

Georg Stegschuster

Analyse des Kardierverfahrens zur Herstellung von Carbonfaservliesstoff als Verstärkungstextil für Faserverbundwerkstoffe

Analyse des Kardierverfahrens zur Herstellung von Carbonfaservliesstoff als Verstärkungstextil für Faserverbundwerkstoffe

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Augsburg

vorgelegt von
Georg Andreas Reinhold Stegschuster

Augsburg, 2021



Erstgutachter:
Zweitgutachter:

Prof. em. Dr. Siegfried Horn
Univ.-Prof. Professor h. c. (MGU)
Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries
Prof. Dr. Andreas Rathgeber

Vorsitzender der mündlichen Prüfung:

Tag der mündlichen Prüfung:

11.03.2021

Berichte aus der Textiltechnik

Georg Stegschuster

**Analyse des Kardierverfahrens zur Herstellung von
Carbonfaservliesstoff als Verstärkungstextil
für Faserverbundwerkstoffe**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Augsburg, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7999-9

ISSN 1430-0559

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Diese Arbeit beinhaltet Ergebnisse aus studentischen Forschungsarbeiten, die unter der Betreuung des Autors entstanden sind. Die Arbeiten und deren Autoren sind im Literaturverzeichnis unter Kapitel 11 aufgeführt.

Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden ausschließlich die männliche Form für Personenbezeichnungen verwendet. Unabhängig davon beziehen sich die Angaben immer auf alle Geschlechter.

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH, Augsburg. Während der Zeit von 2016 bis 2020 durfte ich mit besonderen Menschen zusammenarbeiten, die zur Entstehung der Dissertation einen maßgeblichen Beitrag leisteten.

Allen voran möchte ich meiner Frau, Elisabeth Stegschuster, danken, die für mich während der Promotionszeit durch ihre Liebe der Fels in der Brandung war und stets ist. Vielen Dank für die intensiven Gespräche und Diskussionen rund um die Dissertation und meine Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie das unermüdliche Korrekturlesen der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Prof. em. Dr. Siegfried Horn für die Unterstützung und Betreuung der Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries danke ich vielmals für die Übernahme des Koreferats. Des Weiteren bedanke ich mich außerordentlich bei Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlichter dafür, dass er mir die Rahmenbedingungen für die Durchführung dieser Arbeit geschaffen hat. Sie standen mir stets mit Rat und Tat zur Seite und sind für mich als Führungskraft und privat ein Vorbild.

Teile der Ergebnisse dieser Arbeit stammen aus dem Projekt *Carbonfaser Recyclingwerkstoffe für industrielle Anwendungen* (Förderkennzeichen NW-1707-0017), das vom bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie gefördert wurde. Ich danke dem Fördergeber und dem Koordinator, Frank Manis, sowie den Projektpartner für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

An dieser Stelle will ich mich auch bei der Firma Dilo Machines GmbH, Eberbach und persönlich bei Herrn Johann Philipp Dilo für das außerordentlich großzügige Bereitstellen einer Kompakt-Vliesstofflinie sowie den fortwährenden technischen und finanziellen Support bedanken.

Meinen Kollegen am ITA und Fraunhofer IGCV bin ich dankbar für ihre Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen sowie die vielen lustigen Momente im und außerhalb des Büros. Wer außerdem in dieser Liste nicht fehlen darf, sind meine Studentinnen und Studenten. Ihr habt durch Eure Abschlussarbeiten und die anregenden Diskussionen einen erheblichen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet und dafür danke ich Euch außerordentlich.

Vielen Dank möchte ich auch an meine Eltern richten. Ihr unterstützt mich seit jeher, welchen Weg ich auch einschlage. Auf Euch kann ich immer zählen. Meinem Vater gilt zudem ein extra Dank für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Danke sage ich an dieser Stelle auch meinen Schwiegereltern für ihre rege Teilnahme an diesem Projekt. Zuletzt gilt mein Dank all meinen Freunden, die mich in dieser Zeit unterstützt und auch immer wieder auf andere Gedanken bringen konnten.

Danke vielmals

Georg Stegschuster

Kurzfassung

In dieser Arbeit erfolgt eine Prozessanalyse des Kardierverfahrens bei der Carbonfaserverarbeitung. Der Anlageneinfluss wird auf der Vliesstoffebene und der Verbundebene validiert. Darüber hinaus erfolgt die Entwicklung einer Prüfgeometrie zur Messung richtungsabhängiger mechanischer Eigenschaften.

Als zentrale Qualitätsmerkmale für die Carbonfaservliesstoffe dienen die Faserlänge und die Faserausrichtung. Die Untersuchung der Vliesstoffverarbeitung zeigt, dass durch die Vliesbildung und die Vernadelung in Abhängigkeit von dem Fasertyp, der Fasermischung, dem Anlagen-Setup sowie den Anlageneinstellungen die Carbonfasern zwischen 5 % bis 49 % im Vergleich zur Ausgangslänge eingekürzt werden. Aus den Ergebnissen werden Empfehlungen für Design und Einstellungen carbonfaserverarbeitender Vliesstofflinien abgeleitet.

Auf Basis gewichtsbezogener Faserlängenmessungen gelingt die Definition der Faservereinzlung als Maß für die Öffnungswirkung der Krempel. Dies bildet die Grundlage für eine Optimierung der Faseröffnung in weiterführenden Arbeiten.

In der Prozessanalyse werden über 30 qualitätsrelevante Einflussgrößen identifiziert. Mit Hilfe von Experten werden neun Einflussgrößen für eine detaillierte Untersuchung auf Verbundebene ausgewählt. Zwei typische Carbonfasertypen – Verschnittreste und pyrolysierte Fasern – sowie eine Mischungen mit Thermoplastfasern werden dafür zunächst zu Vliesstoff und anschließend zu Verbundwerkstoffen verarbeitet. Die Validierung erfolgt anhand definierter Qualitätsmerkmale und die Ergebnisse dienen der Ableitung von Modellen der Einflussgrößen. Die Modelle hängen vom verarbeiteten Fasermaterial ab, sodass allgemeine Aussagen über die Faktoren unzulässig sind. Im Zuge der Analyse entsteht eine Methodik, mit der eine effiziente Bestimmung von Modellen der Einflussgrößen bei geringstmöglichem Versuchsaufwand möglich ist.

Ein Oktagon-Prüfkörper wird entwickelt, der eine einfache qualitative Möglichkeit zur Ermittlung der richtungsabhängigen Steifigkeitswerte von Faserverbundwerkstoffen bietet. Eine analytische Lösung zur exakten Bestimmung der Steifigkeit auf Basis des allgemeinen Biegebalkens zeigt keine ausreichende Übereinstimmung mit experimentellen Daten. Mit Hilfe der allgemeinen Ellipsenformel mit Hauptachsentransformation gelingt jedoch die Bestimmung der Hauptfaserausrichtung für Composites bis auf wenige Grad genau.

Summary

The focus of this thesis is the analysis of the carding process with carbon fibres. The influences are validated on the nonwoven and the composite level. Furthermore, the development of a test geometry for the measurement of direction dependent mechanical properties is carried out.

Fibre length and fibre orientation are used as central quality characteristics for the carbon fibre nonwovens. The investigation of the nonwoven processing shows that the nonwoven formation and needling – depending on the barrel type, the fibre mixture, the plant setup and the plant settings – result in a reduction of the carbon fibre length between 5 % and 49 % compared to the initial length. Recommendations for the design and settings of carbon fibre processing nonwoven lines are derived from the results.

On the basis of weight-related fibre length measurements the fibre separation is defined as a measure for the opening effect of the carding machine. This forms the basis for optimizing the opening line in further scientific research.

The process analysis lists over 30 quality-relevant influencing variables. With the help of experts, nine influencing variables are selected for a detailed investigation at the composite level. Two typical carbon fibre types – cuttings and pyrolyzed fibres – as well as blends with thermoplastic fibres are therefore processed into nonwovens and then into composites. The validation is carried out on the basis of defined quality characteristics and the results are used to derive models of the influencing variables. The models depend on the processed fibre material, so that general statements about the factors are not permissible. In the course of the analysis, a methodology is developed which enables an efficient determination of models of the influencing variables with the lowest possible experimental effort.

An octagon test specimen is developed which offers an easy qualitative way to determine the direction-dependent stiffness values of fibre composites. An analytical solution for the exact determination of the stiffness based on the general bending beam does not show sufficient agreement with experimental data. However, with the help of the general ellipse formula with principal axis transformation, the determination of the principal fibre orientation for composites is accurate to a few degrees.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielsetzung	6
2	Vliesstoffherstellung mit recycelten Carbonfasern	10
2.1	Aufbereitung und Verarbeitung von Carbonfasern	10
2.1.1	Aufbereitungsverfahren für Carbonfasern	12
2.1.2	Anforderungen der recycelten Carbonfasern an die Weiterverarbeitung mit Vliesstoffverfahren	15
2.1.2.1	Anforderungen aufgrund der Faserbeschaffenheit	16
2.1.2.2	Anforderungen aufgrund der Materialeigenschaften	17
2.2	Verfahren zur Vliesstoffherstellung für Carbonfasern	18
2.2.1	Trockene Verfahren	19
2.2.1.1	Faservorbereitung	20
2.2.1.2	Prinzip der Faseröffnung	20
2.2.1.3	Garnituren	21
2.2.1.4	Vliesstoffherstellung mit dem Kardierverfahren	22
2.2.1.5	Vliesstoffherstellung mit aerodynamischen Verfahren	30
2.2.1.6	Einsatz von Fasermischungen mit Carbonfasern	32
2.2.2	Nassverfahren	35
2.3	Abgrenzung der Vliesstoffverfahren für die Verarbeitung von Carbonfasern	36
2.4	Zusammenfassung und Fazit	37
3	Carbonfaservliesstoffe in Verbundwerkstoffen	38
3.1	Anforderungen an den Einsatz von Vliesstoffen in Composites	38
3.1.1	Faserlänge	38
3.1.2	Faserausrichtung	39
3.1.3	Faservolumengehalt	41
3.2	Weiterverarbeitung von Carbonfaservliesstoffen zu Faserverbundkunststoffen	42
3.2.1	Duromere Verarbeitungsverfahren	43
3.2.2	Thermoplastische Verarbeitungsverfahren	44
3.3	Prüftechnik für Vliesstoffe aus recycelten Carbonfasern	45
3.3.1	Faserlängenmessung	45
3.3.2	Orientierungsmessung	46
3.4	Bewertung des Forschungsstandes und Identifikation der Defizite	50
4	Prozessanalyse des Kardierverfahrens	52
4.1	Umgebung	55
4.2	Material	55

4.3	Faservorbereitung	56
4.4	Vliesbildung	57
4.5	Prinzip des Kreuzlegens	59
4.6	Prinzip der Vernadelung	60
4.7	Zusammenfassung der Einflussgrößen	60
5	Untersuchung der Vliesstoffverarbeitung	62
5.1	Einflüsse auf die Carbonfaserlänge	62
5.1.1	Einfluss der Vliesbildung	63
5.1.1.1	Verschnittcarbonfasern	64
5.1.1.2	Verschnittcarbonfasern in Mischung mit Thermoplastfasern	67
5.1.1.3	Pyrolierte Carbonfasern in Mischung mit Thermoplastfasern	70
5.1.1.4	Zwischenfazit zum Einfluss der Vliesbildung auf die Carbonfaserlänge	72
5.1.2	Einfluss der Maschineneinstellungen der Krempel	74
5.1.2.1	Einfluss des Florgewichts	75
5.1.2.2	Einfluss der Arbeiter- und Wendergeschwindigkeit	76
5.1.2.3	Zwischenfazit zum Einfluss der Maschineneinstellungen	78
5.1.3	Einfluss thermoplastischer Fasern bei der Vliesbildung	79
5.1.3.1	Einfluss der Fasereigenschaften der Thermoplastfaser	80
5.1.3.2	Einfluss des thermoplastischen Faseranteils	84
5.1.3.3	Zwischenfazit zum Einfluss thermoplastischer Fasern	85
5.1.4	Einfluss der Anlagenkonfiguration	85
5.1.4.1	Einfluss der Faservorbereitung	86
5.1.4.2	Einfluss der Anzahl aktiver Kardierstellen	87
5.1.4.3	Zwischenfazit zum Einfluss der Anlagenkonfiguration	88
5.1.5	Einfluss der Vernadelung	89
5.1.5.1	Einfluss des Nadeltyps	89
5.1.5.2	Einfluss der Vernadelungsparameter	92
5.1.5.3	Zwischenfazit zum Einfluss der Vernadelung	99
5.1.6	Fazit zu den Einflüssen auf die Carbonfaserlänge	100
5.2	Faserausrichtung der Carbonfasern im Vliesstoff	103
5.2.1	Optisches Verfahren	103
5.2.2	Mechanisches Verfahren	104
5.2.3	Vergleich der optischen Messung mit mechanischen Kennwerten der carbonfaserverstärkten Kunststoffe	108
5.2.4	Vergleich der Höchstzugkraftmessung mit mechanischen Kennwerten der carbonfaserverstärkten Kunststoffe	108

5.2.5	Fazit zur Faserausrichtung der Carbonfasern im Vliesstoff	109
5.3	Einflüsse der Vliesstoffanlage	109
5.3.1	Massenbilanz in der Vliesstoffherstellung	110
5.3.2	Öffnungsverhalten von Carbonfasern in der Krempel	112
5.3.3	Entmischungseffekte in der Krempel	119
5.3.4	Einfluss des Legewinkels auf die Faserausrichtung	122
5.3.5	Fazit zu den Einflüssen der Vliesstoffanlage	124
5.4	Einfluss des Abnahmesystems	125
5.4.1	Häufigkeitsverteilung der Erscheinungsformen	128
5.4.2	Anteil der Fehler an der Flormasse	131
5.4.3	Fazit zum Einfluss des Abnahmesystems	132
5.5	Abschließendes Fazit zur Vliesstoffverarbeitung	133
6	Einfluss der Prozessparameter auf Vliesstoff- und Verbundwerkstoffeigenschaften	138
6.1	Methodik der Untersuchung	138
6.2	Bewertung der Faktoren	139
6.3	Bewertung und Auswahl statistischer Versuchspläne	141
6.3.1	Teilfaktorieller Versuchsplan	142
6.3.2	Übersättigter Versuchsplan	143
6.3.3	Plackett-Burman-Design	143
6.3.4	Bewertung und Auswahl	144
6.3.5	Zwischenfazit	144
6.4	Definition des Versuchsraums	144
6.4.1	Definition der Faktoren	145
6.4.1.1	Bestimmung der Faktorstufen	146
6.4.1.2	Faktorstufen der drei Fasermischungen	149
6.4.2	Qualitätskriterien und deren Messung	151
6.4.2.1	Gleichmäßigkeit des Flächengewichts	151
6.4.2.2	Gleichmäßigkeit der Faserverteilung	151
6.4.2.3	Biegesteifigkeit	152
6.4.2.4	Ausrichtung der Carbonfasern	153
6.4.3	Versuchsraum	153
6.4.3.1	Verwendete Materialien	153
6.4.3.2	Herstellung der vliesstoffverstärkten Verbundwerkstoffe	157
6.5	Darstellung der Ergebnisse	159
6.5.1	Ergebnisse der Verarbeitung von Verschnittcarbonfasern	159
6.5.1.1	Variationskoeffizient des Flächengewichts	159
6.5.1.2	Mechanische Steifigkeit und Festigkeit	161
6.5.1.3	Orientierung	162

6.5.2	Ergebnisse der Verarbeitung pyrolisierter Carbonfasern	163
6.5.2.1	Variationskoeffizient des Flächengewichts	163
6.5.2.2	Mechanische Steifigkeit und Festigkeit	165
6.5.2.3	Orientierung	166
6.5.3	Ergebnisse der Verarbeitung von Carbon-Thermoplast-Fasermischungen	167
6.5.3.1	Variationskoeffizient des Flächengewichts	167
6.5.3.2	Carbonfasermassenanteil und Faservolumengehalt	169
6.5.3.3	Mechanische Steifigkeit und Festigkeit	170
6.5.3.4	Orientierung	171
6.5.4	Zusammenfassung der Darstellung der Ergebnisse	172
6.6	Hypothesen zum Einfluss der ausgewählten Faktoren	173
6.6.1	Öffnungszyklen	173
6.6.2	Florgewicht	174
6.6.3	Tambour-Arbeiter-Abstand	175
6.6.4	Walzengeschwindigkeiten	176
6.6.4.1	Tambourgeschwindigkeit	176
6.6.4.2	Arbeitergeschwindigkeit	177
6.6.4.3	Wendergeschwindigkeit	178
6.6.5	Profiling – Verzug des CV1-Systems	179
6.6.6	Einstichdichte	180
6.6.7	Verzug der Nadelmaschine	181
6.6.8	Zwischenfazit zu den Hypothesen der Faktoren	182
6.7	Auswertung und Interpretation der Faktoren	183
6.7.1	Auswertung und Interpretation für Verschnittcarbonfasern	185
6.7.1.1	Variationskoeffizient des Flächengewichts	186
6.7.1.2	Mechanische Festigkeit und Steifigkeit	188
6.7.1.3	Faserausrichtung der Carbonfasern	198
6.7.1.4	Fazit zur Verarbeitung von Verschnittcarbonfasern	204
6.7.2	Auswertung und Interpretation für pyrolisierte Carbonfasern	207
6.7.2.1	Variationskoeffizient des Flächengewichts	208
6.7.2.2	Mechanische Festigkeit und Steifigkeit	211
6.7.2.3	Orientierung	219
6.7.2.4	Fazit zur Verarbeitung von pyrolisierten Carbonfasern	224
6.7.3	Auswertung und Interpretation für die Verarbeitung einer Carbon-Thermoplast-Fasermischung	227
6.7.3.1	Variationskoeffizient des Flächengewichts	228
6.7.3.2	Gleichmäßigkeit der Faserverteilung im Vliesstoff	230
6.7.3.3	Gleichmäßigkeit der Faserverteilung im Verbund	234
6.7.3.4	Mechanische Festigkeit und Steifigkeit	237
6.7.3.5	Orientierung	247

6.7.3.6	Fazit zur Verarbeitung der Mischung aus pyroli- sierten Carbonfasern und Polyamid6-Fasern	252
6.8	Abschließendes Fazit zu den Einflüssen der Prozessparameter auf Vliesstoff- und Verbundwerkstoffeigenschaften	257
7	Technische Aspekte und Potenziale	261
7.1	Vergleich und Potenziale auf Vliesstoffebene	261
7.2	Vergleich und Potenziale auf Composite-Ebene	264
7.3	Fazit	268
8	Entwicklung einer Prüfgeometrie zur Messung richtungsabhängiger Eigenschaften	269
8.1	Analytische Berechnung des Oktagon-Prüfkörpers	271
8.2	Untersuchung der Oktagon-Prüfmethode	276
8.2.1	Koeffizient K	278
8.2.2	Einfluss der Mehrfachbelastung des Oktagon-Probekörpers	279
8.2.3	Orientierungsmessung mit dem Oktagon-Prüfkörper	280
8.3	Fazit der Untersuchung einer Prüfgeometrie zur Messung richtungsabhängiger Eigenschaften	284
9	Zusammenfassung	286
10	Ausblick	291
11	Literaturverzeichnis	293
12	Abkürzungsverzeichnis	308
13	Anhang	310
13.1	Signifikanzbetrachtung	310
13.2	Berechnungen zu Verhältnissen in der Kreppe	316
13.3	Details zu den mechanischen Prüfverfahren	325