

Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik  
(ITM), Technische Universität Dresden

Rieter Ingolstadt (Assoziierter Partner ohne Förderung)

## **Entwicklung einer industriellen Prozesskette zur Herstellung von UD-Tapes auf der Basis von recycelten Carbonstapelfasern und Thermoplastfasern**

Abschlussbericht gefördert unter AZ-33809/01,  
Projektlaufzeit 01.07.2018-30.09.2021

Autoren

M. Sc. Muhammad Furqan Khurshid, Dr.-Ing. Anwar Abdkader,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif  
Dipl.-Ing. Friedrich Geißner, Dipl.-Ing. Werner Schmolke

Dresden, 2021



## Inhaltverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	iv
Tabellenverzeichnis .....	vii
Abkürzungsverzeichnis .....	ix
Formelverzeichnis .....	x
Kurzfassung .....	xi
1. Einführung/Motivation.....	1
2. Vorgehensweise/Methodik/Projektablauf .....	2
2.1 Präzisierung der Anforderungen; Auswahl der Fasermaterialien und Festlegung der Tapestruktur (AP 1 Neuhof/ITM) .....	3
2.2 Weiterentwicklung der rCF-Krempel und Krempelbandherstellung (AP 2 ITM).....	4
2.2.1 Verwendete Speziallaborkrempelanlage.....	4
2.2.2 Statistische Methode zur Versuchsplanung .....	6
2.2.3 Faseraufbereitung.....	7
2.2.4 Erarbeitung des Versuchsplanes, Versuchsdurchführung und Herstellung von Proben für die Charakterisierung .....	7
2.2.5 Versuchsdurchführung und Herstellung von Proben für die Charakterisierung.....	9
2.3 Weiterentwicklung der Reguliereinheit der Strecke und Herstellung der Streckenbänder (AP 3 Neuhof/ITM/ Rieter) .....	10
2.3.1 Notwendigkeit der Regulierungsstrecke .....	10
2.3.2 Untersuchungen mit unterschiedlichen Tastrollen zur Auswahl der optimalen Tastrollen .....	12
2.3.3 Untersuchungsergebnisse zur Reduzierung der Tastrollenbelastung auf Basis des längensvariablen Hebelarms.....	14
2.3.4 Untersuchungsergebnisse zur Reduzierung der Tastrollenbelastung auf Basis des Federelementes mit geringer Steifigkeit .....	15
2.3.5 Untersuchung der Tastrollenoberflächen zur schonenden Verarbeitung von rCF.....	17
2.3.6 Kalibrierung der Regulierungseinheit.....	19
2.3.7 Modifikation der Streckwerkunterwalzen.....	19
2.3.8 Textiltechnologische und maschinentechnische Untersuchungen zur Herstellung der Streckenbänder.....	21
2.3.8.1 Optimierung von Streckenparametern für die Faserorientierung .....	21
2.3.8.2 Optimierung von Streckenparametern für die Faserlänge .....	23

2.3.8.3 Optimierung von Streckenparametern für die Bandungleichmäßigkeit .....	24
2.4 Umsetzung der rCF-UD-Tapes im Labormaßstab - AP4 (ITM).....	25
2.4.1 Optimierung der Bandzuführung .....	27
2.4.2 Optimierung des Streckwerks .....	27
2.4.3 Untersuchung des Imprägnierungsmoduls.....	28
2.4.4 Untersuchung des Thermofixierungsmoduls .....	29
2.4.5 Untersuchung des Kompaktierungs- und Aufwicklungsmoduls .....	31
2.4.6 Entwicklung einer unidirektionalen Tape-Struktur.....	31
2.5 Transfer der Technologie zur Tapeherstellung vom Labormaßstab in den Industriemaßstab – AP5 (Neuhof, ITM, Rieter) .....	34
2.5.1 Modifikation der vorhandenen Regulierstrecke auf Basis von AP 3 (3.3) .....	35
2.5.2 Modifikation der vorhandenen Regulierstrecke auf Basis von AP 4 (3.4) zur Tapefertigungsanlage (TFA).....	36
2.5.2.1 Entwicklung von Abzugswalzen und Vliesführungstrichter .....	38
2.5.2.3 Entwicklung von Antriebssystemen .....	40
2.6 Erprobung und Weiterentwicklung der Tapefertigungsanlage zur kontinuierlichen rCF- Tapeherstellung - AP6 (Neuhof, ITM) .....	41
3. Projektergebnisse.....	43
3.1 Präzisierung der Anforderungen; Auswahl der Fasermaterialien und Festlegung der Tapestruktur .....	43
3.2 Ergebnisse der Fasercharakterisierung.....	44
3.3 Ergebnisse der Faseraufbereitung und der Weiterentwicklung der rCF-Krempel sowie Krempelbandherstellung .....	45
3.3.1 Ergebnisse der Faseraufbereitung .....	45
3.3.2 Ergebnisse der technologischen und maschinentechnischen Einstellungsparameter und Krempelbandherstellung .....	47
3.3.2.1 Optimierung der Geschwindigkeiten von Einzugswalzen, des Vorreißers und der Arbeiter-Wender-Paare (DoE-1).....	47
3.3.2.2 Optimierung der Walzenabstände zwischen Einzugswalzen, Vorreißer und Arbeiter Wender-Paaren (DoE-2) .....	52
3.3.2.3 Optimierung der Geschwindigkeiten des Tambours, des Arbeiter-Wender-Paars und des Abnehmers (DoE-3) .....	55
3.3.2.4 Optimierung des Abstandes zwischen Tambour, Abnehmer und Arbeiter-Wender Paare (DoE-4) .....	58

3.4 Ergebnisse der hergestellten Streckenbänder.....	63
3.5 Ergebnisse der ermittelten Eigenschaften in den Bändern und rCF-Tapestrukturen.....	65
3.5.1 Faserlänge in den Bändern und rCF-Tapestrukturen .....	65
3.5.2 Faserorientierung in den Bändern und UD-rCF-Tapestrukturen .....	67
3.5.4 Eigenschaften von rCF-Tapestrukturen .....	69
3.5.4.1 Flächenmasse .....	69
3.5.4.2 Kraft-Dehnungs-Verhaltens UD-rCF-TFS in Abhängigkeit von.....	70
3.5.4.2.1 Thermostabilisierungsgard.....	70
3.5.4.2.2 rCF-Faserlänge und rCF-Faservolumenanteil.....	71
3.6 Fertigung und Charakterisierung von recycelten carbonfaserverstärkten FKV- Verbundprüfplatten .....	71
3.6.1 Fertigung von recycelten carbonfaserverstärkten FKV-Verbundprüfplatten .....	71
3.6.3 Einfluss des Faservolumenanteils und der Faserlänge auf Verbundeigenschaften .....	73
3.6.4 Einfluss der Faserlänge und des Durchmessers der Thermoplastfaser auf Verbundeigenschaften.....	74
3.6.5 Einfluss der rCF-Typen und des Haftvermittlers auf Verbundeigenschaften.....	76
3.7 Herstellung eines geometrisch komplexen CFK-Bauteil-Demonstrators aus den entwickelten rCF-Tapes durch Thermopressen (Neuhof/ITM) – AP 8 .....	77
3.8 Ökonomisch/ökologische Bewertung bzw. Bilanzierung (Neuhof/ITM) – AP 9.....	78
4. Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge .....	81
5. Fazit/Ausblick.....	83
6. Danksagung .....	83
7. Literatur .....	84

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Konzept für die Spezialkrepelanlage .....	5
Abb. 2: Spezialkrepelanlage am ITM. Faseröffner und -speiser (links), Spezialkrepel (mitte), Bandtransport und Kannenstock (rechts) .....	5
Abb. 3: Transformierte Darstellung der .....	6
Abb. 4: Schematische Darstellung der Spezialkrepel .....	7
Abb. 5: Steuerungsprinzip der Reguliereinheit der Regulierstrecke Rieter RSB-D40 [17].....	11
Abb. 6: Optische Untersuchung eines mit 9,0 mm Tastrollenbreite verarbeiteten Streckbandes (Variante: KB-rCF-I-80-50) .....	13
Abb. 7: Neuer, von Rieter Ingolstadt GmbH entwickelter längenvariabler Hebelarm zur Reduzierung der Tastrollenbelastung der Reguliereinheit [18] .....	14
Abb. 8: Integriertes Federelement zur Reduzierung des Tastrollenbelastungsdrucks .....	16
Abb. 9: Optische Untersuchung eines mit optimaler Tastrollenbelastung verarbeiteten Streckenbandes (Variante: KB-rCF-I-80-50).....	17
Abb. 10: Gummierte Tastrollen der Reguliereinheit.....	17
Abb. 11: Streckwerkunterwalzenvariante: (a) gummierte Unterwalzen, (b) mit Topocrom beschichtete Unterwalzen, (c) Stahlwalzen mit glatter Oberfläche .....	20
Abb. 12: Einfluss der Verzugparameter auf die Faserorientierung im Streckenband (Variante: KB-rCF-I-80-50) .....	22
Abb. 13: Einfluss der Verzugparameter auf die Faserlänge im Streckenband (Variante: KB-rCF- I-80-50).....	23
Abb. 14: Einfluss der Verzugparameter auf die Bandungleichmäßigkeit (Variante: KB-rCF-I-80- 50).....	24
Abb. 15: Prinzipskizze der Tapefertigungsanlage (TFA) .....	26
Abb. 16: Rieter-Banddoublierungsmaschine als Basisanlage für Laborversuchsstand .....	26
Abb. 17: Optimierung der Bandzuführung der Tapefertigungsanlage (TFA).....	27
Abb. 18: Einfluss der Walzenbelastung und des Walzenabstands auf mittlere Faserlänge (Variante: KB-rCF-I-80-50) .....	28
Abb. 19: Modifiziertes Haftvermittler-Auftragssystem .....	29
Abb. 20: Thermo-Fixierungsmodul: (a) Heizplatte, (b) Heißlüfter, (c) Infrarotstrahler .....	30
Abb. 21: UD-rCF-Tape-Fertigungsversuchsstand mit modifiziertes Streckwerk, Thermostabilisierungs, Kompaktierungs- und Aufwicklungsmoduls.....	31
Abb. 22: entwickelte Prozesskette zur Herstellung von UD-rCF-Tapes im Labormaßstab .....	34
Abb. 23 : Konstruktion und Umsetzung der UD-rCF-Tapefertigungsanlage .....	37
Abb. 24: Vliesführungsdüse, Bandtrichter und schmale Abzugsscheiben einer Standard-Strecke und konstruierte und umgesetzte Abzugswalzen und Vliesführungstrichter .....	38
Abb. 25: Drehteller und Kannenstock mit Bandablage einer Standard-Strecke und konstruierter und umgesetzter Thermostabilisierungs-, Komprimierungs- und Aufwicklungsmodul für TFA..	39
Abb. 26: Konstruiertes und umgesetztes Antriebsystem .....	40
Abb. 27: entwickelter UD-rCF-Tapefertigungsversuchsstand als Prototypanlage .....	41

<b>Abb. 28:</b> Untersuchungen der Tapefertigungsanlage in Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG. .....	42
Abb. 29: hergestellte UD-rCF-Tapes mit unterschiedliche Breite und Dicke an der Tapefertigungsanlage bei Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG. ....	42
Abb. 30: Sattel eines Fahrrads.....	43
Abb. 31: Oberflächenmorphologie der verschiedenen rCF-Fasern .....	45
Abb. 32: Zusammenhang der Bandfeinheit und der Walzengeschwindigkeiten .....	48
Abb. 33: Zusammenhang der Faserorientierung und der Walzengeschwindigkeiten.....	49
Abb. 34: Zusammenhang der Faserlängenverteilung und der Walzengeschwindigkeiten .....	50
Abb. 35: Zusammenhang der Bandkohäsion und Walzengeschwindigkeiten-- .....	51
Abb. 36: Zusammenhang zwischen Bandfeinheit und Walzenabständen.....	52
Abb. 37: Zusammenhang zwischen Faserorientierung und Walzenabstände .....	53
Abb. 38: Zusammenhang zwischen Faserlängenverteilung und Walzenabständen.....	53
Abb. 39: Zusammenhang zwischen Bandkohäsion und Walzenabständen .....	54
Abb. 40: Zusammenhang zwischen Bandfeinheit und Walzengeschwindigkeiten.....	55
Abb. 41: Zusammenhang zwischen Faserorientierung und Walzengeschwindigkeiten .....	56
Abb. 42: Zusammenhang zwischen Faserlängenverteilung und Walzengeschwindigkeiten.....	57
Abb. 43: Zusammenhang zwischen Bandkohäsion und Walzengeschwindigkeiten .....	57
Abb. 44: Zusammenhang zwischen Bandfeinheit und Walzenabständen.....	59
Abb. 45: Zusammenhang zwischen Faserorientierung und Walzenabständen .....	59
Abb. 46: Zusammenhang zwischen Faserlängenverteilung und Walzenabstand .....	60
Abb. 47: Zusammenhang zwischen Bandkohäsion und Walzengeschwindigkeiten .....	61
Abb. 48: Einfluss der Prozesskettenstufen auf die mittlere rCF-Länge (Variant: SB-rCF-I- 40~100-45) .....	66
Abb. 49: Abhängigkeit des Anteils an kurzen Fasern in einem Hybridfaserband von den Ausgangsfaserlängen und vom rCF-Volumengehalt (Variant: SB-rCF-I-40~100-45; SB-rCF-I- 80-45~65) .....	67
Abb. 50: Einfluss der Tapefertigungsprozessstufen auf Faserorientierung in Abhängigkeit von den Ausgangsfaserlängen (Variant: SB-rCF-I-40~100-45) .....	68
Abb. 51: Ungleichmäßigkeit des Krempelbandes, des Streckenbandes und des rCF-Tapes in Abhängigkeit von den Ausgangsfaserlängen (Variant: rCF-I-40~100-45).....	68
Abb. 52: Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Intensität der Infrarotstrahlung und der Produktionsgeschwindigkeit (Variant: TS-rCF-I-80-45) .....	70
Abb. 53: Abhängigkeit der Höchstzugkraft von rCF-Faserlängen und rCF-Faservolumenanteilen (Variant: TS-rCF-I-40~100-45; TS-rCF-I-80-45~65).....	71
Abb. 54: Fertigung von recycelten carbonfaserverstärkten FKV-Verbundprüfplatten: (a) UD Tape, (b) Stapelung, (c) Konsolidierungszyklus, (d) FKV-Verbundprüfplatten .....	72
Abb. 55: Abhängigkeit der Verbundzugfestigkeit der UD-rCF-Tapes vom Konsolidierungsdruck und von der Intensität der Infrarotstrahlung (Variant: VS-rCF-I-80-50) .....	72
Abb. 56: Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Faservolumenanteilen (Variant: VS- rCF-I-60-45~65) .....	74

Abb. 57: Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Länge und des Durchmessers der Thermoplastfaser (Variant: VS-rCF-I-40~100-45) .....	75
Abb. 58: Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Typen und Haftvermittler (Variant: VS-rCF-I~III-60-45) .....	76
Abb. 59: hergestellter Demonstrator aus entwickelten UD-rCF-Tapes .....	78
Abb. 60: Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Typen und Haftvermittler .....	78
Abb. 61: Energieverteilung bei der Tapeferfertigungstechnologie .....	80

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Arbeitsdiagramm.....	3
Tab. 2: Versuchsplanung nach dem Box-Behnken-Design mit drei .....	6
Tab. 3: Versuchsplanungen (DoE 1-4).....	8
Tab. 4: Versuchsdurchführung und Herstellung von Krempelbänder .....	9
Tab. 5: Abhängigkeit der Reguliergüte und Faserschädigung von der Tastrollenbreite (Variante: KB-rCF-I-80-50) .....	12
Tab. 6: Abhängigkeit der Reguliergüte und der Faserschädigung von der Tastrollenbelastung (Basis längenvariabler Hebel) (Variante: KB-rCF-I-80-50) .....	15
Tab. 7: Abhängigkeit der Reguliergüte und Faserschädigung von der Tastrollenbelastung (Basis Federelement) (Variante: KB-rCF-I-80-50).....	16
Tab. 8: Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Tastrollenoberflächen auf Hybridbandqualität (Variante: KB-rCF-I-80-50).....	18
Tab. 9: Ergebnisse zum Einfluss der Unterwalzen auf rCF-Hybridband (Variante: KB-rCF-I-80-50).....	20
Tab. 10: Untersuchungsparameter des Verstreckungsprozesses.....	21
Tab. 11: Versuchsdurchführung und Herstellung von Streckenbänder .....	25
Tab. 12: Versuchsplan zur Untersuchung des Streckwerkes der Tapeferigungsanlage.....	27
Tab. 13: Optimale Parameter für die Tapeferigung .....	32
Tab. 14: Versuchsdurchführung und Herstellung von UD-rCF-Tapes .....	33
Tab. 15: Optimale textiltechnologische und maschinentechnische Einstellungen zur Verarbeitung von rCF-Hybridbändern an der Strecke .....	36
Tab. 16: Versuchsplan zur Untersuchung der UD-rCF-Tapeferigungsanlage.....	41
Tab. 17: Faserlänge, -durchmesser, zugmechanische Eigenschaften und Oberflächenenergie der .....	45
Tab. 18: Aufbereitete Fasern als Vorlage für die Weiterverarbeitung an der Speziallaborkrempel .....	46
Tab. 19: Einfluss der Geschwindigkeiten der Einzugswalzen, des Vorreißers und der Arbeiter-Wender-Paare auf die Faser- und Bandqualität - DoE-1.....	48
Tab. 20: Einfluss der Walzenabstände zwischen Einzugswalzen, Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paare auf die Faser- und Bandqualität - DoE-2.....	51
Tab. 21: Einfluss der Geschwindigkeiten des Tambours (Xt), des Arbeiter-Wender-Paars (Xa) und des Abnehmers (Xd) auf die Faser- und Bandqualität - DoE-3 .....	55
Tab. 22: Einfluss der Walzenabstände zwischen Tambour-Arbeiter-Wender-Paar I, Tambour-Arbeiter-Wender-Paar II und Tambour-Arbeiter-Wender-Paar III auf die Faser- und Bandqualität - DoE-4.....	58
Tab. 23: Optimierte technologische und maschinentechnische Einstellungsparameter der .....	61
Tab. 24: Eigenschaften der entwickelten Krempelbänder .....	62
Tab. 25: Versuchsplan und Ergebnisse zur Streckenbandqualität .....	64
Tab. 26: Optimale Einstellungen für die Verarbeitung von rCF an der Strecke .....	64
Tab. 27: Eigenschaften der entwickelten Streckenbänder .....	65



Tab. 28: Flächenmasse und Dicke des UD-rCF-Tapes.....69  
Tab. 29: Mechanische Eigenschaften der aus den Tapes gefertigten Verbundproben in Richtung  
der Faserorientierung (0°-Richtung) .....77  
Tab. 30: Fertigungskosten der UD-rCF-Tapes.....79  
Tab. 31: Vergleichen des Spezifischer Stromverbrauch und der CO2-Emissionen.....81

**Abkürzungsverzeichnis**

CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
rCFK	Recycelte Carbonfaserverstärkter Kunststoff
rCF	Recycelte Carbonfaser
UD	Unidirektional (verstärkt)
AP	Arbeitspaket
ML	Mittlere Faserlänge
UHML	Obere Hälfte der mittleren Länge
TFA	Tapefertigungsanlage
$x_e$	Geschwindigkeit der Einzugswalzen
$x_v$	Geschwindigkeit des Vorreißers
$x_a$	Geschwindigkeit des Arbeiter-Wender-Paars
$x_{e-v}$	Abstand zwischen Einzugswalze und Vorreißer
$x_{v-a1}$	Abstand zwischen Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar I
$x_{v-a2}$	Abstand zwischen Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar II
$x_t$	Geschwindigkeit des Tambours
$x_a$	Geschwindigkeit des Arbeiter-Wender-Paars
$x_d$	Geschwindigkeit des Abnehmers
$x_{t-a1}$	Abstand zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paar I
$x_{t-a2}$	Abstand zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paar II
$x_{t-a3}$	Abstand zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paar II
$x_{wb}$	Walzenbelastung
$x_{pg}$	Produktionsgeschwindigkeit
$x_{wa}$	Walzenabstand
$x_{gv}$	Gesamtverzug
$x_{vv}$	Vorverzug
$x_{wh}$	Oberwalzenoberflächenhärte

**Formelverzeichnis**

$\mu\text{m}$	Mikrometer
mm	Millimeter
m	Meter
g	Gramm
kg	Kilogramm
t	Tonnen
N	Normalfaser (g)
daN	Deka Newton
mN/m	Milli Newton pro Meter
%	Prozent
$^{\circ}\text{C}$	Celsius
CV %	Variationskoeffizient in Prozent
MPa	Mega-Pascal
GPa	Giga-Pascal
kW	Kilowatt
KWh	Kilowattstunde
KWh/kg	Kilowattstunde pro Kilogramm

## **Kurzfassung**

Durch den zunehmenden Einsatz von Carbonfasern (CF) für Leichtbauanwendungen rückt die Problematik der Entsorgung bzw. der Wiederverwertung der hochwertigen CF in den Vordergrund. Als ein neuer Ansatz wurde im Rahmen dieses Projektes die Entwicklung von UD-Tapes aus recycelten Carbonfasern (rCF) und Thermoplastfasern mit höchster Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit für hochbelastbare thermoplastische CFK-Bauteile umgesetzt. Um den Nachweis einer grundsätzlichen Umsetzbarkeit zu erbringen, wurde die Technologie von der Faseraufbereitung bis zur Tapefergung im Labormaßstab am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der Technischen Universität Dresden (ITM der TU Dresden) entwickelt. Es wurden zunächst die am ITM verfügbaren Maschinentechniken zur Krempel- und Streckbandherstellung modifiziert und technologisch-konstruktiv weiterentwickelt. Im nächsten Schritt erfolgte die technologische Modifikation und Erweiterung einer Industriestrecke zur Tapefergungsanlage, die aus Streckwerk, Thermofixierungs- und Aufwicklungsvorrichtung besteht. Anschließend wurde die erprobte Prozesskette in die Industriereife überführt und bei der Spinnerei Neuhof in die bestehende Maschinenteknik integriert. Darauf basierend wurde das gleichmäßige hochorientierte rCF-Tape aus den Hybridstreckenbändern im Labor- und Industriemaßstab entwickelt. Damit konnte eine vollständige Fertigungskette zur Umsetzung der rCF-Tapes mit einer Breite von bis zu 100 mm realisiert werden. Die Projektergebnisse bestätigen, dass durch Modifikation und Optimierung des Kardier- und Streckprozesses ein gleichmäßiges hochorientiertes Band mit geringer Fasereinkürzung und reproduzierbarer Qualität für die Fertigung von Tapestrukturen mit hohem Leistungsvermögen entwickelt werden kann. Es wurden Imprägnierungs-, Thermofixierungs- und Aufwicklungsmodule entwickelt und an einer modifizierten und konstruktiv-angepassten Tapesfergungsanlage (TFA) auf Basis einer Industriestrecke integriert. Darauf basierend wurden gleichmäßige, hochorientierte UD-rCF-Tapes aus den Streckenbändern mit einer Breite von bis zu 100 mm und Dicken von bis zu 4 mm mit definierten rCF-Faservolumenanteil, mittlerer Faserlänge und Flächenmasse produziert. Durch eine anschließende lastfallgerechte ressourceneffiziente Fertigung von CFK-Bauteilen direkt aus gleichmäßigen hochorientierten UD-rCF-Tapes oder mittels Tapelegen kann der Verschnitt zudem minimiert werden. Eine aufwendige und teure Faden- und Flächenbildung (z. B. Weben) wie z. B. bei rCF-Garnkonstruktionen ist nicht mehr notwendig. Damit können die CF zukünftig unter bestmöglichen ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten wiederverwertet werden.

Die auf Basis der entwickelten UD-rCF-Tapes hergestellten UD-Verbundkörper weisen eine exzellente Zugfestigkeit und ein E-Modul von 1150 MPa und 80 GPa auf (Verbundbauteile aus rCF-Spritzguss und rCF-Vliesstoffe max. 200 MPa bzw. 400 MPa).

## 1. Einführung/Motivation

Die weltweite Carbonfaserproduktion im Jahr 2019 betrug ca. 84.500 t. Diese Tendenz wird sich aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Carbonfasern (Luft- und Raumfahrt, Automobil, Windenergie, Bauwesen sowie Sport und Freizeit) im Zuge der Megatrends (Klimaschutz, Nachhaltigkeit, CO<sub>2</sub>-Reduktion, Elektromobilität, Materialeffizienz, Ökologie, etc.) in den kommenden Jahren stark beschleunigen bzw. bis 2023 auf 120.500 t (jährliche Wachstumsrate von 11 %) steigern [1]. Mit steigender Nachfrage und zunehmendem Einsatz von CFK rückt auch die Frage nach der Entsorgung der End-of-Life-Bauteile in den Vordergrund (rCF-Typ III). Ungefähr 10.000 t CFK-Abfälle fallen bereits jährlich in den USA und Europa an, so werden bspw. bis 2030 allein 6000 bis 8000 Flugzeuge ausgesondert. Moderne Rotoren von Windkraftanlagen bestehen in hohem Maße aus CFK, die Ausmusterung solcher Anlagen erfolgt in der Regel nach 20 Jahren [2]. Heute wird deshalb prognostiziert, dass künftig in Deutschland allein etwa 30.000 t Rotorblätter (ca. 8 t CFK pro Rotorblatt) jährlich entsorgt werden müssen. Darüber hinaus fallen bei der Verarbeitung von primären Endlos-Carbonfasern (CF) zu Textilstrukturen (rCF-Typ I) je nach Anwendungsgebiet bis zu 40% Verschnitt an [3-5].

Das Schließen des Wertstoffkreislaufs für CF gilt als eine der wesentlichen Herausforderungen für die breite Durchsetzung der CF abseits der Luft- und Raumfahrtindustrie. Da die CF-Abfälle weder thermisch verwertet noch deponiert werden dürfen (EU Richtlinie 1999/31/EG), sind sinnvolle Verwertungsverfahren notwendig [6]. Zudem wurde in der EU Anfang der 2000er Jahre die Wiederverwertbarkeit von Kraftfahrzeugen (85 bis 95 m.-% müssen recycelbar sein, EU-Richtlinie 2005/64/EG) beschlossen [7].

Bereits heute können recycelte Carbonfasern (rCF) aus CFK-Bauteilen durch innovative Recycling-Technologien (insbesondere Pyrolyse und Solvolyse) gewonnen werden [8-10]. Die erstmalige Herstellung von CF erfordert im Vergleich zu Metallen einen deutlich höheren Energieaufwand, gleichzeitig basiert nahezu die komplette Herstellung der CF auf PAN-Fasern, die aus Erdöl gewonnen werden. Der verstärkte Einsatz von rCF führt in erster Linie zu einer Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sowie des Energie- und Erdölverbrauchs. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Carbonfasern kann mit effizienten Recyclingmethoden drastisch verringert werden. Mittel- bis langfristig ergeben sich geringere Kosten zur Herstellung von CFK-Bauteilen durch die effiziente Verwertung von rCF [11]. Damit werden die CFK-Bauteile konkurrenzfähiger und ermöglichen einen breiteren Einsatz zur Senkung des Gewichts, insbesondere im Bereich der

Großserienanwendung in der Verkehrstechnik, wie dem Kraftfahrzeugbau. Auf diese Weise lassen sich zum einen fossile Energieträger bei der Verwendung konventioneller Verbrennungsmotoren einsparen. Zum anderen können die Reichweite von Elektrofahrzeugen auf Leichtbaubasis signifikant erhöht und die Fertigungspreise gesenkt werden, was zu einer breiteren Durchsetzung der Elektromobilität, insbesondere in Deutschland als Leitmarkt führen wird. Hierbei kann ein wesentlicher Beitrag zur Umsetzung der Zielstellungen der Nationalen Plattform Elektromobilität geleistet werden [12-15].

Das Ziel des Projektes ist die technologische Entwicklung und Fertigung von gleichmäßigen UD-rCF-Tapes für lasttragende, thermoplastische CFK-Bauteile in reproduzierbarer Qualität und mit hoher Marktrelevanz. Zur Lösung dieser anspruchsvollen, ingenieurtechnischen Problemstellungen sind umfangreiche konzeptionelle und konstruktiv-technologische Entwicklungen bzw. Modifizierungen der Krempel, der Strecke und der Technologie zur Tapeherstellung erforderlich. Durch eine angepasste textiltechnologische Prozesskette sollen die extrem querkraftempfindlichen rCF schonend und nahezu vollständig parallel ausgerichtet in Faserlängsrichtung zu rCF-Tapes verarbeitet werden, womit höchste Verbundzugfestigkeiten (ca. 1200 MPa bei UD-Strukturen) erreichbar sind. Die Forschungsergebnisse lassen sich ebenfalls auf andere Hochleistungsfasern, z. B. Aramidfasern, übertragen.

## **2. Vorgehensweise/Methodik/Projektlauf**

Zur Erzielung der anvisierten, hohen mechanischen Verbundeigenschaften der tapebasierten Strukturen aus rCF und Thermoplastfasern wurde die Entwicklung einer industriellen Prozesskette zur Herstellung von UD-rCF-Tapes in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen durchgeführt, die hier im Arbeitsdiagramm (Tab. 1) dargestellt sind. Im ersten Projektjahr (01.07.2018-30.06.2019) wurden AP 1 und AP 2 bearbeitet und planmäßig abgeschlossen sowie mit der Weiterentwicklung der Reguliereinheit der Strecke (AP 3) begonnen. Im zweiten Projektjahr (01.07.2019-30.06.2020) wurden AP 3 und AP 4 bearbeitet und abgeschlossen sowie mit der Technologie-Transferierung der Tape-Herstellung in den Industriemaßstab (AP 5) planmäßig begonnen. Im dritten Projektjahr (01.07.2020-30.09.2021) wurden AP 5 bis AP 9 bearbeitet und abgeschlossen. Die Bearbeitung der Arbeitspakete erfolgte durch die Kooperationspartner Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG (Neuhof), Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden und Rieter Ingolstadt GmbH (Rieter, Assoziierter Partner ohne Förderung).

**Tab. 1:** Arbeitsdiagramm

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Bearbeiter																												
AP1: Präzisierung der Anforderung	■	■																																				Neuhof (80 h) ITM (1 MM)																											
AP2: Weiterentwicklung Krempel		■	■	■	■	■	■	■	■																													ITM (6 MM)																											
AP3: Optimierung Regulierung Strecke					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																				Neuhof (320 h) ITM (9 MM) Rieter																											
AP4: Entwicklung Labormaßstab															■	■	■	■	■	■	■	■	■														ITM (11 MM)																												
AP5: Transferierung in Industriemaßstab													■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Neuhof (1440 h) ITM (5 MM) Rieter																												
AP6: Optimierung und Herstellung																																					Neuhof (280 h) ITM (2 MM)																												
AP7: Textilphysikalische Prüfung					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	ITM (2 MM)																												
AP8: Herstellung Demonstrator																																					Neuhof (120 h) ITM (0.5 MM)																												
AP9: Ökol./ökon. Bewertung																																					Neuhof (40 h) ITM (0.5 MM)																												
AP10: Berichterstattung																																					Neuhof (40 h) ITM (1 MM)																												
Meilenstein 1: Gleichmäßige Bandherstellung umgesetzt																		▲																																															
Meilenstein 2: Tapeherstellung im Labormaßstab umgesetzt																					▲																																												
Meilenstein 3: Tapeherstellung im Industriemaßstab umgesetzt																																																																	

Im Folgenden werden die für die erfolgreiche Bearbeitung des Forschungsprojektes eingesetzten Technologien und Methoden sowie Vorgehensweisen aufgeführt, da diese die Basis für die im Abschnitt 3 zusammenzufassenden Ergebnisse bilden.

**2.1 Präzisierung der Anforderungen; Auswahl der Fasermaterialien und Festlegung der Tapestruktur (AP 1 Neuhof/ITM)**

Für die erfolgreiche Entwicklung einer Technologie zur Fertigung von UD-Tapestrukturen auf Basis der recycelten Carbonfasern wird auf rCF der Typen I, II und III zurückgegriffen. Die trockenen Fasern aus Produktionsrückständen und Verschnitten (Typ I) verfügen prinzipiell über die gleichen Eigenschaften wie Primärfasern und können bis zu 10 % Fremdstoffe (z. B. Fremdfasern, Bindemittel, Nähfäden und Zusatzstoffe) enthalten. Die Faserlängenverteilung und die Aufmachung können sehr unterschiedlich sein. Die rCF-Typ I sind i. d. R. unbeschädigt, besitzen Originalschlichte und erfüllen die besten Voraussetzungen zur Wiederverwertung in Hochleistungsprodukten. Die vorimprägnierten rCF-Typ II aus Resten und Verschnitten von Prepregs sowie die aus defekten oder End-of-Life-CFK-Bauteilen extrahierten rCF-Typ III erfordern einen zusätzlichen Prozessschritt zum Herauslösen der rCF aus dem Bauteil bzw. eine Entfernung der duro- oder thermoplastischen Matrixsysteme. Dies führt je nach Recyclingverfahren zu unterschiedlichen Fasereigenschaften, wobei die pyrolysierten bzw. solvolysierten Fasern keine Schlichte vorweisen.



Im AP 1 sollen Die Spinnerei Neuhof und das ITM die Anforderungen an die zu entwickelnden UD-rCF-Tapes auf Basis einer fundierten Marktstudie und Befragung von Experten präzisieren. Dies umfasst insbesondere eine konkrete Auswahl von definiert geschnittenen, primären Carbonfasern (rCF-Typ I) und von rCF-Typ II und III mit deren Faserlängenverteilungen (im Bereich von 40 mm bis 100 mm), sowie die Festlegung der Tapegeometrien (z. B. Dicke, Breite und Flächengewicht) und -eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit und Flexibilität bzw. Aufwickelbarkeit). Die Auswahl der Thermoplastfasern (z. B. PA-6) soll unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften, insbesondere der Schmelztemperatur sowie der Verbreitung in der Industrie, und der Kosten erfolgen. Darüber hinaus werden dazu Anwendungsbeispiele definiert, die aus den entwickelten rCF-Tapes in Form von Funktionsmustern und eines Demonstrators generiert werden sollen, z. B. als Teil eines Frontendteils eines Automobils oder Sattel eines Fahrrads.

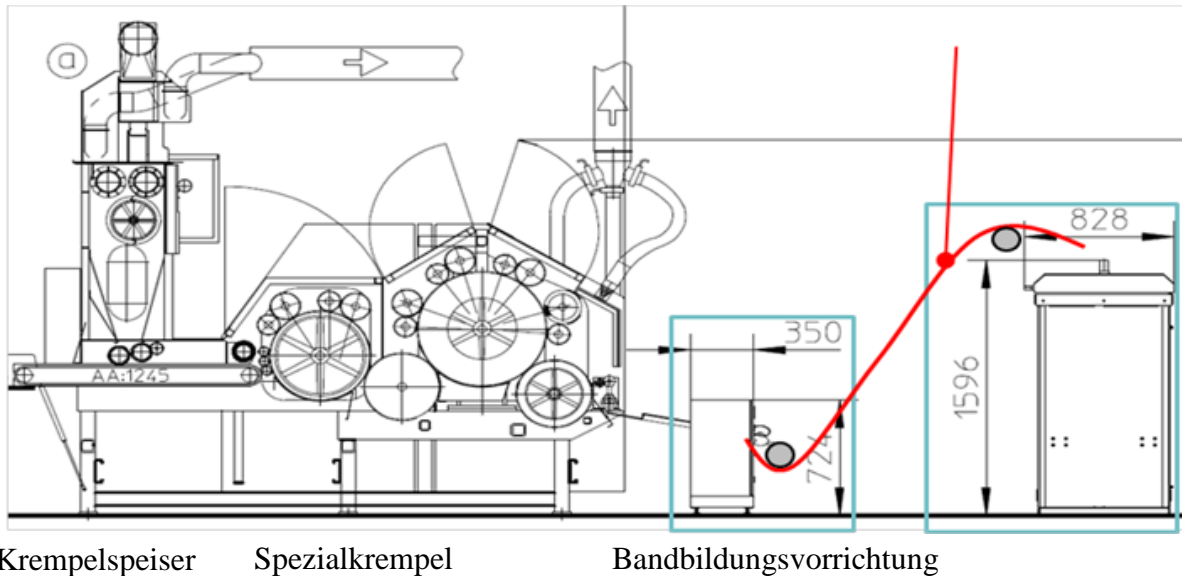
## **2.2 Weiterentwicklung der rCF-Krempel und Krempelbandherstellung (AP 2 ITM)**

### **2.2.1 Verwendete Speziallaborkrempelanlage**

Zur Verarbeitung von rCF und Thermoplastfasern zu einem gleichmäßigen und homogen durchmischten Hybridfaserband wird im Rahmen des Projektes eine Krempeltechnologie eingesetzt, die in Zusammenarbeit zwischen dem Anlagenbauer Oskar Dilo Maschinenfabrik KG (DILO) und dem ITM im Technikumsmaßstab entwickelt und umgesetzt wurde (Abb. 1 und Abb. 2). Die Speziallaborkrempelanlage besteht aus Faseröffner, Krempelspeiser, Spezialkrempel und Bandbildungsvorrichtung. Die bisherigen Ergebnisse von zahlreichen Vorarbeiten und Forschungsprojekten haben gezeigt, dass die CF im Krempelprozess immer noch sehr stark beschädigt bzw. eingekürzt (aktueller Schädigungsgrad  $\geq 60$  %) werden. Dies führt dazu, dass die strukturmechanischen Eigenschaften der auf diesen eingekürzten Carbonfasern basierenden Verbundbauteile nur sehr gering sind und damit die im Projekt anvisierten, hohen mechanischen Eigenschaften der rCF-tapebasierten Verbundwerkstoffe mit der vorhandenen Technologie nicht erzielt werden können. Daher sind ein tiefgreifendes Prozessverständnis aufzubauen und eine Prozessanalyse durchzuführen (siehe Abschnitt 3). Diese von DILO und dem ITM gemeinsam entwickelte Anlage ist für die Bildung von Faserfloren bzw. -bändern aus primären geschnittenen Carbonfasern (rCF Typ I) konzipiert.

In diesem Arbeitspaket erfolgt deshalb die Weiterentwicklung der Anlage, um erstmalig eine schonende Verarbeitung der rCF-Typ II und III zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden an dieser

Speziallaborkrempelanlage noch keine systematischen Untersuchungen zu den technologischen und maschinentechnischen Parametern zur Verarbeitung von rCF durchgeführt. Deshalb werden unter Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften dieser rCF-Typen die Einflüsse der Abstände und Geschwindigkeiten der Vorverdichtungswalze, der Einzugswalzen, der Öffnungswalze, des Tambours und der Arbeiter-Wender-Paare auf das Verarbeitungsverhalten, die Fasereinkürzungen, die Faserbandgleichmäßigkeit und die Faserorientierung systematisch untersucht.



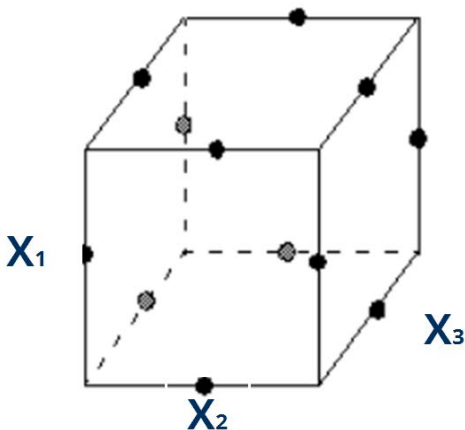
**Abb. 1:** Konzept für die Spezialkrempelanlage



**Abb. 2:** Spezialkrempelanlage am ITM. Faseröffner und -speiser (links), Spezialkrempel (mitte), Bandtransport und Kannenstock (rechts)

### 2.2.2 Statistische Methode zur Versuchsplanung

Um die Anzahl der zur Überprüfung der verschiedenen Einflussfaktoren an der Spezialkrepelanlage notwendigen Versuche zu minimieren, wird das statistische Beschreibungsmodell des Box-Behnken-Designs ausgewählt. Das bedeutet, dass ein Qualitätsmerkmal in Abhängigkeit von zwei Faktoren untersucht wird. In Abb. 3 ist das kubische Modell des Box-Behnken-Designs dargestellt. Bei der Ansicht der transformierten Darstellung mit drei Einflussfaktoren lässt sich erkennen, dass die Eckpunkte des Würfels keinen Versuchspunkt enthalten. Es sind nur die Mittelpunkte der Würfelkanten und der Zentralpunkt besetzt. Mit dem Box-Behnken-Design werden jeweils zwei Faktoren in allen Kombinationen auf zwei Stufen variiert. Die übrigen Faktoren bleiben auf einer mittleren Einstellung. Diese Strategie ist effizient und liefert eine klare Auflösung der Wechselwirkungen und Effekte bei geringen Faktoranzahlen zwischen drei und sechs [16]. In Tab. 2 ist der Aufbau eines dreistufigen Versuchsplans mit drei Faktoren beispielhaft dargestellt. Die Ziffer -1, 1 und 0 stehen für die Einstellparameter minimaler, maximaler und mittlerer Wert.  $X_1$ ,  $X_2$  und  $X_3$  beschreiben die drei einstellbaren Faktoren. Von den ursprünglich 27 ( $3^3$ ) Versuchspunkten verbleiben 13. Um die Orthogonalität zu gewährleisten, sind zwei Wiederholungen des Zentralpunktes notwendig. Somit beläuft sich die Anzahl der Versuche auf 15. Basierend auf dieser Versuchsmethodik werden umfangreiche Untersuchungen im Abschnitt 2.2.4 durchgeführt, deren Ergebnisse in Abschnitt 3.3.2 dargestellt werden.



**Abb. 3:** Transformierte Darstellung der Versuchspunkte eines Box-Behnken-Planes für drei Einflussgrößen ohne Zentralpunkt

Nr.	Parameter		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

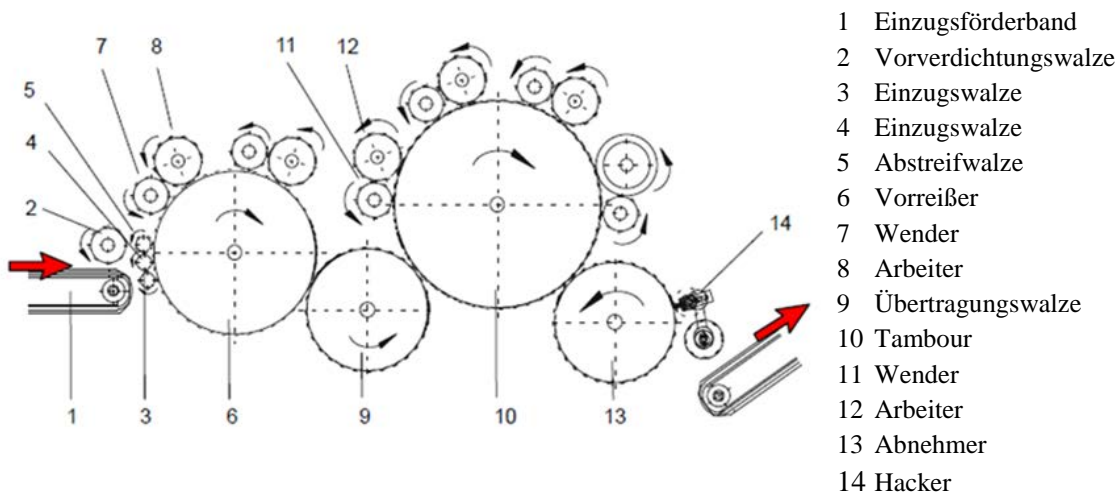
**Tab. 2:** Versuchsplanung nach dem Box-Behnken-Design mit drei Faktoren

### 2.2.3 Faseraufbereitung

Die Faseraufbereitung stellt die erste Prozessstufe beim Tafelfertigungsprozess dar. Für die Aufbereitung der Fasern wird das Faseröffnermodul eingesetzt (Abb. 2). Es werden die rCF (40 mm / 60 mm / 80 mm / 100 mm) mit den PA 6-Stapelfasern (40 mm und 60 mm) mit definierten Faserlängen und Faservolumenanteilen (rCF/PA6: 45 % / 55 %; 50 % / 50 %; 55 % / 45 %; 60 % / 40 % und 65 % / 35 %) gleichmäßig vorgeöffnet und vorgemischt (Ergebnisse Abschnitt 3.3.1). Anschließend werden die vorgeöffneten Fasern über den Förderventilator und eine Rohrleitung dem Krempelspeiser zugeführt. Diese stellen das Ausgangsmaterial für die Entwicklung des Faserbands dar (Abschnitt 3.3.1).

### 2.2.4 Erarbeitung des Versuchsplanes, Versuchsdurchführung und Herstellung von Proben für die Charakterisierung

Die vorgeöffneten und vorgemischten Fasern werden über den Krempelspeiser den Abzugswalzen zugeführt und gleichmäßig verdichtet (Abb. 1). Das erfordert eine mehrstufige Regelungstechnik, u. A. durch Einsatz von Lichtschranken und Differenzdruckmesssystemen, um beide Faserkomponenten gleichmäßig komprimiert auf das Transportband der Spezialkrempel vorzulegen, insbesondere im Zusammenspiel mit dem Faseröffnermodul. Anschließend erfolgt im Modul der Spezialkrempel die Florbildung aus rCF und PA 6-Fasern (Abb. 1). Insbesondere die Walzenabstände und -geschwindigkeiten beeinflussen das Verarbeitungsverhalten, die Fasereinkürzung, die Faserbandgleichmäßigkeit und die Faserorientierung im Krempelprozess maßgeblich. Wegen der geringen Bruchdehnung und hohen Querkraftempfindlichkeit der rCF wurden umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen technologischen und maschinentechnischen Parameter der Speziallaborkrempelanlage durchgeführt.



**Abb. 4:** Schematische Darstellung der Spezialkrempel

Deshalb werden der gesamte Versuchsplan an der Spezialkrepelanlage unter Berücksichtigung der wichtigsten Einflussfaktoren Walzenabstände und –geschwindigkeiten in den Bereichen Einspeisung und Vorreißer sowie Tambour und Abnehmer in vier Versuchsreihen (DoE 1-4) auf Basis der schematischen Darstellung in Abb. 4 erarbeitet (Tab. 3). Ein vollfaktorieller Versuchsplan würde demnach  $3^3 = 27$  Versuche je Reihe umfassen. Durch die in Tab. 3 dargestellte Versuchsplanung wird der Versuchsaufwand auf 15 Versuche je Versuchsreihe, also insgesamt auf 60 Versuche verringert.

**Tab. 3:** Versuchsplanungen (DoE 1-4)

Nr.	Parameter		Einheit	Bereich		
				min.	mittel	max.
DoE-1	Einzugswalzengeschwindigkeit	$X_e$	m/min	0,08	0,16	0,24
	Vorreißergeschwindigkeit	$X_v$	m/min	50	95	140
	Arbeitergeschwindigkeit	$X_a$	m/min	8	16	24
DoE-2	Einzugswalzen-Vorreißer-Abstand	$X_{e-v}$	mm	2	4	6
	Vorreißer-Arbeiter-I-Abstand	$X_{v-a1}$	mm	0,8	1,2	1,6
	Vorreißer-Arbeiter-II-Abstand	$X_{v-a2}$	mm	1,5	2	2,5
DoE-3	Tambourgeschwindigkeit	$X_t$	m/min	160	200	240
	Arbeitergeschwindigkeit	$X_a$	m/min	15	30	45
	Abnehmergeschwindigkeit	$X_d$	m/min	8	10	12
DoE-4	Tambour-Arbeiter -I-Abstand	$X_{t-a1}$	mm	0,5	1	1,5
	Tambour-Arbeiter -II-Abstand	$X_{t-a2}$	mm	0,5	1	1,5
	Tambour-Arbeiter -III-Abstand	$X_{t-a3}$	mm	0,5	1	1,5

In DoE-1 werden drei verschiedene Geschwindigkeiten der Einzugswalzen, des Vorreißers und des Arbeiter-Wender-Paares im Bereich der Einspeisung und des Vorreißers untersucht. In DoE-2 werden die Walzenabstände zwischen Einzugswalzen und Vorreißer, Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar 1 sowie Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar 2 im Bereich der Einspeisung und des Vorreißers analysiert. In DoE-3 werden drei verschiedene Geschwindigkeiten des Tambours, des Arbeiter-Wender-Paares und des Abnehmers im Bereich des Tambours und Abnehmers variiert. In DoE-4 werden die Walzenabstände zwischen Tambour-Arbeiter-Wender-Paar-I, Tambour-Arbeiter-Wender-Paar-II und Tambour-Arbeiter-Wender-Paar-III im Bereich des Tambours und Abnehmers verändert.

### 2.2.5 Versuchsdurchführung und Herstellung von Proben für die Charakterisierung

Basierend auf den zu ermittelnden, optimalen technologischen und maschinentechnischen Einstellparametern für das beste Verhältnis aus Faserschädigung, Parallelisierung und Bearbeitungsintensität werden Untersuchungen gemäß Tab. 4 durchgeführt sowie Krempelbänder zur Charakterisierung in AP 7 hergestellt. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 3 dargestellt und diskutiert. Die hergestellten Krempelbänder werden für das AP 3 (Abschnitt 3.4) zur Fertigung der Streckenbänder zur Verfügung gestellt.

**Tab. 4:** Versuchsdurchführung und Herstellung von Krempelbänder

rCF-Typ	rCF	PA 6	rCF/PA6	vorgeöffnete und vorgemischte rCF und PA 6- Fasern Bezeichnung: rCF-Typ-Länge- Vol.%	hergestellte Krempelband
	Faserlänge [mm]		Faservolumen- engehalt [%]		
I	40	40	45	rCF-I-40-45	KB-rCF-I-40-45
I	40	40	50	rCF-I-40-50	KB-rCF-I-40-50
I	60	60	45	rCF-I-60-45	KB-rCF-I-60-45
I	60	60	50	rCF-I-60-50	KB-rCF-I-60-50
I	60	60	55	rCF-I-60-55	KB-rCF-I-60-55
I	60	60	60	rCF-I-60-60	KB-rCF-I-60-60
I	60	60	65	rCF-I-60-65	KB-rCF-I-60-65
I	80	60	45	rCF-I-80-45	KB-rCF-I-80-45
I	80	60	50	rCF-I-80-50	KB-rCF-I-80-50
I	80	60	55	rCF-I-80-55	KB-rCF-I-80-55
I	80	60	60	rCF-I-80-60	KB-rCF-I-80-60
I	80	60	65	rCF-I-80-65	KB-rCF-I-80-65
I	100	60	45	rCF-I-100-45	KB-rCF-I-100-45
I	100	60	50	rCF-I-100-50	KB-rCF-I-100-50
I	100	60	55	rCF-I-100-55	KB-rCF-I-100-55
I	100	60	60	rCF-I-100-60	KB-rCF-I-100-60
I	100	60	65	rCF-I-100-65	KB-rCF-I-100-65
II	60	60	45	rCF-II-60-45	KB-rCF-II-60-45
III	65	60	45	rCF-III-65-45	KB-rCF-III-65-45

Die gewonnenen Erkenntnisse stellen eine wichtige Basis zur Beschaffung einer geeigneten Krempelanlage für die Firma Die Spinnerei Neuhof dar, die eine derartige Anlage für die Verarbeitung von rCF nicht besitzt. Deshalb stellt das ITM im Rahmen des gesamten Projekts die Krempelbänder für die Untersuchungen bei Die Spinnerei Neuhof zur Verfügung.

## **2.3 Weiterentwicklung der Reguliereinheit der Strecke und Herstellung der Streckenbänder (AP 3 Neuhof/ITM/ Rieter)**

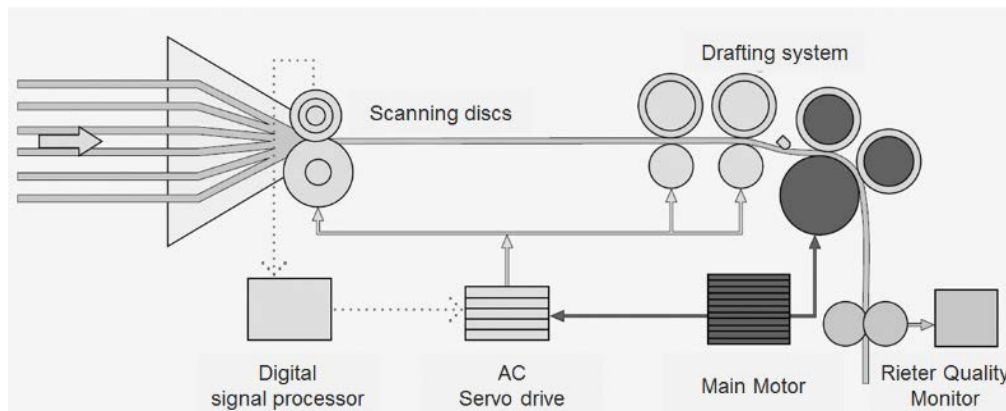
### **2.3.1 Notwendigkeit der Regulierungsstrecke**

Bei den bisherigen Forschungsarbeiten konnte das Regulierungssystem von konventionellen Strecken zur Ausregulierung der Massenschwankungen von Faserbändern nicht eingesetzt werden, weil die Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung der querkraftempfindlichen rCF enorm ist. Aus den Vorversuchen an der Strecke mit aktiver Reguliereinheit unter Verwendung der serienmäßigen Tastrollenbelastung von 800 N wurde festgestellt, dass die Faserschädigung der sich im rCF-Hybrid-Streckenband befindenden rCF durch die Abtastung und Ver Streckung > 50 % beträgt. Diese starke Faserschädigung ist im Hinblick auf die zu erreichenden, hohen verbundmechanischen Eigenschaften nicht akzeptabel. Daher wird aktuell bei der Verarbeitung des rCF-Faserbandes an der Strecke keine Reguliereinheit verwendet. Das führt dazu, dass die Massenschwankungen des Bandes extrem groß sind. So liegt die Bandungleichmäßigkeit bei min. 20 %. Deshalb werden im Rahmen des Projektes die Reguliereinheit der Strecke sowie die Steuerung zur Ausregulierung der Bandungleichmäßigkeit und zur Reduzierung der Faserschädigung derart weiterentwickelt, dass sie an die extreme Querkraftempfindlichkeit der Fasern hinsichtlich Tastrollenbelastung und -oberfläche angepasst sind, um die Bandungleichmäßigkeit signifikant auf  $CV < 10\%$  und die Faserschädigung signifikant auf  $< 3\%$  zu reduzieren.

Die zentrale Aufgabe der Strecke besteht in der Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Massenschwankungen der Bänder im gesamten Bereich. Dies wird zum einen durch die Doublierung, indem die kurzwelligen und langwelligen Massenschwankungen durch einen statistischen Ausgleichseffekt beim Übereinanderlegen mehrerer Faserbänder vergleichmäßig werden und zum anderen mittels Ausregulierung der Massenschwankungen durch die Reguliereinheit erreicht. Die in dem Projekt eingesetzte Regulierstrecke RSB-D40 V2 ist mit einem elektronischen Reguliernsystem ausgestattet.

Das Funktionsprinzip der Reguliereinheit einer Rieter-Strecke RSB D-40 ist in Abb. 5 dargestellt [17]. Die schematische Skizze zeigt, dass die Reguliereinheit aus einem Tastrollenpaar, einem Signalwandler und einem Servoantrieb besteht. Eine der beiden Tastrollen ist beweglich gelagert und wird durch die Volumenschwankungen der einlaufenden Bänder ausgelenkt. Die Auslenkbewegungen werden von einem Signalwandler in elektrische Spannungswerte umgewandelt und an die Reguliereinheit weitergeleitet. Aufgabe der Reguliereinheit ist es, den korrekten Sollwert für den Servoantrieb zu generieren. Dieser wird aus den elektrischen

Signalwerten der abgetasteten, einlaufenden Bänder und der Liefergeschwindigkeit der Strecke gebildet. Der Servoantrieb erzeugt daraus eine gesteuerte Ausgangsdrehzahl für das Differentialgetriebe. Mit dieser gesteuerten Ausgangsdrehzahl des Differentialgetriebes werden die Drehzahlen des Eingangs- und Mittelzylinders und der Bandförderorgane vor dem Streckwerk variiert. Dadurch werden im Hauptverzugsfeld die gewünschte Verzugsänderung erzielt und die Volumenschwankungen (welche aufgrund der starken Komprimierung durch die Tastwalzen den Masseschwankungen entsprechen) der einlaufenden Bänder ausreguliert [17].



**Abb. 5:** Steuerungsprinzip der Reguliereinheit der Regulierstrecke Rieter RSB-D40 [17]

Durch den Einsatz des Regulierungssystems ist mit konventionellen Spinnfasern (z. B. Baumwolle, Polyester) bereits eine sehr hohe Bandgleichmäßigkeit möglich. Dieses System ist für die Verarbeitung der querkraftempfindlichen rCF-Streckenbänder allerdings in der jetzigen Form ungeeignet, da durch die extrem hohe Anpresskraft von 800 N an den Tastrollen die rCF stark beschädigt werden. Eine Verringerung des Anpressdrucks an der Strecke RSB-D40 V2 ist konventionell nicht vorgesehen, da sich dieser massiv auf die validierte Steuerung und Regelung der Bandgleichmäßigkeit auswirkt. Dem somit vorhandenen, erheblichen Entwicklungsaufwand zur Umsetzung der Regulierung der Strecke RSB-D40 V2 mit an die Querkraftempfindlichkeit der rCF angepasster, minimierter Tastrollenbelastung kann daher ausschließlich durch enge Zusammenarbeit mit der Firma Rieter Ingolstadt GmbH (assoziiertes Partner) Genüge getan werden. Nur so können die notwendigen, umfangreichen Änderungen an der elektronischen Maschinensteuerung und -regelung der Strecke mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit durchgeführt werden.

Bei den systematischen Versuchen wird durch Variation der Parameter eine möglichst hohe Bandgleichmäßigkeit bei geringer Faserschädigung angestrebt. Dabei wurden drei Lösungsansätze



verfolgt: (1) unterschiedliche Tastrollenbreite, (2) längenvariabler Hebelarm und (3) steifigkeitsoptimierte Federelemente [18].

### 2.3.2 Untersuchungen mit unterschiedlichen Tastrollen zur Auswahl der optimalen Tastrollen

Bei den Tastrollen der Reguliereinheit wird die zweite, beweglich gelagerte Rolle durch Massenschwankungen des Eingangsbands ausgelenkt und hält eine konstante Oberflächenbelastung auf das Eingangsmaterial aufrecht. Durch den Einsatz einer größeren Tastrollenbreite kann der auf das Faserband wirkende Druck verringert werden, was zu einer geringeren Faserschädigung der querkraftempfindlichen rCF führt. Die Wahl der richtigen Tastrollenbelastung ist dabei ein Kompromiss: einerseits ist eine möglichst hohe Belastung nötig, um das Band möglichst bis auf den Substanzquerschnitt zu komprimieren, sodass Masseschwankungen korrekt erfasst werden. Andererseits führt eine zu hohe Belastung zur Schädigung der rCF, die unterbunden werden soll [18].

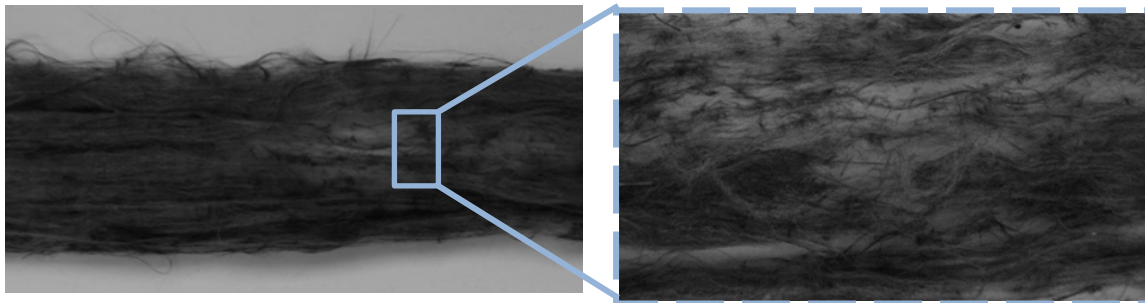
Tab. 5: Abhängigkeit der Reguliergüte und Faserschädigung von der Tastrollenbreite (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Tastrollenbreite [mm]	Tastrollenbelastung [N]	0 %-Tastrollenabstand [mm]	Bandfeinheit [ktex]	Bandungleichmäßigkeit [CV% 1m]	mittlere Faserlänge [mm]
5,5	800	3,127	$3,37 \pm 0,04$	2,08	$29 \pm 2,3$
7,0	800	2,914	$3,35 \pm 0,06$	2,28	$29 \pm 2,5$
9,0	800	2,673	$3,32 \pm 0,05$	2,19	$32 \pm 1,6$
11,0	800	2,250	$3,22 \pm 0,30$	7,55*	$32 \pm 2,05$
**	**	**	$3,35 \pm 0,35$	7,74	$60 \pm 2,7$

\* Regulierung funktioniert nicht; \*\* Streckenband ohne Regulierung

Zur Realisierung einer minimalen Faserbelastung im Bereich der durch die Tastrollen verursachten Faserkompaktierung wurde im ersten Ansatz, in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Rieter Ingolstadt GmbH, die am besten geeignete Tastrollenbreite ermittelt, damit eine optimale Ausregulierung erfolgen konnte. Die Untersuchungen wurden mit Tastrollen unterschiedlicher Breite von 5,5 mm, 7,0 mm, 9,0 mm und 11,0 mm unter Verwendung einer konstanten Tastrollenbelastung von 800 N durchgeführt. Zur Bewertung der Reguliergüte wurden unter Variation des Tastrollenabstands die Tastrollenspannung, die Bandungleichmäßigkeit sowie die Faserlängenverteilung bestimmt und in Tab. 5 zusammengefasst.

Der 0 %-Tastrollenabstand sinkt prinzipbedingt mit steigender Tastrollenbreite. Der Tastrollenabstand bei Verwendung der Tastrolle 11,0 ist kleiner als die angegebene technische Untergrenze (2,5 mm), sodass das Regulierungssystem nicht korrekt arbeiten kann. Dies spiegelt sich auch in den sehr hohen CV1m-Werten der hergestellten Streckenbänder wider. Die CV1m-Werte der Bänder, die mit 5,5-, 7,0- und 9,0-Tastrollen reguliert wurden, zeigen tendenziell Werte auf ähnlichem Niveau. Die Fasereinkürzung bzw. Faserschädigung sinkt mit breiter werdenden Tastrollen geringfügig (ML von 29 mm auf 32 mm). Die Tastrollen 9 und 11 weisen gegenüber den Tastrollen 5,5 und 7,0 eine minimal geringere Fasereinkürzung bzw. -schädigung auf. Allerdings ist die Faserschädigung erfahrungsgemäß immer noch sehr hoch und beträgt knapp 50 %. Eine Detailaufnahme des Bandes nach dem Verstreckungsprozess mit Regulierung mit einer Tastrollenbreite von 9,0 mm ist in Abb. 6 dargestellt. Dieses Bild verdeutlicht, dass durch die hohe Tastrollenbelastung die rCF stark beschädigt wurden und im Streckenband viele unerwünschte Kurzfasern vorliegen. Daher wurde in den folgenden Entwicklungsschritten die Reduktion der Tastrollenbelastung untersucht [18].

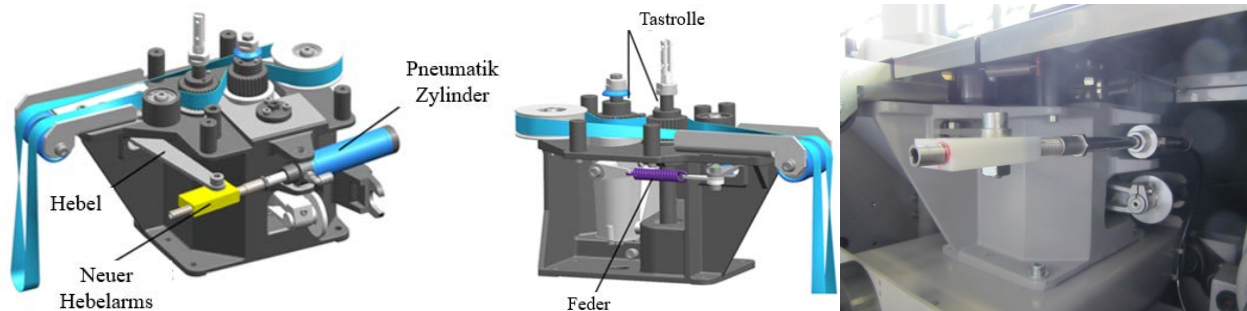


**Abb. 6:** Optische Untersuchung eines mit 9,0 mm Tastrollenbreite verarbeiteten Streckbandes (Variante: KB-rCF-I-80-50)

**Fazit:** Aufgrund der geringeren Faserschädigung im Vergleich zu den anderen Tastrollenbreiten wurde für die weitere Optimierung der Reguliereinheit und zukünftige Untersuchungen eine Tastrollenbreite von 9,0 mm festgelegt.

### 2.3.3 Untersuchungsergebnisse zur Reduzierung der Tastrollenbelastung auf Basis des längenvariablen Hebelarms

Der zentrale Lösungsansatz des assoziierten Partners Rieter Ingolstadt GmbH und des ITM ist, das bestehende Abtastsystem aus den Tastrollen beizubehalten und im Hinblick auf eine schonende Abtastung der rCF weiterzuentwickeln. Daher wurde im zweiten Ansatz vom Projektpartner Rieter Ingolstadt GmbH ein längenvariabler Hebelarm zur Reduzierung des Belastungsdruckes der Tastrollen konzipiert, konstruiert, entwickelt und umgesetzt sowie in die Strecke RSB-D40 integriert (Abb. 7).



**Abb. 7:** Neuer, von Rieter Ingolstadt GmbH entwickelter längenvariabler Hebelarm zur Reduzierung der Tastrollenbelastung der Reguliereinheit [18]

Anschließend wurden das bestehende Steuerungs- und Regelungssystem umfangreich neukalibriert und Streckenbänder mit der optimierten Reguliereinheit hergestellt. Dies soll in Abhängigkeit von Anpressdruck, Bandfeinheit, Reguliergüte, Verzugsgeschwindigkeit, -höhe und -feldweite erfolgen.

Der längenvariable Hebelarm ist mit dem Pneumatikzylinder gekoppelt. Somit bietet die Vorrichtung die Flexibilität, die auf die Tastrollen wirkende Last zu variieren, indem die Hebellänge des Pneumatikzylinders verändert wird. Eine größere Hebellänge führt zu einer geringeren Dehnung der Feder, wodurch die auf die Tastrolle wirkende Belastung verringert wird. Dieser Hebel bietet sechs Einstellstufen, sodass die Belastung der Abtastrollen inkrementell von 800 N auf 200 N reduziert werden kann. Für die Untersuchung wurden drei Tastrollenbelastungen von 800 N (max.), 500 N (mittel) und 200 N (min.) ausgewählt. Zur Bewertung der Ergebnisse, wurden die Bandfeinheit, die Bandungleichmäßigkeit und die mittlere Faserlänge unter Variation der Tastrollenbelastung, der Bandungleichmäßigkeit und der Faserlängenverteilung der Streckenbänder bestimmt und in Tab. 6 zusammengefasst.

**Tab. 6:** Abhängigkeit der Reguliergüte und der Faserschädigung von der Tastrollenbelastung (Basis längenvariabler Hebel) (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Tastrollenbelastung [N]	Tastrollenbreite [mm]	Bandfeinheit [ktex]	Bandungleichmäßigkeit [CV% 1m]	mittlere Faserlänge [mm]
800	9,0	3,32 ± 0,05	2,49	32 ± 1,6
500	9,0	3,37 ± 0,07	2,54	37 ± 2,8
200	9,0	3,30 ± 0,06	2,52	42 ± 2,2
Streckenband ohne Regulierung		3,35 ± 0,35	7,74	60 ± 2,7

Aus Tab. 6 ist ersichtlich, dass die Bandungleichmäßigkeit bei der Reduzierung der Tastrollenbelastung von 800 N auf 200 N keine signifikanten Unterschiede aufweist. Daher ist davon auszugehen, dass das Reguliersystem in diesem Fall bis 200 N Tastrollenbelastung ausreichend genau funktioniert. Die mittlere Faserlänge verbessert sich zwar mit sinkender Tastrollenbelastung von 32 mm auf 42 mm, jedoch bleibt die Faserschädigung nach wie vor zu hoch (ca. 30 %). Deshalb mussten weitere Entwicklungen zur Reduktion der Tastrollenbelastung durchgeführt werden, um das Projektziel (Faserschädigung  $\leq 3\%$ ) zu erreichen und so die anvisierten, hohen mechanischen Verbundeigenschaften mit den entwickelten Tapestrukturen zu erzielen.

**Fazit:** Mit dem entwickelten Hebelmechanismus kann die Belastung der Tastrollen nur auf bis zu 200 N verringert werden. Da positive Ergebnisse hinsichtlich der Faserschädigung bei Reduzierung der Tastwalzenbelastung erzielt werden konnten, soll der Einfluss einer weiteren Reduzierung ( $< 200$  N) der Tastrollenbelastung untersucht werden.

### 2.3.4 Untersuchungsergebnisse zur Reduzierung der Tastrollenbelastung auf Basis des Federelementes mit geringer Steifigkeit

Im dritten Ansatz wurden mit dem Projektpartner Rieter Ingolstadt GmbH auf der Basis bestehender, umfangreicher Erfahrungen vier verschiedene Federelemente mit geringerer Steifigkeit oder durch Kombination von Federn mit geringerer Steifigkeit und längenvariablem Hebelarm ausgewählt und zur Reduzierung des Belastungsdruckes der Tastrollen in die Strecke RSB-D40 integriert (Abb. 8). Es wurden Tastrollenbelastungen von 70 N, 60 N, 50 N und 30 N eingestellt. Anschließend wurden rCF-Hybridkardenbänder auf der Strecke mit der modifizierten Reguliereinheit verarbeitet und die hergestellten Streckenbänder untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 7 zusammengefasst.



Standardfeder

Feder mit geringer Steifigkeit

längenvariabler Hebelarm

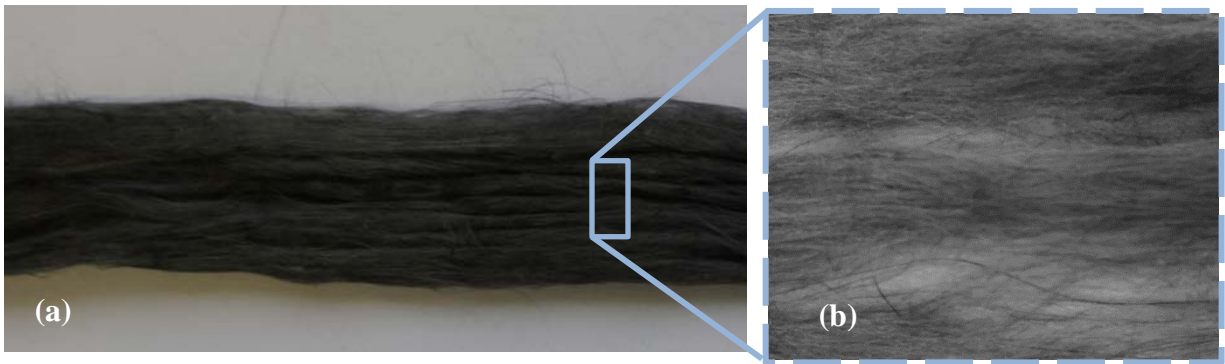
**Abb. 8:** Integriertes Federelement zur Reduzierung des Tastrollenbelastungsdrucks

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Bandungleichmäßigkeiten bei der Variation der Tastrollenbelastung von 70 N bis 50 N auf einem ähnlichen Niveau liegen, wobei bei 50 N der höchste Variationskoeffizient gemessen wird. Bei einer Tastrollenbelastung von 30 N wird der Grenzwert für die Regulierung unterschritten. Die Mittlere Faserlänge als Merkmal für die Faserschädigung ändert sich ab 70 N Tastrollenbelastung mit weiterer Verringerung auf 50 N kaum (von 58 mm auf 60 mm). Es wurde eine minimale Faserschädigung von 2 % gegenüber dem rCF-Hybridkrempeband erzielt. Damit wurde das entsprechende Projektziel (Faserschädigung  $\leq 3$  %) erreicht.

**Tab. 7:** Abhängigkeit der Reguliergüte und Faserschädigung von der Tastrollenbelastung (Basis Federelement) (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Tastrollenbelastung [N]	Tastrollenbreite [mm]	Bandfeinheit [ktex]	Bandungleichmäßigkeit [CV% 1m]	mittlere Faserlänge [mm]
70	9,0	$3,27 \pm 0,06$	2,42	$59 \pm 1,4$
60	9,0	$3,30 \pm 0,05$	2,37	$60 \pm 2,0$
50	9,0	$3,29 \pm 0,07$	2,55	$59 \pm 2,1$
30	9,0	Fehlermeldung aufgrund der Unterschreitung des Grenzwertes		
Streckenband ohne Regulierung		$3,35 \pm 0,35$	7,74	$60 \pm 2,7$

In Abb. 9 ist ein rCF-Hybridstreckenband dargestellt, das mit optimalen Einstellungen auf einer Strecke mit Reguliereinheit bei einer Tastrollenbelastung von 70 N aus einem Hybridkrempeband aus rCF und PA6-Fasern hergestellt wurde. Es sind keine Faserschädigungen bzw. Fasereinkürzungen sowie Carbonfaserstaub zu erkennen.

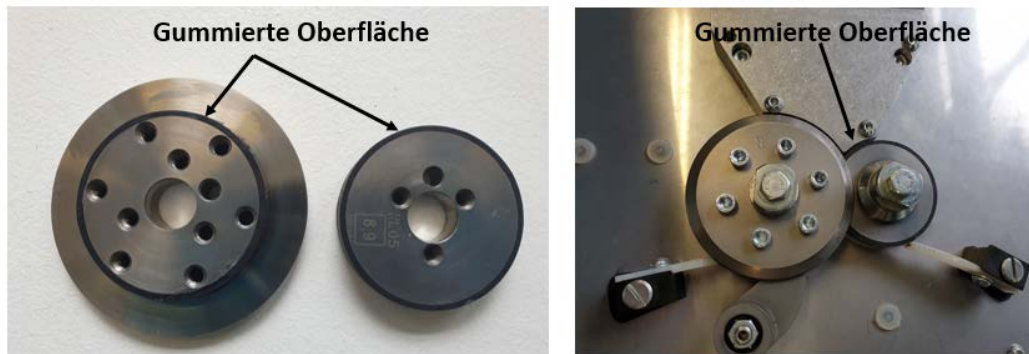


**Abb. 9:** Optische Untersuchung eines mit optimaler Tastrollenbelastung verarbeiteten Streckenbandes (Variante: KB-rCF-I-80-50)

**Fazit:** Für die zukünftigen Untersuchungen wird unter Berücksichtigung des Komprimierungsgrads der rCF eine Tastrollenbelastung von 70 N festgelegt [18].

### 2.3.5 Untersuchung der Tastrollenoberflächen zur schonenden Verarbeitung von rCF

Die Tastrollen sind aus Edelstahl mit gehärteter Oberfläche von geringer Rauigkeit gefertigt. Die querkraftempfindlichen rCF werden zwischen den Tastrollen während des Regulierungsprozesses einer konstanten Querbelastung ausgesetzt. Um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Tastrollen auf die Carbonfaserschädigung zu untersuchen, werden 2 mm der Oberfläche der Edelstahltastrollen abgeschliffen und mit einem Spezialgummi bezogen (Abb. 10). Anschließend werden rCF-Hybridkreppebänder auf der Strecke mit der modifizierten Reguliereinheit verarbeitet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 8 zusammengefasst.



**Abb. 10:** Gummierte Tastrollen der Reguliereinheit

**Tab. 8:** Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Tastrollenoberflächen auf Hybridbandqualität (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Tastrollenoberfläche	Tastrollenbreite [mm]	Tastrollenbelastung [N]	Bandfeinheit [ktex]	Bandungleichmäßigkeit [CV% 1m]	mittlere Faserlänge [mm]
Stahl	9,0	800	3,28 ± 0,06	2,57	33 ± 1,8
Stahl	9,0	70	3,35 ± 0,05	2,42	58 ± 2,4
Gummi	9,0	800	3,37 ± 0,07	2,71	43 ± 3,5
Gummi	9,0	70	3,30 ± 0,06	2,50	57 ± 2,6
Streckenband ohne Regulierung			3,35 ± 0,35	7,74	60 ± 2,7

Aus den Messwerten lässt sich ableiten, dass die Schädigung der Fasern bei der hohen Tastrollenbelastung von 800 N durch den Einsatz einer gummierten Tastrollenoberfläche signifikant um 23 % gegenüber der Stahlwalzenoberfläche verringert werden kann. Die mittlere Faserlänge wird dabei von 33 mm beim Einsatz von Stahlstastrollen auf 43 mm bei Verwendung von gummierten Tastrollen wesentlich erhöht.

Aus den Versuchsergebnissen lässt sich jedoch auch schließen, dass die Faserschädigung hauptsächlich durch die hohe Tastrollenbelastung verursacht wird. Bei einer Tastrollenbelastung von 70 N wird die mittlere Faserlänge durch die Tastrollenoberfläche nur unwesentlich verringert, auch mit den serienmäßigen Stahlstastrollen.

**Fazit:** Die Tastrollenbreite, die -belastung und die -oberfläche haben Einfluss auf die Faserschädigung und Qualität der Bänder. Mit steigender Tastrollenbreite bzw. sinkender Tastrollenbelastung verringert sich die Schädigung der Carbonfasern. Durch die umfangreichen Untersuchungen wurden Parameter evaluiert, mit denen die Fasereinkürzung und die Bandungleichmäßigkeit im Verstreckungsprozess mit Regulierung wesentlich verringert werden konnten. Folgende Einstellungen sind für die weitere Verarbeitung zu empfehlen:

- Tastrollenbreite 9,0 mm
- Tastrollenbelastung 70 N
- Tastrollenoberfläche aus Edelstahl

Mit den ermittelten optimalen Einstellungsparametern wurden für die weiteren Untersuchungen geeignete rCF-Hybridstreckenbänder mit definierter Qualität entwickelt und schonend umgesetzt.

### **2.3.6 Kalibrierung der Regulierungseinheit**

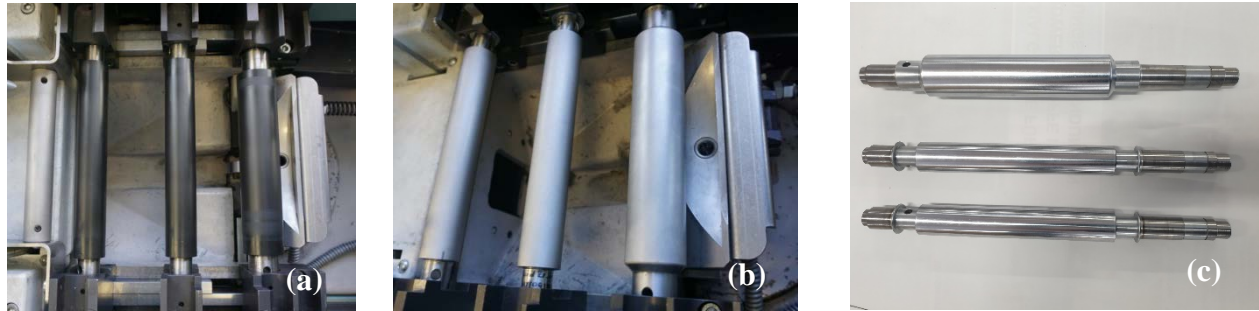
Die Regulierung ist maßgebend für die Qualität des Streckenbandes. Die Kalibrierung der Regulierungseinheit erfolgt nach Vorgaben der Firma RIETER (Technisches Handbuch RSB-D40). Dabei wird zunächst die statistische Kennlinie der Reguliereinheit abgeglichen. Dafür wird das Faserband unter Verwendung der automatischen Regulierung mit drei verschiedenen Banddoublierungen ( $n$  (z. B. 4, 6, 8),  $n+1$ ,  $n-1$ ) verarbeitet. Anschließend wird das Bandgewicht der drei gemessenen Proben ermittelt und die Kennlinie entsprechend korrigiert. In einem weiteren Schritt erfolgt die Anpassung an das dynamische Maschinenverhalten. Dabei wird der Regeleinsatzpunkt variiert und es erfolgt die Messung der Gleichmäßigkeit des hergestellten Streckenbandes, bezogen auf eine Messlänge von einem Meter (CV1m), solange bis ein Streckenband mit den geringsten CV1m erreicht wird [19].

### **2.3.7 Modifikation der Streckwerkunterwalzen**

Das Streckwerk besteht aus mehreren, hintereinanderliegenden Walzenpaaren, die unterschiedlich ansteigende Geschwindigkeiten haben. Auf diese Weise wird das Faserband in seiner Stärke stufenweise verfeinert. Die Standardstrecke mit Regulierung besteht unter anderem aus einem 4-über-3-Streckwerk, d. h. 4 Oberwalzen sind über 3 Streckwerkszylinder angeordnet. Die Oberwalzen sind Stahlwalzenkörper mit Gummibezug. Die Unterwalzen sind aus Stahl mit geriffelten Oberflächen und in Zylindersupporten oder im Gestell in Nadel-, Rollen- oder Kugellager gelagert. Die Unterwalzen werden aktiv durch Schrittmotoren und die Oberwalzen durch Kontaktreibung angetrieben. Für einen störungsfreien Verzugsprozess ist eine einwandfreie Klemmung des Faserbandes notwendig, diese wird durch Belastung der Oberwalzen mittels Federdruck oder Druckluft realisiert. Diese Unterwalzen sind allerdings in der jetzigen Form für die Verarbeitung der querkraftempfindlichen rCF-Streckenbänder ungeeignet, da durch die extrem hohe Belastung in Folge der scharfkantigen Riffelung der Unterwalzen die rCF stark beschädigt werden. Daher wurden in einem vorherigen Projekt gummierte Unterwalzenvarianten für die schonende Verarbeitung von rCF entwickelt. Die Nachteile dieses gummierten Walzensystems sind die hohe Faserhaftung an den gummierten Walzen, was zu Wickeln führen kann, eine geringe Lebensdauer und eine nicht ausreichende Funktionsfähigkeit bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten. Deshalb wurden in diesem Projekt zwei neue Unterwalzen entwickelt, eine mit Topocrombeschichtung und eine weitere Variante mit glatter Stahloberfläche



(Abb. 11 ). Es wurde der Einfluss der Unterwalzen auf die Qualität des Streckenbandes untersucht und analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 9 zusammengefasst.



**Abb. 11:** Streckwerkunterwalzenvariante: (a) gummierte Unterwalzen, (b) mit Topocrom beschichtete Unterwalzen, (c) Stahlwalzen mit glatter Oberfläche

**Tab. 9:** Ergebnisse zum Einfluss der Unterwalzen auf rCF-Hybridband (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Unterwalzen	Bandfeinheit [ktex]	Bandungleichmäßigkeit [CV% 1m]	mittlere Faserlänge [mm]
Gummibezug	$3,25 \pm 0,06$	2,58	$59 \pm 3,2$
Topocrombeschichtung	$3,29 \pm 0,07$	2,65	$59 \pm 1,8$
glatte Stahloberfläche	$3,34 \pm 0,05$	2,45	$52 \pm 2,5$

**Fazit:** Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass mit den Streckwerkunterwalzen mit Gummibezug, Topocrombeschichtung und mit glatter Oberfläche sehr ähnliche Bandungleichmäßigkeiten erzielt werden können. Die Unterwalzen mit Gummibezug und Topocrombeschichtung bieten ein schonendes Verarbeitungsverhalten von rCF hinsichtlich der mittleren Faserlänge im Vergleich zu Stahlwalzen mit glatten Oberflächen. Diese wird durch die Ergebnisse der mittleren Faserlängen verdeutlicht. Darüber hinaus sind die Unterwalzen mit Topocrombeschichtung verschleißfester, sodass diese eine längere Lebensdauer aufweisen und für höhere Produktionsgeschwindigkeiten geeignet sind. Die Faserschädigung mit der glatten Stahloberfläche ist größer gegenüber Unterwalzen mit Gummibezug und Topocrombeschichtung. Dies ist auf die höhere Walzenbelastung zur Gewährleistung der Klemmung der Fasern und härtere Walzenoberfläche zurückzuführen.

### 2.3.8 Textiltechnologische und maschinentechnische Untersuchungen zur Herstellung der Streckenbänder

Die Reproduzierbarkeit in der Herstellung von unidirektionalen Tapes ist ein wichtiger Parameter für die Produktion im industriellen Maßstab, die durch eine konstante und gleichmäßige Qualität des rCF-Hybridstreckbands erreicht wird. Daher war ein Streckenband mit hoher Faserorientierung, geringer Faserschädigung und hoher Gleichmäßigkeit mit reproduzierbarer Qualität zu entwickeln. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde der Einfluss der textiltechnologischen und maschinentechnischen Einstellparameter der Strecke auf die Bandqualität mit Hilfe von einer experimentellen Methodik (Definitive Screening Design) untersucht.

Definitive Screening Designs (DSD) sind Versuchspläne mit sehr geringem Versuchsumfang. Sie ermöglichen die Auswertung von Modellen, die durch quadratische/exponentielle Funktionen beschrieben werden können, und basieren deshalb auf drei Stufen. Zwischen den Hauptfaktoren untereinander und den quadratischen Termen gibt es keine Vermengung (orthogonal). Die sechs in dieser Untersuchung verwendeten Parameter sind Streckwerkbelastung, Produktionsgeschwindigkeit, Walzenabstand, Gesamtverzug, Vorverzug und Oberwalzenoberflächenhärte. Die Mindest- und Höchstwerte der einzelnen Parameter wurden auf der Grundlage der technologischen Grenzen der Strecke experimentell ermittelt (Tab. 10).

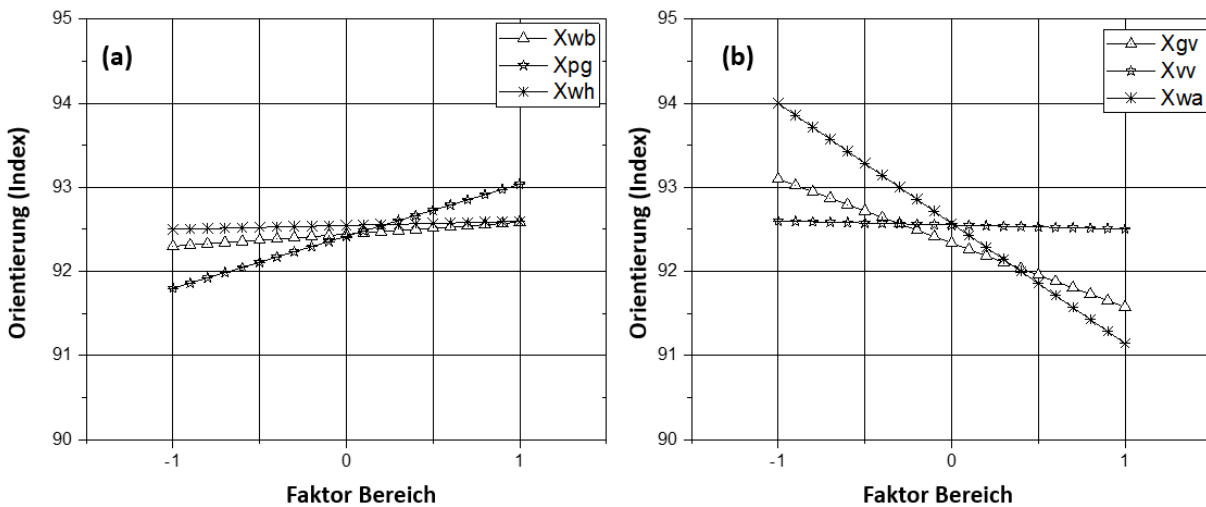
**Tab. 10:** Untersuchungsparameter des Verstreckungsprozesses

Parameter		Einheit	Bereich		
			-1	0	+1
Walzenbelastung	$x_{wb}$	daN	10	20	30
Produktionsgeschwindigkeit	$x_{pg}$	m/min	15	30	45
Walzenabstand Hauptverzugswalzenabstand / Vorverzugswalzenabstand	$x_{wa}$	mm	65/70	65/80	65/90
Gesamtverzug	$x_{gv}$	--	5,06	5,98	7,02
Vorverzug	$x_{vv}$	--	1,1	1,3	1,5
Oberwalzenoberflächenhärte	$x_{wh}$	Shore	75	80	83

#### 2.3.8.1 Optimierung von Streckenparametern für die Faserorientierung

Der Einfluss der Walzenbelastung ( $X_{wb}$ ), der Produktionsgeschwindigkeit ( $X_{pg}$ ) und der Härte der Oberwalzenoberflächen ( $X_{wh}$ ) auf die Faserorientierung im Streckenband ist in Abb. 12(a)

dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Walzenbelastung und die Oberwalzenoberflächenhärte keinen Einfluss auf die Faserorientierung in den untersuchten Bereichen haben. Die Faserorientierung steigt jedoch mit zunehmender Produktionsgeschwindigkeit an. Es wurde bereits festgestellt, dass sich die Fasern beim Verstrecken nicht einzeln, sondern in Bündeln bewegen und bei höherer Geschwindigkeit aufgrund der nun herrschenden Gleitreibung zwischen den Fasern eine gleichmäßige Faserbewegung auftritt. Daher sorgt eine höhere Geschwindigkeit von 45 m/min für ein gleichmäßigeres Verziehen und verbessert die Faserorientierung in Streckenband im Vergleich zu einer niedrigeren Geschwindigkeit [20].



**Abb. 12:** Einfluss der Verzugsparameter auf die Faserorientierung im Streckenband (Variante: KB-rCF-I-80-50)

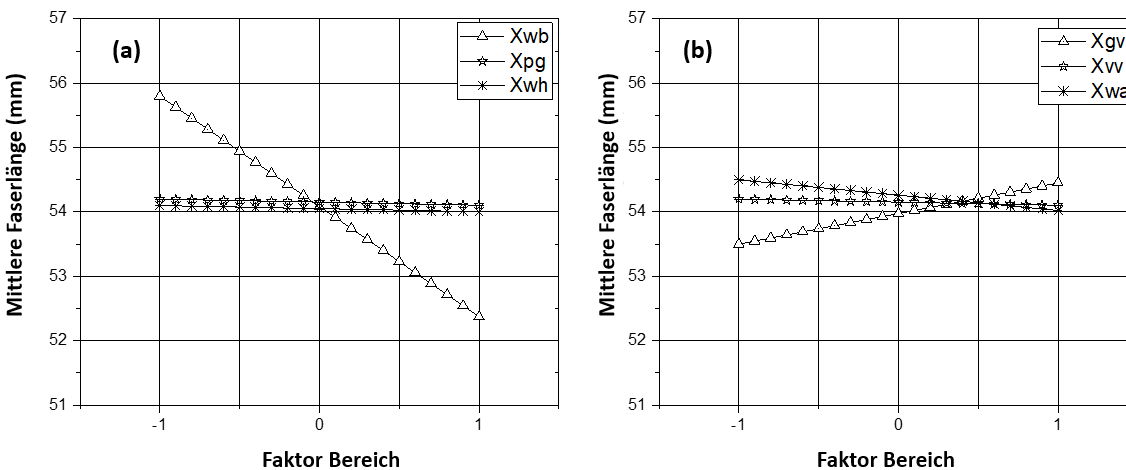
Der Einfluss des Gesamtverzugs ( $X_{gv}$ ), des Vorverzugs ( $X_{vv}$ ) und des Walzenabstands ( $X_{wa}$ ) auf die Faserorientierung im Streckband ist in Abb. 12(b) dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass der Walzenabstand und Gesamtverzug einen großen Einfluss auf die Faserorientierung haben. Der Faserorientierungsgrad sinkt mit zunehmendem Walzenabstand und Gesamtverzug. Der höchste Faserorientierungsgrad von 93 % wird bei minimalem Walzenabstand und geringstem Gesamtverzug erreicht, was auf die mittlere Länge der Carbonfaser im Kardenband von  $62 \pm 2,2$  mm zurückgeführt werden kann. Daher bietet der entsprechende Walzenabstand von 65/70 mm einen besonders gleichmäßigen Verzugsprozess. Ein ähnlicher Effekt zeigt sich auch beim Gesamtverzug. Der Faserorientierungsgrad von 93 % wird bei einem Verzug von 5,06 erreicht, da die glatte Oberfläche der Carbonfaser nur zu geringen Reibkräften zwischen den Fasern

führt. Daher wirkt sich der geringe Gesamtverzug von 5,06 positiv auf die Faserorientierung aus. Der Faserorientierungsgrad ist unabhängig vom Vorverzug.

**Fazit:** Die für das vorliegende Material optimalen Werte für Walzenbelastung ( $X_{wb}$ ), Produktionsgeschwindigkeit ( $X_{pg}$ ), Härte der Oberwalzenoberflächen ( $X_{wh}$ ) und Gesamtverzug betragen 10 daN, 45 m/min, 83° Shore und 5,06-fach.

### 2.3.8.2 Optimierung von Streckenparametern für die Faserlänge

Der Einfluss der Walzenbelastung ( $X_{wb}$ ), der Produktionsgeschwindigkeit ( $X_{pg}$ ) und der Härte der Oberwalzenoberflächen ( $X_{wh}$ ) auf die mittlere Carbonfaserlänge ist in Abb. 13 (a) dargestellt. Es geht aus der Abb. 13(a) deutlich hervor, dass die Walzenbelastung einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Faserlänge hat, denn die Faserlänge sinkt mit steigender Walzenbelastung. Das liegt daran, dass bei einer Walzenbelastung weniger Druck auf die spröden Carbonfasern ausgeübt wird. Folglich gleiten die Faserbündel mit geringerer Reibung im Streckprozess und die Faserschädigung im verstretchten Band nimmt ab.

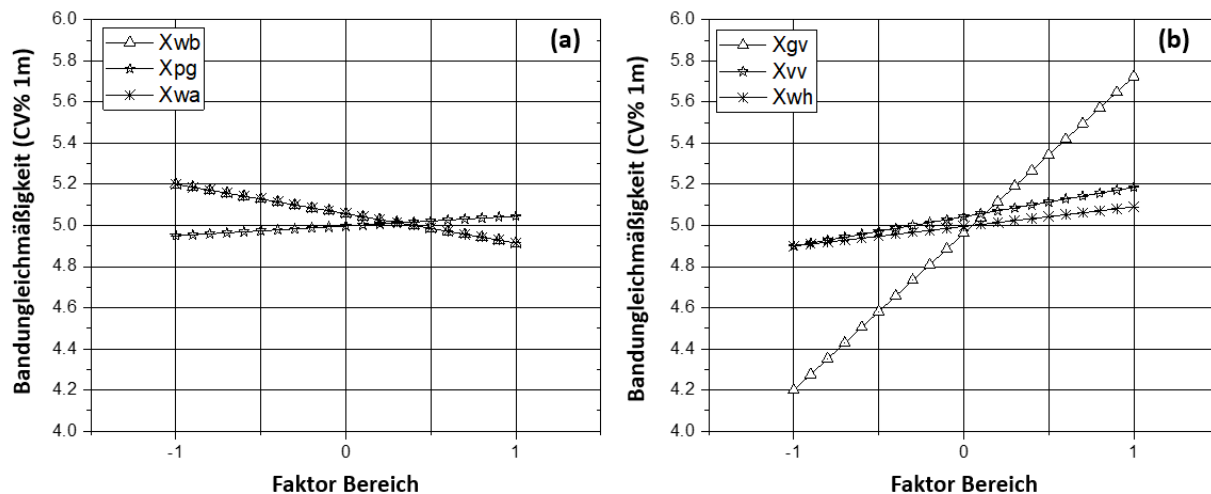


**Abb. 13:** Einfluss der Verzugparameter auf die Faserlänge im Streckenband (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Die Auswirkungen von Gesamtverzug ( $X_{gv}$ ), Vorverzug ( $X_{vv}$ ) und Walzenabstand ( $X_{wa}$ ) auf die mittlere Carbonfaserlänge sind in Abb. 13(b) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere Carbonfaserlänge im Streckenband vom Gesamtverzug beeinflusst wird, denn sie steigt geringfügig mit zunehmendem Gesamtverzug. Der Vorverzug und der Walzenabstand weisen keinen nennenswerten Einfluss auf die mittlere Faserlänge auf, was hauptsächlich auf die Stabilisierungswirkung beim Vorverzug und die geringere mittlere Faserlänge im Kardenband zurückgeführt werden kann [20].

### 2.3.8.3 Optimierung von Streckenparametern für die Bandungleichmäßigkeit

Abb. 14(a) stellt den Einfluss der Walzenbelastung ( $X_{wb}$ ), der Produktionsgeschwindigkeit ( $X_{pg}$ ) und des Walzenabstandes ( $X_{wa}$ ) auf die Bandungleichmäßigkeit dar. Aus dem Diagramm geht hervor, dass diese Parameter die Bandungleichmäßigkeit mit einer Schwankung von 0,3 % nur geringfügig beeinflussen. Eine höhere Walzenbelastung und ein größerer Walzenabstand verringern die Bandungleichmäßigkeit, was sich vor allem durch eine gleichmäßige Verstreckung und ein verbessertes Gleitverhalten der Fasern begründen lässt. Im Gegensatz dazu führt eine steigende Produktionsgeschwindigkeit zu einer geringfügigen Verschlechterung der Bandungleichmäßigkeit.



**Abb. 14:** Einfluss der Verzugsparameter auf die Bandungleichmäßigkeit (Variante: KB-rCF-I-80-50)

Der Einfluss des Gesamtverzugs ( $X_{gv}$ ), des Vorverzugs ( $X_{vv}$ ) und der Härte der Oberwalzenoberflächen ( $X_{wh}$ ) auf die Bandungleichmäßigkeit geht aus der Abb. 14(b) hervor. Die Bandungleichmäßigkeit steigt deutlich mit zunehmendem Gesamtverzug. Dagegen vergrößert sich die Bandungleichmäßigkeit mit steigender Oberwalzenoberflächenhärte und mit zunehmendem Vorverzug unerheblich. Der Grund dafür ist der weichere Gummi, der für die ausreichend hohe Haftung zwischen Walzen und Fasern während des Verzugs mit geringster Schädigung der Fasern sorgt, wodurch ein gleichmäßigerer, störungsfreier Verzugsprozess realisiert wird.

Basierend auf der modifizierten Regulierstrecke und ermittelten textiltechnologischen und maschinentechnischen Parameter werden anschließend Streckenbänder aus rCF mit hohem Orientierungs- und Durchmischungsgrad mit minimaler Faserschädigung (< 3%) aus den

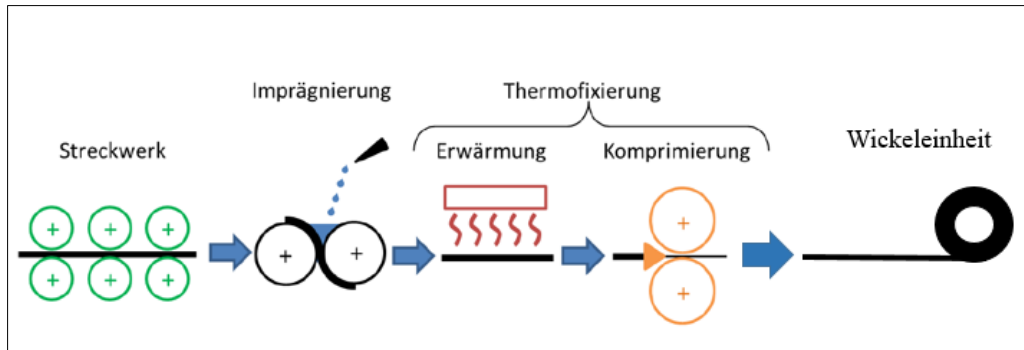
Krempelbändern hergestellt (Tab. 11). Die rCF-Bänder werden APAP 4 zur Entwicklung der rCF-Tapes bereitgestellt.

**Tab. 11:** Versuchsdurchführung und Herstellung von Streckenbänder

rCF-Typ	rCF	PA 6	rCF/PA6	hergestellte Krempelbänder	hergestellte Streckenbänder
	Faserlänge [mm]		Faservolumengehalt [%]		
I	40	40	45	KB-rCF-I-40-45	SB-rCF-I-40-45
I	40	40	50	KB-rCF-I-40-50	SB-rCF-I-40-50
I	60	60	45	KB-rCF-I-60-45	SB-rCF-I-60-45
I	60	60	50	KB-rCF-I-60-50	SB-rCF-I-60-50
I	60	60	55	KB-rCF-I-60-55	SB-rCF-I-60-55
I	60	60	60	KB-rCF-I-60-60	SB-rCF-I-60-60
I	60	60	65	KB-rCF-I-60-65	SB-rCF-I-60-65
I	80	60	45	KB-rCF-I-80-45	SB-rCF-I-80-45
I	80	60	50	KB-rCF-I-80-50	SB-rCF-I-80-50
I	80	60	55	KB-rCF-I-80-55	SB-rCF-I-80-55
I	80	60	60	KB-rCF-I-80-60	SB-rCF-I-80-60
I	80	60	65	KB-rCF-I-80-65	SB-rCF-I-80-65
I	100	60	45	KB-rCF-I-100-45	SB-rCF-I-100-45
I	100	60	50	KB-rCF-I-100-50	SB-rCF-I-100-50
I	100	60	55	KB-rCF-I-100-55	SB-rCF-I-100-55
I	100	60	60	KB-rCF-I-100-60	SB-rCF-I-100-60
I	100	60	65	KB-rCF-I-100-65	SB-rCF-I-100-65
II	60	60	45	KB-rCF-II-60-45	SB-rCF-II-60-45
III	65	60	45	KB-rCF-III-65-45	SB-rCF-III-65-45

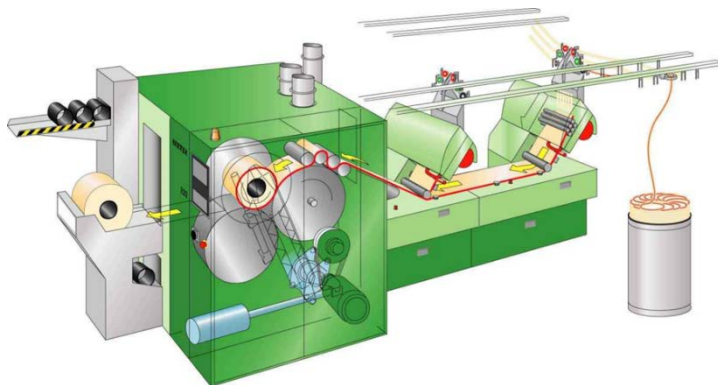
## 2.4 Umsetzung der rCF-UD-Tapes im Labormaßstab - AP4 (ITM)

In diesem AP wurden erstmals rCF-UD-Tapes mit textilähnlichem Verhalten aus den in AP 3 hergestellten gleichmäßigen Streckenbändern entwickelt und am ITM im Labormaßstab umgesetzt. Die dafür erforderlichen, anforderungsgerechten Komponenten sind Streckwerke sowie Einheiten zur Imprägnierung mit einem Haftvermittler und zur Thermofixierung (Erwärmung + Komprimierung). In Abb. 15 ist eine Prinzipskizze der vier benötigten Module dargestellt. Die Herstellung am ITM im Labormaßstab erfolgt dabei an den einzelnen, separaten Komponenten diskontinuierlich.



**Abb. 15:** Prinzipskizze der Tapeherstellungsanlage (TFA)

Um dieses Konzept im Labormaßstab umzusetzen, wurde eine Rieter-Banddoublierungsmaschine als Basisanlage genutzt, die für die Verarbeitung von Baumwollfasern ausgelegt ist, und für die Entwicklung einer unidirektionalen Tapestruktur auf der Basis von recycelten Carbonfasern und thermoplastischen PA 6-Fasern modifiziert und weiterentwickelt wurde. Die wichtigsten Bestandteile dieser Anlage sind ein Bandeinlaufgestell, ein darauffolgendes Streckwerk sowie eine Vlieszusammenführungs- und Wickelbildungsvorrichtung (Abb. 16).



**Abb. 16:** Rieter-Banddoublierungsmaschine als Basisanlage für Laborversuchsstand

Daher wurden diese Sektionen für die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern angepasst bzw. konstruktiv-technologisch weiterentwickelt. Darüber hinaus wurden in diese Basisanlage jeweils ein Imprägnierungs-, Thermofixier- und Aufwicklungsmodul zur Herstellung verfestigter Tapestrukturen integriert. Diese Maßnahmen umfassen:

- Reduzierung der Anzahl von Umlenk- und Reibstellen sowie Vergrößerung Umlenkwinkel
- Modifizierung des Streckwerks → Einsatz von Topocrom-beschichteten Unterwalzen und Anpassung der Streckwerksbelastung
- Konzeptionierung, Konstruktion und Umsetzung eines Imprägnierungsmoduls
- Konzeptionierung, Konstruktion und Umsetzung eines Thermofixiersmoduls
- Konzeptionierung, Konstruktion und Umsetzung eines Aufwicklungsmoduls

### 2.4.1 Optimierung der Bandzuführung

Hierbei wurden die Anzahl der Umlenk- Reibstellen von zehn auf fünf für die Zuführung der Streckenbänder an der Banddoubliermaschine reduziert sowie der Umlenkwinkel z. B. von 5 ° auf 15 ° vergrößert (Abb. 17).



**Abb. 17:** Optimierung der Bandzuführung der Tapefertigungsanlage (TFA)

### 2.4.2 Optimierung des Streckwerks

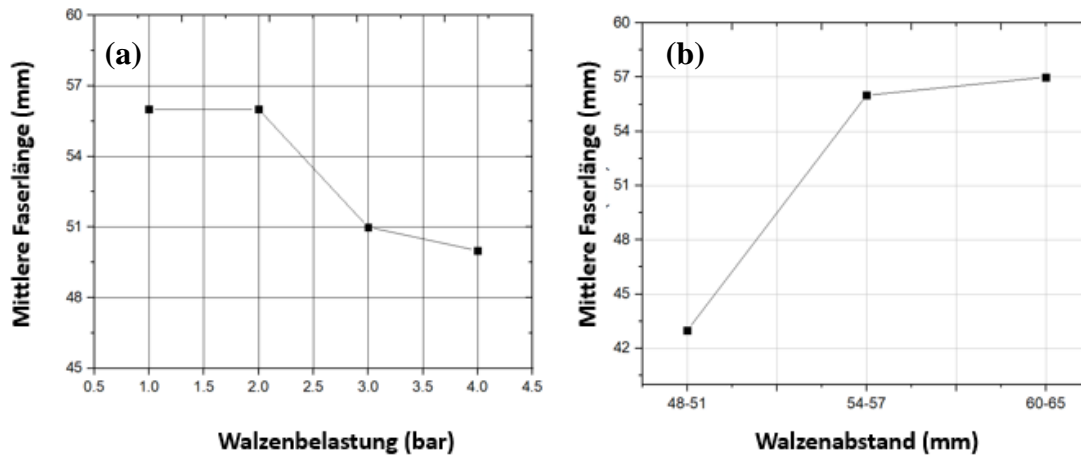
Die Modifikation der Streckwerkunterwalzen der Tapefertigungsanlage (TFA) wird auf Basis der Erkenntnisse aus dem AP 3 (2.3.7) für die Verarbeitung der rCF-Hybridbänder übernommen, d. h. auf die Unterwalzenoberflächen werden Topocrombeschichtungen mit definierter Struktur aufgetragen. Eine systematische Untersuchung des Streckwerks der TFA wurde bereits im Rahmen des AP 3 durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass für die Verarbeitung von rCF-Hybridbändern ein geringerer Verzug, eine mittelharte Oberwalzenoberfläche und eine geringere Streckwerkbelastung die besten Ergebnisse ermöglichen. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein experimenteller Ansatz (One factor at a time (OFAT)) zur Optimierung der textiltechnologischen und maschinentechnischen Parameter zur Verarbeitung von rCF-Hybridbändern zu rCF-UD-Tapes verwendet. Der Versuchsplan zur Untersuchung des Streckwerkes der TFA ist in Tab. 12 dargestellt.

**Tab. 12:** Versuchsplan zur Untersuchung des Streckwerkes der Tapefertigungsanlage

Parameter	Einheit	Versuchs-Nr.		
		1	2	3
Unterwalzen	--	Topocrom beschichtet		
Vorverzug/Hauptverzug		1,11/1,7	1,11/1,7	1,11/1,7
Walzenbelastung	bar	1,0	2,0	3,0
Walzenabstand	mm	48/51	54/57	60/65



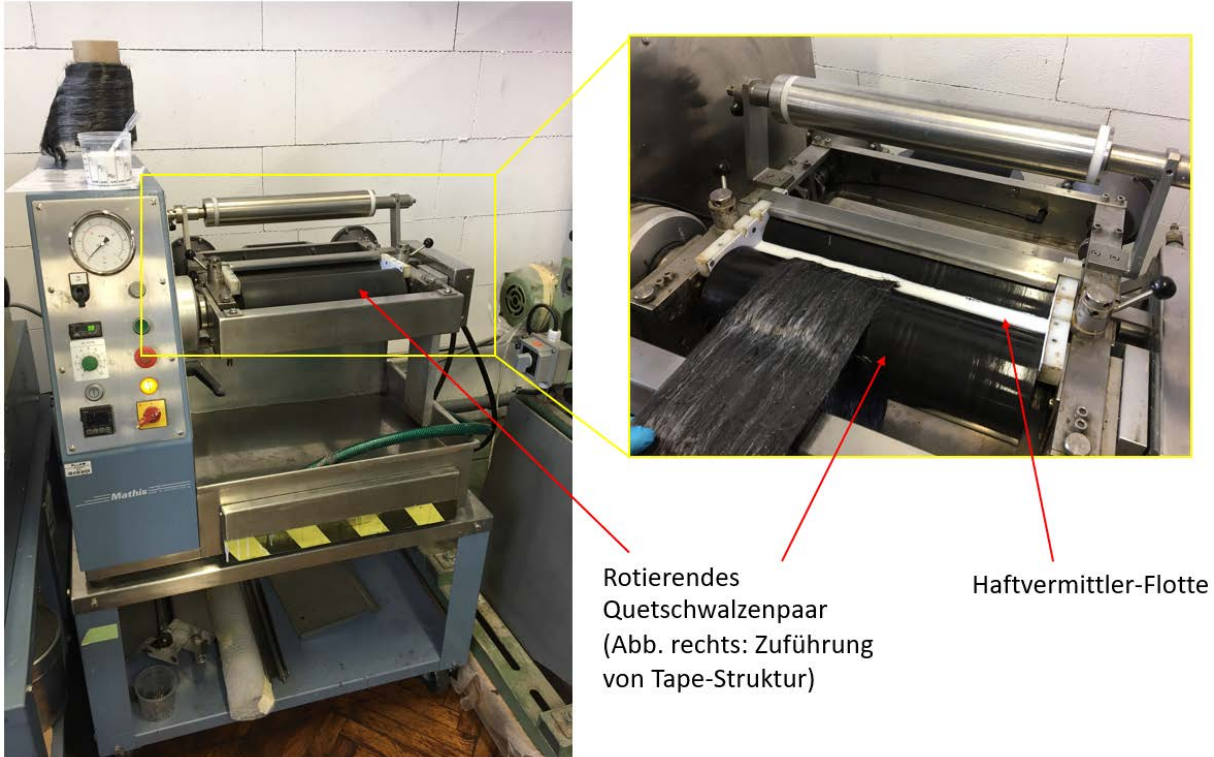
Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Einkürzung der mittleren Faserlänge in der Tapestruktur durch Scherbeanspruchungen der Walzen wie erwartet mit steigender Walzenbelastung sinkt (Abb. 18 a). Die mittlere Faserlänge in der Tapestruktur erhöht sich mit größer werdendem Walzenabstand (Abb. 18 b). Den Ergebnissen zufolge liegen der optimale Walzenabstand und die Walzenbelastung bei 60/65 mm und 2,0 bar.



**Abb. 18:** Einfluss der Walzenbelastung und des Walzenabstands auf mittlere Faserlänge (Variante: KB-rCF-I-80-50)

### 2.4.3 Untersuchung des Imprägnierungsmoduls

Bei den rCF-Typ I ist eine herstellerseitig aufgebraute Schlichte bzw. ein applizierter Haftvermittler für eine optimale Faser-Matrix-Haftung auf den Carbonfasern vorhanden. Im Gegensatz dazu ist dieser bei den rCF-Typ II und III durch die Extraktion im Pyrolyseprozess nicht mehr existent. Aus diesem Grund wurden Haftvermittler von der Firma Michelman als Schlichte mit einer Menge von 1, 2 und 3 Masse-% auf die rCF-Typ 2 und Typ 3 im hochorientierten, dünnen Vlies neu aufgetragen. Aufgrund der technisch komplexen dieses Imprägnierungsmoduls zur Integration an der TFA wurde diese auf eine am ITM vorhandene Laboranlage eingesetzt (Abb. 19) und für eine gleichmäßige und schonende Imprägnierung des hochorientierten dünnen Vlieses optimiert. Das betrifft insbesondere die Modifizierung des Anpressdrucks und der Quetschwalzenoberfläche für eine schonende Verarbeitung der rCF. Die Ergebnisse wurden nach der Charakterisierung der auf den jeweiligen rCF-Tapestrukturen basierenden Verbundplatten hinsichtlich der optimalen Faser-Matrix-Haftung in Kapitel 3.6.5 bewertet.



Rotierendes  
Quetschwalzenpaar  
(Abb. rechts: Zuführung  
von Tape-Struktur)

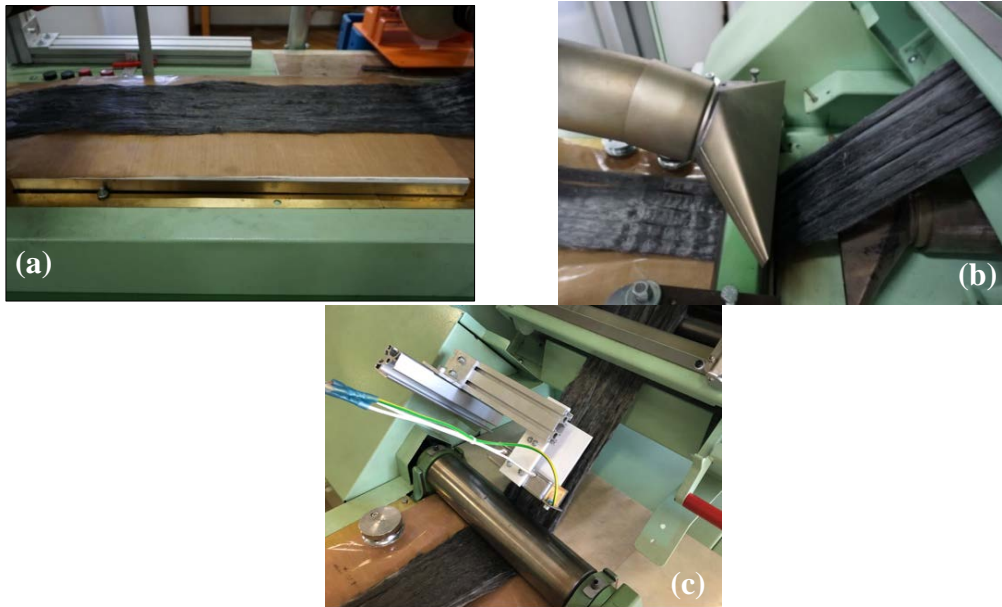
Haftvermittler-Flotte

**Abb. 19:** Modifiziertes Haftvermittler-Auftragssystem

Aufgrund der hohen notwendigen Trockenzeit von ca. 10 Minuten bei den betrachteten, technisch/technologischen Randbedingungen wurde auf die Umsetzung eines kontinuierlichen Verfahrens zum Haftvermittlerauftrag in der Banddoubliermaschine im Rahmen des Projektes verzichtet. Sämtliche durchgeführte Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit sowie zum Einfluss des Haftvermittlers erfolgten somit offline mit der modifizierten Laborbeschichtungsanlage. Aber auf Basis der erzielten Ergebnisse konnte ein Konzept des Imprägniermoduls zur Integration an der Tafelfertigungsanlage erarbeitet werden.

#### 2.4.4 Untersuchung des Thermofixiermoduls

Zur Thermostabilisierung des Vlieses wurden drei Erwärmungsmechanismen auf der Basis von Heizplatte, Heißlüfter und Infrarotstrahler untersucht (Abb. 20).



**Abb. 20:** Thermo-Fixierungsmodul: (a) Heizplatte, (b) Heißlüfter, (c) Infrarotstrahler

Bei einer definierten Temperatur werden die Thermoplastfasern zur UD-rCF-Tape-Stabilisierung gezielt angeschmolzen. Die Erwärmung muss exakt definiert erfolgen, da bei zu hoher Temperatur oder Dauer das Thermoplastfasermaterial zu stark aufschmilzt und die gewünschte Flexibilität der Tapes hinsichtlich ihrer Biegesteifigkeit nach der Komprimierung und Abkühlung nicht mehr gewährleistet ist. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die besten Ergebnisse zur Stabilisierung der UD-rCF- Tapes hinsichtlich der Prozessstabilität mit dem Infrarotstrahler in die Praxis umgesetzt und gleichzeitig die gewünschte Flexibilität für die Weiterverarbeitung eingestellt werden konnten. Deshalb wurden ein für rCF speziell angepasster Infrarotstrahler von der Firma Heraeus beschafft und umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Bei diesen Experimenten wurde beobachtet, dass die Thermofixierung der unidirektionalen Tapestruktur u. a. von der Schmelztemperatur der thermoplastischen Fasern, der Produktionsgeschwindigkeit der Tapestruktur und dem Abstand zwischen Tape und Heizmedium abhängt. In diesem Projekt wird eine Polyamidfaser (PA 6) mit einer Erweichungs- bzw. Schmelztemperatur von 204 °C bzw. 223 °C als thermoplastische Faser verwendet. Daher wurden Untersuchungen unter Variation der Produktionsgeschwindigkeit der Tapestruktur und des Abstandes zwischen Tape und Heizmedium durchgeführt, um eine stabile und zusammenhängende unidirektionale Tapestruktur mit größtmöglicher Flexibilität zu entwickeln. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in Kapitel 3.5.4 dargestellt.

### 2.4.5 Untersuchung des Kompaktierungs- und Aufwicklungsmoduls

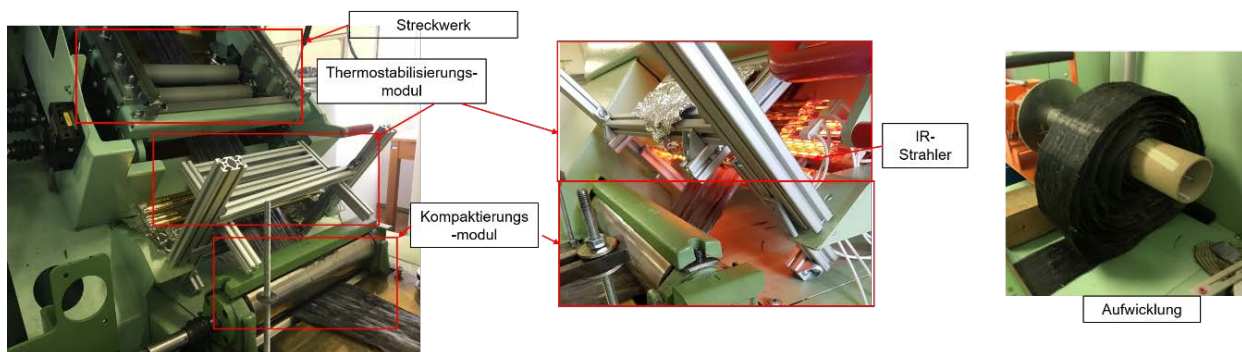
Um Fehlstellen bei der Konsolidierung, wie größere Luftporenschlüsse, aufgrund längerer Fließwege der Matrix entstandene trockene Stellen sowie geringe Verbundeigenschaften aufgrund der voluminösen Strukturen des UD-rCF-Tapes zu eliminieren, wurde das Kompaktierungsmodul zur Erhöhung der Faserkompaktierung des UD-rCF-Tapes auf Basis der vorhandenen, druckbelasteten Kalandrierwalzen an der Banddoublieranlage umgesetzt. Dazu wurden die Walzenoberflächen mit Teflonfolie in Bezug auf die erzielbare Komprimierung der Tapes, die Faserschädigung und die Vermeidung von Walzenwickeln optimiert. Die Belastungen auf die Tischkalandrierwalzen können über eine Stellvorrichtung zwischen 70 N bis 100 N variiert werden.

Darüber hinaus wurden PA6-Fasern mit unterschiedlicher Feinheit (1,8 dtex und 4,1 dtex) mit möglichst geringer Kräuselung zur Homogenisierung der Durchmischung der Hochleistungsfasern und Matrix in den Faserbändern sowie zur Verringerung der Voluminösität und damit zur Verbesserung der Verbundeigenschaften eingesetzt. Als weitere Maßnahme wurde die Feinheit der Streckenbänder (2-3 ktex) bei der rCF-TFS-Herstellung zur Erhöhung der Faserausrichtung in Längsrichtung variiert, um damit die Voluminösität des Faserbandes und schließlich des UD-rCF-Tapes zu reduzieren.

Die abgekühlten Tapes werden mittels eines angepassten Aufwicklungssystems zu endlosen Taperollen aufgewickelt. Ein solches Aufwickelsystem wurde konstruktiv in die TFA integriert.

### 2.4.6 Entwicklung einer unidirektionalen Tape-Struktur

Mit der erfolgreichen Optimierung des Streckwerks und der Integration des Thermofixierungs-, Komprimierungs- und Aufwicklungsmoduls in die Tapeferigungsanlage wurde die Voraussetzung zur Entwicklung von flexiblen, homogenen und reproduzierbaren, unidirektionalen Tapestrukturen im Labormaßstab geschaffen. Die Tapeferigungsanlage ist in Abb. 21 dargestellt.



**Abb. 21:** UD-rCF-Tape-Fertigungsversuchsstand mit modifiziertes Streckwerk, Thermostabilisierung, Kompaktierungs- und Aufwicklungsmoduls

**Tab. 13:** Optimale Parameter für die Tapefergung

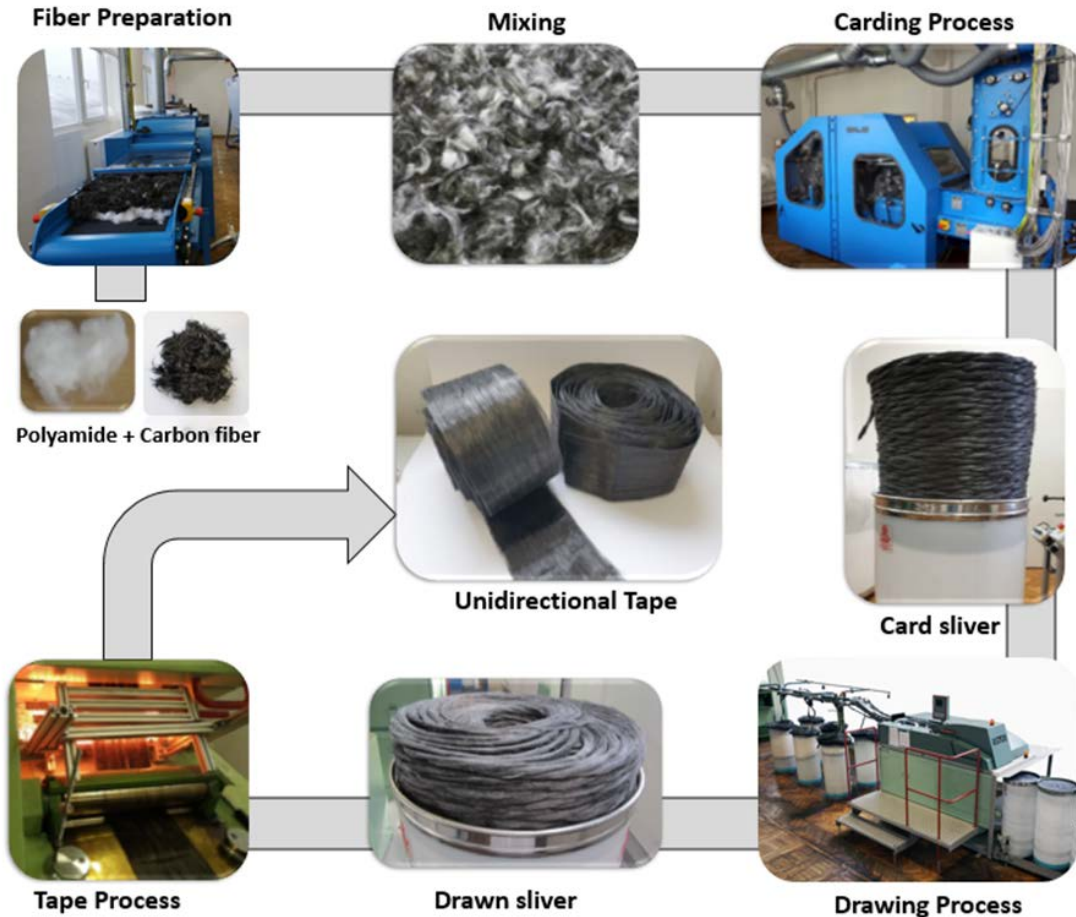
Parameter	Einheit	Wert
Walzenbelastung	bar	2
Walzenabstand	mm	60-65
Gesamtverzug	--	1,7
Vorverzug	--	1,11
Streckwerkunterwalzen	--	Topocrombeschichtung
Streckwerk	--	Zwei-Zone-Streckwerk 3 über 3 und Eine -Zone-Streckwerk 2 über 2
Thermo-Fixiereinheit	--	IR-Strahler
Abstand zwischen Heizmedium und Tape	cm	10
IR Intensität	%	15-20
Aufwickelgeschwindigkeit	m/min	10

Auf Basis dieses Versuchsstandes wurden umfangreiche textil- und maschinentechnologische Untersuchungen hinsichtlich der Wechselwirkungen und Technologiegrenzen durchgeführt, weiterentwickelt und erprobt. Dazu wurden jeweils bis zu 18, in AP 4 entwickelte bzw. hergestellte rCF-Hybridbänder der Tapefergungsanlage vorgelegt (Abb. 17), die über eine Bandzuführung zum Streckwerk laufen, in dem das Band bis zu 2-fach verzogen wird und zu einem gleichmäßig flächigen UD-rCF-Tape mit skalierbaren Abmessungen überführt wird. Die Stabilisierung der rCF-UD-Tapes erfolgt mittels eines Thermostabilisierungsmoduls, welches auf einem Infrarotstrahler basiert. Abschließend wird das rCF-UD-Tape definiert aufgewickelt (Abb. 21). Es werden UD-rCF- Tapes mit einem rCF-Volumengehalt von 45 %; 55 % und 65 %, einer Dicke von 0,3 mm; 0,7 mm und 1,0 mm und einer Breite bis 100 mm gefertigt. Diese stehen für die Herstellung von Verbundprüfplatten zur Verfügung. Damit konnte die entwickelte Tapefergungstechnologie im Labormaßstab zur Transferierung in die Industrie zur Verfügung gestellt werden (Abb. 22).

**Tab. 14:** Versuchsdurchführung und Herstellung von UD-rCF-Tapes

rCF-Typ	rCF	PA 6	rCF/PA6	hergestellte Krempelbänder	hergestellte Streckenbänder	Hergestellte Tapestrukturen
	Faserlänge [mm]		Faservolumengehalt [%]			
I	40	40	45	KB-rCF-I-40-45	SB-rCF-I-40-45	TS-rCF-I-40-45
I	40	40	50	KB-rCF-I-40-50	SB-rCF-I-40-50	TS-rCF-I-40-50
I	60	60	45	KB-rCF-I-60-45	SB-rCF-I-60-45	TS-rCF-I-60-45
I	60	60	50	KB-rCF-I-60-50	SB-rCF-I-60-50	TS-rCF-I-60-50
I	60	60	55	KB-rCF-I-60-55	SB-rCF-I-60-55	TS-rCF-I-60-55
I	60	60	60	KB-rCF-I-60-60	SB-rCF-I-60-60	TS-rCF-I-60-60
I	60	60	65	KB-rCF-I-60-65	SB-rCF-I-60-65	TS-rCF-I-60-65
I	80	60	45	KB-rCF-I-80-45	SB-rCF-I-80-45	TS-rCF-I-80-45
I	80	60	50	KB-rCF-I-80-50	SB-rCF-I-80-50	TS-rCF-I-80-50
I	80	60	55	KB-rCF-I-80-55	SB-rCF-I-80-55	TS-rCF-I-80-55
I	80	60	60	KB-rCF-I-80-60	SB-rCF-I-80-60	TS-rCF-I-80-60
I	80	60	65	KB-rCF-I-80-65	SB-rCF-I-80-65	TS-rCF-I-80-65
I	100	60	45	KB-rCF-I-100-45	SB-rCF-I-100-45	TS-rCF-I-100-45
I	100	60	50	KB-rCF-I-100-50	SB-rCF-I-100-50	TS-rCF-I-100-50
I	100	60	55	KB-rCF-I-100-55	SB-rCF-I-100-55	TS-rCF-I-100-55
I	100	60	60	KB-rCF-I-100-60	SB-rCF-I-100-60	TS-rCF-I-100-60
I	100	60	65	KB-rCF-I-100-65	SB-rCF-I-100-65	TS-rCF-I-100-65
II	60	60	45	KB-rCF-II-60-45	SB-rCF-II-60-45	TS-rCF-II-60-45
III	65	60	45	KB-rCF-III-65-45	SB-rCF-III-65-45	TS-rCF-III-65-45

Die technologischen Parameter, die für die erfolgreiche Herstellung von unidirektionalen Tapestrukturen verwendet werden, sowie die gefertigten UD-rCF-Tapes sind in Tab. 13 und Tab. 14 aufgeführt. Diese Parameter stehen auch zur Entwicklung von rCF-Tapes in AP 5 zur Verfügung. Die in diesem AP hergestellten Funktionsmuster werden im AP 7 umfassend charakterisiert und zur Fertigung eines geometrisch komplexen CFK-Bauteil-Demonstrators verwendet.



**Abb. 22:** entwickelte Prozesskette zur Herstellung von UD-rCF-Tapes im Labormaßstab

## 2.5 Transfer der Technologie zur Tapeherstellung vom Labormaßstab in den Industriemaßstab – AP5 (Neuhof, ITM, Rieter)

In diesem Arbeitspaket erfolgten die notwendigen Entwicklungsarbeiten zur erstmaligen Verarbeitung der gleichmäßigen rCF-Hybridstreckenbänder aus AP 3 auf einer umfassend modifizierten und erweiterten Strecke als Tafelfertigungsanlage (TFA) bei Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG zur Herstellung von rCF-UD-Tapes im Industriemaßstab. Auf Basis dieser Anlage sollen im Rahmen dieses Projekts gleichmäßige rCF-Tapes aus den rCF-Hybridstreckenbändern hochproduktiv hergestellt werden. In mehreren Meetings am 29.04.2019, 29.10.2019, 20.02.2020, 17.06.2020, 12.10.2020 und 9.11.2020 in Dresden und Neuhof wurde unter Beteiligung aller Projektpartner über den Transfer der Technologie zur Tapeherstellung vom Labormaßstab in den Industriemaßstab diskutiert. Bei den Meetings zeigt Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG ein großes Interesse an der Entwicklung von UD-Tapes auf Grundlage der Strecke RSB D 30. Dabei wurden u. a. folgende Festlegungen getroffen:

- Das ITM wird das rCF-Kardenband auf der Grundlage der in AP 2 ermittelten, optimalen Einstellungen entwickeln und dem Unternehmen Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG für die Weiterverarbeitung an der Strecke zur Verfügung stellen.
- Die Firma Rieter Ingolstadt GmbH hat alle technischen Einschränkungen der Reguliereinheit der Strecke RSB D 30 aufgezeigt und die notwendigen Informationen zur Überwindung dieser Einschränkungen bereitgestellt. Um die vorhandene Strecke RSB-D30 zu modifizieren, wurden die notwendigen Bauteile von Rieter Ingolstadt GmbH durch die Firma Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG beschafft.
- Es wurden zunächst zwei Konzepte zur Modifikation der Strecke RSB-D 30 zur Tapefertigungsanlage in Zusammenarbeit den Projektpartnern am ITM erarbeitet. Anschließend wurde eine Vorzugsvariante für die Entwicklung der Anlage zur Herstellung von UD-Tapes im Industriemaßstab durch Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG umgesetzt.

### **2.5.1 Modifikation der vorhandenen Regulierstrecke auf Basis von AP 3 (3.3)**

Basierend auf den Ergebnissen von AP 3 (Abschnitt 3.4) wurde durch die Zusammenarbeit der Projektpartner Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG, des assoziierten Partners Rieter Ingolstadt GmbH und des ITM das bestehende Reguliersystem einer bei Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG vorhandenen Regulierstrecke hinsichtlich der Abtastrollenbreite und Abtastrollenbelastung und das Streckwerk hinsichtlich der Unterwalzen sowie der textiltechnologischen und maschinentechnischen Parameter zur Herstellung von gleichmäßigem rCF-Hybridstreckenband modifiziert. Folgende Parametereinstellungen wurden für die Regulierstrecke festgelegt:

- Tastrollenbreite 9,0 mm
- Tastrollenbelastung 70 N
- Tastrollenoberfläche aus Edelstahl
- Streckwerkunterwalzen mit Topocrombeschichtung

Die optimalen, maschinentechnischen und textiltechnologischen Einstellparameter sind in Tab. 15 zusammengefasst. Mit den ermittelten, optimalen Einstellungsparametern wurden rCF-Streckenbänder mit definierter Qualität schonend für die weitere Verarbeitung zu rCF-UD-Tapes im Industriemaßstab produziert.



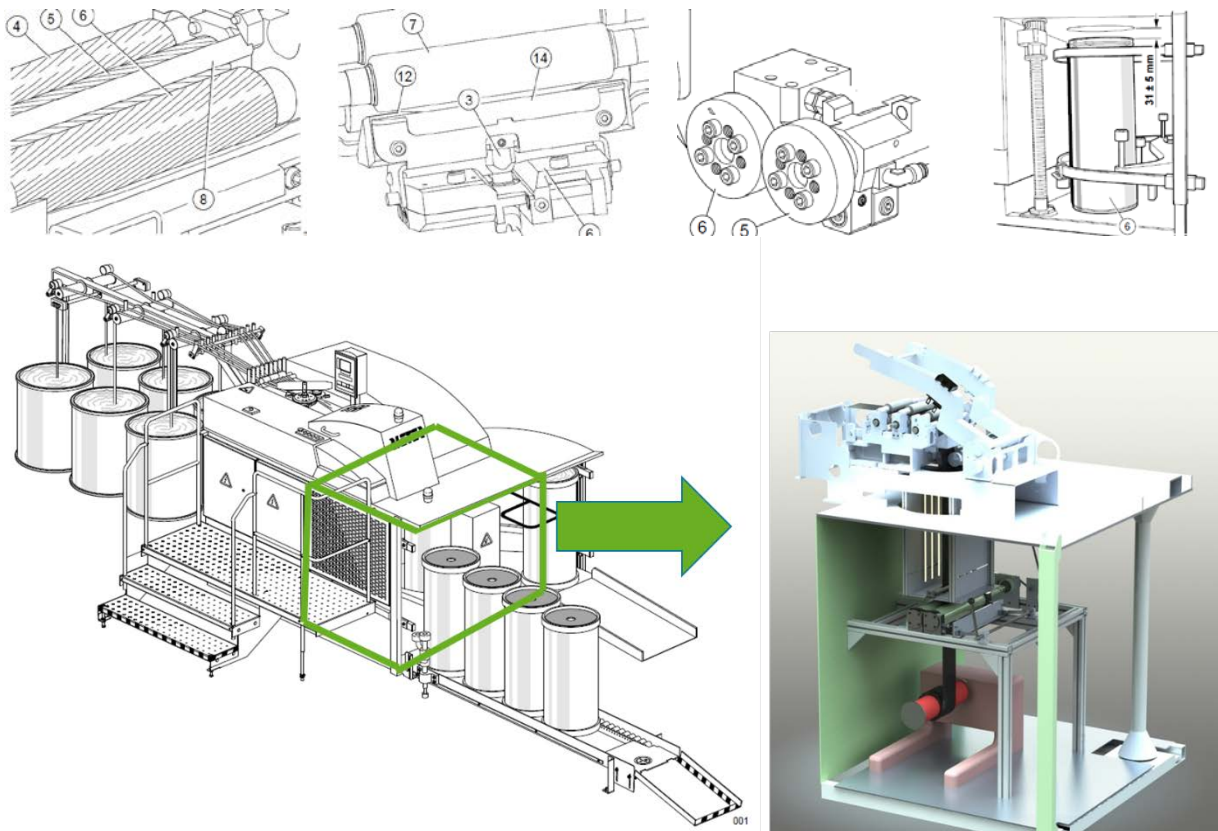
**Tab. 15:** Optimale textiltechnologische und maschinentechnische Einstellungen zur Verarbeitung von rCF-Hybridbändern an der Strecke

Parameter		Einheit	Wert
Tastrollenbreite	--	mm	9
Tastrollenbelastung	--	N	70
Tastrollenoberfläche	--	--	Stahl
Regeleinsatzpunkt	LAP	mm	933
Einlaufbandfeinheit	--	ktex	$\geq 23$
Walzenbelastung	$x_{wb}$	daN	10
Produktionsgeschwindigkeit	$x_{pg}$	m/min	45
Walzenabstand	$x_{wa}$	mm	Hauptverzugsabstand 65 Vorverzugsabstand 70
Gesamtverzug	$x_{gv}$	--	7
Vorverzug	$x_{vv}$	--	1,3
Oberwalzenoberflächenhärte	$x_{wh}$	shore	75 (Schwarz)
Streckwerkunterwalzen	--	--	Topocrombeschichtung
Anzahl der Doublierung	--	--	6

### 2.5.2 Modifikation der vorhandenen Regulierstrecke auf Basis von AP 4 (3.4) zur Tafelfertigungsanlage (TFA)

Die zweite vorhandene Strecke bei Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG wurde auf Basis der Ergebnisse des AP 4 zur Fertigung der UD-rCF-Tapes umfassend zur Tafelfertigungsanlage (TFA) optimiert und erweitert. Dies wird durch eine tiefgreifend verzahnte Zusammenarbeit des Antragsstellers Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG mit den Kooperationspartnern ITM und Rieter Ingolstadt GmbH umgesetzt. Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Integration und Abstimmung aller Komponenten, um eine kontinuierliche Prozesskette zur hochqualitativen Tapeherstellung zu realisieren. Dazu sind zahlreiche konzeptionelle, konstruktive, fertigungstechnische und textiltechnologische Fragestellungen zur Umsetzung der Tafelfertigungsanlage zu klären. Deshalb wurden im Zusammenarbeit aller Projektpartner verschiedene Konzepte zur Modifikation der vorhandenen Regulierstrecke zu einer TFA erarbeitet. Die dafür erforderlichen, anforderungsgerechten Komponenten sind Streckwerke, Module zur Thermofixierung (Erwärmung + Komprimierung) sowie zur Aufwicklung. In Abb. 23 ist das endgültige Konzept der TFA mit den benötigten Modulen dargestellt. Im diesem Konzept dient das vorhandene Streckwerk der Regulierstrecke zur gleichmäßigen Verstreckung mehrerer, nebeneinanderliegender Streckenbänder mit definierter Breite der Tapes. Das Streckwerk wird auf

Basis der umfangreichen Erfahrungen des Projektpartners und der bisherigen Erkenntnisse aus diesem Projekt für die Verarbeitung des rCF-Hybridstreckenbandes modifiziert, d. h. Reguliereinheit, Walzenoberflächen des Streckwerkes sowie textiltechnologische und maschinentechnische Einstellparameter werden anforderungsgerecht angepasst. Nach dem Durchlaufen des Streckwerkes liegen die Streckenbänder in Form eines hochgradig ausgerichteten, unverfestigten Vlieses vor. Zur Thermostabilisierung des Vlieses werden Infrarotstrahler eingesetzt. Die endgültige Fixierung des erwärmten Vlieses erfolgt mittels Kalandrierungswalzen. Nach der Komprimierung werden die flexiblen Tapes durch eine integrierte Aufwicklungsvorrichtung aufgewickelt. Die Herstellung soll im Industriemaßstab kontinuierlich erfolgen.



**Abb. 23** : Konstruktion und Umsetzung der UD-rCF-Tapefertigungsanlage

Dazu wurde folgende Komponenten zur Integration an der Rieter RSB D30 Strecke konzipiert, konstruiert und umgesetzt:

- Weiterentwicklung des Streckwerkes hinsichtlich der Unterwalzen (Abschnitt 2.3.7)
- Entwicklung von Abzugswalzen und Vliesführungstrichter

- Entwicklung eines Thermostabilisierungsmoduls
- Entwicklung eines Komprimierungsmoduls
- Entwicklung eines Aufwicklungsmoduls
- Entwicklung von Antriebssystemen

### 2.5.2.1 Entwicklung von Abzugswalzen und Vliesführungstrichter

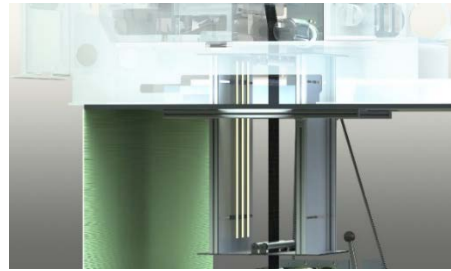
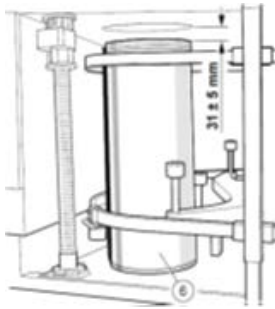
Im Ausgang des Streckwerkes einer Standard-Strecke sind eine Vliesführungsdüse, ein Bandtrichter und ein Paar schmale Abzugsscheiben (Breite ca. 1 cm) integriert (Abb. 24, links), um die verstreckten Fasern zu einem schmalen Band mit einer Breite von max. 3 cm abhängig von der zugeführten Einlaufbandanzahl bzw. -feinheit sowie Auslaufbandfeinheit umzuwandeln sowie das Faserband weiter an dem Bandkanal zu transportieren. Der Zweck der Modifikation der Strecke zur TFA besteht darin, dass dieses verstreckte Hybridfaservlies die flächige Struktur beibehält und zur Verarbeitung transportiert wird. Die Breite des Vlieses soll zwischen 5 cm und 15 cm abhängig von der zugeführten Einlaufbandanzahl bzw. -feinheit variiert werden. Daher sollen die Vliesführungsdüse, Bandtrichter sowie ein Paar schmale Abzugsscheiben mit einem Vliesführungstrichter und ein Paar Abzugswalzen mit einer Breite von bis zu 15 cm ersetzt werden. Dazu wurde ein Vliesführungstrichter und ein Paar Abzugswalzen mit einer Breite von bis zu 15 cm konzipiert, konstruiert und umgesetzt (Abb. 24), Mitte und rechts).



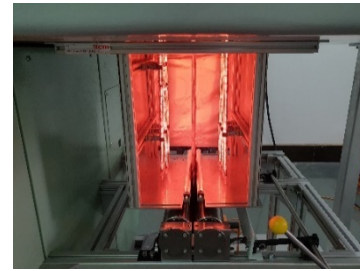
**Abb. 24:** Vliesführungsdüse, Bandtrichter und schmale Abzugsscheiben einer Standard-Strecke und Konstruierte und umgesetzte Abzugswalzen und Vliesführungstrichter

### 2.5.2.2 Entwicklung von Thermostabilisierungs-, Komprimierungs- und Aufwicklungsmodul

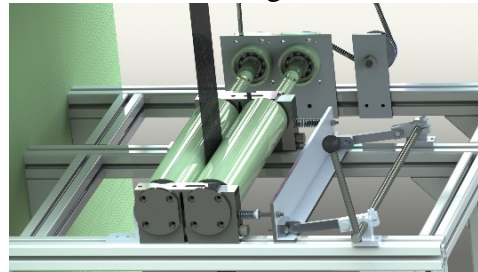
Nach Vliesführungsdüse, Bandtrichter und Abzugsscheiben folgt an einer Standard-Strecke (Abb. 22, links) ein Bandführungskanal, ein Drehteller und ein Kannenstock mit Bandablagevorrichtung, um das gebildete Band in die Kannen ablegen zu können. Diese Vorrichtungen werden bei der modifizierten Strecke als TFA durch Thermostabilisierungs-, Komprimierungs- und Aufwicklungsmodul ersetzt. Dazu wurden diese Module zur Integration auf Basis der Rieter RSB D30 Strecke konzipiert, konstruiert und umgesetzt (Abb.25).



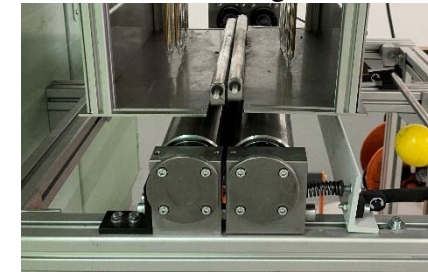
konstruierter  
Thermostabilisierungsmodul



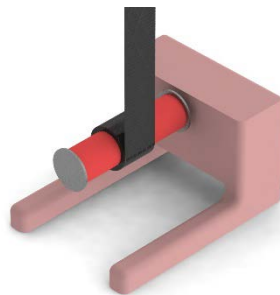
umgesetzter  
Thermostabilisierungsmodul



konstruierter Komprimierungsmodul



umgesetzter  
Komprimierungsmodul-



Drehteller und konstruierter Aufwicklungsmodul  
Kannenstock mit  
Bandablage einer  
Standard-Strecke



umgesetzter Aufwicklungsmodul

**Abb. 25:** Drehteller und Kannenstock mit Bandablage einer Standard-Strecke und konstruierter und umgesetzter Thermostabilisierungs-, Komprimierungs- und Aufwicklungsmodul für TFA

Zur Thermostabilisierung des unidirektionalen Vlieses werden Infrarotstrahler eingesetzt. Das Thermostabilisierungsmodul besteht aus mehreren angepassten Infrarotelementen, einer Halterung und einem Mechanismus zur Einstellung des Abstandes zwischen den Infrarotelementen und dem Abstand zwischen Infrarotelementen und UD-rCF-Tapes. Die für rCF speziell angepassten Infrarotstrahler wurden von der Firma M.E.S. GmbH beschafft.

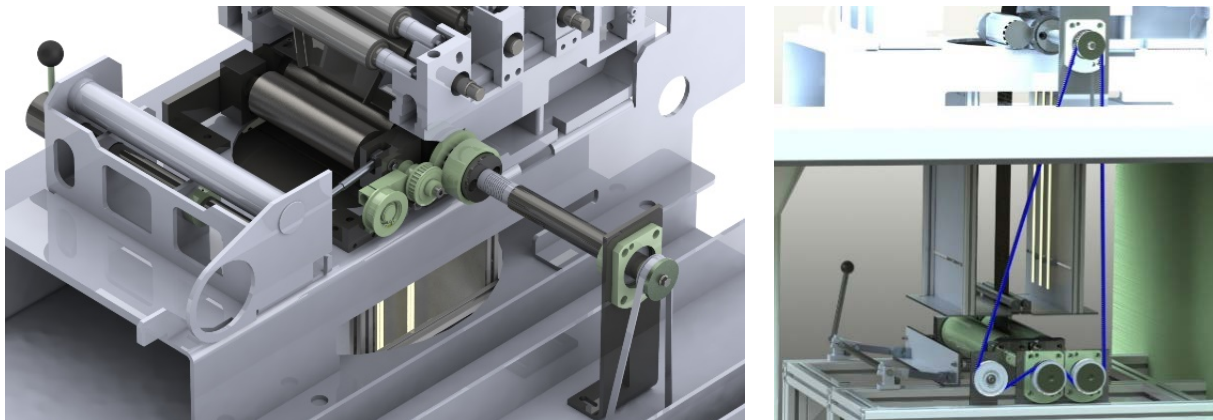
Die endgültige Fixierung des erwärmten Vlieses erfolgt mittels Kalandrierwalzen. Das Komprimierungsmodul besteht aus einem Walzenpaar mit einer Breite von 15 cm. Die Walzengeometrien und die Materialien der Walzenoberflächen (glatte Stahlwalzen, gummierte

Walzen) wurden in Bezug auf die erzielbare Komprimierung der Tapes, der Faserschädigung und deren Bildung von Walzenwickel mittels systematischer Untersuchungen variiert und optimiert. Für die Walzenbelastung wurde eine mechanische Vorrichtung zur definierten Einstellung der Druckkraft integriert. Nach der Komprimierung sind die Tapes vollständig hergestellt.

Die gefertigten rCF-Tapes wurden am Ende des Prozesses auf eine Hülse mit einem großen Durchmesser von 150 cm schonend aufgewickelt. Dazu wurde ein konventionelles Aufwickelsystem angepasst und konstruktiv in die TFA integriert.

### 2.5.2.3 Entwicklung von Antriebssystemen

Zum synchronisierten Antrieb der Abzugswalzen und Kalanderswalzen wurde ein Antriebsplan mittels Wellen, Riemen und Zahnrädern konzipiert, konstruiert und umgesetzt (Abb. 26). Das Aufwicklungsmodul hat eine eigene Steuerungseinheit. Die Synchronisierung der Abzugs-, und Kalanderswalzen und der Aufwicklungseinheit wurde manuell angepasst.



**Abb. 26:** Konstruiertes und umgesetztes Antriebssystem

Die entwickelte UD-rCF-Tapefertigungsanlage (Abb. 27) steht zur Erprobung und Weiterentwicklung sowie zur kontinuierlichen Herstellung in AP 6 zur Verfügung.



**Abb. 27:** entwickelter UD-rCF-Tapefertigungsversuchsstand als Prototypanlage

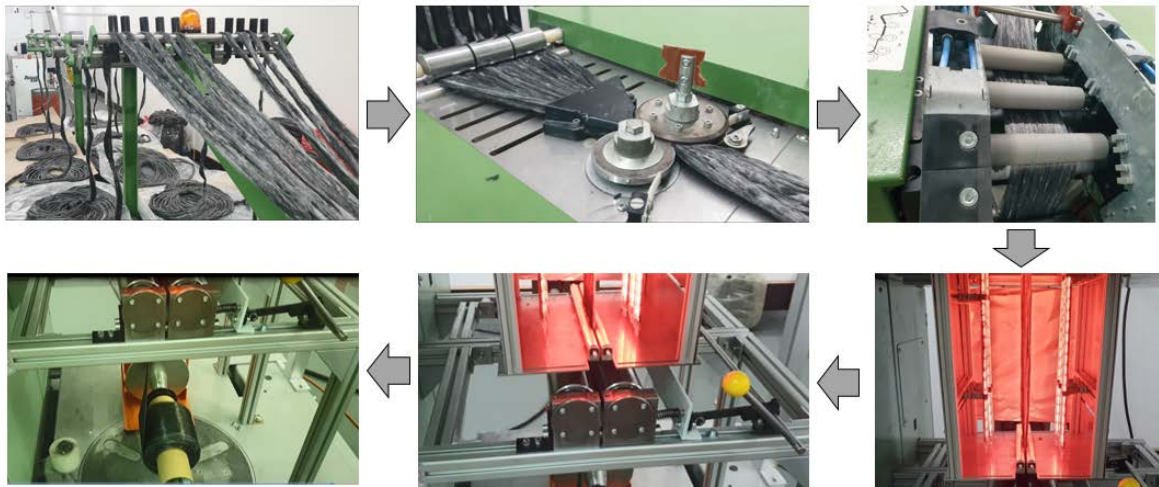
## 2.6 Erprobung und Weiterentwicklung der Tapefertigungsanlage zur kontinuierlichen rCF-Tapeherstellung - AP6 (Neuhof, ITM)

Im AP 6 wurde das Ziel verfolgt, die im AP 5 entwickelte TFA unter textiltechnologischen Aspekten zu untersuchen, iterativ weiterzuentwickeln und die bestehenden Wechselwirkungen sowie die Technologiegrenzen hinsichtlich Verstreckung, Thermofixierung, Komprimierung, Aufwicklung im Zusammenhang mit der Produktivität zu ermitteln. Dazu wurden die verschiedenen Einflussgrößen, z. B. Anzahl der Doublierung, Bandfeinheit, Tastrollenbelastung, Walzenbelastung, Verzug, Thermofixierungstemperatur, Kalandervalzenbelastung und Produktionsgeschwindigkeit, variiert (Tab. 16).

**Tab. 16:** Versuchsplan zur Untersuchung der UD-rCF-Tapefertigungsanlage

Parameter	Einheit	Parametervariation	optimale Parameter
Doublierung	--	6,8,10	10
Eingangsbandanzahl/Feinheit	-/ktex	12, 16, 20	20
Zuführungsverzug	--	1.01,0.98	0.98
Tastrollenbelastung	bar	1, 3, 5	1
Walzenbelastung	daN	10, 20, 30	20
Walzenabstand	mm	85 – 90	85 – 90
Gesamtverzug	--	4.6, 3.2, 3.0	3.0
Vorverzug	--	1.28, 1.2	1.28
Produktionsgeschwindigkeit	m/min	3, 5, 8	3-8
Intensität IR-Strahler	%	15, 20, 25, 30	20
Kalandervalzenbelastung	N	0, 70	70

Beim Thermostabilisierungsprozess sollen die Thermoplastfasern in der rCF-Tapestruktur zur Stabilisierung gezielt angeschmolzen werden. Die Erwärmung muss exakt definiert erfolgen, da bei zu hoher Temperatur oder -dauer sowie bei zu geringem Abstand das Thermoplastfasermaterial zu stark aufschmilzt und die gewünschte Flexibilität der Tapes nach der Komprimierung und Abkühlung nicht mehr gewährleistet wird. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine höhere Doublierung, ein niedrigerer Zuführungs-, Vor- und Gesamtverzug, eine geringe Tastrollen- und Kalandrierwalzenbelastung, topocrombeschichtete Streckwerkwalzen, eine optimale Erwärmungstemperatur und -dauer sowie eine geringe Produktionsgeschwindigkeit eine stabile Produktion ermöglichen. Dadurch wurden die Streckwerk-, Thermofixierungs-, Komprimierungs- und Aufwicklungsparameter optimiert (grünmarkiert Tab. 16) und die unidirektionalen rCF-Tapes mit unterschiedlicher Breite und Dicke hergestellt. (Abb. 28 und Abb. 29).



**Abb. 28:** Untersuchungen der Tapeferigungsanlage in Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG.



**Abb. 29:** hergestellte UD-rCF-Tapes mit unterschiedliche Breite und Dicke an der Tapeferigungsanlage bei Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG.

Die in diesem AP hergestellten Funktionsmuster werden im AP 7 umfassend charakterisiert und zur Fertigung eines geometrisch komplexen CFK-Bauteil-Demonstrators verwendet.

### 3. Projektergebnisse

#### 3.1 Präzisierung der Anforderungen; Auswahl der Fasermaterialien und Festlegung der Tapestruktur

Die Anforderungen an die Fasermaterialien und die Abmessungen der Bandstruktur wurden im Rahmen der Meetings der Projektmitglieder am 17. Juli 2018; 11.11.2018 und 29.04.2019 am ITM präzisiert und festgelegt. Zu diesem Zweck wurde eine umfassende Diskussion über zukünftige Markt- und Expertenmeinungen geführt. Bei diesen Meetings wurden folgende Materialien und deren Eigenschaften festgelegt:

- Zur Realisierung eines breiten Anwendungsspektrums → Auswahl des rCF-Typs (rCF-Typ I, rCF-Typ II und rCF-Typ III)
- Zur Ausschöpfung des Materialpotenzials → Variation der mittleren Faserlänge von 40 mm, 60 mm, 80 mm und 100 mm
- Die PA 6-Faser wurde aufgrund ihrer geringen Viskosität während der Konsolidierung, ihres geringen Schrumpfes und ihrer guten thermischen Eigenschaften als thermoplastische Faser definiert. Basierend auf der Literatur und der Meinung von Industrieexperten wurde eine einheitliche Faserlänge von 40 mm und 60 mm für alle Untersuchungen ausgewählt.
- Zur Erreichung der maximalen Verbundeigenschaften werden die Faservolumenanteile rCF/PA 6 wie folgt variiert: 45 % / 55 % 50 % / 50 %; 55 % / 45 %; 60 % / 40 %; 65 % / 35 %
- rCF-Tapebreite 100 mm
- rCF-Tapedicke 0,3 mm; 0,7 mm; 1,0 mm
- Demonstratorbauteil: Fahrradsattel (Abb. 30)



**Abb. 30:** Sattel eines Fahrrads

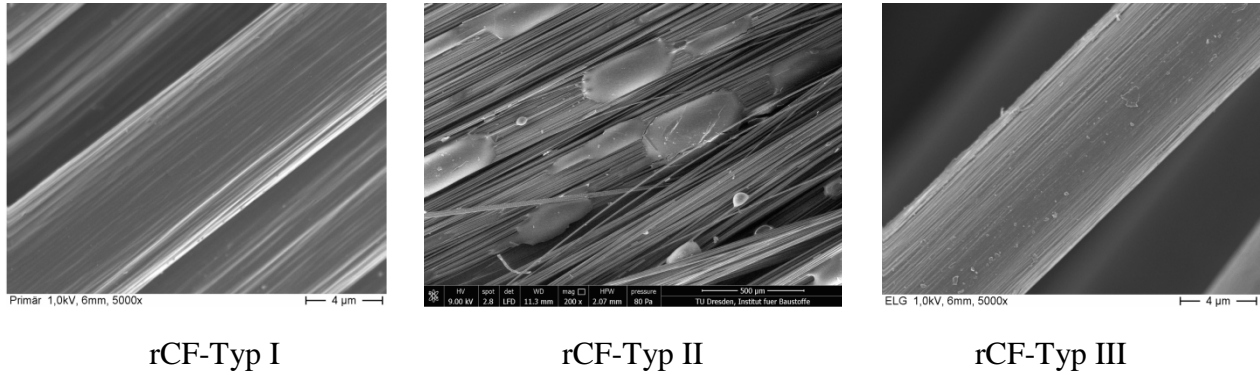


Darüber hinaus wurden folgende weitere Punkte festgelegt:

- Um eine gezielte Qualitätssicherung, Analyse der Einflussparameter während des Krempel- und Verstreckungsprozesses sowie die Wechselwirkung bzw. Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren zu untersuchen, soll zunächst mit dem rCF-Typ I mit einer definierten, einheitlichen Faserlänge von 80 mm sowie mit einem definierten Faservolumenanteil von 50 % bei unterschiedlichen technologischen und maschinentechnischen Parametern die Faserschädigung im Krempelprozess bewertet und darauf basierend die Speziallaborkrempelanlage modifiziert und optimiert werden.
- Basierend auf den optimalen, technologischen und maschinentechnischen Einstellparametern werden die verschiedenen Krempelbänder aus rCF-Typ I mit einer definierten Faserlänge von 40 mm, 60 mm, 80 mm und 100 mm sowie Faservolumenanteil von 45 %, 50 %, 55 %, 60 % und 65 % entwickelt.
- Aus den entwickelten Krempelbändern, Streckenbändern und Tapes werden UD-Verbundkörper gefertigt und hinsichtlich mechanischer Eigenschaften charakterisiert. Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine Vorzugsvariante der Tapestruktur mit entsprechender Faserlänge und entsprechendem Faservolumenanteil festgelegt. Mit diesen Parametern sollen die Krempelbänder, Streckenbänder und Tapes aus den rCF-Typ II und III entwickelt, charakterisiert und für die weitere Verarbeitung herangezogen werden.

### **3.2 Ergebnisse der Fasercharakterisierung**

Die Oberflächenmorphologie der verschiedenen Carbonfasern ist glatt und gleichmäßig (Abb. 31). Bei den Faseroberflächen der rCF-Typ II und III sind Reste des Matrixmaterials zu erkennen. Eine glatte Oberfläche führt grundsätzlich zu einer problembehafteten Verarbeitung der Fasern aufgrund der geringen Faser-Faser-Reibung sowie der geringen Reibung zwischen den Fasern und Führungselementen der Krempel und Strecke. Damit kann eine kontrollierte Faserbewegung nur bedingt gewährleistet werden und es resultieren Verzugsstörungen sowie Faserbandungleichmäßigkeiten. Bei der Analyse der Schlichte der verarbeiteten rCF (rCF-Typ I) mittels Infrarotspektroskopie fanden sich charakteristisch ausgeprägte Polyurethan (PU)-Banden, was auf eine sehr gute Kompatibilität zu Polyamidmatrices hinweist. Bei der Analyse der Oberfläche der pyrolysierten rCF konnten verschiedene Restsubstanzen nachgewiesen werden.



**Abb. 31:** Oberflächenmorphologie der verschiedenen rCF-Fasern

Die Untersuchungsergebnisse in Tab. 17 zeigen, dass die drei rCF-Varianten (rCF-Typ I, II und III) vergleichbare Durchmesser, aber unterschiedliche Festigkeiten und Steifigkeiten aufweisen. Zur tiefgreifenden Untersuchung der Faser-Matrix-Haftung wurden Kontaktwinkelmessungen zur Bestimmung des dispersen und polaren Anteils der Oberflächenenergie mittels Tensiometer K 100 SF (Krüss GmbH) durchgeführt.

Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung belegen die höchste Oberflächenenergie und Adhäsion für rCF-Typ I in Kombination mit der PA 6-Matrix, da die Oberflächenenergien von beiden Fasertypen nahezu identische Werte aufweisen, wodurch sich eine hohe Kompatibilität ableiten lässt. Zudem konnten fast keine polaren Eigenschaften auf der pyrolysierten rCF-Oberfläche nachgewiesen werden, was auf die kaum vorhandene Schlichte zurückzuführen ist.

**Tab. 17:** Faserlänge, -durchmesser, zugmechanische Eigenschaften und Oberflächenenergie der untersuchten rCF und PA 6-Fasern

Fasern	Mittlere Faserlänge (mm)	Mittlerer Durchmesser (µm)	Bruchdehnung (%)	E-Modul (GPa)	Mittlere Zugfestigkeit (MPa)	Oberflächenenergie (mN/m)	
						Dispers	Polar
rCF Typ-I	40;60;80;100	6,73 ± 2,23	1,66	246 ± 20,1	4162 ± 803	50,5	12,2
rCF Typ-II	60 ± 2	6,89 ± 1,93	1,80	198 ± 37,4	3563 ± 725	42,4	0,6
rCF Typ-III	65 ± 18	6,87 ± 2,03	1,83	199 ± 12,8	3599 ± 845	49,6	0,1
PA-6	40;60 ± 2	21,4 ± 7,9	74,95	1,3 ± 0,2	608 ± 15,8	43,3	9,9
PA-6	40;60 ± 2	12,5 ± 2,4	85,6	1,48 ± 0,5	452 ± 8,3	--	--

### 3.3 Ergebnisse der Faseraufbereitung und der Weiterentwicklung der rCF-Krempel sowie Krempelbandherstellung

#### 3.3.1 Ergebnisse der Faseraufbereitung

Die Ergebnisse der Aufbereitung der rCF Typ I und PA 6- Fasern mit definierter Faserlänge (rCF: 40 mm; 60 mm; 80 mm und 100 mm und PA 6-Fasern: 40 mm und 60 mm) und

Faservolumenanteilen (rCF/PA6: 45 % / 55 %, 50 % / 50 %; 55 % / 45 %; 60 % / 40 % und 65 % / 35 %) sind Tab. 18 zu entnehmen.

Die Aufbereitung der rCF-Typ II und III mit den PA 6-Fasern mit definierten Faserlängen und -volumenanteilen werden erst durchgeführt, wenn die Verbundeigenschaften der tapebasierten UD-Verbundkörper aus rCF-Typ I ermittelt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine Vorzugsvariante der Tapestruktur mit entsprechender Faserlänge und entsprechendem Faservolumenanteil festgelegt. Mit diesen Parametern (Faserlänge und Faservolumenanteil) soll die Faseraufbereitung für rCF-Typ II und III durchgeführt werden.

**Tab. 18:** Aufbereitete Fasern als Vorlage für die Weiterverarbeitung an der Speziallaborkrempel

rCF		PA 6	vorgeöffnete und vorgemischte rCF und PA 6- Fasern Bezeichnung: rCF-Typ-Länge- Vol.%
Faserlänge [mm]	Faservolumengehalt [%]	Faserlänge [mm]	
40	45	40	rCF-I-40-45
40	50	40	rCF-I-40-50
60	45	60	rCF-I-60-45
60	50	60	rCF-I-60-50
60	55	60	rCF-I-60-55
60	60	60	rCF-I-60-60
60	65	60	rCF-I-60-65
80	45	60	rCF-I-80-45
80	50	60	rCF-I-80-50
80	55	60	rCF-I-80-55
80	60	60	rCF-I-80-60
80	65	60	rCFI-80-65
100	45	60	rCF-I-100-45
100	50	60	rCF-I-100-50
100	55	60	rCF-I-100-55
100	60	60	rCF-I-100-60
100	65	60	rCF-I-100-65
60	45	60	rCF-II-60-45
65	45	60	rCF-III-65-45

### **3.3.2 Ergebnisse der technologischen und maschinentechnischen Einstellungsparameter und Krempelbandherstellung**

Die bisherige Krempeltechnologie ist nach wie vor nicht für die schonende Verarbeitung von rCF hinsichtlich einer geringen Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung, insbesondere für rCF Typ II und III, geeignet. Deshalb erfolgt die Weiterentwicklung der Krempelanlage, um erstmalig eine schonende Verarbeitung der rCF-Typ II und III zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden an dieser Speziallaborkrempelanlage noch keine systematischen Untersuchungen zu den technologischen und maschinentechnischen Parametern zur Verarbeitung von Carbonfasern durchgeführt. Daher werden unter Berücksichtigung der speziellen Eigenschaften dieser rCF-Typen die Einflüsse der Abstände und Geschwindigkeiten der Vorverdichtungswalze, der Einzugswalzen, der Öffnungswalze, des Tambours und der Arbeiter-Wender-Paare auf das Verarbeitungsverhalten, die Fasereinkürzung, die Faserbandungleichmäßigkeit und die Faserorientierung systematisch untersucht.

Ausgehend von den speziellen Eigenschaften der rCF werden die Abstände und Geschwindigkeiten der Einzugswalzen, des Vorreißers, des Tambours, des Abnehmers sowie der Arbeiter-Wender-Paare der Spezialkrempelanlage variiert und umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Die Qualität des Krempelbandes wurde in Bezug auf die Bandfeinheit, die Faserorientierung, die Faserschädigung und die Bandkohäsion umfangreich charakterisiert. Um die Vielzahl der notwendigen Versuche zur Überprüfung der verschiedenen Einflussfaktoren bzw. der Einstellbarkeit der Parameter an der Spezialkrempelanlage zu minimieren, wird unter Anwendung des statistischen Beschreibungsmodells das Box-Behnken-Design am Krempelprozess unter Berücksichtigung der wichtigsten Einflussfaktoren Walzengeschwindigkeit und Walzenabstand in vier Versuchsreihen (DoE 1-4) erarbeitet. Die Ergebnisse werden mit Hilfe der Statistiksoftware Minitab analysiert.

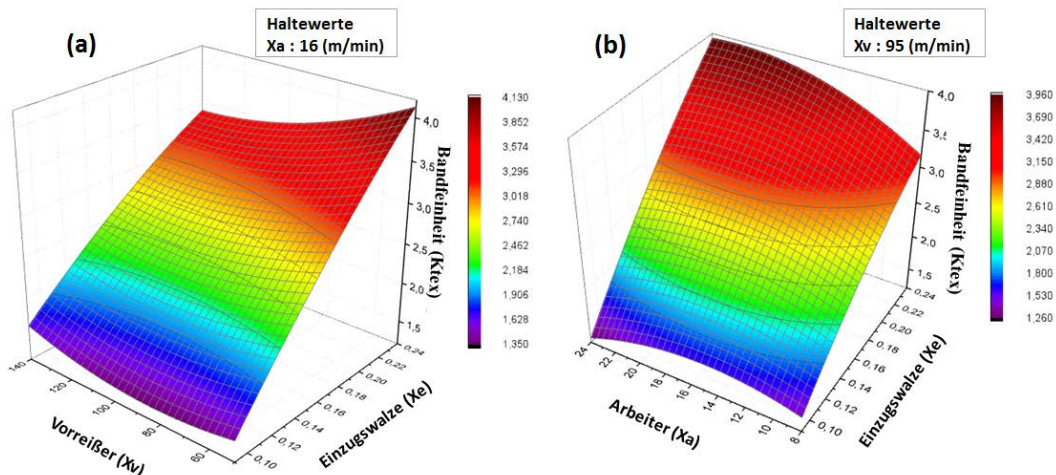
#### **3.3.2.1 Optimierung der Geschwindigkeiten von Einzugswalzen, des Vorreißers und der Arbeiter-Wender-Paare (DoE-1)**

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung DoE-1 wurden die Einflüsse der verschiedenen Geschwindigkeiten der Einzugswalzen ( $X_e$ ), des Vorreißers ( $X_v$ ) und des Arbeiter-Wender-Paares ( $X_a$ ) auf die Bandfeinheit, die Faserorientierung, die Faserschädigung und die Bandkohäsion umfangreich untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tab. 19 aufgeführt.

**Tab. 19:** Einfluss der Geschwindigkeiten der Einzugswalzen, des Vorreißers und der Arbeiter-Wender-Paare auf die Faser- und Bandqualität - DoE-1

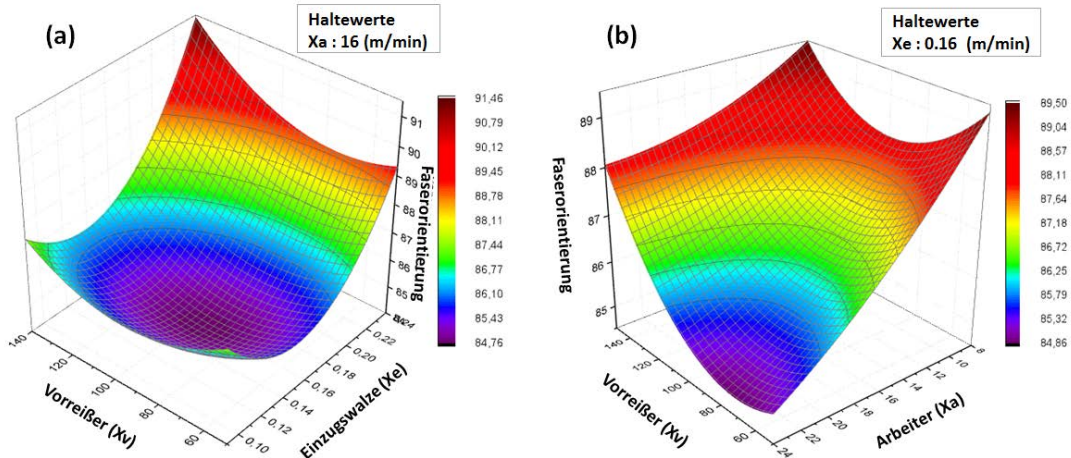
Parameter			Bandfeinheit (ktex)	Faser- orientierungs- index	Faserlänge (mm)		Bandkohäsion (N)
Xe (m/min)	Xv (m/min)	Xa (m/min)			ML	UHML	
0,08	50	16	1,47 ± 0,17	89,5 ± 2,5	51,1 ± 2,1	57,9 ± 1,4	0,44 ± 0,1
0,24	50	16	4,54 ± 0,19	90,9 ± 2,4	52,3 ± 1,5	59,1 ± 1,9	1,55 ± 0,2
0,08	140	16	1,41 ± 0,10	84,5 ± 2,5	57,9 ± 2,3	65,9 ± 2,5	0,47 ± 0,2
0,24	140	16	3,63 ± 0,30	89,7 ± 0,8	72,7 ± 2,6	78,4 ± 2,3	1,18 ± 0,2
0,08	95	8	1,51 ± 0,26	89,5 ± 1,5	60,2 ± 1,8	63,6 ± 1,3	0,49 ± 0,1
0,24	95	8	2,84 ± 0,29	89,8 ± 2,5	68,2 ± 2,3	73,8 ± 2,2	1,17 ± 0,2
0,08	95	24	1,45 ± 0,14	83,8 ± 1,0	65,9 ± 2,5	70,4 ± 3,0	0,52 ± 0,1
0,24	95	24	3,67 ± 0,35	88,7 ± 2,2	67,0 ± 3,2	72,7 ± 2,8	1,22 ± 0,2
0,16	50	8	2,31 ± 0,25	85,7 ± 2,1	59,1 ± 1,6	64,8 ± 1,6	0,79 ± 0,1
0,16	140	8	2,41 ± 0,20	89,4 ± 2,2	64,8 ± 1,4	70,4 ± 2,8	0,84 ± 0,1
0,16	50	24	2,57 ± 0,23	82,0 ± 1,9	68,2 ± 1,9	75,0 ± 3,2	0,87 ± 0,1
0,16	140	24	2,48 ± 0,29	88,1 ± 0,8	56,8 ± 2,1	64,8 ± 2,2	0,89 ± 0,1
0,16	95	16	2,61 ± 0,21	84,9 ± 2,2	62,5 ± 1,6	68,2 ± 1,5	0,84 ± 0,1
0,16	95	16	2,28 ± 0,29	84,4 ± 2,5	59,1 ± 2,2	64,8 ± 1,3	0,91 ± 0,1
0,16	95	16	2,68 ± 0,22	84,2 ± 1,9	59,1 ± 1,8	63,6 ± 1,8	0,94 ± 0,1

Abb. 32 zeigt, dass die Bandfeinheit mit steigender Einzugswalzengeschwindigkeit von 1,41 ktex auf 4,54 ktex linear zunimmt. Ein solches Ergebnis ist zu erwarten, da bei einer Vergrößerung der Einzugswalzengeschwindigkeit bei gleichbleibender Ausgangswalzengeschwindigkeit (Abnehmer), eine größere Faseranzahl in derselben Zeit zugeführt werden. Somit werden mehr Fasern gleichzeitig verarbeitet und ein Band von höherer Feinheit produziert. Die Geschwindigkeit des Vorreißers und Arbeiters hat kaum Einfluss auf die Bandfeinheit [21].



**Abb. 32:** Zusammenhang der Bandfeinheit und der Walzengeschwindigkeiten

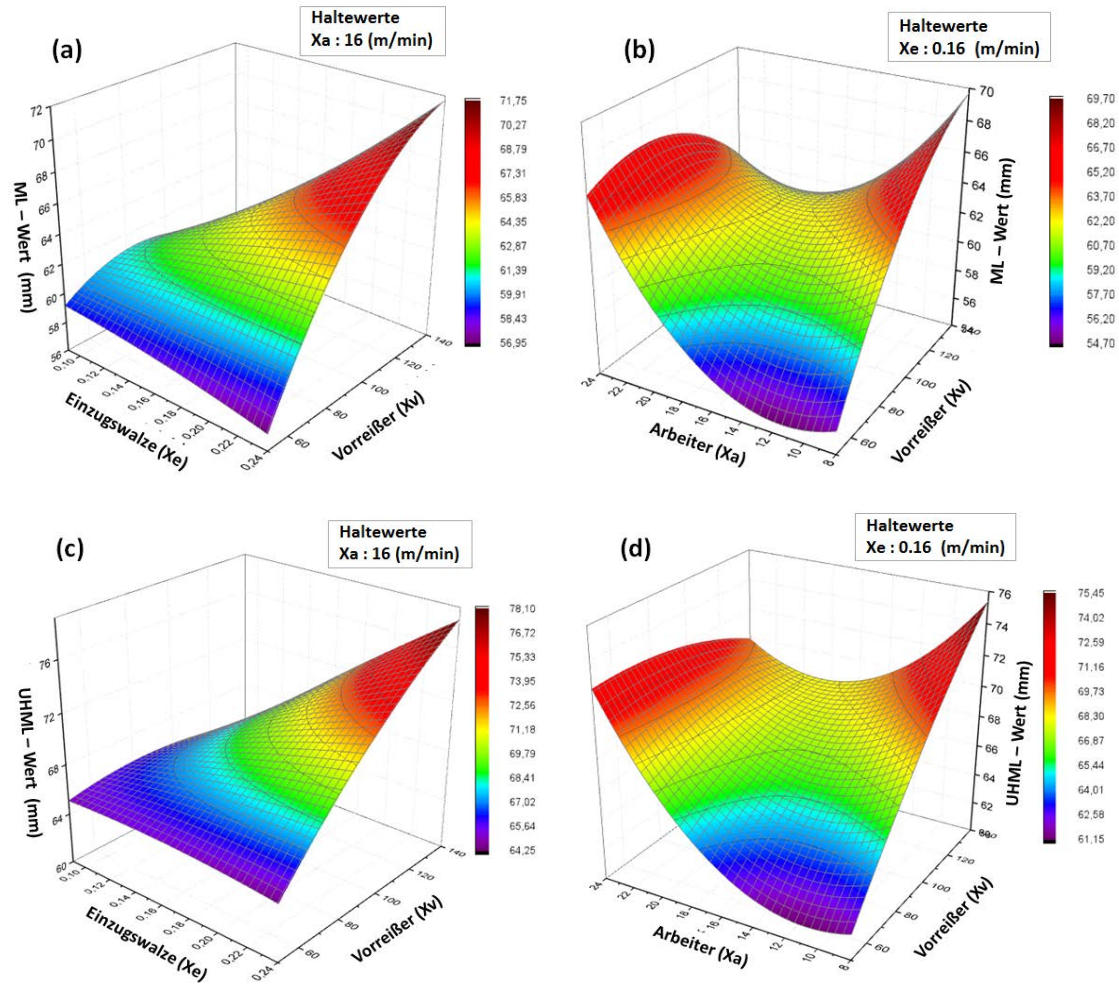
Abb. 33(a) zeigt den Zusammenhang zwischen Faserorientierung, Vorreißer- und Einzugswalzengeschwindigkeit. Die Geschwindigkeiten der Arbeiter-Wender-Paare werden konstant gehalten. Die höchste Faserorientierung wird bei maximalen Geschwindigkeiten der Einzugswalzen und des Vorreißers erreicht. Das ist auf die intensive Kardierung der Fasern bei höherer Geschwindigkeit aufgrund des erhöhten Gesamtverzuges sowie auf eine verbesserte Faserverteilung über die Garniturflächen zurückzuführen [16].



**Abb. 33:** Zusammenhang der Faserorientierung und der Walzengeschwindigkeiten

Der Einfluss der Geschwindigkeiten des Vorreißers und Arbeiter-Wender-Paars auf die Faserorientierung ist in Abb. 33(b) dargestellt. Die Faserorientierung verhält sich linear mit zunehmenden Geschwindigkeiten des Arbeiter-Wender-Paars und steigt mit zunehmender Vorreißergeschwindigkeit. Bei geringerer Geschwindigkeit des Arbeiter-Wender-Paars und bei höherer Geschwindigkeit des Vorreißers ergibt sich der höchste Faserorientierungsgrad. Dieser korreliert mit dem Grad der Kardierintensität. Der Grad der Kardierung ist abhängig von den Geschwindigkeiten von Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar. Der maximale Kardiereffekt wird bei höheren Vorreißer- und niedrigeren Arbeiter-Wender-Paar-Geschwindigkeiten erzielt.

Aus Abb. 34 wird ersichtlich, dass die Geschwindigkeit des Vorreißers einen größeren Einfluss auf die Faserlängenverteilung als die Geschwindigkeit von Einzugswalzen und Arbeiter-Wender-Paar hat. Die Geschwindigkeit der Einzugswalzen weist die geringste Auswirkung auf die mittlere Faserlänge (ML) und die obere halbe mittlere Faserlänge (UHML) auf. Die Werte für ML und UHML der rCF sind bei höheren Vorreißer- und niedrigeren Arbeiter-Wender-Paar-Geschwindigkeiten höher, was auf eine geringere Faserschädigung hinweist [16].



**Abb. 34:** Zusammenhang der Faserlängenverteilung und der Walzengeschwindigkeiten

Der Einfluss der Geschwindigkeiten der Einzugswalzen ( $X_e$ ), des Vorreißers ( $X_v$ ) und des Arbeiter-Wender-Paares ( $X_a$ ) auf die Bandkohäsion ist in Abb. 35 dargestellt. Die Einzugswalzengeschwindigkeit beeinflusst die Bandkohäsion signifikant. Diese steigt quasilinear mit zunehmender Einzugswalzengeschwindigkeit, da auf diese Weise mehr Material eingespeist wird. Dadurch steigt die Bandfeinheit, was zu mehr Fasern im Bandquerschnitt führt und dementsprechend auch zu einer größeren Bandkohäsion. Im Gegensatz dazu haben Vorreißer- und Arbeitergeschwindigkeiten keinen Einfluss auf die Bandkohäsion [16].

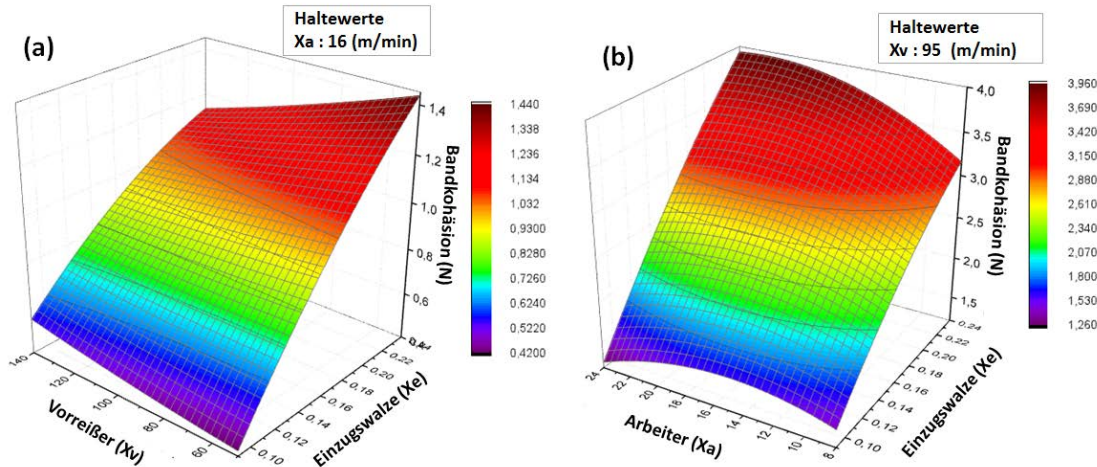


Abb. 35: Zusammenhang der Bandkohäsion und Walzengeschwindigkeiten--

**Fazit:** Die Einzugswalzengeschwindigkeit (Xe) hat den größten Einfluss auf die Bandfeinheit und Bandkohäsion. Die höchste Faserorientierung wird bei maximalen Geschwindigkeiten der Einzugswalzen und des Vorreißers erreicht. Die Geschwindigkeit des Vorreißers hat einen größeren Einfluss auf die Faserlängenverteilung als die Geschwindigkeit der Einzugswalzen und des Arbeiter-Wender-Paars.

Tab. 20: Einfluss der Walzenabstände zwischen Einzugswalzen, Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paare auf die Faser- und Bandqualität - DoE-2

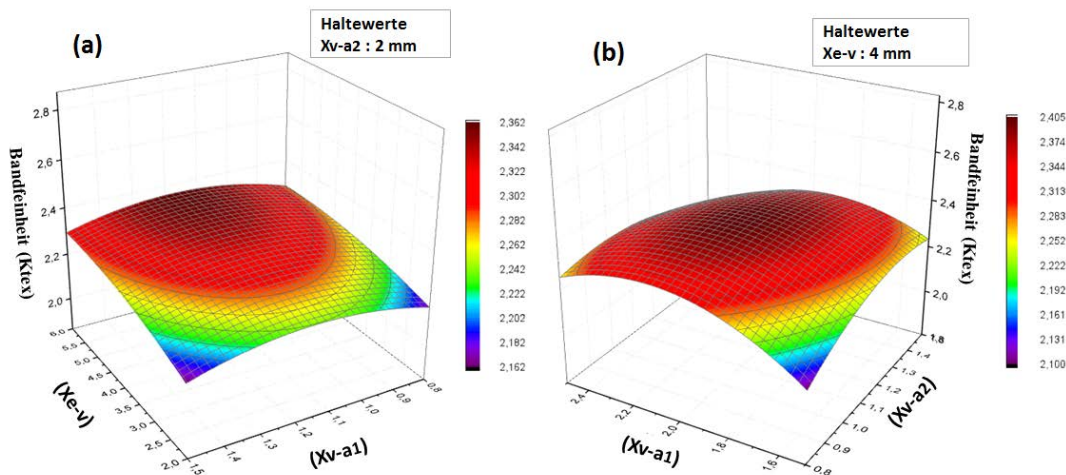
Nr.	Parameter			Bandfeinheit (ktex)	Faserorientierung (Index)	Faserlänge (mm)		Bandkohäsion (N)
	Xe-v	Xv-a1	Xv-a2			ML	UHML	
1	2	0,8	2	2,32 ± 0,28	88,0 ± 3,2	55,0 ± 1,2	60,1 ± 3,1	0,68 ± 0,2
2	6	0,8	2	2,44 ± 0,16	82,6 ± 2,2	62,2 ± 2,3	68,8 ± 1,5	0,89 ± 0,1
3	2	1,5	2	2,08 ± 0,16	72,0 ± 1,8	57,0 ± 1,6	62,2 ± 3,2	0,91 ± 0,2
4	6	1,5	2	2,33 ± 0,17	84,4 ± 2,2	62,2 ± 2,1	66,6 ± 2,3	0,98 ± 0,1
5	2	1,2	1,5	2,17 ± 0,14	82,0 ± 2,8	54,4 ± 2,3	62,2 ± 0,9	0,83 ± 0,1
6	6	1,2	1,5	2,30 ± 0,22	75,0 ± 2,5	57,6 ± 2,2	63,3 ± 1,6	0,85 ± 0,1
7	2	1,2	2,5	2,25 ± 0,25	80,9 ± 2,1	51,1 ± 1,5	58,1 ± 2,8	0,6 ± 0,1
8	6	1,2	2,5	2,20 ± 0,17	82,2 ± 2,2	56,1 ± 1,2	61,1 ± 2,5	1,04 ± 0,1
9	4	0,8	1,5	2,02 ± 0,29	81,0 ± 2,9	65,0 ± 2,2	71,0 ± 1,4	0,66 ± 0,1
10	4	1,5	1,5	2,33 ± 0,31	82,4 ± 2,2	56,0 ± 2,3	63,3 ± 3,0	1,08 ± 0,1
11	4	0,8	2,5	2,18 ± 0,20	85,4 ± 2,7	40,1 ± 2,5	46,6 ± 2,5	1,04 ± 0,1
12	4	1,5	2,5	2,24 ± 0,23	81,4 ± 2,6	52,2 ± 2,3	58,1 ± 3,5	0,76 ± 0,1
13	4	1,2	2	2,55 ± 0,27	81,80 ± 2,4	52,2 ± 1,8	58,8 ± 2,8	0,79 ± 0,1
14	4	1,2	2	2,33 ± 0,11	85,05 ± 2,0	56,2 ± 2,1	61,1 ± 1,6	1,22 ± 0,3
15	4	1,2	2	2,39 ± 0,17	86,84 ± 1,5	50,0 ± 1,5	57,1 ± 2,3	1,16 ± 0,2



### 3.3.2.2 Optimierung der Walzenabstände zwischen Einzugswalzen, Vorreißer und Arbeiter Wender-Paaren (DoE-2)

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung DoE-2 wurden die Einflüsse der Walzenabstände zwischen Einzugswalzen und Vorreißer ( $X_{e-v}$ ), Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar-1 ( $X_{v-a1}$ ) sowie Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paar-2 ( $X_{v-a2}$ ) auf die Bandfeinheit, die Faserorientierung, die Faserschädigung und die Bandkohäsion umfangreich untersucht, charakterisiert und analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tab. 20 aufgeführt.

In Abb. 36 ist ersichtlich, dass die Abstände zwischen den Walzen keinen Einfluss auf die Bandfeinheit ausüben. Die Bandfeinheit wird ausschließlich durch den Gesamtverzug beeinflusst, welcher wiederum von den Geschwindigkeiten der Einzugswalzen und des Abnehmers abhängig ist.



**Abb. 36:** Zusammenhang zwischen Bandfeinheit und Walzenabständen

Der Einfluss der Walzenabstände auf die Faserorientierung ist in Abb. 37 dargestellt. Die höchste Faserorientierung wird entweder bei mittlerem Abstand zwischen Einzugswalzen und Vorreißer ( $X_{e-v}$ ) oder bei minimalem Abstand zwischen Vorreißer und erstem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_{v-a1}$ ) erreicht (Abb. 37 (a) und (b)). Die Ursache dafür ist, dass diese Abstände zwischen Einzugswalzen und Vorreißer eine hohen Faseröffnungsgrad ermöglichen und dadurch eine gute Faserorientierung realisiert wird. Der Abstand zwischen Vorreißer und zweitem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_{v-a2}$ ) hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Faserorientierung.

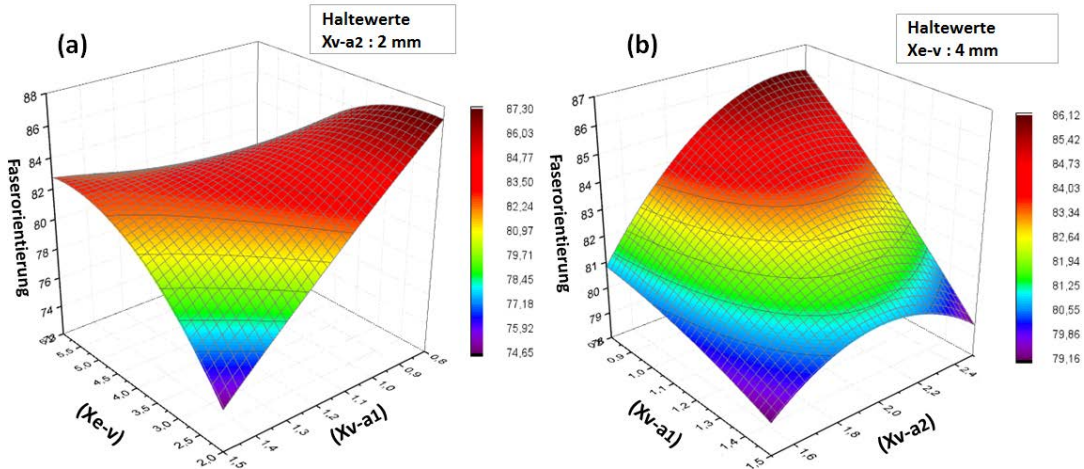


Abb. 37: Zusammenhang zwischen Faserorientierung und Walzenabstände

Aus Abb. 38 lässt sich ableiten, dass die minimalen Abstände zwischen Einzugswalzen und Vorreißer ( $Xe-v$ ) zu einer höheren Schädigung der rCF führen und mit steigendem Walzenabstand die Faserschädigung signifikant reduziert werden kann.

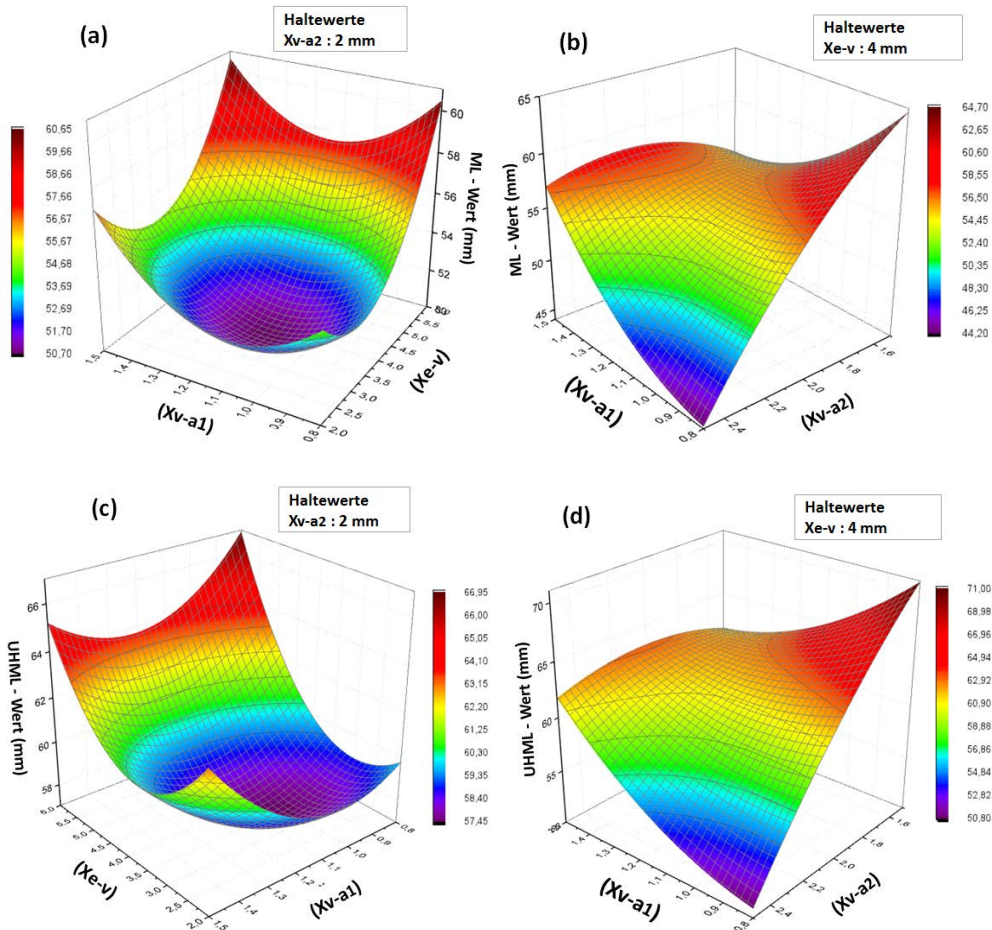
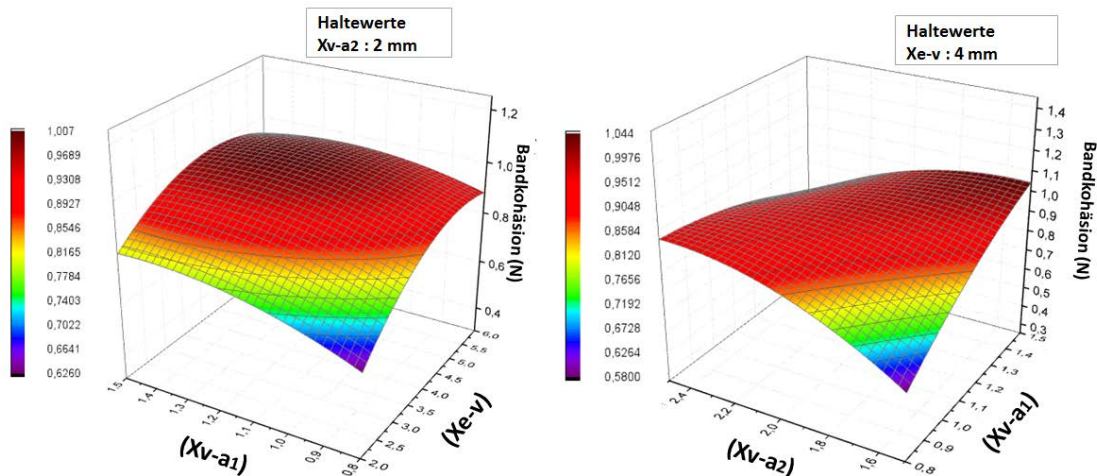


Abb. 38: Zusammenhang zwischen Faserlängenverteilung und Walzenabständen

Ein ähnlicher Effekt auf die Faserlänge zeigt sich auch bei Variation des Abstandes zwischen Vorreißer und erstem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_v-a1$ ). Der Grund dafür ist, dass bei geringem Abstand zwischen den Walzen die mechanische Beanspruchung zwischen den recycelten Carbonfasern sowie zwischen rCF und Garnituren erhöht wird, was letztendlich zur Beschädigung der in hohem Maße querkräftempfindlichen Fasern führt. Die geringeren Walzenabstände zwischen Vorreißer und Arbeiter-Wender-Paaren ( $X_v-a1$  und  $X_v-a2$ ) haben eine geringe Auswirkung auf die Faserschädigung. Die Ursache dafür ist, dass die Fasern aufgrund der Funktionsweise der Arbeiter-Wender-Paare kontrolliert auf die nächste Walze übertragen werden können. Im Falle eines größeren Abstandes werden die Fasern in geringerem Maße kontrolliert auf den Wender übergeben. Damit resultiert eine Wirrlage der Fasern, was zu einer erhöhten Schädigung führt.

Der Einfluss des Abstandes zwischen Einzugswalzen und Vorreißer ( $X_e-v$ ), Vorreißer zu erstem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_v-a1$ ) und Vorreißer zu zweitem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_v-a2$ ) auf die Bandkohäsion ist in Abb. 39 dargestellt. Es zeigt sich, dass diese Parameter einen geringen Einfluss auf die Bandkohäsion haben. Diese nimmt bei minimalen Abständen zwischen Vorreißer und Arbeiter leicht ab, da eine höhere Faserorientierung die Faser-Faser-Reibung reduziert.



**Abb. 39:** Zusammenhang zwischen Bandkohäsion und Walzenabständen

**Fazit:** Die Walzenabstände haben keinen Einfluss auf die Bandfeinheit und Bandkohäsion. Mit geringeren Walzenabständen steigt die Faserorientierung, wohingegen die Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung zunimmt. Deshalb muss ein Kompromiss bei der Auswahl der Walzenabstände gemacht werden, wobei grundsätzlich eine weitgehende Faserschädigung vermieden werden soll. Die verbesserte Faserorientierung soll in nachgeschaltetem Verstreckungsprozess erfolgen.

**3.3.2.3 Optimierung der Geschwindigkeiten des Tambours, des Arbeiter-Wender-Paars und des Abnehmers (DoE-3)**

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung DoE-3 wurden die Einflüsse der Geschwindigkeiten des Tambours (Xt), des Arbeiter-Wender-Paars (Xa) und des Abnehmers (Xd) auf die Bandfeinheit, die Faserorientierung, die Faserschädigung und die Bandkohäsion umfangreich untersucht, charakterisiert und analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 21 aufgeführt.

Tab. 21: Einfluss der Geschwindigkeiten des Tambours (Xt), des Arbeiter-Wender-Paars (Xa) und des Abnehmers (Xd) auf die Faser- und Bandqualität - DoE-3

Parameter			Bandfeinheit (ktex)	Faser-Orientierung (Index)	Faserlänge (mm)		Bandkohäsion (N)
Xt	Xd	Xa			ML	UHML	
160	8	30	2,80 ± 0,22	80,0 ± 2,5	59,4 ± 2,1	64,8 ± 3,5	1,19 ± 0,2
240	8	30	2,73 ± 0,24	82,3 ± 1,6	65,7 ± 3,1	68,4 ± 2,0	1,13 ± 0,3
160	12	30	1,54 ± 0,30	89,4 ± 2,2	55,8 ± 1,9	58,5 ± 2,2	0,51 ± 0,1
240	12	30	1,43 ± 0,18	89,0 ± 2,5	59,4 ± 1,2	63,0 ± 3,5	0,81 ± 0,1
160	10	15	1,35 ± 0,19	81,7 ± 2,6	54,9 ± 2,5	59,4 ± 1,5	0,75 ± 0,1
240	10	15	2,15 ± 0,35	86,1 ± 3,1	63,0 ± 1,7	67,5 ± 1,6	1,05 ± 0,2
160	10	45	2,33 ± 0,23	86,7 ± 2,7	61,2 ± 2,5	65,7 ± 3,5	0,87 ± 0,2
240	10	45	3,23 ± 0,20	88,3 ± 2,8	65,7 ± 2,8	68,4 ± 3,0	1,55 ± 0,2
200	8	15	4,17 ± 0,31	85,7 ± 1,4	60,3 ± 2,2	63,0 ± 2,1	1,85 ± 0,2
200	12	15	1,85 ± 0,29	84,0 ± 1,1	63,0 ± 3,1	67,5 ± 2,5	0,95 ± 0,1
200	8	45	2,64 ± 0,30	85,0 ± 2,1	62,1 ± 3,6	64,8 ± 2,5	1,86 ± 0,1
200	12	45	1,96 ± 0,29	81,3 ± 0,9	54,0 ± 2,2	62,1 ± 2,3	1,12 ± 0,3
200	10	30	3,11 ± 0,32	83,3 ± 1,8	54,0 ± 1,7	58,5 ± 3,2	1,42 ± 0,3
200	10	30	2,40 ± 0,28	82,3 ± 2,1	56,7 ± 2,6	59,4 ± 1,8	1,17 ± 0,3
200	10	30	2,31 ± 0,20	83,5 ± 2,2	49,5 ± 1,8	54,0 ± 1,6	1,58 ± 0,2

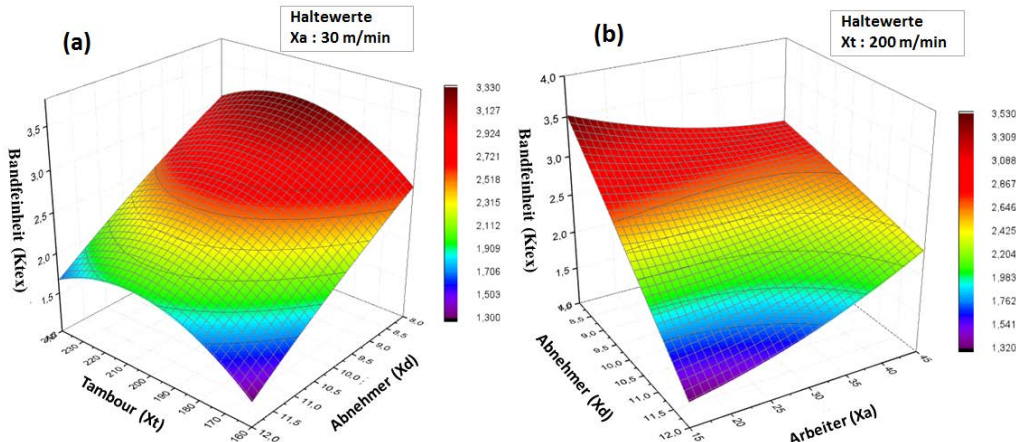
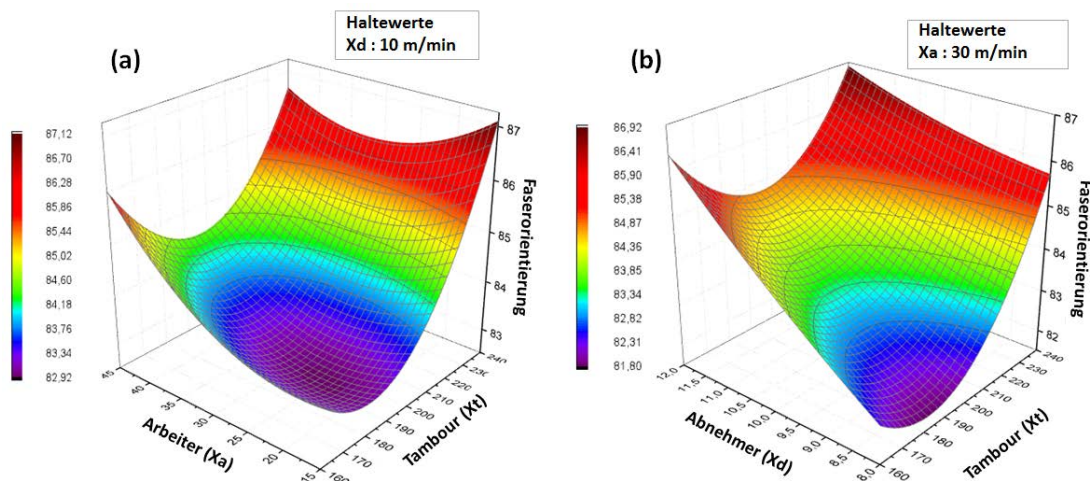


Abb. 40: Zusammenhang zwischen Bandfeinheit und Walzgeschwindigkeiten

Abb. 40 zeigt, dass die Bandfeinheit stark von der Geschwindigkeit des Abnehmers beeinflusst wird und mit steigender Walzengeschwindigkeit aufgrund einer steigenden Verzugshöhe abnimmt. Es wird auch festgestellt, dass die Geschwindigkeiten von Tambour und Arbeiter-Wender-Paar keinen Einfluss auf die Bandfeinheit haben [21].

Aus Abb. 41 ist ersichtlich, dass mit steigender Geschwindigkeit des Tambours ( $X_t$ ) die Faserorientierung signifikant steigt. Dies ist auf die intensivere Kardierwirkung zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paar bei höherer Geschwindigkeit des Tambours zurückzuführen. Auch mit steigender Geschwindigkeit des Abnehmers ( $X_d$ ) steigt die Faserorientierung, da mit steigender Abnehmergeschwindigkeit ein höherer Gesamtverzug resultiert. Im Gegensatz dazu hat die Geschwindigkeit des Arbeiters ( $X_a$ ) kaum Einfluss auf die Faserorientierung.



**Abb. 41:** Zusammenhang zwischen Faserorientierung und Walzengeschwindigkeiten

Der Einfluss der Walzengeschwindigkeiten auf die Faserlängenverteilung ist in Abb. 42 dargestellt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass eine höhere Geschwindigkeit des Tambours ( $X_t$ ) einen positiven Einfluss auf die Faserlängenverteilung hat. Das ist auf einen verbesserten Kardiereffekt und eine bessere Verteilung der Fasern auf den Garnituroberflächen zurückzuführen. Die Geschwindigkeit des Abnehmers ( $X_d$ ) hat ebenfalls Auswirkungen auf die Faserlänge und ist abhängig von der Produktionsgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des Arbeiters ( $X_a$ ) hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Faserlängenverteilung [16].

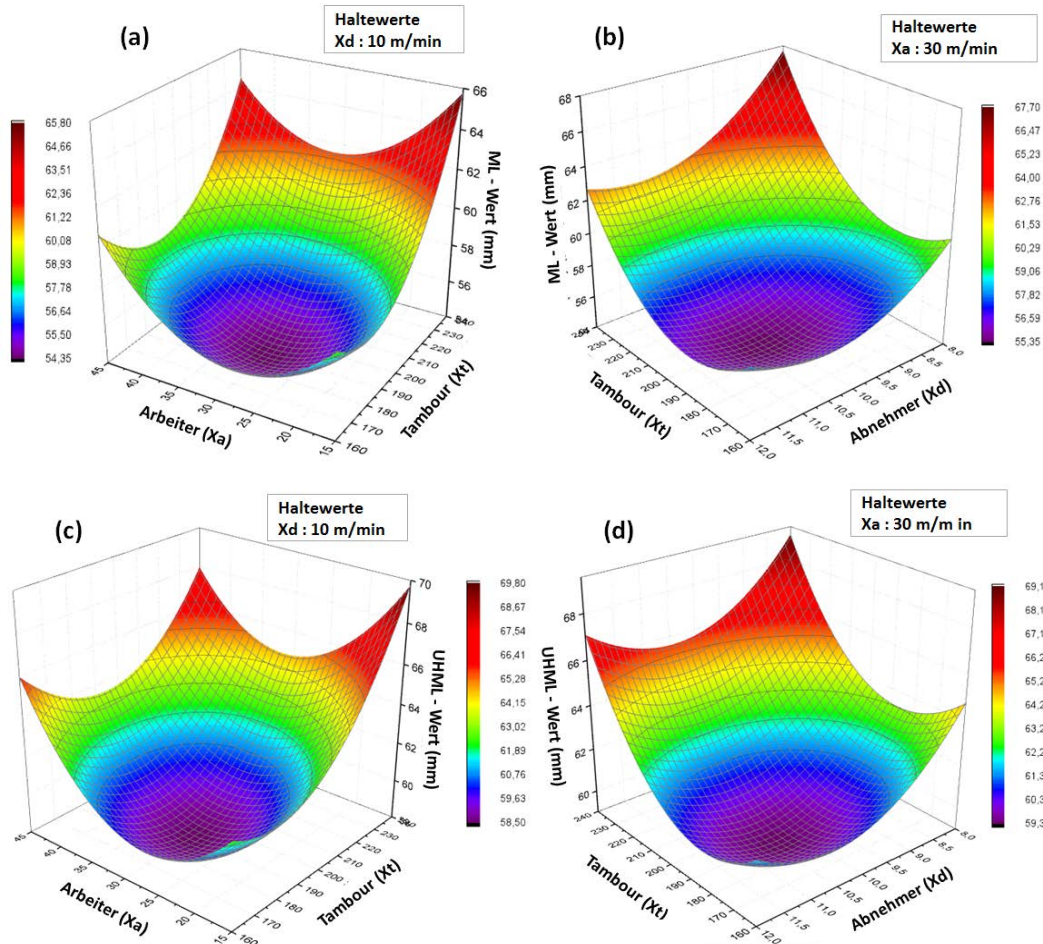


Abb. 42: Zusammenhang zwischen Faserlängenverteilung und Walzengeschwindigkeiten

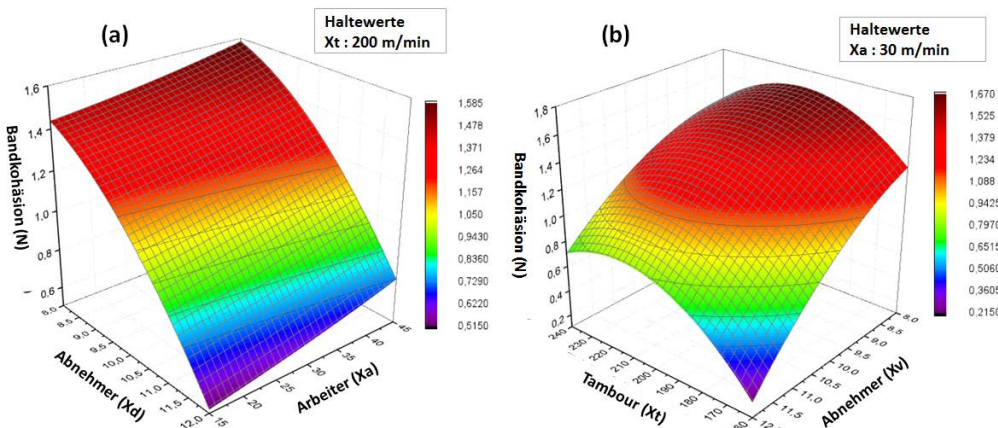


Abb. 43: Zusammenhang zwischen Bandkohäsion und Walzengeschwindigkeiten

Der Einfluss der Geschwindigkeiten des Tambour (Xt), des Arbeiter-Wender-Paars (Xa) und des Abnehmers (Xd) auf die Bandkohäsion ist in Abb. 43 dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die Bandkohäsion durch die Geschwindigkeit des Abnehmers und des Tambours erheblich beeinträchtigt wird. Dies ist drauf zurückzuführen, dass zum einen mit steigender

Tambourgeschwindigkeit die Faserparallelität verbessert wird. Zum anderen sinkt mit steigender Abnehmergeschwindigkeit die Bandfeinheit. Im Gegensatz dazu hat die Geschwindigkeit des Arbeiters keinen signifikanten Einfluss auf die Bandkohäsion [16].

**Fazit:** Die Bandfeinheit hängt stark von der Geschwindigkeit des Abnehmers ab und nimmt mit steigender Walzengeschwindigkeit zu. Mit steigender Geschwindigkeit des Tambours steigen die Faserorientierung und Faserlängen signifikant. Die Bandkohäsion wird mit steigender Geschwindigkeit des Abnehmers und des Tambours aufgrund des starken Parallelisierungsgrads der rCF erheblich verringert.

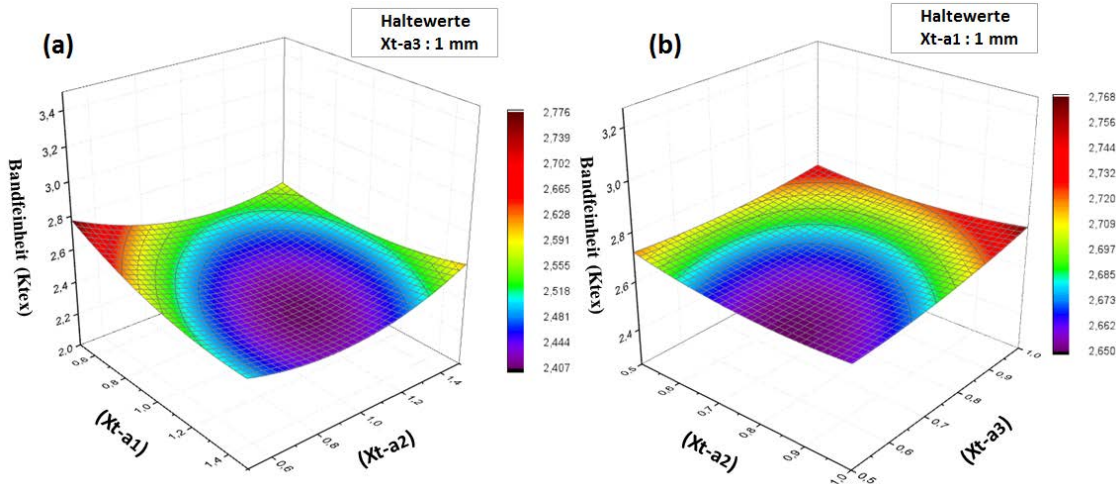
### 3.3.2.4 Optimierung des Abstandes zwischen Tambour, Abnehmer und Arbeiter-Wender Paare (DoE-4)

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung DoE-4 wurden die Einflüsse der Walzenabstände zwischen Tambour-Arbeiter-Wender-Paar I (Xt-a1), Tambour-Arbeiter-Wender-Paar II (Xt-a2) und Tambour-Arbeiter-Wender-Paar III (Xt-a3) auf die Bandfeinheit, die Faserorientierung, die Faserschädigung und die Bandkohäsion umfangreich untersucht, charakterisiert und analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tab. 22 aufgeführt.

Tab. 22: Einfluss der Walzenabstände zwischen Tambour-Arbeiter-Wender-Paar I, Tambour-Arbeiter-Wender-Paar II und Tambour-Arbeiter-Wender-Paar III auf die Faser- und Bandqualität - DoE-4

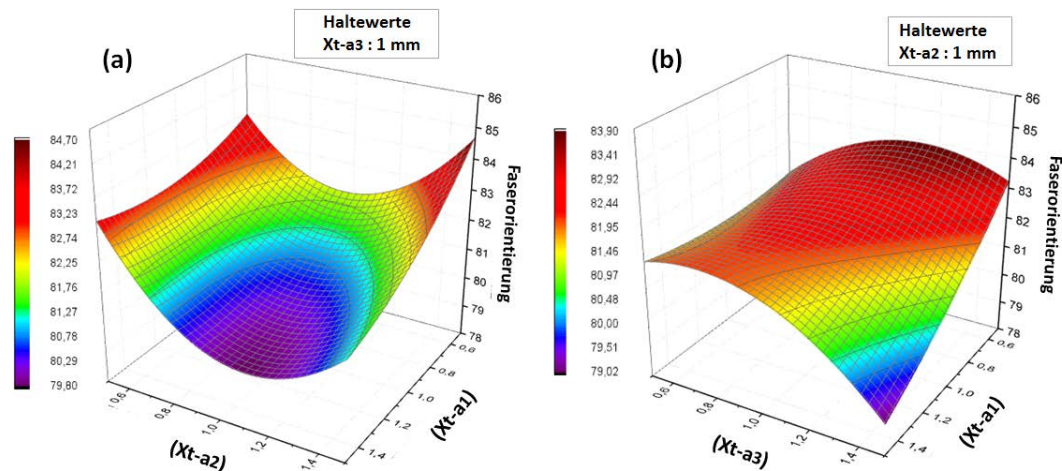
Parameter			Bandfeinheit (ktex)	Faserorientierung (Index)	Faserlänge (mm)		Bandkohäsion (N)
Xt-a1	Xt-a2	Xt-a3			Mean	UHML	
0,5	0,5	1	2,98 ± 0,21	85,6 ± 2,5	44,4 ± 3,1	51,1 ± 2,0	1,81 ± 0,1
1,5	0,5	1	2,41 ± 0,22	83,1 ± 2,1	52,3 ± 2,9	58,8 ± 1,2	0,98 ± 0,2
0,5	1,5	1	2,59 ± 0,31	85,9 ± 2,3	50,0 ± 1,9	56,6 ± 1,6	1,25 ± 0,2
1,5	1,5	1	2,32 ± 0,25	80,6 ± 1,2	54,4 ± 1,2	62,0 ± 3,8	0,95 ± 0,1
0,5	1	0,5	2,31 ± 0,26	80,8 ± 2,5	51,1 ± 1,6	56,6 ± 3,3	0,95 ± 0,2
1,5	1	0,5	2,69 ± 0,19	82,6 ± 2,6	52,2 ± 1,5	56,7 ± 1,6	1,26 ± 0,3
0,5	1	1,5	2,58 ± 0,17	80,4 ± 1,3	59,9 ± 3,8	63,3 ± 2,0	1,14 ± 0,2
1,5	1	1,5	2,56 ± 0,20	78,0 ± 1,5	46,6 ± 1,2	53,3 ± 3,4	1,16 ± 0,3
1	0,5	0,5	2,51 ± 0,29	81,5 ± 1,2	62,2 ± 2,7	66,6 ± 3,8	1,19 ± 0,1
1	1,5	0,5	2,67 ± 0,23	82,0 ± 1,0	57,7 ± 2,7	62,2 ± 1,1	1,36 ± 0,3
1	0,5	1,5	2,52 ± 0,23	83,2 ± 0,8	57,8 ± 1,6	63,3 ± 1,7	0,87 ± 0,1
1	1,5	1,5	2,67 ± 0,33	82,2 ± 0,6	54,4 ± 2,4	59,9 ± 1,6	1,1 ± 0,3
1	1	1	2,31 ± 0,17	81,2 ± 1,6	55,5 ± 1,6	62,2 ± 1,7	1,26 ± 0,1
1	1	1	2,52 ± 0,25	81,3 ± 1,2	53,3 ± 2,2	59,9 ± 2,3	1,15 ± 0,1
1	1	1	2,25 ± 0,19	80,8 ± 1,3	58,8 ± 2,9	65,5 ± 2,5	0,87 ± 0,1

Abb. 44 zeigt, dass die Abstände zwischen Tambour, Abnehmer und Arbeiter-Wender-Paaren keinen signifikanten Einfluss auf die Bandfeinheit haben, da diese den Gesamtverzug nicht beeinflussen.



**Abb. 44:** Zusammenhang zwischen Bandfeinheit und Walzenabständen

In Abb. 45 ist der Einfluss der Abstände zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paaren ( $Xt-a1...3$ ) dargestellt.  $Xt-a1$ ,  $Xt-a3$  haben einen größeren Einfluss auf die Faserorientierung als  $Xt-a2$ . Der Faserorientierungsgrad ist bei minimalen Walzenabständen höher, da in diesem Fall eine höhere Kardierintensität vorliegt.



**Abb. 45:** Zusammenhang zwischen Faserorientierung und Walzenabständen

Der Einfluss der Abstände zwischen Tambour und erstem Arbeiter-Wender-Paar ( $Xt-a1$ ), zweitem Arbeiter-Wender-Paar ( $Xt-a2$ ) sowie drittem Arbeiter-Wender-Paar ( $Xt-a3$ ) auf die Faserlängenverteilung ist in Abb. 46 dargestellt. Bei Einstellung mittlerer Werte der Parameter  $Xt-a1$  und  $Xt-a2$  konnten maximale Faserlängen erzielt werden. Im Gegensatz dazu wird bei der



Einstellung der minimalen Werte eine größere Faserschädigung verursacht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit geringen Abständen die mechanische Beanspruchung innerhalb des Faserverbundes sowie zwischen Fasern und Garnituren erhöht wird. Die optimale Einstellung des Abstandes zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paaren I und II beträgt daher 1 mm. Bei Betrachtung des dritten Parameters ( $X_{t-a3}$ ) liegt eine maximale Faserlänge bei minimalen Einstellwerten vor, da hier eine bessere Kontrolle der Faserbewegung während der Faserübertragung stattfindet.

Der Einfluss der Abstände zwischen Tambour und erstem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_{t-a1}$ ), zweitem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_{t-a2}$ ) sowie drittem Arbeiter-Wender-Paar ( $X_{t-a3}$ ) auf die Bandkohäsion ist in Abb. 47 dargestellt. Es zeigt sich, dass diese Abstände keinen signifikanten Einfluss auf die Bandkohäsion haben, da sie den Gesamtverzug nicht beeinflussen.

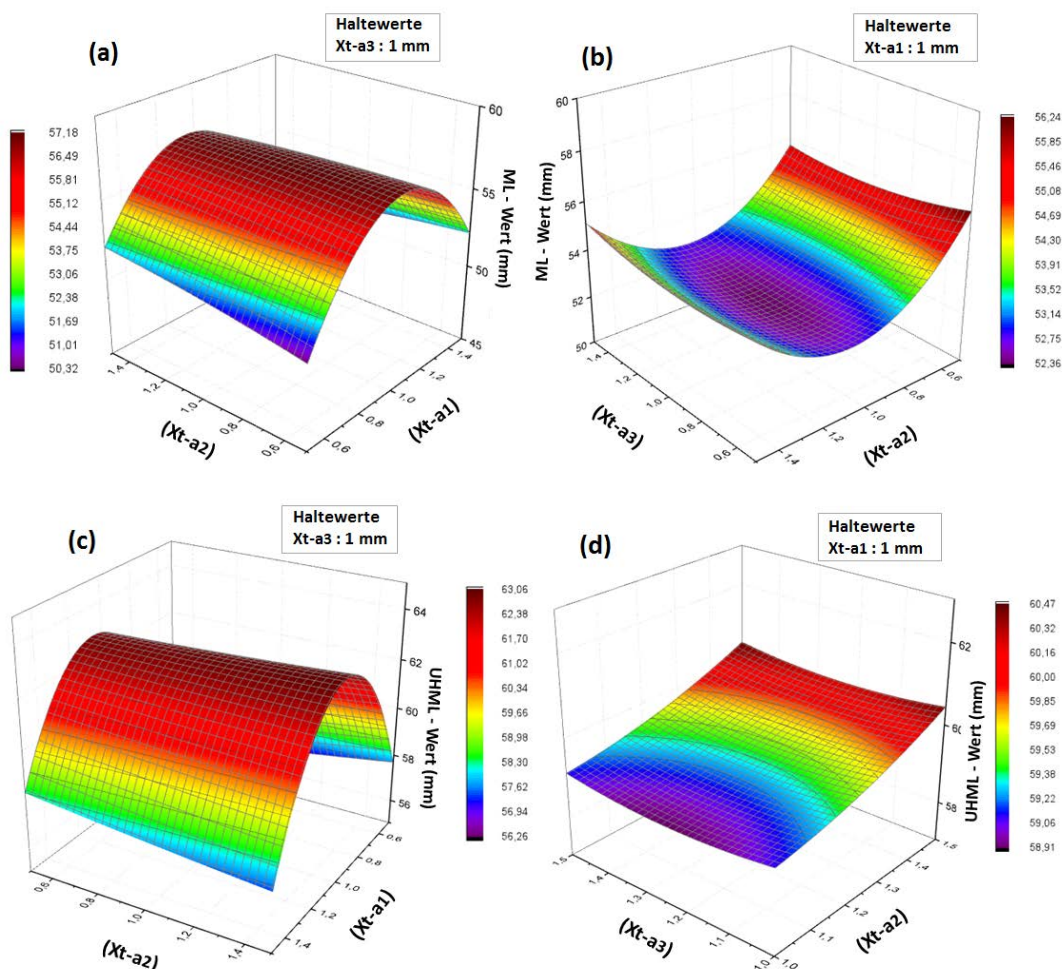
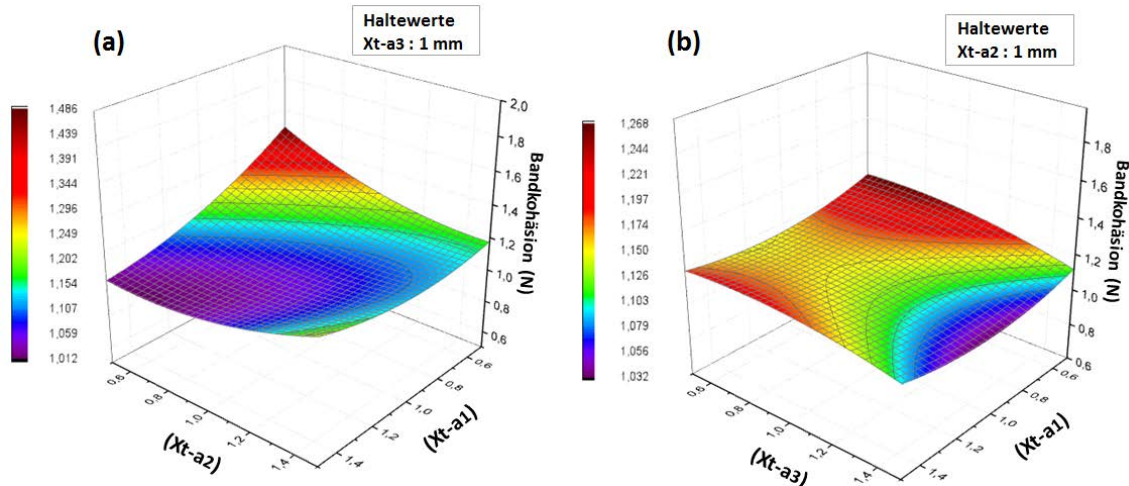


Abb. 46: Zusammenhang zwischen Faserlängenverteilung und Walzenabstand



**Abb. 47:** Zusammenhang zwischen Bandkohäsion und Walzengeschwindigkeiten

**Fazit:** Die Abstände zwischen Tambour, Abnehmer und Arbeiter-Wender-Paaren haben keinen Einfluss auf die Bandfeinheit und Bandkohäsion. Hingegen üben die Abstände zwischen Tambour und Arbeiter-Wender-Paar I (Xt-a1) sowie III (Xt-a3) einen größeren Einfluss auf die Faserorientierung als Xt-a2 aus. Mit sinkenden Walzenabständen steigt die Faserorientierung, wohingegen die Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung zunimmt, sodass ein Kompromiss bei der Auswahl der Walzenabstände gemacht werden muss. Es wird empfohlen, die Fasereinkürzung im Krepelpprozess weitestgehend zu minimieren und die Faserorientierung im nachgeschalteten Verstreckungsprozess zu verbessern.

**Tab. 23:** Optimierte technologische und maschinentechnische Einstellungsparameter der Speziallaborkrempelanlage

Parameter	Einheit	optimale Einstellung			
		für gleichmäßige Bandfeinheit (ktex)	für optimierte Faserlängen (mm)	für höchste Faserorientierung (Index)	für geeignete Bandkohäsion (N)
Xe	m/min	0,24	0,24	0,24	0,09
Xv	m/min	140	140	140	--
Xa	m/min	8	8	8	--
Xe-v	mm	6	6	4	--
Xv-a <sub>1</sub>	mm	0,8	0,8	0,8	--
Xv-a <sub>2</sub>	mm	2,5	1,5	2	--
Xt	m/min	160	240	240	--
Xd	m/min	8	8	12	12
Xa	m/min	15	15	15	--
Xt-a <sub>1</sub>	mm	0,5	1	0,5	--
Xt-a <sub>2</sub>	mm	0,5	1	0,5	--
Xt-a <sub>3</sub>	mm	0,5	1	0,5	--

In Tab. 23 werden die zur Erreichung der höchsten Bandgleichmäßigkeit, höchsten Faserlängen, höchsten Faserorientierung und einer für die Verstreckung geeigneten Bandkohäsion die optimalen maschinentechnologischen Einstellwerte dargestellt. Erfahrungsgemäß ist die Faserlänge der relevanteste Faktor für die Erzielung von hohen, mechanischen Verbundeigenschaften und sollte daher bei der Auswahl der Einstellwerte in besonderem Maße berücksichtigt werden (fett grün markiert).

Mit den ermittelten optimalen Einstellungswerten wurden Krempelbänder mit definierter Faserlänge und mit definiertem Faservolumenanteil für die weiteren Untersuchungen in AP 8 und die Weiterverarbeitung (in AP 3) entwickelt und hergestellt (Tab. 24). Die gewonnenen Erkenntnisse stellen eine wichtige Basis zur Entwicklung von Krempelbändern dar.

**Tab. 24:** Eigenschaften der entwickelten Krempelbänder

hergestelltes Krempelband	Bandfeinheit [ktex]	Bandgleich- mäßigkeit [CV%]	Faser- Orientierung (Index)	Faserlänge (mm)	
				ML	UHML
KB-rCF-I-40-45	2,3 ± 0,2	8,8	86,2 ± 2,3	37,2 ± 1,8	39,8 ± 1,8
KB-rCF-I-40-50	2,3 ± 0,2	9,0	86,9 ± 1,9	36,0 ± 2,2	38,9 ± 2,2
KB-rCF-I-60-45	1,9 ± 0,2	9,0	85,3 ± 2,5	52,3 ± 2,6	55,3 ± 1,8
KB-rCF-I-60-50	2,0 ± 0,3	11,2	84,6 ± 1,6	50,0 ± 1,8	52,2 ± 2,5
KB-rCF-I-60-55	1,8 ± 0,3	9,8	86,0 ± 2,3	52,2 ± 1,3	56,6 ± 1,7
KB-rCF-I-60-60	2,1 ± 0,3	10,9	84,2 ± 2,1	48,8 ± 2,4	53,3 ± 1,1
KB-rCF-I-60-65	2,0 ± 0,3	11,1	79,1 ± 3,8	51,1 ± 1,9	54,4 ± 3,8
KB-rCF-I-80-45	2,2 ± 0,3	11,4	86,4 ± 2,4	62,3 ± 2,4	64,3 ± 1,8
KB-rCF-I-80-50	2,0 ± 0,3	9,8	86,6 ± 1,5	59,9 ± 1,2	63,3 ± 2,0
KB-rCF-I-80-55	1,9 ± 0,4	18,8	85,8 ± 1,74	58,8 ± 2,7	62,2 ± 1,2
KB-rCF-I-80-60	2,0 ± 0,3	12,3	80,8 ± 2,14	65,5 ± 2,3	69,9 ± 1,8
KB-rCF-I-80-65	2,3 ± 0,3	10,9	86,3 ± 1,26	66,6 ± 2,8	71,0 ± 2,3
KB-rCF-I-100-45	1,9 ± 0,3	13,4	85,7 ± 1,8	63,5 ± 2,0	68,3 ± 2,8
KB-rCF-I-100-50	1,9 ± 0,3	12,8	86,8 ± 2,09	62,2 ± 2,6	66,6 ± 3,2
KB-rCF-I-100-55	2,0 ± 0,4	18,8	85,0 ± 1,99	63,3 ± 3,8	67,7 ± 1,9
KB-rCF-I-100-60	2,1 ± 0,4	15,6	84,6 ± 1,65	69,9 ± 1,3	74,4 ± 1,5
KB-rCF-I-100-65	2,0 ± 0,3	13,3	83,4 ± 1,93	71,0 ± 3,5	75,5 ± 2,5
KB-rCF-II-60-45	2,3 ± 0,3	12,6	81,3 ± 1,5	49,1 ± 3,8	53 ± 2,0
KB-rCF-III-65-45	2,0 ± 0,3	11,6	82,9 ± 2,1	53,3 ± 2,1	56,6 ± 1,4

Aus den umfangreichen Untersuchungen können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Faserorientierung steigt mit zunehmenden Geschwindigkeiten des Vorreißers, Tambours und Abnehmers.
- Die Faserorientierung steigt mit sinkenden Walzenabständen.
- Die Faserschädigung steigt mit den Geschwindigkeiten des Vorreißers und Tambours. Im Gegensatz dazu führt eine geringere Abnehmergeschwindigkeit zu einer geringeren Faserschädigung. Mit großem Abstand zwischen Einzugswalze und Vorreißer sowie Vorreißer und zugehörigen Arbeiter-Wender-Paaren und mittleren Abständen zwischen Tambour und zugehörigen ersten sowie zweiten Arbeiter-Wender-Paaren wird die geringste Faserschädigung erzielt.
- Die Bandkohäsion ist abhängig von der Bandfeinheit und Faserorientierung im Band und wird im Wesentlichen ausschließlich von der Einzugswalzen- und Abnehmergeschwindigkeit beeinflusst.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch die Optimierung der technologischen und maschinentechnischen Parameter der Spezialkrepelanlage die Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung von größer als 60 % auf kleiner als 25 % reduziert werden konnten. Dies wird sich signifikant auf die Eigenschaften der zu entwickelnden Tape- bzw. Verbundstrukturen auswirken.

### **3.4 Ergebnisse der hergestellten Streckenbänder**

Um eine reproduzierbare Qualität des rCF-Hybridbandes zu entwickeln, wurden umfangreiche Untersuchungen an der modifizierten Strecke im Hinblick auf die Reguliereinheit (2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 und 2.3.5) und die textiltechnologischen Parameter sowie die Streckwerkunterwalzen (2.3.7 und 3.3.8) durchgeführt. Es wurde die Reguliereinheit der Strecke hinsichtlich der Tastrollenbelastung, der Tastrollenoberflächenbeschaffenheit, der Tastrollenbreite sowie die Streckwerkunterwalzen modifiziert und weiterentwickelt. Des Weiteren wurden die textiltechnologischen Parameter optimiert und die Streckenbänder aus rCF und den thermoplastischen PA 6-Fasern mit definierten Faserlängen und Faservolumengehalt hergestellt. Die Untersuchungsergebnisse zum Streckenband mit hoher Faserorientierung, geringer Faserschädigung und hoher Gleichmäßigkeit mit reproduzierbarer Qualität sind in Tab. 25 zusammengefasst.

**Tab. 25:** Versuchsplan und Ergebnisse zur Streckenbandqualität

Versuchsplan						Faser- orientierung [Index]	mittlere Faserlänge [mm]	Band- ungleichmäßigkeit [CV% 1m]
Xwb	Xpg	Xwa	Xgv	Xvv	Xwh			
20	45	90	7	1,5	85	91,4 ± 1,8	58 ± 2,1	5,24
20	15	70	5	1,1	75	94,7 ± 2,8	58 ± 1,8	3,60
30	30	90	5	1,1	85	94,5 ± 2,6	52 ± 2,1	5,19
10	30	70	7	1,5	75	95,3 ± 3,2	57 ± 2,5	7,44
30	45	80	7	1,1	75	94,2 ± 3,5	54 ± 1,8	5,23
10	15	80	5	1,5	85	94,2 ± 2,2	56 ± 2,6	4,50
30	15	90	6	1,5	75	89,3 ± 2,4	51 ± 1,9	3,58
10	45	70	6	1,1	85	93,5 ± 1,8	55 ± 1,5	4,29
30	15	70	7	1,3	85	92,2 ± 1,6	55 ± 3,2	6,00
10	45	90	5	1,3	75	92,0 ± 2,5	56 ± 2,5	4,23
30	45	70	5	1,5	80	92,9 ± 2,6	46 ± 2,6	4,58
10	15	90	7	1,1	80	87,1 ± 2,4	50 ± 2,0	5,72
20	30	80	6	1,3	80	90,1 ± 2,1	55 ± 2,6	5,35

Die optimalen Einstellungen der Regulierstrecke für eine schonende Verarbeitung von rCF sind in Tab. 26 aufgeführt. Die wichtigen Prozessparametereinstellungen und die Eigenschaften des auf Basis dieser Einstellungen produzierten rCF-Hybridbandes sind in Tab. 27 zusammengefasst.

**Tab. 26:** Optimale Einstellungen für die Verarbeitung von rCF an der Strecke

Parameter	Kurzbez.	Einheit	optimale Einstellungen
Tastrollenbreite	--	mm	9
Tastrollenbelastung	--	N	70
Tastrollenoberfläche	--	--	Stahl
Regeleinsatzpunkt	--	mm	933
Einlaufbandfeinheit	--	Ktex	≥ 23
Walzenbelastung	$x_{wb}$	daN	10
Produktionsgeschwindigkeit	$x_{pg}$	m/min	45
Walzenabstand	$x_{wa}$	mm	65-70
Gesamtverzug	$x_{gv}$	--	5,0
Vorverzug	$x_{vv}$	--	1,3
Oberwalzenoberflächenhärte	$x_{wh}$	shore	75 (Black)
Streckwerkunterwalzen	--	--	Gummi/ Topocrom
Doublierung	--	--	6

**Tab. 27:** Eigenschaften der entwickelten Streckenbänder

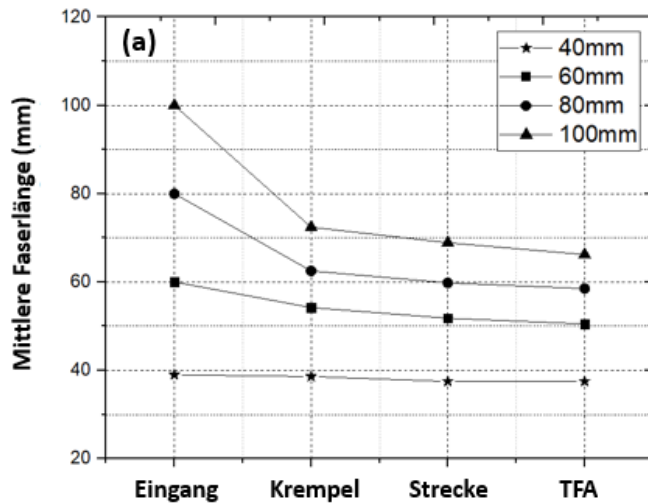
hergestellte Krempelband	Bandfeinheit [ktex]	Bandungleich- mäßigkeit [CV%]	Faser- Orientierung (Index)	Faserlänge (mm)	
				ML	UHML
SB-rCF-I-40-45	2,6 ± 0,1	1,9	92,3 ± 2,2	37,0 ± 1,4	39,5 ± 2,1
SB-rCF-I-40-50	2,5 ± 0,1	2,0	92,5 ± 1,8	37,2 ± 1,6	38,2 ± 2,2
SB-rCF-I-60-45	2,4 ± 0,1	2,7	92,1 ± 2,4	51,8 ± 1,9	53,4 ± 2,8
SB-rCF-I-60-50	2,5 ± 0,1	2,8	91,7 ± 1,7	50,4 ± 2,6	51,0 ± 2,4
SB-rCF-I-60-55	2,3 ± 0,1	2,6	91,3 ± 3,8	51,0 ± 12,5	54,4 ± 3,2
SB-rCF-I-60-60	2,7 ± 0,1	2,5	89,3 ± 1,4	55,5 ± 2,8	59,4 ± 2,4
SB-rCF-I-60-65	2,5 ± 0,1	2,8	87,5 ± 1,9	51,6 ± 2,4	53,8 ± 2,1
SB-rCF-I-80-45	2,4 ± 0,1	2,8	91,8 ± 1,8	57,1 ± 2,4	63,4 ± 2,0
SB-rCF-I-80-50	2,5 ± 0,1	3,1	91,2 ± 2,2	59,2 ± 1,5	62,4 ± 1,8
SB-rCF-I-80-55	2,3 ± 0,1	2,9	90,2 ± 2,5	61,1 ± 1,9	64,6 ± 1,9
SB-rCF-I-80-60	2,3 ± 0,1	2,7	88,3 ± 2,4	62,1 ± 2,2	65,6 ± 2,4
SB-rCF-I-80-65	2,3 ± 0,1	2,9	87,1 ± 2,1	63,2 ± 2,3	65,4 ± 2,2
SB-rCF-I-100-45	2,4 ± 0,1	3,2	90,8 ± 2,5	61,8 ± 2,0	68,1 ± 1,4
SB-rCF-I-100-50	2,4 ± 0,1	2,9	90,2 ± 1,8	64,3 ± 2,3	68,8 ± 2,2
SB-rCF-I-100-55	2,3 ± 0,1	3,1	89,5 ± 1,3	68,8 ± 2,5	75,4 ± 2,4
SB-rCF-I-100-60	2,5 ± 0,1	2,7	89,3 ± 1,5	66,6 ± 2,3	71,4 ± 2,6
SB-rCF-I-100-65	2,5 ± 0,1	2,7	87,4 ± 2,7	66,8 ± 2,6	72,1 ± 2,4
SB-rCF-II-60-45	2,4 ± 0,1	3,2	88,3 ± 3,2	45,2 ± 1,9	47,8 ± 3,2
SB-rCF-III-65-45	2,4 ± 0,1	3,5	89,8 ± 2,8	49,8 ± 2,1	53,5 ± 2,5

### 3.5 Ergebnisse der ermittelten Eigenschaften in den Bändern und rCF-Tapestrukturen

#### 3.5.1 Faserlänge in den Bändern und rCF-Tapestrukturen

Die Faserlänge hat einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Faserstrukturen und der darauf basierenden Verbundwerkstoffe. Daher wurde die Verkürzung der mittleren Faserlänge in Abhängigkeit von der Eingangsfaserlänge in der Tafelfertigungsprozesskette untersucht. Die Länge der Carbonfasern wurde nach jedem Prozess der Tafelfertigungsprozesskette gemessen.

Abb. 48(a) zeigt die mittlere rCF-Faserlänge nach dem Kardier-, Verstreckungs- und Tafelfertigungsprozess. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere rCF-Faserlänge vom Kardier- bis zum Tafelfertigungsprozess stetig abnimmt. Die Schädigung von rCF ist im Kardierprozess signifikant höher als im Verstreckungs- und Tafelfertigungsprozess. In den Prozessstufen von der Verstreckung bis zur Tafelfertigung ist der Grad der Faserschädigung gering. Dies ist auf die Wirkprinzipien der jeweiligen Mechanismen zurückzuführen. Die Kardier- und Scherwirkung ist die Hauptursache für Faserschädigungen.



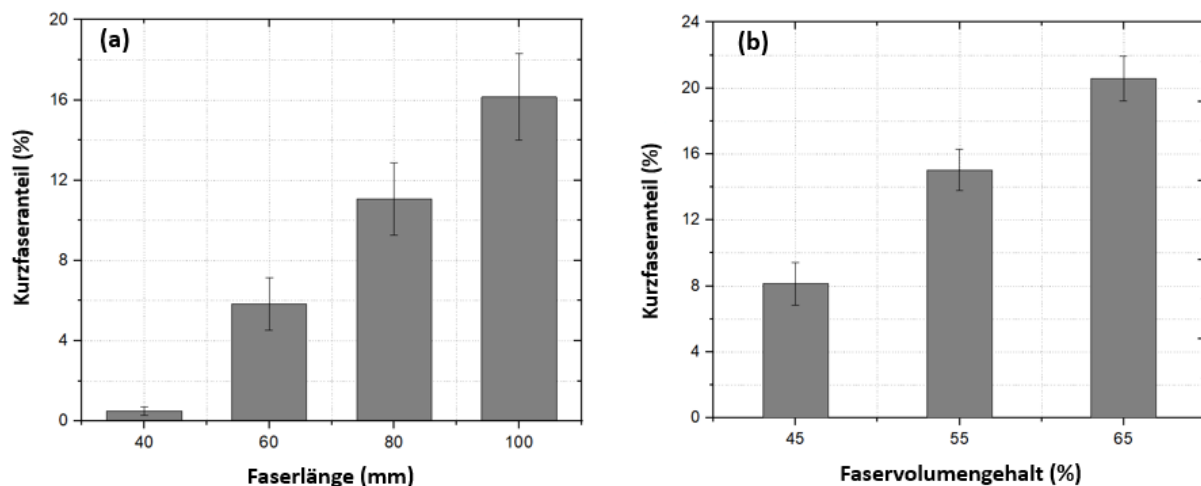
**Abb. 48:** Einfluss der Prozesskettenstufen auf die mittlere rCF-Länge (Variant: SB-rCF-I-40~100-45)

Aus Abb. 48 ist ersichtlich, dass 80 mm bis 100 mm lange Carbonfasern beim Kardierprozess stärker beschädigt werden als 40 mm bis 60 mm lange Carbonfasern. Dies kann auf den Knickkoeffizienten der Fasern zurückgeführt werden, der die Biegungstendenz der Fasern definiert [21]. Der Knickkoeffizient beschreibt die Biegungstendenz einer Faser und hängt von den Fasereigenschaften ab, z. B. Länge, Festigkeit, Modul und Feinheit. Bei konstantem Modul, Feinheit und Festigkeit haben 100 mm lange Carbonfasern einen 96-mal höheren Knickkoeffizienten im Vergleich zu 40 mm bis 60 mm langen Carbonfasern. Dies deutet darauf hin, dass längere Fasern eine viel höhere Tendenz zur Verschlingung um die Garnitur im Kardierprozess haben. Daher biegen sich 80 mm bis 100 mm lange Fasern während des Kardiervorgangs häufig, wodurch der Faserschadigungsgrad verstärkt wird.

Die Höhe des Kurzfaserteils in den Faserstrukturen hat großen Einfluss auf die Qualität der Faserstruktur und der darauf basierten Verbundwerkstoffe. Daher wurde der Anteil an kurzen Fasern in den Bändern bestimmt. Abb. 49 zeigt die Abhängigkeit des Anteils an kurzen Fasern (weniger als 12 mm) in einem Hybridfaserband von den Ausgangsfaserlängen und vom rCF-Volumengehalt. Aus der Abb. 49(a) ist deutlich zu erkennen, dass der Kurzfaserteil in den Faserbändern mit steigender Ausgangsfaserlänge signifikant von 0,25 % bei 40 mm auf 16 % bei 100 mm zunimmt. Die Hybridstreckbänder aus 80 mm und 100 mm langen rCF-Fasern weisen einen wesentlich höheren Kurzfaserteil als die Hybridstreckbänder aus 40 mm und 60 mm langen rCF-Fasern auf. Dies kann auf die Abhängigkeit der Knickkoeffizienten der Fasern von den Faserlängen zurückgeführt werden. Die weitere Analyse in Abb. 49(b) zeigt, dass der

Kurzfaseranteil auch von der Zusammensetzung des Hybridbandes abhängig ist. Je höher der Anteil an rCF-Fasern ist, desto größer ist die Faserschädigung im Hybridband und der damit einhergehende Kurzfaseranteil. Dies kann mit der Häufigkeit des Reibmechanismus zwischen den rCF und Garnituren begründet werden.

Durch den steigenden Kurzfaseranteil resultieren eine breite Faserlängenverteilung, ein unregelmäßiger Verzugsprozess und in Folge dessen eine ungleichmäßige Faserstruktur, eine inhomogene Durchmischung sowie eine niedrige Faserorientierung im Band. Dies wirkt sich in der Folge negativ auf die mechanischen Eigenschaften der Bänder, der stabilisierten UD-rCF-Tapes und schließlich der darauf basierenden Verbunde aus [22].



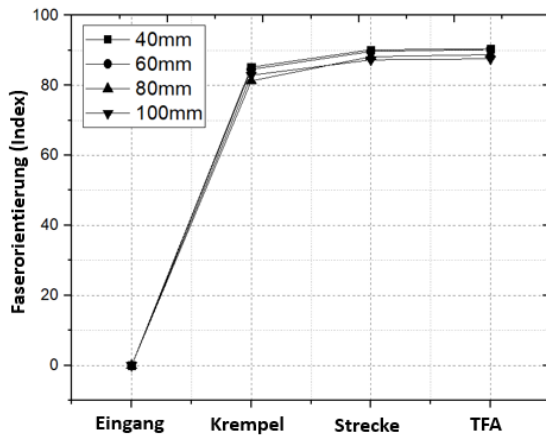
**Abb. 49:** Abhängigkeit des Anteils an kurzen Fasern in einem Hybridfaserband von den Ausgangsfaserlängen und vom rCF-Volumengehalt (Variant: SB-rCF-I-40~100-45; SB-rCF-I-80-45~65)

### 3.5.2 Faserorientierung in den Bändern und UD-rCF-Tapestrukturen

Die Faserorientierung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Faserstrukturen und der darauf basierenden Verbunde. Abb. 50 zeigt den Faserorientierungsindex nach dem Kardier-, Verstreckungs- und Tapefertigungsverfahren. Der Faserorientierungsindex bezieht sich auf den Anteil der längeren Fasern (> 12 mm), die in Materialflussrichtung ausgerichtet sind. Diese Größe wird auf der Grundlage des Gewichts gemessen und anstatt einer Winkelangabe als Index quantifiziert. Die Ergebnisse in Abb. 50 zeigen, dass der Orientierungsindex vom Kardierprozess bis zum Tapefertigungsverfahren stetig zunimmt. Der größte Faserorientierungsgrad von 92 % wurde im UD-rCF-Tape festgestellt. Die Faserorientierung im Band ist im Kardierprozess signifikant verbessert worden. Danach wurden die orientierten Fasern durch das Banddoublierverfahren ohne



Verformung zu einer Bandstruktur verarbeitet. Anschließend wurde diese Faserstruktur mit hoher Faserorientierung durch Konsolidierung in die rCF-Tapestruktur eingebettet.

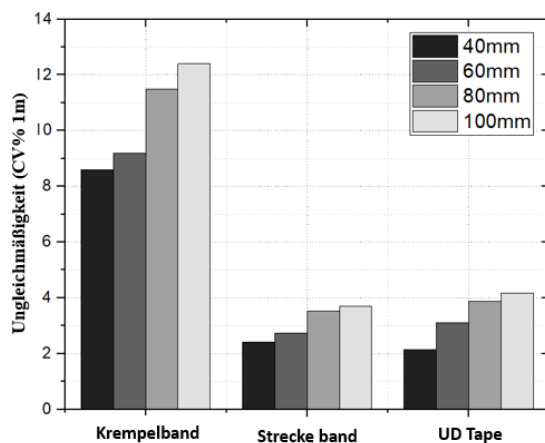


**Abb. 50:** Einfluss der Tafelfertigungsprozessstufen auf Faserorientierung in Abhängigkeit von den Ausgangsfaserlängen (Variant: SB-rCF-I-40~100-45)

### 3.5.3 Gleichmäßigkeit in den Bändern und rCF-Tapestrukturen

**Die Gleichmäßigkeit der Bänder gewährleistet die Reproduzierbarkeit des UD-rCF-Tapes.**

Abb. 51 zeigt die Ungleichmäßigkeit des Krempelbandes, des Streckenbandes und des rCF-Tapes in Abhängigkeit von den Ausgangsfaserlängen. Die Ungleichmäßigkeit des Bandes und rCF-Tapes steigt mit zunehmender Ausgangsfaserlänge. Die signifikante Reduzierung der Ungleichmäßigkeit des Streckenbandes gegenüber dem des Krempelbandes ist auf die Vergleichmäßigung des Bandes durch Doublierung und Verziehen von mehreren Bändern sowie auf das aktive Regulierungssystem an der Strecke zurückzuführen [37, 41].



**Abb. 51:** Ungleichmäßigkeit des Krempelbandes, des Streckenbandes und des rCF-Tapes in Abhängigkeit von den Ausgangsfaserlängen (Variant: rCF-I-40~100-45)

Die Hybridbänder bzw. Tapes aus 80 mm und 100 mm langen rCF-Fasern weisen eine höhere Massenschwankung als die Hybridbänder und Tapes aus 40 mm und 60 mm langen rCF-Fasern auf. Dies kann auf den höheren Anteil an Kurzfasern im Hybridband und Tapes bei Verwendung der längeren Fasern zurückgeführt werden. Die kurzen Fasern verhalten sich im Verzugsprozess wie schwimmende Fasern und erzeugen Verzugsstörungen. Infolgedessen resultiert eine höhere Ungleichmäßigkeit des Bandes und Tapes.

### 3.5.4 Eigenschaften von rCF-Tapestrukturen

#### 3.5.4.1 Flächenmasse

Die Flächenmasse von UD-rCF-Tapes wurde unter Verwendung des Schnitt- und Gewichtsverfahrens ermittelt. Dazu wurden fünf UD-rCF-Tapes-Proben in eine spezifische Dimension von 260 mm x 150 mm geschnitten. Anschließend wurde jede Probe gewogen und die Masse pro Quadratmeter ( $\text{g/m}^2$ ) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 28 zusammengefasst.

**Tab. 28:** Flächenmasse und Dicke des UD-rCF-Tapes

Tapestructure - Bezeichnung	Mittlere Flächenmasse [ $\text{g/m}^2$ ]	CV%
TS-rCF-I-40-45	104	2,07
TS-rCF-I-40-50	110	2,4
TS-rCF-I-60-45	98	3,7
TS-rCF-I-60-50	103	2,5
TS-rCF-I-60-55	109	3,7
TS-rCF-I-60-60	101	1,9
TS-rCF-I-60-65	98	3,8
TS-rCF-I-80-45	94	4,4
TS-rCF-I-80-50	86	4,0
TS-rCF-I-80-55	84	5,2
TS-rCF-I-80-60	88	4,4
TS-rCF-I-80-65	90	4,3
TS-rCF-I-100-45	86	4,6
TS-rCF-I-100-50	95	5,3
TS-rCF-I-100-55	102	3,8
TS-rCF-I-100-60	105	5,6
TS-rCF-I-100-65	101	4,7
TS-rCF-II-60-45	100	5,2
TS-rCF-III-65-45	110	4,5

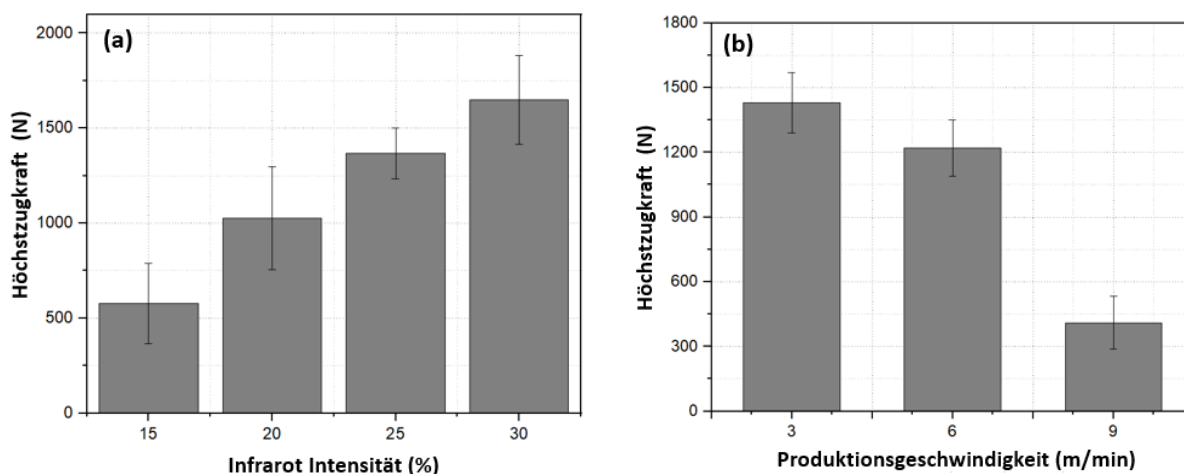
### 3.5.4.2 Kraft-Dehnungs-Verhaltens UD-rCF-TFS in Abhängigkeit von

Das Kraft-Dehnungsverhalten des UD-rCF-Tapes in Streifenzugversuchen wurde an der Universal-Zugprüfmaschine in Anlehnung an die DIN EN ISO 13934-1 geprüft. Dazu wurden streifenförmige Messproben mit Abmessungen 300x100 mm vorbereitet.

#### 3.5.4.2.1 Thermostabilisierungsgard

Durch das definierte Schmelzen der Polyamidfasern in der Hybridfaserstruktur wird dem rCF-Tape eine Strukturstabilität verliehen. Der Thermostabilisierungsgrad der Hybridfaserstruktur hängt maßgebend von der Intensität der Infrarotstrahlung und der Produktionsgeschwindigkeit ab. Aus der Abb. 52(a) wird ersichtlich, dass die Höchstzugkraft des UD-rCF-Tapes mit steigender Intensität der Infrarotstrahlung zunimmt und mit größer werdender Produktionsgeschwindigkeit reduziert wird. Die Höchstzugkraft des UD-rCF-Tapes steigt von 500 N auf 1850 N bzw. sinkt von 1400 N auf 400 N, wenn die IR-Intensität von 15 % auf 30 % bzw. die Produktionsgeschwindigkeit von 3 m/min auf 9 m/min erhöht werden (Abb. 52(b)).

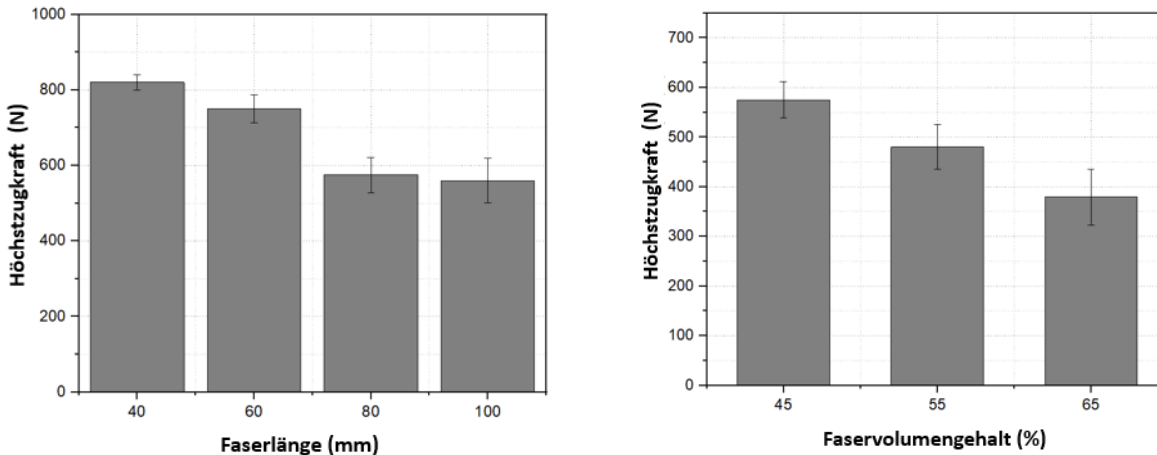
Durch Erhöhung der IR-Intensität bei konstanter Produktionsgeschwindigkeit werden mehr Polyamidfasern in der Tapestruktur angeschmolzen. Die dabei eingebrachten stoffschlüssigen Bindungen sind die Ursache für den Anstieg der Höchstzugkraft. Eine Verringerung der Produktionsgeschwindigkeit führt zu einer längeren Verweildauer der Faserstrukturen im Bereich des Thermostabilisierungsmoduls, sodass der Verfestigungsgrad der unidirektionalen Tapestruktur erhöht wird.



**Abb. 52:** Abhängigkeit der Höchstzugkraft von der Intensität der Infrarotstrahlung und der Produktionsgeschwindigkeit (Variante: TS-rCF-I-80-45)

### 3.5.4.2.2 rCF-Faserlänge und rCF-Faservolumenanteil

Die Abhängigkeit der Höchstzugkraft von rCF-Faserlängen und rCF-Faservolumenanteilen ist in Abb. 53 dargestellt.



**Abb. 53:** Abhängigkeit der Höchstzugkraft von rCF-Faserlängen und rCF-Faservolumenanteilen (Variant: TS-rCF-I-40~100-45; TS-rCF-I-80-45~65)

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Höchstzugkraft des UD-rCF-Tapes mit steigender rCF-Faserlänge und mit zunehmendem rCF-Faservolumenanteil abnimmt. Die Höchstzugkraft des UD-rCF-Tapes sinkt von 800 N auf 580 N bzw. sinkt von 570 N auf 370 N, wenn die rCF-Faserlänge von 40 mm auf 100 mm bzw. der rCF-Faservolumenanteil von 45 Vol. % auf 65 Vol. % erhöht werden, wie in Abb. 53 dargestellt. Dies ist auf den höheren Kurzfasernanteil beim Einsatz von längeren Fasern und der daraus resultierenden Ungleichmäßigkeiten der rCF-Tapestrukturen zurückzuführen. Der geringere rCF-Faservolumenanteil bzw. der höhere PA6-Faseranteil führt zur einer besseren Verfestigung der rCF-Tapestruktur durch Schmelzen des höheren Polyamidfaseranteils.

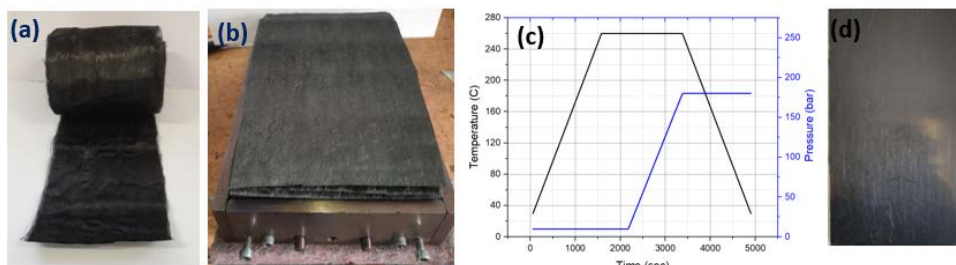
## 3.6 Fertigung und Charakterisierung von recycelten carbonfaserverstärkten FKV-Verbundprüfplatten

### 3.6.1 Fertigung von recycelten carbonfaserverstärkten FKV-Verbundprüfplatten

Basierend auf diesen UD-rCF-Tapes wurden Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) aus den verschiedenen UD-rCF-Typen (I, II, III) und mit variierender Faserlänge (40, 60, 80, 100 mm) und rCF-Volumengehalt (45 %, 55 %, 65 %) mit optimierten Konsolidierungsparametern (Druck, Zeit, Temperatur) hergestellt und charakterisiert.

Es wurden verschiedene Lagen von UD-rCF-Tape für eine definierte Verbundprüfplattendicke gestapelt und konsolidiert, wie in Abb. 54 dargestellt. Die Konsolidierung erfolgte bei 260 °C und

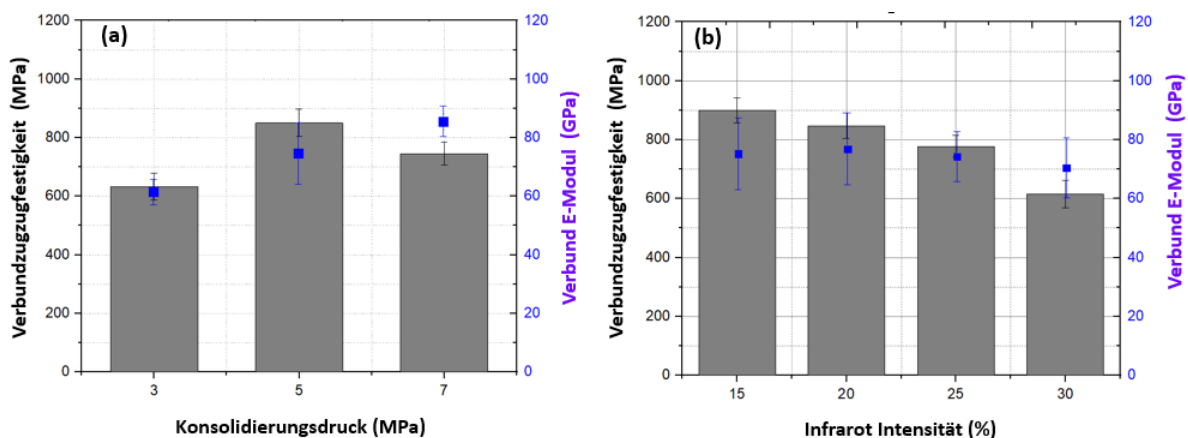
5,0 MPa Druck. Die Verbundplatten haben die Maße des eingesetzten Plattenwerkzeugs von 274x 180 mm<sup>2</sup>. Für die Durchführung der Verbundzugprüfung wurden Verbundplatten mit 1 mm Dicke in Anlehnung an DIN EN ISO 527-5/A/2 hergestellt. Daraus werden in Anlehnung an DIN EN ISO 527-5/A/2 die Verbundprüfkörper für den Zugversuch in 0°-Richtung mit 250 mm Länge, 25 mm Breite und 1 mm Dicke herausgearbeitet. Für die Durchführung der Verbundbiegeprüfung wurden ausgewählte Verbundplatten mit 2 mm Dicke in Anlehnung an DIN EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011 hergestellt. Die verwendeten Proben weisen Abmessungen von 80 mm × 15 mm × 2 mm auf. Der vollständige Prozessablauf des thermoplastischen Kunststoffverbunds ist in Abb. 54 (a-d) dargestellt.



**Abb. 54:** Fertigung von recycelten carbonfaserverstärkten FKV-Verbundprüfplatten: (a) UD Tape, (b) Stapelung, (c) Konsolidierungszyklus, (d) FKV-Verbundprüfplatten

### 3.6.2 Einfluss der Intensität der Infrarotstrahlung und des Konsolidierungsdruckes auf Verbundeigenschaften

Die Heizleistung der IR-Strahler hat Einfluss auf den Thermostabilisierungsgrad des UD-rCF-Tapes (siehe 3.5).



**Abb. 55:** Abhängigkeit der Verbundzugfestigkeit der UD-rCF-Tapes vom Konsolidierungsdruck und von der Intensität der Infrarotstrahlung (Variant: VS-rCF-I-80-50)

Die Auswirkung des bei unterschiedlicher Intensität der Infrarotstrahlung hergestellten UD-rCF-Tapes sowie des Konsolidierungsdrucks auf Verbundeigenschaften ist in Abb. 55 dargestellt. Die

Ergebnisse der Verbundzugprüfung zeigen, dass eine Erhöhung des Konsolidierungsdrucks von 3 MPa auf 7 MPa zur Steigerung des Verbund-E-Moduls von 62 GPa auf 86 GPa führt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verbundprüfkörper aus mehreren thermisch stabilisierten UD-rCF-Tapeschichten bestehen. Ein höherer Druck verbessert die Kohäsion zwischen den Schichten durch den größeren Kompaktierungsgrad der Fasern während der Konsolidierung und führt zu einem zunehmenden Verbund-E-Modul. Im Gegensatz dazu steigt die Verbundfestigkeit zuerst mit zunehmendem Konsolidierungsdruck von 3 MPa auf 5 MPa und sinkt dann mit weiterer Steigerung des Konsolidierungsdruckes von 5 MPa auf 7 MPa. Der optimale Konsolidierungsdruck für höchste Verbundfestigkeit liegt bei 5 MPa. Der Grund für die verbesserten Verbundeigenschaften mit steigendem Konsolidierungsdruck bis zu 5 MPa ist die zunehmende Kohäsion zwischen den Schichten durch den größeren Kompaktierungsgrad der Fasern. Bei weiterer Steigerung des Konsolidierungsdrucks bis zu 7 MPa weichen die Fasern aufgrund der Verzehung der Faserstruktur immer mehr von der Belastungsrichtung ab und wirken dadurch negativ auf die Verbundfestigkeit.

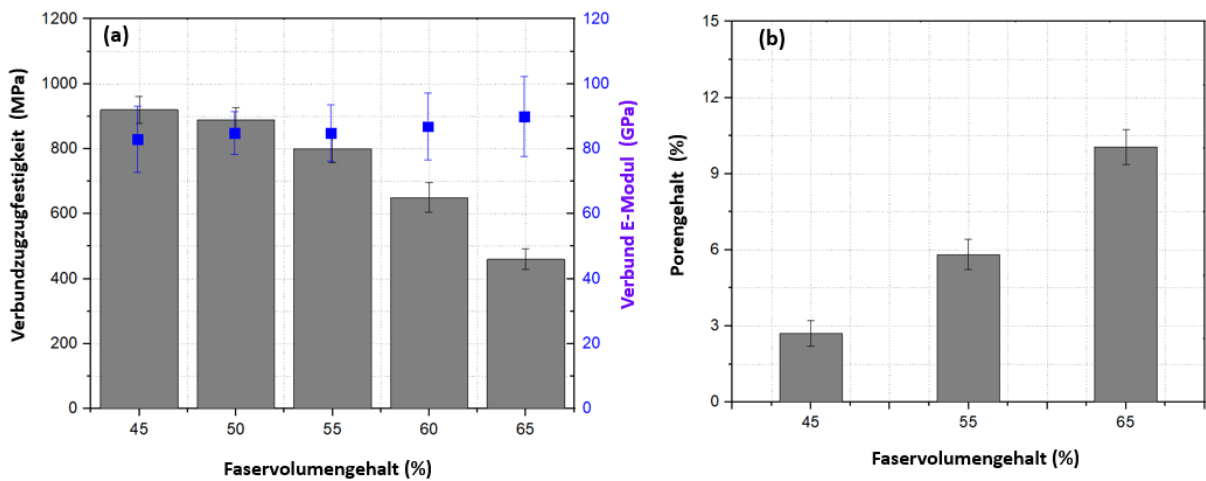
Die Zugfestigkeit eines Verbundes, die auf bei unterschiedlichen IR-Intensitäten hergestellten UD-rCF-Tapes basiert, verringert sich mit der steigenden Intensität der Infrarotstrahlung. Die Verbundzugfestigkeit sinkt von 900 MPa auf 650 MPa, wenn die IR-Intensität von 15 % auf 30 % erhöht wird. Durch eine höhere IR-Intensität bei konstantem Konsolidierungsdruck wird ein größerer Anteil der Polyamidfasern in der Tapestruktur aufgeschmolzen und eine ungleichmäßige Tapestruktur verursacht, sodass eine Reduzierung der Verbundfestigkeit resultiert.

Das Verbund-E-Modul bleibt mit steigender Heizleistung der IR-Strahler konstant. Das ist auf die unveränderten rCF-Strukturen und Anteile zurückzuführen.

### **3.6.3 Einfluss des Faservolumenanteils und der Faserlänge auf Verbundeigenschaften**

In der Abb. 56 sind die Zugeigenschaften der Verbunde in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil dargestellt. Die Verbundfestigkeit sinkt mit zunehmendem Faservolumenanteil, wohingegen das E-Modul geringfügig steigt. Die maximale Verbundfestigkeit von 920 MPa und das maximale E-Modul von 91 GPa wurden bei 45 Vol.% bzw. 65 Vol.% Faservolumenanteil erreicht. Dies kann auf verschiedene Strukturparameter wie Faserlänge, Kurzfaserteil, Faserorientierung und Massenvariation in der Faserstruktur zurückgeführt werden. Es wurde bereits festgestellt, dass die unidirektionalen rCF-Tapes, die mit einem Faservolumengehalt von 55 % bis 65 % hergestellt wurden, im Vergleich zu den Verbunden mit einem Faservolumengehalt von 45-50 % eine höhere

Faserschädigung, einen hohen Kurzfaserteil, eine geringere Faserorientierung und eine geringere Gleichmäßigkeit aufweisen.



**Abb. 56:** Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Faservolumenanteilen (Variant: VS-rCF-I-60-45~65)

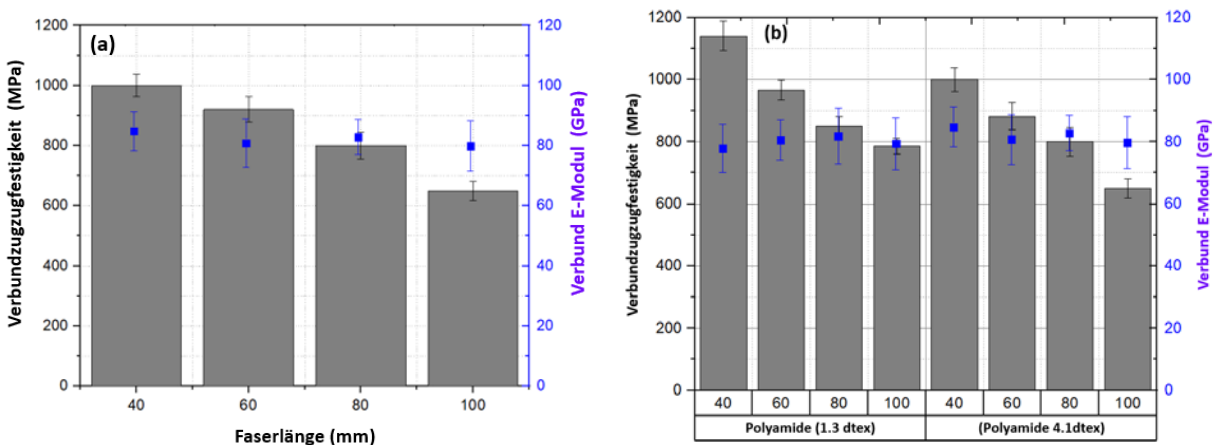
Die niedrige Zugfestigkeit der Verbundwerkstoffe mit 55-65 Vol.% rCF-Anteil ist auf den geringen Matrixanteil und die größere Menge von Lufteinschlüssen in Folge einer unzureichenden Imprägnierung der Verbundwerkstoffe durch längeren Fließwege des Matrixmaterials im Verbund zurückzuführen. Dies wird durch die Untersuchungsergebnisse der Porengröße in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt im Verbund in Abb. 56 bestätigt. Im Falle der Verbundprüfplatten mit 55 % und 65 % Faservolumengehalt nimmt der Porengehalt in der Verbundstruktur deutlich zu.

### 3.6.4 Einfluss der Faserlänge und des Durchmessers der Thermoplastfaser auf Verbundeigenschaften

Die Faserlänge hat einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Faserstrukturen und der darauf basierenden Verbundwerkstoffe. Abb. 57(a) zeigt die Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von der rCF-Länge. Die Verbundfestigkeit sinkt mit zunehmender rCF-Länge, wohingegen sich das E-Modul kaum ändert. Die maximale Verbundfestigkeit von 1000 MPa und das maximale E-Modul von 85 GPa wurden bei 40 mm rCF-Länge erreicht. Dies kann auf die verschiedenen Strukturparameter wie Faserschädigung, Kurzfaserteil, Faserorientierung und höheren Massenschwankungen in der Faserstruktur zurückgeführt werden. Es wurde bereits in Abschnitt 3.5 festgestellt, dass das unidirektionale rCF-Tape, das mit einer längeren Faser von 80 mm und 100 mm hergestellt wurden, im Vergleich zu denen mit einer

Faserlänge von 40 mm und 60 mm eine höhere Faserschädigung, einen hohen Kurzfaserteil, eine geringere Faserorientierung und eine geringere Gleichmäßigkeit aufweisen.

Um den Einfluss der PA6-Faserfeinheit auf die Verbundeigenschaften zu untersuchen, wurden Polyamidfasern mit 1,3 dtex und 4,1 dtex untersucht. Zudem wurden Fasern mit geringer Kräuselung verwendet, um ein UD-rCF-Tape mit homogener Durchmischung zu entwickeln. Es wurden thermoplastische Verbundkörper auf Basis der UD-rCF-Tapes hergestellt. Aus Abb. 57(b) ist ersichtlich, dass auf UD-rCF-Tapes aus feineren Polyamidfasern (1,3 dtex) basierten Verbundkörper bessere mechanische Eigenschaften aufweisen als vergleichbare Verbundkörper mit 4,1 dtex-Polyamidfasern. Dies kann mit der Anzahl der Matrixfasern korreliert werden, die pro Einheitsquerschnitt des Hybridbandes des UD-rCF-Tapes vorhanden sind. PA6-Fasern mit geringerem Faserdurchmesser sorgen für eine homogene Matrixverteilung und einen geringeren Porenanteil in den UD-rCF-Tapes und den darauf basierenden Verbunden. Darüber hinaus kann durch eine homogene Polyamidfaserverteilung das Verarbeitungsverhalten des Hybridmaterials, insbesondere beim Kardier- und Versterckungsprozess, verbessert und dadurch die Faserschädigung minimiert werden. Durch Einsatz von Matrixfasern mit geringer Kräuselung und Feinheit bei gleichbleibendem Verarbeitungsverhalten wurde die Voluminösität des UD-rCF-Tapes verringert, der Anteil von Lufteinschlüssen sowie trockenen Stellen im Verbundbauteil reduziert und damit höhere mechanischen Eigenschaften erzielt.

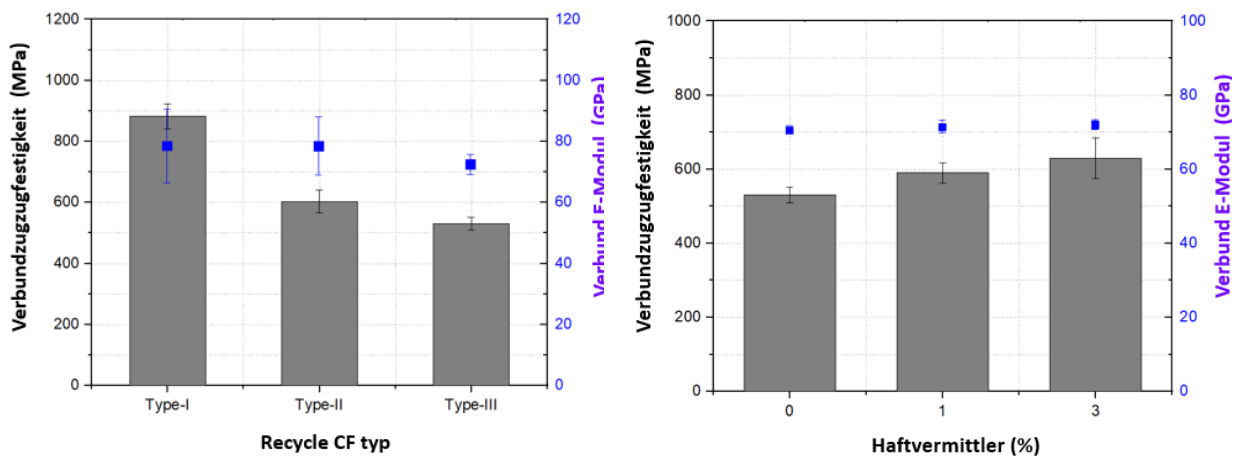


**Abb. 57:** Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Länge und des Durchmessers der Thermoplastfaser (Variant: VS-rCF-I-40~100-45)



### 3.6.5 Einfluss der rCF-Typen und des Haftvermittlers auf Verbundeigenschaften

Der Einfluss der rCF-Typen auf die Zugeigenschaften von thermoplastischen Verbundwerkstoffen ist in Abb. 58 dargestellt. Aus den Prüfergebnisse in Abb. 58(a) ist zu erkennen, dass die Verbundprüfkörper aus den Fasertyp rCF-I die höchsten Zugfestigkeiten im Vergleich zu den pyrolysierten rCF-II und III aufweisen. Dies kann auf die Schlichte der rCF zurückgeführt werden. Die in diesem Projekt verwendete rCF-I wurde mit 1 Masse- % thermoplastischem Schlichtemittel beschichtet und sorgt für höhere Haftung zwischen rCF-I und der PA 6-Matrix. Im Gegensatz dazu ist auf den Carbonfasern Typ-II- und Typ-III aufgrund der Pyrolysierung keine Schlichte mehr vorhanden. Daher ist die Lastübertragung von der Matrix auf die Verstärkungsfasern unter Zugbelastung von Typ II und III nicht ausreichend. Darüber hinaus entstehen bei der Verarbeitung von rCF-II und III höhere Kurzfasern im Tafefertigungsprozess als bei Typ-I aufgrund der fehlenden Schutzschlichte.



**Abb. 58:** Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von rCF-Typen und Haftvermittler (Variant: VS-rCF-I~III-60-45)

Aus diesem Grund wurden Haftvermittler von der Firma Michelman mit 1, 2 und 3 Masse-% auf die rCF-II und III in den hochorientierten UD-rCF-Tapes zur Verbesserung der Verbundfestigkeit aufgetragen. Basierend auf diesen UD-rCF-Tapes werden Verbundprüfplatten aus den verschiedenen UD-rCF-Tapes mit definiertem rCF-Volumengehalt von 45 % mit optimierten Konsolidierungsparametern (Druck, Zeit, Temperatur) hergestellt und charakterisiert. Beispielhaft sind die ermittelten Ergebnisse der Verbundeigenschaftenprüfungen der Verbundprüfkörper aus rCF-III in Abb. 58(b) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeit der thermoplastischen Verbundwerkstoffe, die mit höherem Massenanteil des Haftvermittlers behandelt wurden, gegenüber den Verbunden mit unbeschichteten rCF-III einen Zuwachs von

16 % aufweisen. Das E-Modul bleibt nahezu konstant. Dies kann mit der verbesserten Haftung zwischen Matrix und Verstärkungsfasern begründet werden. Die Ergebnisse der Zugs- und Biegeversuche von UD-rCF-Verbundwerkstoffen aus rCF-I, II und III mit einem Faservolumengehalt von 45-60 Masse% sind in Tab. 29 zusammengefasst.

**Tab. 29:** Mechanische Eigenschaften der aus den Tapes gefertigten Verbundproben in Richtung der Faserorientierung (0°-Richtung)

hergestellte Faserverbund Bezeichnung: Verbund- rCF-Typ-Länge-Vol.%	Originale Faserlänge (mm)	Zugeigenschaften		Biegeeigenschaften	
		E-Modul [GPa]	Festigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Festigkeit [MPa]
VS-rCF-I-40-45	40	77,4 ± 1,7	1150 ± 35,1	75 ± 8,3	628 ± 52,7
VS-rCF-I-40-50	40	75,1 ± 7,6	1130 ± 50,5	83 ± 7,9	642 ± 50,5
VS-rCF-I-60-45	60	78,3 ± 12,1	918 ± 41,1	68 ± 9,5	615 ± 42,1
VS-rCF-I-60-50	60	81,3 ± 3,5	882 ± 31,2	70 ± 6,9	686 ± 51,1
VS-rCF-I-60-55	60	82,1 ± 8,7	774 ± 42,6	59 ± 9,5	414 ± 58,3
VS-rCF-I-60-60	60	85,3 ± 15,7	613 ± 40,3	44 ± 6,9	315 ± 13,5
VS-rCF-I-60-65	60	86,3 ± 7,5	400 ± 31,9	46,8 ± 8,3	311 ± 27,9
VS-rCF-I-80-45	80	80,1 ± 9,9	890 ± 30,3	65 ± 7,5	649 ± 46,3
VS-rCF-I-80-50	80	82,8 ± 10,5	860 ± 47,3	75 ± 5,4	654 ± 35,6
VS-rCF-I-80-55	80	83,7 ± 5,1	506 ± 40,4	53 ± 4,7	405 ± 50,8
VS-rCF-I-80-60	80	84,6 ± 6,4	355 ± 28,5	24 ± 5,5	201 ± 47,5
VS-rCF-I-80-65	80	88 ± 5,6	250 ± 21,8	53,2 ± 9,7	150 ± 22,3
VS-rCF-I-100-45	100	74,2 ± 8,3	783 ± 24,6	64 ± 4,1	620 ± 20,8
VS-rCF-I-100-50	100	75,6 ± 4,1	625 ± 20,3	65 ± 3,6	506 ± 19,5
VS-rCF-I-100-55	100	76,1 ± 4,3	460 ± 34,8	51 ± 9,3	397 ± 40,4
VS-rCF-I-100-60	100	76,4 ± 3,4	340 ± 19,9	36 ± 3,7	230 ± 40,3
VS-rCF-I-100-65	100	80,4 ± 8,9	264 ± 26,4	30 ± 6,6	200 ± 40,7
VS-rCF-II-60-45	65	78,2 ± 9,5	604 ± 37,1	69 ± 1,3	626 ± 32,6
VS-rCF-III-65-45	60	70,2 ± 3,2	520 ± 21,5	60 ± 7,1	580 ± 18,1

### 3.7 Herstellung eines geometrisch komplexen CFK-Bauteil-Demonstrators aus den entwickelten rCF-Tapes durch Thermopressen (Neuhof/ITM) – AP 8

Auf Basis der in AP 6 hergestellten und als am besten bewerteten UD-rCF-Tape-Funktionsmuster und Konsolidierungsparameter erfolgte mit Unterstützung des Leichtbau-Zentrums Sachsen GmbH die Fertigung eines Demonstrators. Als Demonstrator wurde ein Fahrradsattel gefertigt (Abb. 59). Ein Fahrradsattel besteht aus einer hinteren Sitzfläche und der sogenannten Sattelnase. Für die Demonstratorfertigung wurde die Vorzugsvariante der UD-rCF-Tapes Funktionsmuster (45 Vol.% rCF-I) aufgrund der höheren mechanischen Eigenschaften verwendet.



**Abb. 59:** hergestellter Demonstrator aus entwickelten UD-rCF-Tapes

### 3.8 Ökonomisch/ökologische Bewertung bzw. Bilanzierung (Neuhof/ITM) – AP 9

Anhand des entwickelten Herstellungsprozesses wurde anschließend aus der gesamten Prozesskette (Abb. 60) eine ökonomische Analyse zur Wirtschaftlichkeit des entwickelten Tapes erstellt. Darin wurden Materialkosten (MK), Herstellungskosten (HK), Produktivität (Prod), Fertigungszeit (FZ), Maschinenstundensätze (KMh), Lohnkosten (LK), Maschinenkosten pro Jahr (KMJ), Maschinennutzung in Stunden pro Jahr (MNh/a), Abschreibungskosten (KA), Zinskosten (KZ), Instandhaltungs- und Wartungskosten (IWK), Energiekosten (EK), Maschinenanschaffungskosten (AHK) und Maschinenmodifikationskosten (MD) sowie Kohlenstoffemission und CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt.



**Abb. 60:** Prozesskette der industriellen Herstellung von neuartigen, ökologischen und ökonomischen UD-rCF-Tapes

Für die Berechnung wurden folgende Daten ermittelt (Tab. 30). Als Basismaschinen sind die Spezialkrepelmanlage der Fa. Dilo, die Hochleistungsregulierstrecke RSB-D40 der Fa. Rieter und der Versuchsstand zur Herstellung von UD-rCF-Tapes basierend auf der Regulierstrecke RSB-D 50 der Fa. Rieter angesetzt. Die für die Berechnung relevanten Maschinenparameter resultieren aus Angaben der industriellen Unternehmen sowie aus den bei Spinnerei Neuhof und am ITM ermittelten Versuchsdaten. Es werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Produktion mit 60 % Auslastung unter Berücksichtigung der Unterbrechung bei der Verarbeitung von rCF
- 4000 h/Jahr (entspricht Zweischichtbetrieb an 250 Tagen)
- 8 Stunden Arbeitszeit pro Schicht
- 10 Jahre Nutzungsdauer der Maschinen

**Tab. 30:** Herstellungskosten der UD-rCF-Tapes

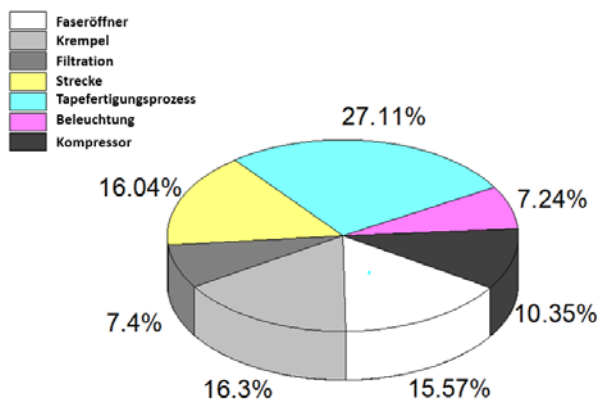
Prozess	Tapefertigungstechnologie	Jahr	2021
Ort	ITM, TU Dresden, Germany		
Investitionskosten			
Maschinenanschaffungskosten (AHK)	Krempel	€Maschine	700.000
	Strecke	€Maschine	60.000
	Tapefertigungsprozess (TFA)	€Maschine	100.000
Instandhaltungs- und Wartungskosten (IWK)	15% des Maschinenanschaffungskosten		
Herstellungskosten			
Materialkosten (MK)	rCF (Type-I)	€/kg	3,0
	rCF (Type-II und III)	€/kg	3,0
	Polyamide-6	€/kg	3,5
Energiekosten (EK)	Kosten pro Kilowattstunde	€/KWh	0,17
	Spezifischer Stromverbrauch	kWh/kg	4,01
Personalkosten (PK)	Lohnkosten	€/Std.	35,0
	Spezifische Arbeitskraft	Arbeitskraft/kg	0,6
	Arbeitstage pro Jahr	Tage	250
	Arbeitsschichten	--	8×3
Sonstige Gemeinkosten (GK)	Verwaltungskosten	15 % Kosten (MK + EK + PK)	
	Verpackungskosten		
	Vermarktungskosten		
	Transportkosten		
	Zinskosten (KZ)		
	Forschungs- und Entwicklungskosten		
Herstellungskosten (HK)			
MK + EK + PK + GK	UD Tape (Type-I-III, 45% V <sub>f</sub> )	€/kg	9,38
EK + PK + GK	UD Tape (Type-I-III, 45% V <sub>f</sub> )	€/kg	5,61

Unter Berücksichtigung der Materialkosten resultieren Herstellkosten für UD-rCF-Tapes von 4,40 €/kg. Die Herstellkosten für Organobleche aus Primärcarbonfilamentgarnen betragen ca. 25 €/kg. In Anbetracht der Kosten und der erreichten Zugfestigkeit der Verbunde aus UD-rCF-TFS von ca. 1150 MPa und aus Primärcarbonfilamentgarnen von ca. 1500 MPa ergeben sich jeweils ein Festigkeit-Kosten-Quotient von 120 MPa/€ und 60 MPa/€. Damit wurde ein um 100 % höheres

Festigkeits-Kosten-Verhältnis mit den hier im Projekt entwickelten UD-rCF-Tapes basierten Verbunden erreicht. Die dafür notwendigen Investitionskosten für die Maschinenmodifikationen betragen insgesamt 45.000 € In der Gesamtheit der technisch/technologischen Ergebnisse sowie der wirtschaftlichen Analyse wurde damit erstmals ein nachhaltiges Recyclingkonzept bereitgestellt, das eine hohe Marktdurchdringung der UD-rCF-Tapes erwarten lässt.

Um die Auswirkungen der Tapeferfertigungstechnologie auf die Ökologie der Erde (z. B. spezifischer Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen) zu untersuchen, wurde der Energieverbrauch der gesamten Tapeferfertigungsprozesskette, beginnend von der Faseraufbereitung, über den Kardier- und Verstreckungsprozess bis zum Tapeferfertigungsprozess, erfasst. Die Ergebnisse sind in Abb. 61 zusammengefasst. Der spezifische Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der unidirektionalen Tapeferfertigungsprozesskette liegen bei 4,01 kWh/kg bzw. 1,51 kg CO<sub>2</sub>/kg. Der prozentuale Energieverbrauch dieser Tape-, Krempelband-, Streckenbandherstellungsprozesse sowie Faservoröffnungs- und -vormischungsprozess beträgt jeweils 27,11 %, 16,3 %, 16,04 % und 15,57 %.

Eine vergleichende Analyse des spezifischen Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen von der unidirektionalen Tapeferfertigungsprozesskette mit der bestehenden rCF-Vliesstoffherstellungsprozesskette (Trocken- und Nassvliesstoffherstellung sowie Faserausrichtung ist in Tab. 31 zusammengestellt. Die Analyse zeigt, dass der spezifische Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Technologien zur Herstellung von rCF-Tapes und rCF-Nassvliesstoffe auf einem Niveau liegen. Dagegen sind der spezifische Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung von rCF-Trochenvliesstoffen und ausgerichteten Vliesstoffen deutlich höher.



**Abb. 61:** Energieverbrauchverteilung bei der Tapeferfertigungstechnologie

**Tab. 31:** Vergleichen des Spezifischer Energieverbrauch und der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Prozess	Spezifischer Energieverbrauch (kWh/kg)	Spezifische Co <sub>2</sub> -Emissionen (kg Co <sub>2</sub> eq./kg)
Primärcarbonfaser [3, 23]	198	79,39
Spritzguss [24]	0,6-2,2	0,24- 0,87
Tapefertigungsprozess [24]	4,01	1,51
Vliesstoff (trocken) [25]	5,6-6,8	2,24-2,72
Vliesstoff (nass) [24]	3,9	1,56

Die ökologische und ökonomische Bewertung kommt zu dem Schluss, dass die Verbundwerkstoffe aus UD-rCF-Tapes mit höchster Wirtschaftlichkeit, Ressourcen- und Leistungseffizienz hergestellt und für die Leichtbau- und Elektromobilitätindustrie eingesetzt werden können. Darüber hinaus bietet diese Bewertung auch eine Grundlage für die Kommerzialisierung und Machbarkeit von unidirektionalen rCF-Tapes im industriellen Maßstab. Damit stellt die entwickelte Technologie zur Herstellung von rCF-Tapes eine nachhaltige, umweltfreundliche und wirtschaftlich tragfähige Lösung im Vergleich zu den bestehenden Herstellungstechnologien dar. Dadurch ergeben sich für deutsche Unternehmen große wettbewerbliche Chancen. Das wirtschaftliche Risiko für Die Spinnerei Neuhof GmbH & Co. KG stellt insbesondere die Akzeptanz der völlig neuen CFK-Produkte aus recycelten Carbonfasern und die reproduzierbaren Produkteigenschaften dar.

#### 4. Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge

Die Liste der bisherigen Vorträge und Veröffentlichungen ist nachfolgend aufgeführt.

1. Khurshid M.F., Hasan M. M. B., Abdkader A. and Cherif C. Processing of waste carbon and polyamide fibers for high-performance thermoplastic composites: A novel technology for the manufacturing of unidirectional tapes structure (Under Review). Journal of Industrial Textile, (eingereicht und akzeptiert)
2. Khurshid M.F., Hasan M. M. B., Hoebel S., Abdkader A. and Cherif C. Uni-Directional tape structure consisting of recycled carbon fibre and polyamide 6 fibres for high performance thermoplastic composites (2021). In: 20th World textile conference Autex (2021), Guimarães, Portugal, pp.205–206, ID 130
3. Khurshid, M. F., Hengstermann, M., Badrul Hasan, M. M., Abdkader, A., & Cherif, C. Recent developments in the processing of waste carbon fiber for thermoplastic composites – A review. Journal of Composite Materials, 2020; 54(14): 1925-1944

4. Khurshid M.F., Abdkader A and Cherif C. Processing of waste carbon and polyamide fibres for high performance thermoplastic composites: Influence of carding parameters on fibre orientation, fibre length and sliver cohesion force. *Journal of the Textile Institute*. 2020; 111(9) : 1277-1187
5. Khurshid M.F., Abdkader A and Cherif C. (2020). Processing of waste carbon and polyamide fibers for high performance thermoplastic composites: Modifications to the auto leveling system to enhance the quality of hybrid drawn sliver. *Journal of Industrial Textile*. <https://doi.org/10.1177/1528083720913530> (Online)
6. Khurshid MF, Abdkader A and Cherif C. Process development for Uni-Directional tape structure based on recycled carbon fibre and thermoplastic fibres for fibre-reinforced plastics. In: 19th World textile conference on textiles at the crossroads. 2019, Ghent, Belgium, pp.1–6 (5A1\_0483) (<https://ojs.ugent.be/autex/article/view/11656>)
7. Khurshid, M. F., Abdkader, A., Hasan, MMB Cherif, Ch: Uni-Directional tape structure consisting of recycled carbon fibre and polyamide 6 fibres for high performance thermoplastic composites. In: Renewable sources for advanced fibres and materials, Autex Conference, Guimarães, Portugal, September 6-9, 2021
8. Khurshid, M. F., Abdkader, A., Cherif, Ch.: An innovative tape structure for the development of recycle carbon fibre reinforced thermoplastics. In: Digital Conference in the context of the master's degree program in textile and clothing technology, Alumni Conference, Dresden, July 2-3, 2021
9. Khurshid, M. F., Abdkader, A., Hasan, MMB Cherif, Ch.: Novel tape structures based on recycle carbon and polyamide fibers for high performance fiber reinforced plastics, In: 4th European industry and Research exchange on technical textile, Future techniques and challenges for Recycling, Frankfurt, 11-12 March, 2021.
10. Abdkader, A., Khurshid, M. F., Sauer, P., Cherif, Ch.: Entwicklung einer industriellen Prozesskette zur Herstellung von nachhaltigen UD-Tapes aus recycelten Carbon stapel Fasern und Thermoplast fasern für die kostengünstigen Ressourcen effiziente Massenfertigung von Verbundbauteilen, In: Aufbereitung und Verwertung Carbon faserhaltiger Abfälle Fachaustausch, Dessau-Roßlau, Deutschland, 20 September, 2019
11. Khurshid, M. F., Abdkader, A., Cherif, Ch.: Process Development for Uni Directional tape structure based on recycled carbon and thermoplastic fibres for fibre-reinforced plastics. In:

Recycling, Life cycle analysis, sustainability and circularity, Autex Conference, Ghent, June 11-15, 2019

12. Khurshid, M. F., Abdkader, A., Cherif, Ch., :Development of an Industrial Process Line for the Production of UD tapes based on recycled carbon staple fibers (rCF) and thermoplastic fibers’’  
In: Towards Sustainability Forum, Techtexil, Frankfurt, May 14-17, 2019

## **5. Fazit/Ausblick**

Im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens (AZ-33809/01) wurde die gesamte Prozesskette der industriellen Herstellung von neuartigen, ökologischen und ökonomischen UD-rCF-Tapes entwickelt. Diese umfasst die Faseraufbereitung, den Krempelprozess zur Krempelbandbildung, den Streckprozess zur Streckenbandbildung sowie die abschließende Fertigung des UD-rCF-Tapes aus rCF und Thermoplastfasern in einer modifizierten Hochleistungsstrecke.

Anhand des entwickelten, neuartigen Herstellungsprozesses wird aus der gesamten Prozesskette eine ökonomische Analyse zur Wirtschaftlichkeit des entwickelten Tapes erstellt. Parallel erfolgt eine ökologische Bewertung der hergestellten rCF-Tapes. Durch die Prozessentwicklung wird zum einen eine hohe ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit der Produktion von Carbonfaser-Halbzeugen, zum anderen eine hohe Ressourceneffizienz durch exzellente Verbundeigenschaften erreicht.

Damit diese entwickelte Technologie zur Umsetzung der rCF-Tapes in breitem Spektrum in die Industrie transferiert werden kann, soll im nächsten Schritt auf Basis der erprobten Pilottapefertigungsanlage in Zusammenarbeit mit Textilmaschinenbauern eine Serienanlage realisiert werden.

## **6. Danksagung**

Wir bedanken uns bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes AZ-33809/01.



## 7. Literatur

- [1] M. Sauer, "Composites Market Report 2019 - The global CF- and CC-Market 2019 - Market Developments, Trends, Outlook and Challenges," Composites United e.V., Germany 2020.
- [2] M. F. Khurshid, M. Hengstermann, Mir Mohammad Badrul Hasan, A. Abdkader, and C. Cherif, "Recent developments in the processing of waste carbon fibre for thermoplastic composites – A review," *Journal of Composite Materials*, vol. 54, no. 14, pp. 1925-1944, 2020.
- [3] M. M. B. Hasan, S. Nitsche, A. Abdkader, and C. Cherif, "Carbon fibre reinforced thermoplastic composites developed from innovative hybrid yarn structures consisting of staple carbon fibres and polyamide 6 fibres," *Composites Science and Technology*, vol. 167, pp. 379-387, 2018.
- [4] J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang, and C.-H. Wang, "Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling," *Composites Part B: Engineering*, vol. 193, 2020.
- [5] E. Pakdel, S. Kashi, R. Varley, and X. Wang, "Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 166, 2021.
- [6] Y. F. Khalil, "Comparative environmental and human health evaluations of thermolysis and solvolysis recycling technologies of carbon fiber reinforced polymer waste," *Waste Management*, vol. March 2018, no. xxx, p. xxx, 2018.
- [7] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, The Council of the European Union, 1999.
- [8] S. Karuppanan Gopalraj and T. Kärki, "A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 3, 2020.
- [9] S.-S. Yao, F. L. Jin, K. Y. Rhee, D. Hui, and S.-J. Park, "Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 142, pp. 241-250, 2018.
- [10] Darli Rodrigues Vieira, R. K. Vieira, and M. C. Chain, "Strategy and management for the recycling of carbon fiber reinforced polymers CFRPs in the aircraft industry a critical review," *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, vol. 24, no. 3, pp. 214-223, 2017.

- [11] S.R. Naqvi, H. Mysore Prabhakar, E.A. Bramer, W. Dierkesa, R. Akkerman, G. Brem, "A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 36, pp. 118–129, 2018
- [12] F. Meng, J. McKechnie, and S. J. Pickering, "An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 109, pp. 207-220, 2018.
- [13] M. Holmes, "High volume composites for the automotive challenge," *Reinforced Plastics*, vol. 61, no. 5, pp. 294-298, 2017.
- [14] S. P. Muhammad Pervaiz, Birat K, Mohini Sain, Jimi Tjong,, "Emerging trends in automotive lightweighting through novel composite materials," *Materials Sciences and Applications*, vol. 7, pp. 26-38, 2016.
- [15] H. Mainka et al., "Lignin – an alternative precursor for sustainable and cost-effective automotive carbon fiber," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 283-296, 2015.
- [16] Muhammad Furqan Khurshid, A. Abdkader, and C. Cherif, "Processing of waste carbon and polyamide fibres for high performance thermoplastic composites: Influence of carding parameters on fibre orientation, fibre length and sliver cohesion force " *Journal of the Textile Institute*, vol. 111, no. 9, pp. 1277–1287, 2020.
- [17] W. Klein, "The Rieter Manual of Spinning " in *The Rieter Manual of Spinning vol. Volume 3 – Spinning Preparation* Klosterstrasse, Germany: Rieter Machine Works Ltd., 2016.
- [18] M. F. Khurshid, M. Hillerbrand, A. Abdkader, and C. Cherif, "Processing of waste carbon and polyamide fibers for high-performance thermoplastic composites: Modifications to the auto-leveling system to enhance the quality of hybrid drawn sliver," *Journal of Industrial Textiles*, 2020.
- [19] Rieter, "Technical manual of RSB D 40 draw frame," ed. Germany: Rieter AG.
- [20] A. Farooq, "Development of Prediction Systems Using Artificial Neural Networks for Intelligent Spinning Machines," Doctor of Phillosophy, Mechanical Engineering, Technischen Universit“at Dresden, 2010.
- [21] C. A. Lawrence, *Fundamentals of spun yarn technology*. Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC PRESS, 2003.

- [22] V. K. KOTHARI and A. DAS, "The role of fiber friction in staple fiber processing," in Friction in Textile Materials, B. S. Gupta, Ed.: Woodhead Publishing, 2008.
- [23] Pimenta S. and P. S. T., "Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook," Waste Management, vol. 31, no. 2, pp. 378-92, Feb 2011.
- [24] F. Meng, "Environmental and cost analysis of carbon fibre composites recycling," PhD, University of Nottingham, 2017.
- [25] Gustav Sandin, Sandra Roos, Björn Spak, and B. Zamani, "Environmental assessment of Swedish clothing consumption - six garments, sustainable futures," RISE AB and Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2019.