

**„Ermittlung der Prozessparameter zur kontinuierlichen Herstellung von
Polyolefin-basierten Carbonfasern“**

**„Determination of Process Parameters for Continuous Production of
Polyethylene-Based Carbon Fibre “**

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

vorgelegt von

Andreas De Palmenaer

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

Tag der mündlichen Prüfung: 25. April 2017

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

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

Andreas De Palmenaer

**Ermittlung der Prozessparameter zur kontinuierlichen
Herstellung von Polyolefin-basierten Carbonfasern**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-5397-5

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

„Wir sind nur dadurch erfolgreich, dass wir uns im Leben oder im Krieg oder wo auch immer ein einzelnes beherrschendes Ziel setzen, und diesem Ziel

alle anderen Überlegungen unterordnen.“

(Dwight D. Eisenhower)

Danksagung

Mein Dank gilt meinen wissenschaftlichen Betreuern Prof. Seide und Prof. Gries für die Möglichkeit, diese Arbeit durchführen zu können. Herrn Prof. Klocke danke ich für die Übernahme des Koreferates und des Vorsitzes im Promotionsverfahren.

Mein besonderer Dank gilt den Studenten des Instituts für Textiltechnik mit denen ich während der vergangenen Jahre zusammengearbeitet habe. Sie haben im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten oder als studentische Hilfskräfte einen wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit.

Dank gilt den Kollegen und Mitarbeitern am Institut, die mich in den letzten vier Jahren unterstützt haben. Besonders hervorzuheben sind Moritz Warnecke, Franz Pursche, Gisa Wortberg und Tim Röding. Die vielen motivierenden Gespräche und fachlichen Diskussionen bei der Ausarbeitung der Arbeit und während der Promotionszeit haben mir sehr geholfen.

Die Forschung auf dem Themengebiet der Polyolefin-basierten Carbonfasern wurde in dem öffentlich geförderten Projekt iPEC (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand 2015-2016) unterstützt. Ich danke den Projektpartnern der Texmer GmbH & Co KG für die Unterstützung und den wertvollen fachlichen Austausch.

Meinen Eltern, meinen Geschwistern und meinen Freunden danke ich für den steten Rückhalt in den vergangenen Jahren. Das Gelingen der Arbeit wäre ohne Euch nicht möglich gewesen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen University in der Zeit zwischen Mai 2013 und Januar 2017 angefertigt.

Teile dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen der von mir betreuten studentischen Arbeiten. Eine bibliographische Auflistung dieser Arbeiten befindet sich in Kapitel 12.2. Das Grundlagenkapitel zu Carbonfasern (Kapitel 3) basiert auf der von mir veröffentlichten Faserstofftabellen „Carbonfasern“ und „Carbonfasern aus alternativen Precursoren“ [WDV+13, WDW+15].

In dieser Dissertationsarbeit werden die Prozesse der Sulfonierung und Carbonisierung analysiert und beschrieben sowie Polyethylen-basierte Carbonfasern hergestellt. Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung von Prozessparameter für eine kontinuierliche Polyethylen-basierte Carbonfaserherstellung. Hierzu werden Wirkzusammenhänge zwischen Fasereigenschaften und Prozessparametern in den Prozessen der Sulfonierung und Carbonisierung identifiziert. Basierend auf den generierten Erkenntnissen können für die Sulfonierung optimale Eigenschaften für einen Polyethylen-Precursor sowie für die Erreichung der Carbonfaser-Zieleigenschaften optimale Parameter für den Herstellungsprozess definiert werden.

Die Prozessentwicklung und Herstellung der in dieser Dissertation verwendeten Polyethylen-Precursoren finden in der parallel zu dieser Arbeit stattfindenden Dissertationsarbeit „Entwicklung Polyethylen-basierter Precursoren für die thermochemische Stabilisierung“ von Gisa Wortberg statt [Wor17]. Der Fokus in [Wor17] liegt auf der Parameterermittlung und Prozessentwicklung für die Polyethylen-Precursorherstellung als Ausgangsmaterial für eine effiziente Polyethylen-basierte Carbonfaserherstellung. Ziel in [Wor17] ist es, einen Polyethylen-Precursor mit diesen für einen effizienten Sulfonierungsprozess optimalen Eigenschaften zu entwickeln.

Die Entwicklungsarbeit zur Herstellung kostengünstiger und leistungsfähiger Carbonfasern auf Polyethylen-Basis stellt somit ein bilaterales Forschungsvorhaben zwischen diesen beiden Dissertationen dar (vgl. Abbildung 0.). Eine klare Abgrenzung der beiden Dissertationen ist über die Prozesskette gegeben. WORTBERG befasst sich ausschließlich mit der Precursorherstellung [Wor17]. Diese Arbeit hingegen befasst sich mit der Umwandlung der zur Verfügung stehenden Precursoren zu Carbonfasern.

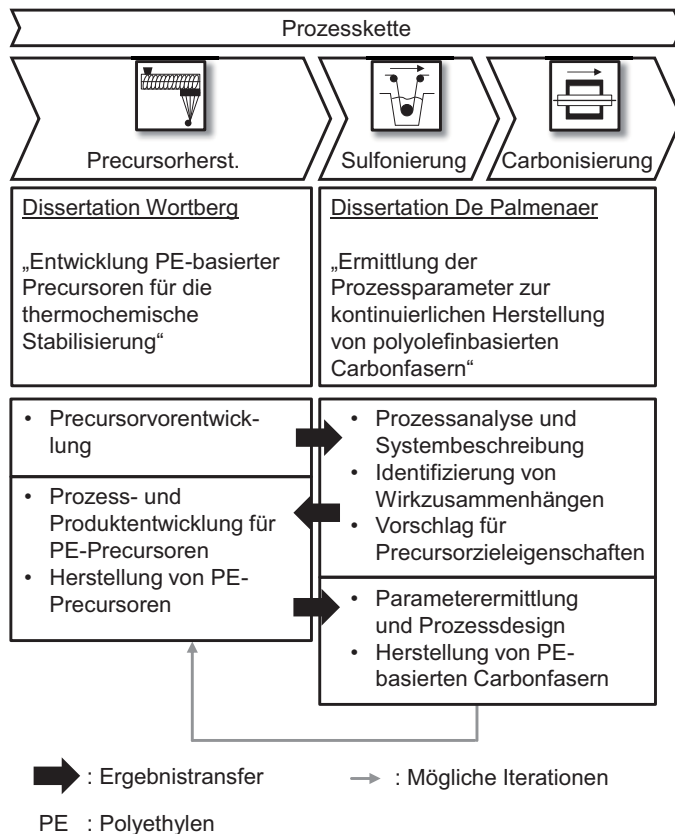


Abbildung 0.1: Übersicht zur bilateralen Forschung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1	Motivation und Ausgangslage	1
1.2	Zielherleitung für Low-Cost-Carbonfaser	4
1.3	Bestehende Defizite und Hypothese	10
1.4	Wissenschaftliche Fragestellung und Struktur der Arbeit	14
2	Historie und Marktübersicht der Carbonfaser	16
2.1	Historische Entwicklung der Carbonfaser	16
2.2	Carbonfasermarkt	17
3	Herstellung von Carbonfasern	24
3.1	PAN-basierte Carbonfaserherstellung	24
3.2	Polyolefin-basierte Carbonfaserherstellung	36
3.3	Faserstruktur und Fasereigenschaften	53
4	Analyse- und Prüfmethoden	59
4.1	Optische Messverfahren	59
4.2	Mechanische Messverfahren	62
4.3	Kalorische Messverfahren	66
4.4	Physikalische Messverfahren	71
4.5	Chemische Messverfahren	77
4.6	Zusammenfassung der Analyse- und Prüfmethoden	80
5	Verwendete Materialien	81
5.1	Polymer	81
5.2	Precursoren	83
5.3	Sulfonierungsmittel	84
6	Methodische Vorgehensweise	87
6.1	Planungsphase	89

6.2	Realisierungsphase	90
6.3	Zusammenfassung und Übersicht	91
7	Planung der Prozessentwicklung	93
7.1	Strategieplanung	93
7.2	Profilplanung	94
7.3	Konzeptplanung und Festlegung operationaler Ziele	159
8	Realisierung der Prozessentwicklung	166
8.1	Systementwurf	166
8.2	Verwendete Modulkomponenten	175
8.3	Systemintegration	187
9	Wirtschaftliche Bewertung	205
9.1	Produktionsmodell	205
9.2	Grundlagen der Prozesskostenrechnung	209
9.3	Ergebnisse der Kostenrechnung	213
10	Zusammenfassung	216
10.1	Zusammenfassung	216
10.2	Summary	220
11	Ausblick	225
12	Verzeichnisse	230
12.1	Literaturverzeichnis	230
12.2	Betreute studentische Arbeiten	258
12.3	Abbildungsverzeichnis	262
12.4	Tabellenverzeichnis	270
12.5	Abkürzungsverzeichnis	274
13	Anhang	277

13.1	Daten zum verwendeten HD-PE	277
13.2	Grundlagen zur IR-Spektroskopie	277