

**„Kosteneffizientes Produktionsverfahren zur
Herstellung von Carbonfaser-Precursoren“**

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

vorgelegt von

Christian Wilms

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Prof. h.c. (RU) Thomas Gries
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Gunnar Seide

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2013

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

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

Christian Wilms

**Kosteneffizientes Produktionsverfahren
zur Herstellung von Carbonfaser-Precursoren**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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, 2013)

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2700-6

ISSN 1618-8152

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 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 in Kapitel 16.5.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik und Lehrstuhl für Textilmaschinenbau der RWTH Aachen University (ITA) entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich für die Unterstützung, die ich während dieser Zeit von einer Vielzahl von Personen erfahren habe, bedanken.

Meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Prof. h.c. (RU) Thomas Gries danke ich für die inhaltliche Betreuung der Arbeit, die anregenden Diskussionen und den konstruktiven fachlichen Austausch. Für die Übernahme des Koreferats und die zahlreichen fachlichen Diskussionen danke ich Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Gunnar Seide. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg sowie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer für die Übernahme des Beisitzes.

Ein besonderer Dank gilt meinen Arbeitskollegen. Es sind die Mitarbeiter, die mit ihrer jederzeit kollegialen Arbeitsweise das Institut auszeichnen. Unter den wissenschaftlichen Mitarbeitern sind besonders Frau Valentine Gesché, Herr Dr. Achim Hehl, Herr Timm Holtermann, Frau Tanja Klietzing, Herr Dr. Davide Pico und Herr Niels Vestweber hervorzuheben. Wegen euch hat sich die Arbeit selten als Job angefühlt. Herrn David Djudjaj, Herrn Dirk Mergl und Herrn Manuel Schulz danke ich für die Unterstützung im Technikum und an den Anlagen, auch unter Flutlicht. Des Weiteren gilt mein Dank Frau Christiane Cremer für die orthographische und stilistische Korrektur.

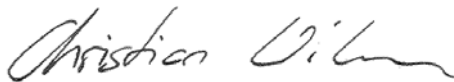
Hervorzuheben sind zudem die Studierenden, die mit ihren wissenschaftlichen Arbeiten einen substantiellen Beitrag zur Dissertation geleistet haben. Unter den in Kapitel 16.5 genannten Personen möchte ich besonders Herrn Johannes Emigholz, Herrn Philip Grethe, Herrn Christopher Kessler, Herrn Christopher Kurz, Herrn Stephan Printz, Frau Vanessa Rexin, Herrn Maximilian Rothe sowie Frau Sarah Samson danken.

Die Forschung auf diesem Themengebiet wurde in den zwei öffentlich geförderten Projekten MegaCarbon (Ziel2-Programm NRW 2007-2013; High-tech.NRW, 2. Call) und Zentrum für High Performance Fiber Materials (Ziel2-

Programm NRW 2007-2013; NanoMikro+Werkstoffe.NRW, 1. Call) unterstützt. Den Projektpartnern, allen voran den beteiligten Mitarbeitern der Dralon GmbH und der Trützschler Nonwovens & Man-Made Fibers GmbH, danke ich für den fachlichen Austausch.

Abschließend gilt meinen Eltern und insbesondere meiner Verlobten Steffi ein besonderer Dank. Ohne eure fortwährende Unterstützung und das große Vertrauen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen!

Aachen, im April 2014

A handwritten signature in black ink, reading "Christian Dillen". The script is cursive and fluid, with the first name "Christian" and the last name "Dillen" clearly distinguishable.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik - Polyacrylnitril als Precursor für Carbonfasern	5
2.1	Precursorherstellung	5
2.1.1	Polyacrylnitril	5
2.1.2	Materialaufbereitung	10
2.1.3	Faserherstellung	12
2.1.3.1	Spinnverfahren	12
2.1.3.2	Nachfolgende Prozessschritte	18
2.2	Eigenschaften eines Precursors und zugehörige Messmethoden	21
2.3	Carbonfaser	28
2.3.1	Thermische Umsetzung	28
2.3.2	Anwendungen	32
3	Standardherstellungsprozess	35
3.1	Definition	35
3.2	Beschreibung	39
4	Methodik zur Effizienzsteigerung in der Precursorherstellung	45
5	Kostenrechnung (KEPp 1)	55
5.1	Grundlagen zur Prozesskostenrechnung	55
5.2	Precursorherstellungsprozess mit zugehörigen Kosten	57
5.2.1	Grundlagen der Berechnung	57
5.2.2	Ergebnisse der Berechnung	62
5.3	Identifikation der Einsparpotentiale	65
6	Technologische Machbarkeitsanalyse (KEPp 2)	75
7	Ökologische Analyse (KEPp 3)	83

7.1	Grundlagen des Carbon Footprint	83
7.2	Analyse des Carbon Footprint des Precursorherstellungsprozesses	84
8	Neues Spinnkonzept zur Steigerung des Durchsatzes (KEPp-Pfad a)	89
8.1	Technologische Feinanalyse (KEPp 4a)	89
8.1.1	Strukturbildung beim Nassspinnen	89
8.1.2	Strukturbildung beim Luftspaltspinnen	102
8.1.3	Verstreckung in den nachfolgenden Prozessschritten	112
8.2	Kreativitätstechniken (KEPp 5a)	116
8.3	Entscheidung über das umzusetzende Konzept (KEPp 6a)	123
8.4	Praktische Umsetzung (KEPp 7a)	124
8.4.1	Labormaßstab	124
8.4.1.1	Aufbau und Versuchsdurchführung	124
8.4.1.2	Analyse der Fasern	130
8.4.1.3	Versuchsauswertung	139
8.4.2	Pilotmaßstab	140
8.4.2.1	Aufbau und Versuchsdurchführung	140
8.4.2.2	Analyse der Fasern	145
8.4.2.3	Versuchsauswertung	155
8.4.3	Umsetzung in den Industriemaßstab	156
9	Material- und kosteneffizienter Waschprozess (KEPp-Pfad b)	161
9.1	Technologische Feinanalyse (KEPp 4b)	161
9.2	Kreativitätstechniken (KEPp 5b)	167
9.3	Entscheidung über die umzusetzenden Konzepte (KEPp 6b)	173
9.4	Praktische Umsetzung (KEPp 7b)	175
9.4.1	Aufbau und Versuchsdurchführung	175
9.4.2	Analyse der Fasern	187
9.4.3	Versuchsauswertung	192
9.4.4	Umsetzung in den Industriemaßstab	195

10	Ökologische Auswirkungen (KEPp 8)	197
11	Mikro- und makroökonomische Auswirkungen (KEPp 9)	199
11.1	Marktbetrachtung	199
11.2	Preiselastizität der Nachfrage nach Carbonfasern	203
11.3	Implikationen der Untersuchungen auf den Carbonfasermarkt	205
12	Ergebniszusammenstellung und Fazit	209
12.1	Beurteilung der KEPp-Methode	209
12.2	Beurteilung der technischen Veränderungen	211
12.3	Beurteilung der wirtschaftlichen Auswirkungen	212
13	Ausblick	217
14	Zusammenfassung	221
15	Summary	225
16	Verzeichnisse	229
16.1	Abbildungen	229
16.2	Tabellen	242
16.3	Abkürzungen	246
16.4	Literatur	252
16.5	Betreute wissenschaftliche Arbeiten	272
17	Anhang	277