF vom Typ 1 werden dort teilweise mitverarbeitet, um z. B. die verschiedenen Faserschichten zu entfernen und die rCF somit zu homogenisieren. Abschließend wird in der Regel ein zusätzlicher Faseraufbereitungsschritt (z. B. Sortieren, Schneiden, Mischen) für alle drei Typen durchgeführt.

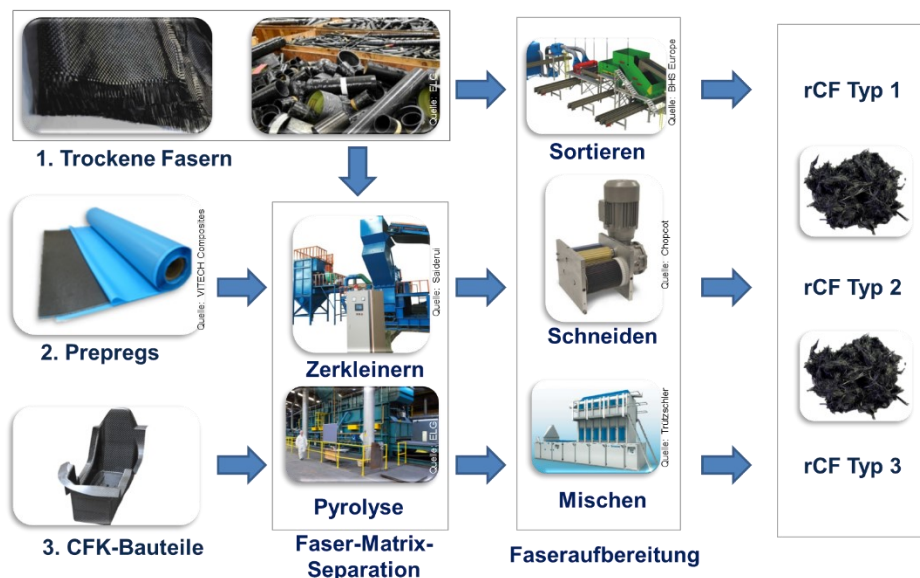


Abbildung 2-3: Herkunft und Aufbereitung von recycelten Carbonfasern

Sollen Abfälle im Allgemeinen nicht recycelt werden, können diese als Sondermüll deklariert werden. Dieser wird in Deutschland auf Deponien endgelagert. Ein Abfallschlüssel zur Erfassung und Regulation ist für CF-Abfälle bisher nicht vorhanden, daher ist eine Deponierung in Deutschland aus rechtlichen Gründen

schwierig [4]. Weiterhin können Abfälle prinzipiell auch thermisch in Müllverbrennungsanlagen verwertet werden. Konventionelle (Sonder-) Müllverbrennungsanlagen nehmen jedoch CF-Abfälle in der Regel deutschlandweit nicht mehr an, aufgrund ihrer zu hohen Zersetzungstemperatur und ihrer elektrischen Leitfähigkeit [36]. Dabei können die Elektrofilter ausfallen und die Rauchgaswäscher verstopfen. Als weitere Möglichkeit können die ausgesonderten Prepregs und CFK-Bauteile direkt verwertet werden, wobei geeignete Verfahren aktuell erforscht werden. Dazu zählt deren Einsatz in zerkleinerter Form im Zementwerk, um diese als Sekundärbrennstoff zur Herstellung von Zement zu nutzen [37]. Dieses Verfahren wird bereits zur Verwertung glasfaserverstärkten Kunststoffen industriell genutzt [38]. Der Einsatz bei der Calciumcarbid-Herstellung wird aktuell ebenso untersucht wie die Verwendung als Primärkohleersatz in der Stahlherstellung [39]-[40]. Nachteilig bei allen genannten Verfahren ist, dass die mit hohem Energieaufwand hergestellten CF unwiederbringlich verloren gehen. Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft ist deshalb eine Aufbereitung der CFK-Abfälle mittels Faser-Matrix-Separation und die anschließende Verwendung der rCF in einer möglichst hochwertigen Anwendung erheblich sinnvoller.

Verfahren zur Faser-Matrix-Separation

Zur Durchführung eines Faser-Matrix-Separationsverfahrens ist es zumeist erforderlich, die ausgesonderten CFK-Bauteile zunächst auf die vorliegende Dimension z. B. des Ofens anzupassen. Dafür werden diese in der Regel **mechanisch** zerkleinert, beispielsweise mit Rotorscheren oder Querstromzerspanern [41]. Eine weitere mechanische Zerkleinerung ist ebenfalls möglich, z. B. durch Hammermühlen oder Hochgeschwindigkeitsfräsen. Dabei entstehen je nach Grad der Aufbereitung rCF-Bruchstücke im Bereich weniger Millimeter. Diese können im Spritzguss oder als Füllmaterial eingesetzt werden, was allerdings keinem hochwertigen Recycling entspricht [42]-[43].

Bei den **thermischen Separationsverfahren** wird die Matrix mittels Wärmeenergie zersetzt. Größte Bedeutung hat dabei die Pyrolyse, die heutzutage weltweit im Industriemaßstab zur Separation von CF und Matrix eingesetzt wird. Die Pyrolyse erfolgt in einem Temperaturbereich von 400 °C bis 700 °C in inerter Atmosphäre. Durch die Abstinenz von Oxidationsmitteln (z. B. Sauerstoff) verbrennt die Matrix nicht, sondern verschwelt. Die entscheidenden Einflüsse auf die erzielbare Qualität der rCF sind vor allem der Anteil und die Zusammensetzung der Polymermatrix sowie die Prozessparameter der Pyrolyse (Zeit, Temperatur und Atmosphäre) [41], [44]. CF weisen ab einer Temperatur von 600 °C eine hohe Oxidationsneigung auf, die sich signifikant auf deren mechanische Eigenschaften auswirkt. Zudem wird die Schlichte auf der Faseroberfläche mit entfernt, was sich in der Regel negativ auf die

anschließende Weiterverarbeitbarkeit und auf die Verbundeigenschaften auswirkt. Als weitere Verfahrensvariante wurde der Einsatz von Mikrowellen untersucht, um die CFK-Abfälle direkt zu erwärmen, um somit die Prozesszeit zu reduzieren [45]. Die elektrodynamische Fragmentierung beruht hingegen auf der Entladung einer induzierten Hochspannung. Durch das schlagartige Entladen bildet sich ein Plasmakanal aus, der durch Expansion eine Druckwelle erzeugt, dadurch wird der Faser-Matrix-Verbund an den Grenzflächen, Korngrenzen und Inhomogenitäten aufgebrochen [46]. Die induktive Faser-Matrix-Separation nutzt die elektrische Leitfähigkeit der CF zum selektiven Erwärmen mittels Induktion. Durch Anlegen eines elektromagnetischen Wechselfeldes werden elektrische Wirbelströme im Bauteil erzeugt, die die Fasern direkt erwärmen. Dadurch wird die Faser-Matrix-Anbindung an der Grenzfläche zerstört, es muss daher nicht die gesamte Matrix zersetzt werden [47].

Im Unterschied zu den mechanischen und thermischen Verfahren befinden sich die **chemischen Separationsverfahren** noch überwiegend im Forschungsstadium [44]. Das Solvolyse-Verfahren beruht auf der Depolymerisation der Matrix durch ein Lösungsmittel. Das Lösungsmittel zerlegt die Matrix in stabile, kurzkettige Fragmente, die überwiegend flüssig sind. Die Reaktionsbedingungen (Druck, Temperatur und Zeit) und Lösungsmittel (z. B. Wasser, Glykol) sind analog der verschiedenen Matrixwerkstoffe vielfältig. Im Vergleich zur Pyrolyse ist das Energieniveau der Solvolyse niedriger. Die Solvolyse wird anhand der Prozessparameter *Druck* und *Temperatur* unterschieden. Erfolgt die Solvolyse bei Hochdruck und Temperaturen über 200 °C, wird sie als HTP-Solvolyse (= high temperatures and pressures) bezeichnet. Die LTP-Solvolyse erfolgt hingegen bei niedrigeren Temperaturen im Bereich von 80 °C bis 200 °C [48]-[49]. Das biotechnologische Trennen beruht indes auf der Matrixzersetzung durch Mikroorganismen, diese verstoffwechseln die Matrix. Die schonend freigelegten rCF bleiben zurück und können verwendet werden [50].

Bezüglich der Faser-Matrix-Separation besitzen thermoplastische Matrices gegenüber duroplastischen Matrices den Vorteil, dass diese (mehrfach) aufschmelzbar sind. Damit können thermoplastische CFK-Bauteile z. B. granuliert und als Sekundärrohstoff in Extrudern und Spritzgussmaschinen eingesetzt werden, was einem vergleichsweise einfachen und kostengünstigen Recyclingprozess entspricht. Wie beim mechanischen Zerkleinern ist damit allerdings ebenfalls kein hochwertiges Recycling möglich, siehe Kapitel 2.3.

Möglichkeiten zur Verbesserung der Matrix-Anhaftung

Nach der Pyrolyse ist auf den rCF keine intakte Schlichte mehr nachweisbar, wodurch sich u. a. die Faser-Matrix-Haftung und damit die Verbundkennwerte verringern. Da die rCF prinzipbedingt eine endliche Faserlänge in Form von Kurz-

oder Langfasern aufweisen, führt deren direkte Wiederbeschichtung mittels Besprühens, Tauchen, Foulardieren, etc. in der Regel zu großflächig verklebten Faseranhäufungen und erschwert damit deren Weiterverarbeitbarkeit. Deshalb wurden die rCF in [51] einer thermischen und einer Säurebehandlung ausgesetzt, um ihre Oberflächenmorphologie und -chemie zu modifizieren. Damit konnte bei anschließend durchgeführten Einzelfaserfragmentierungsversuchen eine erheblich höhere Grenzflächenscherfestigkeit (IFSS) im Vergleich zu den unbehandelten rCF nachgewiesen werden [52]-[53]. Die thermische Behandlung führte aufgrund einer erhöhten Oberflächenrauigkeit zu einer höheren mechanischen Reibung zwischen rCF und Matrix. Hingegen wird der durch die chemische Säurebehandlung verursachte Anstieg der IFSS auf die Sauerstoffanreicherung auf der Faseroberfläche zurückgeführt. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der rCF-Matrix-Haftung könnte die Technologie der Oxyflourierung darstellen, die am ITM in [54] umfangreich untersucht wurde.

2.3 Verwendung von recycelten Carbonfasern in CFK-Bauteilen

Aufgrund der hohen Herstellungskosten von CF werden diese bis zum heutigen Tag hauptsächlich in Form von Filamentgarnen eingesetzt. In diesen liegen die Fasern hochgradig orientiert vor, um damit deren hervorragende mechanische Eigenschaften in lastgerecht konstruierten CFK-Bauteilen optimal nutzen zu können. Die Verbundzugfestigkeiten von unidirektionalen (UD-)CFK-Bauteilen mit Standard-CF liegen dabei im Bereich von ca. 1200 bis 1500 MPa [55]. Solche Kennwerte sollten idealerweise auch bei CFK-Bauteilen aus rCF wieder (annähernd) erreicht werden, um einem möglichst hochwertigen Recyclingprozess zu entsprechen.

Nachfolgend sind aktuelle Lösungen dargestellt, wie rCF in neuen CFK-Bauteilen eingesetzt werden können.

rCF-verstärkte Spritzguss-Bauteile:

Die Firmen SABIC und Dell Inc. [56] oder AkroPlastic GmbH [57] setzen zermahlene oder sehr kurz geschnittene rCF (1-10 mm Faserlänge) zur Herstellung von faserverstärkten Spritzgussbauteilen ein. Zwar erreicht ein damit hergestelltes Bauteil eine deutlich höhere Festigkeit im Vergleich zu einem unverstärkten Kunststoff, dennoch liegt das genutzte Potential der rCF weit unterhalb ihres Leistungsvermögens. Die Ursachen dafür liegen in den sehr kurzen Faserlängen der rCF, in der nicht-lastgerechten Faserorientierung und im vergleichsweise geringen Faservolumenanteil (bis ca. 30 % [57]-[58]). Mit diesen Bauteilen lassen sich Verbundzugfestigkeiten bis ca. 150 MPa erzielen [58].

rCF-Vliesstoffstrukturen:

Die Herstellung von Vliesstoffen aus rCF wird national und international an zahlreichen Instituten erforscht (u. a. STFI [12], [59]-[60], DITF Denkendorf [61], RWTH Aachen [62]-[64], ITA Augsburg [65], Hochschule Niederrhein/Universität Duisburg-Essen [66]-[67], Hochschule Reutlingen [68], University of Nottingham [69]-[70] und Faserinstitut Bremen [71]-[72]) und von mehreren Firmen bereits industriell umgesetzt (ELG Carbon Fibre Ltd. [73], Carbon Conversion Inc. [74], Sigmatech Ltd. [75], SGL Automotive Carbon Fibers GmbH & Co. KG [76] und Tenowo GmbH [77]). Die Herstellung der Vliesstoffe fokussiert sich derzeit auf die etablierte Krempeltechnik, da hier mittlerweile rCF-taugliche Maschinentechiken zur Verfügung stehen. Neben den Vorteilen von rCF-Vliesstoffen, insbesondere hohe Produktivität und gute Drapierbarkeit, weisen diese verfahrensbedingt eine teilweise hohe Vliesungleichmäßigkeit, eine relativ geringe Faserausrichtung in Längsrichtung und einen geringen Faservolumenanteil im späteren Verbundbauteil (max. 40 % [11]-[12]) mit daraus resultierenden geringen Verbundzugfestigkeiten (ca. 200 bis 400 MPa [12], [67]) auf. Damit sind auch Vliesstoffe weniger für den Einsatz in hochbelastbaren Verbundbauteilen geeignet, das Leistungspotential der rCF wird bei weitem nicht ausgenutzt.

rCF-Band- bzw. Tapestrukturen

Anstelle einer Verfestigung zu Vliesstoffen können die hergestellten Vliese aus rCF auch mittels Bandtrichtern zu Bändern zusammengefasst werden, untersucht in [78], siehe Abbildung 2-4. In [79] wurden bebinderte rCF-Bandstrukturen entwickelt, die anschließend mittels Tapelegen und RTM-Verfahren zu duroplastischen Verbundprüfkörpern verarbeitet wurden, siehe Abbildung 2-4. Die Verbundzugfestigkeit beträgt hier jedoch nur ca. 350 MPa bei 34 % Faservolumenanteil. In [80] wurden schmale thermoplastische Tapes (Breite: 12 mm, Dicke: 0,1 bis 0,3 mm) aus verstrecktem und anschließend konsolidiertem rCF-PA 6-Krempelband mit einem Faservolumenanteil von 40 % entwickelt. Diese wurden anschließend mittels Weben zu flächigen Strukturen verarbeitet und zu Verbundprüfkörpern verpresst. Entsprechende Kennwerte zu den Verbundzugfestigkeiten sind nicht bekannt.



Abbildung 2-4: Bandstruktur aus 100 % rCF (links) [78] und mittels Tapelegen abgelegte rCF-Bandstrukturen (rechts) [79]

Aus den recherchierten Lösungen zur Verwendung von rCF in neuen CFK-Bauteilen ist ersichtlich, dass die bisher erzielbaren Verbundzugfestigkeiten bei weitem nicht an die von CFK-Bauteilen aus Carbon-Filamentgarn heranreichen. Die Ursachen hierfür liegen teilweise an der nicht-lastgerechten Faserausrichtung bzw. -orientierung, der unzureichenden Faserlänge der rCF, wodurch eingeleitete Kräfte nicht vollständig übertragen werden können, sowie dem geringen erzielbaren Faservolumengehalt durch zu voluminöse rCF-Halbzeuge.

Um das hohe Potential der rCF deshalb sinnvoller nutzen zu können, sollten diese möglichst lastgerecht-orientiert und kompakt im Bauteil vorliegen, sowie über eine hohe Faserlänge verfügen. Aus diesem Grund wäre es überaus zweckmäßig, die rCF wieder zu Garnkonstruktionen zu verarbeiten. Zur Umsetzung bietet sich dafür die Technologie der modernen Stapelfaserspinnerei an. Durch deren hochproduktive und hochautomatisierte Textilmaschinenteknik kann ein wirtschaftlich tragbares Recyclingverfahren realisiert werden. Gleichzeitig ermöglicht diese zudem die direkte Verspinnung von rCF und Thermoplastfasern (z. B. Polyamid (PA) 6) zu rCF-Hybridgarnen, um daraus thermoplastische CFK-Bauteile zu entwickeln. Bisher ist am Markt allerdings keine industrielle Prozesskette bekannt, welche die rCF und PA 6-Fasern zu qualitativ hochwertigen Garnkonstruktionen mit geringer Faserschädigung verarbeiten kann. Aus diesem Grund ist das Konzept zur Verspinnung von rCF und PA 6-Fasern zu rCF-Hybridgarnen völlig neuartig und erfordert eine tiefgreifende wissenschaftliche Untersuchung der gesamten Prozesskette.

2.4 Zusammenfassende Betrachtung

Carbonfasern bieten hervorragende mechanische Eigenschaften und werden deshalb immer häufiger in Leichtbauanwendungen eingesetzt. Gleichzeitig ist deren Herstellungsprozess sehr energie-, ressourcen- und dementsprechend kostenintensiv. Ein sinnvolles Recycling bietet deshalb die Möglichkeit, den Ressourcenverbrauch und die Herstellungskosten für CFK-Bauteile signifikant zu reduzieren. Heute bereits etablierte Recyclinglösungen von CF auf Basis von Spritzguss oder

von Vliesstoffen nutzen deren hohes Leistungspotential allerdings kaum aus. Hier bietet sich deshalb die Entwicklung von Hybridgarnkonstruktionen an, in denen die rCF wieder hochgradig orientiert und kompakt vorliegen und sich damit lastgerecht-konstruierte CFK-Bauteile herstellen lassen. Der Einsatz von rCF ermöglicht außerdem eine deutliche bessere Drapier- bzw. Umformbarkeit von Halbzeugen verglichen mit endlosen Carbon-Filamentgarnen. Gleichzeitig bietet die Verwendung von thermoplastischen Matrices deutliche Vorzüge gegenüber duroplastischen Matrices. Damit wird das sehr hohe Potential der rCF-Hybridgarne für die zukünftige breite industrielle Anwendung im Leichtbau verdeutlicht.

Zur Entwicklung und Umsetzung der rCF-Hybridgarne wird nachfolgend im Kapitel 3 zunächst die bestehende Prozesskette der konventionellen Stapelfaserspinnerei tiefgreifend analysiert und deren Defizite aufgezeigt. Daraus soll das Entwicklungspotential abgeleitet werden.

3 Prozessanalyse zur Verarbeitung von rCF mittels konventioneller Stapelfaserspinntechnik

3.1 Vorbetrachtung

Die moderne Stapelfaserspinntechnik zur Herstellung von Stapelfasergarnen aus Naturfasern (z. B. Baumwolle, Schafwolle) und Chemiefasern (z. B. Polyester) blickt auf eine über 200-jährige Geschichte zurück und war der Ausgangspunkt der Industriellen Revolution in England im 18. Jahrhundert. Die Maschinenteknik zur Faseraufbereitung, Spinnereivorbereitung und Verspinnung hat sich seit dem enorm weiterentwickelt und ermöglicht heutzutage eine hochproduktive und -automatisierte Massenherstellung von Stapelfasergarnen in einer Vielzahl an Varianten und Qualitäten.

Neben der Herstellung von Stapelfasergarnen für die Bekleidung sowie Heim- und Haustextilien werden zunehmend Garnkonstruktionen für Technische Textilien entwickelt, die z. B. in vielfältigen Anwendungen im Bereich Bau-, Sensor- und Medizintechnik eingesetzt werden. Die Verspinnung von recycelten Carbonfasern in Form von Stapelfasern ist hingegen ein völlig neuer Ansatz und wird im Rahmen dieser Arbeit erstmals wissenschaftlich grundlegend untersucht.

Aufgrund der relativen Unempfindlichkeit von konventionellen Fasermaterialien bei Querkräften und Verformungen können bei den einzelnen Prozessschritten sehr hohe Kräfte in die Fasern eingeleitet werden, um so hohe Prozessgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Verarbeitungsqualität zu ermöglichen. Im Vergleich dazu führen diese hohen Kräfte bei den rCF zu einer extrem hohen Faserschädigung, wodurch sowohl keine gleichmäßige Garnverspinnung mehr möglich ist, als auch die erzielbaren Verbundkennwerte drastisch sinken. Wesentliche Anforderung ist deshalb eine möglichst schonende Verarbeitung der rCF während des gesamten Verspinnungsprozesses. Dafür wird zunächst die gesamte Prozesskette zur Herstellung von konventionellen Stapelfasergarnen grundlegend analysiert und deren bestehende Defizite für die Verarbeitung von rCF aufgezeigt. Daraus sollen im nächsten Schritt Rückschlüsse zur anforderungsgerechten Entwicklung der rCF-Hybridgarne abgeleitet werden.

Eine stark vereinfachte Prozesskette zur Herstellung von konventionellen Stapelfasergarnen aus Langfasern ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

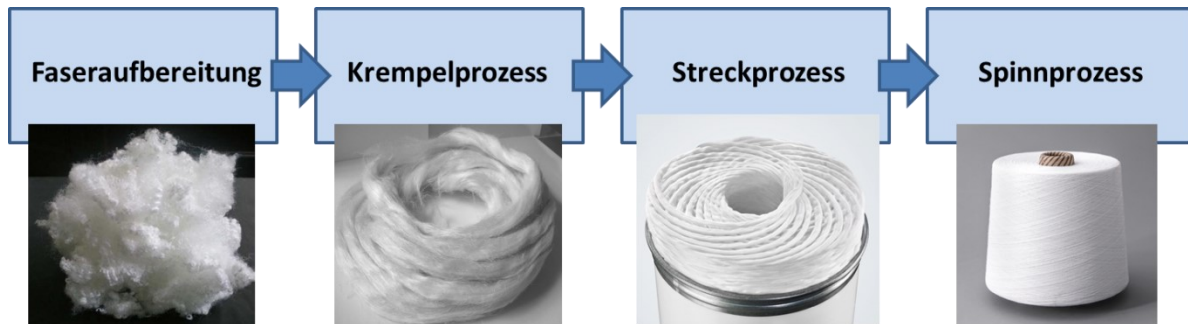


Abbildung 3-1: Vereinfachte Prozesskette zur Herstellung von konventionellen Stapelfasergarnen aus Langfasern

Nach der Faseraufbereitung (z. B. Reinigung, Mischung, Öffnung) werden die losen Stapelfasern einer Krepel zugeführt, wo diese erstmals zu einem zusammenhängenden Faserband verarbeitet werden. Anschließend werden mehrere solcher Krepelbänder zu einem Streckenband verstreckt, insbesondere um die Faserorientierung und die Bandgleichmäßigkeit zu erhöhen. Als letzter Schritt wird das Streckenband der Spinnmaschine zugeführt und zum fertigen Stapelfasergarn in der endgültigen Garnfeinheit ausgespinnen. Es können zahlreiche weitere Prozessschritte folgen (z. B. Umspulen, Zwirnen). In dieser Dissertationsschrift wird sich auf die drei wesentlichen Herstellungsschritte *Krepelprozess*, *Streckprozess* und *Spinnprozess* konzentriert. Nach deren umfassender Erläuterung erfolgt die separate Betrachtung von relevanten Fasereigenschaften und deren Einfluss auf die Band- und Garneigenschaften in der Stapelfaserspinnentechnik.

3.2 Analyse der Maschinen- und Prozesstechnik

3.2.1 Krepelprozess

Auswahl der Krepel

Zur Faserbandbildung werden in der modernen Spinnerei im Wesentlichen zwei verschiedene Maschinentypen eingesetzt, die Karde und die Krepel. Die Karde ist auf die Verarbeitung von kürzeren Fasern optimiert (z. B. Baumwolle, Chemiefasern kleiner 80 mm Schnittlänge), die Krepel auf Langfasern (z. B. Chemiefasern größer 80 mm Schnittlänge, Bastfasern, Schafwolle). Beide Typen bieten aufgrund ihres mechanischen Kardierprinzips die effektivste Möglichkeit zur Herstellung von Faserbändern mit einer hohen Faserlängsorientierung, weshalb sich diese besonders für die Stapelfasergarnherstellung eignen. Voruntersuchungen am ITM haben ergeben, dass die Verwendung einer Krepel eine deutlich gleichmäßigere Faserbandherstellung aus langen rCF im Vergleich zu einer Karde ermöglicht, die rCF jedoch bei beiden Maschinentypen massiv geschädigt werden.

Die am ITM eingesetzte Laborkrepel der Firma Anton Guillot KG (Aachen, Deutschland) ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Der Labormaßstab eignet sich

besonders für die intensive grundlegende Untersuchung, da entsprechend erforderliche Maschinenkonfigurationen mit relativ geringem Aufwand und Kosten umgesetzt werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich anschließend auf deutlich leistungsfähigere Industrieanlagen übertragen. Im Vergleich dazu ist der Arbeits- und Kostenaufwand zur Modifikation einer Industriekrempel um ein Vielfaches größer. Nachfolgend werden die Aufgaben und die Funktionsweise der eingesetzten Laborkrempel kurz erläutert.

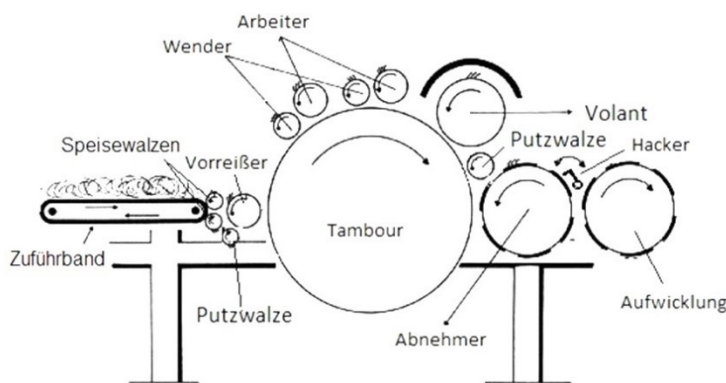


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung (links) und reale Abbildung (rechts) der eingesetzten Laborkrempel

Aufgaben und Funktionsweise der Krempel

Eine Krempel hat mehrere Aufgaben:

- Auflösung bzw. Öffnung der Faserflocken in Einzelfasern
- Durchmischung der Fasern
- Parallelisierung und Ausrichtung der Fasern in Längsrichtung
- Ausreinigung von Kurzfasern, Nissen und Störpartikeln
- Herstellung eines zusammenhängenden Faserbands aus den vereinzelt Fasern

Die ungeöffneten Faserflocken werden beim Krempelprozess zunächst auf das kontinuierlich laufende Zuführband vorgelegt und der Vorreißerwalze zugeführt, wodurch diese vorgeöffnet und aufgelockert werden. Anschließend werden die Faserflocken auf den schnell drehenden Tambour übertragen und dort von den Arbeiterwalzen „kardiert“, d. h. aufgelöst, aufgelockert und in Längsrichtung ausgerichtet, siehe Abbildung 3-3 (a). Dies wird durch die Geschwindigkeitsunterschiede und die Stellung der Garniturzähne (*Kardierstellung*) auf den jeweiligen Walzen realisiert. Die Auflösung bzw. Öffnung der Faserflocken in Einzelfasern erhöht dabei maßgeblich die spätere Gleichmäßigkeit der daraus hergestellten Bänder und Garne, da sich die vereinzelt Fasern gleichmäßiger im Band verteilen

und somit einen einheitlichen Bandquerschnitt ermöglichen. Gleichzeitig verbessert es die Faserausrichtung und die Entfernung von Schmutz [81]-[82]. Um die Fasern wieder von der Arbeiterwalze zu entfernen, befindet sich eine zusätzliche Wenderwalze vor jedem Arbeiter, diese nimmt die Fasern von der Arbeiterwalze ab (*Abnahmestellung*) und übergibt diese zurück an den Tambour (*Abnahmestellung*). Dabei werden die Fasern gleichzeitig gestreckt und parallelisiert. Beide Garniturstellungen sind in Abbildung 3-3 (b) dargestellt.

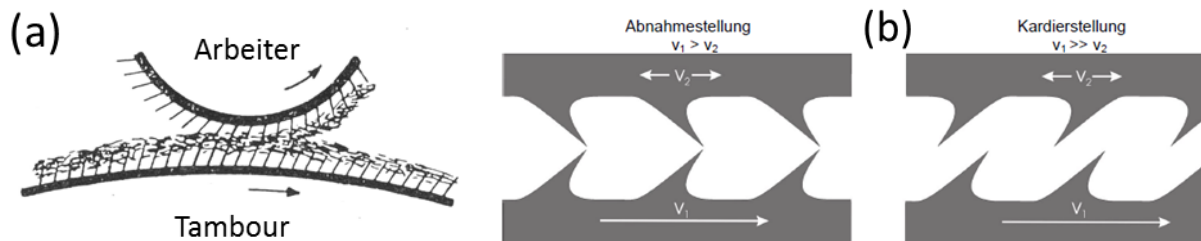


Abbildung 3-3: Auflösung der Faserflocken zwischen Arbeiter und Tambour (a), Abnahme- und Kardierstellung der Walzengarnituren in einer Krempel (b) [82]

Nachdem die Fasern die Arbeiter-Wender-Walzenpaare passiert haben, erfolgt ein „Ausbürsten“ des Tambours mittels der flexiblen Garnituren der Volant-Walze, um auch die tiefsitzenden Fasern zu lösen. Die Fasern werden anschließend vom langsam drehenden Abnehmer abgenommen, wodurch sich die Fasern aufstauen bzw. verdichten. Der daraus entstehende Faserflor wird durch einen mechanischen Hacker von der Abnehmerwalze abgeschlagen [82]-[84]. Aufgrund der bauartbedingten geringen Größe von Laborkrempeln ist direkte Weiterverarbeitung des sehr feinen Flors nicht zweckmäßig, da dieser eine viel zu geringe Festigkeit bzw. Bandhaftung für die anschließende Garnherstellung aufweisen würde. Deshalb sind Laborkrempeln mit einer zusätzlichen Aufwicklungswalze ausgestattet, bei der der endlos hergestellte Flor zu einem mehrlagigen Vlies mit endlicher Länge aufgewickelt wird. Aus mehreren solchen Vliesen wird anschließend das Krempelband manuell zusammengesetzt.

Relevante Krempel- und Prozessparameter sowie auftretende Prozesskräfte

Der Vorteil einer hohen Faserorientierung im Faserband mittels mechanischer Kardierung über Walzen bei der Krempel führt unweigerlich zu einer hohen Beanspruchung der Fasern. Der daraus resultierende Grad an Faserschädigung wird dabei maßgeblich von den Fasereigenschaften sowie den eingestellten Krempel- und Prozessparametern beeinflusst. Wesentliche Krempel- und Prozessparameter sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Wesentliche Krempel- und Prozessparameter

Krempelparameter	Krempelprozessparameter
Arbeitsbreite der Krempel	Geschwindigkeit der Walzen
Anzahl an Walzen	Abstände der Walzen zueinander
Verwendete Walzengarnitur	

Die Arbeitsbreite der Krempel bestimmt maßgeblich die Produktionsleistung des Krempelprozesses und ist für die durchzuführenden Grundlagenuntersuchungen zunächst nicht relevant. Die Anzahl der jeweiligen Walzen bestimmt sowohl die Produktionsleistung als auch z. B. die Kardierintensität. Eine konstruktive Veränderung der Anzahl an Walzen ist jedoch nur mit hohem Aufwand möglich. Die Wahl der Walzengarnituren ist essentiell beim Krempelprozess, deren Geometrie und Anzahl an Garniturzähnen bestimmt maßgeblich das Verarbeitungsverhalten der Fasern im Krempelprozess [85]. Exemplarische Garniturtypen sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

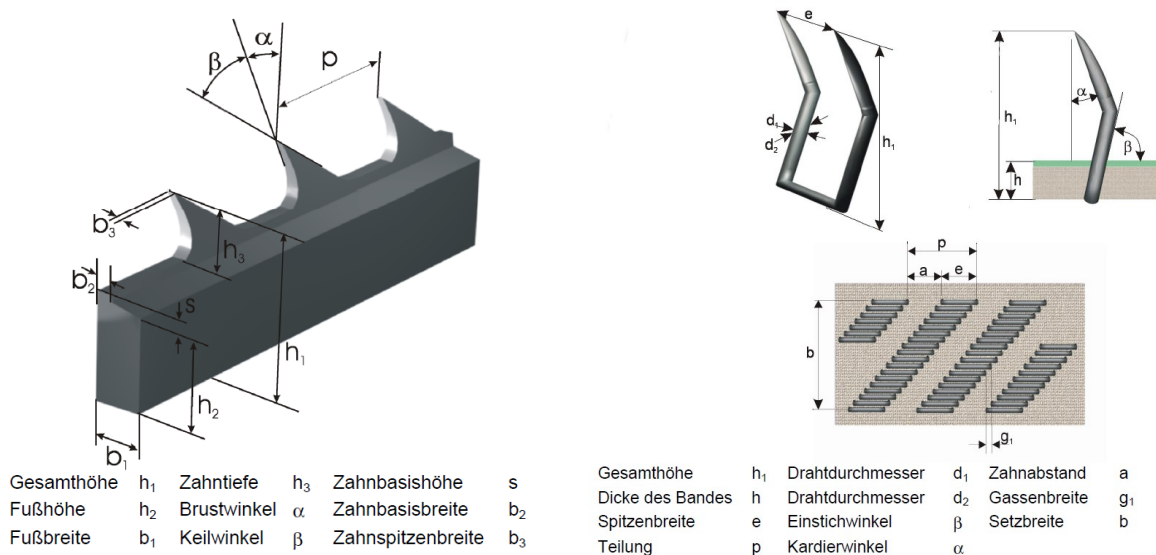


Abbildung 3-4: Ganzstahlgarnitur (links) und flexible Garnitur (rechts) mit zugehörigen Parametern [82]

Am Markt gibt es eine große Vielfalt an unterschiedlichen Walzengarnituren. Das Know-how zur Wahl der Garnituren liegt dabei nahezu ausschließlich bei den Garnitur- bzw. Karden- und Krempelherstellern. Grundsätzlich sind Fasertyp, Faserlänge, Faserfeinheit, Krempelkonzept, Florgewicht und Liefergeschwindigkeit die wichtigsten Kriterien, welche für die Wahl der Garnituren maßgebend sind. Zudem gelten die Faustregeln:

- Feine Fasern oder Endprodukte = feine Garnituren
- Grobe Fasern oder Endprodukte = grobe Garnituren
- Schlecht aufgelöstes Material sowie Recyclingfasern = grobe Garnituren [86]

Aufgrund der relativen Neuartigkeit von rCF verfügen die Hersteller allerdings über entsprechend wenig Erfahrung zu deren Verarbeitungseigenschaften, wodurch die

Auswahl der passenden Garnituren herausfordernd ist. Zudem sei der große Aufwand zum Beziehen einer neuen Garnitur auf den Walzenrohling erwähnt sowie die Notwendigkeit zur Anfertigung von zusätzlichen Walzenrohlingen für jede neue Garniturvariante, da ansonsten die bisher aufgezoogene Garnitur bei einem Wechsel unwiederbringlich verloren gehen würde.

Bei den Krempelprozessparametern sind insbesondere die Walzengeschwindigkeit und der Abstand der Walzen zueinander bei der Verarbeitung der Fasern relevant. Bei der Walzengeschwindigkeit gilt dabei der Grundsatz, je höher die Walzengeschwindigkeit bzw. die daraus resultierende Produktionsleistung der Krempel, desto höher die Faserschädigung [82]-[83]. Die Variation der Walzengeschwindigkeiten ist bei der eingesetzten Laborkrempel jedoch mit Ausnahme der Aufwicklungswalze nicht vorgesehen. Hingegen sind die Walzenabstände bei nahezu jeder Walze im Bereich von 0 mm bis ca. 3 mm variierbar. Durch Verringerung der Abstände der Walzen zueinander erhöht sich in der Regel die Faserübertragungsrate (= höhere Produktionsleistung), der Grad der Einzelfaserlösung (= höhere Bandgleichmäßigkeit) und die Faserorientierung in Längsrichtung, gleichzeitig aber auch der Grad der Faserschädigung [82], [85]. Nachfolgend soll deshalb genauer auf die Mechanismen der Faserschädigung im Krempelprozess eingegangen werden.

Untersuchungen zur Faserschädigung von Naturfasern in einer Krempel in [87]-[90] haben gezeigt, dass diese im Wesentlichen durch zu hohe Zugkräfte verursacht wird. Diese treten auf, wenn die einzelnen Fasern aus den Faserflocken herausgezogen werden oder an zwei Walzengarnituren gleichzeitig hängen bleiben. Dabei wird die maximale Zugfestigkeit der Fasern teilweise überschritten, wodurch diese zerreißen, siehe Abbildung 3-5.

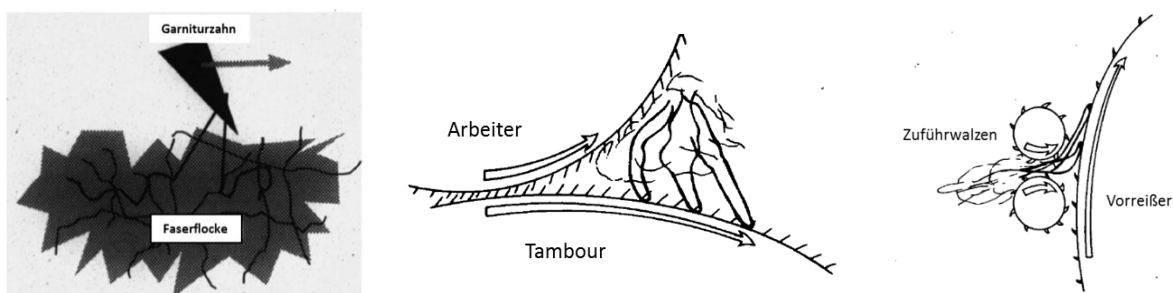


Abbildung 3-5: Mechanische Belastungen von Fasern im Krempelprozess [87], [89]

Aufgrund der deutlich höheren Zugfestigkeit der rCF im Vergleich zu Naturfasern, siehe dazu Kapitel 3.3.3, werden aber andere Ursachen für die hohe Faserschädigung beim Krempelprozess vermutet. Bisherige Untersuchungen zur Schädigung von spröden Hochleistungsfasern sind in der Literatur insbesondere beim glasfaserverstärkten Spritzguss zu finden, die hier für die Analyse mit

herangezogen werden. Beim faserverstärkten Spritzgussprozess wird zunächst vereinfacht angenommen, dass sich die Verstärkungsfasern in einem strömenden Newtonschen Fluid bewegen [91]. Diese werden dabei auf Biegung (a), Torsion (b), Zug bzw. Druck (c) und Scherung (d) beansprucht, woraus unterschiedliche Faserbewegungen resultieren, siehe Abbildung 3-6.

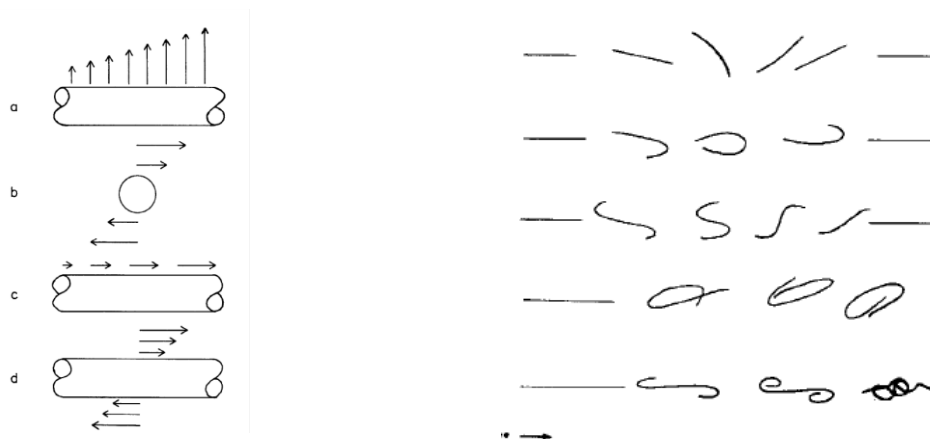


Abbildung 3-6: Wirkende Kräfte auf Fasern in einem strömendem Fluid (links) und daraus resultierende, beispielhafte Faserbewegungen (rechts) [92]

Bei den untersuchten Glasfasern wird dabei in [92]-[93] insbesondere das Biegen bzw. Knicken der Fasern als Hauptursache für den Faserbruch identifiziert. Dies ist zum einen auf das spröde Bruchverhalten von Glasfasern, zum anderen auf den deutlich größeren kritischen Biegeradius zurückzuführen. Letzterer resultiert aus der geringeren Bruchdehnung bzw. dem deutlich höheren E-Modul der Glasfasern (E-Glas: ca. 76 GPa) im Vergleich zu konventionellen Natur- oder Chemiefasern (z. B. Baumwolle: 5 bis 10 GPa). Weiterhin wurde nachgewiesen, dass längere Glasfasern im Vergleich zu kürzeren Glasfasern deutlich mehr geschädigt werden [91]-[92]. Die Ursache dafür liegt im geänderten Verhältnis von Faserlänge zu Faserdurchmesser, dem sogenannten Schlankheitsgrad. Dabei weisen bei gleichem Durchmesser kürzere Fasern prinzipbedingt eine höhere Biegesteifigkeit als längere Fasern auf [94]. Dies ist auch gleichzeitig die Ursache dafür, dass sich die auftretende Faserschädigung erheblich verringert, wenn die Glasfasern anstelle von vereinzelt Fasern in Form von Faserbündeln vorliegen [95]-[96]. Zurückzuführen ist dies auf den deutlich höheren Durchmesser der Bündel im Vergleich zu vereinzelt Fasern bei gleicher Länge.

Diese ermittelten Ursachen zur Faserschädigung lassen sich auch auf die Verarbeitung von rCF in der Krempel übertragen. Darin werden die rCF durch strömende Luft (z. B. Voröffnung der Fasern, Fasertransport über Förderventilatoren) und durch kleine Umlenkradien (z. B. an den Garniturzähnen, zwischen zwei Walzen) stark verformt, wodurch z. T. Knickstellen bzw. kritische Biegeradien entstehen. Dieser kritische Biegeradius R_K der rCF ist aufgrund des sehr hohen E-Moduls im

Vergleich zu Glasfasern nochmals größer und beträgt nach der Gleichung (3-1) bei einem rCF-Bündel mit einem Durchmesser $d_{rCF} = 0,76 \text{ mm}$ ($\approx 800 \text{ tex}$ Feinheit), einem Zugmodul $E_{rCF} = 230 \text{ GPa}$ und einer Faserzugfestigkeit $\sigma_{rCF} = 3500 \text{ MPa}$ näherungsweise $R_{KrCF} = 24,9 \text{ mm}$ [92].

$$R_K = \frac{E}{2\sigma} \cdot d \quad (3-1)$$

Ein Glasfaserbündel mit gleichem Durchmesser weist demgegenüber einen kritischen Biegeradius von nur $R_{KGlaser} = 8,5 \text{ mm}$ auf, mit $E_{Glaser} = 76 \text{ GPa}$ und $\sigma_{Glaser} = 3400 \text{ MPa}$. Damit erklärt sich die hohe auftretende Faserschädigung der rCF bei den durchgeführten Voruntersuchungen an der Krepel, da dort der kritische Biegeradius der rCF teilweise deutlich überschritten wird, wie in Abbildung 3-5 verdeutlicht.

3.2.2 Streckprozess

Auswahl der Strecke

Wie beim Krepelprozess wird bei den Maschinentechiken des nachfolgenden Streckprozesses zwischen Kurz- und Langfasern unterschieden. Bei der Verarbeitung von Baumwolle und ähnlich langem Polyester werden in der Regel Strecken der Kurzstapelspinnerei mit drei bis vier Walzenpaaren eingesetzt. Bei Langfasern (z. B. Bastfasern, Schafwolle) werden hingegen Langstapel-Strecken, zumeist Nadelstabstrecken, verwendet. Diese weisen zusätzliche Nadelelemente im Streckwerk auf, um einen gleichmäßigeren Verzugsprozess zu ermöglichen, siehe Abbildung 3-7 (rechts). Als kritisch wird allerdings das Eingreifen der Nadeln in die rCF-Bänder bewertet, was zu einer erheblichen Faserschädigung der rCF führen könnte. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchungen eine moderne Kurzstapel-Strecke vom Typ RSB-D 40 V2 der Firma Rieter Ingolstadt GmbH (Ingolstadt, Deutschland; Abbildung 3-7 (links)) eingesetzt. Bei dieser Strecke ist der Abstand zwischen den Verzugswalzen (= Feldweite) jeweils bis 90 mm einstellbar, wodurch ebenfalls die Verarbeitung von langen rCF möglich ist.

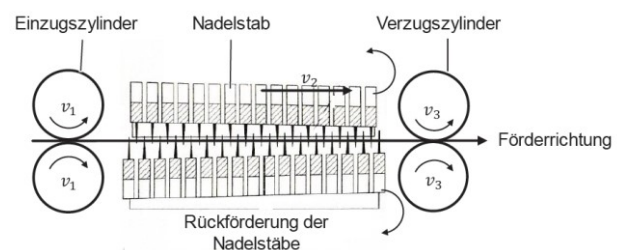


Abbildung 3-7: Eingesetzte Kurzstapel-Strecke RSB-D 40 V2 (links) und Prinzipskizze einer Nadelstabstrecke [97] (rechts)

Aufgaben und Funktionsweise der Strecke

- Parallelisierung und Ausrichtung der Fasern in Längsrichtung im Faserband
- Ausgleich von Bandmassenschwankungen durch Doublierung und Regulierung
- Durchmischung der Fasern
- Entstaubung der Bänder

Wesentliche Kernaufgabe des Streckprozesses ist die Ausrichtung der Fasern in Längsrichtung und der Ausgleich von Bandmassenschwankungen. Dazu werden mehrere Krempelbänder gleichzeitig aus Kannen ((1) in Abbildung 3-8 (links)) über Umlenkrollen (2) dem Streckwerk (3) zugeführt und dort verstreckt, in dem sich die Walzenpaare im Streckwerk unterschiedlich schnell drehen. Durch dieses Verziehen werden die Fasern hochgradig in Längsrichtung ausgerichtet. Die verstreckten Bänder werden anschließend mittels Düsen bzw. Trichter (4) zu einem Streckenband zusammengefasst und über Abzugswalzen (5) dem Kannenstock zugeführt. Dieser Kannenstock besteht aus einem Drehteller (6), der das Streckenband zyklidenförmig in die Kanne (7) ablegt. Durch das gleichzeitige Zuführen mehrerer Krempelbänder (= Doublieren) gleichen sich die Bandmassenschwankungen der einzelnen Bänder weitestgehend aus, wodurch in der Regel ein gleichmäßigeres Streckenband entsteht [98]. Eine weitere Verringerung der Bandmassenschwankungen erfolgt durch die Regulierungseinheit (8). Diese komprimiert die einlaufenden Krempelbänder mittels mechanischer Tastscheibe auf Substanzquerschnitt, wobei diese bei ungleichmäßigen Bändern unterschiedlich stark ausgelenkt wird. Über ein Steuerungs- und Regelungssystem wird anschließend die Geschwindigkeit der Streckwerkwalzen verändert, wodurch die einzelnen Dick- und Dünnstellen im Band durch höheren oder geringeren Verzug der Bänder gezielt ausgeglichen werden.

Das Kernelement der Strecke, das Streckwerk, ist in Abbildung 3-8 (rechts) im Detail dargestellt. Dabei handelt es sich bei der eingesetzten Strecke um ein 4-über-3-Streckwerk mit vier Oberwalzen und drei Unterwalzen, welches in Vor- und Hauptverzugszone unterteilt wird. Beim Vorverzug werden die Fasern im Band gelockert und die Faserorientierung erhöht, um einen gleichmäßigen Hauptverzug zu ermöglichen. Der Wert des Verzugs gibt an, um das wievielfache die Bänder verstreckt werden. Dieser beträgt beim Vorverzug zumeist 1,15- bis 1,7, beim Hauptverzug zumeist 4,0 bis 8,0 [98].

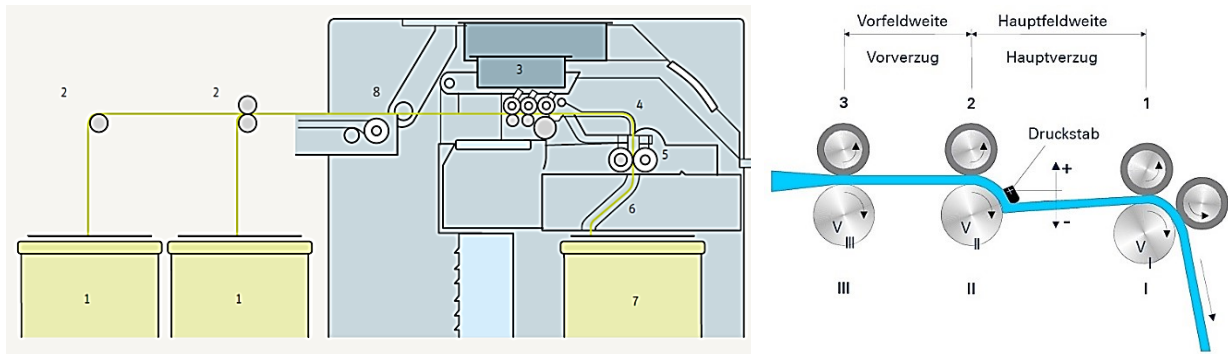


Abbildung 3-8: Prinzipabbildung der eingesetzten Strecke (links) und des Streckwerks (rechts) [98]

Relevante Strecken- und Prozessparameter sowie auftretende Prozesskräfte

Die bei der Strecke stattfindenden Verzugsprozesse sind äußerst komplex und auch heute noch Gegenstand der Forschung. Deshalb wird nachfolgend nur auf die wesentlichen Zusammenhänge eingegangen, zum tiefergreifenden Verständnis wird auf Sekundärliteratur verwiesen, z. B. [81], [94], [98] und [99].

Um einen Verzug der Krempelbänder überhaupt zu ermöglichen, müssen die Krempelbänder bzw. die darin enthaltenen Fasern zunächst zwischen den Ober- und Unterwalzen ausreichend geklemmt werden. Daraus ergibt sich eine zentrale Schwierigkeit bei der Verarbeitung der rCF auf der Strecke. Diese Fasern weisen zum einen eine sehr glatte Oberfläche auf, benötigen also eine hohe Kraft zur ausreichenden Klemmung. Andererseits sind die rCF extrem querkraftempfindlich, brechen also bei hoher Klemmkraft sehr leicht durch. Voruntersuchungen am ITM haben dementsprechend ergeben, dass die rCF in einem konventionellen Streckwerk massiv geschädigt werden. Die notwendige Klemmkraft ist dabei im Wesentlichen von den Fasereigenschaften und der Oberfläche der Streckwerkswalzen abhängig und wird über den Belastungsdruck eingestellt [98]. Grundsätzlich führt eine Verringerung der Streckwerksbelastung zu einem höheren Faserschlupf [81], zur Verringerung des Verzugs [100] und zu einem ungleichmäßigeren Streckenband bzw. Garn [101]. Neben der Härte der gummierten Oberwalzen ist die Art der Riffelung der Unterwalzen für eine effektive linienförmige Klemmung der Fasern entscheidend, siehe Abbildung 3-9 [98], [102]-[104].

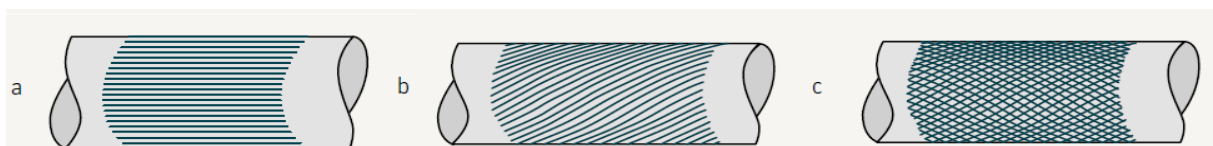


Abbildung 3-9: Streckwerksunterwalzen mit (a) gerader Riffelung, (b) schräger Riffelung, (c) gekreuzter Riffelung [98]

Beim eigentlichen Verzugsprozess der Krempelbänder werden die Fasern ähnlich wie beim Krempelprozess auf Biegung, Torsion, Zug und Scherung belastet. Die

dabei auftretenden Kräfte sind im Allgemeinen allerdings vergleichsweise gering und werden deshalb als vernachlässigbar bewertet. Die Gleichmäßigkeit des Verzugsprozesses ist im Wesentlichen von der Höhe und der Gleichmäßigkeit der im Faserband vorliegenden Faser-Faser-Reibung bzw. den resultierenden Verzugskräften abhängig [81], [99]. Für einen optimalen Verzug wird die Feldweite des Streckwerks in der Regel auf die längsten Fasern (z. B. auf die Stapelfaserlänge von Baumwolle oder die Schnittlänge von Chemiefasern) zzgl. weniger Millimeter eingestellt [81]. Dabei kann zum einen der Fall auftreten, dass überlange Fasern auseinandergerissen werden, die zwischen zwei Streckwerkswalzenpaaren eingeklemmt sind. Zum anderen könnten die Fasern aus einem Walzenpaar herausgezogen werden und dabei benachbarte Fasern mitreißen, was wiederum zu Verzugsstörungen führt [94]. Für die hier untersuchten rCF kann aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit mehrheitlich von letzterem Fall ausgegangen werden, was eine gleichmäßige Streckbandherstellung dementsprechend erschwert. Bei kürzeren Fasern tritt hingegen ein sogenanntes Schwimmen auf, wenn diese von keiner Streckwerkswalze erfasst werden. Dies kann zu sogenannten Verzugswellen führen und infolgedessen ebenfalls zu Band- und Garnungleichmäßigkeiten [94], [105]-[110]. Dementsprechend sollte die Feldweite auch nicht zu groß gewählt werden [81]. Weiterhin verringert sich in der Regel die Band- und Garnleichmäßigkeit bei Erhöhung der Verzugsgeschwindigkeit (= Liefergeschwindigkeit der Strecke) und des Verzugs [99]. Somit besteht insgesamt betrachtet vermutlich eine große Herausforderung bei der Verstreckung der rCF, u. a. aufgrund ihrer hohen Querkraftempfindlichkeit und der breiten Faserlängenverteilung mit vielen langen und kurzen Fasern, die eine gleichmäßige Verstreckung erschweren.

3.2.3 Spinnprozess

Auswahl der Spinnmaschine

Nach dem Streckprozess erfolgt der abschließende Spinnprozess. Dabei werden die Streckenbänder auf die endgültige Garnfeinheit verstreckt und mittels unterschiedlicher Verfahren verfestigt. Aufgrund der Vielzahl an existierenden Spinnverfahren am Markt wurden zunächst wesentliche Verfahren auf deren grundsätzliche Eignung untersucht. Dies beinhaltete konkret das *Flyer-* bzw. *Ringspinnen*, *Rotorspinnen*, *Luftdüsenspinnen*, *Friktionsspinnen* und *Umwindespinnen*. Deren wesentliche Kenndaten sind in Tabelle 3-2 dargestellt. Nachfolgend wird die Verarbeitung von rCF mit den unterschiedlichen Verfahren kurz erläutert.

Tabelle 3-2: Wichtige Kenndaten der verschiedenen Spinnverfahren

	Flyer/Ringspinnen	Rotorspinnen	Luftdüsen- spinnen	Friktionsspinnen	Umwinde- spinnen
Vorlage	Band/Flyerlunte	Band	Band	Band	Band
Verzug auf Garnfeinheit	Streckwerk	Auflösewalze + Faserleitkanal	Streckwerk	Streckwerk + Auflösewalze	Streckwerk
Drehungs- erteilung	Mechanisch durch Flügelkrone-Flügel/ Ring-Läufer; Echtdraht	Mechanisch durch Rotor; Echtdraht	Pneumatisch durch Luftströmung; Falschdraht	Mechanisch durch zwei Friktionswalzen; Echtdraht	Ohne Drehung
Lieferge- schwindigkeit	bis 30 m/min	bis 320 m/min	bis 500 m/min	bis 200 m/min	bis 30 m/min

Das **Ringspinnverfahren** ist ein universelles Verfahren zur Herstellung von feinem und grobem Garn aus nahezu allen Fasermaterialien. Die Drehungserteilung erfolgt über ein Ring-Läufer-System, siehe Abbildung 3-10. Dazu ist ein Vorgarn (= Flyerlunte) erforderlich, welches mittels **Flyerverfahren** aus den Streckenbändern hergestellt wird.

Für die Voruntersuchungen wurden der Flyer F15 und die Kompaktringspinnmaschine K44, beide Firma Rieter AG (Winterthur, Schweiz), eingesetzt. Das rCF-Streckenband wird dem Streckwerk des Flyers zugeführt und verzogen, anschließend wird eine Schutzdrehung erteilt und die hergestellte Flyerlunte wird auf eine Hülse aufgewickelt. Bei der darauffolgenden Verarbeitung der rCF-Flyerlunte auf der Kompaktringspinnmaschine K44 treten aufgrund der vorliegenden Streckwerkskonstruktion erhebliche Verzugsfehler und Fadenbrüche auf. Die in der Flyerlunte enthaltenen Kurzfasern werden in die Absaugung an der Spinnstelle gezogen und führen dann zum Fadenbruch oder sie bleiben im Läufer hängen. Die aufgetretenen Verzugsstörungen während des Verzugsprozesses und die Flyerlunte mit hohem Kurzfaseranteil verursachen vermehrt Dick- und Dünnstellen im Ringgarn. Insgesamt wird daher bewertet, dass die Verspinnung der Ringgarne grundsätzlich möglich ist, allerdings reicht die Prozessstabilität aufgrund der vorhandenen Streckwerkskonstruktion für eine industrielle Garnherstellung nicht aus. Deshalb sind noch Modifikationen für eine höhere Garnleichmäßigkeit erforderlich. Die Ringgarne eignen sich aber aufgrund der hohen erteilten Drehung von 400-800 T/m, die zu erheblichen Fasereinkürzungen führen, und der Garnfeinheit von 30-100 tex weniger für Anwendungen im Verbundbereich. Hingegen können die Flyerlunten auch direkt als Garne mit gröberer Feinheit (bis ca. 3.500 tex) und sehr niedriger Drehung

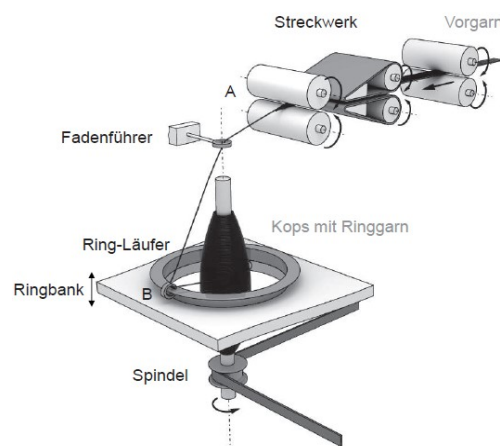


Abbildung 3-10: Schematischer Aufbau einer Ringspinnmaschine [15]

(≥ 60 T/m) eingesetzt werden, die sehr gut für CFK-Anwendungen geeignet erscheinen. Nachteilig könnte sich dennoch die notwendige Verdrehung der rCF im Flyergarn auf die späteren Verbundkennwerte auswirken, da die Fasern prinzipbedingt von der Längsachse ausgelenkt werden. Hier besteht deshalb erheblicher Forschungsbedarf.

Das **Rotorspinnverfahren** wurde mittels Autocoro AC360 der Firma Saurer Germany GmbH & Co. KG, (Übach-Palenberg, Deutschland) untersucht. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 3-11 dargestellt. Das Streckenband wird mit minimaler Einzugsgeschwindigkeit von 0,5 bis 1,0 m/min über eine Speisewalze und einen Speisetisch der Auflösewalze zugeführt. Die Auflösewalze besteht aus einer Ganzstahlgarnitur mit scharf ausgebildeten Spitzen und rotiert mit einer Drehzahl von bis zu 10.000 U/min, woraus eine sehr intensive Auskämmung und Auflösung der Fasern resultiert. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die rCF durch die prinzipbedingte sägezahnartige Ganzstahlgarnitur sowie die ungünstige Anordnung und Geometrie der Speisewalze/Speisemulde zur Auflösewalze sehr stark beansprucht und massiv eingekürzt werden. Zudem setzen sich die Zwischenräume der Garnitur nach und nach zu. Nur am Anfang des Prozesses werden die stark geschädigten Fasern über einen Luftstrom aus der Garnitur gelöst und durch den Faserleitkanal zum rotierenden Rotor transportiert. Die kurzen Fasern rutschen aufgrund der Zentrifugalkraft an der Rotorwand entlang und formieren sich ringförmig. Der dabei entstehende Faserring aus Kurzfasern lagert sich im Rotor ab und kann nicht abgezogen werden. Es kann kein Garn versponnen werden. Somit ist das Rotorspinnverfahren aufgrund der Auflöseinheit und der Rotorgeometrie für die Verarbeitung von rCF prinzipiell ungeeignet.

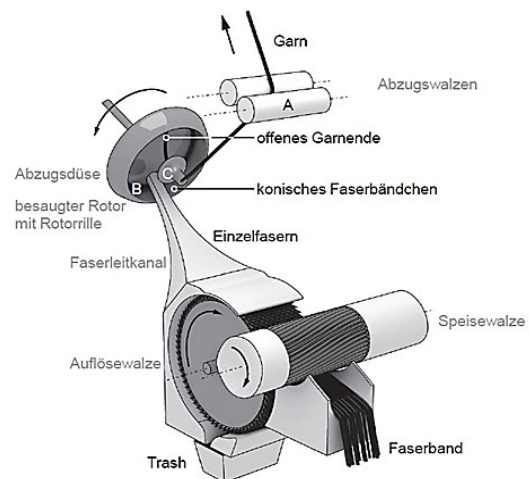


Abbildung 3-11: Schematischer Aufbau einer Rotorspinnmaschine [15]

Das Friktionsspinnen wurde mittels **Friktionsspinnverfahren** DREF 3000 der Firma Fehrer AG (Linz, Österreich) untersucht. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3-12 (links) dargestellt. Aufgrund der Erfahrungen beim Rotorspinnen wurde wegen der Auflöseinheit auf die Verarbeitung von rCF im Garnmantel verzichtet und das rCF-Streckenband ausschließlich als Material für den Garnkern zugeführt. Ein zusätzliches PA 6-Streckenband wird als Material für den Mantel hinzugefügt, wodurch ein Kern-Mantel-Hybridgarn ausgespinnen wird. Durch geeignete Wahl der

Spinnparameter können relativ gleichmäßige Hybridgarne erzeugt werden, in einem breiten Feinheitsspektrum von 400 bis 2.000 tex. Als größtes Defizit gilt allerdings die deutlich niedrigere Garnfestigkeit der Friktionsgarne im Vergleich zu den anderen Spinnverfahren aufgrund der herstellungsbedingten geringen Längsorientierung der Mantelfasern sowie der geringen Haftung zwischen Kern- und Mantelfasern [111].

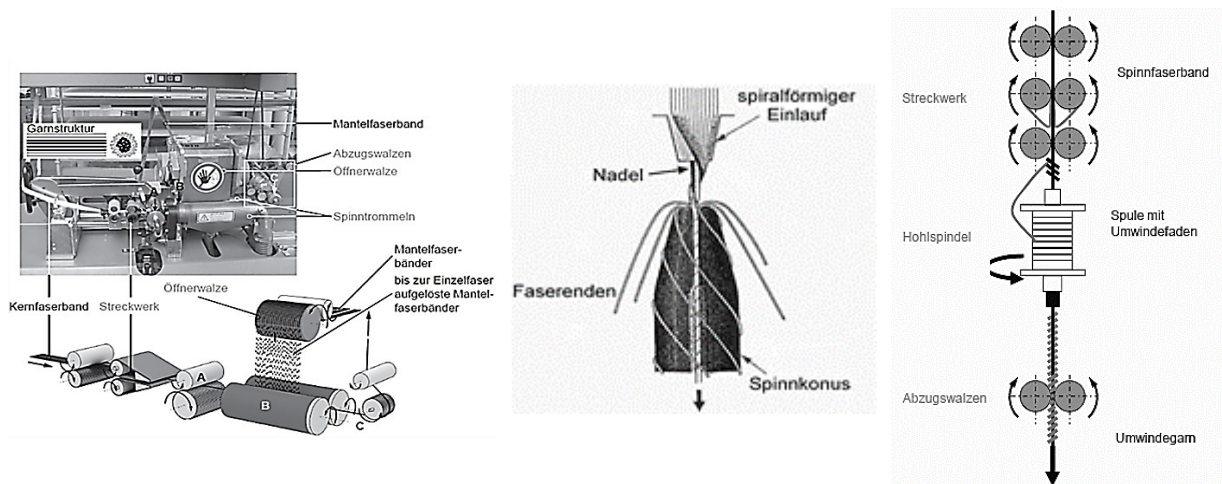


Abbildung 3-12: Schematischer Aufbau einer Friktionsspinnmaschine [15] (links), Luftdüsen-spinnmaschine [112] (Mitte) und Umwindespinnmaschine [15] (rechts)

Die Verspinnung von rCF-Garnen nach dem **Luftdüsen-spinnverfahren** wurde an einer Luftdüsenmaschine J20 der Firma Rieter AG (Winterthur, Schweiz) durchgeführt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3-12 (Mitte) dargestellt. Das Streckenband wird zunächst dem Streckwerk zugeführt, dieses verzieht das Band auf die gewünschte Feinheit. Anschließend werden die Fasern durch das Faserführungselement in einem Luftstrom zur Spinndüse transportiert, in der eine Rotationsströmung herrscht. Das freie hintere Ende eines Fadens rotiert in dieser Strömung und die zugeführten vereinzelt Fasern binden sich an das offene Ende des Fadens an. Die anderen hinteren Faserenden werden abgespreizt, wickeln sich um die Spinnspitze (Konus) und umwinden den parallelen Faserkern. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die eingesetzte Streckwerkskonfiguration nicht für die Verarbeitung von rCF mit Faserlängen größer 40 mm geeignet ist. Nächster kritischer Punkt ist das notwendige „Umklappen“ der querkraftempfindlichen rCF an der Spinnspitze. Dies verursacht eine extrem hohe Faserschädigung und führt zu einer geringeren Garndrehung sowie zu einer ungleichmäßigen und haarigen Garnstruktur. Das vorliegende Maschinenkonzept ist somit für eine Verarbeitung von rCF nicht geeignet.

Beim **Umwindespinnverfahren** erhält das Umwindegarn seine Festigkeit nicht durch ein Verdrehen, sondern indem ein Filamentgarn um das ungedrehte rCF-Faserband herumgeschlungen wird. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3-12 (rechts) dargestellt. Während des Spinnvorgangs passiert das im Streckwerk verzogene

Faserband die Hohlspindel, auf der die Filamentgarnspule aufgesteckt ist. Infolge der Rotation umwindet das feine Filamentgarn das durchlaufende Faserband. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mit diesem Umwindespinverfahren relativ gleichmäßige Hybridgarne mit bis zu 2.000 tex Garnfeinheit bei stabilem Prozess versponnen werden können. Allerdings onduziert das Garn durch die Einschnürung des Umwindfadens stark, was vermutlich ebenfalls zu geringeren mechanischen Kennwerten im späteren Verbund führt. Dennoch zeigt auch das Umwindverfahren ein großes Potential für die Herstellung der rCF-Hybridgarne.

Die ausgesponnenen Garne sind in Abbildung 3-13 dargestellt.



Abbildung 3-13: Umgesetzte rCF-Garnkonstruktionen auf der Basis unterschiedlicher Spinnverfahren

Durch die umfangreich durchgeführten Voruntersuchungen wurde ermittelt, dass das Rotor- und Luftdüsen-spinnverfahren für die Verarbeitung von rCF ungeeignet ist. Hingegen waren die Ergebnisse bei dem Flyer-, Friktion- und Umwindespinverfahren sehr aussichtsreich. Nachfolgend wird sich in dieser Dissertation auf die Entwicklung der Hybridgarne mittels Flyer beschränkt. Dazu wird der bereits untersuchte Flyer F15 eingesetzt, siehe Abbildung 3-14 (links). Die Entwicklung der Hybridgarne mittels Friktionsspinnmaschine DREF 3000 und Umwindespinmaschine am ITM sind u. a. in [181] und [185] veröffentlicht.

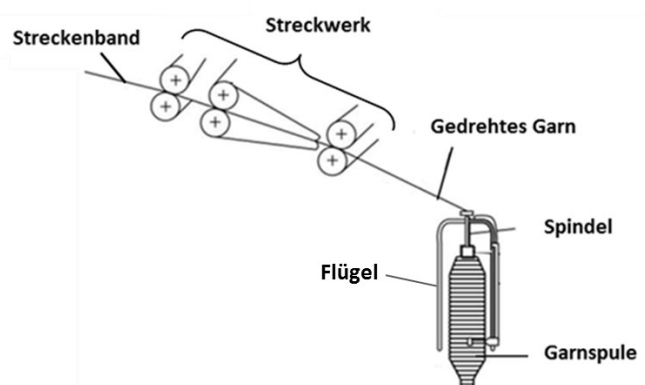


Abbildung 3-14: Flyer F15 (links) und Prinzipskizze der Garnverspinnung mittels Flyer (rechts)

Aufgaben und Funktionsweise der Spinnmaschine

- Verzug des Streckenbands auf die endgültige Garnfeinheit
- Erteilung der endgültigen Garnfestigkeit durch Verdrehung des Faserbands
- Entstaubung des Faserbands

Der vereinfachte Aufbau des Flyers ist in Abbildung 3-14 (rechts) dargestellt. Der Flyer vereint zwei separat zu betrachtende Prozesse, das Verstrecken und die Verdrehung des Faserbands. Zur Garnverspinnung werden die Streckenbänder zunächst im Streckwerk auf die endgültige Garnfeinheit verstreckt. Anschließend erfolgt die Drehungserteilung (Echtdraht) mittels Flügel und Spindel zur Garnverfestigung und die Aufwicklung auf die Garnspule.

Relevante Spinn- und Prozessparameter sowie auftretende Prozesskräfte

Das Streckwerk des Flyers besteht aus drei Walzenpaaren mit Riemchenführung in der Hauptverzugszone. Die Streckwerkswalzen bestehen wie die der Strecke ebenfalls aus gummierten Oberwalzen und geriffelten Unterwalzen. Da die Verzugprozesse dem der Strecke entsprechen, wird für die relevanten Spinn- und Prozessparameter beim Verzug auf Kapitel 3.2.2 verwiesen.

Am Flyer kann die resultierende Garndrehung in Drehung pro Meter [T/m] direkt eingestellt werden. Die bei der Verdrehung auftretenden Kräfte auf die Fasern und deren Einflüsse sind äußerst komplex und wurden in der Vergangenheit mit konventionellen Stapelfasern tiefgreifend untersucht, z. B. in [113]. Praktisch relevant ist im vorliegenden Fall insbesondere der Einfluss der Garndrehung auf die resultierende Garnfestigkeit. Dieser Einfluss ist in Abbildung 3-15 in drei exemplarischen Kurven dargestellt. Die Zugfestigkeit der Garne nimmt mit zunehmender Verdrehung zunächst kontinuierlich zu und beruht ausschließlich auf Gleitreibung, d. h. bei Zugbelastung gleiten die Fasern auseinander. Bei weiterer Verdrehung entsteht kohäsive Reibung. Diese wird durch die hohen Zugkräfte an den Fasern und den dabei entstehenden hohen Druck in Richtung Garnkern verursacht. Der Druck wird mit zunehmender Drehung immer stärker, sodass immer weniger Fasern aneinander vorbeigleiten und diese mehr und mehr zerreißen. Dieser Prozess setzt sich bis zu einem gewissen Maximum, der sogenannten kritischen Faserdrehung (C in Abbildung 3-15) fort, d. h. bis zur optimalen Ausnutzung der Festigkeit der einzelnen Fasern. Anschließend nimmt die Zugfestigkeit des Garns wieder ab (D). Die kritische Faserdrehung ist dabei vom Fasermaterial abhängig. In der Regel werden Garne auf Werte unterhalb der kritischen Drehung verdreht (z. B. für Strickware (A), für Wirkware (B)), da hier bereits eine ausreichende Garnfestigkeit für das daraus herzustellende Textil erreicht wird [94]. Aus diesen Zusammenhängen wird einerseits geschlussfolgert, dass die steigenden Zugkräfte bei höherer

Garndrehung bei den rCF als unkritisch bewertet werden, da deren Faserfestigkeit deutlich höher als bei Baumwolle oder Polyester liegt. Andererseits werden die gleichzeitig auftretenden Querkräfte aufgrund des zunehmenden Drucks in Richtung Garnkern als kritisch bezüglich der Faserschädigung der rCF bewertet. Deshalb sollte tendenziell eine geringe Garndrehung für die zu entwickelnden Hybridgarne eingestellt werden. Der aus diesen Annahmen abgeleitete Kurvenverlauf der Garnfestigkeit eines rCF-Garns ist ebenfalls in Abbildung 3-15 dargestellt.

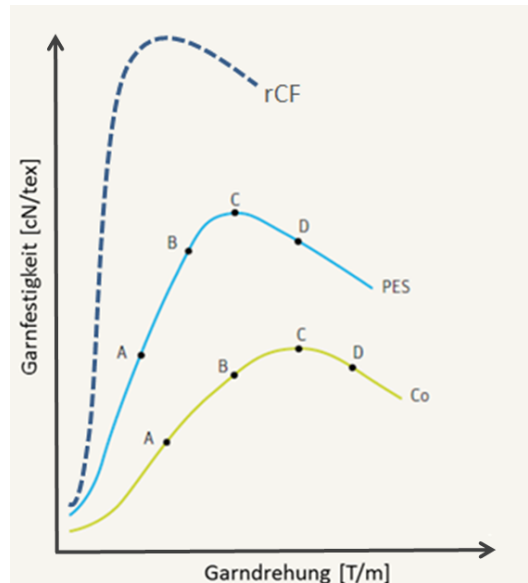


Abbildung 3-15: Garnfestigkeit in Abhängigkeit der Garndrehung bei Stapelfasergarnen aus Polyester (PES) und Baumwolle (Co) nach [94] sowie aus rCF (angenommen)

Abschließend sei hier auch die für Krempel, Strecke und Flyer bestehende Problematik der elektrischen Leitfähigkeit der rCF genannt. Diese kann zum Kurzschließen der Elektronik an den Maschinen führen. Dementsprechend ist eine Kapselung an allen eingesetzten Textilmaschinen zwingend erforderlich.

3.3 Analyse relevanter Fasereigenschaften

Nachfolgend werden relevante Fasereigenschaften der rCF im Vergleich zu konventionellen Spinnfasern betrachtet und deren Einfluss auf die Band- und Garneigenschaften in der Stapelfaserspinnentechnik erläutert.

3.3.1 Einfluss der Faserlänge und der Faserlängenverteilung

Zum Einfluss der Faserlänge bzw. der vorliegenden Faserlängenverteilung auf die Band- und Garneigenschaften bei konventionellen Naturfasern gibt es eine Vielzahl an Untersuchungen. Diese sind z. B. in [109] und [113]-[117] dargestellt. Daraus kann zunächst allgemein abgeleitet werden, dass je kürzer die Stapelfaserlänge und je breiter die Faserlängenverteilung der zu verspinnenden Fasern, desto höher ist die Band- und Garnungleichmäßigkeit. Die Stapelfaserlänge von Baumwolle liegt dabei im Bereich von ca. 20 bis 40 mm. Unterhalb von ca. 15 mm Faserlänge tragen

Fasern aufgrund ihrer kurzen Einbindungslänge kaum etwas zur Garnfestigkeit bei [94]. Die Breite der Faserlängenverteilung wird u. a. mittels Gleichmäßigkeitsindex (*uniformity index (UI)*) angegeben. Dieser wird bei Baumwolle als Quotient aus der mittleren Faserlänge und der Stapelfaserlänge gebildet. Ein Wert über 87 % gilt dabei als sehr hoch bzw. gut ($\hat{=}$ schmale Längenverteilung), ein Wert unter 77 % hingegen als sehr gering ($\hat{=}$ breite Längenverteilung) [118]-[119]. Für die Verspinnung spielt insbesondere auch der enthaltene Kurzfaserteil eine wesentliche Rolle. Dieser ist bei Baumwolle auf eine Faserlänge bis ca. 0,5 Zoll (= 12,7 mm) definiert [94]. Bei steigendem Kurzfaserteil treten u. a. vermehrt Verzugsstörungen durch schwimmende Fasern im Streckwerk auf, die zu einer höheren Garnungleichmäßigkeit führen [94], [120]-[123]. Allerdings kann näherungsweise angenommen werden, dass sehr kurze Fasern kleiner 4 mm Faserlänge durch die Absaugungen an den jeweiligen Textilmaschinen nahezu vollständig ausgeschieden werden [94].

Für die zu verspinnenden rCF sollten demnach, wie auch bei Baumwolle, Fasern mit möglichst geringem Kurzfaserteil und möglichst schmaler Faserlängenverteilung ausgewählt werden. Die Bestimmung der optimalen (mittleren) Faserlänge der rCF, die prinzipiell in nahezu allen Faserlängen am Markt erhältlich sind, gestaltet sich jedoch als herausfordernd. Bei konventionellen Fasern ist eine Faserlänge von ca. 15 mm erforderlich, um überhaupt eine Garnfestigkeit zu erzeugen. Bei den rCF wird hingegen vermutlich eine minimale Faserlänge von ca. 40 mm benötigt, um später möglichst hohe Verbundkennwerte zu erreichen (siehe Kapitel 2.1, streckgerissene CF). Ob bei noch höheren Faserlängen die Garngleichmäßigkeit tendenziell weiter steigt, kann aktuell nicht abgeschätzt werden. Zwar steigt bei konventionellen Fasern prinzipiell die Garngleichmäßigkeit bei höherer Faserlänge, gleichzeitig wird dadurch aber vermutlich eine höhere Faserschädigung bei den rCF im Krempelprozess verursacht. Diese höhere Schädigung führt wiederum zu einer breiteren Faserlängenverteilung bzw. zu einem höheren Kurzfaserteil und somit tendenziell zu einer Verringerung der Garngleichmäßigkeit. Deshalb ist gleichzeitig eine möglichst schonende Verarbeitung der rCF während der gesamten Prozesskette zwingend erforderlich, um eine hohe (mittlere) Faserlänge und eine schmale Faserlängenverteilung sicherzustellen.

3.3.2 Einfluss der Faserfeinheit bzw. des Faserdurchmessers

In der Literatur wird dem Faserdurchmesser der größte Einfluss bei der Garnherstellung beigemessen [81], [124]-[127]. Laut [128] bestimmt die Faserfeinheit maßgeblich die Garngleichmäßigkeit. Dabei gilt tendenziell, je feiner die Fasern, desto höher die Garngleichmäßigkeit, da mehr Fasern im gegebenen Garnquerschnitt verteilt sind [94]. Dementsprechend positiv dürfte sich die geringe

Feinheit der rCF (ca. 0,7 dtex) im Vergleich zu Baumwolle (ca. 2 bis 4 dtex) auswirken. Allerdings ergibt sich ein gravierender Unterschied zu nahezu allen bisher eingesetzten Faserstoffen in der Spinnerei. Obwohl der Faserdurchmesser bzw. die Faserfeinheit von vereinzelt rCF näherungsweise konstant ist, liegen die rCF hauptsächlich in Faserbündeln mit völlig unterschiedlichen Durchmessern vor. Die Ursache hierfür ist die ursprüngliche Herstellungsform als Carbon-Filamentgarn mit ca. 1.000 bis 50.000 Einzelfasern. Durch die beim Herstellungsprozess aufgebraachte Schlichte haften diese Einzelfasern selbst nach der Aufbereitung zu rCF mehr oder weniger zusammen. Damit bewegt sich der praktisch auftretende Faser- bzw. Bündeldurchmesser der rCF im Bereich von 0,007 mm ($\hat{=}$ eine Einzelfaser) bis ca. 2 mm ($\hat{=}$ 50.000 Fasern). Diese gravierenden Schwankungen des Durchmessers könnte eine gleichmäßige Garnverspinnung erheblich erschweren.

3.3.3 Einfluss der Faserzugfestigkeit und der Faserdehnung

Die resultierende maximale Zugfestigkeit eines Garns wird im Wesentlichen von der Faserzugfestigkeit bestimmt. In der Literatur wird dafür eine Mindestfaserzugfestigkeit von ca. 6 cN/tex angegeben, um daraus eine ausreichende Garnzugfestigkeit (mindestens 3 cN/tex) für die anschließende Weiterverarbeitung zu erzeugen [94]. Die Zugfestigkeit von Baumwolle liegt im Bereich von ca. 15 bis 40 cN/tex, beim Polyester im Bereich von ca. 35 bis 60 cN/tex. Bei den rCF liegt die Faserzugfestigkeit hingegen bei ca. 200 bis 250 cN/tex. Dementsprechend wird die hohe Zugfestigkeit der rCF erwartungsgemäß als unkritisch bzw. als förderlich für die Garnverspinnung bewertet.

Die unterschiedlichen Bruchdehnungen von konventionellen Spinnfasern haben prinzipiell keine Auswirkungen auf den gesamten Garnherstellungsprozess. Nur bei sehr hohen Faserbruchdehnungen über 30 % können Verzugsstörungen auftreten [94]. Dementsprechend ist die äußerst geringe Bruchdehnung von rCF (< 2 %) unkritisch. Eine höhere Faserdehnung, wie bei Baumwolle (6 bis 10 %) oder Polyester (10 bis 18 %), ist insbesondere für die Bekleidung relevant. Diese sollte sich für einen hohen Tragekomfort elastisch dehnbar verformen [94].

3.3.4. Einfluss der Faserkräuselung

Baumwolle und Schafwolle verfügen über eine natürliche Faserkräuselung. Auch chemisch hergestellte Spinnfasern, wie z. B. Polyester, werden in der Regel mittels Texturierungsprozess gekräuselt. Durch die Kräuselung lässt sich die Verspinnbarkeit deutlich verbessern [129]. In [130] wurde u. a. nachgewiesen, dass sich die erforderlichen Verzugskräfte bei gekräuseltm Polyester im Vergleich zu ungekräuseltm Polyester massiv erhöhen. Dies wird auf die höhere Anhaftung bzw. Faser-Faser-Reibung durch die Kräuselung zurückgeführt. Diese Verzugskräfte und

deren Gleichmäßigkeit haben wiederum hohen Einfluss auf die erzielbare Band- und Garnleichmäßigkeit. Die fehlende Kräuselung der rCF und die daraus vermutlich resultierende geringe Faser-Faser-Reibung im Faserband werden deshalb als äußerst kritisch beurteilt, um einen gleichmäßigen Garnherstellungsprozess zu ermöglichen.

3.3.5. Einfluss der Faser-Hybridisierung

Eine effektive Maßnahme zur Verbesserung des gesamten Garnherstellungsprozesses stellt das Hinzufügen einer weiteren Faserstoffkomponente dar. So ist es beispielsweise in der konventionellen Spinntechnik seit vielen Jahrzehnten üblich, die verschiedenen Vorteile von Baumwolle mit denen von Polyester in einem Garn zu kombinieren. Der Vorteil in der zusätzlichen Beimischung von Polyester liegt insbesondere in dessen einstellbaren Eigenschaften bezüglich der Faserlänge, -feinheit und -festigkeit für die vorliegenden bzw. gegebenen Eigenschaften der Baumwolle. Die Polyesterfasern wirken dabei u. a. als sogenannte Stützfasern. Diese können z. B. sehr kurze Baumwollfasern „mitnehmen“ und die vorliegende Breite der Faserlängenverteilung der Baumwolle durch ihre einheitliche Schnittlänge erheblich schmälern. Durch die Mischung von Baumwolle und Polyester lassen sich somit die Garnleichmäßigkeit und erzielbare Garnfestigkeit z. T. massiv steigern [131]-[133].

Die Zumischung einer weiteren Faserkomponente (z. B. PA 6-Fasern) mit definierbaren Fasereigenschaften (u. a. Faserlänge, -feinheit und -kräuselung) würde somit eine erhebliche Verbesserung des gesamten Garnherstellungsprozesses mit den rCF ermöglichen. Gleichzeitig bilden die PA 6-Fasern in einem solchen rCF-Hybridgarn die thermoplastische Matrix im späteren Verbundbauteil aus. Für bestmögliche Garneigenschaften sollten dazu beide Faserkomponenten u. a. über eine ähnliche Stapelfaserlänge und einen vergleichbaren Faserdurchmesser verfügen [131]-[132].

Anhand der durchgeführten Prozessanalyse lässt sich insgesamt schlussfolgern, dass eine enorme Herausforderung in der Verarbeitung von rCF mittels konventioneller Stapelfaserspinntechnik besteht. Zur Entwicklung und Umsetzung von gleichmäßigen rCF-Hybridgarnen müssen demnach sowohl umfangreiche Modifikationen an den Textilmaschinen durchgeführt werden, zahlreiche Prozessparameter angepasst werden als auch geeignete rCF und PA 6-Faser mit anforderungsgerechten Fasereigenschaften ausgewählt werden. Zusätzlich muss geeignete Prüftechnik für die Charakterisierung der Faser-, Band-, Garn- und Verbundeigenschaften eingesetzt werden. Die Entwicklung und Auswahl dieser Prüftechnik ist im nachfolgenden Kapitel 4 beschrieben.

4 Prüftechnik zur Faser-, Band-, Garn- und Verbundcharakterisierung

4.1 Prüfung der Faserlänge von langen rCF

4.1.1 Vorbetrachtung

Um die erzielbaren Garn- und Verbundeigenschaften der rCF-Hybridgarne abzuschätzen, die Faserschädigung bei den einzelnen Prozessschritten zu beurteilen sowie die Textilmaschinenparameter (z. B. Feldweite der Streckwerke) einzustellen, sind Kenntnisse zur Faserlängenverteilung der rCF in den einzelnen Prozessschritten zwingend erforderlich. Daher ist eine effektive und reproduzierbare Prüftechnik zur Faserlängenmessung äußerst wichtig.

Das erforderliche Längenmessverfahren muss die rCF trotz ihres kleinen Durchmessers, ihres geringen Transmissionsvermögens, ihrer vergleichsweise hohen Länge (> 40 mm Faserlänge) mit teilweise breiter Faserlängenverteilung und ihrem Vorliegen in Faserbündeln mit Hunderten oder Tausenden von Einzelfasern identifizieren können. Darüber hinaus sollte das Verfahren unempfindlich gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit dieser Fasern und möglichst faserschonend sein, um eine Faserschädigung durch die Faserlängenmessung zu minimieren.

4.1.2 Stand der Technik zu Faserlängenmessverfahren bzw. -methoden

Die zur Messung der Faserlänge verwendeten Methoden können in direkte und indirekte Prüfungen eingeteilt werden. Bei der direkten Prüfung wird jede Faser einzeln gemessen, während bei der indirekten Prüfung mehrere Fasern gleichzeitig untersucht werden. Die Faserlängen werden entweder nach der Faseranzahl oder dem Fasergewicht bestimmt.

Sogenannte Einzelfasermessverfahren nach den Prüfnormen DIN 53808-1 [134] oder ISO 6989 [135] zählen zu den direkten Messverfahren. Bei diesen werden Einzelfasern mit einer oder zwei Pinzetten aus den Proben entnommen und die Länge jeder Faser entweder manuell oder mit Hilfe einer WIRA Single Fiber Length Machine [136] gemessen. Diese Prüfverfahren sind aufgrund des extrem zeit-aufwendigen Prozesses, den auftretenden rCF-Bündeln und der Sprödigkeit der rCF nicht für deren Messung geeignet. Die Sprödigkeit der rCF kann insbesondere zu einer deutlichen Einkürzung der Faserlänge führen, indem einzelne Fasern mit einer Pinzette aus der Probe entnommen werden und dabei durchbrechen. Durchgeführte Messreihen haben auch gezeigt, dass die gemessene Faserlänge durch die Entnahme von einzelnen Fasern oder von Faserbündeln erheblich variiert. Bei Faserbündeln tritt aufgrund ihres geringeren Schlankheitsgrads im Vergleich zu Einzelfasern tendenziell weniger Faserschädigung auf. Es ist jedoch eine

herausfordernde Aufgabe, die Anzahl der Einzelfasern in jedem Bündel für die Berechnung der Faserlängenwerte zu zählen, während das genaue Wiegen der Bündel durch ihr extrem geringes Gewicht erschwert wird.

Ein weiteres direktes Faserlängenmessverfahren ist das Advanced Fiber Information System (AFIS) der Firma Uster Technologies AG (Uster, Schweiz) [137]. Die zu messenden Fasern werden zunächst durch zwei Auflösewalzen vereinzelt und mittels Luftstrom zu einem optoelektronischen Sensor transportiert, wobei deren individuelle Länge gemessen wird. Ein alternatives Gerät vom Typ MDTA-4 der Firma Textechno GmbH & Co. KG (Mönchengladbach, Deutschland) wurde 2015 vorgestellt. Bei diesem werden ebenfalls die Fasern individualisiert und jede Faser mit optischen Sensoren direkt gemessen. Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit wurde bisher keines dieser Systeme mit rCF getestet, da die empfindliche Elektronik der Messgeräte möglicherweise beschädigt werden könnte. Die durchgeführten Vorversuche an der Rotorspinnmaschine zeigten jedoch, dass der mechanische Individualisierungsprozess für die spröden rCF sehr schädigend ist und daher die Testergebnisse negativ beeinflussen würde. Es wird daher angenommen, dass auch bei den beiden genannten Längenmessgeräten eine erhebliche Faserschädigung auftritt. Weiterhin ist unklar, ob die implementierten Sensoren der Messgeräte in der Lage sind, die langen und extrem dünnen rCF richtig zu erfassen um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Die Firma Uster verweist in [138] beispielsweise darauf, dass Faserabfälle nicht mit dem AFIS geprüft werden sollten. Diese könnte die Instrumentenkomponenten beschädigen und den Garantieanspruch ungültig machen. Zudem beträgt die maximal messbare Faserlänge 2 Zoll (ca. 50 mm).

Als weitere Methode können die jeweiligen Faserlängen in Vliesen oder in Flüssigkeiten mittels elektronischer Bildverarbeitung direkt gemessen werden, z. B. in [91] und [139] eingesetzt. Dabei werden die (Kurz-)Fasern gescannt und deren Länge (und Orientierung) bestimmt. Diese Faserdetektierungssysteme wurden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls untersucht. Es wurde allerdings festgestellt, dass größtenteils keine eindeutige Lokalisierung der langen rCF(-Bündel) in den Vliesen möglich ist. Diese Problematik ist exemplarisch in Abbildung 4-1 dargestellt. Daher sind solche Systeme nicht für lange rCF geeignet.

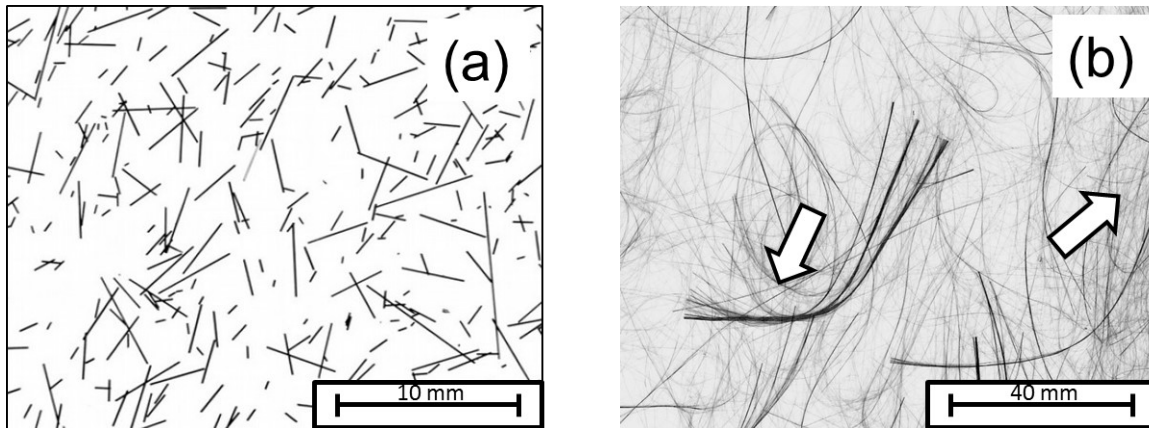


Abbildung 4-1: Gescannte Bilder von kurzen rCF mit einer Länge von bis zu 10 mm (a) und langen rCF mit einer Länge von bis zu 80 mm (b); die Pfeile deuten exemplarisch auf rCF, deren Faserlänge nicht eindeutig bestimmt werden kann

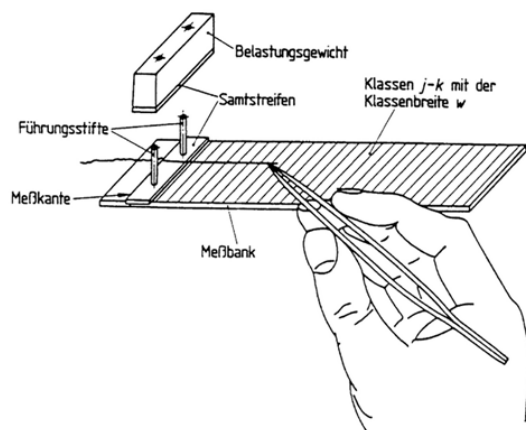
Zudem sind mehrere Methoden zur indirekten Faserlängenmessung verfügbar. Sehr genaue, aber zeitaufwendige Systeme sind das Suter-Webb-Array und das Johannsen-Zweigle-Kammstapelverfahren. Dabei werden die Fasern aus einer Probe mit einem sogenannten Kammstapler durch spezielle Pinzetten sortiert, in Längengruppen eingeteilt und anschließend gewogen [140]. Das Almeter [141]-[142] und die WIRA Fiber Diagram Machine [143] basieren hingegen auf der kapazitiven Messung von endengeordneten Faserbärten. Dazu ist es zunächst erforderlich, dass jede Faser aus einer Probe manuell oder automatisch auf eine Referenzlinie vorsortiert werden muss. Die genaue Sortierung jeder rCF bei den genannten Verfahren führen zur gleichen Problematik wie bei den bereits beschriebenen Einzelfasermessverfahren. Weiterhin sind die kapazitiven Verfahren aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der rCF prinzipbedingt nicht verwendbar.

Die indirekte Längenmessung von nicht-endengeordneten Faserbärten wurde erstmals im Jahr 1940 von Hertel als sogenannte Fibrographmethode eingeführt [144]. Diese Methode wurde seitdem weiter verbessert und ist heutzutage u. a. ein wesentlicher Bestandteil des High Volume Instruments (HVI) der Firma Uster Technologies AG (Uster, Schweiz). Dieses Gerät zählt zu den wichtigsten Prüfgeräten zur Baumwollfasercharakterisierung. Zur Prüfung der Faserlänge wird zunächst ein Faserbart aus zufällig verteilten Fasern hergestellt. Dieser Bart wird anschließend mittels Bürsten parallelisiert, wobei nicht geklemmte Fasern entfernt werden. Im nächsten Schritt wird der Faserbart von einem optischen Sensor erfasst, daraus werden abschließend die charakteristischen Längenwerte der Probe (z. B. mittlere Faserlänge) berechnet. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist der sehr geringe Probenpräparationsaufwand bzw. die geringe Prüfdauer im Vergleich zu den anderen Verfahren. Wu et al. stellten in [145]-[146] einen neuartigen Ansatz für die Entwicklung einer sogenannten Doppelbart-Fibrographmethode vor. Damit kann der Kurzfasergehalt einer Faserprobe im Gegensatz zum HVI direkt gemessen werden

[147]. Das Längenmessgerät Lengthcontrol TC-LCT der Firma Textechno GmbH & Co. KG (Mönchengladbach, Deutschland) war das erste im Handel erhältliche Gerät, mit dem automatisch Doppelbärte aus einem Faserband hergestellt werden konnten. Das optische Messprinzip dieser Systeme basiert jedoch wie beim HVI auf der Messung der Lichtdurchlässigkeit bzw. der Transmission. Dieses kann durch das Lambert-Beer-Gesetz beschrieben werden. Die kalibrierte Bildverarbeitung dieser Geräte neigt daher bei höheren Faserkonzentrationen im Faserbart oder bei Verwendung anderer Fasermaterialien als Baumwolle zu ungenauen Messungen [148]. Deshalb sind die HVI- und Lengthcontrol-Geräte nicht zum Messen von z. B. Wollfasern geeignet, aufgrund deutlich erhöhter Streuung und Reflexion im Vergleich zu Baumwollfasern [149]. Auch Uster gibt an, dass der HVI nur zur Messung von Rohbaumwollfasern geeignet ist [150]. Diese Problematik gilt auch bei den rCF aufgrund ihres deutlich geringeren Transmissionsvermögens.

Deshalb wurden in den letzten Jahren alternative Bildverarbeitungstechniken für die Fibrographmethode entwickelt. Wu et al. verwendeten dafür in [151] ein Spektralphotometer, um das Reflexionsvermögen von Faserbartproben basierend auf der Kubelka-Munk-Theorie zu ermitteln. Die Ergebnisse legen ein hohes Potenzial insbesondere für Wollfasern nahe. Eine weitere alternative und vielversprechende Bildverarbeitungstechnik für die Fibrographmethode wurde u. a. von Jin et al. in [152] für Baumwollfasern veröffentlicht. Dabei werden die Faserbärte mittels Flachbettscanner digitalisiert und die Graustufenwerte jedes Pixels für die nachfolgende Berechnung der Faserlänge ermittelt. Ein solches Verfahren ermöglicht eine schnelle Messung der Faserbärte, zudem ist die erforderliche Messtechnik vergleichsweise kostengünstig am Markt verfügbar. Dies ist auch im Hinblick auf eine eventuell auftretende Beschädigung der Messtechnik durch die elektrisch leitfähigen rCF von Bedeutung. Das Verfahren ist jedoch nur auf die Verarbeitung von Baumwolle angepasst bzw. kalibriert.

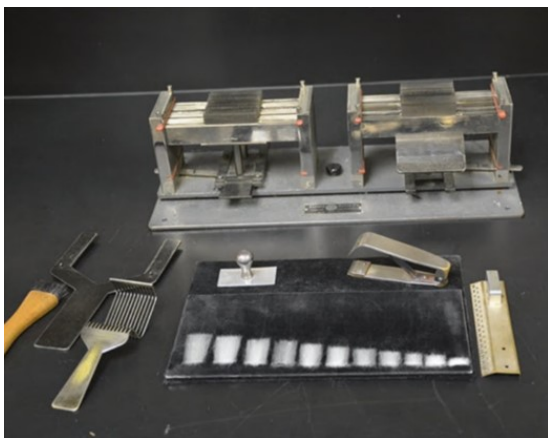
In Abbildung 4-2 sind ausgewählte Faserlängenmessverfahren abgebildet.



Ein-Pinzetten-Verfahren mit Messbank [119]



Uster AFIS PRO 2 [153]



Kammstapelverfahren [140]



Uster HVI 1000 [154]

Abbildung 4-2: Ausgewählte Faserlängenmessverfahren

Damit wird abschließend aus dem Stand der Technik geschlussfolgert, dass am Markt kein geeignetes Verfahren zur Bestimmung der Faserlänge von langen rCF existiert. Die Fibrographmethode bietet allerdings aufgrund ihrer genannten Vorzüge im Vergleich zu den anderen Messverfahren die beste Basis für dessen Entwicklung. Zur Analyse des Faserbarts aus rCF eignet sich insbesondere ein leistungsfähiger Flachbettscanner. Im dabei eingestellten Reflexions- bzw. Auflichtmodus wird das von den rCF reflektierte Licht erfasst, nicht wie das (für Baumwolle) sonst übliche transmittierte Licht. Damit kann die Problematik des geringen Transmissionsvermögens der rCF umgangen werden.

Für die anschließende Entwicklung des Prüfverfahrens für rCF sind umfangreiche Untersuchungen notwendig. Zum einen müssen geeignete Methoden zur Probenpräparation erarbeitet werden, zum anderen ist eine umfangreiche Kalibrierung mit bekannten Referenzfaserlängen erforderlich. Daraus resultiert eine weitere Herausforderung, da auch hierfür kein geeignetes Verfahren am Markt für lange rCF zur Verfügung steht. Dieses musste daher ebenfalls erst im Rahmen dieser Dissertationsarbeit entwickelt werden.

4.1.3 Entwicklung von Prüftechnik zur Faserlängenmessung von langen rCF

Einführende Betrachtung

Zunächst werden drei wesentliche Messprinzipien zur Ermittlung der Faserlänge erläutert.

Die jeweilige Faserlänge L von Fasern aus einer Probe kann erstens direkt einzeln gemessen, in Faserlängensklassen eingeordnet und die Ergebnisse in einem Histogramm dargestellt werden, siehe Abbildung 4-3. Dabei ist auf der Y-Achse die relative Häufigkeit der jeweiligen Faserlänge (X-Achse) dargestellt. Die im Histogramm eingetragenen Punkte bilden anschließend einen Funktionsgraphen $P(L)$ ab. Ein solches Histogramm kann z. B. mit Hilfe einer Einzelfaserlängenmessung erstellt werden.

Ein anderes Prinzip entspricht u. a. der indirekten Längenmessung mit einem endengeordneten Faserbart. Dabei werden die Fasern aus einer Probe zunächst endengeordnet und nebeneinander abgelegt. Die Enden der nach der Länge sortierten Fasern würden anschließend einen Funktionsgraphen $Q(L)$ in einem sogenannten Stapellängen-Diagramm abbilden, siehe Abbildung 4-3. Dabei ist auf der Y-Achse die relative Summenhäufigkeit der jeweiligen Faserlänge (X-Achse) dargestellt.

Das dritte Prinzip entspricht der Längenmessung mit einem nicht-endengeordneten Faserbart, welcher die Grundlage für die hier vorliegende Faserlängenmessung der rCF bildet. Dabei wird auf die Endenordnung der Fasern verzichtet, stattdessen werden diese an einem zufälligen Punkt geklemmt. Anschließend werden die Fasern durch Kämmen oder Bürsten parallelisiert. Mit diesem Ansatz kann allerdings nicht mehr unmittelbar die Faserlänge L ermittelt werden, sondern stattdessen die Spannlänge L_s (\triangleq Länge von der Klemmung der Faser bis zum Ende der Faser). Die Enden der nach der Spannlänge sortierten Fasern würden anschließend einen Funktionsgraphen $F(L_s)$ in einem sogenannten Spannweiten-Diagramm (= Fibrogramm) abbilden, siehe Abbildung 4-3. Dabei ist auf der Y-Achse die relative Summenhäufigkeit der jeweiligen Spannweite L_s (X-Achse) dargestellt.

Hertel hat in [144] nachgewiesen, dass diese drei Funktionsgraphen $P(L)$, $Q(L)$ und $F(L_s)$ in einem differenziellen bzw. integralen Verhältnis zueinander stehen. Ist eine dieser drei Kurven bekannt, können die anderen beiden Funktionen mathematisch berechnet werden [155]. Damit konnte Hertel u. a. nachweisen, dass durch Anlegen einer Tangente in der Fibrogrammkurve $F(L_s)$ die mittlere Faserlänge (ML) der Faserprobe am Schnittpunkt mit der X-Achse ermittelt werden kann, siehe Abbildung 4-3.

Nachfolgend soll eine solche Methode mit einem nicht-endengeordneten Faserbart für die Längenmessung der rCF entwickelt werden.

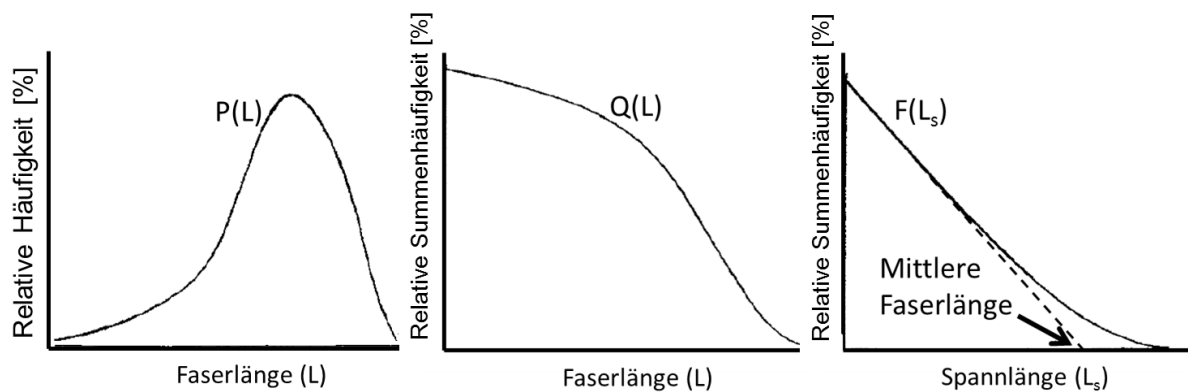


Abbildung 4-3: Funktionsgraphen $P(L)$, $Q(L)$ und $F(L_s)$ zur Charakterisierung der Faserlängenverteilung

Entwicklung einer Fibrographmethode für rCF

Zum umfassenden Verständnis der Fibrograph-Theorie sowie der dafür eingesetzten Probenpräparations- und Messtechnik empfiehlt sich weiterführende Sekundärliteratur, z. B. [144] und [155]-[158].

Faserbartherstellung und Scanprozess

Die Verwendung eines konventionellen Entnahmegeräts zur Faserbartpräparation beim HVI, dem sogenannten Fibrosampler, wurde im Rahmen von Vorversuchen intensiv untersucht. Daraus wurde ermittelt, dass dieses Gerät aufgrund der Art der Faserfixierung in Kombination mit der hohen Biegesteifigkeit der rCF keine Herstellung von parallelisierten Faserbärten ermöglicht, siehe Abbildung 4-4 (links). Deshalb werden wie beim Lengthcontrol-Prüfgerät Faserbänder zur Faserbartherstellung verwendet. Zur Fixierung der Fasern wurde dafür eine gummierte Faserklemme mit einer Klemmbreite von 120 mm konzipiert, konstruiert und umgesetzt.

Die rCF-Bänder werden zunächst zur Herstellung des Faserbarts in die Klemme eingelegt und fixiert. Danach werden die nicht geklemmten Fasern unter Verwendung eines feinen Kamms vorsichtig entfernt, wobei die Fasern gleichzeitig parallelisiert werden. Der präparierte Faserbart wird anschließend gescannt, siehe Abbildung 4-4 (rechts). Das Gehäuse des Scanners wurde dazu derart modifiziert, dass die gesamte Klemme einschließlich des Faserbarts in den Scanner eingelegt werden kann.

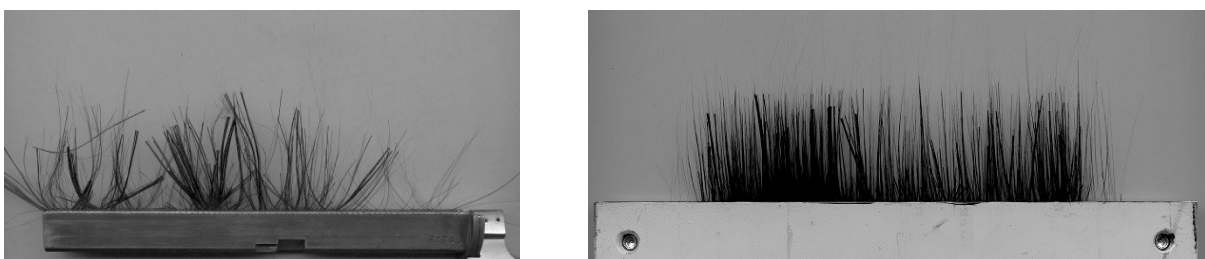


Abbildung 4-4: Hergestellte Faserbarte aus 40 mm rCF mittels Fibrosampler (links) und mittels entwickelter Präparationstechnik (rechts)

Die Scanparameter werden auf eine Auflösung von 600 dpi, eine Farbtiefe von 8 Bit (Graustufen) und eine Helligkeit bzw. einen Kontrast von -10 bzw. 0 eingestellt. Die dazu durchgeführten Voruntersuchungen ergaben, dass eine höhere Auflösung und eine höhere Farbtiefe die Genauigkeit der Messung nicht verbessert hat. Die Helligkeit und der Kontrast wurden derart angepasst, um einen Kompromiss aus maximaler Bildhelligkeit und ausreichendem Kontrast für die Erkennung auch sehr dünner Faserbündel zu erzielen. Zudem können dadurch Lichtreflexionen der glänzenden rCF-Oberfläche vermieden werden, die die Messung beeinflussen würden.

Auswertung des gescannten Faserbarts

Als Entwicklungsumgebung zur Auswertung des Faserbarts wird die Software Matlab R2018a der Firma The MathWorks Corp. (Natick, USA) eingesetzt. Die Messung beginnt an der Klemmlinie bei einer Spannlänge von 0 mm, wie in Abbildung 4-5 dargestellt.

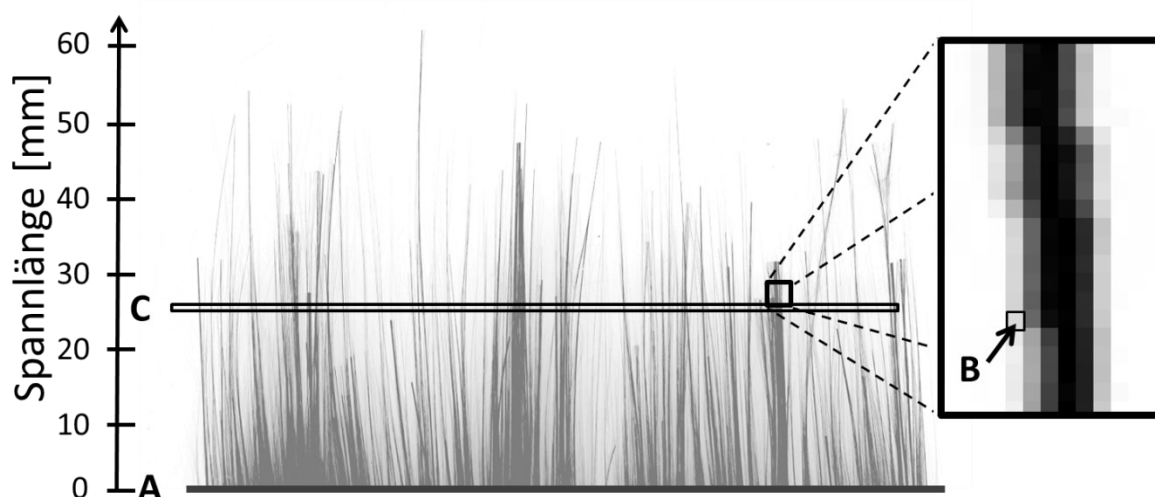


Abbildung 4-5: Schema der Längenmessung eines Faserbarts; A: Klemmlinie, B: Pixelwert des markierten Pixels (= 37) und C: Pixelwertsumme bei einer Spannlänge von 28 mm (= 29605)

Aus dem gescannten Bild des Faserbarts wird in Abhängigkeit der Spannlänge der Pixelwert jedes Pixels im Bereich von 0 bis 255 (8 Bit) ermittelt und dieser aufsummiert. Dazu wird zunächst ein Wert von 112 auf jeden Pixelwert aufaddiert, um die Hintergrundfarbe (Pixelwerte im Bereich von 143 bis 146) auf einen einheitlichen Wert von 255 anzuheben. Durch anschließendes Invertieren der Pixelwerte weist jeder Pixel einen Wert zwischen 0 und 143 auf. Durch diese Zuordnung kann die enthaltene Anzahl an Fasern in den Bündeln sehr präzise bestimmt werden, im Vergleich zu einer einfachen Schwarz-Weiß-Binarisierung (1 Bit). In Abbildung 4-6 ist ein invertierter Faserbart und ein Histogramm mit den zugehörigen Pixelwerten abgebildet. Aus dem Histogramm ist erkennbar, dass ca. 22 % aller Pixel einen Pixelwert von Null ($\hat{=}$ reines Schwarz) aufweisen und diese damit bei der Berechnung des Fibrogramms nicht berücksichtigt werden.

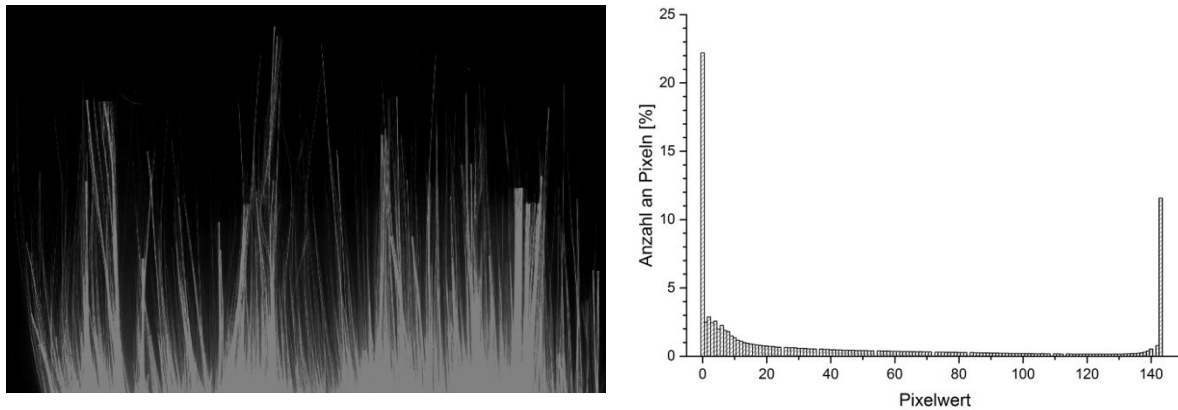


Abbildung 4-6: Invertierter Faserbart (links) und zugehöriges Histogramm (rechts)

Basierend auf der kalkulierten Pixelwertsumme wird ein Fibrogramm erstellt, indem der Prozentsatz der Pixelwertsumme ($\hat{=}$ Anzahl der Fasern) pro einzelner Spannlänge aus der Gesamtpixelwertsumme bei 4 mm berechnet wird ($\hat{=}$ Gesamtzahl der Fasern). Da sich viele Fasern im Bereich direkt über der Klemmlinie überlappen, ist es z. B. beim HVI üblich, mit der Spannängenberechnung erst bei 0,15 Zoll (ca. 4,0 mm) zu beginnen, was auch hier angewendet wird.

Zwei beispielhafte Fibrogramm-Graphen sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

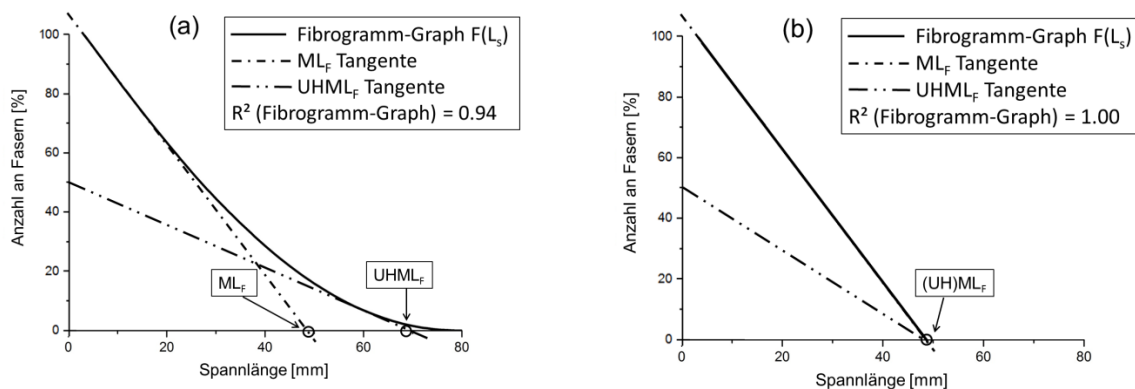


Abbildung 4-7: Typischer Fibrogramm-Graph $F(L_s)$ mit unterschiedlichen Faserlängen in der Probe mit einer ermittelten mittleren Länge ML_F : 49 mm und mittlerer Länge der 50 % längsten Fasern $UHML_F$: 68 mm (a); Theoretischer Fibrogramm-Graph $F(L_s)$ mit nur einer Faserlänge in der gesamten Probe mit einer mittleren Länge (der 50 % längsten Fasern) $(UH)ML_F$: 49 mm (b), gemäß [158]-[159]

Aus dem Fibrogramm werden anschließend die charakteristischen Längenwerte *mittlere Faserlänge* (ML_F ; Gleichung (4-1)) und *mittlere Länge der 50 % längsten Fasern* ($UHML_F$; Gleichung (4-2)) nach der Faseranzahl berechnet und gemittelt (Gleichung (4-3)) [155].

$$ML_F = \frac{2 \cdot \int_0^{L_{sm}} F(X) dX}{N} \tag{4-1}$$

$$UHML_F = \frac{2 \cdot \int_{L_S(N(50\%))}^{L_m} F(X) dX}{N(50\%)} + F_{N(50\%)} \tag{4-2}$$

$$\overline{(UH)ML_F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (UH)ML_{F_i} \quad (4-3)$$

Dabei ist L_s die Spannlänge der Faserprobe, L_{sm} die Spannlänge der längsten Faser in der Probe, F der Fibrogramm-Graph, N die Gesamtzahl der Fasern im Faserbart (= die Pixelwertsumme bei 4,0 mm), X der Abstand und n die Anzahl der Faserbartproben für jede Versuchsreihe.

Zur Einordnung dieser Werte ML_F und $UHML_F$ folgt der Hinweis, dass zur Klassifikation der Länge der Baumwollfasern üblicherweise die Stapelfaserlänge angegeben wird. Diese Stapelfaserlänge ist bei Baumwolle als diejenige Länge definiert, die von 10 % aller Fasern überschritten wird und ist äquivalent zur geprüften $UHML_F$ [82], [118]. Mit Hilfe dieses Werts können die Streckwerke der Textilmaschinen eingestellt werden.

Um Aufschluss über die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von den verschiedenen Proben einer Versuchsreihe mit der Fibrographmethode zu erhalten, wird der Variationskoeffizient CV_F der ML_F nach Gleichung (4-4) berechnet.

$$CV_F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ML_{F_i} - \overline{ML_F})^2}{n}} \cdot 100 \% \quad (4-4)$$

Abschätzung der Faserlängenverteilung

Bei der Fibrographmethode sowie z. B. auch beim HVI werden die Kennwerte ML und $UHML$ zur Abschätzung der Faserlängenverteilung angegeben. Außerdem kann der Gleichmäßigkeitsindex (UI) auf Basis dieser beiden Werte nach Gleichung (4-5) berechnet werden [160].

$$UI = \frac{ML}{UHML} \cdot 100 \% \quad (4-5)$$

Ein UI von 100 % würde sich demnach bei einer einheitlichen Faserlänge ergeben. Laut Hertel korreliert dieser UI eng mit dem Variationskoeffizienten der mittleren Faserlänge [144].

Mit Hilfe dieser drei charakteristischen Werte ML , $UHML$ und UI wird u. a. die Auswahl einer geeigneten PA 6-Faserlänge, die Berechnung der einzustellenden Feldweite der Streckwerke sowie die Quantifizierung der Faserschädigung der rCF in der gesamten Prozesskette ermöglicht.

Entwicklung einer Referenzmethode für rCF

Zur Kalibrierung der angepassten Fibrographmethode sollte die Faserlänge der CF bzw. rCF möglichst exakt bekannt sein. Zur Bestimmung dieser Referenzlänge musste dazu im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls erst ein geeignetes Verfahren entwickelt werden. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus einem

Einzelfasermessverfahren und der anschließenden Berechnung der Anzahl der Fasern pro Bündel mittels Bildverarbeitung. Dabei konnte im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen werden, dass die Anzahl an Fasern in einem rCF-Bündel (bis zu ca. 1000 Fasern) linear mit der ermittelten Pixelwertsumme des Bündels korrespondiert. Dementsprechend wird zunächst die Länge der jeweiligen rCF-Bündel aus einer Probe mittels Methoden der Einzelfaserlängenmessung möglichst schonend bestimmt, ohne dabei jedoch einzelne Fasern aus dem rCF-Bündel zu extrahieren. Anschließend kann die Anzahl der Fasern pro Bündel durch Scannen und Bildverarbeitung berechnet werden. Aus den gemessenen Bündellängen und der Anzahl an Fasern in jedem Bündel können anschließend ebenfalls die mittlere Faserlänge ML_R (Gleichung (4-6)) und die mittlere Länge der 50 % längsten Fasern $UHML_R$ (Gleichung (4-7)) nach Faseranzahl sowie die zugehörige Standardabweichung s_{ML_R} (Gleichung (4-8)) berechnet werden.

$$ML_R = \frac{1}{n_F} \sum_{i=1}^{n_F} L_{B_i} \cdot N_{B_i} \quad (4-6)$$

$$UHML_R = \frac{2}{n_F} \sum_{i=\frac{n_F}{2}}^{n_F} L_{B_i} \cdot N_{B_i} \quad (4-7)$$

$$s_{ML_R} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_F} (L_{B_i} - ML_R)^2 \cdot N_{B_i}}{n_F}} \quad (4-8)$$

Dabei ist L_B die rCF-Bündellänge, N_B die zugehörige Anzahl der Fasern im Bündel und n_F die Gesamtzahl der Fasern in der Probe. Gemäß der Norm ISO 6989 sollten 500 Proben für eine Einzelfasermessung entnommen werden, zusätzlich sollten für eine aussagekräftige Messung die Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls C kleiner 5 % sein, berechnet gemäß Gleichung (4-9).

$$C = \pm \frac{1,96 \cdot CV_R}{\sqrt{S}} \quad (4-9)$$

Dabei ist S die Gesamtanzahl an Fasern (bzw. Bündeln) in einer Probe und CV_R der Variationskoeffizient der mittleren Faserlänge nach Gleichung (4-10).

$$CV_R = \frac{s_{ML_R}}{ML_R} \cdot 100 \% \quad (4-10)$$

Auch dieses Referenzverfahren muss jedoch zunächst kalibriert werden.

4.1.4 Kalibrierung der entwickelten Faserlängenmessverfahren

Materialauswahl

Um einen möglichst präzisen Kalibrierungsprozess der beiden Faserlängenmessverfahren zu ermöglichen, wird Carbon-Filamentgarn vom Typ SIGRAFIL C T050-4.0/240-E100 der Firma SGL Carbon SE (Wiesbaden, Deutschland) verwendet. Das Filamentgarn wird zunächst zu Bündeln mit vier verschiedenen

(nominalen) Längen (30 mm; 35 mm; 40 mm; 45 mm) geschnitten, da diese Faserlängen auch nach der Verarbeitung zu Faserbändern nahezu erhalten bleiben. Dieser Umstand ist auf den vorliegenden Schlankheitsgrad zurückzuführen. Dadurch sind diese Bündel sehr biegesteif, sodass nur eine sehr geringe Faserschädigung beim Krempelprozess auftritt. Längere CF-Bündel (> 45 mm) sind hingegen zunehmend weniger biegesteif und werden dadurch mehr geschädigt. Dieser beobachtete Zusammenhang gilt allerdings nicht zwangsläufig auch bei anderen kommerziell erhältlichen CF.

Kalibrierung der Referenzmethode

Im ersten Schritt wird die Referenzmethode auf Basis verschiedener CF-Bündel mit bekannter Anzahl von Fasern kalibriert. Dazu werden zehn verschiedene Proben mit jeweils fünf Bündeln mit einer Anzahl von ca. 40 bis 1000 Fasern pro Bündel untersucht, siehe Abbildung 4-8. Die einzelnen Bündel wurden zuvor durch manuelles Auszählen der Einzelfasern aus dem SGL Carbon-Filamentgarn mit 50.000 Einzelfasern präpariert. Aufgrund des sehr geringen Durchmessers der Einzelfasern (7 μm) wird ein Messfehler von näherungsweise 10 % angenommen.

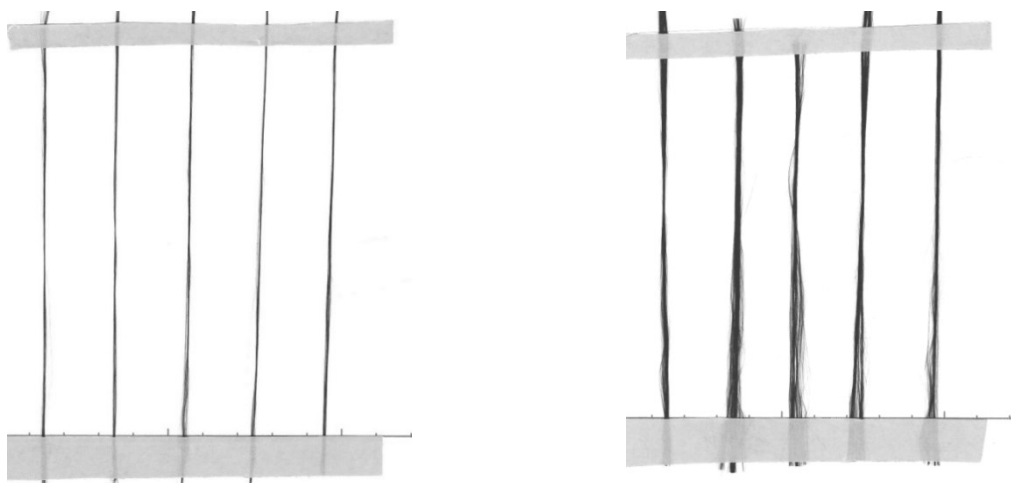


Abbildung 4-8: Präparierte Faserbündel mit jeweils ca. 100 (links) und 300 (rechts) Fasern pro Bündel

Anschließend wird jedes Bündel mit den gleichen Scanparametern wie bei der angepassten Fibrographmethode gescannt und die resultierenden Bilder mit der Software ImageJ [161] verarbeitet. Dabei wird die Pixelwertsumme für jedes Bündel berechnet und durch die Bündel-Pixellänge dividiert. Damit ist das Verhältnis zwischen der durchschnittlichen Pixelwertsumme der Bündel und der zugehörigen Anzahl der Fasern bekannt. Dieses wird als sogenannter Bündelfaktor bezeichnet. Die geprüften Ergebnisse sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Berechnung des Bündelfaktors für die Referenzfaserlänge

Faseranzahl in den CF Bündeln ($\pm 10\%$)	Durchschnittliche Pixelwertsumme	Bündelfaktor als Quotient aus durchschnittlicher Pixelwertsumme und Faseranzahl
40	541	13,53
60	752	12,54
80	1107	13,84
100	1318	13,18
150	1901	12,67
200	2690	13,45
300	4269	14,23
500	6295	12,59
700	9121	13,03
1000	14330	14,33
Gemittelter Bündelfaktor:		13,34
Zugehörige Standardabweichung:		$\pm 0,62$

Daraus ergibt sich ein gemittelter Bündelfaktor von $13,34 \pm 0,62$ bei den hier eingesetzten Prüfparametern. Somit enthält demnach ein CF-Bündel mit einer durchschnittlichen Pixelwertsumme von z. B. 7588 eine Anzahl von 569 ± 27 Einzelfasern. Damit ist das Referenzverfahren kalibriert und kann für die Messung der Referenzfaserlängen für die Fibrographmethode eingesetzt werden.

Kalibrierung der Fibrographmethode

Nach der Kalibrierung der Referenzmethode wird die Kalibrierung der adaptierten Fibrographmethode durchgeführt. Aufgrund der geringeren Transparenz der CF im Vergleich zu weißen Naturfasern wird erwartet, dass der potentielle Bereich der optimalen Fasermenge innerhalb eines Faserbarts beträchtlich kleiner ist. Daher beginnt der Kalibrierungsprozess zunächst mit der genauen Ermittlung der optimalen Faseranzahl im Faserbart. Für jede CF-Schnittlänge werden dazu zehn Faserbartproben aus rCF-Streckenband mit jeweils unterschiedlicher Anzahl an Fasern hergestellt und untersucht.

In Abbildung 4-9 sind zwei hergestellte Faserbarte beispielhaft dargestellt. Um Informationen über die optimale Anzahl der Fasern im Bart zu erhalten, werden diese nach der Messung an der Klemmlinie abgeschnitten und gewogen. Ist die Anzahl der Fasern im Bart zu gering, ist die resultierende Faserverteilung nicht repräsentativ. Ist sie dagegen zu hoch, überlappen sich zu viele Fasern und können nicht mehr korrekt identifiziert werden. In beiden Fällen würden solche Messungen keine korrekten Ergebnisse liefern.

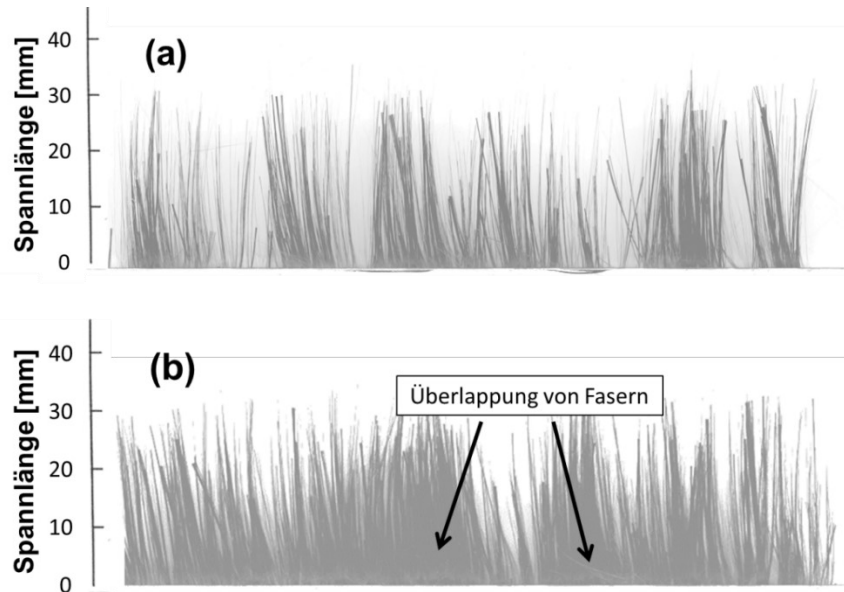


Abbildung 4-9: Faserbärte mit einheitlicher Faserlänge von 35 mm und unterschiedlichen Bartgewichten: (a) 64,4 mg und (b) 128,5 mg

Da alle geschnittenen CF eine jeweils einheitliche Länge aufweisen, wird ein Fibrogramm-Graph $F(L_s)$ in Form einer geraden Linie erwartet, siehe Abbildung 4-7 (b). Deshalb wird nach der Aufstellung der einzelnen Fibrogramm-Graphen dessen Bestimmtheitsmaß für eine lineare Anpassung (R^2) berechnet. Dabei würde der Wert $R^2 = 1,00$ für eine absolut gerade Linie des Graphen $F(L_s)$ und somit für die optimale Anzahl von Fasern im Bart stehen. Ist die Anzahl an Fasern hingegen zu hoch oder zu niedrig, verringert sich der R^2 -Wert.

Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Zur besseren Veranschaulichung ist zuvor der Einfluss der unterschiedlichen Faseranzahl im Faserbart in Abbildung 4-10 exemplarisch veranschaulicht. Diese Abbildung zeigt deutlich, dass die „Geradheit“ der Linie erheblich variiert, wenn die Faserzahl bzw. deren Masse zu hoch oder zu niedrig ist.

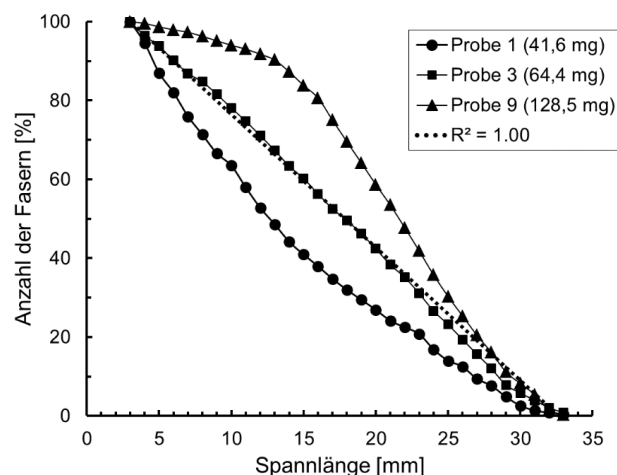


Abbildung 4-10: Fibrogramm von drei CF-Proben mit jeweils 35 mm Faserlänge und unterschiedlicher Faserzahl bzw. Fasermasse im Bart; das lineare Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 1,00$) ist als gepunktete Linie eingezeichnet

Tabelle 4-2: Faserbartproben mit einheitlicher Faserlänge und unterschiedlicher Faseranzahl bzw. Fasermasse

Nominale Länge der rCF	30 mm		35 mm		40 mm		45 mm	
Probennummer	Faserbartgewicht [mg]	R^2	Faserbartgewicht [mg]	R^2	Faserbartgewicht [mg]	R^2	Faserbartgewicht [mg]	R^2
1	44,0	0,974	41,6	0,964	31,1	0,962	25,4	0,940
2	55,1	0,984	53,2	0,994	34,8	0,964	33,6	0,944
3	57,3	0,991	64,4	0,998	63,0	0,974	57,4	0,953
4	60,6	0,988	68,9	0,993	78,3	0,988	80,0	0,983
5	63,9	0,989	72,3	0,989	81,2	0,992	88,9	0,985
6	71,3	0,989	94,3	0,984	88,4	0,981	100,0	0,981
7	89,2	0,984	104,8	0,976	89,8	0,981	103,1	0,988
8	90,3	0,976	110,2	0,954	93,5	0,975	117,8	0,974
9	93,0	0,983	128,5	0,947	101,1	0,968	122,0	0,977
10	95,5	0,967	132,3	0,944	105,4	0,969	131,2	0,945

Die Ergebnisse zeigen, dass der höchste R^2 -Wert bei den Probennummern 3 für 30 mm, 3 für 35 mm, 5 für 40 mm und 7 für 45 mm erzielt wird. Dies deutet somit auf die optimale Anzahl an Fasern in den Bärten hin. Allerdings kann diese optimale Anzahl nicht durch Abwiegen der jeweiligen Faserbartproben ermittelt werden, da sich diese Masse in Abhängigkeit von der Faserlänge ändert. Daher ist diese Methode für recycelte Carbonfasern in der Praxis ungeeignet, aufgrund ihrer in der Regel nicht zuvor bekannten Faserlängenverteilung.

Deshalb wurde ein alternativer Lösungsansatz entwickelt. Dabei wird anstelle der Fasermasse die Pixelwertsumme bei 4 mm Spannlänge als Referenzwert herangezogen. Bei dieser Spannlänge sind nahezu alle Fasern im Faserbart zu finden. Wie in Abbildung 4-11 zu erkennen, wird der höchste R^2 -Wert (aus Tabelle 4-2) bei einer jeweils ähnlichen Pixelwertsumme nachgewiesen, unabhängig von den verschiedenen Schnittlängen der CF. Zur Bestimmung dieser optimalen Pixelwertsumme wurde jeweils eine polynomiale Regression vierter Ordnung durchgeführt, das jeweilige Maxima bestimmt und abschließend gemittelt. Daraus wurde ein Wert von 284.300 ± 17.800 ermittelt. Für die adaptierte Fibrographmethode wird dieser Wert als charakteristischer Index festgelegt, um zu überprüfen, ob die Anzahl der Fasern in den jeweiligen Faserbartproben im optimalen Bereich, zu hoch oder zu niedrig ist. Dies muss bei der abschließenden Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

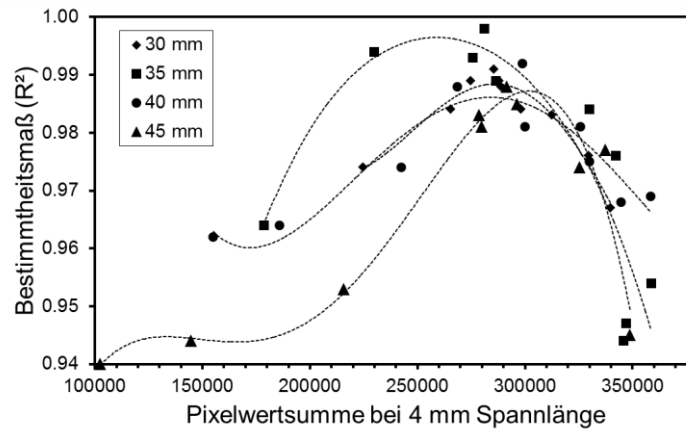


Abbildung 4-11: Bestimmtheitsmaß (R^2) in Abhängigkeit von der Pixelwertsumme bei 4 mm Spannlänge bei unterschiedlichen Faserlängen; die Graphen der polynominalen Regression sind als gepunktete Linien dargestellt

Nach der Bestimmung der optimalen Faseranzahl im Bart kann die eigentliche Faserlängenmessung mittels Fibrographmethode kalibriert werden. Dafür werden zunächst die Referenzkennwerte ML_R , $UHML_R$ und UI_R mit der entwickelten Referenzmethode möglichst exakt bestimmt. Für jede CF-Schnittlänge (30 bis 45 mm nominale Faserlänge) werden 50 CF-Bündel mit Hilfe von zwei Pinzetten aus den hergestellten Streckenbändern entnommen und manuell gemessen. Anschließend wird jedes Bündel gescannt, um die dazugehörige Anzahl an Fasern zu ermitteln.

Nach der Ermittlung der Referenzfaserlänge werden unter Verwendung der angepassten Fibrographmethode die Kennwerte \overline{ML}_F , \overline{UHML}_F und \overline{UI}_F von denselben Streckenbändern bestimmt. Für jede CF-Schnittlänge werden zehn Faserbartproben hergestellt und geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Faserlängenmessungen mit geschnittenen CF mit bekannter Länge

Nominale CF Länge [mm]	30	35	40	45
ML_R aus Referenzmethode [mm]	29,6	35,0	39,6	45,2
$UHML_R$ aus Referenzmethode [mm]	29,9	35,2	39,8	45,4
UI_R aus Referenzmethode [%]	99,0	99,4	99,5	99,6
\overline{ML}_F aus Fibrographmethode [mm]	21,0	27,6	30,7	36,4
\overline{ML}_F aus Fibrographmethode mit Korrekturwert (8,1 mm) [mm]	29,1	35,7	38,8	44,5
\overline{UHML}_F aus Fibrographmethode [mm]	21,1	28,4	31,2	38,2
\overline{UHML}_F aus Fibrographmethode mit Korrekturwert (8,1 mm) [mm]	29,2	36,5	39,3	46,3
\overline{UI}_F aus Fibrographmethode mit Korrekturwert (8,1 mm) [%]	99,7	97,8	98,7	96,1
CV_F [%]	5,8	4,9	6,1	3,3
Abweichung von $\overline{ML}_F/\overline{UHML}_F$ mit Korrekturwert zu $ML_R/UHML_R$ [%]	1,7/2,3	2,0/3,7	2,0/1,3	1,5/2,0

Die mit der Fibrographmethode ermittelten Kennwerte belegen zunächst, dass eine hohe Reproduzierbarkeit ermöglicht werden kann, mit einem vergleichsweise niedrigem CV_F von maximal 6,1 % für identisch wiederholte Tests von jeweils zehn Faserbartproben.

Wie aus den Ergebnissen ebenfalls zu erkennen ist, unterscheiden sich die Referenz- und Fibrograph-Kennwerte jeweils um einige Millimeter. Wesentliche Ursache dafür ist die notwendige Fixierung der Fasern in der Klemme bei der Fibrographmethode. Dies führt dazu, dass die gemessenen Faserlängen immer um einige Millimeter kürzer sind als die wahren Faserlängen. Bei Baumwolle wird in [162] eine Klemmlänge von 4,06 mm angegeben. Zudem kann bei gekräuselten Fasern die Kräuselung mit der Fibrographmethode nicht beseitigt werden. Dadurch verkürzt sich die geprüfte Faserlänge zusätzlich. Hertel zeigte daher in [144], dass ein Korrekturfaktor von 1,19 erforderlich ist, um die wahre Faserlänge der untersuchten Baumwolle zu erreichen. Im hier vorliegenden Fall erscheint es allerdings sinnvoller, zu jeder geprüften Faserlänge einen Korrektursummanden anstelle eines Faktors hinzuzufügen. Dies gilt insbesondere für Fasern mit deutlich höheren Längen als Baumwolle, da sich ein solcher Korrekturfaktor dort deutlich stärker auswirkt. Basierend auf dem beschriebenen Versuchsaufbau wird im vorliegenden Fall eine Klemmlänge bzw. ein Korrekturfaktor von 8,1 mm ermittelt, indem die Differenzwerte zwischen ML_R und \overline{ML}_F sowie $UHML_R$ und \overline{UHML}_F berechnet und gemittelt werden. Bei der anschließenden Addition des Korrekturwerts zur gemessenen $\overline{(UH)ML}_F$ liegen die prozentualen Abweichungen von der Referenzlänge bei unter ± 4 %. Diese geringe Abweichung stellt eine sehr hohe Genauigkeit dar, wenn davon ausgegangen wird, dass für eine absolut präzise Faserlängenmessung mit der Fibrographmethode die Fasern in jeder Faserbart-Probe immer vollständig gleichmäßig verteilt sein müssten. Dieser Idealfall tritt jedoch in der Praxis nicht auf.

4.1.5 Exemplarische Faserlängenmessung von rCF mit unbekannter Länge mit der Referenz- und Fibrographmethode

Nach der Kalibrierung der Fibrographmethode mit einheitlich geschnittenen CF wird nachfolgend die Faserlänge von langen recycelten Carbonfasern mit unbekannter Länge exemplarisch bestimmt. Für diese Untersuchung werden wieder Streckenbänder hergestellt und geprüft, dieses Mal allerdings aus rCF. Diese stammen aus Prozessabfällen von der Gelegefertigung (rCF-Typ 1). Insgesamt werden zehn Faserbartproben aus den Streckenbändern hergestellt und mit der adaptierten Fibrographmethode geprüft, um die \overline{ML}_F , die \overline{UHML}_F und den \overline{UI}_F zu bestimmen. Zusätzlich wird eine Referenzfaserlängenmessung mit 500 rCF-Bündeln durchgeführt. Daraus werden die Referenzkennwerte ML_R , $UHML_R$ und UI_R berechnet.

Beim durchgeführten Referenzverfahren konnte zunächst der Nachweis erbracht werden, dass die geforderten Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls C kleiner 5 % sind. Damit ist die Anzahl der geprüften Fasern bzw. Bündel S beim Referenzverfahren ausreichend für eine aussagekräftige Messung ($C = 2,94\%$ mit $s_{ML_R} = \pm 17,6$ mm und $S = 500$).

Ein exemplarischer Faserbart sowie das gemittelte Fibrogramm von allen zehn Proben sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die bestimmten Kennwerte sind in Tabelle 4-4 aufgeführt.

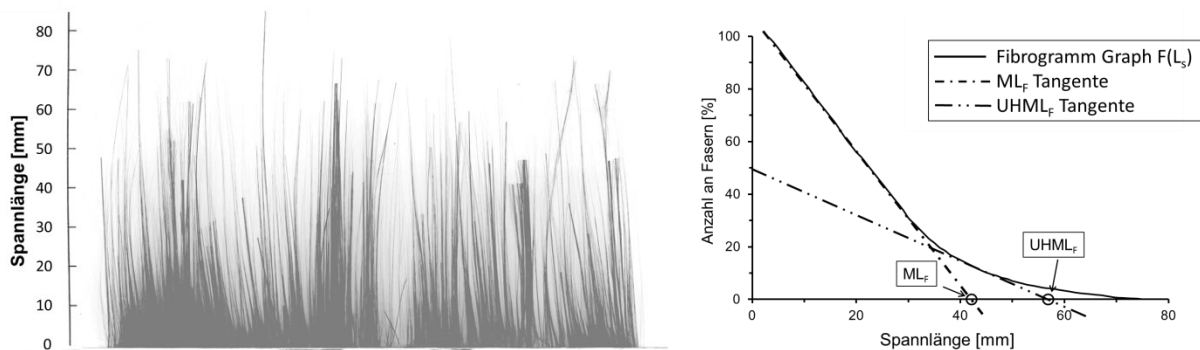


Abbildung 4-12: Exemplarischer Faserbart aus rCF mit unbekannter Faserlänge (links) und gemitteltes Fibrogramm aus allen zehn Proben (rechts)

Tabelle 4-4: Ergebnisse der Faserlängenmessungen mit rCF unbekannter Länge

ML_R aus Referenzmethode [mm]	52,4
$UHML_R$ aus Referenzmethode [mm]	64,2
U_I_R aus Referenzmethode [%]	81,6
\overline{ML}_F aus Fibrographmethode [mm]	50,6
\overline{UHML}_F aus Fibrographmethode [mm]	65,6
\overline{U}_I_F aus Fibrographmethode [%]	77,1
CV_F [%]	5,4
Abweichung von $\overline{ML}_F/\overline{UHML}_F$ zu $ML_R/UHML_R$ [%]	3,6/2,1

Die durch die Fibrographmethode geprüften rCF weisen eine \overline{ML}_F von 50,6 mm und \overline{UHML}_F von 65,6 mm auf, einschließlich des hinzugefügten Korrekturwerts (8,1 mm). Diese Messwerte sind damit vergleichbar mit den ermittelten ML_R und $UHML_R$ der Referenzmethode, mit einer Abweichung im Bereich von $\pm 4\%$. Der CV_F der Messung von zehn Faserbartproben beträgt 5,4 % und ist damit ebenfalls vergleichsweise gering.

Diese Ergebnisse bestätigen die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit der adaptierten Fibrographmethode. Somit konnte im Rahmen dieser Dissertation erstmalig ein effektives Faserlängenmessverfahren für lange rCF entwickelt und umgesetzt werden. Die Nutzung dieses Fibrographverfahrens ermöglicht zudem eine deutlich schnellere Prüfung der rCF (ca. 35 Minuten für zehn Faserbartproben) im

Vergleich zu bisher durchgeführten Einzelfaserlängenmessungen (mehrere Stunden für 500 rCF). Damit wurde eine zentrale Voraussetzung für die Entwicklung der rCF-Hybridgarne geschaffen, durch die Möglichkeit zur effizienten Charakterisierung der Faserschädigung der rCF in der gesamten Prozesskette. In Abbildung 4-13 ist der Messaufbau zur Faserlängenmessung der rCF mittels entwickelter Fibrographmethode abschließend dargestellt.



Abbildung 4-13: Messaufbau zur Faserlängenmessung der rCF

4.2 Prüfung des Biegungsverhaltens und des Öffnungsgrads von rCF beim Krempelprozess

Um die auftretende Faserschädigung der rCF während des Krempelprozesses tiefgreifend zu verstehen, wurden zwei weitere Prüfverfahren im Rahmen der Dissertation entwickelt.

Prüfung des Biegeverhaltens der rCF-Bündel

Mit diesem Prüfverfahren kann untersucht werden, wie unterschiedlich stark sich einzelne rCF-Bündel abhängig von der enthaltenen Faseranzahl und der aufgetragenen Schichte durchbiegen. Dies ermöglicht Rückschlüsse zur auftretenden Faserschädigung im Krempelprozess. Dieses Verfahren wird anstelle der bekannten Cantilever-Methode [163] eingesetzt, da dieses aufgrund der teilweise extrem dünnen und spröden rCF-Bündel ungeeignet ist. Dazu werden zunächst 15 bis 20 Faserbündel (Faseranzahl: ca. 5 bis 700 Einzelfasern je Bündel, Faserlänge: 80 mm) je Variante zufällig ausgewählt und einzeln auf ein Gestell mit zwei Auflagern (Abstand: 70 mm) gelegt. Anschließend werden die Bündel mit einer festinstallierten Kamera abfotografiert. Die digitalen Abbildungen (6000 x 3376 Pixel, 350 dpi) werden danach mit Hilfe der ImageJ-Software [161] analysiert, wobei die

Durchbiegung f anhand der Pixelanzahl gemessen und in Millimeter umgerechnet wird, siehe Abbildung 4-14. Abschließend werden die rCF-Bündel mit der entwickelten Referenzmethode untersucht, um deren jeweilige Anzahl an Fasern zu quantifizieren, siehe Kapitel 4.1.4.

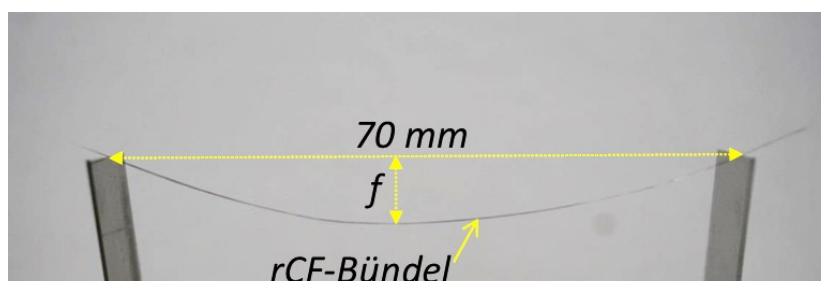


Abbildung 4-14: Durchbiegung eines rCF-Bündels

Prüfung des Öffnungsgrads der rCF-Bündel

Das zweite entwickelte Prüfverfahren ermöglicht die Untersuchung des Bündelöffnungsgrads der rCF. Werden die rCF-Bündel beim Krempeln stärker geöffnet, reduziert sich der Bündeldurchmesser, wodurch die Fasern einen geringeren Widerstand gegen Biegekräfte aufweisen. Damit werden die rCF vermutlich stärker im Krempelprozess geschädigt. Zur Prüfung werden je rCF-Variante zehn Krempelvliese mit einem Flächengewicht von jeweils $3,0 \text{ g/m}^2$ aus der gleichen Anzahl an Bündeln und der gleichen Anordnung auf dem Zuführtisch hergestellt. Die Krempelvliese werden anschließend mit einem Scanner (Helligkeit/Kontrast: 0/0, Auflösung: 1200 dpi) gescannt. Auf Basis der erhaltenen Abbildungen werden im letzten Schritt Grauwert-Histogramme mittels ImageJ-Software [161] erstellt. Diese können anschließend miteinander verglichen werden, um den Grad der Bündelöffnung zu bewerten.

4.3 Konventionelle Prüftechnik zur Faser-, Band-, Garn- und Verbundprüfung

Nachfolgend werden die Prüfbedingungen der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten konventionellen Prüfverfahren kurz erläutert.

Prüfung der Einzelfaserzugeigenschaften und der Faserfeinheit

Das Spannungs-Dehnungsverhalten von Einzelfasern wird nach der Norm DIN EN ISO 5079 [164] mit dem Prüfgerät Favimat+ der Firma Textechno GmbH & Co. KG (Mönchengladbach, Deutschland) bestimmt. Die Prüfkraft des Messkopfs beträgt 210 cN, die Einspannlänge 15 mm, die Prüfungsgeschwindigkeit 1,0 mm/min und die Vorspannung 1,0 cN/tex. Mindestens 50 Einzelfasern werden pro Fasertyp geprüft. Mittels Favimat+ kann ebenfalls die Faserfeinheit automatisch ermittelt werden. Aus dieser kann anschließend der Faserdurchmesser von den rCF und

PA 6-Fasern mit den gegebenen Dichten von rCF ($\rho_{rCF} = 1,75 \frac{g}{cm^3}$) und PA 6 ($\rho_{PA6} = 1,14 \frac{g}{cm^3}$) berechnet werden.

Prüfung der Oberflächenenergie der Fasern

Die gesamte Oberflächenenergie der rCF sowie PA 6-Fasern wird aus den Ergebnissen der Kontaktwinkelmessung mit dem Tensiometer K 100 SF der Firma Krüss GmbH (Hamburg, Deutschland) nach der OWRK-Methode (Owens, Wendt, Rabel und Kaelble; [165]-[166]) berechnet. Jeweils sechs Einzelfasern pro Probe von rCF und PA 6 werden dazu mit zwei verschiedenen Testflüssigkeiten (Wasser und Diiodmethan) untersucht. Die geprüften Kontaktwinkel sowie die polare Oberflächenenergie geben anschließend Auskunft über die Benetzungseigenschaften und dem daraus resultierenden Adhäsionsvermögen der rCF in der PA 6-Matrix. Basierend auf der berechneten Oberflächenenergie wird zudem die thermodynamische Arbeit der Adhäsion (W_A) zwischen den rCF und der PA 6-Matrix unter Verwendung der Gleichung (4-11) berechnet, mit den polaren (γ_P) und dispersen (γ_D) Teilen der ermittelten Oberflächenenergie [167].

$$W_A = 2(\sqrt{\gamma_{P,rCF} \cdot \gamma_{P,PA6}} + \sqrt{\gamma_{D,rCF} \cdot \gamma_{D,PA6}}) \quad (4-11)$$

Prüfung der Faser-Matrix-Haftung mittels SFPO-Test

Die Untersuchungen zu den wirkenden Adhäsionskräften zwischen den rCF und der PA 6-Matrix werden mit einem am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (IPF) entwickelten quasistatischen Einzelfaser-Auszugstest (SFPO-Test) durchgeführt. Detaillierte Informationen zu diesem Prüfverfahren sind in [168]-[169] dargestellt. Dieses Prüfgerät ist auch als FIMATEST von der Firma Textechno GmbH & Co. KG (Mönchengladbach, Deutschland) kommerziell erhältlich. Das PA 6-Matrixmaterial wird dazu zunächst bei ca. 255 °C in einem Tiegel aufgeschmolzen. Im nächsten Schritt wird eine Carbon-Einzelfaser in der Mitte des Tiegels eingebettet, danach wird das Matrixmaterial abgekühlt. Die quasistatischen Auszugstests werden anschließend mit einer Auszugsgeschwindigkeit von 0,01 $\mu\text{m/s}$ durchgeführt, dabei werden 15 bis 20 Proben für jede rCF-Variante getestet. Die scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit (IFSS) τ_{app} kann zusätzlich zur Friktionsscherspannung τ_f aus den Gleichungen (4-12) und (4-13) berechnet werden [170]-[171].

$$\tau_{app} = \frac{F_{max}}{\pi d_f l_{el}} \quad (4-12)$$

$$\tau_f = \frac{F_{min}}{\pi d_f l_{el}} \quad (4-13)$$

Dabei ist F_{max} die maximale Kraft, F_{min} die Kraft nach dem Ablösen der rCF von der PA 6-Matrix, d_f der Durchmesser der rCF und l_{el} die Einbettungslänge. Der

Faserdurchmesser und die Einbettungslänge der rCF in der PA 6-Matrix werden mit einem optischen Mikroskop gemessen. Die Prüfsoftware berechnet zudem die resultierende Ablösungsarbeit, die zum vollständigen Ablösen der Faser erforderlich ist (W_{debond}), die Auszugsarbeit, die zum vollständigen Herausziehen der Faser nach dem Ablösen aufgrund von Reibung erforderlich ist ($W_{pullout}$) sowie die Gesamtarbeit ($W_{total} = W_{debond} + W_{pullout}$).

Prüfung der rCF-Schichte

Zur Analyse der auf den verschiedenen rCF-Varianten aufgetragenen Schichte wird diese zunächst von den rCF extrahiert. Diese Extraktion wird mittels geeignetem Lösungsmittel und einer Soxhlet-Apparatur nach der Norm DIN ISO 10548 durchgeführt [172]. Anschließend werden die Infrarot-Spektren aus den extrahierten Schichten mittels Fourier-Transform-Infrarotspektrometer Nicolet 6700 der Firma Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, USA) bestimmt, aus denen die funktionellen Gruppen ermittelt werden können.

Prüfung der Faserorientierung

Die Faserorientierung in den Faserbändern wird mittels der Methode von Lindsley [173] ermittelt. Dazu wurde zunächst eine dafür erforderliche dreigeteilte Klemmvorrichtung konstruiert und hergestellt, siehe Abbildung 4-14. Die zu prüfenden Faserbänder werden anschließend eingelegt und der Faserorientierungsindex (= Orientation Index (OI)) wird mittels Auskämmen, Schneiden und Wiegen bestimmt. Ein OI von 100 % weist dabei auf eine vollständige Orientierung der Fasern in Längsrichtung hin, berechnet mit der Gleichung (4-14), mit m_E = Masse der herausstehenden gekämmten Fasern und m_N = Masse der unter Klemme 1 verbliebenen Fasern.

$$OI = 1 - \frac{m_E}{m_N} \cdot 100 \% \quad (4-14)$$

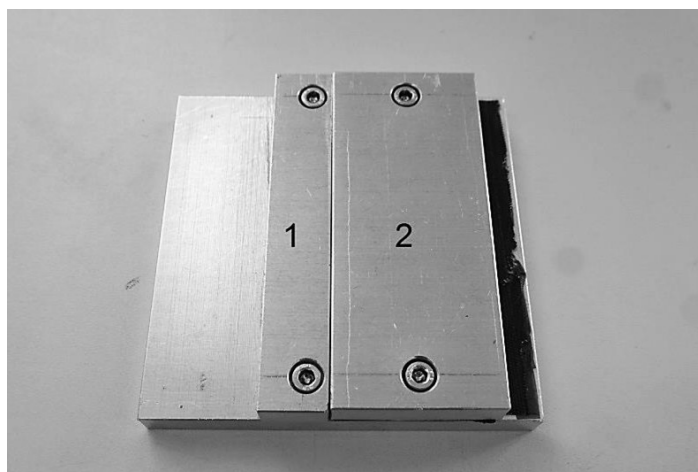


Abbildung 4-15: Klemmvorrichtung zur Bestimmung der Faserorientierung, mit profiliertem Belag zur Verbesserung der Faserklemmung; Maße: Steg 1: 120 mm x 20 mm; Steg 2: 120 mm x 50 mm

Prüfung der Band- und Garnleichmäßigkeit

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der rCF ist die konventionelle Band- und Garnleichmäßigkeitsprüfung mittels kapazitivem Sensor, wie z. B. beim TESTER der Firma Uster, prinzipbedingt nicht möglich. Deshalb werden zur Ermittlung der Gleichmäßigkeit der Faserbänder und Hybridgarne die Massen von 20 Bändern bzw. 100 Garnen mit einer Prüflänge von jeweils 1 m gewogen und daraus der Variationskoeffizient (CV_m) berechnet.

Prüfung der Zugeigenschaften der Hybridgarne

Die Prüfung der Zugeigenschaften der Hybridgarne erfolgt auf der Zugprüfmaschine Z 2.5 der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Ulm, Deutschland) in Anlehnung an die Norm ISO 3341 [174]. Dazu wird eine Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min und eine Prüflänge von 250 mm verwendet. Für jede Variante werden 20 Proben geprüft.

Prüfung der Faserverteilung im Garnquerschnitt

Zur Analyse der Faserverteilung in den Hybridgarnen werden zunächst Schliffbilder des Garnquerschnitts angefertigt. Davon werden anschließend Graustufen-Bilder (2584 x 1936, 150 dpi) mittels Digitalmikroskop AXIOImager.M1m der Firma Carl Zeiss AG (Oberkochen, Deutschland) aufgenommen. Aus den Abbildungen können die rCF bzw. PA 6-Fasern über die Anpassung der Grauwerte herausgefiltert und deren Faserquerschnittsfläche mittels der ImageJ-Funktion *Partikelanalyse* [161] bestimmt werden. Damit kann u. a. die Anzahl an rCF in einem Bündel und die Gesamtanzahl an rCF im Garnquerschnitt näherungsweise ermittelt werden.

Prüfung der Zugeigenschaften der Verbundprüfkörper

Die Prüfung der Zugeigenschaften der Verbundprüfkörper erfolgt auf der Zugprüfmaschine Z 100 der Firma Zwick GmbH & Co. KG (Ulm, Deutschland) nach der Norm DIN EN ISO 527-5 [175]. Die Probenabmessungen der Prüfkörper inkl. Krafteinleitungselemente betragen 250 mm x 15 mm x 1 mm. Für den Zugversuch wird eine Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min und eine Prüflänge von 150 mm verwendet. Die Materialdehnung wird mit einem optischen Sensor aufgezeichnet. Für jede Variante werden zehn Proben hergestellt und geprüft.

Prüfung des Faservolumenanteils der Verbundprüfkörper

Die Prüfung des Faservolumenanteils der Verbundprüfkörper erfolgt mittels Muffelofen Nabertherm Controller B170 der Firma Nabertherm (Lilienthal, Deutschland) in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 1172 [176]. Die Proben werden dort für 1 h bei 450 °C gelagert, sodass die PA 6-Matrix komplett verascht. Der Faservolumenanteil v_F kann auf der Grundlage des Gewichtsmassenverhältnisses

(ψ) vor und nach dem Veraschen mit Hilfe der Gleichungen (4-15) und (4-16) berechnet werden.

$$\psi = \frac{m_{rCF}}{m_{Verbund}} \quad (4-15)$$

$$v_F = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_{rCF}}{\rho_{PA6}}} \quad (4-16)$$

Dabei ist ρ_{rCF} die Dichte der rCF ($1,75 \frac{g}{cm^3}$) und ρ_{PA6} die Dichte der PA 6-Matrix ($1,14 \frac{g}{cm^3}$).

Prüfung der Bruchstellen der Verbundprüfkörper

Nach der Zugprüfung der Verbundprüfkörper werden die Bruchstellen mit einem Quanta-Rasterelektronenmikroskop (REM) der Firma Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, USA) untersucht.

5 Technologisch-konstruktive Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung von Hybridgarnkonstruktionen aus rCF und PA 6-Fasern

5.1 Vorbetrachtung

In diesem Kapitel ist die technologisch-konstruktive Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung von Hybridgarnkonstruktionen aus recycelten Carbonfasern (rCF) und Polyamid (PA) 6-Stapelfasern geschildert. In dieser Prozesskette werden die rCF zunächst zusammen mit den PA 6-Fasern auf einer Krempel zu mehreren diskontinuierlichen Krempelvliesen verarbeitet. Anschließend werden diese Krempelvliese auf einer Strecke zu einem kontinuierlichen Streckenband verstreckt. Im letzten Schritt wird dieses Streckenband einer Spinnmaschine auf Basis eines Flyers zugeführt und zum fertigen rCF-Hybridgarn in der endgültigen Garnfeinheit ausgesponnen.

Nachfolgend sind die einzelnen Prozessschritte *Faserauswahl und -charakterisierung*, *Krempelprozess*, *Streckprozess* und *Spinnprozess* zur Entwicklung des rCF-Hybridgarns umfassend dargestellt.

5.2 Faserauswahl und -charakterisierung

5.2.1 Faserauswahl

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei verschiedene Varianten von rCF untersucht und eingesetzt, siehe Tabelle 5-1. Zwei Varianten simulieren trockene Restspulenabschnitte oder Webkantenreste (rCF-Typ 1), mit speziellen, für thermoplastische (rCF-T) oder duroplastische (rCF-E) Matrices entwickelten Schichten. Beide Varianten stammen von der Firma SGL Carbon SE (Wiesbaden, Deutschland). Als dritte Variante werden kommerziell erhältliche pyrolysierte Fasern (rCF-P) der Firma ELG Carbon Fibre Ltd. (Coseley, England) eingesetzt, die dem rCF-Typ 2 entsprechen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden alle rCF-Varianten nachträglich auf jeweils einheitliche Faserlängen geschnitten. Diese einheitliche Schnittlänge ermöglicht eine reproduzierbare Versuchsdurchführung und eine wissenschaftlich fundierte Ermittlung der Faserschädigung bei den verschiedenen Prozessstufen. Gleichzeitig liegt damit am Beginn der Prozesskette eine sehr schmale Faserlängenverteilung für eine möglichst gleichmäßige Garnherstellung vor.

Als thermoplastisches Fasermaterial werden zwei verschiedene Varianten kommerziell erhältlicher gekräuselter Polyamid (PA) 6-Stapelfasern der Firmen Barnet Europe GmbH & Co. KG (Aachen, Deutschland) bzw. EMS-CHEMIE AG

(Domat, Schweiz) untersucht und eingesetzt, siehe Tabelle 5-2. Das Polyamid 6 wurde aufgrund seiner wachsenden Bedeutung in der Automobilindustrie ausgewählt.

5.2.2 Fasercharakterisierung

Die rCF und PA 6-Fasern werden zunächst hinsichtlich des Faserdurchmessers, der Faserfeinheit, der Oberflächenenergie und der Faser-Matrix-Haftung charakterisiert. Zudem werden die Faserzugeigenschaften und die Schlichte der drei rCF-Varianten untersucht. Diese Ergebnisse sind insbesondere für die erzielbaren Verbundzugeigenschaften in Kapitel 6 relevant. Die entsprechende Prüftechnik ist in Kapitel 4.3 beschrieben.

Die Prüfergebnisse des Durchmessers, der Feinheit, der Zugeigenschaften und der Oberflächenenergie der rCF sind in Tabelle 5-1, die Prüfergebnisse des Durchmessers, der Feinheit und der Oberflächenenergie der PA 6-Fasern sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-1: Ermittelte Faserlänge, -durchmesser, -feinheit, -zugfestigkeit, -zugmodul und Oberflächenenergie der untersuchten rCF

Bezeichnung	Material	Einheitliche Faserlänge [mm]	Durchmesser [µm]	Feinheit [dtex]	Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Oberflächenenergie [mN/m]	
							Disperser Anteil	Polarer Anteil
rCF-E	SGL SIGRAFIL C T50-4.0/240- E100 (für Duroplast-Matrizes)	Filament, 40, 60, 80, 100	6,98	0,67	3588 ± 768	233,1 ± 24	50,5	12,2
rCF-T	SGL SIGRAFIL C T50-4.0/240- T140 (für Thermoplast-Matrizes)	Filament, 80	6,98	0,67	3563 ± 725	232,6 ± 30	39,6	11,8
rCF-P	ELG CARBISO C (Pyrolysiert)	80	6,87	0,65	3599 ± 845	244,8 ± 4	49,6	0,1

Tabelle 5-2: Ermittelte Faserlänge, -durchmesser, -feinheit und Oberflächenenergie der untersuchten PA 6-Fasern

Material	Faserlänge [mm]	Durchmesser [µm]	Feinheit [dtex]	Oberflächenenergie [mN/m]	
				dispers	polar
PA 6 Barnet Europe 2.0-4.0 dtex	40	19,2	3,3	41,1	10,7
PA 6 GRILON P300 EMS GRILTECH 3.3 dtex	60	19,2	3,3	42,1	10,4

Die drei rCF-Varianten (rCF-E, -T und -P) weisen zunächst ähnliche Faserdurchmesser, -feinheiten und -zugeigenschaften auf, wodurch eine gute Vergleichbarkeit untereinander gegeben ist. Der Durchmesser der rCF (ca. 7 μm) unterscheidet sich hingegen deutlich von den PA 6-Fasern (ca. 19 μm). Dieser sollte in mehrkomponentigen Stapelfasergarnen aber möglichst ähnlich sein, um bestmögliche Garneigenschaften zu erzielen, siehe Kapitel 3.3.5. Allerdings liegen die rCF im späteren Hybridgarn vermutlich nicht vollständig vereinzelt, sondern mehrheitlich in rCF-Bündeln mit sehr unterschiedlichen Durchmessern vor. Deshalb kann keine allgemeine Aussage zum optimalen Faserdurchmesser der PA 6-Fasern getroffen werden. Eigene Voruntersuchungen am ITM haben allerdings gezeigt, dass der Einsatz von Modal-Mikrofasern (Durchmesser ca. 5 μm) und PES-Mikrofasern (Durchmesser ca. 12 μm) anstelle der PA 6-Fasern tendenziell zu einer Verringerung der Garnleichmäßigkeit geführt hat. Mögliche Ursachen dazu werden später in Kapitel 5.5.4 diskutiert.

Bei der Prüfung der Schlichte fanden sich bei den rCF-E charakteristische Epoxid-Banden bzw. bei den rCF-T ausgeprägte Polyurethan-Banden. Dies deutet auf eine sehr gute Kompatibilität zu duroplastischen Epoxidharz- bzw. zu thermoplastischen Polyamid-Matrizes hin. Auch im Extrakt der rCF-P konnten verschiedene Restfunktionalitäten nachgewiesen werden. Das verdeutlicht, dass trotz der durchgeführten Pyrolyse Restbestandteile der Schlichte auf den rCF-P vorhanden sind.

Die Ergebnisse aus der Prüfung der Oberflächenenergie lassen erwarten, dass die höchste Adhäsion bei einer Kombination von rCF-T und PA 6-Matrix entsteht, da deren Oberflächenenergien nahezu identische Werte aufweisen. Dadurch wird eine hohe Kompatibilität erzielt [177]. Zudem konnte fast kein polarer Anteil auf der pyrolysierten rCF-P-Oberfläche nachgewiesen werden, was auf die kaum vorhandene Schlichte zurückzuführen ist. Somit ist nur eine vergleichsweise geringe Haftung an der PA 6-Matrix zu erwarten.

Der SFPO-Test bestätigt diese Ergebnisse. Wie in Abbildung 5-1 und in Tabelle 5-3 zu sehen, weisen die rCF-T die höchsten Werte hinsichtlich Auszugskraft, scheinbarer Grenzflächenscherfestigkeit T_{app} , Friktionsscherspannung T_f sowie Ablösungs- (W_{debond}) und Auszugsarbeit ($W_{pullout}$) in der PA 6-Matrix auf.

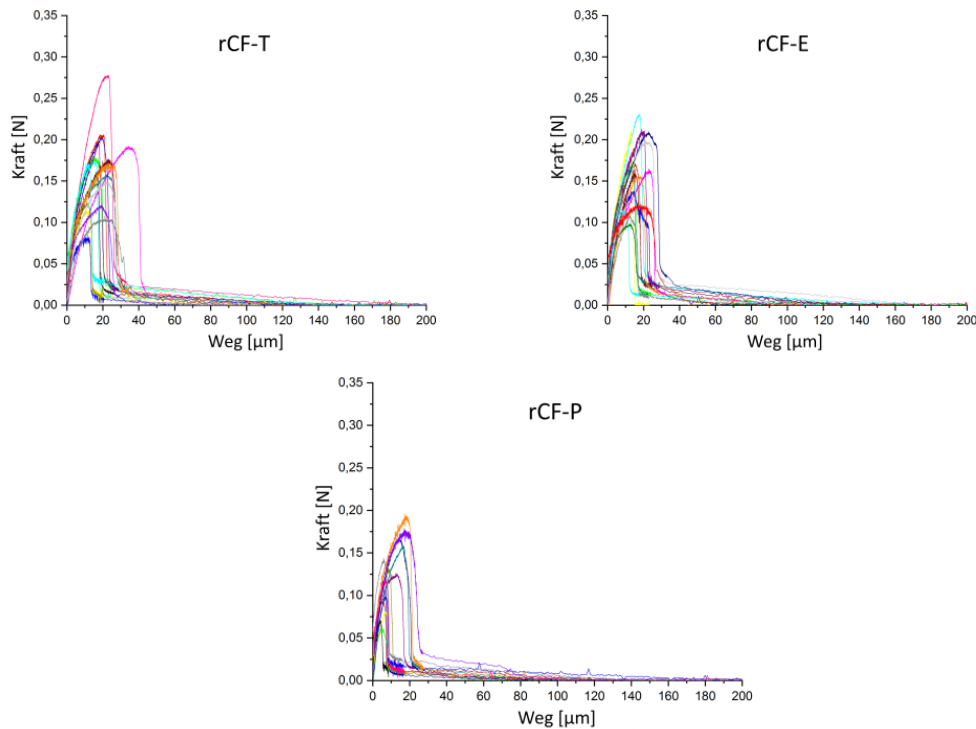


Abbildung 5-1: Kraft-Weg-Verläufe der rCF beim Auszug aus der PA 6-Matrix mittels SFPO-Test

Tabelle 5-3: Grenzflächenparameter der verschiedenen rCF-Varianten beim SFPO-Test

Bezeichnung	τ_{app} [MPa]	τ_f [MPa]	W_{debond} [mN*mm]	$W_{pullout}$ [mN*mm]	W_{total} [mN*mm]	l_{ej} [μm]
rCF-T	56 ± 6	$9,5 \pm 1,3$	$2,5 \pm 1,1$	$1,7 \pm 0,6$	$4,2 \pm 1,6$	128 ± 36
rCF-E	52 ± 7	$9,3 \pm 2,7$	$2,2 \pm 0,9$	$1,8 \pm 0,6$	$4,0 \pm 1,5$	138 ± 30
rCF-P	43 ± 15	$7,6 \pm 2,9$	$1,1 \pm 0,9$	$1,4 \pm 0,6$	$2,5 \pm 1,3$	132 ± 31

Im Allgemeinen wird bei allen getesteten rCF eine hohe Streuung beim SFPO-Test beobachtet, was auf die eher inhomogene Faserflächenfunktionalisierung zurückgeführt wird. Dies wird durch die REM-Aufnahmen in Abbildung 5-2 bestätigt. Die rCF-T und rCF-E weisen im Ausgangszustand vor dem SFPO-Test unterschiedlich benetzte Faserflächen auf. Zudem werden bei den rCF-P Schlichterückstände im REM nachgewiesen. Im Vergleich zu den rCF-E und rCF-P variiert die Form der aufgezeichneten SFPO-Kurven bei den rCF-T am stärksten, was mit zwei charakteristischen Versagensarten in Verbindung zu stehen scheint. Zum einen wird der Riss zur PA-Matrix abgelenkt, wodurch das Matrixmaterial verformt wird und noch an der Faseroberfläche haftet, wie in Abbildung 5-2 (rCF-T #1) dargestellt. Zum anderen wächst der Riss sehr nahe entlang der Faseroberfläche, wodurch eine zerklüftete rCF-Oberfläche ohne Schlichte- oder Matrixreste sichtbar wird, wie in Abbildung 5-2 (rCF-T #2) zu erkennen.

Die scheinbare Grenzflächenscherfestigkeit τ_{app} von den rCF-E bzw. rCF-P ist etwa 7 % bzw. 23 % geringer als die von den rCF-T. Damit ermöglichen die untersuchten rCF-P dennoch eine vergleichsweise starke Anhaftung zur PA 6-Matrix, obwohl fast kein polarer Anteil auf der rCF-P-Oberfläche nachgewiesen wurde. Dies wird auf die

raue Faseroberfläche aufgrund des Pyrolyseprozesses zurückgeführt. Diese führt dazu, dass die Matrixhaftung hauptsächlich durch mechanische Reibung erfolgt, wie z. B. auch in [51] und [166] nachgewiesen. Auch hier bestätigen die REM-Aufnahmen der rCF-P diese Annahme. Die pyrolysierte rCF-P-Oberfläche ist vor dem SFPO-Test stark gerillt, nach dem SFPO-Test sind diese Rillen mit Matrixmaterial gefüllt. Im Vergleich dazu zeigt die rCF-E-Oberfläche vor und nach dem SFPO-Test kaum Unterschiede.

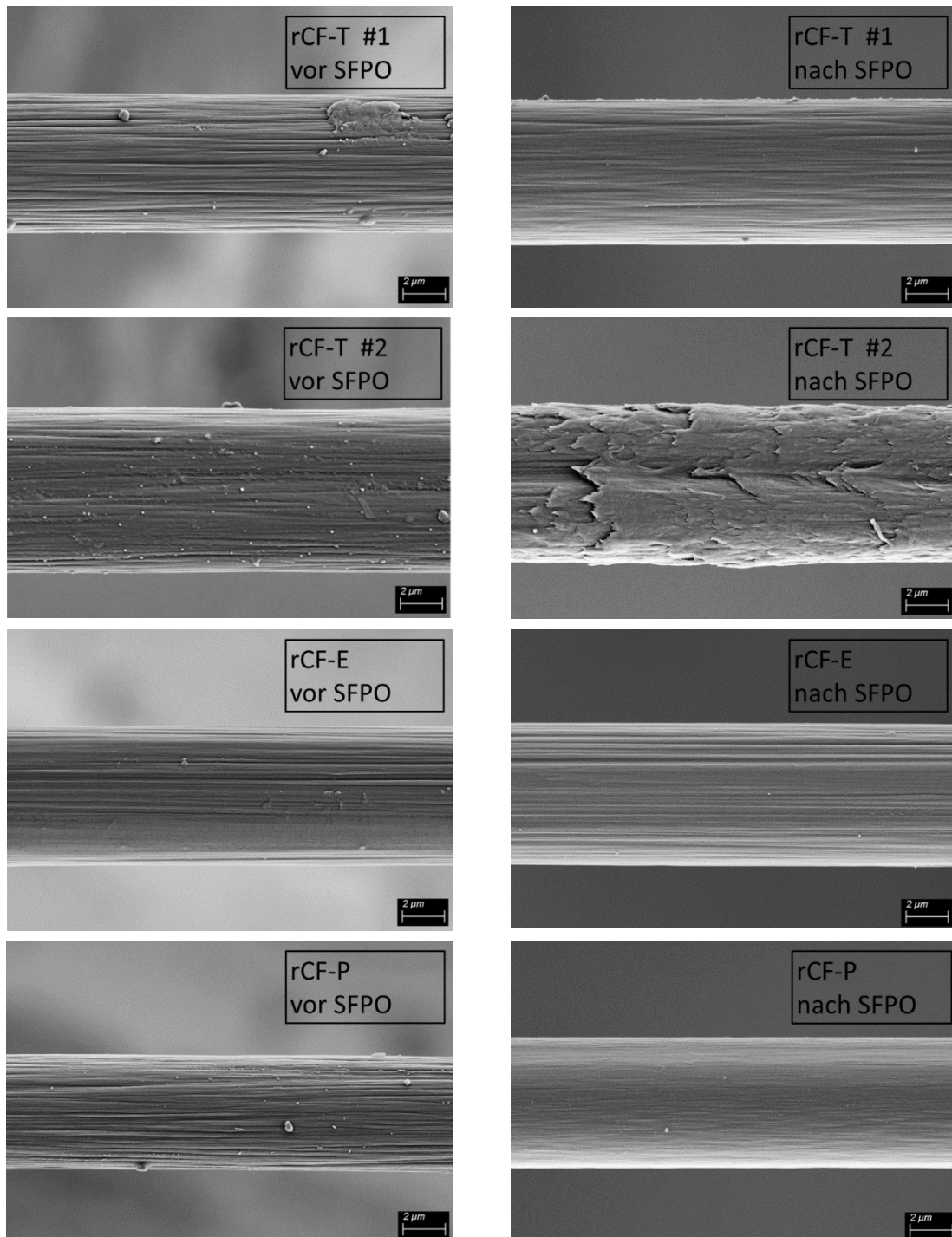


Abbildung 5-2: REM Aufnahmen von den rCF-T, rCF-E und rCF-P vor und nach dem Single-Fiber-Pull-Out-(SFPO-)Test

5.3 Krempelprozess

5.3.1 Modifikation der eingesetzten Krempel zur Spezialkrempel

Die Verarbeitung der rCF und PA 6-Fasern zu einem kontinuierlichen Krempelband wird mittels Krempelprozess umgesetzt. Die Basis dazu bildet eine Laborkrempel der Firma Anton Guillot KG (Aachen, Deutschland), die bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben ist. Wie dort ebenfalls geschildert, ist aufgrund der bauartbedingten Größe der Laborkrempel nur die Herstellung von diskontinuierlichen Vliesen möglich. Diese müssen anschließend manuell zu einem kontinuierlichen Krempelband zusammengefügt werden.

Zur Verarbeitung von elektrisch leitfähigen rCF wurde zunächst die gesamte Elektronik der Krempel zur Vermeidung von Kurzschlüssen gekapselt. Der Hauptmotor der Krempel, über den alle Walzen mittels Riemen oder Zahnräder angetrieben werden, wurde mit einem Frequenzumrichter ausgestattet. Dieser ermöglicht die stufenlose Variation der Drehzahl der Walzen. Zudem wurden drei verschiedene Garniturtypen inkl. Walzenrohlinge beschafft, mit denen die Tambour-, Arbeiter- und Wenderwalzen garniert wurden. Damit kann der Einfluss der Garnituren auf die Verarbeitung der Fasern (Faserschädigung, -orientierung, etc.) analysiert werden. Konkret wurden zwei Ganzstahlgarnituren sowie eine Garniturvariante mit flexiblen Zähnen beschafft, diese sind exemplarisch in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Auswahl erfolgte in enger Zusammenarbeit mit einem Garniturhersteller. Die dafür erforderlichen zusätzlichen Walzenrohlinge wurden konstruiert, angefertigt und anschließend vom Garniturhersteller bezogen. Die wesentlichen Kenndaten der Garnituren sowie die Standardeinstellungen der Walzenabstände sind in Anlage 1 hinterlegt.

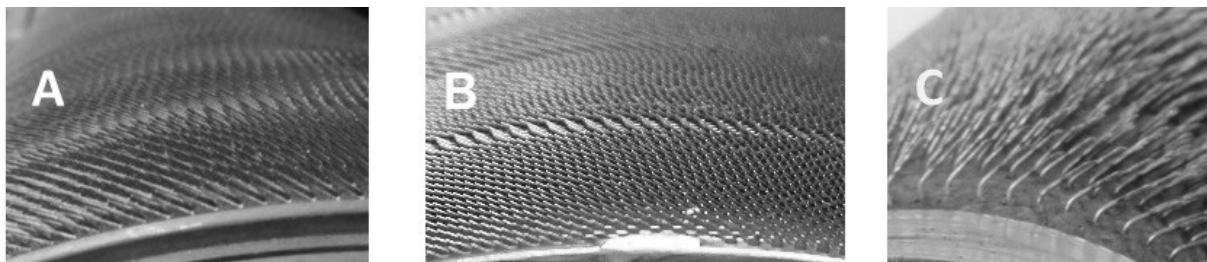


Abbildung 5-3: Eingesetzte Ganzstahlgarnituren A und B sowie flexible Garniturvariante C

5.3.2 Anforderungen an den Krempelprozess

Folgende Anforderungen werden an den Krempelprozess zur Verarbeitung der rCF und PA 6-Fasern gestellt:

- Geringe Faserschädigung
- Hohe Faservereinzelung
- Homogene Verteilung der Fasern
- Hohe Faserorientierung in Längsrichtung
- Hoher Durchmischungsgrad beider Faserkomponenten

Wie in der Prozessanalyse in Kapitel 3 dargestellt, erhöhen eine schmale Faserlängenverteilung, eine hohe Faservereinzelung und eine homogene Verteilung der Fasern die spätere Garngleichmäßigkeit. Da sich aber der Grad der Einzelfaserauflösung direkt auf den Grad der Faserschädigung der rCF auswirkt, muss beim Krempelprozess vermutlich eine gewisse Faserschädigung in Kauf genommen werden, um die rCF-Bündel ausreichend zu öffnen. Eine hohe Faserorientierung in Vlies-Längsrichtung für maximale Garn- und Verbundzugkennwerte wird ebenfalls angestrebt. Für eine spätere gleichmäßige Konsolidierung der rCF-Hybridgarne zu Verbundbauteilen ist außerdem ein hoher Durchmischungsgrad der rCF und PA 6-Fasern für kurze Fließwege erforderlich. Bei der Stapelfasergarnherstellung kann allerdings grundsätzlich von einer nahezu homogenen Durchmischung beider Faserkomponenten ausgegangen werden, da hierbei die Fasermischung auf Mikro- bzw. Faserebene stattfindet [15]. Im Vergleich dazu liegt bei herkömmlichen Hybridgarnverfahren mittels Lufttexturier- und Friktionsspinntechnik nur eine Fasermischung auf Meso- bzw. Garnebene vor.

5.3.3 Versuchsdurchführung

5.3.3.1 Versuchsplan

Es sei an dieser Stelle zunächst darauf hingewiesen, dass sich beim Krempelprozess eine große Vielzahl an Parametervariationen ergeben. Ursächlich dafür sind u. a. die drei unterschiedlichen Garniturvarianten, die breite Einstellbarkeit der Walzenabstände zueinander sowie die frei auswählbaren Faserparameter (unterschiedliche Faserlänge, Faservariante, etc.), die jeweils alle untereinander beliebig kombinierbar sind. Die nachfolgenden Untersuchungen konzentrieren sich daher nur auf die Variation der Parameter:

- Walzengarnituren
- Walzenabstände der Arbeiterwalzen zum Tambour
- Motordrehzahl
- rCF-Variante

- rCF-Eingangsfaserlänge
- rCF-Voröffnung

In Tabelle 5-4 ist der entsprechende Versuchsplan für den Krempelprozess dargestellt. Dazu werden die Vliese zunächst nur aus 100 % rCF hergestellt, um eine Beeinflussung der Prüfergebnisse durch die PA 6-Fasern zu vermeiden.

Tabelle 5-4: Versuchsplan der untersuchten Parametervariationen beim Krempelprozess

Vlies- bezeichnung	Eigenschaften der Faservorlage			Parametervariationen
	rCF-Eingangs- faserlänge [mm]	rCF- Variante	Voröffnung	
40-rCF-E	40	rCF-E	nein	Garnitur A, B, C; Motordrehzahl: 500 min ⁻¹ / 1000 min ⁻¹ ; Abstand Arbeiter-Tambour: 0,5; 1,0; 2,0; 2,8 mm
60-rCF-E	60			
80-rCF-E	80			
100-rCF-E	100			
40-rCF-E-V	40		ja	
60-rCF-E-V	60			
80-rCF-E-V	80			
100-rCF-E-V	100			
80-rCF-T	80	rCF-T	nein	
80-rCF-P		rCF-P		

5.3.3.2 Herstellung der Vliese

Für jedes herzustellende Vlies werden 12 g rCF abgewogen. Das gesamte Fasermaterial wird auf das Zuführband der Krempel gelegt, wobei dieses anschließend zu einem sehr feinen Faserflor verarbeitet wird. Dieser Flor wird abschließend auf der Aufwicklungswalze zu einem diskontinuierlichen Vlies aufgewickelt. Ein hergestelltes Vlies weist eine Feinheit von ca. 13 ktex auf und ist in Abbildung 5-4 mit den entsprechenden Abmessungen dargestellt.



Abbildung 5-4: Abmessungen eines hergestellten Vlieses aus 100 % rCF

In der Stapelfaserspinnerei wird bei der Verarbeitung von konventionellen Natur- und Chemiefasern vor dem eigentlichen Kardier- oder Krempelprozess in der Regel eine zusätzliche Faservoröffnung durchgeführt. Diese trägt zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit der Fasern bei der anschließenden Garnherstellung bei. Deshalb wurde im Rahmen der Arbeit ebenfalls untersucht, wie sich ein separater Voröffnungsprozess auf die Verarbeitung der rCF auswirkt. Für eine möglichst

schonende Voröffnung wurde dazu ein Verfahren mittels Luftverwirbelung im Labormaßstab entwickelt. Die rCF werden in einen speziellen Behälter mit Luftauslässen gelegt, anschließend wird Druckluft eingeblasen. Bei der dabei auftretenden Verwirbelung bzw. Zyklonbildung im Behälter werden die rCF-Bündel äußerst schonend vorgeöffnet und somit auch deutlich voluminöser, siehe Abbildung 5-5.



Abbildung 5-5: Ungeöffnete (links) und vorgeöffnete (rechts) rCF mit jeweils gleicher Fasermenge

Nach der Herstellung der einzelnen Vliese mit den unterschiedlichen Parametern erfolgt die Prüfung der Faserlänge, der Faserorientierung, des Öffnungsgrads und des Biegeverhaltens der rCF. Die entsprechende Prüftechnik ist in Kapitel 4 erläutert.

5.3.4 Prüfergebnisse

5.3.4.1 Variation der rCF-Variante

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 geschildert, wird der Grad der Faserschädigung im Krempelprozess ganz entscheidend von den konkret vorliegenden geometrischen Abmessungen der Fasern beeinflusst. Mit zunehmendem Schlankheitsgrad verringert sich der Widerstand der Fasern gegenüber auftretenden Biegekräften im Krempelprozess, wodurch diese potentiell stärker geschädigt werden. Der Durchmesser der rCF resultiert im Wesentlichen aus der Anzahl an Einzelfasern des ursprünglichen Carbon-Filamentgarns und der Haftung der Einzelfasern zueinander. Diese Haftung wird wiederum maßgeblich von der aufgetragenen Schlichte beeinflusst. Eine Schlichte mit einer höheren Adhäsion führt daher zu einer stärkeren Haftung der Fasern im Bündel und bietet somit einen höheren Schutz vor Faserschädigung beim Krempelprozess. Zudem verringert die glatte Oberfläche der Schlichte die Reibung zwischen den Fasern und den Krempelgarnituren und unterstützt somit ebenfalls einen schonenden Krempelprozess. Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Schlichten beim Krempelprozess zu untersuchen, werden daher als erster Schritt die drei verschiedenen rCF-Varianten (rCF-T,-E und -P) mit je 80 mm Eingangsfaserlänge untersucht. Die Ergebnisse der Faserlängenmessung sind in Abbildung 5-6 dargestellt.

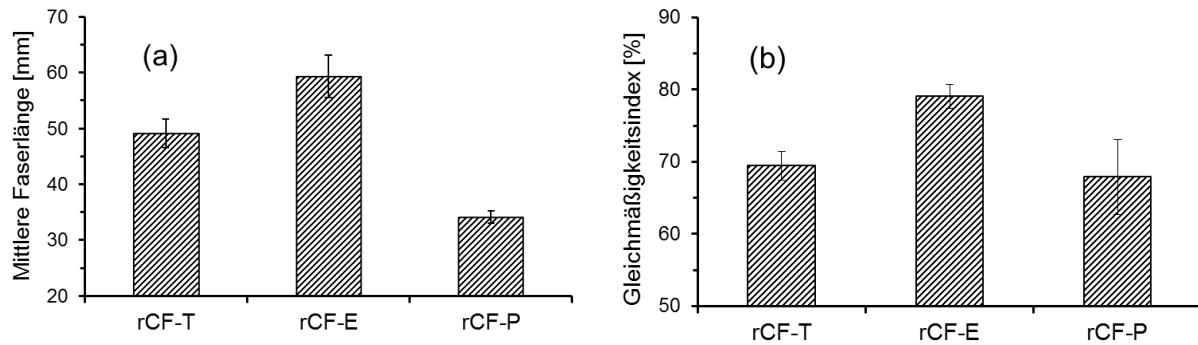


Abbildung 5-6: Mittlere Faserlänge (ML) (a) und Gleichmäßigkeitsindex (UI) (b) der verschiedenen rCF-Varianten nach dem Krempelprozess bei 80 mm Eingangsfaserlänge

Wie aus beiden Diagrammen ersichtlich, weisen die rCF-E die höchste mittlere Faserlänge sowie den höchsten Gleichmäßigkeitsindex ($\hat{=}$ schmalste Faserlängenverteilung) aller drei Varianten auf. Die mittlere Länge der rCF-T ist dazu im Vergleich zu den rCF-E um 17 % niedriger, bei den rCF-P sogar um 43 %. Die Ursachen für die höhere Schädigung der rCF-T und rCF-P wurden anhand der Prüfungen des Biegungsverhaltens und des Öffnungsgrads der rCF näher untersucht. Deren Ergebnisse sind nachfolgend erläutert.

Bei der Prüfung des Biegungsverhaltens der rCF kann der Grad der Durchbiegung bei unterschiedlicher Faseranzahl bzw. dem sich daraus verändernden Bündeldurchmesser ermittelt werden. Dabei weisen die rCF-E-Bündel eine gleichmäßige Zunahme der Durchbiegung bei abnehmendem Bündeldurchmesser auf, siehe Abbildung 5-7. Dieser Zusammenhang zwischen der Durchbiegung f und der Anzahl an Fasern spiegelt sich in einem hohen Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,85$) wider. Bei den rCF-T wurde hingegen eine stärkere Schwankung bei den Werten der Durchbiegung ermittelt ($R^2 = 0,69$). Diese wird auf einen ungleichmäßigeren Schichtauftrag anhand der im REM beobachteten inhomogenen Faseroberflächen zurückgeführt, siehe Kapitel 5.2.2. Das Biegeverhalten der rCF-P weist demgegenüber einen noch viel größeren Unterschied zu den beiden anderen rCF-Varianten auf ($R^2 = 0,0008$). Dabei wurde eine hohe Durchbiegung der rCF-P-Bündel unabhängig von dem jeweiligen Bündeldurchmesser ermittelt. Die Ursache hierfür liegt in der fehlenden Schichte dieser Variante. Dadurch haften nahezu keine Einzelfasern innerhalb der Bündel aneinander, wodurch keine wechselseitige Kraftübertragung ermöglicht wird. Dies führt zu einer äußerst geringen Widerstandsfähigkeit der pyrolysierten rCF-P gegenüber den auftretenden Biegekräften im Krempelprozess, weshalb diese stark eingekürzt werden.

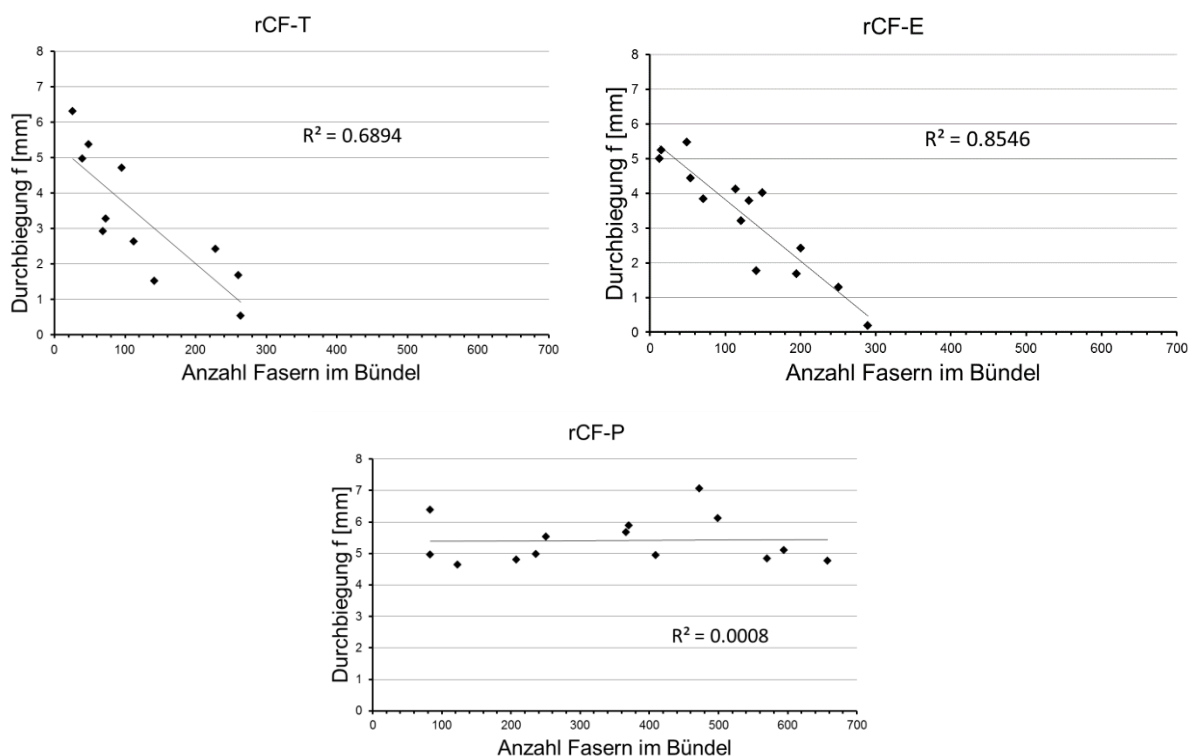


Abbildung 5-7: Ergebnisse der Bündelbiegungsprüfung von rCF-T/-E/-P

Darüber hinaus zeigt auch die Prüfung des Öffnungsgrads der rCF deutliche Unterschiede bei den einzelnen Varianten. Dieser lässt sich anhand einer Grauwertanalyse von den eingescannten Vliesen beurteilen. Wie in Abbildung 5-8 dargestellt, wird ein Vlies mit einem höheren rCF-Öffnungsgrad deutlich dichter, da sich die Anzahl an vereinzelt rCF drastisch erhöht. Die gescannten Bilder der rCF-P-Vliese weisen dabei deutlich weniger weiße ($\hat{=}$ Farbe des Hintergrunds) und mehr dunkelgraue Pixel auf, siehe Abbildung 5-9. Dieser höhere Faseröffnungsgrad ist auf den geringen Zusammenhalt der einzelnen Fasern in den Bündeln durch die fehlende Schlichte zurückzuführen. Auch die rCF-T-Vliese neigen im Vergleich zu den rCF-E zu einer höheren Faseröffnung, vermutlich ebenfalls aufgrund des ungleichmäßigeren Schlichteauftrags. Dies resultiert bei den rCF-T und rCF-P letztlich in einer höheren Faserschädigung.

Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Untersuchungen im Wesentlichen rCF-E eingesetzt, da damit vermutlich die gleichmäßigsten Hybridgarne herstellbar sind, aufgrund der vergleichsweise höchsten mittleren Faserlänge und der schmalsten Faserlängenverteilung im Vlies.

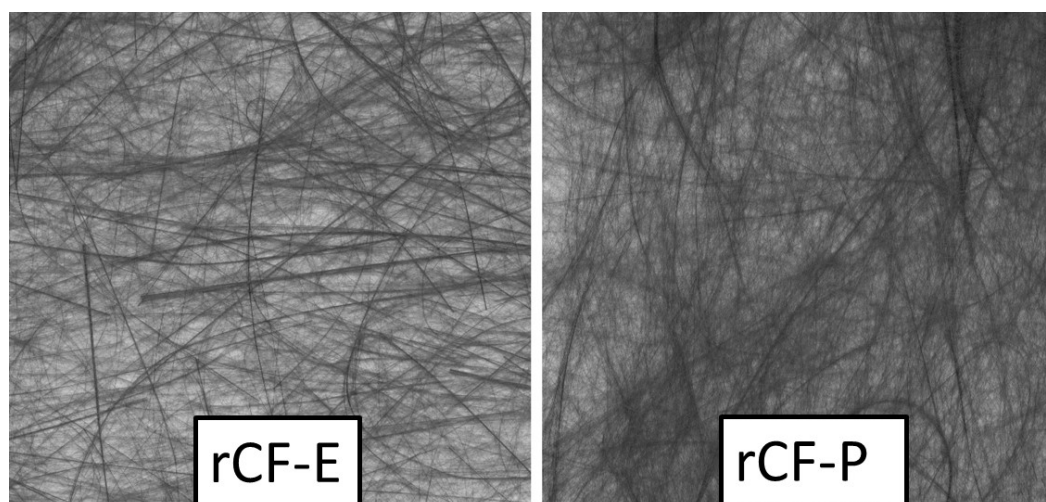
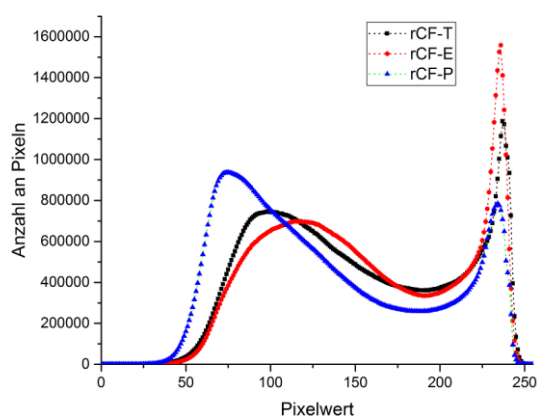


Abbildung 5-8: Detailaufnahme eines eingescannten rCF-E- und rCF-P-Vlieses



Variante	Mittlerer Pixelwert
rCF-T	151,7
rCF-E	156,2
rCF-P	132,6

Abbildung 5-9: Pixelwert-Diagramm sowie Mittelwerte der Pixelwerte der gescannten rCF-T/-E/-P-Vliese, vom Pixelwert 0 (reines Schwarz) bis zu 255 (reines Weiß); die gestrichelten Verbindungslinien sind nur zur besseren Übersichtlichkeit dargestellt

5.3.4.2 Variation der Walzengarnituren und der Eingangsfaserlänge

Nach der Auswahl der Faservariante werden die drei verschiedenen Walzengarniturtypen und die unterschiedlichen Eingangsfaserlängen der rCF (40, 60, 80, 100 mm) untersucht. Die Verarbeitung der rCF-E ist dabei mit den Ganzstahlgarnituren A und B uneingeschränkt möglich. Im Gegensatz dazu setzen sich die Zwischenräume der flexiblen Garnitur C aufgrund der vergleichsweise langen Zähne nach kurzer Zeit mit den rCF zu, wodurch keine kontinuierliche Verarbeitung möglich ist. Deshalb wurden die flexiblen Garnituren C im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Die durchgeführten Faserlängenmessungen belegen zunächst, dass die Faserschädigung mit zunehmender Eingangsfaserlänge der rCF steigt, siehe Abbildung 5-10. Während die 40 mm rCF die nahezu gleiche mittlere Faserlänge wie vor dem Krempelprozess aufweisen (ca. 4 % Einkürzung), beträgt die Fasereinkürzung bei den 60/80/100 mm rCF jeweils ca. 20/26/42 %. Dies kann im Wesentlichen mit dem

bereits in Kapitel 3.2.1 beschriebenen zunehmenden Schlankheitsgrad der Fasern begründet werden. Die längeren rCF werden dabei durch die strömende Luft und die kleinen Umlenkradien in der Krempel deutlich stärker gebogen, wodurch diese anschließend stärker geschädigt werden. Die Eingangsfaserlänge der rCF ist somit ein wesentlicher Einflussfaktor für den Grad der resultierenden Faserschädigung. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Walzengarnituren auf die Faserschädigung, zumindest bei den beiden hier untersuchten Garniturvarianten, als gering zu bewerten. Die rCF, die auf der Garnitur A verarbeitet wurden, weisen hierbei eine etwas geringe Faserschädigung auf. Die Ursachen dafür sind allerdings aufgrund der geringen Differenz kaum ermittelbar. Wegen dieser geringen Unterschiede wurde sich für die nachfolgenden Untersuchungen auf die Garnitur A beschränkt.

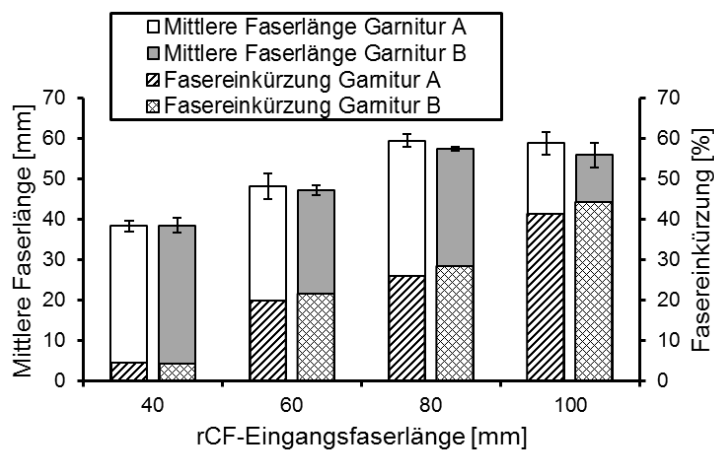


Abbildung 5-10: Mittlere Faserlänge und Fasereinkürzung der rCF nach dem Krempelprozess mit den Garnituren A und B bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

5.3.4.3 Variation der Motordrehzahl und der Eingangsfaserlänge

Der in der Krempel integrierte Frequenzumrichter ermöglicht die stufenlose Variation der Motordrehzahl bzw. der daraus resultierenden Walzengeschwindigkeiten. Zur Untersuchung des Einflusses der Motordrehzahl auf die Faserschädigung bei verschiedenen rCF-Eingangsfaserlängen wurde diese auf den maximalen Wert (ca. 1000 min^{-1}) und auf 500 min^{-1} eingestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-11 dargestellt. Entgegen den Erwartungen nimmt die Faserschädigung bei höherer Motordrehzahl nicht zu. Dies unterscheidet sich von den bisher bekannten Zusammenhängen, siehe Kapitel 3.2.1. Die Ursache hierfür könnte im unterschiedlichen Ursprung der Faserschädigung liegen. Während die konventionellen Fasern (Baumwolle, Polyester) durch höhere Zugkräfte bei zunehmenden Walzengeschwindigkeiten stärker geschädigt werden, erfolgt die Fasereinkürzung der rCF im Wesentlichen durch zu hohe Biegekräfte. Diese Biegung der Fasern wird hingegen deutlich weniger von den Walzengeschwindigkeiten, sondern primär von den kritischen Umlenkradien an den Garniturzähnen oder

zwischen zwei Walzen beeinflusst. Aus den vorliegenden Ergebnissen kann allerdings nicht zwangsläufig abgeleitet werden, dass dies z. B. bei einem anderen Krepelmodell oder anderen Garnituren auch genauso gilt. Nichtsdestotrotz können die rCF im vorliegenden Fall mit maximaler Motordrehzahl an der Spezialkrepel verarbeitet werden.

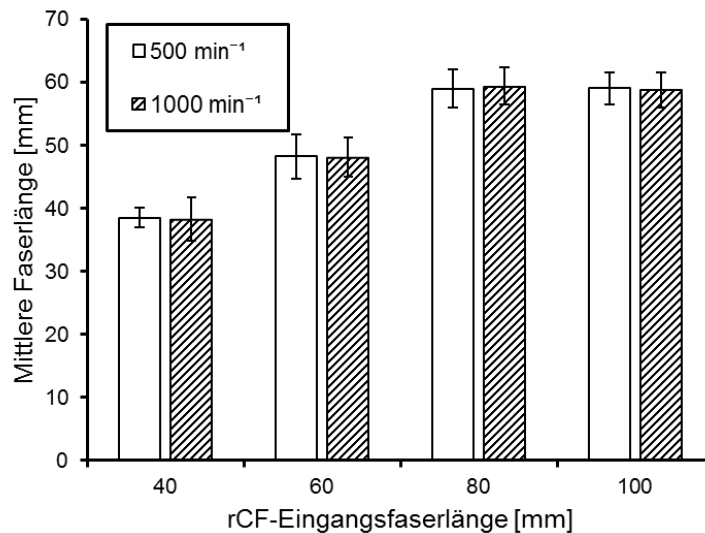


Abbildung 5-11: Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krepelprozess bei einer Motordrehzahl der Krepel von 500 min⁻¹ und 1000 min⁻¹ bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

5.3.4.4 Variation der Walzenabstände und der Eingangsfaserlänge

Nach der Festlegung der Motordrehzahl werden die Abstände der Arbeiterwalzen zum Tambour bei jeweils unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen variiert (jeweils 0,5; 1,0; 2,0 und 2,8 mm Abstand). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-12 dargestellt.

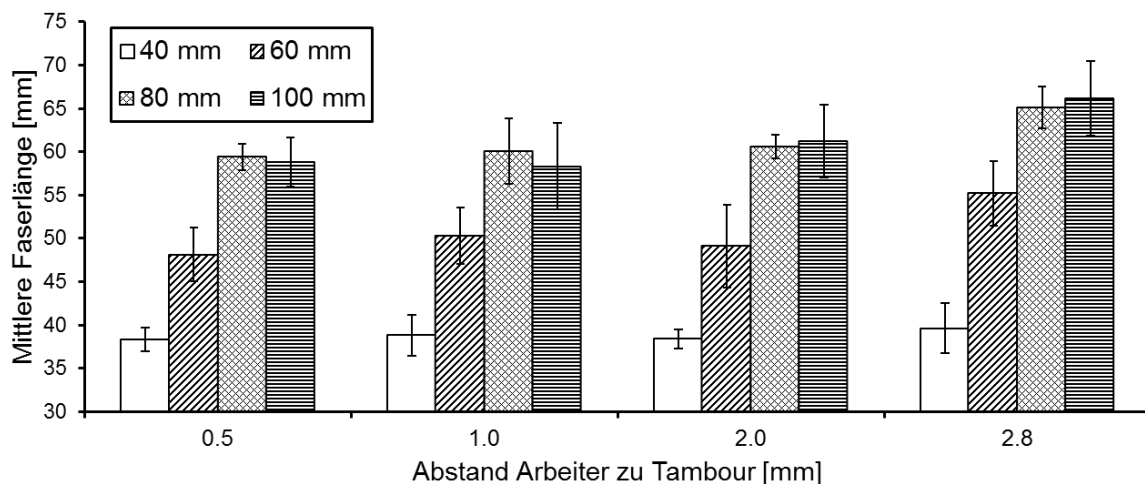


Abbildung 5-12: Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krepelprozess mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Faserschädigung tendenziell mit Vergrößerung des Walzenabstands abnimmt, insbesondere bei dem maximal einstellbaren Abstand von 2,8 mm. Die wesentliche Ursache hierfür ist, dass die sich

auf dem Tambour befindlichen rCF zunehmend seltener von den Arbeiterwalzen erfasst und umgebogen und dadurch geschädigt werden. Gleichzeitig werden die rCF-Bündel vermutlich durch die abnehmende Kardierleistung deutlich weniger geöffnet und orientiert. Dies wird nachfolgend mit der Prüfung des Öffnungsgrads der rCF und der Faserorientierung untersucht.

Die Ergebnisse der Prüfung des Öffnungsgrads sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Dabei sind hier zur besseren Übersichtlichkeit lediglich die Mittelwerte der ermittelten Grauwerte angegeben. Ein höherer mittlerer Pixelwert steht für einen geringeren Öffnungsgrad.

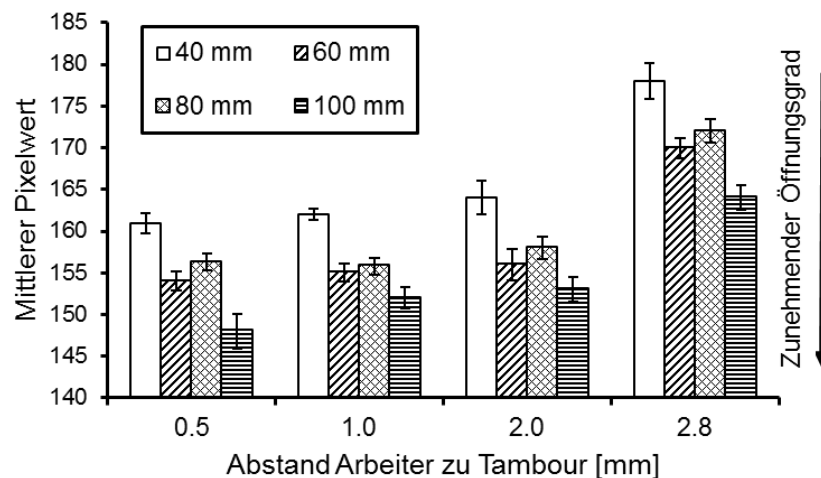


Abbildung 5-13: Grad der Faseröffnung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen; ein niedriger mittlerer Pixelwert steht für einen hohen Öffnungsgrad

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Walzenabstand der mittlere Pixelwert steigt, somit also der Grad der Faseröffnung sinkt. Insbesondere beim maximalen Walzenabstand von 2,8 mm werden die rCF-Bündel nur noch vergleichsweise gering geöffnet. Daraus resultiert demnach eine geringere Faserschädigung. Zudem ist ersichtlich, dass die 40 mm rCF im Vergleich zu den längeren Fasern am wenigsten geöffnet werden, was ein weiterer Grund für deren äußerst geringe Faserschädigung beim Krempelprozess darstellt. Dieser geringe Öffnungsgrad wird ebenfalls auf die hohe Biegesteifigkeit bzw. den geringen Schlankheitsgrad der 40 mm rCF zurückgeführt, wodurch diese nur in geringem Maße von den einzelnen Zähnen der Krempelgarnituren erfasst werden können. Die höhere Faserschädigung der 60 bis 100 mm rCF resultiert demnach aus ihrer abnehmenden Biegesteifigkeit, die durch den gleichzeitig zunehmenden Faseröffnungsgrad weiter reduziert wird.

Da die 40 mm rCF aufgrund ihrer hohen Biegesteifigkeit nur schwierig von den Arbeiterwalzen erfasst und somit kardiert werden können, müssten diese demnach die vergleichsweise geringste Faserorientierung im Vlies aufweisen. Diese Schluss-

folgerung steht im ersten Blick im Widerspruch zu den Ergebnissen der geprüften Faserorientierung, siehe Abbildung 5-14.

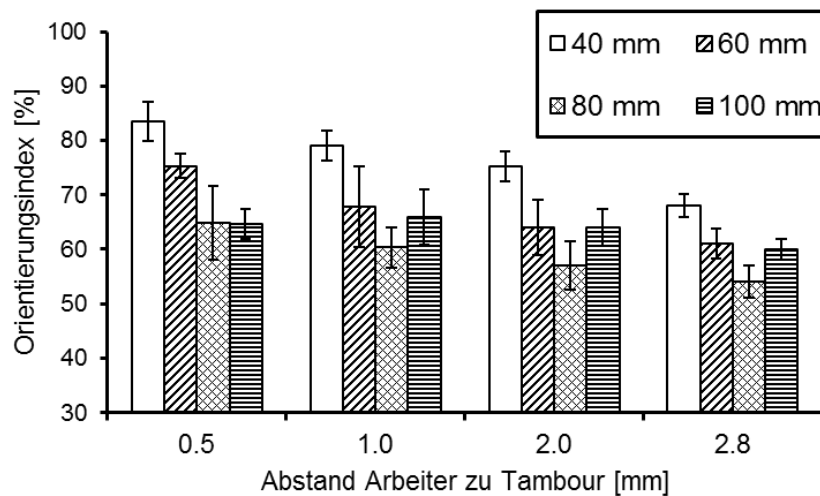


Abbildung 5-14: Faserorientierung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiter zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Dabei weisen die 40 mm rCF den höchsten Orientierungsindex auf, also die höchste Ausrichtung in Vlies-Längsrichtung. Dies ist allerdings nicht auf die „beste“ Kardierung im Krepelprozess zurückzuführen, sondern ebenfalls auf deren hohe Biegesteifigkeit. Dadurch liegen die 40 mm rCF im Vlies jeweils immer nahezu vollständig gestreckt vor, wodurch diese auch häufig in Vlies-Längsrichtung orientiert sind. Im Gegensatz dazu liegen die 60 bis 100 mm rCF durch deren höhere Faserlängen und höhere Faservereinzelung z. T. wahllos geschlängelt im Vlies vor. Dadurch wird nur eine vergleichsweise geringe Faserorientierung erzielt. Erwartungsgemäß konnte hingegen nachgewiesen werden, dass die Faserorientierung bei zunehmendem Walzenabstand sukzessiv sinkt. Dies ist auf die abnehmende Kardierleistung der Arbeiterwalzen zurückzuführen.

Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, dass die geprüften Vliese mit 2,8 mm Walzenabstand von Tambour und Arbeiter die geringste Faserschädigung aufweisen und somit als Vorzugsvariante gelten würden. Allerdings verfügen diese Vliese, im Gegensatz zu den Vliesen mit 0,5 bis 2,0 mm Walzenabstand, über eine kaum vorhandene Vlies- bzw. Krepelbandhaftung. Deswegen war die anschließende Streckenbandherstellung nur sehr eingeschränkt möglich. Dies wird auf die niedrige Faser-Faser-Reibung im Vlies durch die äußerst geringe Faservereinzelung der rCF zurückgeführt. Aus diesem Grund wurde für die nachfolgenden Versuche ein Arbeiter-Tambour-Abstand von 1,0 mm eingestellt, als Kompromisslösung aus geringer Faserschädigung und hoher Faseröffnung und -orientierung.

5.3.4.5 Variation der Voröffnung und der Eingangsfaserlänge

Die Ergebnisse der Faserlängenmessung und der Prüfung des Öffnungsgrads der rCF bei zusätzlicher Faservoröffnung sind in Abbildung 5-15 dargestellt.

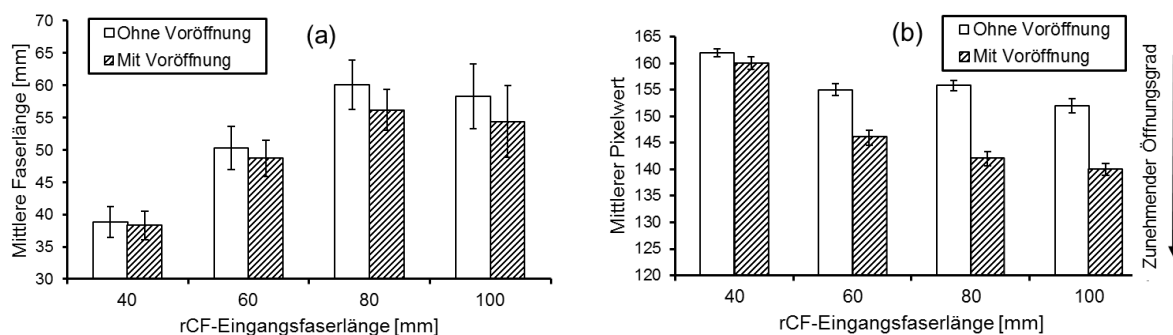


Abbildung 5-15: Mittlere Faserlänge (a) und Öffnungsgrad der rCF (b) mit und ohne zusätzlicher Faservoröffnung bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Der Vergleich der Ergebnisse der Faserlängenmessung zeigt, dass die vorgeöffneten rCF im Krempelprozess stärker geschädigt werden. Dies wird auf den höheren Grad der Faseröffnung zurückgeführt, wie in Abbildung 5-15 (b) dargestellt. Dadurch erhöht sich der Schlankheitsgrad der rCF und deren Biegesteifigkeit reduziert sich. Der Einfluss der zusätzlichen Faservoröffnung auf den resultierenden Grad der Faseröffnung und die Faserschädigung im Vlies steigt dabei deutlich mit zunehmender rCF-Eingangsfaserlänge.

Aus diesen Ergebnissen wird geschlossen, dass auf eine zusätzliche Faservoröffnung verzichtet werden sollte, um die Fasereinkürzung so gering wie möglich zu halten. Dennoch könnte der Öffnungsgrad der Fasern bzw. der daraus resultierende Grad der Faservereinzelung einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Verbundbauteile ausüben. Für eine vollständige Konsolidierung der Bauteile ohne trockene Stellen sind hierzu möglichst kurze Fließwege der thermoplastischen Matrix erforderlich. Diese könnten bei einer höheren Faservereinzelung dementsprechend kürzer sein. Aus diesem Grund werden daher auch rCF-Hybridgarne mit zusätzlicher Faservoröffnung hergestellt, um den Einfluss der daraus resultierenden höheren Faservereinzelung auf die Verbundzugeigenschaften zu untersuchen.

Mit den durchgeführten Versuchen konnten wesentliche Krempelprozessparameter für eine anforderungsgerechte Vliesherstellung ermittelt werden. Damit können anschließend verschiedene Vliesvarianten für die Entwicklung von Streckenbändern bzw. Hybridgarne hergestellt werden.

5.3.5 Herstellung von Krempelbändern für die Weiterverarbeitung zu Streckenbändern

Zur Herstellung der verschiedenen Krempelbandvarianten für die anschließende Streckenbandherstellung werden je 12 g Fasermaterial (rCF und PA 6 im jeweiligen

Mischungsverhältnis) der Krempel vorgelegt. Anschließend werden die einzelnen Vliese manuell zu einem kontinuierlichen Krempelband zusammengesetzt. Dazu werden die Vliese direkt vor dem Streckprozess jeweils bis zur Mitte aufgeklappt (bei 380 mm Länge) und das nächste Vlies wird darin eingelegt, siehe Abbildung 5-16. Daraus ergibt sich eine endgültige Krempelbandfeinheit von ca. 26 ktex.

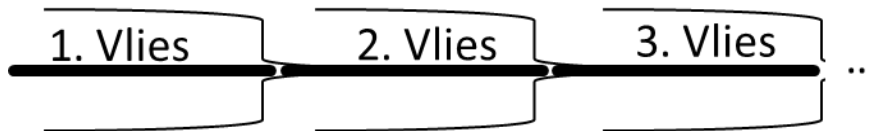


Abbildung 5-16: Schematische Darstellung der Krempelbandherstellung aus den einzelnen Vliesen

In Tabelle 5-5 sind die herzustellenden Krempelbandvarianten dargestellt, die anschließend zu Streckenbändern verarbeitet werden. Dabei wird der PA 6-Anteil stufenweise variiert (30, 50, 70 vol.-%), um dessen Einfluss auf die Hybridgareigenschaften zu untersuchen. Für die Herstellung der Krempelbänder werden die PA 6-Fasern mit kommerziell erhältlicher Schnittlänge von 40 mm (für 40 mm rCF-Eingangsfaserlänge) sowie 60 mm (für 60, 80 und 100 mm rCF-Eingangsfaserlänge) eingesetzt. Als Auswahlkriterium für diese konkreten Schnittlängen der PA 6-Fasern hat sich die jeweils resultierende mittlere Faserlänge (*ML*) der rCF nach dem Krempelprozess bewährt, nicht die wie bei Baumwolle sonst übliche Stapelfaserlänge ($\hat{=}$ *UHML*).

Tabelle 5-5: Hergestellte Krempelbandvarianten für die anschließende Weiterverarbeitung zu Streckenbändern

Krempelbandbezeichnung	Eingangsfaserlänge rCF [mm]	rCF-Variante	Voröffnung	Mischungsverhältnis rCF/PA 6 [vol.-%]
40-rCF-E-30	40	rCF-E	nein	30
40-rCF-E-50				50
40-rCF-E-70				70
60-rCF-E-30	60			30
60-rCF-E-50				50
60-rCF-E-70				70
80-rCF-E-50	80		ja	50
100-rCF-E-50	100			
40-rCF-E-V-50	40			
60-rCF-E-V-50	60			
80-rCF-E-V-50	80	nein	50	
100-rCF-E-V-50	100			
80-rCF-T-50	80			rCF-T
80-rCF-P-50		rCF-P		

5.4 Streckprozess

5.4.1 Modifikation der eingesetzten Strecke zur Spezialstrecke

Die Verarbeitung des Krempelbands zum Streckenband wird mittels Streckprozess umgesetzt. Dieser findet auf der Strecke RSB-D 40 V2 der Firma Rieter Ingolstadt GmbH (Ingolstadt, Deutschland) statt. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen durch die elektrisch leitfähigen rCF wurde zunächst die gesamte Elektronik der Strecke gekapselt. Außerdem wurde das Streckwerk der Strecke modifiziert, da die rCF im konventionellen Streckwerk stark geschädigt werden, siehe Kapitel 3.2.2. Das Ziel war daher, die Krafteinwirkung auf die rCF im Streckwerkssystem so weit wie möglich zu reduzieren und trotzdem eine sichere Klemmung zu gewährleisten. Damit sollte sowohl ein störungsfreier als auch faserschonender Verzugsvorgang umgesetzt werden. Realisiert wurde dies durch die Konstruktion und Fertigung neuer Streckwerks-Unterwalzen mit einer speziellen Nitril-Butadien-Kautschuk-(NBR-) Oberfläche, siehe Abbildung 5-17.

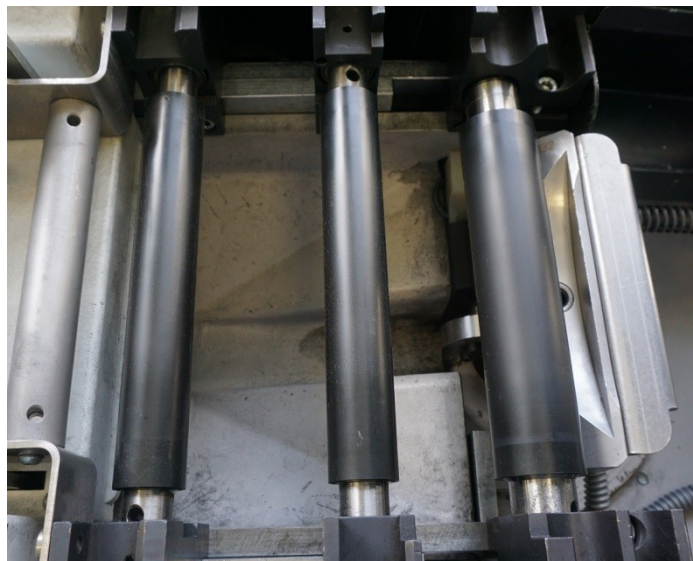


Abbildung 5-17: Im Streckwerk integrierte Unterwalzen mit NBR-Oberfläche

Diese ersetzen die bisherigen Stahlunterwalzen mit schräger Riffelung. Dadurch werden die rCF nicht mehr punktförmig geklemmt, sondern es entsteht eine deutlich breitere Klemmzone (= Flächenpressung). Durch diese verbreiterte Klemmzone und durch den im Vergleich zu glattem Stahl deutlich höheren Haftreibungskoeffizienten des NBR kann eine effektive Klemmung der rCF bei erheblich reduzierter Faserbelastung ermöglicht werden. Damit konnte die Fasereinkürzung deutlich reduziert werden.

Die Liefergeschwindigkeit der eingesetzten Strecke ließ sich zuvor mit einer Schrittweite von 50 m/min im Geschwindigkeitsbereich von 250 bis 1100 m/min einstellen. Aufgrund der bereits genannten Herausforderungen beim Verzugsvorgang

ist allerdings eine stufenlose Regelung der Liefergeschwindigkeit im Bereich von 10 bis 250 m/min unabdingbar. Dies wurde durch den Einsatz eines geeigneten Frequenzumrichters und Elektromotors sowie der Anpassung der Maschinensteuerung realisiert.

Mit konventionellen Spinnfasern (z. B. Baumwolle, Polyester) ist bereits eine sehr hohe Bandgleichmäßigkeit durch den zusätzlichen Einsatz einer Regulierungseinheit an der Strecke möglich. Die dafür eingesetzte mechanische Tastscheibe ist für die Verarbeitung der querkraftempfindlichen rCF allerdings in der jetzigen Form ungeeignet, da die rCF durch den hohen Anpressdruck der Tastscheibe stark eingekürzt werden. Hier treten Flächendrücke von ca. 40 N/mm² auf. Im Vergleich dazu beträgt der Druck im Streckwerk für eine geringe Faserschädigung der rCF ca. 10 N/mm². Eine Verringerung des Anpressdrucks ist an der Strecke aber bauarttechnisch nicht vorgesehen. Als zentraler Lösungsansatz war deshalb geplant, entsprechende Komponenten zur Reduzierung des Anpressdrucks zu entwickeln sowie notwendige Anpassungen in der Steuerungs- und Regelungstechnik vorzunehmen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die modifizierte Regulierungseinheit allerdings nicht mehr rechtzeitig eingesetzt werden. Zukünftig können deshalb vermutlich noch deutlich gleichmäßigere Bänder als hier vorgestellt entwickelt und umgesetzt werden.

5.4.2 Anforderungen an den Streckprozess

Folgende Anforderungen werden an den Streckprozess zur Verarbeitung der rCF und PA 6-Krempelbänder gestellt:

- Geringe Faserschädigung
- Hohe Faserorientierung in Längsrichtung
- Hohe Streckenbandgleichmäßigkeit

Durch den Verzug des Krempelbands soll die Faserorientierung und die Gleichmäßigkeit im anschließenden Streckenband drastisch erhöht werden. Wie auch beim Krempelprozess steht dabei eine möglichst geringe Faserschädigung der rCF im Fokus der Untersuchungen. Damit sollen sowohl hohe Garn- und Verbundkennwerte als auch ein gleichmäßiger Verzugsprozess realisiert werden. Eine starke Schädigung der Fasern führt hingegen zu Verzugsstörungen im Streckwerk, wodurch keine gleichmäßigen Streckenbänder bzw. Hybridgarne herstellbar sind.

5.4.3 Versuchsdurchführung

5.4.3.1 Versuchsplan

Ähnlich wie beim Krempelprozess ergeben sich zahlreiche Variationsmöglichkeiten bei den Maschinen- und Prozessparametern der Strecke zur Optimierung der Streckenbandqualität. In der hier vorliegenden Dissertationsschrift sind deshalb nur die wichtigsten Einflussmöglichkeiten bei der Verarbeitung der rCF auf der Strecke geschildert. Die restlichen Parameter werden als konstant angenommen und sind in Tabelle 5-6 dargestellt. Diese konkret eingestellten Werte beruhen dabei auf den bisherigen Erfahrungen bei der Verarbeitung von konventionellen Faserbändern bzw. richten sich nach den Vorgaben des Maschinenherstellers.

Tabelle 5-6: Eingestellte Maschinenparameter an der Spezialstrecke

Streckwerk	4 über 3	Liefargeschwindigkeit	50 m/min
Gesamtverzug	6,46	Oberwalzen	Shore: 83
Vorverzug	1,15	Unterwalzen	Shore: 90
Vliesführungsdüse	11,5 mm		

Bei den durchzuführenden Versuchen soll der Einfluss der Faserlänge der rCF-E mit den nachfolgend genannten Maschinen- und Prozessparametern untersucht werden:

- Streckwerksbelastung der Oberwalzen
- Feldweite
- Anzahl an Streckpassagen

In der Tabelle 5-7 ist der Versuchsplan für den Streckprozess dargestellt.

Tabelle 5-7: Versuchsplan der untersuchten Parametervariationen beim Streckprozess

Streckenbandbezeichnung	Eigenschaften der Krempelbandvorlage				Parametervariationen		
	Eingangsfaserlänge rCF [mm]	$UHML_{rCF}$ [mm]	ML_{rCF} [mm]	$(UH)ML_{PA 6}$ [mm]	Streckwerksbelastung [daN]	Feldweite VVD/HVD [mm]	Anzahl Streckpassagen
40-rCF-E-50	40	39,3	38,8	40,0	20	50/48	1; 2
60-rCF-E-50	60	57,3	50,3	60,0	20	67/65; 60/58; 70/68	1; 2
80-rCF-E-50	80	75,2	60,1	60,0	5; 10; 15; 20; 25; 30	85/83; 70/68	1; 2
100-rCF-E-50	100	86,3	58,3	60,0	20	90/90; 70/68	1; 2

Die Streckwerksbelastung an den Oberwalzen der Strecke ist stufenlos im Bereich von 0 bis 40 daN einstellbar. Für Baumwolle und Chemiefasern wird eine Walzenbelastung von 32 bis 38 daN empfohlen [178].

Bei der Verstreckung von Faserbändern aus Baumwolle wird die Feldweite bei Nutzung des Fibrographs bzw. des HVI zur Faserlängenmessung nach der *UHML* ($\hat{=}$ Stapelfaserlänge) eingestellt, zuzüglich eines Wertes von 10 bis 15 mm bei der Vorverzugsdistanz (VVD) und 8 bis 10 mm bei der Hauptverzugsdistanz (HVD). Bei Fasermischungen wird sich nach der jeweils längeren Faserkomponente gerichtet [178]. Da sich aber die jeweiligen Stapelfaserlängen von rCF und PA 6 teilweise erheblich unterscheiden, wird daher neben diesen beiden Werten auch die mittlere Länge der rCF (ML_{rCF}) als Basiswert für die Einstellung der Feldweite herangezogen. Dadurch resultieren im konkreten Fall allerdings teilweise ähnliche Feldweiten, weshalb die Versuchsanzahl entsprechend reduziert wurde.

Abschließend wird untersucht, inwieweit sich eine zusätzliche Streckwerkspassage, also eine erneute Verstreckung der Streckenbänder, auf die Bandqualität auswirkt. Da die Regulierungseinheit nicht genutzt werden kann, ist eine Vergleichmäßigung der Streckenbänder nur durch Doublierung mehrerer Streckenbänder möglich. Dabei können prinzipiell zwei bis acht Streckenbänder zu einem neuen Streckenband verarbeitet werden, wodurch sich Dick- und Dünnstellen durch deren statistische Verteilung in den Bändern ausgleichen. Im konkreten Fall werden in der zweiten Streckpassage sechs Streckenbänder doubliert, dies entspricht bei dem gewählten Hauptverzug von 6,46 näherungsweise wieder der gleichen Bandfeinheit eines ursprünglichen Streckenbands.

5.4.3.2 Herstellung der Streckenbänder

Das manuell zusammengefügte Krempelband wird in die Strecke eingelegt, verstreckt und zum Schluss in die Streckenbandkanne abgelegt. Die Feinheit der Streckenbänder beträgt dabei ca. 4200 tex. In Abbildung 5-18 ist der Streckprozess exemplarisch dargestellt.



Abbildung 5-18: Zuführung des Krempelbands zum Streckwerk (links), Einzug des verstreckten Bands in die Vliesführungsdüse (Mitte) und in einer Kanne abgelegtes Streckenband (rechts)

Nach der Herstellung der einzelnen Streckenbänder mit den unterschiedlichen Parametern erfolgt die Prüfung der Faserlänge der rCF, der Faserorientierung und der Bandgleichmäßigkeit. Die entsprechende Prüftechnik ist in Kapitel 4 erläutert. Für eine möglichst präzise Bestimmung der Faserlängen der rCF werden die

hergestellten Streckenbänder zunächst pyrolysiert, um eine Beeinflussung der Faserlängenmessung durch die PA 6-Fasern zu vermeiden.

5.4.4 Prüfergebnisse

5.4.4.1 Einfluss der Streckwerksbelastung und der Anzahl an Streckwerkspassagen auf die Faserschädigung der rCF

Die auftretende Faserschädigung der rCF bei unterschiedlicher Streckwerksbelastung wird zunächst exemplarisch an der Variante 80-rCF-E-50 untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-19 (a) dargestellt.

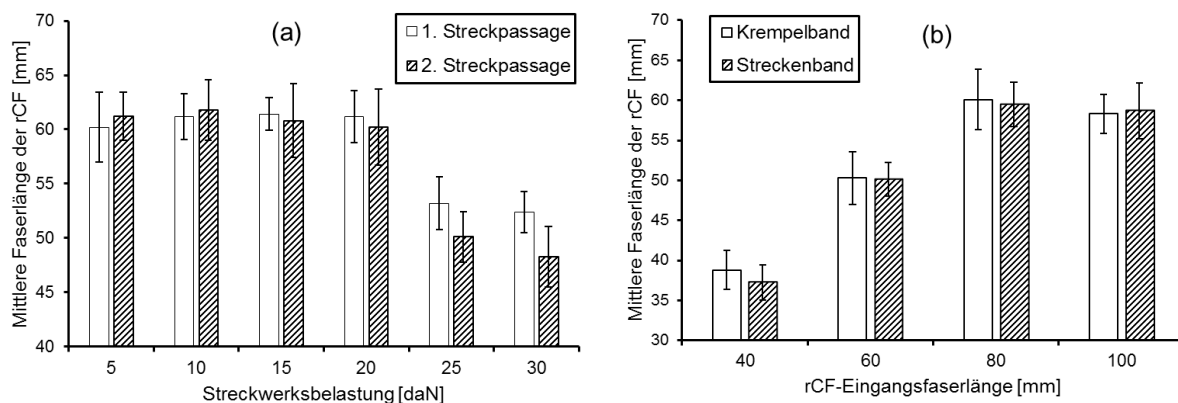


Abbildung 5-19: Mittlere Faserlänge des Streckenbands (80-rCF-E-50) mit 80 mm rCF-Eingangsfaserlänge nach dem Streckprozess bei unterschiedlicher Streckwerksbelastung und ein bzw. zwei Streckpassagen (a) sowie mittlere Faserlänge der Krempel- und Streckenbänder bei einer Streckwerksbelastung von 20 daN und unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen (b)

Aus den Ergebnissen in Abbildung 5-19 (a) ist ersichtlich, dass eine Streckwerksbelastung bis 20 daN keine wesentliche zusätzliche Schädigung der rCF verursacht. Die Einkürzung der rCF-Eingangsfaserlänge von 80 mm auf ca. 60 mm mittlere Faserlänge ist somit nur auf den zuvor durchgeführten Krempelprozess zurückzuführen. Wird die Streckwerksbelastung allerdings weiter erhöht, werden die querkraftempfindlichen Fasern deutlich geschädigt. Dieser Effekt verstärkt sich bei der zweiten Streckwerkspassage.

Nach diesen Untersuchungen werden auch die Krempelbänder mit den 40, 60 und 100 mm rCF-Eingangsfaserlängen bei 20 daN Streckwerksbelastung verstreckt und geprüft, siehe Abbildung 5-19 (b). Dabei zeigt der Vergleich mit den zuvor geprüften Vliesen bzw. Krempelbändern, dass eine Schädigung der rCF im Streckprozess weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Deshalb wird für die nachfolgenden Versuche eine einheitliche Streckwerksbelastung von 20 daN eingestellt. Damit wird die vergleichsweise höchste Klemmung der rCF gewährleistet, um ein Rutschen der Fasern im Verzugsprozess möglichst zu vermeiden.

5.4.4.2 Einfluss der Feldweite auf die Streckenbandgleichmäßigkeit

In Tabelle 5-8 ist der Einfluss der Feldweite auf die erzielbare Streckenbandgleichmäßigkeit nach einer Streckwerkspassage dargestellt.

Tabelle 5-8: Einfluss der Feldweite auf die Streckenbandgleichmäßigkeit

Einlaufende Krempelbandfeinheit [tex]	Streckenbandbezeichnung	Basiswert für Feldweite	Feldweite VVD/HVD [mm]	Auslaufende Streckenbandfeinheit [tex]	Streckenbandgleichmäßigkeit CV_m [%]
ca. 26.000	40-rCF-E-50	$(UH)ML_{PA\ 6}$	50/48	4185	8,2
	60-rCF-E-50	$UHML_{rCF}$	67/65	4127	8,0
		ML_{rCF}	60/58	Nicht verstreckbar	
		$(UH)ML_{PA\ 6}$	70/68	4155	7,8
	80-rCF-E-50	$UHML_{rCF}$	85/83	4389	11,2
		$(UH)ML_{PA\ 6}$	70/68	4227	8,9
	100-rCF-E-50	$UHML_{rCF}$	90/90	4217	13,8
		$(UH)ML_{PA\ 6}$	70/68	4287	9,2

Aus der Tabelle ist erkennbar, dass die Krempelbandvariante 60-rCF-E-50 bei einer eingestellten Feldweite von 60/58 mm nicht verstreckt werden kann, da zu viele Fasern von zwei Walzenpaaren gleichzeitig geklemmt werden. Bei einer Einstellung der Feldweite auf Basis der $UHML_{rCF}$ nimmt die Bandgleichmäßigkeit insbesondere bei den 80- und 100-rCF-E-50 deutlich ab, was auf eine hohe Anzahl an schwimmenden Fasern zurückgeführt wird. Zudem nimmt die Bandgleichmäßigkeit insgesamt bei steigender rCF-Eingangsfaserlänge tendenziell ab, was auf die breitere Faserlängenverteilung der rCF durch den Krempelprozess zurückgeführt wird. Als optimaler Basiswert für die Einstellung der Feldweite hat sich die Schnittlänge der PA 6-Fasern ($\hat{=} (UH)ML_{PA\ 6}$) herausgestellt. Die dabei eigentlich zu erwartenden Verzugsstörungen bei den rCF mit 80 und 100 mm Eingangsfaserlänge traten in der Praxis nicht auf, obwohl diese Fasern aufgrund ihrer teilweise deutlich höheren Faserlängen häufig zwischen zwei Walzenpaaren eingeklemmt sein müssten. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass die rCF aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit und ihrer glatten Oberfläche sowie der fehlenden Unterwalzenriffelung relativ gleichmäßig aus der Klemmung herausgezogen werden, ohne dabei andere Fasern mitzureißen. Es sei auch darauf hingewiesen, dass die Streckenband- bzw. die daraus resultierende Hybridgarngleichmäßigkeit durch den Einsatz einer leistungsfähigeren Technikumskrempel nochmals gesteigert werden konnte (siehe Kapitel 5.6), was auf die direkte kontinuierliche Krempelbandherstellung zurückzuführen ist (= höhere Krempelbandgleichmäßigkeit).

5.4.4.3 Einfluss der Streckwerkspassagen bzw. Doublierung auf die Bandgleichmäßigkeit und die Faserorientierung

In Abbildung 5-20 ist der Einfluss einer zweiten Streckpassage auf die resultierende Faserorientierung (a) und die Streckenbandgleichmäßigkeit (b) dargestellt.

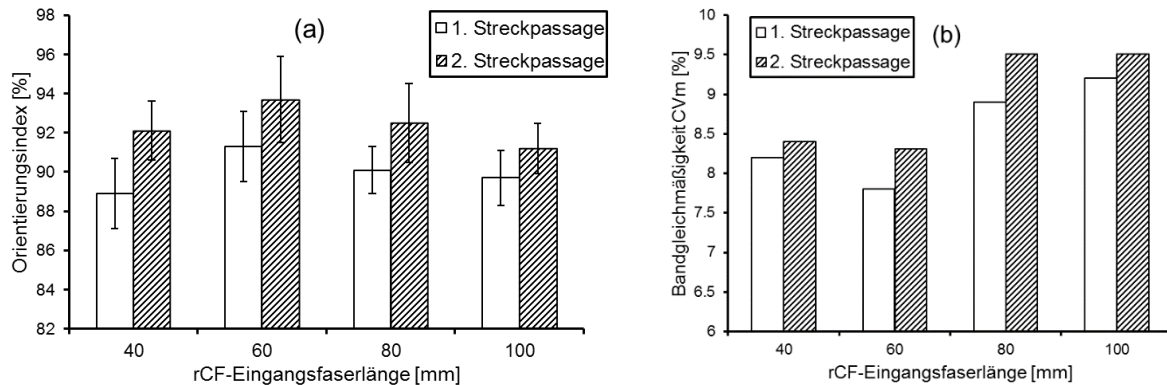


Abbildung 5-20: Faserorientierung (a) und Streckenbandgleichmäßigkeit (b) bei ein bzw. zwei Streckpassagen und unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Daraus ist zu erkennen, dass sich die Faserorientierung trotz eines erneuten Verzugs nur noch geringfügig erhöht, was auf eine bereits hohe Orientierung nach der ersten Streckpassage hindeutet. Gleichzeitig nimmt die Bandgleichmäßigkeit trotz der zusätzlichen Banddoublierung geringfügig ab. Die wesentliche Ursache hierfür wird in der zunehmenden Längsorientierung und „Begradigung“ der Fasern vermutet. Dadurch sinkt die Faser-Faser-Reibung im Band, was wiederum zu Verzugsstörungen führen kann [129]. So ist auch bei konventionellen Spinnfasern bekannt, dass sich die Bandgleichmäßigkeit bei mehr als zwei Streckpassagen teilweise wieder verringert [98]. Dieser Effekt könnte bei den glatten und ungekräuselten rCF bereits bei mehr als einer Streckpassage auftreten, da diese dann bereits relativ stark orientiert und ausgerichtet sind. Aufgrund dieser Ergebnisse wird bei der Herstellung der rCF-Hybridgarne im Rahmen dieser Arbeit auf eine zweite Streckpassage verzichtet.

5.4.5 Herstellung von Streckenbändern für die Weiterverarbeitung zu rCF-Hybridgarnen

In Tabelle 5-9 sind die hergestellten Streckenband-Varianten für die anschließende Weiterverarbeitung zu den rCF-Hybridgarnen dargestellt.

Tabelle 5-9: Hergestellte Streckenbandvarianten für die anschließende Weiterverarbeitung zu rCF-Hybridgarnen

Streckenband-bezeichnung	Eingangsfaserlänge rCF [mm]	rCF-Variante	Voröffnung	Mischungsverhältnis rCF/PA 6 [vol.-%]
40-rCF-E-30	40	rCF-E	nein	30
40-rCF-E-50				50
40-rCF-E-70				70
60-rCF-E-30	60			30
60-rCF-E-50				50
60-rCF-E-70				70
80-rCF-E-50	80		ja	50
100-rCF-E-50	100			
40-rCF-E-V-50	40			
60-rCF-E-V-50	60			
80-rCF-E-V-50	80			
100-rCF-E-V-50	100			
80-rCF-T-50	80	rCF-T	nein	
80-rCF-P-50		rCF-P		

5.5 Spinnprozess

5.5.1 Modifikation des eingesetzten Flyers zum Spezialflyer

Nach der Herstellung der Streckenbänder erfolgt die Entwicklung und Umsetzung der rCF-Hybridgarne. Dazu werden die jeweiligen Streckenbänder auf die endgültige Garnfeinheit verstreckt und mittels Verdrehung verfestigt, um die notwendige Garnfestigkeit für die anschließende Weiterverarbeitung zu erzeugen. Im Kapitel 3.2.3 wurden mehrere Spinnverfahren vorgestellt, die dafür prinzipiell geeignet sind. Nachfolgend wird sich in dieser Dissertationsschrift auf die Herstellung der Hybridgarne mittels Flyer F15 der Firma Rieter AG (Winterthur, Schweiz) fokussiert.

Wie auch an der Strecke sind die am Flyer verwendeten Streckwerke mit geriffelten Unterwalzen aus Stahl für die querkraftempfindlichen rCF ungeeignet. Deshalb wurde ein spezieller Gummibelag auf die Unterwalzen aufgezogen, um die Riffelung und somit die Faserschädigung der rCF möglichst zu minimieren, siehe Abbildung 5-21. Darüber hinaus wurde die gesamte Elektronik des Flyers gekapselt und die aktive Frischluftkühlung der Elektronikkomponenten durch eine passive Kühlung ersetzt. Dadurch kann ein Eindringen der elektrisch leitfähigen rCF vermieden werden.

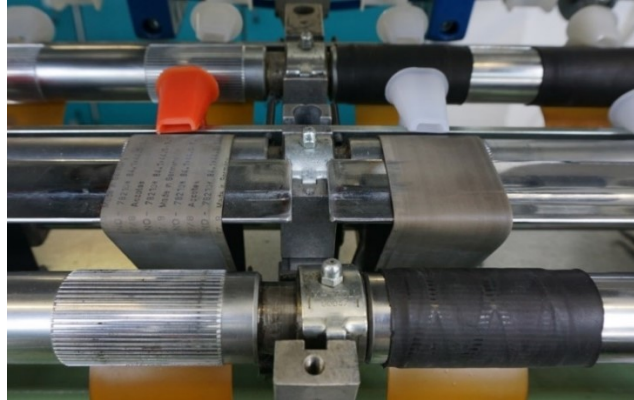


Abbildung 5-21: Streckwerk mit geriffelten (linke Seite) und mit gummierten Unterwalzen (rechte Seite) am Flyer F15

5.5.2 Anforderungen an den Spinnprozess

Folgende Anforderungen werden an den Spinnprozess zur Verarbeitung der rCF und PA 6-Fasern gestellt:

- Geringe Faserschädigung
- Hohe Faserorientierung in Längsrichtung
- Ausreichende Hybridgarngleichmäßigkeit und -festigkeit

Wie auch beim Krempel- und Streckprozess steht eine minimale Faserschädigung im Fokus der Untersuchungen. Dadurch soll die gegebene Faserlängenverteilung der rCF nicht weiter verbreitert werden, um anschließend eine möglichst hohe Hybridgarngleichmäßigkeit zu erzielen. Wesentlich für eine kontinuierliche Weiterverarbeitbarkeit der rCF-Hybridgarne, z. B. auf der Web- oder Wickelmaschine, ist zudem eine ausreichende Garnfestigkeit. Dazu sollte u. a. die Faserorientierung in Längsrichtung möglichst hoch sein.

5.5.3 Versuchsdurchführung

5.5.3.1 Versuchsplan

In dieser Dissertationsschrift sind nachfolgend nur die Untersuchungen zur Variation der Garndrehung geschildert. Die restlichen Parameter werden als konstant angesehen und sind in Tabelle 5-10 dargestellt. Die konkret eingestellten Werte beruhen dabei auf den bisherigen Erfahrungen bei der Verspinnung von konventionellen Fasern, den Vorgaben des Maschinenherstellers sowie den Ergebnissen aus dem Streckprozess in Kapitel 5.4. So werden die Einstellwerte der Streckwerksbelastung direkt vom Streckprozess übernommen. Da sich die Streckwerke des Flyers und der Strecke allerdings im Aufbau unterscheiden, variieren die konkreten Einstellwerte der Feldweite je nach Vorgabe des Herstellers [179]. Als Basiswert hat sich jedoch auch hier die Schnittlänge bzw. die $(UH)ML_{PA\ 6}$ der PA 6-Fasern bewährt. Damit konnte ein gleichmäßiger Verzugprozess ermöglicht werden.

Tabelle 5-10: Einstellungen der Maschinenparameter am Spezialflyer

Flügeldrehzahl	800 U/min	Streckwerksbelastung	20 daN
Liefargeschwindigkeit	8 m/min	Flügelkronenprofilierung	Glatt
Gesamtverzug	5,02	Feldweite VVD/HVD	(UH)ML _{PA 6} als Basiswert; 40 mm PA 6 :62/48 60 mm PA 6: 82/74

Die Hybridgarne werden im Rahmen der Versuche mit unterschiedlichen Eingangsfaserlängen, rCF-Anteilen und Garndrehungen ausgesponnen. Dazu wird sich nachfolgend auf die ausführliche Darstellung der Ergebnisse mit den rCF-E-Eingangsfaserlängen 40 mm und 60 mm beschränkt, um die grundlegenden Zusammenhänge zu erläutern. Auch mit den anderen rCF-Varianten und -Eingangsfaserlängen konnten Hybridgarne mit ausreichender Gleichmäßigkeit und Festigkeit umgesetzt werden.

In der Tabelle 5-11 ist der Versuchsplan für den Spinnprozess dargestellt.

Tabelle 5-11: Versuchsplan der untersuchten Parametervariationen beim Spinnprozess

Hybridgarnbezeichnung	Eigenschaften der Streckenbandvorlage			Parametervariation	
	Eingangsfaserlänge rCF/PA 6 [mm]	rCF-Variante	Mischungsverhältnis rCF/PA 6 [vol.-%]	Garndrehung [T/m]	
40-rCF-E-30-90	40	rCF-E	30	90	
40-rCF-E-30-100				100	
40-rCF-E-30-120				120	
40-rCF-E-50-90			50	90	
40-rCF-E-50-100				100	
40-rCF-E-50-120				120	
40-rCF-E-70-90			70	90	
40-rCF-E-70-100				100	
40-rCF-E-70-120				120	
60-rCF-E-30-90	60		rCF-E	30	90
60-rCF-E-30-100					100
60-rCF-E-30-120					120
60-rCF-E-50-90				50	90
60-rCF-E-50-100					100
60-rCF-E-50-120					120
60-rCF-E-70-90				70	90
60-rCF-E-70-100					100
60-rCF-E-70-120					120

5.5.3.2 Herstellung der Hybridgarne

Zur Herstellung der Hybridgarne wird das entsprechende Streckenband dem Flyer zugeführt, im Streckwerk verstreckt und anschließend durch Drehung des Flügels und der Spindel verdreht. Das ausgesponnene Garn mit einer Feinheit von ca. 800 tex wird auf der Flyerhülse aufgewickelt. In Abbildung 5-22 ist die Hybridgarnvariante 60-rCF-E-30-90 exemplarisch dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass relativ gleichmäßige rCF-Hybridgarne mit geringer Haarigkeit ausgesponnen werden können.

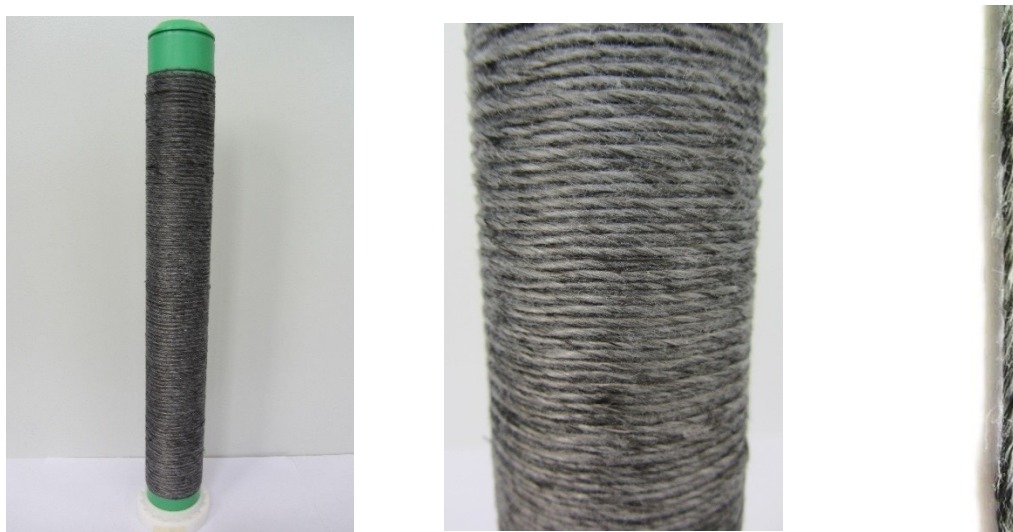


Abbildung 5-22: rCF-Hybridgarn der Variante 60-rCF-E-30-90 mit Detailaufnahmen

Nach der Herstellung der einzelnen Hybridgarne mit den unterschiedlichen Parametern erfolgt die Prüfung der rCF-Faserlänge, der Garnleichmäßigkeit, der Faserorientierung, der Zugeigenschaften und der Faserverteilung im Garnquerschnitt. Die entsprechende Prüftechnik ist in Kapitel 4 dargestellt. Zur Prüfung der Faserlänge und der Faserorientierung der rCF werden die Garne zunächst vorsichtig manuell aufgedreht sowie die PA 6-Fasern mittels Pyrolyseprozess entfernt.

5.5.4 Prüfergebnisse

5.5.4.1 Prüfung der Faserlänge, Gleichmäßigkeit und Faserorientierung der Hybridgarne

In Tabelle 5-12 sind die Ergebnisse der Prüfung der Faserlänge, der Garnleichmäßigkeit und der Faserorientierung dargestellt. Dabei wird nachfolgend nur auf die Prüfergebnisse von den Hybridgarnen mit der höchsten Garndrehung (120 T/m) eingegangen. Bei dieser Drehung wirken die höchsten Querkräfte auf die rCF im Garnkern, wodurch die größte Faserschädigung zu erwarten ist.

Tabelle 5-12: Geprüfte Faserlänge und Faserorientierung der rCF im Hybridgarn und Garnleichmäßigkeit

Einlaufende Streckenbandfeinheit [tex]	Garnbezeichnung	ML_{rCF} vor Verspinnung [mm]	Auslaufende Hybridgarnfeinheit [tex]	ML_{rCF} nach Verspinnung [mm]	Orientierungsindex [%]	Garnleichmäßigkeit CV_m [%]
4241	40-rCF-E-30-120	37,8 ± 2,6	765	34,4 ± 2,4	98,3 ± 0,4	8,2
4185	40-rCF-E-50-120	38,8 ± 3,2	742	35,1 ± 2,7	99,0 ± 0,5	8,4
4171	40-rCF-E-70-120	37,5 ± 2,8	769	35,6 ± 2,0	98,9 ± 0,5	8,6
4261	60-rCF-E-30-120	49,5 ± 2,7	784	48,4 ± 2,4	99,6 ± 0,2	7,9
4155	60-rCF-E-50-120	50,3 ± 3,0	782	47,2 ± 2,8	99,7 ± 0,1	8,4
4205	60-rCF-E-70-120	48,6 ± 3,2	740	48,1 ± 1,7	99,1 ± 0,1	8,2

Wie aus den Ergebnissen der Faserlängenmessung (ML_{rCF} vor und nach der Verspinnung) zu erkennen ist, werden die rCF durch den Spinnprozess kaum geschädigt. Dies ist sowohl auf die durchgeführten Maschinenmodifikationen als auch auf den eingestellten maximalen Drehungswert (120 T/m) zurückzuführen. Bei diesem sind die auftretenden Querkräfte im Garn scheinbar noch nicht groß genug, um die rCF signifikant zu schädigen. Gleichzeitig zeigt der ermittelte CV_m -Wert bei allen Hybridgarnvarianten eine maximale Abweichung von kleiner 10 %, was als ausreichend für eine anschließende Weiterverarbeitung bewertet wird. Auch die nahezu vollständige Faserorientierung der rCF in Längsrichtung konnte in den jeweiligen Hybridgarnen nachgewiesen werden. Aus dieser relativ hohen Gleichmäßigkeit und Faserorientierung resultiert vermutlich ebenfalls eine hohe Garnzugfestigkeit, deren Prüfergebnisse nachfolgend dargestellt sind.

5.5.4.2 Prüfung der Zugeigenschaften der Hybridgarne

In Abbildung 5-23 sind die geprüften Garnzugeigenschaften mit 40 mm und 60 mm rCF-E in Abhängigkeit des rCF-Anteils und der Drehung dargestellt.

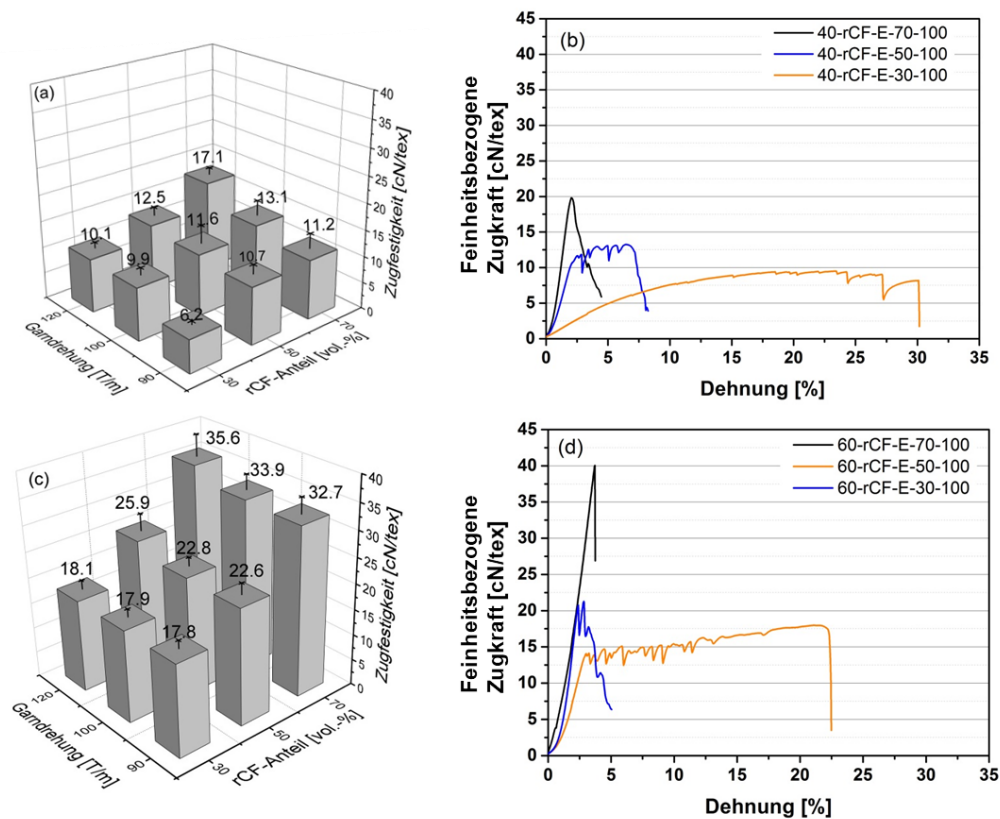


Abbildung 5-23: Zugfestigkeit der Hybridgarne in Abhängigkeit der Garn Drehung und des rCF-Anteils bzw. Kraft-Dehnungs-Kurven von ausgewählten Hybridgarne bei 100 T/m mit Eingangsfaserlängen von 40 mm (a) bzw. (b) und 60 mm (c) bzw. (d)

Zunächst kann aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitet werden, dass alle untersuchten Hybridgarnvarianten über eine ausreichende Zugfestigkeit für die anschließende Weiterverarbeitung verfügen. Diese sollte dafür mindestens 3 cN/tex betragen [94].

Dabei steigt die Garnfestigkeit deutlich mit dem Anstieg des rCF-Anteils. Zum Beispiel erhöht sich die Garnfestigkeit um ca. 69 % bei 40 mm bzw. ca. 97 % bei 60 mm bei einer Erhöhung des rCF-Volumenanteils von 30 % auf 70 %. Gleichzeitig kann die Garnfestigkeit durch Variation der Drehung beeinflusst werden. Durch die Erhöhung der Drehung von 90 T/m auf 120 T/m bei der Variante 60-rCF-E-70 steigt die Garnfestigkeit um 8,7 % von 32,7 auf 35,6 cN/tex. Auch die Faserlänge spielt eine wesentliche Rolle. Die hergestellten Hybridgarne mit 60 mm Eingangsfaserlänge weisen eine deutlich höhere Garnfestigkeit als die 40 mm auf, was auf die wesentlich längere Einbindungslänge der rCF und PA 6-Fasern zurückzuführen ist.

Die charakteristischen Kraft-Dehnungs-Kurven von ausgewählten Garnen mit 40 mm und 60 mm Faserlänge bei 100 T/m sind ebenfalls in Abbildung 5-23 dargestellt. Dabei weisen die Hybridgarne mit geringem rCF-Anteil eine deutlich höhere Dehnung bei gleichzeitig geringerer Garnfestigkeit auf. Daraus wird geschlossen, dass die

Fasern in den Hybridgarnen mit 30 und 50 vol.-% rCF-Anteil nicht vollständig zerreißen, sondern schrittweise an verschiedenen Stellen ausgezogen werden. Im Gegensatz dazu stellt sich bei den 70 vol.-% rCF-Anteil ein Spröbruch durch vollständigen Faserbruch ein.

5.5.4.3 Prüfung der Faserverteilung im Garnquerschnitt

Die Analyse des Hybridgarnquerschnitts wird nachfolgend anhand der Garnvariante 40-rCF-E-50-120 exemplarisch erläutert. Deren charakteristische Merkmale lassen sich auch bei den anderen untersuchten Hybridgarnvarianten nachweisen. In der zugehörigen Abbildung 5-24 (a) sind weiß-reflektierende rCF und grau-reflektierende PA 6-Fasern erkennbar. Die rCF weisen einen eher nierenförmigen Querschnitt auf, die PA 6-Fasern sind hingegen rund- und dreiecksförmig. Dabei kann zunächst bestätigt werden, dass beide Faserkomponenten hochgradig durchgemischt und verteilt im Hybridgarn vorliegen. Durch geeignete Bildbearbeitung können die rCF und PA 6-Fasern anschließend einzeln hervorgehoben werden, um deren genauere Verteilung zu analysieren, siehe Abbildung 5-24 (b) und (c).

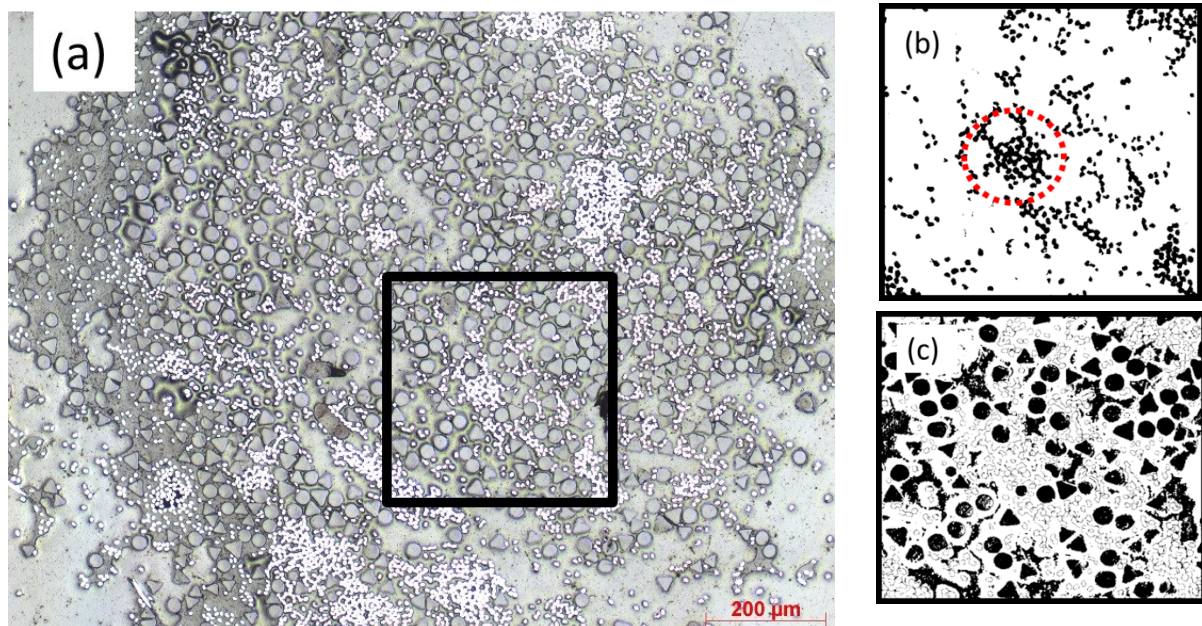


Abbildung 5-24: Garnquerschnitt des Hybridgarns 40-rCF-E-50-120 im Mikroskop (a), mittels Bildbearbeitung schwarz hervorgehobene rCF (b) und PA 6-Fasern (c) im eingezeichneten Quadrat; in (b) ist ein rCF-Bündel aus ca. 57 Einzelfasern rot hervorgehoben

Wie in Abbildung 5-24 (c) zu erkennen, liegen die PA 6-Fasern nahezu vollständig vereinzelt vor, während die rCF (b) noch teilweise in Bündeln formiert sind. Bei dieser Bündelformierung sind insbesondere die jeweilige Anzahl an enthaltenen Einzelfasern sowie deren Anteil an der Gesamtfasermenge von Bedeutung, die mittels Bildanalysemethoden quantifiziert werden kann. Beide Ergebnisse sind in Abbildung 5-25 dargestellt.

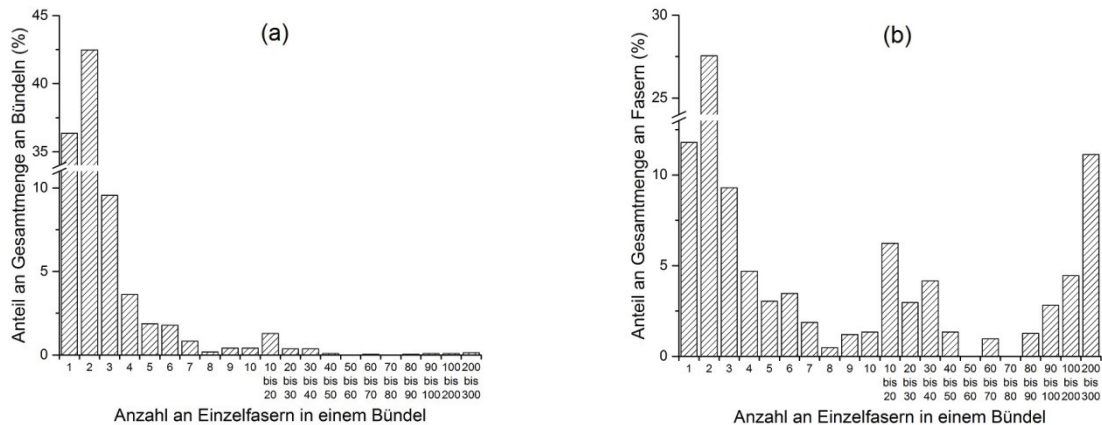


Abbildung 5-25: Histogramm mit der Anzahl an Einzelfasern je Bündel bezogen auf den prozentualen Anteil an der Gesamtmenge an rCF-Bündeln (a) bzw. Fasern (b) im Hybridgarnquerschnitt

Aus dem Diagramm in Abbildung 5-25 (a) ist erkennbar, dass im Hybridgarn im Wesentlichen vereinzelt rCF sowie rCF-Bündel aus jeweils zwei Einzelfasern mit einem Gesamtanteil von zusammen 78,8 % vorliegen. Daraus wird geschlossen, dass die rCF trotz der schonenden Verarbeitung immer noch sehr stark im Prozess geöffnet werden und damit eine relativ gleichmäßige Hybridgarnherstellung realisiert werden kann.

Wird allerdings zusätzlich das Diagramm in Abbildung 5-25 (b) herangezogen, wird deutlich, dass trotz der vergleichsweise geringen Menge von rCF-Bündeln mit mehr als zwei Einzelfasern (21,2 %) diese 60,7 % der Gesamtfasermenge enthalten. So enthalten z. B. nur die drei Bündel mit der größten Anzahl an Einzelfasern (200 bis 300 Stück) bereits 11,1 % der Gesamtmenge an rCF. Die daraus resultierenden höheren Durchmesser der rCF-Bündel könnten auch das vergleichsweise gute Verzugs- und Spinnverhalten in Zusammenspiel mit der vorliegenden PA 6-Faserfeinheit erklären. Wie bereits in Kapitel 3.3.5 dargestellt, sollte der Durchmesser von zwei Faserkomponenten in einem Garn möglichst ähnlich für eine hohe Garnleichmäßigkeit sein. Für vollständig vereinzelt rCF (ca. 7 µm Durchmesser) wäre demnach eine PA 6-Feinheit von ca. 0,4 dtex; für rCF-Bündel die jeweils aus zwei Einzelfasern bestehen würden (ca. 14 µm Durchmesser) eine Feinheit von ca. 1,7 dtex am geeignetsten. Vermutlich verbessern aber die verwendeten PA 6-Fasern mit einer Feinheit von 3,3 dtex das Spinn- und Verzugsverhalten der rCF-Bündel mit mehr als zwei Einzelfasern, die den Großteil der Gesamtfasermenge ausmachen. Dies würde auch die bereits erwähnte Verringerung der Hybridgarnleichmäßigkeit bei der Verwendung von Modal-Mikrofasern (Feinheit: 0,3 dtex) und Polyester-Mikrofasern (Feinheit: 1,7 dtex) bei Voruntersuchungen erklären.

5.6 Zusammenfassende Betrachtung und aktueller Entwicklungsstand

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnten anforderungsgerechte rCF-Hybridgarne mit erheblich verringerter Faserschädigung entwickelt und umgesetzt werden. Die Ergebnisse dieser Entwicklungsarbeiten wurden umfassend in nationalen und internationalen Zeitschriften und auf Konferenzen veröffentlicht ([35], [180]-[212]) und waren ebenfalls zentraler Gegenstand des DFG-Projekts CH 174/34-1. Die entwickelte Prozesskette und das rCF-Hybridgarn sind in den Abbildungen 5-26 und 5-27 abschließend dargestellt.

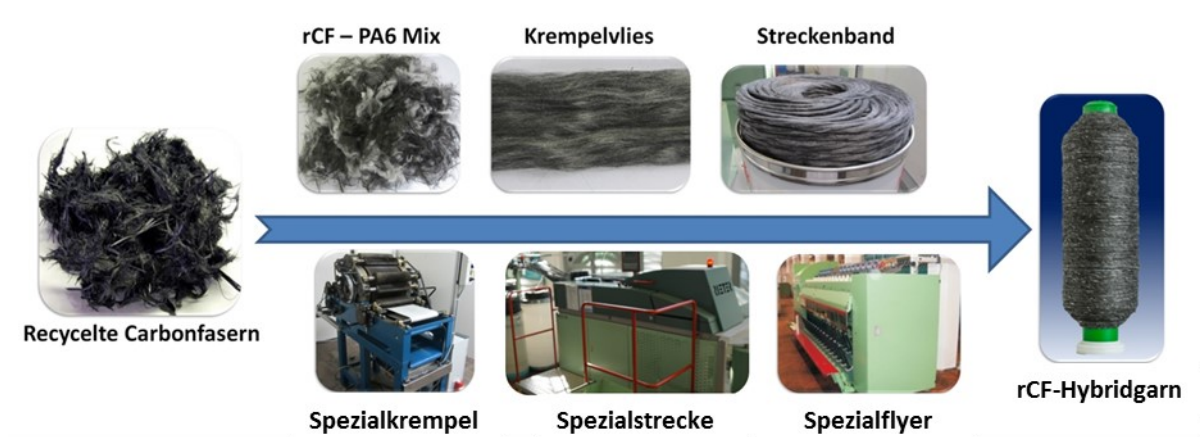


Abbildung 5-26: Prozesskette zur Entwicklung des rCF-Hybridgarns



Abbildung 5-27: Entwickeltes rCF-Hybridgarn

In der Zwischenzeit wurden auch an anderen Instituten rCF-Hybridgarne entwickelt, so z. B. am DITF Denkendorf im Rahmen der Forschungsprojekte IGF 17107 N/1, DBU AZ29910-1 und -2 und BMBF InTekS VP2088343TA4. Diese rCF-Hybridgarne wurden anschließend zu verschiedenen CFK-Bauteilen verarbeitet, u. a. dargestellt in [213]-[214]. Auch das STFI und die Universität Leeds entwickelten Hybridgarne aus rCF und PA 6- oder PP-Fasern [215]-[216]. Zudem konnte in [217] der Nachweis erbracht werden, dass diese CFK-Bauteile aufgrund der enthaltenen rCF über ein hohes plastisches Umformvermögen bei Erwärmung der PA 6-Matrix auf Schmelztemperatur verfügen, was das enorm hohe Potential der rCF-Hybridgarne für zukünftige Anwendungen im Leichtbau unterstreicht.

Die entwickelte Prozesskette konnte mittlerweile auch im Rahmen des BMBF-Projekts „3DProCar“ am ITM in den Technikumsmaßstab transferiert werden [181]. Als Kernstück gilt dabei die vom Anlagenbauer Oskar Dilo Maschinenfabrik KG in Zusammenarbeit mit dem ITM eigens entwickelte Spezialkrepelanlage, mit der die rCF und PA 6-Fasern erstmals schonend zu einem kontinuierlichen Krepelband verarbeitet werden konnten. Diese Spezialkrepelanlage wird inzwischen als Technikumsanlage am ITM eingesetzt und ist in Abbildung 5-28 dargestellt.



Abbildung 5-28: Am ITM installierte Spezialkrepelanlage; Links im Vordergrund: Faseröffner und Krepelspeiser; Mitte: Spezialkrepel; Rechts: Bandtransporteinrichtung und Kannenstock

Der Durchsatz dieser Anlage beträgt ca. 10 kg Krepelband pro Stunde, womit dieser im Vergleich zur Laborkrepel um das ca. 100-fache gesteigert werden konnte. Gleichzeitig wurde die Hybridgarngleichmäßigkeit deutlich verbessert ($CV_m = 4,3 \%$ im Vergleich zu ca. $8,5 \%$ im Labormaßstab) und die Produktivität des gesamten Garnherstellungsprozesses massiv gesteigert. Damit wurde ein weiterer wichtiger Meilenstein für die zukünftige Fertigung der rCF-Hybridgarne im Industriemaßstab erreicht. Für diese Entwicklungsarbeiten wurde das ITM gemeinsam mit dem Anlagenbauer Dilo mit dem Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2016 des BMWi ausgezeichnet.

6 Experimentelle Ermittlung der Verbundzugkennwerte und Entwicklung eines analytischen Modells zu deren Vorhersage

6.1 Vorbetrachtung

Zur experimentellen Bestimmung der Verbundzugkennwerte (Zugfestigkeit und -modul) werden die entwickelten rCF-Hybridgarne zunächst mittels Wickeltechnik zu UD-Halbzeugen verarbeitet und in einer Laborpresse durch Aufschmelzen und Abkühlen der integrierten PA 6-Fasern zu Verbundplatten konsolidiert. Anschließend werden daraus Verbundprüfkörper für die Zugprüfung zugeschnitten und diese nach der entsprechenden Norm geprüft. Zusätzlich wird ein analytisches Modell entwickelt, um die experimentell bestimmten Kennwerte näherungsweise vorhersagen zu können.

6.2 Herstellung der Verbundprüfkörper

Das Wickeln der Hybridgarne erfolgt mittels Wickelmaschine FW 122 der Firma IWT Industrielle Wickeltechnik GmbH (Erlangen, Deutschland). Die Innenmaße des Rahmens betragen 274 mm x 274 mm. Die Tabelle 6-1 gibt einen Überblick zu den hergestellten Verbundprüfkörpern. Zusätzlich werden zwei Referenzprüfkörper-Varianten aus Carbon-Filamentgarn und PA 6-Fasern hergestellt, um die erzielbaren Verbundkennwerte miteinander vergleichen zu können. Für deren Herstellung werden die jeweiligen Carbon-Filamentgarne sowie gekrempelte Vliese aus PA 6-Fasern (60 mm Faserlänge) alternierend in mehreren Lagen auf den Wickelrahmen gewickelt bzw. in diesen eingelegt. In Abbildung 6-1 sind die entwickelten Halbzeuge dargestellt.

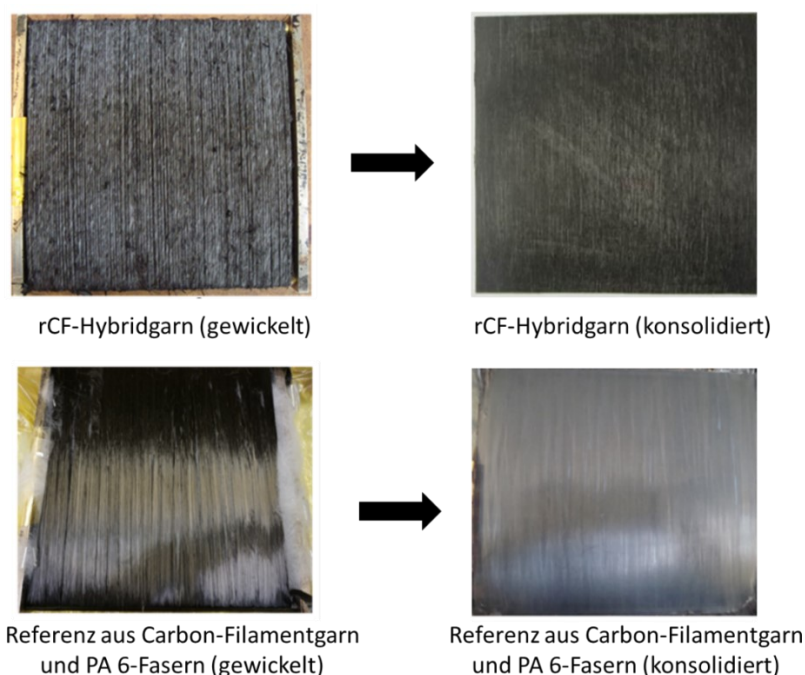


Abbildung 6-1: Gewickelte UD-Halbzeuge vor (links) und nach der Konsolidierung (rechts)

Tabelle 6-1: Hergestellte Verbundprüfkörper zur experimentellen Bestimmung der Verbundzugkennwerte

Verbundprüfkörper- bezeichnung	Eingangs- faserlänge rCF [mm]	rCF- Variante	Mischungsverhältnis rCF/PA 6 [vol.-%]	Voröffnung	Garndrehung [T/m]		
40-rCF-E-50-90	40	rCF-E	50	nein	90		
40-rCF-E-50-100					100		
40-rCF-E-50-120					120		
60-rCF-E-50-90	60				90		
60-rCF-E-50-100					100		
60-rCF-E-50-120					120		
80-rCF-E-50-60	80				60		
80-rCF-E-50-70					70		
80-rCF-E-50-80					80		
80-rCF-E-50-90				90			
80-rCF-E-50-100	100					ja	100
100-rCF-E-50-100							
40-rCF-E-V-50-100							
60-rCF-E-V-50-100							
80-rCF-E-V-50-100							
100-rCF-E-V-50-100							
80-rCF-T-50-60	80	rCF-T		nein	60		
80-rCF-P-50-60		rCF-P					
rCF-T-Referenz	Carbon- Filamentgarn	rCF-T			0		
rCF-E-Referenz		rCF-E					

Nach dem Wickeln werden die UD-Halbzeuge zunächst für 12 h bei 80 °C im Trockenofen getrocknet und anschließend in das Werkzeug der Presse eingelegt. Die Konsolidierung erfolgt mittels Laborpresse P300 PV der Firma COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH (Maitenbeth, Deutschland). Sobald die Aufheizphase beginnt, steigt der Vordruck auf 10 N/cm² und wird nach Erreichen der Konsolidierungstemperatur von 280 °C für 600 s gehalten. Im nächsten Schritt wird der Druck auf 140 N/cm² erhöht, dieser bleibt bis zum Ende der Abkühlphase auf 30 °C konstant. Nach Abschluss der Abkühlphase wird die konsolidierte Verbundplatte aus dem Werkzeug entnommen und zu entsprechenden Prüfkörpern verarbeitet. Während des gesamten Pressvorgangs wird ein technisches Vakuum erzeugt. Abschließend erfolgt die Prüfung der Zugeigenschaften sowie des Faservolumenanteils. Die entsprechenden Prüfungen sind in Kapitel 4.3 näher erläutert.

6.3 Ergebnisse der Verbundzugprüfung sowie Entwicklung eines analytischen Modells

Die tabellarische Gesamtübersicht der ermittelten Verbundzugkennwerte ist in Anlage 4 hinterlegt. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Kennwerte zu gewährleisten, wird der geprüfte Faservolumenanteil der rCF zunächst auf 50,0 vol.-%

mathematisch normiert. Nachfolgend wird auf die wesentlichen Prüfergebnisse eingegangen.

6.3.1 Einfluss der Faserlänge der rCF auf die Verbundzugeigenschaften

Werden die entwickelten rCF-Hybridgarne zu einem thermoplastischen Verbundbauteil konsolidiert, fungieren die rCF als Verstärkungsfasern und das Polyamid 6 als Matrix. Aufgrund der hohen Faserlänge der rCF im Verbundbauteil lassen sich damit prinzipiell nahezu ähnliche Kennwerte wie mit (primären) Filamentgarnen erzielen, da die umhüllende PA 6-Matrix die Lasteinleitung und -ausleitung in die einzelnen Verstärkungsfasern ermöglicht. Dazu müssen die rCF allerdings eine materialspezifische Mindestfaserlänge L_m aufweisen, damit die wirkenden Scherspannungen an der Faser-Matrix-Grenzfläche vollständig in Form von Zugspannungen in die Fasern eingeleitet werden können. Diese Mindestfaserlänge L_m ist dabei größer als die sogenannte kritische Faserlänge L_c , die notwendig ist, um die Fasern zunächst vollständig in der Matrix zu verankern [218]. In der Literatur sind dazu mehrere Untersuchungen zu finden, um diese Mindestfaserlänge L_m im Verbund zu bestimmen, z. B. von Cox [219], Kelly und Tyson [218] und Thomason [220]-[222]. Bei diesen Modellen wird allerdings von einer geraden Faserausrichtung im Verbundbauteil ausgegangen (= die Fasern liegen aufgrund ihrer kurzen Faserlänge mehrheitlich gestreckt vor). So hat Thomason in [222] nachgewiesen, dass in einem Glasfaserverstärkten-Polypropylen-Spritzguss-Verbundbauteil eine Mindestfaserlänge der Glasfasern von $L_m = 7$ mm erforderlich ist, um 90 % der maximalen Zugfestigkeit σ_c zu erreichen, siehe Abbildung 6-2.

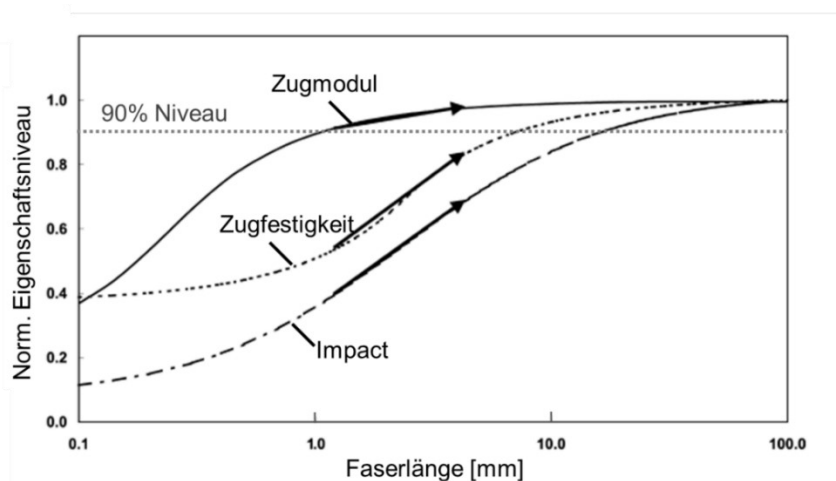


Abbildung 6-2: Einfluss der Faserlänge auf die maximal erzielbaren Verbundeigenschaften in einem Glasfaserverstärkten-Polypropylen-Spritzguss-Verbundbauteil

Entsprechende Berechnungen können für die vorliegenden rCF- und PA 6-Varianten unter Verwendung der Gleichungen (6-1) und (6-2) ebenfalls durchgeführt werden [218], [221].

$$\sigma_C = \sum_j \left[\sigma_{Fj} v_j \left(1 - \frac{L_c}{2L_{mj}} \right) \right] + (1 - v_F) \sigma_M \quad (6-1)$$

$$L_c = \frac{\sigma_F D}{2\tau_{app}} \quad (6-2)$$

Dabei beträgt die Verstärkungsfaser-Zugfestigkeit im vorliegenden Fall näherungsweise $\sigma_F = 3500$ MPa, der Faservolumenanteil $v_F = 50$ % und die Matrix-Zugfestigkeit $\sigma_M = 40$ MPa. Die kritische Faserlänge L_c berechnet sich aus dem Faserdurchmesser $d_f = 6,98$ μm und der scheinbaren Grenzflächenscherfestigkeit $\tau_{app} = 56/52/45$ MPa für rCF-T/-E/-P aus dem SFPO-Test, siehe Kapitel 5.2.2. Daraus ergibt sich für die hier entwickelten Verbundbauteile aus den rCF-Hybridgarnen eine Mindestfaserlänge der rCF von $L_m = 2$ mm, um 90 % der maximalen Verbundzugfestigkeit σ_c zu erreichen. Dieser theoretisch ermittelte Wert konnte durch die nachfolgend geschilderten experimentellen Verbundzugprüfungen allerdings nicht verifiziert werden.

In Abbildung 6-3 sind die geprüften Zugfestigkeiten der entwickelten Verbundprüfkörper mit unterschiedlicher rCF-E-Eingangsfaserlänge (40, 60, 80 und 100 mm) mit bzw. ohne zusätzlicher Faservoröffnung exemplarisch dargestellt. Die Garndrehung beträgt konstant 100 T/m.

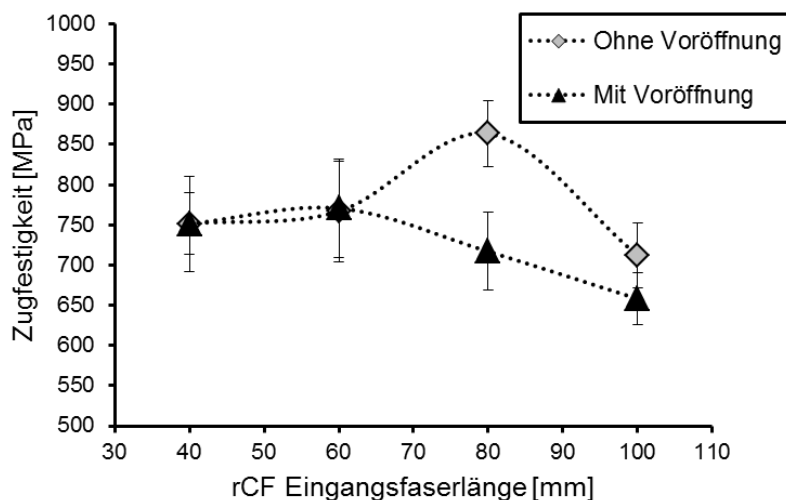


Abbildung 6-3: Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeit in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Eingangsfaserlängen der rCF-E und der Voröffnung bei konstanter Garndrehung (100 T/m); die gestrichelten Linien sind lediglich zur besseren Veranschaulichung ergänzt

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die geprüften Verbundzugfestigkeiten in Abhängigkeit der rCF-Eingangsfaserlänge deutlich variieren, obwohl bei allen Varianten erheblich höhere Faserlängen als 2 mm vorliegen. Bei den nicht-vorgeöffneten rCF und PA 6-Fasern im Hybridgarn nehmen die Verbundzugfestigkeiten bis 80 mm rCF-Eingangsfaserlänge zu, anschließend nimmt die Verbundzugfestigkeit bei 100 mm wieder ab. Bei den vorgeöffneten rCF werden hingegen die höchsten Verbundzugfestigkeiten bei 40 und 60 mm erreicht, danach sinkt die

Verbundzugfestigkeit deutlich ab. Bei den geprüften Zugmoduln kann dieser Trend ebenfalls beobachtet werden. Daraus kann zunächst geschlussfolgert werden, dass sich die Verbundqualität durch eine zusätzliche Faseröffnung bzw. -vereinzelung der rCF nicht verbessert, sondern sich insbesondere bei höheren Faserlängen erheblich verschlechtert.

Die Ursachen für diese unterschiedlichen Verbundkennwerte werden auf die resultierenden Faserlängen der rCF im Verbundbauteil zurückgeführt, die sich im Wesentlichen aus der jeweiligen Eingangsfaserlänge sowie der Faserschädigung der rCF im Krempelprozess ergeben. In Abbildung 6-4 sind deshalb die resultierenden mittleren Faserlängen (ML) der rCF im Verbundkörper und die zugehörigen Verbundzugfestigkeiten zur Veranschaulichung dargestellt.

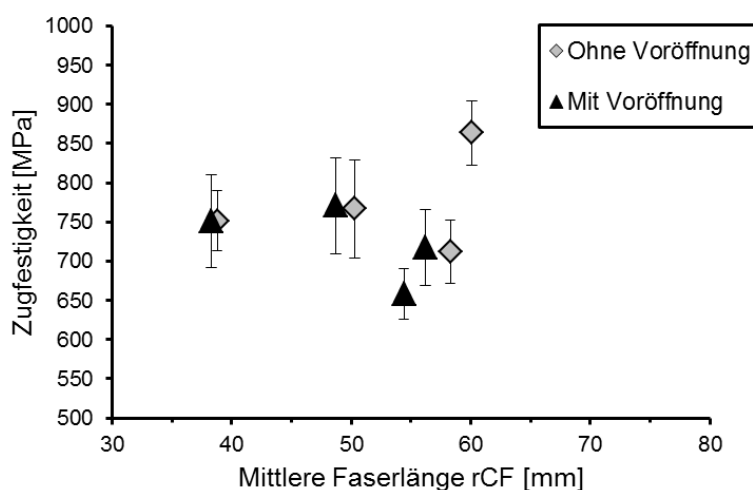


Abbildung 6-4: Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeit in Abhängigkeit von den unterschiedlichen mittleren Faserlängen der rCF und der Voröffnung bei konstanter Garndrehung (100 T/m)

Wie aus diesen Ergebnissen zu erkennen, werden dabei trotz ähnlicher mittlerer Faserlängen der rCF teilweise unterschiedlich hohe Zugfestigkeiten erzielt, insbesondere im Bereich von 55 bis 62 mm. Daraus kann demnach keine eindeutige Tendenz abgeleitet werden, ob die Verbundzugfestigkeiten bei zunehmender mittlerer Faserlänge der rCF ansteigen oder abnehmen. Dementsprechend scheint für die Charakterisierung der Faserlänge die Angabe der mittleren Faserlänge allein nicht ausreichend zu sein.

Deshalb wird nachfolgend neben der mittleren Faserlänge (ML) auch die konkret vorliegende Faserlängenverteilung der rCF mit hinzugezogen. Zur Quantifizierung dieser Faserlängenverteilung wird der aus der Faserlängenmessung ebenfalls ermittelte Gleichmäßigkeitsindex (UI) verwendet. Dieser korreliert eng mit dem Variationskoeffizienten der mittleren Faserlänge [182]. Werden diese beiden Werte anschließend miteinander multipliziert, ergibt sich daraus ein charakteristischer Kennwert, der nachfolgend als effektive Faserlänge L_E bezeichnet und als neue Einheit eingeführt wird, siehe Gleichung (6-3).

$$L_E = ML \cdot UI \quad (6-3)$$

Dieser Kennwert drückt demnach die jeweils im Vlies, Band, Garn oder Verbundbauteil vorliegende mittlere Faserlänge und Faserlängenverteilung aus. Die konkreten Werte zur Berechnung der effektiven Faserlänge L_E im Verbundbauteil werden dazu aus den jeweils geprüften Krempelvliesen herangezogen, bei denen näherungsweise die gleiche Faserlänge bzw. Faserlängenverteilung angenommen wird. Diese sind in Tabelle 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Mittlere Faserlänge (ML), Gleichmäßigkeitsindex (UI) und daraus ermittelte effektive Faserlänge (L_E) der rCF im Krempelvlies

Variante	ML [mm]	UI	L_E [mm]
40-rCF-E	38,8	0,99	38,4
40-rCF-E-V	38,3	0,97	37,2
60-rCF-E	50,3	0,88	44,3
60-rCF-E-V	48,7	0,86	41,9
80-rCF-E	60,1	0,80	48,1
80-rCF-E-V	56,2	0,75	42,2
100-rCF-E	58,3	0,68	39,6
100-rCF-E-V	54,4	0,66	35,9

In Abbildung 6-5 ist der Zusammenhang zwischen der effektiven Faserlänge L_E der rCF (aus der Tabelle 6-2) und den zugehörigen Verbundzugeigenschaften dargestellt. Wie daraus zu erkennen, nimmt sowohl das Verbundzugmodul als auch die Verbundzugfestigkeit mit steigender effektiver Faserlänge linear zu. Somit kann als zentrales Ergebnis dieser Untersuchungen nachgewiesen werden, dass eine höhere mittlere Faserlänge (ML) gemeinsam mit einer schmalen Faserlängenverteilung ($\hat{=}$ geringerer Anteil an kürzeren Fasern) zu einem höheren Verbundzugmodul und einer höheren Verbundzugfestigkeit führen.

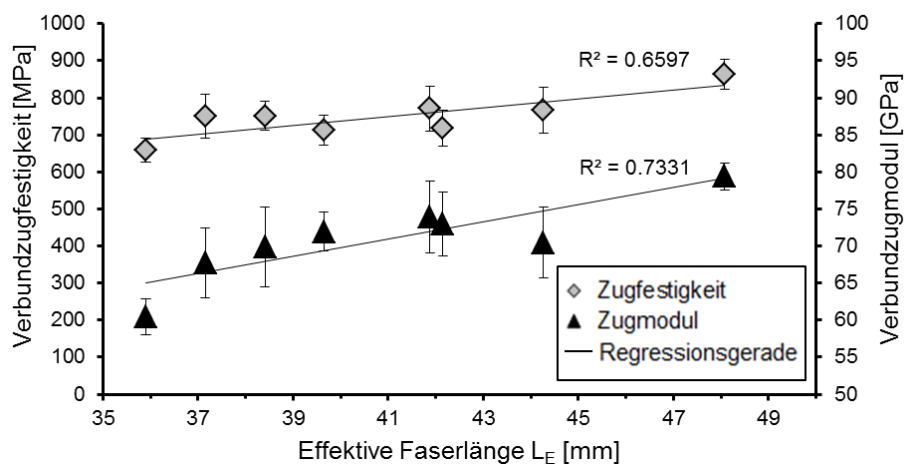


Abbildung 6-5: Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeit und -modul in Abhängigkeit der effektiven Faserlänge bei konstanter Garndrehung (100 T/m)

Dabei sind allerdings deutlich höhere Faserlängen als 2 mm erforderlich, um die maximalen Verbundkennwerte zu erreichen. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in der unterschiedlichen Faserausrichtung der Verstärkungsfasern. Während bei den bekannten Modellen von einer geraden Faserausrichtung im Verbundbauteil ausgegangen wird (= die Fasern liegen aufgrund ihrer kurzen Faserlänge mehrheitlich gestreckt vor), liegt bei den hier entwickelten mittels Stapelfaserspinnentechnik hergestellten Hybridgarnen eine komplexe wellen- und helixförmige Faserausrichtung im Bauteil vor. Dadurch können erst bei deutlich höheren Faserlängen die wirkenden Scherspannungen an der Faser-Matrix-Grenzfläche effektiv in Form von Zugspannungen in die Fasern eingeleitet werden.

6.3.2 Einfluss der Garndrehung auf die Verbundzugeigenschaften

In Abbildung 6-6 sind die ermittelten Verbundzugfestigkeiten (a) und -moduln (b) bei unterschiedlichen Garndrehungen und jeweils konstanten rCF-Eingangsfaserlängen dargestellt.

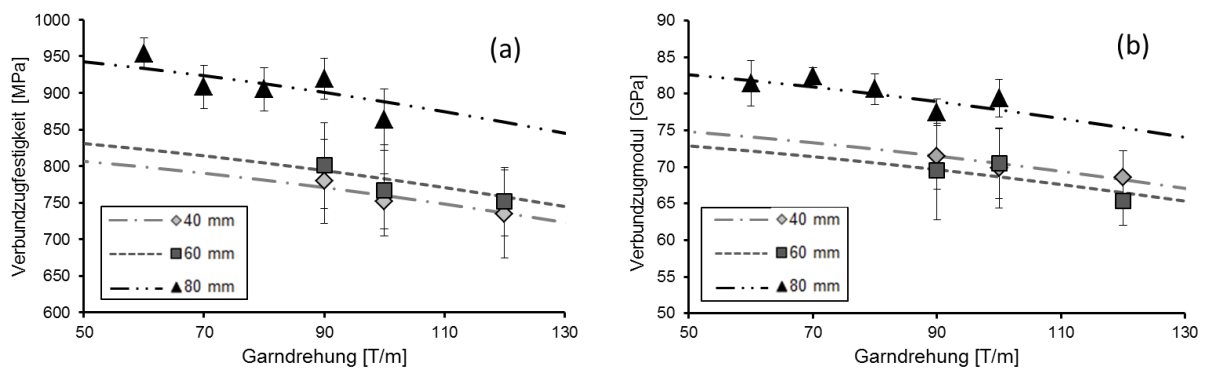


Abbildung 6-6: Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeiten (a) und Verbundzugmoduln (b) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Garndrehungen bei konstanter rCF-Eingangsfaserlänge (40, 60, 80 mm); die dazugehörigen gestrichelten Modellkurven basieren auf den Gleichungen (6-7) bzw. (6-8)

Aus dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sowohl die Verbundzugfestigkeit als auch der Verbundzugmodul bei zunehmender Verdrehung des Hybridgarns abnimmt. Dieses Phänomen wurde bereits von anderen Autoren (siehe z. B. [223]-[226]) beschrieben und wird der resultierenden Faserorientierung in Längsrichtung im Garn bzw. im Verbund zugeschrieben. Dabei wird die Längsorientierung der Fasern infolge einer höheren Garndrehung auch im Verbund verringert. Dies ist in Abbildung 6-7 verdeutlicht. Zur Charakterisierung kann dazu der Faserflächenwinkel α im Garn herangezogen werden.

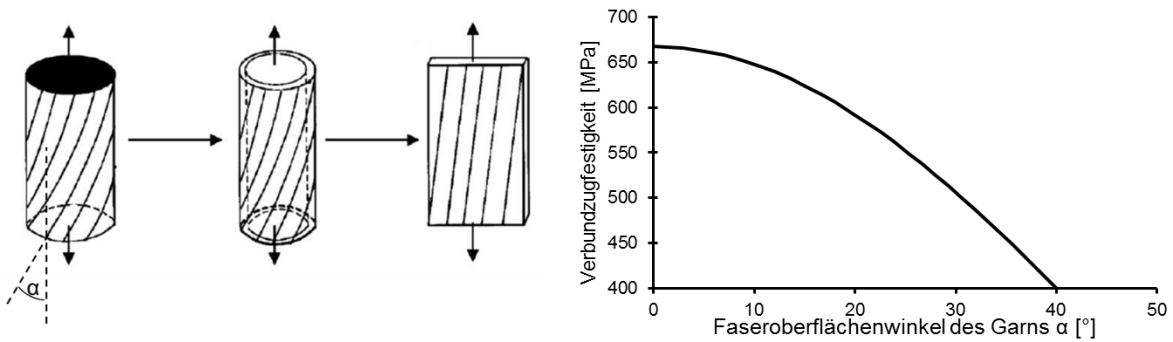


Abbildung 6-7: Einfluss des Faserflächenwinkels α (infolge einer Garndrehung) auf die Faserorientierung im Verbundbauteil und daraus resultierende Verbundzugfestigkeit [225]

Die resultierende Faserorientierung der rCF kann als Index bzw. Effizienzfaktor η_0 mit den Gleichungen (6-4) bis (6-6) berechnet werden [113], [227]-[228]. Ein Wert von $\eta_0 = 1,0$ entspricht demnach einer vollständigen Faserorientierung in Längsrichtung.

$$\eta_0 = \cos^2 \alpha \quad (6-4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(10^{-3} \cdot T \sqrt{4\pi \cdot \frac{T_t}{\rho\phi}} \right) \quad (6-5)$$

$$\phi = 0,7(1 - 0,78e^{-0,195 \cdot T}) \quad (6-6)$$

Dabei wird der Faserflächenwinkel α bestimmt mit T als Drehung (pro Meter), T_t als Garnfeinheit (800 tex), ρ als gemittelte Dichte vom jeweiligen rCF- und PA 6-Masseanteil (1,51 g/cm³), ϕ als Packungsdichte und e als Eulersche Zahl.

Mit den Gleichungen (6-7) und (6-8) kann anschließend der Einfluss der Drehungen im Garn auf die resultierende Verbundzugfestigkeit σ_c bzw. auf den Verbundzugmodul E_c berechnet werden.

$$\sigma_c = \eta_0 \cdot \sigma_{0T} \quad (6-7)$$

$$E_c = \eta_0 \cdot E_{0T} \quad (6-8)$$

Die auf diesen Gleichungen basierenden Modellkurven sind ebenfalls in Abbildung 6-6 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass der Einfluss der Garndrehung hinreichend genau berechnet werden kann. Die jeweiligen Werte der Verbundzugfestigkeit σ_{0T} und des Verbundzugmoduls E_{0T} bei einer Garndrehung von 0 T/m sind in Tabelle 6-3 aufgeführt. Diese Werte wurden aus den Prüfergebnissen mathematisch bestimmt, da eine Hybridgarnherstellung bei 0 T/m mit dem eingesetzten Flyer nicht umgesetzt werden kann.

Tabelle 6-3: Berechnete Kennwerte der Verbundzugfestigkeit σ_{0T} und des Verbundzugmodul E_{0T}

Eingangsfaserlänge rCF-E [mm]	σ_{0T} [MPa]	E_{0T} [GPa]
80	970	85
60	855	75
40	830	77

6.3.3 Entwicklung eines analytischen Modells für die Berechnung der Verbundzugkennwerte

Aus den geprüften Ergebnissen und den daraus abgeleiteten Zusammenhängen wird nachfolgend ein analytisches Modell zur Vorhersage der Verbundzugkennwerte für die Hybridgarne aus den rCF-E und PA 6-Fasern entwickelt.

Die Grundlage hierfür bilden die bekannten und zugleich stark vereinfachten Modelle auf Basis der Gleichungen (6-9) und (6-10) zur Vorhersage der Verbundzugfestigkeit σ_c und des Verbundzugmoduls E_c eines unidirektionalen Faserverbundwerkstoffs. Diese ergeben sich aus dem jeweiligen Zugmodul bzw. der Zugfestigkeit der Verstärkungsfasern und der Matrix sowie dem zugehörigen Volumenanteil [218].

$$\sigma_c = \nu_F \sigma_F + (1 - \nu_F) \sigma_M \quad (6-9)$$

$$E_c = \nu_F E_F + (1 - \nu_F) E_M \quad (6-10)$$

Dabei ist ν_F der Verstärkungsfaser-Volumenanteil, σ_F die Verstärkungsfaser-Zugfestigkeit, σ_M die Matrix-Zugfestigkeit, E_F der Verstärkungsfaser-Zugmodul und E_M der Matrix-Zugmodul.

Die mittels dieser Modelle berechneten Verbundkennwerte werden in der Praxis jedoch kaum erreicht, da zahlreiche Einflussfaktoren unberücksichtigt bleiben. Deshalb wurden die zugrundeliegenden Gleichungen von verschiedenen Autoren z. T. mit zusätzlichen Effizienzfaktoren erweitert, um eine präzisere Vorhersage zu ermöglichen (z. B. in [225] und [229]-[231]). Damit kann beispielweise die konkret vorliegende Faserorientierung im Verbundbauteil mitberücksichtigt werden.

Unter Zuhilfenahme solcher Effizienzfaktoren wurde auf Basis der Gleichungen (6-9) und (6-10) im Rahmen dieser Dissertationsschrift ein analytisches Modell zur Vorhersage der Verbundzugfestigkeit und des Verbundzugmoduls für die hier vorliegenden Prüfergebnisse entwickelt (Gleichungen (6-11) und (6-12)).

$$\sigma_c = \eta_o \eta_s \eta_L \nu_{rCF} \sigma_{rCF} + (1 - \nu_{rCF}) \sigma_{PA6} \quad (6-11)$$

$$E_c = \eta_o \eta_L \nu_{rCF} E_{rCF} + (1 - \nu_{rCF}) E_{PA6} \quad (6-12)$$

Dabei ist η_o der Effizienzfaktor der Faserorientierung der rCF, η_s der Effizienzfaktor der rCF-Zugfestigkeit, η_L der Effizienzfaktor der Faserlänge der rCF, ν_{rCF} der rCF-Volumenanteil, σ_{rCF} die rCF-Zugfestigkeit, σ_{PA6} die PA 6-Matrixzugfestigkeit, E_{rCF} der

rCF-Zugmodul und E_{PA6} der PA 6-Zugmodul. Die Herleitung der einzelnen Effizienzfaktoren wird nachfolgend kurz erläutert.

Der Effizienzfaktor für die Faserorientierung der rCF η_o wurde bereits in Gleichung (6-4) bestimmt und dessen grundsätzliche Eignung nachgewiesen.

Zur Vorhersage der Verbundzugfestigkeit auf Basis der geprüften Zugfestigkeit der Verstärkungsfasern wurden bereits viele Theorien und Simulationen entwickelt, dargestellt z. B. in [232]-[236]. Im vorliegenden Fall wird der Effizienzfaktor der rCF-Zugfestigkeit η_s aber vereinfacht auf Basis der Gleichung (6-11) mit den geprüften Werten der rCF-E-Referenz (siehe Kapitel 6.3.4) und $\eta_o, \eta_L = 1,0$ ermittelt. Der daraus berechnete Wert $\eta_s = 0,71$ stimmt dabei gut mit den experimentellen Ergebnissen aus verschiedensten Verbunduntersuchungen (z. B. in [232]-[236]) überein. Für die Berechnung des Verbundzugmoduls spielt dieser Effizienzfaktor η_s hingegen keine Rolle und wird daher in Gleichung (6-12) nicht berücksichtigt.

Der Effizienzfaktor der Faserlänge η_L wird auf Basis der effektiven Faserlänge L_E nach der entwickelten Gleichung (6-13) berechnet, da ein linearer Zusammenhang zwischen der effektiven Faserlänge und den resultierenden Verbundzugeigenschaften nachgewiesen werden konnte (siehe Abbildung 6-5).

$$\eta_L = \begin{cases} \frac{L_E}{L_{Emin}}, & 0 < L_E \leq L_{Emin} \\ 1,0, & L_E > L_{Emin} \end{cases} \quad (6-13)$$

Dabei steht L_{Emin} für die effektive Mindestfaserlänge, die notwendig ist, um das volle Potential im Verbundbauteil zu erreichen. Allerdings konnte diese effektive Mindestfaserlänge bisher nicht experimentell quantifiziert werden. Zum Nachweis wäre insbesondere ein Krempelprozess erforderlich, der auch rCF mit Faserlängen im Bereich von 60 mm bis 100 mm sehr schädigungsarm verarbeiten kann, was aktuell Forschungsschwerpunkt des DFG-Projekts CH 174/46-1 am ITM ist. Unabhängig davon kann diese effektive Mindestfaserlänge L_{Emin} aber aus den vorliegenden Ergebnissen der Verbundzugprüfung auf Basis der Gleichungen (6-11) und (6-12) berechnet werden. Dabei wird bei einem Wert $L_{Emin} = 64$ mm die höchste Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und dem analytischen Modell erzielt. Bei einem Hybridgarn mit einer effektiven Faserlänge der rCF-E von $L_E = 64$ mm würden sich demnach - in Bezug auf die Faserlänge - die maximalen Verbundzugkennwerte einstellen, da $\eta_L = 1,0$. Eine noch höhere effektive Faserlänge der rCF als L_{Emin} bewirkt hingegen keine weitere Steigerung der Verbundzugkennwerte mehr. Diese konkret ermittelte Mindestfaserlänge gilt allerdings nicht zwangsläufig auch bei allen anderen rCF-Varianten.

Damit konnten alle Effizienzfaktoren für die Anwendung des analytischen Modells ermittelt werden.

6.3.4 Anwendung des Modells für die Berechnung der Verbundzugkennwerte

Nachfolgend wird das entwickelte Modell auf Basis der Gleichungen (6-11) und (6-12) zur Berechnung der Verbundzugfestigkeiten und -moduln angewendet. Bei der rCF-E-Referenz wird dabei näherungsweise von einer vollständigen Faserorientierung in Längsrichtung und von einer einheitlichen endlosen Faserlänge ausgegangen, dementsprechend werden die Effizienzfaktoren $\eta_O, \eta_L = 1,0$ gesetzt. In der Tabelle 6-4 sind die noch fehlenden Kennwerte für die Berechnung der Verbundzugfestigkeiten und -moduln angegeben. Diese wurden im Rahmen der Arbeit ebenfalls experimentell ermittelt.

In Tabelle 6-5 sind die Ergebnisse des analytischen Modells im Vergleich zu den experimentellen Prüfergebnissen abschließend dargestellt.

Tabelle 6-4: Experimentell ermittelte Kennwerte zur Berechnung der Verbundzugeigenschaften

$\nu_{rCF} = 0,5$	$E_{rCF} = 233,1 \text{ GPa}$
$\sigma_{rCF} = 3588 \text{ MPa}$	$E_{PA6} = 3,0 \text{ GPa}$
$\sigma_{PA6} = 40,6 \text{ MPa}$	

Tabelle 6-5: Ermittelte Kennwerte aus dem analytischen Modell und der experimentellen Verbundzugprüfung

Verbundbezeichnung	Verbundzugfestigkeit σ_c			Verbundzugmodul E_c		
	Modell [MPa]	Experimentell [MPa]	Abweichung [%]	Modell [GPa]	Experimentell [GPa]	Abweichung [%]
40-rCF-E-50-90	721,9	778,9 ± 57,5	7,9	65,7	71,5 ± 4,5	8,8
40-rCF-E-50-100	710,5	751,8 ± 38,3	5,8	64,7	69,8 ± 5,5	8,0
40-rCF-E-50-120	685,7	734,7 ± 60,8	7,1	62,4	68,5 ± 3,8	9,8
60-rCF-E-50-90	829,7	800,6 ± 56,2	-3,5	75,6	69,5 ± 6,5	-8,0
60-rCF-E-50-100	816,6	766,5 ± 62,2	-6,1	74,4	70,5 ± 4,8	-5,2
60-rCF-E-50-120	788,0	751,4 ± 47,2	-4,6	71,7	65,4 ± 3,5	-8,8
80-rCF-E-50-60	936,1	953,5 ± 21,2	1,9	85,3	81,5 ± 3,0	-4,5
80-rCF-E-50-70	924,8	908,1 ± 28,6	-1,8	84,3	82,4 ± 1,1	-2,2
80-rCF-E-50-80	912,5	906,8 ± 31,3	-0,6	83,1	80,8 ± 2,3	-2,8
80-rCF-E-50-90	899,1	918,7 ± 29,7	2,2	81,9	77,5 ± 1,9	-5,4
80-rCF-E-50-100	884,9	863,5 ± 44,2	-2,4	80,6	79,4 ± 1,9	-1,5
100-rCF-E-50-100	732,1	712,1 ± 41,4	-2,7	66,6	71,9 ± 2,6	8,0
40-rCF-E-V-50-100	688,9	750,8 ± 59,5	9,0	62,7	67,8 ± 4,7	8,1
60-rCF-E-V-50-100	773,4	770,5 ± 62,6	-0,4	70,4	73,9 ± 4,9	5,0
80-rCF-E-V-50-100	778,8	716,9 ± 49,3	-7,9	70,9	72,9 ± 4,4	2,9
100-rCF-E-V-50-100	665,6	658,9 ± 32,4	-1,0	60,5	60,4 ± 2,4	-0,2
rCF-E-Referenz	1294,54	1294,0 ± 22,1	0,0	118,1	113,1 ± 2,2	-4,2

Aus der Tabelle 6-5 ist ersichtlich, dass mit dem entwickelten analytischen Modell eine vergleichsweise präzise Vorhersage der Verbundzugkennwerte möglich ist, in Abhängigkeit der eingestellten Garndrehung und der resultierenden Faserlängen-

verteilung der rCF im Hybridgarn. Die maximale Abweichung des Modells beträgt weniger als 10 %.

In Abbildung 6-8 sind die ermittelten Verbundzugfestigkeiten der rCF-E-Verbundprüfkörper sowie ausgewählte Kurven des analytischen Modells zur besseren Veranschaulichung dargestellt. Dieses entwickelte Modell soll zukünftig noch erweitert werden, um z. B. den Einfluss von verschiedenen rCF-Varianten vorhersagen zu können.

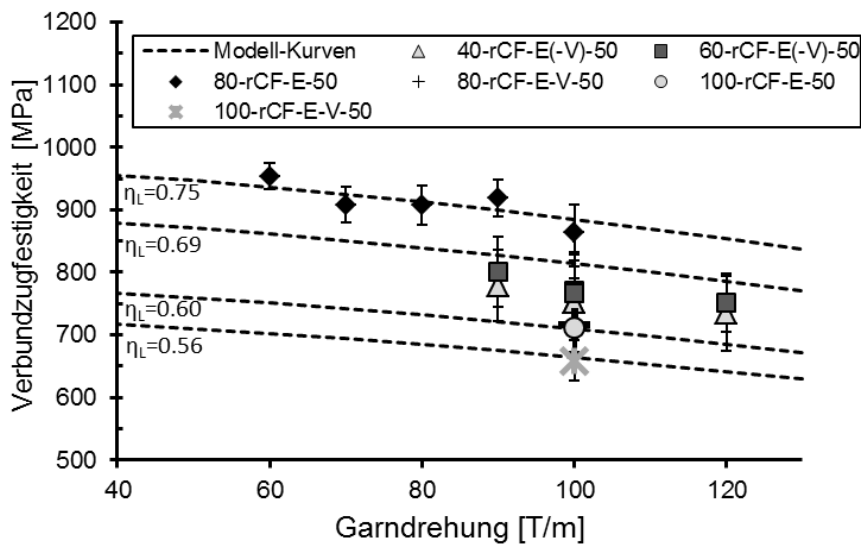


Abbildung 6-8: Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeiten sowie ausgewählte Kurven des analytischen Modells auf Basis der Gleichung (6-11) als gestrichelte Linien mit verschiedenen Effizienzfaktoren der Faserlänge η_L

6.3.5 Einfluss der verschiedenen rCF-Varianten auf die Verbundzugeigenschaften und Vergleich mit Referenzprüfkörpern

Auf Basis der Ergebnisse der Verbundzugprüfung wurden anschließend Hybridgarne aus den verschiedenen rCF-Varianten (rCF-T/-E/-P) mit den bestmöglichen technologischen Parametern für maximale Verbundzugkennwerte hergestellt (Garndrehung = 60 T/m, rCF-Eingangsfaserlänge = 80 mm, ohne Voröffnung). Der Einfluss der Schlichte bei den jeweiligen rCF-Varianten wurde bereits umfangreich hinsichtlich der erzielbaren Faser-Matrix-Haftung (Kapitel 5.2.2) und dem unterschiedlichen Grad der Faserschädigung beim Krempelprozess (Kapitel 5.3.4.1) erläutert.

Aus den Prüfergebnissen in Abbildung 6-9 ist zu erkennen, dass die Verbundprüfkörper aus den rCF-T (mit einer Schlichte speziell für thermoplastische Matrices) die höchsten Zugfestigkeiten im Vergleich zu den rCF-E (mit einer Schlichte speziell für duroplastische Matrices) und den pyrolysierten rCF-P erzielen. Demgegenüber wurde bei allen drei Varianten ein nahezu identisches Zugmodul ermittelt.

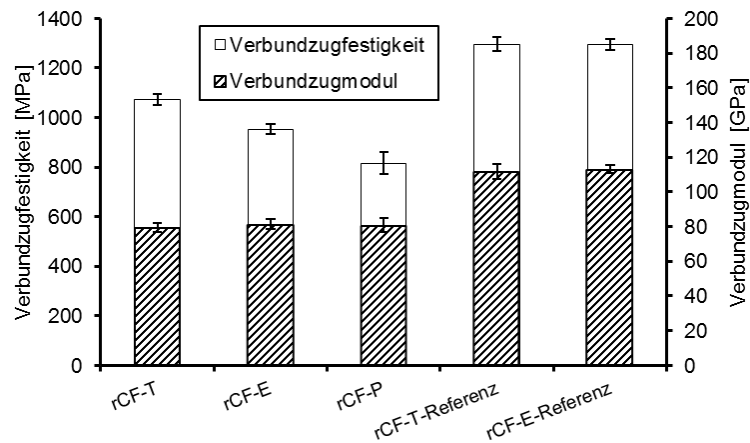


Abbildung 6-9: Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeiten und -moduln der Hybridgarne mit 60 T/m und 80 mm rCF-T/-E/-P-Eingangsfaserlänge sowie der Referenzproben aus rCF-T/-E-Filamentgarn und PA 6-Fasern

Aufgrund des ähnlichen Zugmoduls resultieren die hohen Verbundzugfestigkeiten der rCF-T (1073,6 MPa) im Wesentlichen aus der höchsten Bruchdehnung (1,30 %) im Vergleich zu den rCF-E (953,8 MPa; 1,08 %) und rCF-P (816,6 MPa; 0,97 %). Die Ursache hierfür wird somit auf die höhere Anhaftung der rCF-T in der PA 6-Matrix zurückgeführt, wodurch diese nicht vorzeitig aus der Matrix herausgezogen werden. Die Analyse der Bruchkanten der Verbundprüfkörper mittels REM bestätigen diese Annahme, siehe Abbildung 6-10. Dabei ist bei den rCF-T-Verbundprüfkörpern eine glatte Bruchkante zu erkennen, bei der nur wenige Fasern aus der Matrix herausragen (= Faserbruch). Bei den rCF-E- und rCF-P-Verbundbauteilen kann hingegen von einem Matrixbruch ausgegangen werden, da eine große Menge an Fasern herausgezogen wurde. Dies wird auf die geringere Haftung dieser beiden rCF zu der thermoplastischen Matrix zurückgeführt.

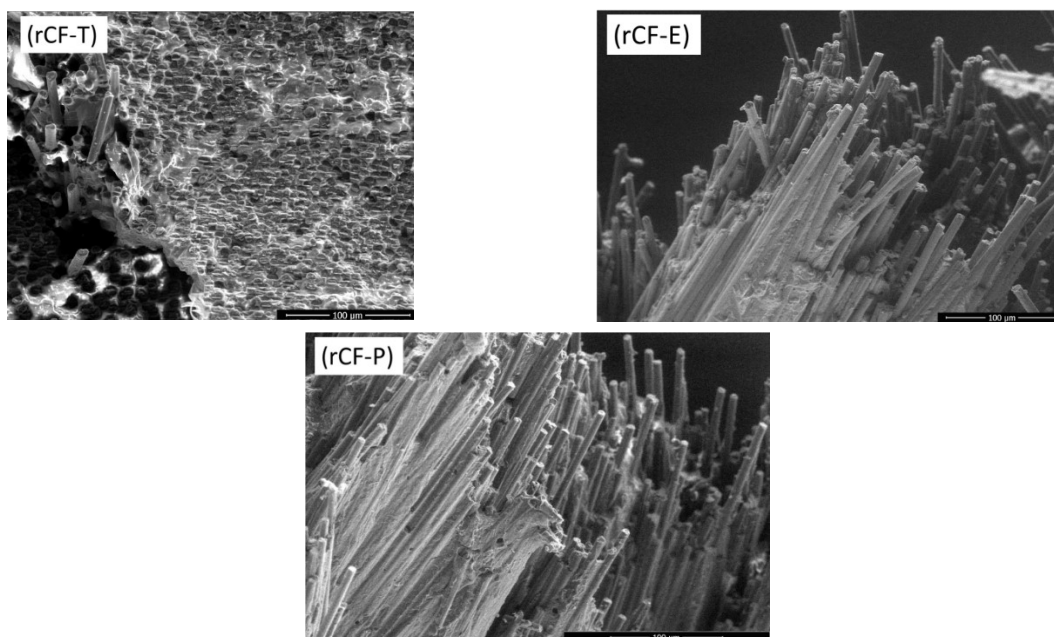


Abbildung 6-10: Bruchanalyse von Verbundprüfkörpern aus rCF-T, rCF-E und rCF-P mittels REM

Welche einzelnen Wirkmechanismen dabei den größten Einfluss auf die resultierende Verbundzugfestigkeit ausüben, muss im Rahmen weiterführender Untersuchungen ermittelt werden. So weisen die rCF-T beim SFPO-Test eine nur geringfügig höhere Faser-Matrix-Haftung ($\tau_{app} = 56$ MPa) im Vergleich zu den rCF-E ($\tau_{app} = 52$ MPa) auf, wodurch die großen Unterschiede bei den Zugfestigkeiten kaum erklärt werden können. Gleichzeitig ist die beim Krepelprozess auftretende Faserschädigung bei den rCF-T höher als bei den rCF-E. Dies müsste erwartungsgemäß zu einer Verringerung der Verbundzugfestigkeiten führen. Andererseits könnten die erzielbaren rCF-T-Verbundzugfestigkeiten durch einen schonenderen Krepelprozess somit vermutlich noch weiter gesteigert werden. Die rCF-P weisen hingegen die höchste Faserschädigung im Krepelprozess sowie die vergleichsweise niedrigste Faser-Matrix-Haftung ($\tau_{app} = 43$ MPa) auf.

In Abbildung 6-9 sind neben den geprüften Verbundzugkennwerten der Hybridgarne auch die rCF-T- und rCF-E-Referenzwerte aus Carbon-Filamentgarn und PA 6-Matrix dargestellt. Dabei erreichen die Hybridgarne aus rCF-T/-E ca. 83/74 % der Verbundzugfestigkeit und 71/72 % des Verbundzugmoduls der rCF-T/-E-Referenz. Im Vergleich zu den bisher eingesetzten Spritzguss- oder Vliesstoffbauteilen aus rCF stellt dies somit eine enorme Leistungssteigerung dar und verdeutlicht das große Potential der rCF-Hybridgarne für die Entwicklung von serientauglichen CFK-Bauteilen. Diese Forschungsarbeiten wurden mit dem AVK-Innovationspreis 2016 in der Kategorie „Forschung/Wissenschaft“ prämiert.

7 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Umsetzung von neuartigen Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern (rCF) und Polyamid (PA) 6-Fasern für thermoplastische Verbundbauteile mit hohem Leistungsvermögen. Wesentliche Schwerpunkte sind dabei die Analyse der konventionellen Prozesskette der Stapelfasergarnherstellung, die Entwicklung und Umsetzung eines geeigneten Faserlängenmessverfahrens für lange rCF, die gezielte Modifikation der eingesetzten Textilmaschinenteknik und die Auswahl anforderungsgerechter Maschinenprozessparameter für eine möglichst schonende Verarbeitung der rCF sowie die Formulierung eines analytischen Modells zur Vorhersage der Verbundzugkennwerte.

Dazu erfolgte zunächst eine Recherche von bisher am Markt oder im Forschungsstadium existierenden Lösungen zur Faser-Matrix-Separation, um die daraus gewonnenen CF-Abfälle recyceln zu können. Diese recycelten Carbonfasern können anschließend wieder zu CFK-Bauteilen verarbeitet werden, wobei dazu aktuell im Wesentlichen die Spritzguss- oder Vliesstofftechnik eingesetzt wird. Mit diesen Technologien können die mechanischen Eigenschaften der rCF allerdings prinzipbedingt nur zu einem geringen Teil ausgenutzt werden. Deutlich effektiver hingegen ist die Herstellung von Garnkonstruktionen, da die rCF darin wieder hochgradig in Lastrichtung ausgerichtet sind. Die dafür eingesetzte Stapelfaserspinn-technik ermöglicht gleichzeitig eine Kombination aus rCF und Thermoplastfasern, im konkreten Fall PA 6, zur Umsetzung von nahezu homogen durchgemischten Hybridgarnen. Dadurch kann die Verspinnbarkeit der rCF durch die einstellbaren Fasereigenschaften der PA 6-Fasern zudem erheblich verbessert werden. Diese rCF-Hybridgarne können anschließend zu hochbelastbaren thermoplastischen CFK-Bauteilen verarbeitet werden, die gegenüber duroplastischen Matrices wesentliche Vorteile bieten, wie geringere Taktzeiten, höhere Automatisierbarkeit, bessere Fügbarkeit sowie Recyclingfähigkeit.

Bedingt durch die speziellen Eigenschaften der rCF, insbesondere hohe Querkraftempfindlichkeit, Sprödigkeit und fehlende Kräuselung, weisen diese allerdings ein von herkömmlich eingesetzten Faserstoffen (z. B. Baumwolle, Polyester) deutlich abweichendes Verarbeitungsverhalten auf. Dieses steht konträr zu den bisher eingesetzten Verfahren und Maschinen der Stapelfaserspinn-technik. Aus diesem Grund wurden zunächst die drei wesentlichen Prozessschritte der Stapelfasergarnherstellung (Krempel-, Streck- und Spinnprozess) umfassend analysiert, um daraus die Defizite der konventionellen Maschinenteknik sowie wesentliche Faser- und Prozessparameter abzuleiten. Damit konnte die Basis für die Entwicklung einer anforderungsgerechten Prozesskette zur Umsetzung der rCF-

Hybridgarne geschaffen werden. Als einzusetzende Maschinenteknik wurden dafür eine Kreppe, eine Kurzstapel-Strecke und ein Flyer ausgewählt.

Eine wesentliche Herausforderung für die Entwicklung der Prozesskette der Hybridgarne war zunächst die Bestimmung der resultierenden Faserschädigung der rCF während der Verarbeitung an den einzelnen Textilmaschinen. Hier war kein geeignetes Verfahren zur Faserlängenmessung von langen rCF am Markt verfügbar. Deshalb wurde ein neues Faserlängenmesssystem für die speziellen Eigenschaften der rCF auf Basis der bekannten Fibrographmethode entwickelt, welches reproduzierbare Prüfergebnisse bei gleichzeitig geringer Probenpräparations- und Prüfdauer liefert. Erst mit diesem Verfahren konnte die bei der Verarbeitung auftretende Faserschädigung der rCF wissenschaftlich analysiert werden. Zur Kalibrierung des Messsystems war zudem die Entwicklung eines geeigneten Referenzverfahrens erforderlich, welches ebenfalls im Rahmen der Arbeit umgesetzt werden konnte.

Mit der konkret ausgewählten Textilmaschinenteknik, der durchgeführten Prozessanalyse der konventionellen Stapelfaserspinnerei sowie dem neuen Faserlängenmessverfahren konnte anschließend die technisch-technologische Entwicklung der Hybridgarne erfolgen. Dazu wurden zunächst umfangreiche Maschinenmodifikationen an der Kreppe, an der Strecke und am Flyer durchgeführt, um anschließend anforderungsgerechte Kreppevliese, Streckenbänder und Hybridgarne durch gezielte Variation ausgewählter Prozessparametern zu fertigen. Dabei konnte als zentrales Ergebnis dieser Dissertationsschrift die Faserschädigung der rCF im gesamten Garnherstellungsprozess drastisch reduziert werden und eine kontinuierliche hochwertige Hybridgarnherstellung ermöglicht werden.

Die rCF-Hybridgarne wurden anschließend zu UD-Verbundprüfkörpern verarbeitet und deren Zugeigenschaften geprüft. Dabei zeigt sich das enorm hohe Potential der Hybridgarne, die über 80 % der Verbundzugfestigkeit von vergleichbaren Referenzprüfkörpern aus Carbon-Filamentgarnen und PA 6-Matrix erreichen. Zudem können die erzielbaren Verbundzugeigenschaften unter Nutzung eines entwickelten analytischen Modells in Abhängigkeit von der vorliegenden Faserlängenverteilung der rCF und der Garndrehung vorhergesagt werden.

Mittlerweile konnte die im Rahmen dieser Dissertationsschrift entwickelte Prozesskette auch in den Technikumsmaßstab transferiert werden. Als Kernstück gilt dabei die eingesetzte Spezialkreppeanlage, bei der die rCF und PA 6-Fasern erstmalig zu einem kontinuierlichen Kreppeband mit geringer Faserschädigung verarbeitet werden konnten. Dadurch wurden gleichzeitig die Hybridgarn-gleichmäßigkeit und die Produktivität des gesamten Garnherstellungsprozesses deutlich gesteigert. Dieser erfolgreich umgesetzte Technikumsmaßstab bildet die

Grundlage für die zukünftige Herstellung der rCF-Hybridgarne im Industriemaßstab. Diese überaus vielversprechenden Forschungsergebnisse wurden mit dem AVK-Innovationspreis 2016 in der Kategorie „Forschung/Wissenschaft“ sowie mit dem Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis 2016 des BMWi prämiert.

8 Ausblick

Die im Rahmen dieser Dissertation erzielten Forschungsergebnisse verdeutlichen das hohe Potential der rCF-Hybridgarne. Neben der industriellen Umsetzung der Hybridgarne, an der momentan bereits gearbeitet wird, müssen nun als nächster Schritt auch entsprechende CFK-Bauteile aus den rCF-Hybridgarnten entwickelt und umgesetzt werden. Als prädestiniert dafür gilt die Automobilindustrie, um serientaugliche Verbundbauteile mit geringen Taktzeiten zu fertigen. Dabei kann insbesondere die elektrische Leitfähigkeit der rCF genutzt werden, um diese durch direkte Bestromung im Werkzeug zu erwärmen um dadurch die Thermoplastfasern aufzuschmelzen [181]. Diese Methode ist dabei äußerst energieeffizient und ermöglicht eine sehr schnelle Bauteilkonsolidierung innerhalb weniger Sekunden, da nur das textile Halbzeug erwärmt wird und nicht das gesamte Werkzeug wie bei konventionellen Heißpressen.

Weiterführende Untersuchungen sind insbesondere zur Beschlichtung der rCF zwingend erforderlich. Der bisherige Einsatz von pyrolysierten rCF führt zu einer deutlich höheren Faserschädigung beim Krempelprozess, was eindeutig auf die fehlende Faserschlichte zurückzuführen ist. Deshalb ist eine anforderungsgerechte Beschlichtung der rCF eine zentrale Anforderung zur Etablierung der rCF am Markt. Dazu ist vermutlich als erstes die Erforschung neuartiger Beschlichtungsverfahren notwendig, da herkömmliche Verfahren meistens zu großflächig verklebten Faseranhäufungen führen, die im Krempelprozess schwer verarbeitbar sind. Eine speziell entwickelte Schlichte könnte gleichzeitig die Oberflächenrauigkeit der rCF deutlich erhöhen, wodurch der Verzugsprozess durch höhere Reibungs- bzw. Verzugskräfte weiter vergleichmäßigt werden könnte.

Die im Kapitel 6 untersuchten Verbundeigenschaften belegen eindeutig, dass die Verbundkennwerte durch die mittels Flyer-Spinnverfahren eingebrachte Garndrehung verringert werden. Allerdings zeigt auch das Umwindespinnverfahren eine hohe Faserondulation durch das Einschnüren des Garnkerns durch den Umwindefaden. Dadurch liegen auch hier nicht vollständig längsorientierte rCF im Verbundbauteil vor. Deshalb rückt das DREF-Spinnverfahren weiter in den Fokus der Untersuchungen, bei dem die als Kern zugeführten rCF nicht verdreht oder ausgelenkt werden. Eine weitere Alternative zur Erzeugung einer Garnfestigkeit ohne Verdrehung oder Einschnürung stellt die stoffschlüssige Verfestigung des Hybridgarns durch gezieltes Aufschmelzen der PA 6-Fasern dar.

Die durchgeführten Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung der Hybridgarne stellen gleichzeitig den Ausgangspunkt für neuartige Garn- und Flächengebilde dar. So sollen zukünftig beispielsweise Hybridgarne aus rCF und Aramidfasern entwickelt

werden, die im Verbund einen höheren Impactwiderstand ermöglichen. Auch die Entwicklung von Organoblechen auf der Basis von nebeneinander abgelegten Streckenbändern aus rCF und PA 6 bietet weitere Entwicklungsmöglichkeiten. Dabei kann die gesamte Prozesskette drastisch verkürzt werden, da kein Spinn- und Flächenbildungsprozess (z. B. Weben) mehr notwendig ist. Dies ist insbesondere in Hinblick auf ein kostengünstiges Recycling von Vorteil. Damit soll abschließend der hohe Nutzen der hier entwickelten Prozesskette verdeutlicht werden, auf deren Basis zukünftig weitere innovative sowie nachhaltige Anwendungen für den Leichtbau entwickelt werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] WITTEN, E.; MATHES, V.: Composites-Marktbericht 2018 Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, November 2018
- [2] MCCONNELL, V.P.: Launching the carbon fibre recycling industry. Reinforced Plastics, Volume 54, Issue 2, 2010, S. 33-37, ISSN 0034-3617 [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(10\)70063-1](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70063-1)
- [3] OLIVEUX, G.; DANDY, L.O. LEEKE, G.A.: Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. Progress in Materials Science, Volume 72, 2015, S.61-99, ISSN 0079-6425, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- [4] WEIßHAUPT, P.: Abfallbehandlung carbonfaserverstärkter Kunststoffe, 69. BHT – FREIBERGER UNIVERSITÄTSFORUM, Proceedings, Freiberg, 7. Juni 2018
- [5] LÖFKEN, J.O.: Sprengen und verbrennen - Ausgediente Windräder, SPIEGEL ONLINE, 2015
- [6] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, „Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien,“ 22. November 2008
- [7] Positionspapier: Positionen zum industriepolitischen Leichtbau-Dialog: Deutschland muss Leitanbieter werden, 20. November 2017
- [8] MARSH, G.: Reclaiming value from post-use carbon composite. Reinforced Plastics, Volume 52, Issue 7, 2008, S. 36-39, ISSN 0034-3617, [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(08\)70242-X](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(08)70242-X)
- [9] CUNNINGHAM, J.: Cheaper carbon fibre: injection moulding thermoplastic and recycled carbon fibre to make BMW clutch pedal. Engineering Materials, März 2016
- [10] GARDINER, G.: Recycling carbon fiber for structural applications. CompositesWorld, Dez.2014
- [11] STEGSCHUSTER, G.: Perspectives of web based composites from rCF material. Sampe Europe Conference 2017, Stuttgart, 2017
- [12] GULICH, B.; HOFMAN, M.: From black gold to the „golden fleece“. Allgemeiner Vliesstoff-Report 4(2013), S. 34-35
- [13] GUDE, M., LIEBERWIRTH, H., MESCHUT, G., ZÄH, F.: FOREL-Studie: Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität, Mai 2015, ISBN 978-3-00-049681-3
- [14] GARTHAUS, C.; WITSCHEL, B.; BARFUß, D.; ROHKAMM, A. et al.: Prozesskette Funktionalisierte Faser-Thermoplast-Profilstrukturen. Lightweight Design. (2016), Nr. 1, S. 40–45
- [15] CHERIF, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau, Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-642-17991-4, DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1
- [16] NEITZEL, M.; MITSCHANG, P.; BREUER, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2014, , eISBN: 978-3-446-43697-8, Print ISBN: 978-3-446-43696-1, <https://doi.org/10.3139/9783446436978>
- [17] BOBETH, W. (Hrsg.): Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften. Berlin, Springer Verlag, 1993
- [18] THOMASON, JL; ADZIMA, LJ.: Sizing up the interphase: an insider's guide to the science of sizing. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2001; 32(3-4): S. 313–321. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00124-X](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00124-X)
- [19] WEITZSACKER, CL.; BELLAMY M.; SHERWOOD PMA.: Studies of the effect of size on carbon fiber surfaces. Journal of Vacuum Science Technology A 1994; 12(4): S. 2392–2397. <https://doi.org/10.1116/1.579220>

- [20] DVIR H.; JOPP J.; GOTTLIEB, M.: Estimation of polymer–surface interfacial interaction strength by a contact AFM technique. *Journal of Colloid and Interface Science* 2006; 304(1): S. 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.08.053>
- [21] PARK, SJ; KIM, BJ.: Roles of acidic functional groups of carbon fiber surfaces in enhancing interfacial adhesion behavior. *Materials Science Engineering: A* 2005; 408(1-2): S. 269–273. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.1298>
- [22] KIM, JK; MAI, YW.: High strength, high fracture toughness fibre composites with interface control – a review. *Composites Science and Technology* 1991; 41(4): S. 333–378. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90072-W](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90072-W)
- [23] PUKÁNSZKY, B.: Interfaces and interphases in multicomponent materials: past, present, future. *European Polymer Journal* 2005; 41(4): S. 645–662. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.035>
- [24] JONES, C.: The chemistry of carbon fibre surfaces and its effect in interfacial phenomena in fibre/epoxy composites. *Composites Science and Technology* 1991; 42(1-3): S. 275–298. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90021-G](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90021-G)
- [25] SHARMA M.; GAO, S.; MÄDER, E. et al.: Carbon fiber surfaces and composite interphases. *Composites Science and Technology* 2014; 102: S. 35-50. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.07.005>
- [26] BLACK, S.: Aligned discontinuous fibers come of age. *Composites World*, 2008
- [27] GUEVEL, J.; FRANCOIS, M.; BONTEMPS, G.: Carbon fiber yarn. US4825635A, 1989
- [28] GUEVEL, J.; FRANCOIS, M.; BONTEMPS, G.: Hybrid yarn for composite materials with thermoplastic matrix and method for obtaining same. US5910361A, 1999
- [29] GUEVEL, J.; BONTEMPS, G.: Unidirectional tape of carbon fibers. US6410126B1, 2002
- [30] HANSEN, N.W.: Stretch breaking of fibers. US6477740B1, 2002
- [31] HENDRIX, J.; HAMRICK, D.; EDWARDS, H.: High strength spun yarn produced from continuous high-modulus filaments, and process for making same. EP1774074B1, 2008
- [32] CHOI, B.D.: Entwicklung von Commingling-Hybridgarnen für langfaserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe. Dresden, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik TU Dresden, Dissertation, 2005, ISBN 3-938863-09-9
- [33] KALDENHOFF, R.D.: Friktionsspinnhybridgarne als neuartige textile Halbzeuge zur Herstellung von Faserverbundkunststoffen. Aachen, Institut für Textiltechnik RWTH Aachen (ITA), Dissertation, 1995
- [34] KOLKMANN, A.: Methoden zur Verbesserung des inneren und äußeren Verbundes technischer Garne zur Bewehrung zementgebundener Matrices. Aachen, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA), Dissertation, 2008
- [35] HENGSTERMANN, M.: Überblick - Standortbestimmung beim Recycling von Carbonfasern. *Carbon Composites Magazin* (2016)2, S. 21-22
- [36] LIMBURG, M.; QUICKER, P.: Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung von Carbonfaserhaltigen Abfällen. Vernetzungsworkshop Recycling und Arbeitsschutz im Bereich Carbonbeton. Proceedings, Dresden, 29. Juni 2018
- [37] STOCKSCHLÄDER, J.; QUICKER, P.: Energetische Verwertung von CFK-Abfällen - Zwischenstand zum Ufoplan Vorhaben CFK. Thementag CFK Verwertung, Proceedings, Augsburg, 28.09.2017
- [38] LANGE, M.: Herausforderungen aus Sicht der Abfallwirtschaft zum GFK-Recycling. Brechen & Sieben Fachaustausch zum End-of-Life von Windenergieanlagen. Proceedings, Bremen, 04. September 2018

- [39] SCHLIEPHAKE, M.; SCHLIEPHAKE, H.: CFK-Abfall als Primärkohleersatz in der Stahlerzeugung. Thementag CFK Verwertung, Proceedings, Augsburg, 28.09.2017
- [40] WALTER, T.: CFK-Abfall als Rohstoff in der Calciumcarbidproduktion. Thementag CFK Verwertung, Proceedings, Augsburg, 28.09.2017
- [41] MARTENS, H.; GOLDMANN, D.: Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Aufl. Wiesbaden Springer Vieweg, 2016
- [42] YANG, Y.; BOOM, R.; IRION, B.; VAN HEERDEN, D.-J. et al.: Recycling of composite materials. Chemical Engineering and Processing, 51 (2012), S. 53-68
- [43] LIU, Y.; FARNSWORTH, M.; TIWARI, A.: A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: State-of-the-art and steps towards a research agenda. Journal of Cleaner Production, 140 (2017), S. 1775-1781
- [44] SEILER, E.; STARK, A.; FORBERGER, J.: Recycling von Textilien aus carbonfaserverstärkten Kunststoff-Bauteilen und deren Produktion. Chemie Ingenieur Technik, 88 (2016), Nr. 4, S. 500-505
- [45] EMMERICH, R.; KUPPINGER, J.: Kohlenstofffasern wiedergewinnen: Welches ist der richtige Weg für das Recycling von CFK?, Kunststoffe 204 (2014), Nr.6, S.92-97, ISSN: 0023-5563
- [46] ORZOL, Carsten: Untersuchungen zur elektrohydraulischen Zerkleinerung von Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Resins für das Carbonfaser-Recycling, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2018
- [47] MANIS, F.; WÖLLING, J.; SCHNELLER, A.: Ganzheitliche Recycling-Prozesskette für Carbonfasergewebe und Gelege. Lightweight Design. (2016), Nr. 5, S. 14–19
- [48] MORIN, C.; LOPPINET-SERANI, A.; CANSELL, F.; AYMONIER, C. et al.: Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. The Journal of Supercritical Fluids. 66 (2012), S. 232–240
- [49] OLIVEUX, G.; DANDY L. O.; LEEKE, G. A.: Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. Progress in Materials Science. 72 (2015), S. 61–99
- [50] GLÖCKNER, C.: Recycling von Carbonfasern. KunststoffXtra Magazin, 6/2015
- [51] GRECO, A.; MAFFEZZOLI, A.; BUCCOLIERO, G. et al.: Thermal and chemical treatments of recycled carbon fibers for improved adhesion to polymeric matrix. Journal of Composite Materials 2013; 47(3): S. 369-377. DOI: 10.1177/0021998312440133
- [52] KARGER-KOCSIS, J.; MAHMOOD, H.; PEGORETTI, A.: Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. Progress in Materials Science 2015; 73: S. 1-43. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.003
- [53] COPPONNEX, T.J.: Analysis and evaluation of the single fibre fragmentation test. Composites Science and Technology 1996; 56(8): S. 893–909. DOI: 10.1016/0266-3538(96)00049-8
- [54] KRUPPKE, I.: Entwicklung von Methoden zur Realisierung von maßgeschneiderten Adhäsionseigenschaften von faserbasierten Hochleistungswerkstoffen für Composites. Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik TU Dresden, Dissertation, 2018
- [55] MAZUMDAR, S.K.: Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering. Taylor & Francis Inc, 2002, ISBN-10: 0849305853
- [56] CALIENDO, H.: Dell, Sabic to recycle excess carbon fiber into new Dell products. CompositeWorld. 10/2015
- [57] SAMBALE, H.: Zweites Leben für Carbonfasern. Kunststoffe.de, 09.2015
- [58] CONNOR, M. L.: Characterization of Recycled Carbon Fibers and Their Formation of Composites Using Injection Molding. North Carolina State University, Master Thesis, 2008

- [59] SIGMUND, I.: Längeres Leben. Sekundär-Roving aus recycelten Carbonstapelfasern. Carbon Composites Magazin, (2016)1, S. 25-26
- [60] HOFMANN, M.; GULICH, B.: Leichtbau mit Faservliesstoffen - ein umsetzbares Recyclingkonzept für Carbonabfälle. Proceedings 8th Aachen-Dresden International Textile Conference, Dresden, 27.11-28.11.2014, S. 111
- [61] DAUNER, M.; BAZ, S.; GEIER, M.; GRESSER, G.T.: Rahmenbedingungen für die Verarbeitung von Carbonfasern durch Krempeltechnik. Hofer Vliesstofftage 2016
- [62] SCHNEIDERS, S.: Recycling of carbon fibres – potenzials and approaches for reuse. In: Tagungsunterlagen 53. Chemiefasertagung Dornbirn, Dornbirn (Österreich), 10.09.-12.09.2014
- [63] SCHLICHTER, S.: Production and recycling of composites with the focus on carbon. In: Internetdatenbank. VDMA Symposium Composite Europe, Stuttgart, 18.09.2013
- [64] Abschlussbericht AiF IGF 18717 BG - FullCycle - Faserlängenoptimierter Recyclingprozess zur Herstellung von Carbonfaser-Mehrschicht-Organoblechen mit hoher Oberflächengüte, 2017
- [65] MÖBITZ, C.; CLOPPENBURG, Frederik.: MAI RecyTape - Prozesslinie zur Herstellung von Tapes aus hochorientierten Recycling-Carbonfasern, Abschlussbericht, 2017
- [66] MANKIEWICZ, J.: Reinforcement of epoxy resin with recycled carbon fibres using wet-laid process. Tagung GoCarbonFibre 2017, München, 2017
- [67] MANKIEWICZ, J.: Herstellung, Modifikation und Anwendung faserverstärkter Duromere unter Einsatz von Vlies aus Carbonfaser-Rezyklat. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2019.
- [68] JEHLE, V.: Möglichkeiten der Verarbeitung von Recyclingmaterial mittels nichtkonventioneller Vliesstofftechnologien – Einsatzmöglichkeiten der Fiber Injektion Moulding- und Nassvliestechnologie. Hochschule Reutlingen Fachtagung Composite Recycling & LCA, 8/9.3.2017 Stuttgart
- [69] WARRIOR, N.A.; TURNER, T.A.; PICKERING, S.J.: Composites Recycling Solutions- Opportunities for the re-use of carbon fibre recovered from polymer composite waste. Fachtagung Composite Recycling, 25.3.2015 Stuttgart
- [70] WARRIOR, N.A.; TURNER, T.A.; PICKERING, S.J.: AFRECAR and HIRECAR Project results. Carbon Fibre Recycling and Reuse 2009 Conference, InterechPira, Hamburg, 2009
- [71] Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von einem faserverstärkten Verbundwerkstoff, DE 102008048334 A1, Veröffentlichungsdatum: 1.4.2010
- [72] Abschlussbericht AiF IGF-Vorhaben 15692. Verstärkte Folien mit rezyklierten Kohlenstofffasern (Organofolien), 2010
- [73] BARNES, F.: Carbin fibre recycling: An industry whose time has come. Tagung GoCarbonFibre 2017, München, 2017
- [74] <https://carbonconversions.com/> [Zugriff am 27. November 2019]
- [75] <https://www.sigmatex.com/recycled-fabrics> [Zugriff am 27. November 2019]
- [76] KNOF, M.: Leichtbau durch Isotropes Carbonfaservlies. Hofer Vliesstofftage 2014, Hof, 2014
- [77] HOFMANN, M.: Wiedereinsatzmöglichkeiten rezyklierter Carbonfasern, Textilplus Zeitschrift, 03/04. 2016
- [78] SIGMUND, I.: Herstellung band- und garnförmiger Strukturen aus rCF. STFI-Seminar Carbonrecycling, Chemnitz, 13.06.2017
- [79] POEPEL, A. et al.: Recycling langer Kohlenstofffasern. München, Carl Hanser Verlag, Kunststoffe 5/2018

- [80] Abschlussbericht AiF IGF 18928 BG - Erforschung eines Verfahrens zur Konsolidierung von Carbonfasertapes aus recycelten Carbonfasern zur Herstellung von Faserverbundbauteilen, 2018
- [81] WEGENER, W.: Die Streckwerke der Spinnereimaschinen, Berlin: Heidelberg [u.a.]: Springer, 1965
- [82] JEHL, V.: Analyse der Faservereinzelung im Kardierprozeß zur Vermeidung einer Faserschädigung, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2002
- [83] SVOBODA, Alois.: Für den Meister und seinen Nachwuchs II. Die Kardiererei. Lenzinger Berichte, Juli 1961, Folge 10
- [84] HOLLMANN, R.: Die Kremperei der Streichgarnspinnerei einschließlich ihrer Vorbereitung. Verlag: Fachbuchverlag Leipzig, 1957
- [85] KLEIN, W.: The Rieter Manual of Spinning, Volume 2 - Blowroom and Carding, Rieter Machine Works Ltd, ISBN 10 3-9523173-2-2
- [86] Gespräch mit der Firma Graf Kratzen
- [87] CARNABY, G. A.: Fiber Breakage During Carding: Part I: Theory. Textile Research Journal, 54(6) (1984). S. 366–369. <https://doi.org/10.1177/004051758405400602>
- [88] WOOD, E. J.; STANLEY-BODEN, P.; CARNABY, G. A.: Fiber Breakage During Carding: Part II: Evaluation. Textile Research Journal, 54(7) (1984), S. 419–424.
- [89] CARNABY, G. A., BURLING-CLARIDGE, G. R.: Carding of Tender Wool: Part I: Theory. Textile Research Journal, 66(2), (1996), S. 90–98. <https://doi.org/10.1177/004051759606600205>
- [90] BURLING-CLARIDGE, G. R.: Carding of Tender Wool: Part II: Evaluation of the Model. Textile Research Journal, 66(3), (1996), S. 141–150. <https://doi.org/10.1177/004051759606600303>
- [91] ROHDE-TIBITANZL, M.: Direct Processing of Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composites and their Mechanical Behavior under Static and Dynamic Load. München, Hanser Verlag, Dissertation 2015, ISBN 978-1-56990-629-3
- [92] SALINAS, A.; PITTMAN, J.F.T.: Bending and Breaking fibers in Sheared Suspensions. Polymer, Engineering and Science, 21 (1981) 1, S. 23
- [93] FORGACS, O.L.; MASON, S.G.: Particles motion in sheared suspensions: IX. Spin and deformation of threadlike particles. Journal of Colloid Science 14 (1959), S. 457-472
- [94] KLEIN, W.: The Rieter Manual of Spinning, Volume 1 - Technology of Short-staple Spinning, Rieter Machine Works Ltd, ISBN 10 3-9523173-1-4
- [95] WOLF, H.J.: Zum Einfluss der Schneckenplastifizierung auf die Faserstruktur diskontinuierlich langglasfasergefüllter Kunststoffe, Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1996
- [96] THOMASSET, J.; GRMELA, M.; CARREAU, P.J.: Microstructure and rheology of polymer melts reinforced by long glass fibers: Direct Simulations. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 73 (1997), S. 195-203
- [97] FAHRBACH, R.: Die Kammgarnspinnerei. Stuttgart, Konradin-Verlag, 1958
- [98] KLEIN, W.: The Rieter Manual of Spinning, Volume 3 - Spinning preparation, Rieter Machine Works Ltd, ISBN 10 3-9523173-3-0
- [99] CHERIF, C.: Analyse der Verzugsvorgänge auf Hochleistungsstrecken und deren Auswirkungen auf die nachfolgenden textilen Prozessstufen. Shaker, ITA Aachen, Habilitation, 2001, ISBN 3-8265-9614-5
- [100] WATANABE, S.: Slipping of Fibers in a Sliver when Passing through the Rollers of Spinning Frame. J. Text. Mach. Soc. Japan 2 (1956) No. 2, 36
- [101] LÜNENSCHLOSS, J., HELLI, J.G.: Einfluß der Zylinderbelastung an der Ringspinnmaschine bei unterschiedlicher Härte des Zylinderbezuges, variiertes Vorgarndrehung, Vorgarndublierung

- und Verzugshöhe auf den Ausfall der Garne aus verschiedenen Faserstoffen. Textil-Praxis 19 (1964), S. 903-993
- [102] VALOTA, A.: Le controle des fibres au laminage. L'Industrie Textile 862 (1958)
- [103] DAKIN, G., FOSTER, G.A.R.; LOCKE, J.: Roller Slip and the Irregularity of Cotton and Rayon-Staple Drawdrame Slivers. Part I: Practical and Experimental. J. Text. Inst. 44 (1953) T 544
- [104] HASCHKE, A. J.: Eine Studie über die Streckwerke der Baumwollspinnerei. Deutsche Textiltechnik 7(1957) S. 633; 8(1958) S. 437, 580
- [105] BALLS, W. L.: Studies of Quality in Cotton. London, 1928, Ch. VIII
- [106] GOODINGS, A. C.: Roller Drafting in the Worsted Industry. J. Text. Inst. 22 (1931) T 1
- [107] FOSTER, G. A. R.: The Causes of the Irregularity of Cotton Yarns. J. Text. Inst. 41 (1950) P 357
- [108] MARTINDALE, J. G.: A New Method of Measuring the Irregularity of Yarns with Some Observations on the Origin of Irregularities in Worsted Slivers and Yarns. J. Text. Inst. 36 (1945) T 35
- [109] MARTINDALE, J. G.: A Review of the Causes of Yarn Irregularity. J. Text. Inst. 41 (1950) P 340
- [110] IKEDA, A., KINOSHITA, R.; OKANO, J.: Staple Diagram and Roller Drafting. J. Text. Mach. Soc. Japan 3 (1957) No. 1, 22
- [111] STALDER, H.: The Rieter Manual of Spinning, Volume 6 - Alternative Spinning Systems, Rieter Machine Works Ltd, ISBN 10 3-9523173-6-5
- [112] WULFHORST, B. (Hrsg.): Textile Fertigungsverfahren ISBN 3 -446-19187-9, Carl Hanser Verlag München Wien, 1998
- [113] HEARLE, J.W.S.; GROSBERG, P.; BACKER, S.: Structural mechanics of yarns and fabrics. Vol 1, New York: Wiley-Interscience, ASIN: B007EHV63W, 1969
- [114] GRISHIN, P. F.: Ungleichmäßigkeit und Verzugsverfahren - Der ideale Verzug. Textil-Praxis 19 (1964)
- [115] YAMAGISHI, T., KOMOYAMA, E.; KUROE, H.: A Theoretical Approach to the Unstationary Roller Draft. J. Text. Mach. Soc. Japan 2 (1956) No. 2, 38
- [116] BALASUBRAMANIAN, N.; IYENGAR, R.L.N.: A Study of the Relationship of Yarn Irregularity with Fibre Properties and its Effect on Yarn Strength. Indian Text. J. (1961) S. 561
- [117] WEGENER, W.; ROSEMANN, W.: Die Verteilung der Langfasern bei der gekämmten Wolle. Melliand Textilberichte, Nr. 40 (1959)
- [118] Uster. Statistics Application Handbook, Edition 2013. Textile Technology / V1.0 / January 2013 / 240 840-1402
- [119] REUMANN, R.D.: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2000
- [120] Uster. AFIS: Applications for Length Module. Uster Quality Management Studies Nr. 6, 3/1997
- [121] ARTZT, P.; SCHREIBER, O.: Faserbeanspruchung an Hochleistungskarden durch den Vorreißer bei Produktionen oberhalb 30 kg/h. Melliand Textilberichte, Nr. 2/1973, S.107-115
- [122] ARTZT, P.; SCHREIBER, O.: Bestimmung der Abhängigkeiten der Kardierkraft an Hochleistungskarden bei Produktionen über 30 kg/h. Melliand Textilberichte, Nr. 4/1974, S. 317-323
- [123] SVOBODA, Alois.: Für den Meister und seinen Nachwuchs III. Die Strecke. Lenzinger Berichte, Dezember 1961, Folge 11
- [124] VON BERGEN, W.; WAKELIN, J.H.: Properties of Apparel Wools. Text.Res. J. 22 (1952) 124
- [125] MCLEAN, H.: Wool Rec. 90 (1956) S. 316
- [126] GEUS, L. H. D.: Merino Breeder Journal 14 (1952) No. 1, S. 22
- [127] GROVER, E. B.; HAMBY, D.S.: Text. Ind. J. 117 (1953) No. 8, S.114
- [128] MARTINDALE, J. G.: Wool Research 6, S. 62
- [129] GUPTA, B. S.: Friction in textile materials, Woodhead Publishing series in textiles; number 78, 2008

- [130] SCARDINO F. L.: Surface geometry of synthetic fibers, Surface characteristics of fibers and textiles, Schick M. J. (Hrsg.), Fiber science series, Part I, Marcel Dekker, NY and Basel, S.165-191,1975
- [131] JEESHAN, M.M.R., ISLAM, M.T., FARUQUI M.R., SHAHED M.A.M.: Comparative studies among polyester/cotton blend yarns with varying polyester percentage. Project work
- [132] ALAGIRUSAMY, R.; DAS, A.: Property Enhancement through Blending, Deopura, B. L., Alagirusamy, R., Gupta, S. and Joshi, M. (Hrsg.), Polyester and Polyamides, Woodhead, Cambridge, UK, (2008) S. 219-231
- [133] SHAD, S.S.; JAVED, M.I.: Impact of Blending Ratio and Techniques on the Quality Characteristics of 24's Polyester Cotton Yarn, Pakistan Textile Journal, Vol 19, No 19, (2006) S. 29-30
- [134] DIN 53808-1- Prüfung von Textilien, Längenbestimmung an Spinnfasern, Einzelfaser-Messverfahren
- [135] ISO 6989:1981-05- Textile Fasern; Bestimmung der Länge und der Längenverteilung von Stapelfasern (durch Messung an Einzelfasern)
- [136] ANDERSON, S.L.; PALMER R.C.: A MACHINE FOR MEASURING THE LENGTH OF SINGLE FIBRES. Journal of the Textile Institute Transactions 1953, 44:3, T95-T115, DOI: [10.1080/19447025308659733](https://doi.org/10.1080/19447025308659733)
- [137] BRAGG, C.K.; SHOFNER, F.M.: A Rapid, Direct Measurement of Short Fiber Content. Textile Research Journal 1993; 63-3: S. 171-176
- [138] Uster. Technical Data AFIS PRO 2, April 2015
- [139] MÜSSIG, J.; AMADUCCI, S.: Scanner based image analysis to characterise the influence of agronomic factors on hemp (*Cannabis sativa* L.) fibre width. In: Industrial Crops and Products 2018; 113: S. 28 - 37. ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcr.op.2017.12.059>
- [140] FANG, D.D.: Cotton Fiber: Physics, Chemistry and Biology. Springer International Publishing, 2018. ISBN 9783030008703, DOI: 10.1007/978-3-030-00871-0
- [141] WHAN, R.: Fibre-Length Variation in greasy wool. The Journal of The Textile Institute 1972; 63-2: S. 84-90
- [142] HEMSTREET, J.M.; KROWICKI, R.S.: Analysis of Known Fiber Arrays by the Peyer Texlab System. Textile Research Journal 1991; 61- 4: S. 223-226
- [143] IWTO 16-67. Method of Test for Wool Fibre Length using a WIRA Fibre Diagram Machine
- [144] HERTEL, K.L.: A Method of Fibre-Length Analysis Using the Fibrograph. Textile Research Journal 1940; 10-12: S. 510-520
- [145] WU, H.Y.; WANG, F.M.: Image measuring method for fiber length measurements. Indian J Fibre Text 2013; 64: S. 321–326
- [146] WU, H.Y.; WANG, F.M.: Dual-beard sampling method for fibre length measurements. Indian J Fibre Text 2014; 39: S. 72–78
- [147] GIBSON, L.: HVI short fiber content measurement. In: proceedings of the 1999 beltwide cotton production conference, National Cotton Council, Orlando, FL, 3-7 January 1999, S. 1406–1407.
- [148] STRONG, F.C.: Theoretical Basis of Bouguer-Beer Law of Radiation Absorption. Analytical Chemistry 1952; 24 (2): S. 338-342. DOI: 10.1021/ac60062a020
- [149] WU, M.; WANG, F.: Optical algorithm for calculating the quantity distribution of fiber assembly. Appl. Opt. 2016; 55: S. 7157-7162
- [150] Uster. Technical Data HVI 1000, November 2017
- [151] WU, M.; ZHANG, J., WANG, F.: Calculation method of a random beard fibrogram based on the derived Kubelka–Munk theory. Textile Research Journal, 2019, 89(12), 2281–2293. <https://doi.org/10.1177/0040517518790969>

- [152] JIN, J.; XU, B.; WANG, F.: Measurement of short fiber contents in raw cotton using dual-beard images. *Textile Research Journal* 2018; 88(1): S. 14–26. DOI: 10.1177/0040517516673333
- [153] Uster. Brochure, AFIS PRO 2, 2016
- [154] Uster. Brochure, HVI 1000, 2013
- [155] CHU, Y.T.; RILEY C.R.: New Interpretation of the Fibrogram. *Textile Research Journal* 1997; 67(12): S. 897–901. <https://doi.org/10.1177/004051759706701206>
- [156] KROWICKI, R.S.; HEMSTREET, J.M.; DUCKETT, K.E.: Different approach to generating the fibrogram from fibre-length array data- part I: theory. *Journal of the Textile Institute*. Part1 1997; 88 (1): S. 1-4
- [157] KROWICKI, R.S.; HEMSTREET, J.M.; DUCKETT, K.E.: A different approach to generating the fibrogram from fibre-length-array data- part II: application, *Journal of the Textile Institute*. Part 1 1998; 89 (1): S.1-9
- [158] KROWICKI, R.S.; DUCKETT, K.E.: An examination of the fibrogram. *Textile Research Journal* 1987; 57 (4): S. 200-204
- [159] Textechno. Bedienungsanleitung, Lengthcontrol TC-LCT Type-Nr. 7860000, April 2006
- [160] LAWRENCE, C.A.: *Fundamentals of Spun Yarn Technology*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2003, S. 30. ISBN 9781566768214
- [161] RASBAND, W.S.: ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2018
- [162] KROWICKI, R.S.; THIBODEAUX, D.P.: Holding Length: Effect on Digital Fibrograph Span Length. *Textile Research Journal* 1990; 60(7): S. 383–388. DOI: 10.1177/004051759006000703
- [163] DIN 53362:2003-10 - Prüfung von Kunststoff-Folien und von textilen Flächengebilden (außer Vliesstoffe), mit oder ohne Deckschicht aus Kunststoff - Bestimmung der Biegesteifigkeit - Verfahren nach Cantilever
- [164] DIN EN ISO 5079 Textilien - Fasern - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung an Spinnfasern (ISO 5079:1995)
- [165] KRUPPKE, I.; SCHEFFLER, C.; SIMON, F.; HUND, R.-D.; CHERIF, C.: Surface Treatment of Carbon Fibers by Oxy-Fluorination. *Materials*, 2019, 12, S. 565; DOI:10.3390/ma12040565
- [166] KRUPPKE, I.; BARTUSCH, M.; HICKMANN, R.; HUND, R.D.; CHERIF C.: Effects of (Oxy-) Fluorination on Various High-Performance Yarns. *Molecules*, 2016, 21, S. 1127; DOI:10.3390/molecules21091127
- [167] WU, S.: *Polymer interface and adhesion*. 1st ed. New York: Marcel Dekker, 1982
- [168] GAO, S.; MÄDER, E.; ZHANDAROV, S.: Carbon fibers and composites with epoxy resins: Topography, fractography and interphases. *Carbon*, 2004, 42: S. 515-529. DOI: 10.1016/j.carbon.2003.12.085
- [169] SCHEFFLER, C.; ZHANDAROV, S.; MÄDER, E.: Alkali resistant glass fiber reinforced concrete: Pull-out investigation of interphase behavior under quasi-static and high rate loading. *Cement and Concrete Composites* 2017; 84: S. 19-27. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.08.009
- [170] NAIRN, J.A.: Analytical fracture mechanics analysis of the pull-out test including the effects of friction and thermal stresses. *Advanced Composite Letters* 2000; 9(6), S. 373–383. DOI: 10.1177/096369350000900601
- [171] ZHANDAROV, S.; MÄDER, E.: Determining the interfacial toughness from force-displacement curves in the pull-out and microbond tests using the alternative method. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2016; 65: S. 11-18. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.10.020
- [172] DIN EN ISO 10548:2003-12- Kohlenstofffasern - Bestimmung des Präparationsmassenanteils (ISO 10548:2002); Deutsche Fassung EN ISO 10548:2003

- [173] LINDSLEY, C. H.: Measurement of Fiber Orientation. *Textile Research Journal*, 21(1), (1951), S. 39–46. <https://doi.org/10.1177/004051755102100109>
- [174] ISO 3341:2000-05- Textilglas - Garne - Bestimmung der Reißkraft und Bruchdehnung
- [175] DIN EN ISO 527-5 - Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5:2009)
- [176] DIN EN ISO 1172:1998-12-Textilglasverstärkte Kunststoffe - Prepregs, Formmassen und Lamine - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts; Kalzinierungsverfahren (ISO 1172:1996)
- [177] RAMANATHAN, T.; BISMARCK, A.; SCHULZ, E. et al.: Investigation of the influence of acidic and basic surface groups on carbon fibres on the interfacial shear strength in an epoxy matrix by means of single-fibre pull-out test. *Composites Science and Technology* 2001; 61(4): S. 599–605. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00239-6
- [178] Rieter. Bedienungsanleitung. Strecke RSB-D 40 V2, 07.09.2007-de-02
- [179] Rieter. Bedienungsanleitung. Flyer F15/F35, Sep. 2004
- [180] HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.; SPENNATO, F.: Fibre Hybrid Composites Consisting of Discontinuous Waste Carbon Fibre and Continuous Glass Filaments Developed for Load-Bearing Structures with Improved Impact Strength, *Composites Part A*, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105610>
- [181] GUDE, M.; MODLER, N.; CHERIF, C. et. al.: 3DProCar - Flexible Prozessketten für thermoplastische integral gefertigte FKV-Bauteile mit komplexer Geometrie. Abschlussbericht, 2019
- [182] HENGSTERMANN, M.; KOPELMANN, K.; NOCKE, A.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites. Part IV: Measurement of recycled carbon fibre length, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* (eingereicht)
- [183] KHURSHID M. F.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Recent Developments in the Processing of Waste Carbon Fiber for Thermoplastic Composites. *Journal of Composite Materials* (2019). <https://doi.org/10.1177/0021998319886043>
- [184] HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; SCHEFFLER, C.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites. Part III: Influence of sizing on textile processing and composite properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* (2019) <https://doi.org/10.1177/0892705719847240>
- [185] HASAN, M.M.B., NITSCHKE, S., ABDKADER, A., CHERIF, C.: Influence of process parameters on the tensile properties of DREF-3000 friction spun hybrid yarns consisting of waste staple carbon fiber for thermoplastic composites. *Textile Research Journal*, 89(1), 32–42. (2019) <https://doi.org/10.1177/0040517517736472>
- [186] HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibers (rCF) for high-performance composites. Part-II: Influence of yarn parameters on tensile properties of composites. *Textile Research Journal*, 87(13): S. 1655-1664. (2016) <https://doi.org/10.1177/0040517516658511>
- [187] HENGSTERMANN, M.; RAITHEL, N.; ABDKADER, A.; HASAN, M.M.B.; CHERIF, C.: Development of new hybrid yarn construction from recycled carbon fibers for high performance composites. Part-I: Basic processing of hybrid carbon fiber/polyamide 6 yarn spinning from virgin carbon fiber staple fibers. *Textile Research Journal*, 86(12): S. 1307-1317. (2016) <https://doi.org/10.1177/0040517515612363>

- [188] HASAN, M. M. B.; HENGSTERMANN, M.; DILLO, R.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Investigations on the manufacturing and mechanical properties of spun yarns made from staple CF for thermoset composites. *Autex Research Journal* (2016), <https://doi.org/10.1515/aut-2016-0034>
- [189] HENGSTERMANN, M.; BARDL, G.; RAO, H.; ABDKADER, A.; HASAN, M. M. B.; CHERIF, C.: Development of a method for characterization of the fiber length of long staple carbon fibers based on image analysis. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 4(118): S. 39-44. (2016) DOI: 10.5604/12303666.1207845
- [190] HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Influence of fibre length and preparation on mechanical properties of CF/polyamide 6 hybrid yarns and composites. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 5(119): S. 55-62. (2016) DOI: 10.5604/12303666.1215528
- [191] HENGSTERMANN, M.; RAITHEL, N.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of staple hybrid yarn from carbon fiber wastes for lightweight constructions. *Materials Science Forum*, 20th Symposium on Composites, S. 695-698 (2015) <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.695>
- [192] HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.; WEBER, D.; GEIER, M.; FLACHENECKER, A.: Industrial manufacturing of hybrid yarns made of recycled carbon fibres for thermoplastic composites. *SAMPE Europe Conference & Exhibition 2017 Proceedings*, Stuttgart, (2017) ISBN: 9781510861282
- [193] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Hybridvliese aus recycelten Carbonfasern, *AVR Allgemeiner Vliesstoffreport*, 4, S. 50-51 (2017)
- [194] ABDKADER, A.; HENGSTERMANN, M.; CHERIF, C.: Innovative Hochleistungshybridgarne aus recycelten Carbonfasern für Leichtbaustrukturen/Innovative high-performance hybrid yarns made from recycled carbon fibers for lightweight structures. *Technische Textilien/Technical Textiles* 60 (2017)1, S. 18-20/*Chemical Fibers International* 67(2017)2, S. 153-155
- [195] ABDKADER, A.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; HOSSAIN, M.; CHERIF, C.; WEBER, D.: Spinnverfahren zur Herstellung von Hybridgarne aus recycelten Carbonfasern für CFK-Bauteile/ Evaluation of spinning methods for production of hybrid yarns from rCF for CFRP components. *Technische Textilien/ Technical Textiles* 60(2017)4, S. 23-24/*Melliand International* 23 (2017)4, S. 196-200
- [196] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; RAITHEL, N.; CHERIF, C.: Schonende Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonstapelfasern zur anschließenden Verspinnung / Production of high quality carded webs from recycled carbon staple fiber for subsequent spinning. *Technische Textilien/Technical Textiles* 58(2015)1, S. 37-38 /S. E28-E29; *Melliand Textilberichte* 96(2015)2, S. 76-77
- [197] CHERIF C.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.: Practical technologies for the development of fiber-based high-performance structures of recycled carbon fibers and thermoplastic fibers for the cost-effective serial production of lightweight structures with high performance. *European Scientific Exchange Meeting and discussion on Circular Economy and Recycling of Technical Textiles*, Frankfurt/Main, 2018
- [198] HASAN, M.M.B.; HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of yarn structures consisting of recycled carbon fibre (rCF) for the application in thermoset composites. *57th Dornbirn Global Fiber Congress*, Dornbirn, 2018
- [199] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Prozessanforderungen an die Herstellung von rC-Hybridgarn und Anwendungen. *69. BHT Freiburger Universitätsforum*, Freiberg, 2018
- [200] HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.; WEBER, D.; GEIER, M.; FLACHENECKER, A.: Industrial manufacturing of hybrid yarns made of recycled carbon fibres for thermoplastic composites; *SAMPE Europe Conference*, Stuttgart, 2017

- [201] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; HASAN, M.M.B.; CHERIF, C.: Reuse of recycled carbon fibers in CFRP for maximum performance. GoCarbonFibre Konferenz, München, 2017
- [202] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; HASAN, M.M.B.; CHERIF, C.: Industrielle Fertigung von Garnkonstruktionen aus Recycling-Kohlenstofffasern für Verbundstoffe / Industrial manufacturing of yarn constructions made of recycled carbon fibers for composites. Techtexil-Symposium 2017, Frankfurt/Main, 2017
- [203] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Hybridgarnkonstruktionen aus recycelten Carbonstapelfasern für hochbelastbare CFK-Bauteile. FOREL Akademie, Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität. "CFK, Aluminium und Co. - Wie kann man Leichtbaustrukturen recyceln?", Freiberg, 2016
- [204] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Entwicklung von Prozessen zur Herstellung von Garnen aus recycelten Carbonfasern für die Wiederverwendung in lasttragenden CFK-Bauteilen. 12. STFI-Kolloquium "recycling for textiles", Chemnitz, 2015
- [205] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of spun yarn made from recycled carbon fibers for reuse in load-bearing components. Speakers Platform ITMA 2015, Mailand, 2015
- [206] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: New yarn constructions from recycled carbon staple fibers and thermoplastic fibers for composite. 54. Chemiefasertagung Dornbirn, Dornbirn, 2015
- [207] HENGSTERMANN, M.; RAITHEL, N.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of staple hybrid yarn from carbon fiber wastes for lightweight constructions. 20. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien, 2015
- [208] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Production of innovative spun hybrid yarns made from recycled carbon fibers for high strength CFRP. 15th AUTEX World Textile Conference 2015, Bukarest, 2015
- [209] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; RAITHEL, N.; CHERIF, C.: Anpassungsmöglichkeiten einer Walzenkreppe zur Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonfasern für die anschließende Verspinnung. 29. Hofer Vliesstofftage 2014, Hof, 2014
- [210] ABDKADER, A.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; CHERIF, C.: Achievements in the development of fibrous structures from recycled carbon fibres at the ITM. Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Stuttgart, 2017
- [211] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of secondary and recycled carbon fibers for load-bearing carbon fiber reinforced plastics. Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Dresden, 2016
- [212] HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of carded webs made from recycled carbon fibers for subsequent spinning for a usage in structural CFRC parts. Aachen-Dresden International Textile Conference, Dresden, 2014
- [213] BAZ, S.; GOERGEN, C.; MITSCHANG, P.; GRESSER, G.T.: Innovative Textilstrukturen aus recycelten Kohlenstoff-Stapelfasern, Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference 2016 Dresden
- [214] BONTEN, C.; WELLEKÖTTER J.; BAZ, S.; SCHWINGEL, J.: Resource efficient production of lightweight materials - a new approach minimalizes downgrading, Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Stuttgart, 2017
- [215] SIGMUND, I.: Herstellung band- und garnförmiger Strukturen aus rCF, STFI-Seminar Carbonrecycling, Chemnitz, 13.06.2017
- [216] AKONDA, M.H.; LAWRENCE, C.A.; WEAGER, B.M.: Recycled carbon fibre-reinforced polypropylene thermoplastic composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, (43)1,2012, S. 79-86

- [217] GOERGEN, C., SCHOMMER, D., DUHOVIC, M., MITSCHANG, P.: Deep drawing of organic sheets made of hybrid recycled carbon and thermoplastic polyamide 6 staple fiber yarns. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, (2018), <https://doi.org/10.1177/0892705718811407>
- [218] KELLY, A.; TYSON, W.R.: Tensile properties of fibre-reinforced metals: Copper/tungsten and copper/molybdenum. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1965; 13(6): S. 329-338. DOI: 10.1016/0022-5096(65)90035-9
- [219] COX, H.L.: The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British Journal of Applied Physics* 1952; 3(3): S. 72. DOI: 10.1088/0508-3443/3/3/302
- [220] THOMASON, J.L.; VLUG, M.A.: Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: 1. Tensile and flexural modulus. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1996; 27(6): S. 477–484. DOI: 10.1016/1359-835X(95)00065-A
- [221] THOMASON, J.L.; VLUG, M.A.; SCHIPPER, G. et al.: Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: Part 3. Strength and strain at failure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1996; 27(11): S. 1075-1084. DOI: 10.1016/1359-835X(96)00066-8
- [222] THOMASON, J.L.: The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2002; 33(12): S.1641–1652. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00179-3
- [223] MADSEN, B.; HOFFMEYER, P.; THOMSEN, A.B.; LILHOLTA, H.: Hemp yarn reinforced composites-I. Yarn characteristics. *Compos Part A* 2007; 38: S.2194-2203
- [224] ZHANG, L.; MIAO, M.: Commingled natural fibre/polypropylene wrap yarns for structured thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*. 70(2010), S. 130-135
- [225] SHAH, D.U.; SCHUBEL, P.J.; CLIFFORD, M.J.: Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites. *Journal of Composite Materials* 2013; 47(4): S. 1–12. DOI: 10.1177/00219983124440737
- [226] MA, H.; LI, Y.; WANG, D.: Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2014. Vol. 33(7), S. 687-696
- [227] PAN, N.: Development of a constitutive theory for short fiber yarns: Part III: effects of fiber orientation and bending deformation. *Textil Res J* 1993; 63(10), S. 503–517
- [228] PAN, N.: Development of a constitutive theory for short fiber yarns: mechanics of staple yarn without slippage effect. *Textil Res J* 1992; 62: S. 749–765
- [229] HULL, D.: An introduction to composite materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1981, ISBN 0-521-28392-2
- [230] MADSEN, B.; THYGESEN, A.; LILHOLT, H.: Plant fibre composites - porosity and stiffness. *Compos Sci Technol* 2009, 69(7–8), S. 1057–69
- [231] SUMMERSCALES, J. et al.: A review of bast fibres and their composites. Part 2 - Composites. *Compos Appl Sci Manuf* 2010; 41: S. 1336–1344
- [232] PADGETT, W. J., DURHAM, S. D., MASON, A. M.: Weibull Analysis of the Strength of Carbon Fibers Using Linear and Power Law Models for the Length Effect. *Journal of Composite Materials*, 1995, 29(14), S. 1873-1884. <https://doi.org/10.1177/002199839502901405>
- [233] GULINO, R.; PHOENIX, S.L.: Weibull strength statistics for graphite fibres measured from the break progression in a model graphite/glass/epoxy microcomposite, *J Mater Sci* (1991) 26: S. 3107. <https://doi.org/10.1007/BF01124848>

- [234] BEYERLEIN, I.J.; PHOENIX, S.L.: Statistics for the strength and size effects of microcomposites with four carbon fibers in epoxy resin. *Composites Science and Technology*, 56(1), 1996, S. 75-92, ISSN 0266-3538, [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00131-X](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00131-X)
- [235] DURHAM, S. D., LYNCH, J. D., PADGETT, W. J., HORAN, T. J., OWEN, W. J., SURLS, J.: Localized Load-Sharing Rules and Markov-Weibull Fibers: A Comparison of Microcomposite Failure Data with Monte Carlo Simulations, *Journal of Composite Materials*, 31(18) (1997), S. 1856-1882. DOI: 10.1177/002199839703101805
- [236] CURTIN, W. A.: Tensile Strength of Fiber-Reinforced Composites: III. Beyond the Traditional Weibull Model for Fiber Strengths. *Journal of Composite Materials*, 34(15), (2000) S. 1301–1332. <https://doi.org/10.1177/002199830003401503>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Entwicklung des globalen CF-Bedarfes in Tsd. t vom Jahr 2010 bis 2022 [1] (*Schätzungen; 11/2018).....	1
Abbildung 1-2:	Spritzgegossene Pedalen (links) und Vliesstoffdach (rechts) aus recycelten Carbonfasern für die Automobilindustrie [9]-[10]	2
Abbildung 2-1:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von verschiedenen Hochleistungsfasern [17]	4
Abbildung 2-2:	Verschiedene Varianten von Hybridgarnen, nach [15]	6
Abbildung 2-3:	Herkunft und Aufbereitung von recycelten Carbonfasern	7
Abbildung 2-4:	Bandstruktur aus 100 % rCF (links) [78] und mittels Tapelegen abgelegte rCF-Bandstrukturen (rechts) [79]	12
Abbildung 3-1:	Vereinfachte Prozesskette zur Herstellung von konventionellen Stapelfasergarnen aus Langfasern	15
Abbildung 3-2:	Schematische Darstellung (links) und reale Abbildung (rechts) der eingesetzten Laborkrempel	16
Abbildung 3-3:	Auflösung der Faserflocken zwischen Arbeiter und Tambour (a), Abnahme- und Kardierstellung der Walzengarnituren in einer Krempel (b) [82]	17
Abbildung 3-4:	Ganzstahlgarnitur (links) und flexible Garnitur (rechts) mit zugehörigen Parametern [82]	18
Abbildung 3-5:	Mechanische Belastungen von Fasern im Krempelprozess [87], [89]	19
Abbildung 3-6:	Wirkende Kräfte auf Fasern in einem strömendem Fluid (links) und daraus resultierende, beispielhafte Faserbewegungen (rechts) [92]	20
Abbildung 3-7:	Eingesetzte Kurzstapel-Strecke RSB-D 40 V2 (links) und Prinzipskizze einer Nadelstabstrecke [97] (rechts).....	21
Abbildung 3-8:	Prinzipabbildung der eingesetzten Strecke (links) und des Streckwerks (rechts) [98].....	23
Abbildung 3-9:	Streckwerksunterwalzen mit (a) gerader Riffelung, (b) schräger Riffelung, (c) gekreuzter Riffelung [98]	23
Abbildung 3-10:	Schematischer Aufbau einer Ringspinnmaschine [15]	25
Abbildung 3-11:	Schematischer Aufbau einer Rotorspinnmaschine [15]	26
Abbildung 3-12:	Schematischer Aufbau einer Friktionsspinnmaschine [15] (links), Lufdüsenpinnmaschine [112] (Mitte) und Umwindespinnmaschine [15] (rechts)	27
Abbildung 3-13:	Umgesetzte rCF-Garnkonstruktionen auf der Basis unterschiedlicher Spinnverfahren	28
Abbildung 3-14:	Flyer F15 (links) und Prinzipskizze der Garnverspinnung mittels Flyer (rechts).....	28
Abbildung 3-15:	Garnfestigkeit in Abhängigkeit der Garndrehung bei Stapelfasergarnen aus Polyester (PES) und Baumwolle (Co) nach [94] sowie aus rCF (angenommen)	30
Abbildung 4-1:	Gescannte Bilder von kurzen rCF mit einer Länge von bis zu 10 mm (a) und langen rCF mit einer Länge von bis zu 80 mm (b); die Pfeile deuten exemplarisch auf rCF, deren Faserlänge nicht eindeutig bestimmt werden kann	36
Abbildung 4-2:	Ausgewählte Faserlängenmessverfahren	38
Abbildung 4-3:	Funktionsgraphen P(L), Q(L) und F(L _s) zur Charakterisierung der Faserlängenverteilung	40
Abbildung 4-4:	Hergestellte Faserbärte aus 40 mm rCF mittels Fibrosampler (links) und mittels entwickelter Präparationstechnik (rechts)	40

Abbildung 4-5:	Schema der Längenmessung eines Faserbarts; A: Klemmlinie, B: Pixelwert des markierten Pixels (= 37) und C: Pixelwertsumme bei einer Spannlänge von 28 mm (= 29605)	41
Abbildung 4-6:	Invertierter Faserbart (links) und zugehöriges Histogramm (rechts)	42
Abbildung 4-7:	Typischer Fibrogramm-Graph $F(L_s)$ mit unterschiedlichen Faserlängen in der Probe mit einer ermittelten mittleren Länge ML_F : 49 mm und mittlerer Länge der 50 % längsten Fasern $UHML_F$: 68 mm (a); Theoretischer Fibrogramm-Graph $F(L_s)$ mit nur einer Faserlänge in der gesamten Probe mit einer mittleren Länge (der 50 % längsten Fasern) $(UH)ML_F$: 49 mm (b), gemäß [158]-[159]	42
Abbildung 4-8:	Präparierte Faserbündel mit jeweils ca. 100 (links) und 300 (rechts) Fasern pro Bündel	45
Abbildung 4-9:	Faserbärte mit einheitlicher Faserlänge von 35 mm und unterschiedlichen Bartgewichten: (a) 64,4 mg und (b) 128,5 mg	47
Abbildung 4-10:	Fibrogramm von drei CF-Proben mit jeweils 35 mm Faserlänge und unterschiedlicher Faserzahl bzw. Fasermasse im Bart; das lineare Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 1,00$) ist als gepunktete Linie eingezeichnet	47
Abbildung 4-11:	Bestimmtheitsmaß (R^2) in Abhängigkeit von der Pixelwertsumme bei 4 mm Spannlänge bei unterschiedlichen Faserlängen; die Graphen der polynominalen Regression sind als gepunktete Linien dargestellt	49
Abbildung 4-12:	Exemplarischer Faserbart aus rCF mit unbekannter Faserlänge (links) und gemittelttes Fibrogramm aus allen zehn Proben (rechts)	51
Abbildung 4-13:	Messaufbau zur Faserlängenmessung der rCF	52
Abbildung 4-14:	Durchbiegung eines rCF-Bündels	53
Abbildung 4-15:	Klemmvorrichtung zur Bestimmung der Faserorientierung, mit profiliertem Belag zur Verbesserung der Faserklemmung; Maße: Steg 1: 120 mm x 20 mm; Steg 2: 120 mm x 50 mm	55
Abbildung 5-1:	Kraft-Weg-Verläufe der rCF beim Auszug aus der PA 6-Matrix mittels SFPO-Test	61
Abbildung 5-2:	REM Aufnahmen von den rCF-T, rCF-E und rCF-P vor und nach dem Single-Fiber-Pull-Out-(SFPO-)Test	62
Abbildung 5-3:	Eingesetzte Ganzstahlgarnituren A und B sowie flexible Garniturvariante C	63
Abbildung 5-4:	Abmessungen eines hergestellten Vlieses aus 100 % rCF	65
Abbildung 5-5:	Ungeöffnete (links) und vorgeöffnete (rechts) rCF mit jeweils gleicher Fasermenge	66
Abbildung 5-6:	Mittlere Faserlänge (ML) (a) und Gleichmäßigkeitsindex (UI) (b) der verschiedenen rCF-Varianten nach dem Krempelprozess bei 80 mm Eingangsfaserlänge	67
Abbildung 5-7:	Ergebnisse der Bündelbiegungsprüfung von rCF-T/-E/-P	68
Abbildung 5-8:	Detailaufnahme eines eingescannten rCF-E- und rCF-P-Vlieses	69
Abbildung 5-9:	Pixelwert-Diagramm sowie Mittelwerte der Pixelwerte der gescannten rCF-T/-E/-P-Vliese, vom Pixelwert 0 (reines Schwarz) bis zu 255 (reines Weiß); die gestrichelten Verbindungslinien sind nur zur besseren Übersichtlichkeit dargestellt	69
Abbildung 5-10:	Mittlere Faserlänge und Fasereinkürzung der rCF nach dem Krempelprozess mit den Garnituren A und B bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen	70
Abbildung 5-11:	Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krempelprozess bei einer Motordrehzahl der Krempel von 500 min^{-1} und 1000 min^{-1} bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen	71

Abbildung 5-12:	Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krempelprozess mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen.....	71
Abbildung 5-13:	Grad der Faseröffnung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen; ein niedriger mittlerer Pixelwert steht für einen hohen Öffnungsgrad	72
Abbildung 5-14:	Faserorientierung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiter zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen	73
Abbildung 5-15:	Mittlere Faserlänge (a) und Öffnungsgrad der rCF (b) mit und ohne zusätzlicher Faservoröffnung bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen	74
Abbildung 5-16:	Schematische Darstellung der Krempelbandherstellung aus den einzelnen Vliesen.....	75
Abbildung 5-17:	Im Streckwerk integrierte Unterwalzen mit NBR-Oberfläche	76
Abbildung 5-18:	Zuführung des Krempelbands zum Streckwerk (links), Einzug des verstretchten Bands in die Vliesführungsdüse (Mitte) und in einer Kanne abgelegtes Streckenband (rechts)	79
Abbildung 5-19:	Mittlere Faserlänge des Streckenbands (80-rCF-E-50) mit 80 mm rCF-Eingangsfaserlänge nach dem Streckprozess bei unterschiedlicher Streckwerksbelastung und ein bzw. zwei Streckpassagen (a) sowie mittlere Faserlänge der Krempel- und Streckenbänder bei einer Streckwerksbelastung von 20 daN und unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen (b).....	80
Abbildung 5-20:	Faserorientierung (a) und Streckenbandgleichmäßigkeit (b) bei ein bzw. zwei Streckpassagen und unterschiedlichen Eingangsfaserlängen	82
Abbildung 5-21:	Streckwerk mit geriffelten (linke Seite) und mit gummierten Unterwalzen (rechte Seite) am Flyer F15.....	84
Abbildung 5-22:	rCF-Hybridgarn der Variante 60-rCF-E-30-90 mit Detailaufnahmen.....	86
Abbildung 5-23:	Mittlere Zugfestigkeit der Hybridgarne in Abhängigkeit der Garndrehung und des rCF-Anteils bzw. Kraft-Dehnungs-Kurven von ausgewählten Hybridgarne bei 100 T/m mit Eingangsfaserlängen von 40 mm (a) bzw. (b) und 60 mm (c) bzw. (d).....	88
Abbildung 5-24:	Garnquerschnitt des Hybridgarns 40-rCF-E-50-120 im Mikroskop (a), mittels Bildbearbeitung schwarz hervorgehobene rCF (b) und PA 6-Fasern (c) im eingezeichneten Quadrat; in (b) ist ein rCF-Bündel aus ca. 57 Einzelfasern rot hervorgehoben.....	89
Abbildung 5-25:	Histogramm mit der Anzahl an Einzelfasern je Bündel bezogen auf den prozentualen Anteil an der Gesamtmenge an rCF-Bündeln (a) bzw. Fasern (b) im Hybridgarnquerschnitt.....	90
Abbildung 5-26:	Prozesskette zur Entwicklung des rCF-Hybridgarns	91
Abbildung 5-27:	Entwickeltes rCF-Hybridgarn	91
Abbildung 5-28:	Am ITM installierte Spezialkrempelanlage; Links im Vordergrund: Faseröffner und Krempelspeiser; Mitte: Spezialkrempel; Rechts: Bandtransporteinrichtung und Kannenstock.....	92
Abbildung 6-1:	Gewickelte UD-Halbzeuge vor (links) und nach der Konsolidierung (rechts).....	93
Abbildung 6-2:	Einfluss der Faserlänge auf die maximal erzielbaren Verbundeigenschaften in einem Glasfaserverstärkten-Polypropylen-Spritzguss-Verbundbauteil.....	95

Abbildung 6-3:	Experimentell ermittelte Kennwerte der Verbundzugfestigkeit in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Eingangsfaserlängen der rCF-E und der Voröffnung bei konstanter Garndrehung (100 T/m); die gestrichelten Linien sind lediglich zur besseren Veranschaulichung ergänzt	96
Abbildung 6-4:	Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeit in Abhängigkeit von den unterschiedlichen mittleren Faserlängen der rCF und der Voröffnung bei konstanter Garndrehung (100 T/m)	97
Abbildung 6-5:	Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeit und -modul in Abhängigkeit der effektiven Faserlänge bei konstanter Garndrehung (100 T/m)	98
Abbildung 6-6:	Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeiten (a) und Verbundzugmoduln (b) in Abhängigkeit von unterschiedlichen Garndrehungen [T/m] bei konstanter rCF-Eingangsfaserlänge (40, 60, 80 mm); die dazugehörigen gestrichelten Modellkurven basieren auf den Gleichungen (6-7) bzw. (6-8)	99
Abbildung 6-7:	Einfluss des Faserflächenwinkels α (infolge einer Garndrehung) auf die Faserorientierung im Verbundbauteil und daraus resultierende Verbundzugfestigkeit [225]	100
Abbildung 6-8:	Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeiten sowie ausgewählte Kurven des analytischen Modells auf Basis der Gleichung (6-11) als gestrichelte Linien mit verschiedenen Effizienzfaktoren der Faserlänge ηL	104
Abbildung 6-9:	Experimentell ermittelte Verbundzugfestigkeiten und -moduln der Hybridgarne mit 60 T/m und 80 mm rCF-T/-E/-P-Eingangsfaserlänge sowie der Referenzproben aus rCF-T/-E-Filamentgarn und PA 6-Fasern	105
Abbildung 6-10:	Bruchanalyse von Verbundprüfkörpern aus rCF-T, rCF-E und rCF-P mittels REM	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Wesentliche Krempel- und Prozessparameter	18
Tabelle 3-2:	Wichtige Kenndaten der verschiedenen Spinnverfahren	25
Tabelle 4-1:	Berechnung des Bündelfaktors für die Referenzfaserlänge	46
Tabelle 4-2:	Faserartproben mit einheitlicher Faserlänge und unterschiedlicher Faseranzahl bzw. Fasermasse	48
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der Faserlängenmessungen mit geschnittenen CF mit bekannter Länge	49
Tabelle 4-4:	Ergebnisse der Faserlängenmessungen mit rCF unbekannter Länge	51
Tabelle 5-1:	Ermittelte Faserlänge, -durchmesser, -feinheit, -zugfestigkeit, -zugmodul und Oberflächenenergie der untersuchten rCF	59
Tabelle 5-2:	Ermittelte Faserlänge, -durchmesser, -feinheit und Oberflächenenergie der untersuchten PA 6-Fasern	59
Tabelle 5-3:	Grenzflächenparameter der verschiedenen rCF-Varianten beim SFPO-Test	61
Tabelle 5-4:	Versuchsplan der untersuchten Parametervariationen beim Krempelprozess	65
Tabelle 5-5:	Hergestellte Krempelbandvarianten für die anschließende Weiterverarbeitung zu Streckenbändern	75
Tabelle 5-6:	Eingestellte Maschinenparameter an der Spezialstrecke	78
Tabelle 5-7:	Versuchsplan der untersuchten Parametervariationen beim Streckprozess	78
Tabelle 5-8:	Einfluss der Feldweite auf die Streckenbandgleichmäßigkeit	81
Tabelle 5-9:	Hergestellte Streckenbandvarianten für die anschließende Weiterverarbeitung zu rCF-Hybridgarnen	83
Tabelle 5-10:	Einstellungen der Maschinenparameter am Spezialflyer	85
Tabelle 5-11:	Versuchsplan der untersuchten Parametervariationen beim Spinnprozess	85
Tabelle 5-12:	Geprüfte Faserlänge und Faserorientierung der rCF im Hybridgarn und Garngleichmäßigkeit	87
Tabelle 6-1:	Hergestellte Verbundprüfkörper zur experimentellen Bestimmung der Verbundzugkennwerte	94
Tabelle 6-2:	Mittlere Faserlänge (ML), Gleichmäßigkeitsindex (UI) und daraus ermittelte effektive Faserlänge (LE) der rCF im Krempelvlies	98
Tabelle 6-3:	Berechnete Kennwerte der Verbundzugfestigkeit σ_{0T} und des Verbundzugmodul E_{0T}	101
Tabelle 6-4:	Experimentell ermittelte Kennwerte zur Berechnung der Verbundzugeigenschaften	103
Tabelle 6-5:	Ermittelte Kennwerte aus dem analytischen Modell und der experimentellen Verbundzugprüfung	103
Tabelle A-1:	Garniturparameter	XII
Tabelle A-2:	Krempelparameter	XIII
Tabelle A-3:	Mittlere Faserlänge und Gleichmäßigkeitsindex der verschiedenen rCF-Varianten nach dem Krempelprozess bei 80 mm Eingangsfaserlänge	XIII
Tabelle A-4:	Ergebnisse der Bündelbiegungsprüfung von rCF-T/-E/-P	XIV
Tabelle A-5:	Mittlere Faserlänge und Fasereinkürzung der rCF nach dem Krempelprozess mit den Garnituren A und B bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen	XIV
Tabelle A-6:	Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krempelprozess bei einer Motordrehzahl der Krempel von 500 min^{-1} und 1000 min^{-1} bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen	XIV

Tabelle A-7:	Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krempelprozess mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-EingangsfaserlängenXV
Tabelle A-8:	Grad der Faseröffnung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen; ein niedriger mittlerer Pixelwert steht für einen hohen ÖffnungsgradXV
Tabelle A-9:	Faserorientierung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiter zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-EingangsfaserlängenXVI
Tabelle A-10:	Mittlere Faserlänge und Öffnungsgrad der rCF mit und ohne zusätzlicher Faservoröffnung bei unterschiedlichen rCF-EingangsfaserlängenXVI
Tabelle A-11:	Mittlere Faserlänge des Streckenbands (80-rCF-E-50) mit 80 mm rCF-Eingangsfaserlänge nach dem Streckprozess bei unterschiedlicher Streckwerksbelastung und ein bzw. zwei Streckpassagen.....XVII
Tabelle A-12:	Mittlere Faserlänge der Krempel- und Streckenbänder bei einer Streckwerksbelastung von 20 daN und unterschiedlichen rCF-EingangsfaserlängenXVII
Tabelle A-13:	Faserorientierung und Streckenbandgleichmäßigkeit bei ein bzw. zwei Streckpassagen und unterschiedlichen EingangsfaserlängenXVII
Tabelle A-14:	Mittlere Zugfestigkeit der Hybridgarne in Abhängigkeit der Garndrehung und des rCF-Anteils mit Eingangsfaserlängen von 40 mm und 60 mmXVIII
Tabelle A-15:	Anzahl an Einzelfasern je Bündel bezogen auf den prozentualen Anteil an der Gesamtmenge an rCF-Bündeln bzw. Fasern im HybridgarnquerschnittXVIII
Tabelle A-16:	Ermittelte Kennwerte aus der experimentellen VerbundzugprüfungXIX

Liste der Veröffentlichungen

a) Auszeichnungen

1. Deutscher Rohstoffeffizienz-Preis 2016 in der Wettbewerbskategorie Forschung: „Rohstoffeffiziente Verwertung von recycelten Carbonfasern durch Entwicklung einer Technologie zur industriellen Fertigung von Hybridgarnen für den Einsatz in hochbelastbaren CFK-Bauteilen“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
2. AVK-Innovationspreis 2016 in der Kategorie „Forschung/Wissenschaft“: Entwicklung von lasttragenden thermoplastischen CFK-Bauteilen aus sekundären und recycelten Carbonfasern von der AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.

b) Rezensierte Veröffentlichungen

1. HENGSTERMANN, M.; KOPELMANN, K.; NOCKE, A.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites. Part IV: Measurement of recycled carbon fibre length, Journal of Engineered Fibers and Fabrics (2020). <https://doi.org/10.1177%2F1558925020910729>
2. KHURSHID M. F.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Recent Developments in the Processing of Waste Carbon Fiber for Thermoplastic Composites. Journal of Composite Materials (2019). <https://doi.org/10.1177/0021998319886043>
3. HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; SCHEFFLER, C.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites. Part III: Influence of sizing on textile processing and composite properties. Journal of Thermoplastic Composite Materials (2019) <https://doi.org/10.1177/0892705719847240>
4. DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; HENGSTERMANN, M.; CHERIF, C.: Micro-scale finite element model of brittle multifilament yarn failure behaviour. Journal of Industrial Textiles, 47(5), S. 870-882. (2016) <https://doi.org/10.1177/1528083716674908>
5. HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibers (rCF) for high-performance composites. Part-II: Influence of yarn parameters on tensile properties of composites. Textile Research

- Journal, 87(13): S. 1655-1664. (2016)
<https://doi.org/10.1177/0040517516658511>
6. HENGSTERMANN, M.; RAITHEL, N.; ABDKADER, A.; HASAN, M.M.B.; CHERIF, C.: Development of new hybrid yarn construction from recycled carbon fibers for high performance composites. Part-I: Basic processing of hybrid carbon fiber/polyamide 6 yarn spinning from virgin carbon fiber staple fibers. Textile Research Journal, 86(12): S. 1307-1317. (2016)
<https://doi.org/10.1177/0040517515612363>
 7. HASAN, M. M. B.; HENGSTERMANN, M.; DILO, R.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Investigations on the manufacturing and mechanical properties of spun yarns made from staple CF for thermoset composites. Autex Research Journal (2016) <https://doi.org/10.1515/aut-2016-0034>
 8. HENGSTERMANN, M.; BARDL, G.; RAO, H.; ABDKADER, A.; HASAN, M. M. B.; CHERIF, C.: Development of a method for characterization of the fiber length of long staple carbon fibers based on image analysis. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 4(118): S. 39-44. (2016) DOI: 10.5604/12303666.1207845
 9. HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Influence of fibre length and preparation on mechanical properties of CF/polyamide 6 hybrid yarns and composites. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 5(119): S. 55-62. (2016) DOI: 10.5604/12303666.1215528
 10. HENGSTERMANN, M.; RAITHEL, N.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of staple hybrid yarn from carbon fiber wastes for lightweight constructions. Materials Science Forum, 20th Symposium on Composites, S. 695-698 (2015)
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.695>

c) Nicht rezensierte Veröffentlichungen

1. HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.; WEBER, D.; GEIER, M.; FLACHENECKER, A.: Industrial manufacturing of hybrid yarns made of recycled carbon fibres for thermoplastic composites. SAMPE Europe Conference & Exhibition 2017 Proceedings, Stuttgart, (2017) ISBN: 9781510861282
2. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Hybridvliese aus recycelten Carbonfasern, AVR Allgemeiner Vliesstoffreport, 4, S. 50-51 (2017)

3. ABDKADER, A.; HENGSTERMANN, M.; CHERIF, C.: Innovative Hochleistungshybridgarne aus recycelten Carbonfasern für Leichtbaustrukturen/Innovative high-performance hybrid yarns made from recycled carbon fibers for lightweight structures. Technische Textilien/Technical Textiles 60 (2017)1, S. 18-20/Chemical Fibers International 67(2017)2, S. 153-155
4. ABDKADER, A.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; HOSSAIN, M.; CHERIF, C.; WEBER, D.: Spinnverfahren zur Herstellung von Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern für CFK-Bauteile/ Evaluation of spinning methods for production of hybrid yarns from rCF for CFRP components. Technische Textilien/ Technical Textiles 60(2017)4, S. 23-24/Melliand International 23 (2017)4, S. 196-200
5. HENGSTERMANN, M.: Überblick - Standortbestimmung beim Recycling von Carbonfasern. Carbon Composites Magazin, 2, S. 21-22 (2016)
6. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; RAITHEL, N.; CHERIF, C.: Schonende Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonstapelfasern zur anschließenden Verspinnung / Production of high quality carded webs from recycled carbon staple fiber for subsequent spinning. Technische Textilien/Technical Textiles 58(2015)1, S. 37-38 /S. E28-E29; Melliand Textilberichte 96(2015)2, S. 76-77

d) Vorträge

1. CHERIF C.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.: Practical technologies for the development of fiber-based high-performance structures of recycled carbon fibers and thermoplastic fibers for the cost-effective serial production of lightweight structures with high performance. European Scientific Exchange Meeting and discussion on Circular Economy and Recycling of Technical Textiles, Frankfurt/Main, 2018
2. HASAN, M.M.B.; HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of yarn structures consisting of recycled carbon fibre (rCF) for the application in thermoset composites. 57th Dornbirn Global Fiber Congress, Dornbirn, 2018
3. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Prozessanforderungen an die Herstellung von rC-Hybridgarn und Anwendungen. 69. BHT Freiburger Universitätsforum, Freiberg, 2018

4. HENGSTERMANN, M.; HASAN, M.M.B.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.; WEBER, D.; GEIER, M.; FLACHENECKER, A.: Industrial manufacturing of hybrid yarns made of recycled carbon fibres for thermoplastic composites; SAMPE Europe Conference, Stuttgart, 2017
5. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; HASAN, M.M.B.; CHERIF, C.: Reuse of recycled carbon fibers in CFRP for maximum performance. GoCarbonFibre Konferenz, München, 2017
6. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; HASAN, M.M.B.; CHERIF, C.: Industrielle Fertigung von Garnkonstruktionen aus Recycling-Kohlenstofffasern für Verbundstoffe / Industrial manufacturing of yarn constructions made of recycled carbon fibers for composites. Techtexil-Symposium 2017, Frankfurt/Main, 2017
7. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Hybridgarnkonstruktionen aus recycelten Carbonstapelfasern für hochbelastbare CFK-Bauteile. FOREL Akademie, Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität. "CFK, Aluminium und Co. - Wie kann man Leichtbaustrukturen recyceln?", Freiberg, 2016
8. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Entwicklung von Prozessen zur Herstellung von Garnen aus recycelten Carbonfasern für die Wiederverwendung in lasttragenden CFK-Bauteilen. 12. STFI-Kolloquium "recycling for textiles", Chemnitz, 2015
9. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of spun yarn made from recycled carbon fibers for reuse in load-bearing components. Speakers Platform ITMA 2015, Mailand, 2015
10. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: New yarn constructions from recycled carbon staple fibers and thermoplastic fibers for composite. 54. Chemiefasertagung Dornbirn, Dornbirn, 2015
11. HENGSTERMANN, M.; RAITHEL, N.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of staple hybrid yarn from carbon fiber wastes for lightweight constructions. 20. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien, 2015
12. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Production of innovative spun hybrid yarns made from recycled carbon fibers for high strength CFRP. 15th AUTEX World Textile Conference 2015, Bukarest, 2015

13. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; RAITHEL, N.; CHERIF, C.:
Anpassungsmöglichkeiten einer Walzenkrepel zur Herstellung von
Vliesen aus recycelten Carbonfasern für die anschließende
Verspinnung. 29. Hofer Vliesstofftage 2014, Hof, 2014

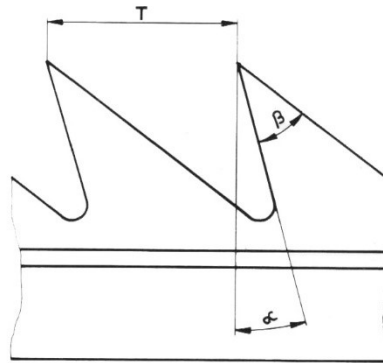
e) Posterbeiträge

1. ABDKADER, A.; HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; CHERIF, C.:
Achievements in the development of fibrous structures from recycled
carbon fibres at the ITM. Aachen-Dresden-Denkendorf International
Textile Conference, Stuttgart, 2017
2. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Spinning of secondary
and recycled carbon fibers for load-bearing carbon fiber reinforced
plastics. Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference,
Dresden, 2016
3. HENGSTERMANN, M.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: Development of carded
webs made from recycled carbon fibers for subsequent spinning for a
usage in structural CFRC parts. Aachen-Dresden International Textile
Conference, Dresden, 2014

Anlagen

Anlage 1 Krempelprozess

Tabelle A-1: Garniturparameter



		Garnitur A	Garnitur B	Garnitur C
Arbeiter	T [mm]; α [°]; β [°]	2,82; 5; 35	2,00; 14; 30	2,12; 16; -
	Anzahl Spitzen $\left[\frac{n}{in}\right]$	24	21	13
	Beschlagdichte $\left[\frac{n}{in^2}\right]$	216	267	208
Tambour	T [mm]; α [°]; β [°]	2,82; 5; 35	1,82; 23; 48	1,69; 20; -
	Anzahl Spitzen $\left[\frac{n}{in}\right]$	26	22	15
	Beschlagdichte $\left[\frac{n}{in^2}\right]$	234	307	315
Wender	T [mm]; α [°]; β [°]	2,82; 5; 30	2,40; 13; 34	2,12; 16; -
	Anzahl Spitzen $\left[\frac{n}{in}\right]$	24	22	13
	Beschlagdichte $\left[\frac{n}{in^2}\right]$	216	233	208

Tabelle A-2: Krepelparameter

Walzen Nr.	Bezeichnung	Walzen- durchmesser [mm]	Umdrehungen [U/min]	Walzengeschwindigkeit [m/min]	Abstand Walzen	Abstand [mm]
1	Speisewalze	40	1,6	0,2	1 - 2	0,5
2	Speisewalze	40	1,6	0,2	1 - 4	0,5
3	Putzwalze	40	1,6	0,2	2 - 3	0,5
4	Vorreißer	82	82	21	2 - 4	1,0
5	Tambour	347	269	293	3 - 4	1,0
6	Wender 1	62	748	145	4 - 5	0,5
7	Arbeiter 1	83	13	3,4	5 - 6	0,5
8	Wender 2	62	748	145	5 - 7	0,5
9	Arbeiter 2	83	13	3,4	5 - 8	0,5
10	Volant	160	1024	514	5 - 9	0,5
11	Putzwalze	49	1027	158	5 - 10	0,0
12	Abnehmer	235	3,5	2,6	5 - 11	0,5
					5 - 12	0,3
					6 - 7	0,5
	Aufwicklung	200	3,5	2,2	8 - 9	0,5
	Hacker	/	1018		10 - 11	0,5
	Motor	/	977		11 - 12	0,5

Tabelle A-3: Mittlere Faserlänge und Gleichmäßigkeitsindex der verschiedenen rCF-Varianten nach dem Krepelprozess bei 80 mm Eingangsfaserlänge

Variante	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]	Gleichmäßigkeitsindex [%]	Standardabweichung [%]
rCF-T	49,13	2,54	69,4	2,0
rCF-E	59,4	3,8	79,0	1,7
rCF-P	34,1	1,1	67,9	5,2

Tabelle A-4: Ergebnisse der Bündelbiegungsprüfung von rCF-T/-E/-P

f	4,01	3,79	4,12	5,48	5,24	0,19	1,76	5,01	2,41	3,84	1,28	3,20	4,44	1,67	
Anzahl Fasern im Bündel	149	132	114	49	15	290	142	13	200	71	251	121	54	195	rCF-E
f	3,28	5,38	6,31	2,92	1,51	4,97	0,53	4,70	2,63	2,41	1,67	-	-	-	
Anzahl Fasern im Bündel	73	48	26	69	141	40	264	96	112	228	260	-	-	-	rCF-T
f	7,06	5,90	4,80	4,77	4,84	5,11	5,68	4,65	4,97	6,39	5,54	6,11	4,95	4,98	
Anzahl Fasern im Bündel	473	371	208	657	570	594	367	123	83	84	251	499	410	236	rCF-P

Tabelle A-5: Mittlere Faserlänge und Fasereinkürzung der rCF nach dem Krempelprozess mit den Garnituren A und B bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Eingangsfaserlänge [mm]	Garnitur A			Garnitur B		
	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]	Faserschädigung [%]	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]	Faserschädigung [%]
40	38,3	1,34	4,3	38,4	1,80	4,1
60	48,1	3,10	19,8	47,1	1,23	21,5
80	59,4	1,56	25,8	57,4	0,44	28,3
100	58,8	2,80	41,2	55,8	3,10	44,2

Tabelle A-6: Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krempelprozess bei einer Motordrehzahl der Krempel von 500 min⁻¹ und 1000 min⁻¹ bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Eingangsfaserlänge [mm]	500 min ⁻¹		1000 min ⁻¹	
	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]
40	38,5	1,6	38,3	1,34
60	48,2	3,5	48,1	3,10
80	59,0	3,1	59,4	1,56
100	59,0	2,5	58,8	2,80

Tabelle A-7: Mittlere Faserlänge der rCF nach dem Krempelprozess mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Eingangsfaserlänge [mm]	Abstand Arbeiter-Tambour [mm]	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]
40	0,5	38,3	1,34
	1,0	38,8	2,40
	2,1	38,4	1,09
	2,8	39,6	2,88
60	0,5	48,1	3,10
	1,0	50,3	3,30
	2,1	49,1	4,74
	2,8	55,2	3,75
80	0,5	59,4	1,56
	1,0	60,1	3,80
	2,1	60,6	1,36
	2,8	65,1	2,40
100	0,5	58,8	2,80
	1,0	58,3	5,00
	2,1	61,2	4,20
	2,8	66,2	4,30

Tabelle A-8: Grad der Faseröffnung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiterwalzen zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen; ein niedriger mittlerer Pixelwert steht für einen hohen Öffnungsgrad

Eingangsfaserlänge [mm]	Abstand [mm]	Mittlerer Pixelwert	Standardabweichung
40	0,5	161	1,2
	1,0	162	0,7
	2,0	164	2,0
	2,8	178	2,1
60	0,5	154	1,1
	1,0	155	1,1
	2,0	156	1,9
	2,8	170	1,2
80	0,5	156	1,0
	1,0	156	1,0
	2,0	158	1,3
	2,8	172	1,4
100	0,5	148	2,1
	1,0	152	1,3
	2,0	153	1,5
	2,8	164	1,5

Tabelle A-9: Faserorientierung der rCF in den Vliesen mit verschiedenen Abständen der Arbeiter zum Tambour bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Eingangsfaserlänge [mm]	Abstand [mm]	Orientierungsindex [%]	Standardabweichung [%]
40	0,5	83,6	3,6
	1	79,1	2,8
	2	75,2	2,7
	2,8	68	2,1
60	0,5	75,3	2,2
	1	67,9	7,4
	2	64	5,1
	2,8	61	2,8
80	0,5	64,9	6,8
	1	60,3	3,7
	2	57	4,5
	2,8	54	3,0
100	0,5	64,7	2,7
	1	65,9	5,1
	2	64	3,4
	2,8	60	1,9

Tabelle A-10: Mittlere Faserlänge und Öffnungsgrad der rCF mit und ohne zusätzlicher Faservoröffnung bei unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

	Eingangs- faserlänge [mm]	Mittlere Faserlänge [mm]	Standard- abweichung [mm]	Mittlerer Pixelwert	Standard- abweichung
Mit Voröffnung	40	38,8	2,4	162	0,7
	60	50,3	3,3	155	1,1
	80	60,1	3,8	156	1
	100	58,3	5	152	1,3
Ohne Voröffnung	40	38,3	2,2	160	1,2
	60	48,7	2,8	146	1,4
	80	56,2	3,2	142	1,3
	100	54,4	5,5	140	1,1

Anlage 2 Streckprozess

Tabelle A-11: Mittlere Faserlänge des Streckenbands (80-rCF-E-50) mit 80 mm rCF-Eingangsfaserlänge nach dem Streckprozess bei unterschiedlicher Streckwerksbelastung und ein bzw. zwei Streckpassagen

Belastung [daN]	Anzahl Streckpassagen	Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]
5	1	60,2	3,20
	2	61,2	2,20
10	1	61,2	2,10
	2	61,8	2,80
15	1	61,4	1,50
	2	60,8	3,40
20	1	61,2	2,40
	2	60,2	3,50
25	1	53,2	2,46
	2	50,1	2,30
30	1	52,4	1,89
	2	48,3	2,79

Tabelle A-12: Mittlere Faserlänge der Krempel- und Streckenbänder bei einer Streckwerksbelastung von 20 daN und unterschiedlichen rCF-Eingangsfaserlängen

Eingangsfaserlänge [mm]		Mittlere Faserlänge [mm]	Standardabweichung [mm]
40	Krempelband	38,8	2,40
	Streckenband	37,2	2,20
60	Krempelband	50,3	3,30
	Streckenband	50,1	2,10
80	Krempelband	60,1	3,80
	Streckenband	59,5	2,80
100	Krempelband	58,3	2,40
	Streckenband	58,7	3,50

Tabelle A-13: Faserorientierung und Streckenbandgleichmäßigkeit bei ein bzw. zwei Streckpassagen und unterschiedlichen Eingangsfaserlängen

	Eingangs- faserlänge [mm]	Mittlere Faserlänge [mm]	Standard- abweichung [mm]	Orientierungs- index [%]	Standard- abweichung [%]	Bandgleichmäßig- keit CV_m [%]
1. Streck- passage	40	88,9	1,8	88,9	1,8	8,2
	60	91,3	1,8	91,3	1,8	7,8
	80	90,1	1,2	90,1	1,2	8,9
	100	89,7	1,4	89,7	1,4	9,2
2. Streck- passage	40	92,1	1,5	92,1	1,5	8,4
	60	93,7	2,2	93,7	2,2	8,3
	80	92,5	2	92,5	2	9,5
	100	91,2	1,3	91,2	1,3	9,5

Anlage 3 Spinnprozess

Tabelle A-14: Mittlere Zugfestigkeit der Hybridgarne in Abhängigkeit der Garndrehung und des rCF-Anteils mit Eingangsfaserlängen von 40 mm und 60 mm

	Garndrehung [T/m]	Zugfestigkeit [cN/tex]		Bruchdehnung [%]	
		Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
40- rCF-E- 30-	90	6,2	0,7	30,9	6,0
	100	9,9	1,4	34,8	5,1
	120	10,2	1,2	30,7	7,8
40- rCF-E- 50-	90	10,7	1,8	25,6	6,2
	100	11,7	3,5	14,0	7,7
	120	12,6	1,6	7,9	3,0
40- rCF-E- 70-	90	11,2	2,9	9,2	2,5
	100	13,1	2,9	6,5	2,2
	120	17,2	1,4	2,9	1,1
60- rCF-E- 30-	90	17,9	1,6	24,0	4,7
	100	18,0	1,6	18,8	6,2
	120	18,0	1,8	17,6	5,9
60- rCF-E- 50-	90	22,6	2,2	5,2	2,8
	100	22,9	1,7	3,8	1,0
	120	25,9	3,4	2,9	0,4
60- rCF-E- 70-	90	32,8	3,1	4,0	0,7
	100	33,9	2,9	4,0	0,4
	120	35,6	4,3	2,6	0,3

Tabelle A-15: Anzahl an Einzelfasern je Bündel bezogen auf den prozentualen Anteil an der Gesamtmenge an rCF-Bündeln bzw. Fasern im Hybridgarnquerschnitt

Anzahl an rCF in einem Bündel	Anteil an Gesamtmenge an Bündeln [%]	Anteil an Gesamtmenge an Fasern [%]	Anzahl an rCF in einem Bündel	Anteil an Gesamtmenge an Bündeln [%]	Anteil an Gesamtmenge an Fasern [%]
1	36,35	11,79	10 bis 20	1,28	6,23
2	42,48	27,55	20 bis 30	0,37	2,97
3	9,56	9,30	30 bis 40	0,37	4,15
4	3,61	4,69	40 bis 50	0,09	1,33
5	1,87	3,04	50 bis 60	0,00	0,00
6	1,78	3,47	60 bis 70	0,05	0,96
7	0,82	1,87	70 bis 80	0,00	0,00
8	0,18	0,47	80 bis 90	0,05	1,26
9	0,41	1,20	90 bis 100	0,09	2,82
10	0,41	1,33	100 bis 200	0,09	4,45
			200 bis 300	0,14	11,12

Anlage 4 Verbundprüfung

Tabelle A-16: Ermittelte Kennwerte aus der experimentellen Verbundzugprüfung

			Nicht Normiert				Normiert auf 50,0 % rCF-Volumenanteil	
Verbundbezeichnung	rCF-Variante	Garn-drehung [T/m]	Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]	Bruchdehnung [%]	rCF-Volumenanteil [%]	Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]
40-rCF-E-50-90	rCF-E	90	776,2 ± 57,3	71,2 ± 4,5	1,0 ± 0,1	49,8 ± 0,2	779,2 ± 57,5	71,5 ± 4,5
40-rCF-E-50-100		100	741,8 ± 37,8	68,9 ± 5,4	1,1 ± 0,1	49,3 ± 0,3	751,8 ± 38,3	69,8 ± 5,4
40-rCF-E-50-120		120	725,1 ± 60,0	67,6 ± 3,7	1,1 ± 0,2	49,3 ± 0,2	734,8 ± 60,8	68,5 ± 3,8
60-rCF-E-50-90		90	831,2 ± 58,3	72,2 ± 6,8	1,1 ± 0,1	52,0 ± 0,3	800,8 ± 56,2	69,5 ± 6,5
60-rCF-E-50-100		100	768,4 ± 62,3	70,6 ± 4,8	1,0 ± 0,1	50,1 ± 0,2	766,9 ± 62,2	70,5 ± 4,8
60-rCF-E-50-120		120	740,0 ± 46,5	64,4 ± 3,4	1,2 ± 0,1	49,2 ± 0,3	751,4 ± 47,2	65,4 ± 3,5
80-rCF-E-50-60		60	990,3 ± 20,9	84,6 ± 3,1	1,1 ± 0,1	52,0 ± 0,3	953,8 ± 20,1	81,5 ± 3,0
80-rCF-E-50-70		70	922,1 ± 29,6	83,7 ± 1,1	1,0 ± 0,1	50,8 ± 0,3	908,2 ± 29,2	82,4 ± 1,1
80-rCF-E-50-80		80	841,0 ± 29,4	74,9 ± 2,1	1,1 ± 0,1	46,2 ± 0,2	906,8 ± 31,7	80,8 ± 2,3
80-rCF-E-50-90		90	866,9 ± 28,0	73,0 ± 1,8	1,2 ± 0,1	47,0 ± 0,3	919,6 ± 29,7	77,5 ± 1,9
80-rCF-E-50-100		100	801,0 ± 41,6	73,6 ± 1,8	1,2 ± 0,1	46,2 ± 0,1	863,5 ± 44,8	79,4 ± 1,9
100-rCF-E-50-100		100	704,0 ± 40,9	71,1 ± 2,6	1,0 ± 0,1	49,4 ± 0,2	712,1 ± 41,4	71,9 ± 2,6
40-rCF-E-M-50-100		100	748,6 ± 59,3	67,5 ± 4,7	1,1 ± 0,1	49,8 ± 0,2	751,4 ± 59,5	67,8 ± 4,7
60-rCF-E-M-50-100		100	753,2 ± 61,2	72,2 ± 4,8	1,0 ± 0,1	48,8 ± 0,3	770,7 ± 62,6	73,9 ± 4,9
80-rCF-E-M-50-100		100	702,1 ± 48,3	71,4 ± 4,3	0,9 ± 0,2	48,9 ± 0,2	716,9 ± 49,3	72,9 ± 4,4
100-rCF-E-M-50-100		100	647,0 ± 31,6	59,4 ± 2,4	0,9 ± 0,2	49,1 ± 0,3	658,1 ± 32,1	60,4 ± 2,4
80-rCF-T-50-60	rCF-T	60	1110,8 ± 22,3	82,1 ± 2,7	1,3 ± 0,1	51,8 ± 0,2	1073,6 ± 21,5	79,4 ± 2,6
80-rCF-P-50-60	rCF-P	60	843 ± 43,5	83,5 ± 3,9	1,0 ± 0,1	51,7 ± 0,3	816,6 ± 42,1	80,9 ± 3,8
rCF-T-Referenz	rCF-T	0	1256,2 ± 27,3	108,2 ± 4,3	1,2 ± 0,03	48,5 ± 0,3	1293,8 ± 28,1	111,5 ± 4,4
rCF-E-Referenz	rCF-E	0	1253,9 ± 21,4	109,6 ± 2,1	1,2 ± 0,04	48,4 ± 0,2	1294 ± 22,1	113,1 ± 2,2