



Ressourceneffizientes und
recyclinggerechtes Design
von Faserverbundwerkstoffen
im Bauwesen

Magdalena Kimm

„Ressourceneffizientes und recyclinggerechtes Design
von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen“

„Resource-efficient Design and Design for Recycling
of Fiber-reinforced Composites in the Construction Industry“

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

vorgelegt von

Magdalena Kerstin Kimm (geb. Plümpe)

Berichter: Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker

Tag der mündlichen Prüfung: 26.11.2020

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

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

Magdalena Kerstin Kimm

**Ressourceneffizientes und recyclinggerechtes
Design von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen**

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, 2020)

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 978-3-8440-7826-8

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.

Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe sind die zentralen Werkstoffe des Leichtbaus. Durch diese wird eine Reduktion des Gewichts bei gleichzeitig hohen Festigkeiten sowie einer langen Lebensdauer ermöglicht. Das Recycling gestaltet sich jedoch aufgrund der Komplexität dieser Multimaterialverbünde als herausfordernd. In der vorliegenden Dissertation werden für die Faserverbundwerkstoffe „Textilbeton“, „Faserbeton“ und „carbonfaserverstärkte Kunststoffe“ drei Ansätze untersucht, um diese ressourceneffizient und recyclinggerecht zu gestalten.

Der Anteil an Produktionsabfällen von Faserverbundwerkstoffen beträgt je nach Fertigungsverfahren bis zu 40 %. Durch die Entwicklung einer Methode zur Analyse, Anpassung und Umsetzung einer ressourceneffizienten Produktion wird eine Reduktion der Abfälle um 50 % realisiert.

Das Recyclingverhalten von Textilbetonbauteilen an deren Lebensende ist weitgehend unbekannt. Die Entsorgung von Textilbeton erfolgt momentan entweder durch Verfüllung im Straßenbau oder durch Deponierung. Aus Untersuchungen zu den Einflussfaktoren auf die Trennbarkeit von Textilbeton wird ein recyclinggerechtes Design abgeleitet. Damit kann die sonstige Verwertungs-, Verfüllungs- und Deponierungsquote von Textilbeton um die Hälfte (von rund 100 % auf 50 %) gesenkt werden.

Für carbonfaserverstärkte Kunststoffe, zu denen auch Bewehrungen aus Carbonfasern in Textilbeton zählen, existiert bislang kein Verwertungskonzept, das in einem Massenmarkt durchgesetzt werden konnte. Durch die Entwicklung eines kurzfaserbewehrten Betons mit recycelten Carbonfasern können mehr als 20 % der Abfälle von carbonfaserverstärkten Kunststoffen im Massenmarkt von Faserbeton hochwertig recycelt werden. Kurzfaserbewehrter Beton mit recycelten Carbonfasern zeigt in den durchgeführten Versuchen bei gleichem Volumengehalt höhere Festigkeiten als konventionelle Fasern, wie Stahl und AR-Glas, und ist außerdem chemisch beständig. Ein Volumengehalt zwischen 0,5 und 1,5 Vol.-% an recycelten Carbonfasern wird empfohlen.

Abstract

Fiber reinforced composites are the key materials of lightweight design. With composites a reduction in weight with high strength and a long durability can be achieved. However, recycling is difficult due to the complexity of these multi-material composites. In this thesis three approaches are examined for the fiber reinforced composites "textile reinforced concrete", "fiber reinforced concrete" and "carbon fiber reinforced plastics" in order to realize a resource-efficient and recyclable design.

Production waste of fiber composites can be up to 40 %, depending on the production process. By developing a method for the analysis, adjustment and implementation of a resource-efficient production, a reduction of the waste by 50 % can be realized.

The recycling behavior of textile reinforced concrete components at the end of their life is widely unknown. The disposal of textile reinforced concrete is currently done either by refilling in road construction or by landfill. By investigating the factors influencing the separability of textile reinforced concrete a design for recycling is derived. Thus, the rate of refilling and landfilling of textile reinforced concrete can be reduced by half (from about 100 % to 50 %).

For carbon fiber reinforced plastics, which also involve reinforcements made of carbon fibers in textile concrete, so far, no utilization concept exists that could be established in a mass market. By the development of a short-fiber reinforced concrete with recycled carbon fibers more than 20 % of the carbon fiber reinforced polymer waste are enabled to be recycled at a high quality in the mass market of fiber reinforced concrete. In the tests carried out, fiber reinforced concrete with recycled carbon fibers results in higher strengths than conventional fibers, such as steel and AR-glass, at the same volume content and is furthermore chemically resistant. A volume content between 0.5 and 1.5 Vol.-% of recycled carbon fibers is recommended.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung	2
1.2	Vorgehen und Aufbau der Arbeit	5
2	Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen	7
2.1	Faserbeton	9
2.1.1	Materialien	10
2.1.2	Markt	16
2.1.3	Recycling	19
2.2	Textilbeton	20
2.2.1	Materialien	21
2.2.2	Markt	25
2.2.3	Recycling	27
2.3	Faserverstärkte Kunststoffe	32
2.3.1	Materialien	33
2.3.2	Markt	34
2.3.3	Recycling	36
2.4	Fazit	40
3	Abfallprognose von Faserverbundwerkstoffen	42
3.1	Abfallprognose von Textilbeton	42
3.2	Abfallprognose von faserverstärkten Kunststoffen	45
3.3	Bewertung	48
3.4	Fazit	52
4	Methoden	53
4.1	Begriffsdefinitionen	53
4.2	Gesamtmethode dieser Arbeit	54
4.3	Herstellungsverfahren, Analysemethoden und Anlagentechnik	58
5	Ressourceneffiziente Produktion	59
5.1	Methodisches Vorgehen	60
5.1.1	Standardisierung	60
5.1.2	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	61

5.1.3	Vermeidung von Verschwendung	62
5.2	Fallstudie zur Validierung des methodischen Vorgehens	62
5.2.1	Unternehmensanalyse	62
5.2.2	Zieldefinition und Identifikation von Verschwendung	65
5.2.3	Finden geeigneter Maßnahmen	70
5.2.4	Priorisierung der Maßnahmen	77
5.3	Fazit	79
6	Recyclinggerechter Textilbeton	80
6.1	Methodisches Vorgehen	80
6.2	Umsetzung des methodischen Vorgehens für Textilbeton	81
6.2.1	Versuchsplan und Materialauswahl	83
6.2.2	Einflussfaktoren für die Recyclingfähigkeit von Textilbeton	86
6.2.3	Wiederverwendung sekundärer Bewehrungen	98
6.2.4	Verfahrensanweisung für ein recyclinggerechtes Design	100
6.3	Fazit	104
7	Recycelte Carbonfasern zur Bewehrung von Beton	106
7.1	Methodisches Vorgehen	107
7.2	Kurzfaserbewehrter Beton mit rCF	109
7.2.1	Versuchsplan und Materialauswahl	109
7.2.2	Herstellung der Kurzfaserbewehrung	112
7.2.3	Ergebnisse	118
7.2.4	Diskussion	132
7.3	Vliesbewehrter Beton mit rCF	137
7.3.1	Versuchsplan und Materialauswahl	137
7.3.2	Herstellung der Vliesbewehrung	139
7.3.3	Ergebnisse	142
7.3.4	Diskussion	147
7.4	Ökonomisch-ökologische Potentialbewertung	149
7.4.1	Mögliche Anwendungsfelder und Produkte	149
7.4.2	Ökonomische Bewertung	151
7.4.3	Ökologische Bewertung	163
7.5	Fazit	169
8	Zusammenfassung	170

9	Ausblick	175
10	Summary	179
11	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	184
11.1	Abbildungen	184
11.2	Tabellen	191
12	Literatur	194
13	Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	228
14	Anhang B	231
14.1	Berechnung der Marktgrößen von FVK im Bauwesen	231
14.2	Daten zur Abfallprognose	232
14.3	Herstellungsverfahren, Analysemethoden und Anlagentechnik	237
14.3.1	Herstellungsverfahren	237
14.3.2	Analysemethoden	243
14.3.3	Anlagentechnik	248
14.4	Technische Datenblätter	253
14.5	Messergebnisse	257
14.5.1	Einzelfaserlängenmessung	257
14.5.2	Einzelfaserzugprüfung	260
14.5.3	4-Punkt-Biegeprüfung	261
14.5.4	Pull-Out-Prüfung	264
14.5.5	Zerkleinerungsversuche	265