

# **Beiträge zur Compoundierung von Wood-Plastic-Composites (WPC)**

zur Erlangung des akademischen Grades  
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Nils Böhm  
aus Witten

Tag des Kolloquiums: 07.06.2017  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim



Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 26/2017

**Nils Böhm**

**Beiträge zur Compoundierung  
von Wood-Plastic-Composites (WPC)**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2017

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 978-3-8440-5432-3

ISSN 2196-2200

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)

## **Dank**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) der Universität Paderborn in den Jahren 2009 bis 2013.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner für die Ermöglichung der Promotion und die fortdauernde Unterstützung sowie die Diskussionen, Anregungen und Geduld. Für die freundliche Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim vom Institut für Werkstofftechnik in Kassel.

Ferner gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für die schöne Zeit, Zusammenarbeit, Hilfe und sachlichen Diskussionen aller Art. Auch danken möchte ich den studentischen Hilfskräften, die mich während dieser Zeit tatkräftig unterstützt haben, sowie den Studien-, Bachelor, Master- und Diplomarbeitern für ihren Einsatz. Besonders erwähnen möchte ich dabei Patrick Rauh, Andreas Binfet, Lisa Schrage, Andreas Wolk und Timo Nordmeyer.

Insbesondere möchte ich mich bei Dr.-Ing. Tobias Hallmann bedanken für die Zusammenarbeit, Diskussionen und die fachliche, mentale und freundschaftliche Unterstützung.

Dem Fach Coatings, Materials & Polymers (CMP) der Universität Paderborn danke ich für die Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (REM), die für diese Arbeit hergestellt wurden.

Einige Ergebnisse dieser Arbeit sind unter anderem während gemeinsamer Projekte mit der Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH (HF) und Advanced Compounding Rudolstadt GmbH (ACR) entstanden. Weiterhin standen besonders die Firmen KraussMaffei Berstorff GmbH, Coperion GmbH und J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO mit Rat, Tat und Materialspenden zur Seite. Dafür danke ich den Mitarbeitern und Firmen für ihre Unterstützung.

Ganz herzlich Danke ich meinen Eltern, die mich haben meinen Weg gehen lassen und mir dabei immer Rückhalt gegeben haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, meiner Frau Katja und meinen Töchtern Lina und Janne, besonders für ihren andauernden Beistand und für den Blick auf das Wesentliche im Leben. Danke!



## **Kurzfassung**

In der vorliegenden Arbeit werden unterschiedliche Themen zur Compoundierung von Holz-Kunststoff-Gemischen (WPC) untersucht. Es soll die WPC-Compoundierung im gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextruder (DSE) durch experimentelle Untersuchungen und Simulationen verbessert werden. Auch der Compoundierprozess im Innenmischer (IM) wird für die WPC-Herstellung angepasst. Daraufhin werden die beiden WPC-Compoundierprozesse (DSE und IM) hinsichtlich der Compoundqualität und der Betriebswirtschaftlichkeit miteinander verglichen. Weiterhin wird der Einfluss der Feuchte auf die mechanischen und optischen Eigenschaften des Bauteils beim Spritzgießprozess untersucht. Um den Trocknungsaufwand von WPC-Granulat vor dem Spritzgießprozess zu minimieren, wird der Einfluss der Granulierparameter einer Unterwassergranulierung auf die Granulatrestfeuchte von WPC untersucht und ein Modell zur Berechnung der Restfeuchte erstellt. Zudem werden Untersuchungen dargestellt, durch welche besseres Verständnis des Einflusses der Rohstoffe auf das Compound oder das Bauteil erlangt werden soll. Dieses alles soll zu verbesserten Herstellungsverfahren, besseren oder günstigeren WPCs und somit zu besseren WPC-Produkten mit erweitertem Einsatzbereich führen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf spritzgießfähige Compounds gelegt.

## **Abstract**

In this thesis different topics of compounding wood plastic composites (WPC) are investigated. The aim is to improve the WPC compounding in the co-rotating twin-screw extruder (TSE) by means of experimental investigations and simulations. The compounding process in the internal mixer (IM) is also adapted for WPC production. Then the two WPC compounding processes (TSE and IM) are compared with regard to the compound quality and costs. Furthermore, the influence of moisture on the mechanical and optical properties of the plastic part during the injection molding process is investigated. In order to minimize the effort of drying WPC pellets prior to the injection molding process, the influence of the pelletizing parameters of an underwater pelletizing system on the residual moisture of WPC pellets is investigated and a model for the calculation of the residual moisture is constructed. In addition, investigations are presented which are intended to give a better understanding of the influence of the raw materials on the compound or the plastic part. All of this will lead to improved manufacturing processes, better or cheaper WPCs, and thus to better WPC products with an extended range of applications. Special attention is paid to compounds for the injection molding process.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation.....	4
1.2	Problematik und Zielsetzung .....	6
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>9</b>
2.1	WPC-Rohstoffe .....	9
2.1.1	Matrixmaterial Kunststoff .....	9
2.1.2	Holzpartikel .....	12
2.1.3	Additive .....	15
2.2	WPC-Eigenschaften .....	17
2.3	WPC-Herstellung und -Verarbeitung .....	22
2.3.1	WPC-Compoundierung.....	24
2.3.2	WPC-Verarbeitung.....	32
<b>3</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b> .....	<b>37</b>
3.1	Qualitätsbeurteilung der Mischleistung.....	38
3.2	Ermittlung der Entgasungsleistung .....	41
3.3	Soxhlet-Extraktion der Holzpartikel aus WPC .....	46
3.4	Kornbruchanalyse.....	46
<b>4</b>	<b>Prozesstechnische Verbesserung der WPC-Compoundierung mit dem gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextruder (DSE)</b> .....	<b>48</b>
4.1	Verfahrensauswahl und Randbedingungen.....	49
4.2	Auslegung der Verfahrenseinheit: geringe mechanische Belastung der Holzpartikel .....	53
4.2.1	Füllstoffeinzug.....	53
4.2.2	Mischzonen.....	54
4.2.3	Druckaufbau.....	55
4.2.4	Untersuchungsergebnisse für geringe mechanische Belastung der Holzpartikel .....	56
4.3	Auslegung der Verfahrenseinheit: verbesserte Mechanik von WPC-Formteilen .....	58
4.3.1	Polymereinzug .....	60

4.3.2	Plastifizierzone .....	60
4.3.3	Füllstoffeinzug und Rückwärtsentlüftung .....	62
4.3.4	Einmischzone.....	62
4.3.5	Atmosphärische Entlüftung .....	65
4.3.6	Distributive Mischzone .....	68
4.3.7	Vakuum-Entgasung .....	69
4.3.8	Druckaufbau.....	74
4.4	Auslegung und Einfluss der Maschinen- und Prozessparameter auf die Materialeigenschaften.....	75
4.4.1	Einfluss der Verweilzeit auf das Compound .....	76
4.4.2	Einfluss von Schneckendrehzahl und Massedurchsatz (des Füllgrades) auf die Schmelztemperatur .....	80
4.4.3	Einfluss des Gegendrucks auf die Schmelztemperatur .....	82
4.4.4	Einfluss des Zylindertemperaturprofils auf Schmelztemperatur .....	82
4.5	Simulation .....	82
4.6	Einordnung mechanischer Kennwerte des verbesserten Compounds.....	85
<b>5</b>	<b>Vergleich der WPC-Compoundierung mit Innenmischer und Doppelschneckenextruder.....</b>	<b>87</b>
5.1	Prozesstechnische Verbesserung der WPC-Compoundierung mit dem ineinandergreifenden gegensinnig drehenden Innenmischer (IM) .....	87
5.1.1	Anlagen- und Prozessanpassung.....	87
5.1.2	Einfluss der Prozessparameter auf die Compoundqualität.....	89
5.2	Vergleich der Compoundqualität durch mechanische Kennwerte.....	95
5.3	Betriebswirtschaftlicher Vergleich der Herstellverfahren .....	106
5.3.1	Spezifischer Energiebedarf der Anlagen .....	107
5.3.2	Spezifische Compoundiergesamtkosten der Anlagen .....	109
5.4	Vergleich der Prozesse und Anlagen .....	111
5.5	Fazit der Vergleiche .....	114
<b>6</b>	<b>Einfluss Feuchte .....</b>	<b>117</b>
6.1	Granulierung.....	117
6.1.1	Ermittlung relevanter Größen und Randbedingungen .....	117
6.1.2	Statistische Versuchsplanung und Untersuchungsergebnisse.....	122

---

6.1.3	Dimensionsanalyse und Modellierung .....	129
6.2	Spritzgießen (Trocknen) .....	136
<b>7</b>	<b>Beiträge zur Rezepturverbesserung .....</b>	<b>144</b>
7.1	WPC-Masterbatch .....	145
7.2	Thermische Vorbehandlung der Holzpartikel.....	147
7.3	Holzpartikelgrößen: mechanische Einordnung von WPCs .....	149
7.4	Additive .....	154
7.4.1	Haftvermittler.....	154
7.4.2	Flammschutzmittel .....	159
7.4.3	Gleitmittel .....	164
7.4.4	Geruchsabsorber .....	167
7.5	Kostenvergleich Compounds im Bezug zu mechanischen Eigenschaften .....	171
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>174</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>183</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>184</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>193</b>
11.1	Prozesstechnische Verbesserung WPC-Compoundierung auf DSE .....	193
11.2	Anlagenvergleich zur WPC-Compoundierung .....	200
11.3	Einfluss Feuchte .....	201
11.4	Einfluss Feuchte Spritzgießen .....	213
11.5	Rezepturentwicklung .....	215
<b>12</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>217</b>