



**HSB**

AG Biologische Werkstoffe  
Fakultät 5 / Bionik  
Hochschule Bremen



Brandenburgische  
Technische Universität  
Cottbus - Senftenberg

---

# HEIMISCHE BASTFASERN FÜR FASERVERBUNDWERK- STOFFE MIT UNTERSCHIEDLICHEN BELASTUNGSSPEKTREN – GRUNDLEGENDE ANALYSE UND ANPASSUNG DER EINFLUSSGRÖßEN ENTLANG DER PROZESSKETTE –

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der  
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung  
des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

von

M.Sc.

Katharina Haag

aus Stuttgart

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Ay

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Müssig

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2016



Berichte aus der Materialwissenschaft

**Katharina Haag**

**Heimische Bastfasern für Faserverbundwerkstoffe  
mit unterschiedlichen Belastungsspektren**

Grundlegende Analyse und Anpassung der Einflussgrößen  
entlang der Prozesskette

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5551-1

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit konnte ich während meiner Zeit an der Hochschule Bremen in der *Arbeitsgruppe Biologische Werkstoffe* von Prof. Dr.-Ing. Jörg Müssig realisieren, wo ich seit 2010 tätig bin.

Ohne das Vertrauen und die Bereitschaft zur Betreuung der Arbeit an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Ay wäre die Umsetzung jedoch nicht möglich gewesen.

Für die Motivation zur Durchführung der Arbeit und die stetige Unterstützung, das in mich gesetzte Vertrauen und die vielen Anregungen und Diskussionen gilt mein herzlichster Dank Prof. Dr.-Ing. Jörg Müssig.

Auch den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, Frau Prof. Martienssen, Herr Prof. Riebel und Herr Dr. Burkhardt, möchte ich meinen Dank aussprechen.

Teile der Arbeit wurden im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten durchgeführt. Mein Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekts *FIBRAGEN – Verbesserte BioWerkstoffe aus Flachs durch angewandte Genomik* (FKZ: 0315911, Laufzeit: 05/2011 – 03/2015) und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Förderung des Projekts *Entwicklung einer industriellen Naturfaser-Pellet-Produktion zur Nutzung von Naturfasern als Verstärkung von (Bio-) Kunststoffen in Spritzguss und Extrusion* (AZ: 277717-34; Laufzeit: 05/2010 bis 04/2012). An dieser Stelle möchte ich mich auch ausdrücklich bei allen Projektpartnern in den Forschungsprojekten bedanken.

Aufbauend auf den Ergebnissen des DBU-Projekts hat sich eine intensive Kooperation zur Weiterentwicklung der Naturfaserpellets mit der BAFA GmbH (Malsch) und HIB Trim Part Solutions GmbH (Bruchsal) ergeben. Ohne die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit und die Unterstützung durch Bernd Frank und Uwe Schnabel wären entscheidende Teile dieser Arbeit nicht umsetzbar gewesen. Auch Wilhelm Wendel (Burwinkel Kunststoffe GmbH, Mühlen) sei an dieser Stelle herzlich für die Möglichkeit Spritzgussversuche durchführen zu können und für spannende Einblicke in die industrielle Praxis gedankt.

## Vorwort

---

Weiter gilt mein Dank Dr. Fabian Wilde, Helmholtz-Zentrum Geesthacht am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) für die Möglichkeit,  $\mu$ -CT-Aufnahmen durchführen zu können.

Explizit möchte ich mich bei Dr. Hans-Jörg Gusovius (ATB Potsdam) für die Unterstützung bei den Versuchsreihen zur Hanfaufbereitung sowie die zahlreichen hilfreichen Diskussionen bedanken.

Emanuelle Delannoy (Safilin, Sailly-sur-la-Lys, FR) danke ich, dass ich speziell für die Faserverbundwerkstoffverwendung optimierte Garnstrukturen nutzen konnte.

Für ihre Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten möchte ich mich bei Thorben Fröhlking, Sebastian Kalka, Erik Klebert, Tim Rogan, Annika Schmidt, Anna Schaub, Gerrit Staufenberg, und Dennis Thulke herzlich bedanken. Auch Susann Bahloul, Katrin Hoffmann, Marie-Yon Strücker und Kathrin Wicke sei an dieser Stelle für ihre Mitarbeit gedankt.

Die Arbeiten hätten nur halb so viel Spaß gemacht und wären bei weitem nicht so erfüllend gewesen, hätte ich mich nicht stets auf die kompetente und freundschaftliche Unterstützung innerhalb der *Arbeitsgruppe Biologische Werkstoffe* verlassen können. Mein ausdrücklicher Dank gilt allen aktuellen und ehemaligen Kollegen für spannende Impulse, Hilfe bei Messreihen, gemeinsame Stunden in Labor und Büro und inhaltliche Diskussionen. Ganz besonders möchte ich mich bei Katharina Albrecht, Andy Dentel, Nina Graupner, Milan Kelch, Anja Mader und Birgit Uhrlaub bedanken.

Eine Frage kann ich zwar nur sehr subjektiv, aber dafür umso dankbarer beantworten: Auf meine Familie und meine Freunde kann ich mich immer verlassen. Danke, dass es Euch gibt.

*Katharina Haag*

Bremen, im Juni 2016

# INHALT

<b>VORWORT</b>	<b>I</b>
<b>INHALT</b>	<b>III</b>
<b>ABKÜRZUNGEN &amp; SYMBOLE</b>	<b>VI</b>
<b>1 KURZFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 EINLEITUNG</b>	<b>7</b>
2.1 Hintergrund	7
2.2 Heimische Bastfaserpflanzen Hanf & Flachs	8
2.3 <i>Naturfaserverstärkte Kunststoffe</i> – aktueller Status quo	11
2.4 Motivation und Zielsetzung	12
<b>3 WELCHE METHODEN EIGNEN SICH FÜR DIE CHARAKTERISIERUNG VON BASTFASERN FÜR <i>NATURFASERVERSTÄRKT</i>E KUNSTSTOFFE?</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Zugeigenschaften</b>	<b>13</b>
3.1.1 Hintergrund	13
3.1.2 Einfluss der Bestimmung der Querschnittsfläche	14
3.1.3 Einfluss der Prüfumgebung	22
3.1.4 Einfluss der Einspannlänge	24
3.1.5 Einfluss der Dehnrate	25
3.1.6 Einfluss der Nachgiebigkeit der Zugprüfmaschine	25
3.1.7 Einfluss des Messbereichs des E-Moduls	26
3.1.8 Fazit: Zugprüfung von Flachsfaserbündeln	30
<b>3.2 Biegeeigenschaften</b>	<b>31</b>
3.2.1 Hintergrund	31
3.2.2 Verfahren zur Bestimmung der Biegesteifigkeit	32
3.2.3 Untersuchung der Biegeeigenschaften von Flachsfaserbündeln	35
3.2.4 Fazit: Biegeprüfung von Flachsfaserbündeln	40
<b>3.3 Faserlängen- und breiten</b>	<b>42</b>
3.3.1 Hintergrund	42
3.3.2 Methoden zur Bestimmung der Längen-, Breiten- und Feinheits- verteilungen von Fasern	44
3.3.3 Bestimmung der Längen- & Breitenverteilung von Bastfasern mit dem Messsystem FibreShape	47
3.3.4 Fazit: Methoden zur Reproduzierbaren Bestimmung der Bastfasermorphologie	52

<b>3.4</b>	<b>Fazit zur Methodik der Bastfasercharakterisierung</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>WELCHEN EINFLUSS HABEN DIE EINZELNEN PROZESSSTUFEN AUF FASER- UND FASERVERBUNDWERKSTOFFEIGENSCHAFTEN?</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Pflanze und Anbaubedingungen: Welchen Einfluss haben die Sorte der Faserpflanze und die Anbaubedingungen?</b>	<b>57</b>
4.1.1	Hintergrund	57
4.1.2	Anbau und Aufbereitung der verwendeten Flachsfasern	58
4.1.3	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften / Zugversuche	60
4.1.4	Herstellung und Prüfung der Verbundwerkstoffe im Pultrusionsverfahren	62
4.1.5	Einfluss von Anbau und Aufbereitung	63
4.1.6	Einfluss der Flachssorte	68
4.1.7	Fazit: Einfluss der Pflanze & der Anbaubedingungen	73
<b>4.2</b>	<b>Aufbereitungsstufen: Welchen Einfluss hat die Aufbereitung auf die Eigenschaften der Fasern und der Verbundwerkstoffe?</b>	<b>74</b>
4.2.1	Hintergrund	74
4.2.2	Einfluss der Erntetechnik	74
4.2.3	Einfluss der Röste	75
4.2.4	Einfluss der Aufbereitung	77
4.2.5	Fazit : Einfluss von Ernte, Röste und Aufbereitung	82
<b>4.3</b>	<b>Halbzeuge, die eine spätere Integration in die Matrix ermöglichen</b>	<b>83</b>
4.3.1	Aufbereitung zu dosierbaren Kurzfaserpellets	83
4.3.2	Textile Aufbereitung zu Rovings bzw. niedrig-gedrehten Garnen	94
4.3.3	Einfluss thermischer Schädigung	102
4.3.4	Fazit: Halbzeuge zur Integration der Fasern in den Faserverbundwerkstoff	107
<b>4.4</b>	<b>Integration der Fasern in die Matrix</b>	<b>108</b>
4.4.1	Spritzguss- und Extrusionsanwendungen mit thermoplastischer Matrix – Naturfaserpellets als Lösung des Dosierungsproblems für Serienbauteile geringerer bis mittlerer Belastung	108
4.4.2	Pultrusions-Prozess mit duroplastischer Matrix – Abschätzung des Verstärkungspotentials bei minimaler Faserschädigung und maximaler Orientierung der Fasern im Bauteil	128
<b>4.5</b>	<b>Fazit: Einflussgrößen entlang der Prozesskette</b>	<b>133</b>
<b>5</b>	<b>MODELLIERUNG: ANWENDUNG UND ANPASSUNG BESTEHENDER MODELLE</b>	<b>135</b>
<b>5.1</b>	<b>Modellbildung: Bauteil aus Spritzguss und Extrusion</b>	<b>136</b>
5.1.1	Modelle zur Berechnung kurzfaserverstärkter Bauteile	136
5.1.2	Beispielhafte Modellberechnung für NF-Pellets im Direktspritzguss	140
5.1.3	Fazit: Modellberechnung für Spritzgussbauteile	143
<b>5.2</b>	<b>Modellbildung: Langfaserverstärktes Bauteil aus dem Pultrusionsprozess</b>	<b>144</b>
5.2.1	Modelle zur Berechnung langfaserverstärkter Faserverbundwerkstoffe mit Naturfasern	144
5.2.2	Überprüfung der Anwendbarkeit auf im Biegeversuch ermittelte Werte	145

# Inhalt

---

5.2.3	Verbundwerkstoffeigenschaften aus den Fasereigenschaften	146
5.2.4	Rückrechnung auf die Fasereigenschaften aus den Verbundwerkstoffeigenschaften	150
5.2.5	Fazit: Modellierbarkeit der mechanischen Eigenschaften von NFK mit Langfaserverstärkung	152
<b>5.3</b>	<b>Fazit: Modellierbarkeit Naturfaserverstärkter Kunststoffe.</b>	<b>153</b>
<b>6</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN &amp; ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>154</b>
<b>7</b>	<b>GLOSSAR</b>	<b>158</b>
<b>8</b>	<b>QUELLEN</b>	<b>162</b>
<b>ANHANG</b>		<b>1</b>
<b>A-1.</b>	<b>Anhang zu Kapitel 3</b>	<b>1</b>
A-1.1.	Anhang zu 3.1	1
A-1.2.	Anhang zu 3.2	2
A-1.3.	Anhang zu 3.3	3
<b>A-2.</b>	<b>Anhang zu Kapitel 4</b>	<b>7</b>
A-2.1.	Anhang zu 4.1	7
A-2.2.	Anhang zu 4.2	20
A-2.3.	Anhang zu Kapitel 4.3.1	23
A-2.4.	Anhang zu 4.3.2 & 4.3.3	26
A-2.5.	Anhang zu 4.4.1	28
<b>A-3.</b>	<b>Anhang zu 5.1</b>	<b>38</b>