



**Entwicklung einer Prozesskette
zur Herstellung nachhaltiger
eigenverstärkter Faserverbundkunststoffe**

Thomas Michael Köhler

**„Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung
nachhaltiger eigenverstärkter Faserverbundkunststoffe“**

**„Development of a Production Process for
Sustainable Self-Reinforced Polymer Composites“**

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Thomas Michael Köhler

Berichter: Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing Gunnar Seide

Tag der mündlichen Prüfung: 30.04.2021

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

Univ. Prof. Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

Thomas Michael Köhler

**Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung
nachhaltiger eigenverstärkter Faserverbundkunststoffe**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-8164-0

ISSN 1618-8152

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

Teile dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen der von mir betreuten studentischen Arbeiten. Eine bibliographische Auflistung befindet sich am Ende des Literaturverzeichnisses.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University entstanden. An dieser Stelle möchte ich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater, Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries, für das Vertrauen, die technischen Möglichkeiten am Institut und die fachliche Unterstützung bedanken. Bei Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Gunnar Seide möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats und die begleitenden Ratschläge bedanken. Herrn Univ.-Prof. Georg Jacobs danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Dank möchte ich auch meinen Kollegen am Institut aussprechen, die mich bei den Versuchen sowie mit Ratschlägen unterstützt haben. Speziell bedanken möchte ich mich bei den Kollegen Klaus Vonberg, Robert Brüll, Richard Haas, Dominik Granich, Alexander Janßen und Max Schwab. Auch den Technikern, Laborantinnen und Laboranten bin ich für jede Unterstützung dankbar die mir entgegengebracht wurde. An dieser Stelle möchte ich mich zudem ganz herzlich bei den Studentinnen und Studenten bedanken, die mich im Rahmen der Recherchen, Versuche und Aufarbeitung der Ergebnisse unterstützt haben.

Auch beim Bio4Self-Projektteam möchte ich mich für die Ratschläge bedanken. Mein besonderer Dank gilt Hans Knudsen vom dänischen Partner Comfil ApS, Gjern, Michael Schweizer und Erna Muks von der Tecnaro GmbH, Ilsfeld, Kevin Moser vom Fraunhofer ICT, Pfinzatl und Fabian Langensiepen vom AMIBM, Maastricht.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken. Bei meinen Eltern möchte ich für die Chance bedanken, die ich erhalten habe. Ihr seid und werdet mir immer ein Vorbild sein. Meinem Bruder sage ich Danke für die tollen Auszeiten in den Schweizer Bergen. Meiner Freundin Janina danke ich für die Ausdauer und Rücksicht beim Erstellen dieser Arbeit. Vielen Dank.

Thomas Köhler

Kurzfassung

Durch die Verwendung erdölbasierter Rohstoffe wird das Klima in erheblichem Ausmaß belastet [BB14]. Die Belastung wird durch den gleichzeitig weltweit wachsenden Wohlstand verstärkt, der sich seinerseits in einer weltweit steigenden Nachfrage nach Produkten manifestiert. Die Verknüpfung von Ökonomie und Ökologie zur Ermöglichung eines biobasierten und nachhaltigen Wirtschaftswachstums ist der zentrale Gedanke der Bioökonomie und auch dieser Arbeit. Einen Anhaltspunkt für die gesellschaftliche Relevanz liefert der globale Markt für Biokunststoffe mit einer jährlichen Wachstumsrate von 20,85 % [NN18]. Neben der Verwendung von nachhaltigen Rohstoffquellen bietet das Themenfeld Leichtbau einen Ansatz zur Reduktion von Gewicht und damit dem Einsparen von Treibstoffen im Mobilitätssektor.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten eigenverstärkte Faserbundkunststoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sowohl die Matrix als auch die Verstärkungsfasern aus demselben Polymer bestehen [KBK10]. Die im Stand der Technik beschriebenen Herstellungsmethoden von eigenverstärkten Faserverbundwerkstoffen aus Biopolymeren befanden sich im Labormaßstab.

Im Rahmen der Dissertation wurde erstmals eine wirtschaftliche Prozesskette zur Herstellung eines eigenverstärkten Biopolymers entwickelt. Auf Grundlage von ökologischen und ökonomischen Kriterien wird das Biopolymer Polylactid als geeignetste Rohstoffbasis zur Entwicklung eines industriell herstellbaren eigenverstärkten Faserverbundkunststoffs ausgewählt. Im Rahmen der experimentellen Prozessentwicklung werden Chemiefasern aus Polylactid erfolgreich mit 3.500 bzw. 4.000 m/min gesponnen. Mittels Lufttexturierverfahren werden die separat ausgesponnenen Matrix- und Verstärkungsfasern bei 500 m/min und einem Luftdruck von 6 bar vermischt. Die im Faserverbundkunststoff verwendeten Verstärkungsfasern betragen eine spezifische Bruchfestigkeit von 40 cN/tex. Der aus diesen Fasern im Heißpressverfahren hergestellte eigenverstärkte Faserverbundkunststoff zeichnet sich durch eine Zugfestigkeit von 143 MPa und ein Biegemodul von 5.525 MPa. Die Herstellung einer 1 m² großen nachhaltigen eigenverstärkten Faserverbundkunststoffplatte von ca. 1 mm Dicke kostet 24,61 €.

Executive summary

The use of petroleum-based raw materials places a considerable burden on the climate [BB14]. The burden is increased by the simultaneous worldwide increase in prosperity, which in turn manifests itself in a worldwide rise in demand for products. The combination of economy and ecology to enable bio-based and sustainable economic growth is the central idea of the bio-economy and of this work. The global market for bioplastics with an annual growth rate of 20.85 % [NN18] provides an indication of social relevance. In addition to the use of sustainable raw material sources, the topic of lightweight materials offers an approach to reducing weight and thus saving fuel in the mobility sector.

The self-reinforced polymer composites developed in this work are characterised by the fact that both the matrix and the reinforcing fibres consist of the same polymer [KBK10]. The production methods for self-reinforced fibre composites made of biopolymers described in the state of the art were on a laboratory scale.

Within the scope of the dissertation, an economic process chain for the production of a self-reinforced biopolymer was developed for the first time. Based on ecological and economic criteria, the biopolymer polylactic acid was selected as the most suitable raw material basis for the development of an industrially producible self-reinforced fibre composite. Within the framework of experimental process development, man-made fibres made of polylactic acid are successfully spun at 3,500 and 4,000 m/min respectively. The separately spun matrix and reinforcing fibres are mixed at 500 m/min and an air pressure of 6 bar using an air texturing process. The reinforcing fibres used in the fibre composite have a specific breaking strength of 40 cN/tex. The self-reinforced fibre composite made from these fibres in a hot-pressing process is characterised by a tensile strength of 143 MPa and a flexural modulus of 5,525 MPa. The production of a 1 m² sustainable self-reinforced fibre composite panel of approx. 1 mm thickness costs 24.61 €.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation der Arbeit	3
1.2	Zentrale Defizite und daraus abgeleitete Ziele der Arbeit	5
1.3	Ansatz und Vorgehen zur Erreichung der Ziele	6
2	Eigenverstärkte Faserverbundkunststoffe	8
2.1	Definition und Potential	8
2.2	Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbeispiele	13
2.3	Herstellungsverfahren	15
2.3.1	Hot-Compaction	16
2.3.2	Film-Stacking	17
2.3.3	Koextrusion	17
2.3.4	Commingling	18
2.3.5	Co-Spinning	19
2.4	Zusammenfassung und Fazit	19
3	Materialauswahl	21
3.1	Einführung in die Biopolymere	24
3.2	Bewertung und Auswahl eines geeigneten Biopolymers	28
3.2.1	Ökonomische Eigenschaften von Biopolymeren	30
3.2.2	Ökologische Eigenschaften von Biopolymeren	32
3.2.3	Bewertung und Auswahl des Biopolymers	35
3.2.4	Werkstoffliche Eigenschaften des ausgewählten Biopolymers	37
3.2.5	Eigenverstärkte Faserverbundwerkstoffe aus Poly(lactid)	40
3.3	Zusammenfassung und Fazit	43
4	Prozessauswahl	44
4.1	Durchführung der Nutzwertanalyse	44
4.1.1	Festlegung der Bewertungskriterien	45
4.1.2	Gewichtung der Bewertungskriterien	46
4.1.3	Bewertung der Herstellungsprozesse	48
4.1.4	Berechnung der Nutzwerte und Prozessauswahl	54
4.2	Zusammenfassung und Fazit	57

5	Schmelzspinnen von Polyactidfasern	58
5.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	58
5.2	Entwicklung der Verstärkungsfasern (1. Durchgang)	62
5.2.1	Zieldefinition	63
5.2.2	Beschreibung der Vorgehensweise	63
5.2.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	66
5.3	Entwicklung der Verstärkungsfasern (2. Durchgang)	70
5.3.1	Zieldefinition	71
5.3.2	Beschreibung der Vorgehensweise	71
5.3.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	74
5.4	Entwicklung der Matrixfasern	78
5.4.1	Zieldefinition	78
5.4.2	Beschreibung der Vorgehensweise	79
5.4.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	81
5.5	Zusammenfassung und Fazit	85
6	Nachbehandlung der Polyactidfasern	88
6.1	Analyse des Einflusses des Nachverstreckens auf die Verstärkungsfasern	88
6.1.1	Zieldefinition	88
6.1.2	Beschreibung der Vorgehensweise	89
6.1.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	91
6.2	Thermische Nachbehandlung der Matrixfasern	96
6.2.1	Zieldefinition	96
6.2.2	Beschreibung der Vorgehensweise	97
6.2.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	98
6.3	Zusammenfassung und Fazit	103
7	Entwicklung der Hybridgarne	105
7.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	105
7.2	Zieldefinition	109
7.3	Beschreibung der Vorgehensweise	110
7.4	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	112
7.5	Zusammenfassung und Fazit	121

8	Entwicklung des Konsolidierungsprozesses	124
8.1	Zieldefinition	126
8.2	Beschreibung der Vorgehensweise	126
8.3	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	134
8.4	Zusammenfassung und Fazit	138
9	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	140
9.1	Methodische Vorgehensweise	143
9.2	Festlegung der Systemgrenzen und der Zielgröße(n)	146
9.3	Modellierung der Prozessketten	148
9.4	Überprüfen der Prozessketten auf Realisierbarkeit und Effizienz	149
9.5	Definition der Prozesse	149
9.5.1	Schmelzspinnen von Verstärkungsfasern	150
9.5.2	Schmelzspinnen von Matrixfasern	153
9.5.3	Commingling von Hybridgarnen	156
9.5.4	Weben von Hybridgarngeweben	159
9.5.5	Konsolidieren von eFVK-Platten	162
9.6	Ermittlung der Kosten der Prozesskette	166
9.7	Szenarioanalyse	167
9.8	Zusammenfassung und Fazit	173
10	Zusammenfassung	175
11	Ausblick	179
12	Summary	181
13	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	185
13.1	Abbildungen	185
13.2	Tabellen	191
14	Literatur	194
15	Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	217
16	Anhang B: Kalkulation Maschinenstundensätze	224
17	Anhang C: Grundlage für Kostenrechnung	229