

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XXII
Abkürzungen	XXVII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Wissenschaftliche Zielstellung der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen Textiltechnologie	5
2.1 Carbonfaser	5
2.1.1 Struktur von Carbonfasern	5
2.1.2 Herstellung von PAN-basierten Carbonfasern	5
2.1.3 Eigenschaften und Einteilung von Carbonfasern	7
2.1.4 Gesundheitsaspekt bei der Verarbeitung von Carbonfasern und CFK	9
2.2 Rückgewinnung und Wiederverwertung von Carbonfasern	9
2.2.1 Vernetzte, ausgehärtete Carbonabfälle und End-of-Life-Bauteile	10
2.2.2 Trockene Carbonfaserabfälle	13
2.3 Herstellung trockengelegter Vliesstoffe	14
2.3.1 Faservorbereitung und Faseröffnung	14
2.3.2 Krempelprozess	15
2.3.3 Airlayprozess	20
2.3.4 Vliesverfestigung	22
2.4 Faserorientierung in der Vliesstoffherstellung	24
2.4.1 Isotrope Vlies- und Vliesstoffstrukturen	25
2.4.2 Anisotrope Vlies- und Vliesstoffstrukturen	26
2.4.3 Faserorientierung im Legeverfahren	28
2.4.4 Faserorientierung im Verfestigungsverfahren	29
2.5 Beschreibung und Bewertung der Faserorientierung von Vliesstoffen	31
2.5.1 MD/CD-Verhältnis zur Beschreibung der Faserorientierung	31
2.5.2 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Beschreibung der Faserorientierung	31
2.6 Besonderheiten bei der Vliesstoffherstellung aus recycelten Carbonfasern	31
2.6.1 Besonderheiten der Ausgangsmaterialien	31
2.6.2 Besonderheiten bei der Prozessführung und Anlagentechnik	32
2.7 Textile Strukturen auf Basis recycelter Carbonfasern	33
3 Grundlagen Faserkunststoffverbunde	36
3.1 Faser-Matrix-Grenzfläche	36
3.1.1 Oberflächenaktivierung und Faserschichten bei Carbonfasern	36
3.1.2 Schichten bei recycelten Carbonfasern	36

IX

3.2	Einflussgrößen faserverstärkter Kunststoffverbunde	37
3.2.1	Faser-Matrix-Grenzfläche im Faserkunststoffverbund	37
3.2.2	Faserlänge im Faserkunststoffverbund	37
3.2.3	Faserorientierung im Faserkunststoffverbund	38
3.2.4	Faservolumengehalt im Faserkunststoffverbund	38
3.3	Faserverstärkte Kunststoffverbunde auf Basis von rCF-Halbzeugen	39
3.3.1	Thermoplastische FKV auf Basis trockengelegter rCF-Halbzeuge	39
3.3.2	Duroplastische FKV auf Basis trockengelegter rCF-Halbzeuge	40
4	Methoden zur statistischen Auswertung und Bewertung der Faserorientierung	41
4.1	Theoretische Verteilungen	41
4.1.1	Gleichverteilung zur Beurteilung der Faserorientierung isotroper Vliesstoffe	41
4.1.2	Normalverteilung zur Beurteilung der Faserorientierung anisotroper Vliesstoffe	42
4.2	Beurteilung der Faserorientierung anisotroper Faserflore	43
4.3	Beurteilung der Faserorientierung anisotroper, gelegter Faserflore und Vliesstoffe	44
4.4	Rahmenbedingungen und Bewertung der Methode zur Beurteilung der Faserorientierung anisotroper Faserflore und Vliesstoffe	45
4.5	Beurteilung der Faserorientierung isotroper Vliese und Vliesstoffe	46
4.6	Signifikanztests	46
4.7	Effektstärkenmaße	47
4.7.1	Mittelwertsdifferenz - Cohens d	47
4.7.2	Korrelationskoeffizient - r	47
4.7.3	Kontingenzkoeffizient - CramersV	47
5	Planung und Durchführung	48
5.1	Vorgehensweise	48
5.1.1	Auswahl trockener rCF	49
5.1.2	Vorgehensweise bei anisotropen rCF-Vliesstoffen	49
5.1.3	Vorgehensweise bei isotropen rCF-Vliesstoffen	50
5.1.4	Vorgehensweise bei der Vernadelung	51
5.1.5	Probenbezeichnung	51
5.2	Versuchsaufbau	52
5.2.1	Faservorbereitung und Faseröffnung von rCF	52
5.2.2	Herstellung trockengelegter rCF-Vliesstoffe	53
5.2.3	Imprägnierung im Nasspressverfahren	54
5.3	Prüfverfahren für rCF und deren Faserkunststoffverbunde	54
5.3.1	Methoden zur Charakterisierung trockener rCF	54
5.3.2	Charakterisierung der Faserorientierung trockengelegter rCF-Vliesstoffe	56
5.3.3	Zugfestigkeit, Flächenmasse und Dicke trockengelegter rCF-Vliesstoffe	57
5.3.4	Charakterisierung von Faserkunststoffverbunden auf Basis trockengelegter rCF-Vliesstoffe	57
5.4	Ausgangsmaterialien	59
5.4.1	Trockene Carbonfaserabfälle	59
5.4.2	Gekräuselte Fasern als Vergleichs- und Mischkomponente	59
5.4.3	Harzsystem und Härter	60

6 Charakterisierung trockener rCF	61
6.1 Ermittlung der Referenzproben für die mechanische Charakterisierung	61
6.1.1 Überprüfung der Herstellerangaben der Referenzprobe HT-Faser	61
6.1.2 Überprüfung der Herstellerangaben der Referenzprobe IM-Faser	62
6.1.3 Bewertung beider Referenzproben	63
6.2 Charakterisierung der Spulenreste	63
6.2.1 Mechanische Charakterisierung der Spulenreste	63
6.2.2 Optische Charakterisierung der Spulenreste	64
6.2.3 Verteilung der Filamentbündellänge der Spulenreste	65
6.2.4 Bewertung der Spulenreste	67
6.3 Charakterisierung der Absaugreste	67
6.3.1 Mechanische Charakterisierung der Absaugreste	68
6.3.2 Optische Charakterisierung der Absaugreste	71
6.3.3 Verteilung der Filamentbündellänge der Absaugreste	71
6.3.4 Bewertung der Absaugreste	73
6.4 Charakterisierung der Randverschnittreste	73
6.4.1 Mechanische Charakterisierung der Randverschnittreste	73
6.4.2 Optische Charakterisierung der Randverschnittreste	74
6.4.3 Verteilung der Filamentbündellänge der Randverschnittreste	75
6.4.4 Bewertung der Randverschnittreste	76
6.5 Charakterisierung der Cutterschnittreste	77
6.5.1 Mechanische Charakterisierung der Cutterschnittreste	77
6.5.2 Verteilung der Filamentbündellänge der Cutterschnittreste	78
6.5.3 Bewertung der Cutterschnittreste	80
6.6 Charakterisierung der Pyrolysefasern	80
6.6.1 Mechanische Charakterisierung der Pyrolysefasern	80
6.6.2 Optische Charakterisierung der Pyrolysefasern	82
6.6.3 Verteilung der Filamentbündellänge der Pyrolysefasern	83
6.6.4 Bewertung der Pyrolysefasern	85
6.7 Verarbeitung von rCF-Vliesstoffabfällen	86
6.7.1 Mechanische Charakterisierung der Vliesstoffabfälle	86
6.7.2 Verteilung der Filamentbündellänge bei der Verarbeitung von Vlies- stoffabfällen	88
6.7.3 Bewertung der Vliesstoffabfälle	90
6.8 Zusammenfassung und Fazit zu trockenen Carbonfaserabfällen	91
7 Herstellung und Charakterisierung trockengelegter rCF-Vliesstoffe	93
7.1 Filamentbündellänge und Faserverlust im Krempelprozess	93
7.1.1 Filamentbündel- und Filamentlänge im Krempelprozess	93
7.1.2 Faserverlust und Filamentlänge in der Absaugung im Krempelprozess	95
7.1.3 Fazit zur Filamentbündellänge und zum Faserverlust im Krempelprozess	97
7.2 Faserorientierung bei der Vliesbildung und Legung anisotroper rCF-Vliese . .	97
7.2.1 Faserorientierung im Faserflor nach dem Krempelprozess	98
7.2.2 Faserorientierung durch den Legeprozess	104
7.2.3 Fazit zur Faserorientierung durch Vliesbildung und Legung	105
7.3 Faserorientierung durch die Verfestigung mittels Vernadelung anisotroper rCF- Vliese	105
7.3.1 Bestimmung der Faserorientierung anisotroper rCF-Vliesstoffe mittels Wahrscheinlichkeitsdichte	108
7.3.2 MD/CD-Verhältnisse anisotroper rCF-Vliesstoffe	119

7.3.3	Ermittlung der höchsten Faserorientierung anisotroper rCF-Vliesstoffe	125
7.3.4	Fazit zur Faserorientierung durch die Vernadelung	126
7.4	Physikalische Eigenschaften anisotroper rCF-Vliesstoffe	127
7.4.1	Flächenmasse anisotroper rCF-Vliesstoffe	127
7.4.2	Dicke anisotroper rCF-Vliesstoffe	129
7.4.3	Zugfestigkeit anisotroper rCF-Vliesstoffe	131
7.4.4	Fazit zu den physikalischen Eigenschaften von anisotropen rCF-Vliesstoffen	137
7.5	Vergleich der Faserorientierungen von trockengelegten anisotropen und isotropen rCF-Vliesstoffen	137
7.5.1	Faserorientierung von anisotropen und isotropen rCF-Vliesstoffen aus Absaugresten	138
7.5.2	Faserorientierung von anisotropen und isotropen rCF-Vliesstoffen aus Randverschnittresten	141
7.5.3	Faserorientierung von anisotropen und isotropen rCF-Vliesstoffen aus rCF-Vliesstoffabfällen	143
7.5.4	Fazit zu anisotropen und isotropen rCF-Vliesstoffstrukturen	145
7.6	Zusammenfassung und Fazit zu trockengelegten rCF-Vliesstoffen	146
8	Duromere Faserkunststoffverbunde auf Basis trockengelegter rCF-Vliesstoffe	148
8.1	Theoretischer und tatsächlicher Faservolumengehalt	148
8.2	Zugversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen	149
8.2.1	Zugversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Spulenresten	149
8.2.2	Zugversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Absaugresten	151
8.2.3	Zugversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Randverschnittresten	153
8.2.4	Zugversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Pyrolysefasern	154
8.2.5	Zugversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus rCF-Vliesstoffabfällen	156
8.2.6	Fazit zu Zugversuchen an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen	157
8.3	Biegeversuch an Faserkunststoffverbunden	158
8.3.1	Biegeversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Spulenresten	158
8.3.2	Biegeversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Absaugresten	160
8.3.3	Biegeversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Randverschnittresten	161
8.3.4	Biegeversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Pyrolysefasern	162
8.3.5	Biegeversuch an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus rCF-Vliesstoffabfällen	164
8.3.6	Fazit zu Biegeversuchen an Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen	166

8.4	MD/CD-Verhältnisse und Faserorientierung anisotroper und isotroper Faserkunststoffverbunde	166
8.4.1	MD/CD-Verhältnisse von Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Spulenresten	166
8.4.2	MD/CD-Verhältnisse von Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Absaugresten	167
8.4.3	MD/CD-Verhältnisse von Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Randverschnittresten	168
8.4.4	MD/CD-Verhältnisse von Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus Pyrolysefasern	169
8.4.5	MD/CD-Verhältnisse von Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen aus rCF-Vliesstoffabfällen	170
8.4.6	Vergleich MD/CD-Verhältnisse anisotroper Vliesstoffe und Faserkunststoffverbunde	172
8.4.7	Fazit MD/CD-Verhältnisse anisotroper Faserkunststoffverbunde auf Basis von rCF-Vliesstoffen	173
8.5	Faserorientierung ausgewählter Faserkunststoffverbunde aus rCF-Vliesstoffen	173
8.5.1	Faserorientierung ausgewählter isotroper Faserkunststoffverbunde aus rCF-Vliesstoffen	174
8.5.2	Faserorientierung anisotroper Faserkunststoffverbunde aus rCFVliesstoffen mit den höchsten mechanischen Kennwerten	176
8.5.3	Fazit zur Faserorientierung ausgewählter anisotroper Faserkunststoffverbunde	179
8.6	Optische Charakterisierung anisotroper Faserkunststoffverbunde	179
8.6.1	Optische Charakterisierung eines anisotropen Faserkunststoffverbundes aus rCF-Vliesstoffabfällen	179
8.6.2	Optische Charakterisierung der Faserkunststoffverbunde aus Pyrolysefasern	181
8.7	Zusammenfassung und Fazit zu Faserkunststoffverbunden auf Basis von rCF-Vliesstoffen	184
9	Technologiepotenzial	185
9.1	Herstellung von rCF-Vliesstoffen in der Industrie	185
9.1.1	Flächenmasse, Dicke und Zugfestigkeit industrieller rCF-Vliesstoffe	185
9.1.2	Faserorientierung von industriellen rCF-Vliesstoffen	186
9.1.3	MD/CD-Verhältnisse von industriellen rCF-Vliesstoffen	187
9.2	Faserkunststoffverbunde auf Basis von industriellen rCF-Vliesstoffen	188
9.2.1	Mechanische Kennwerte der anisotropen Faserkunststoffverbunde auf Basis von industriellen rCF-Vliesstoffen	189
9.2.2	MD/CD-Verhältnis anisotroper Faserkunststoffverbunde auf Basis von industriellen rCF-Vliesstoffen	190
9.2.3	Optische Charakterisierung anisotroper Faserkunststoffverbunde auf Basis von industriellen rCF-Vliesstoffen	191
9.3	Weiterverarbeitung von rCF-Vliesstoffen in der Industrie	192
9.3.1	Mechanische Kennwerte der industriell gefertigten Faserkunststoffverbunde auf Basis von anisotropen rCF-Vliesstoffen	193
9.3.2	MD/CD-Verhältnisse der anisotropen industriell gefertigten Faserkunststoffverbunde auf Basis von anisotropen rCF-Vliesstoffen	194
9.3.3	Praxisbeispiel in der Anwendung	195
9.4	Einordnung der mechanischen Kennwerte der Faserkunststoffverbunde	196

9.5 Einordnung der Faserorientierung der relevanten Faserkunststoffverbunde	196
9.6 Kostenbetrachtung	197
10 Gesamtfazit und Ausblick	199
10.1 Gesamtfazit	199
10.2 Ausblick	199
A Anhang	218
A.1 Anhang zu Kapitel 4	218
A.1.1 Shapiro-Wilk-Test	218
A.1.2 Quantil-Quantil-Plots bzw. Wahrscheinlichkeitsplot	218
A.1.3 Kolmogoroff-Smirnoff-Anpassungstest	219
A.1.4 Chi-Quadrat-Anpassungstest	219
A.2 Anhang zu Kapitel 5	220
A.3 Anhang zu Kapitel 6	220
A.3.1 Signifikanznachweis zu Kapitel 6.1	220
A.3.2 Signifikanznachweis zu Kapitel 6.2	221
A.3.3 Signifikanznachweis zu Kapitel 6.3	221
A.3.4 Signifikanznachweis zu Kapitel 6.4	226
A.3.5 Signifikanznachweis zu Kapitel 6.5	227
A.3.6 Signifikanznachweis zu Kapitel 6.6	230
A.4 Anhang Kapitel 7	232
A.4.1 Signifikanznachweis zu Kapitel 7.3	232
A.4.2 Signifikanznachweis zu Kapitel 7.4	233
A.4.3 Signifikanznachweis zu Kapitel 7.5	236
A.5 Anhang zu Kapitel 8	237
A.5.1 Signifikanznachweis zu Kapitel 8.1	237
A.5.2 Signifikanznachweis zu Kapitel 8.2	238
A.5.3 Signifikanznachweis zu Kapitel 8.3	246
A.5.4 Signifikanznachweis zu Kapitel 8.4	254
A.6 Anhang zu Kapitel 9	256
A.6.1 Signifikanznachweis zu Kapitel 9.2.1	256
A.6.2 Signifikanznachweis zu Kapitel 9.2.2	259
A.6.3 Signifikanznachweis zu Kapitel 9.3.1	260
A.6.4 Signifikanznachweis zu Kapitel 9.3.2	264
B Veröffentlichungen im Rahmen dieser Dissertation	266