



Steigerung der Dispergiertgüte von  
additiverter Kunststoffschmelze  
durch mechanische Hilfsmittel

---

Merle Orth

**Steigerung der Dispergiertüte von additiverter Kunststoffschmelze  
durch mechanische Hilfsmittel**

**Increase of the Dispersing Quality  
of Filled Polymer Melts by Mechanical Support**

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

genehmigte Dissertation  
vorgelegt von

Merle Karoline Orth, geb. Bischoff

Berichter: Univ.-Prof. Prof. h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries  
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Kai Klopp



Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

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

**Merle Karoline Orth**

**Steigerung der Dispergiertgüte von additiverter  
Kunststoffschmelze durch mechanische Hilfsmittel**

Shaker Verlag  
Düren 2020

**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 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7406-2

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



---

## Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textiltechnik (ITA) der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen University. Für die Betreuung und Unterstützung der Promotion bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Professor h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries sowie Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Kai Klopp. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein für die Übernahme des Beisitzes und Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen sowie den Technikumitarbeitern und den zahlreichen Studenten, die mich bei der Erarbeitung der Ergebnisse in unterschiedlichen Rahmen unterstützt haben. Mein Dank gilt insbesondere den Herren Peter Rüdiger, David Djudjaj, Günter Irmisch, Manuel Schulz und Anton Ackermann. Beim Team des Mikroskopie- und Prüflabors möchte ich mich ebenso bedanken. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Simon Vosskämper und Herrn Nick Memminger bedanken, die in Ihren Bachelorarbeiten unter meiner Betreuung einen großen Anteil der Forschungsergebnisse generiert und interpretiert haben. Ebenso gilt mein Dank meinen studentischen Hilfskräften.

Für die kritische Korrektur des Manuskripts dieser Arbeit danke ich Frau Christiane Cremer.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Eltern und meiner Schwester sowie bei meinem Mann und meinem Sohn für die Unterstützung, die mir immer zuteilwurde.

Aachen, 11.05.2020



---

## Kurzfassung

Das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Steigerung der Dispergiertgüte von additiver Kunststoffschmelze durch mechanische Hilfsmittel. Mittels VDI2221 wurden dazu eine Ultraschalleinheit, die mittels Ultraschallwellen Agglomerate dispergiert, sowie ein innovativer Filter, der die Druckerhöhung mindert, entwickelt. Eine Steigerung der Verarbeitbarkeit von additiven Schmelzen konnte durch beide Lösungsansätze für die untersuchten Materialien erreicht werden.

Es wird gezeigt, dass zum einen mit der Ultraschalleinheit die Dispergierung aktiv verbessert werden kann. Dies kann durch geringere Filterdruckanstiege nachgewiesen werden. Die Effektivität des Ultraschalls ist sowohl material- als auch amplitudenabhängig. Zum anderen zeigt auch der innovative Filter eine Verringerung des Druckanstiegs und ermöglicht es, kontinuierlich Fasern mit ausreichend homogener Füllstoffverteilung zu extrudieren. Sowohl für die Ultraschalleinheit als auch für den innovativen Filter kann über die Untersuchungszeit kein Druckanstieg ermöglicht werden. Aufgrund seines geringeren Preises ist der innovative Filter aus wirtschaftlicher Sicht der vielversprechendere Schritt unter Betrachtung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

Durch die vorgestellten Dispergiervverfahren kann der Markt der Dispergiermethoden erweitert werden und die Verarbeitbarkeit von neuen Werkstoffen wird ermöglicht. Am Werkstoffbeispiel elektrisch leitfähige Faser für sensorische Anwendungen werden Potentiale im medizinischen sowie Faserverbundbereich aufgezeigt.

## **Abstract**

The central aim of this thesis is to increase the dispersion quality of filled polymer melts by mechanical aids. Through both the ultrasonic and the filtration approach this goal is achieved for the investigated materials. It is shown that with the ultrasonic unit the melt dispersion can be actively improved. This is proven by lower filter pressure increases. The innovative filter also shows a reduction of pressure rise and enables continuous extrusion of fibers with sufficiently homogeneous filler distribution. For both the ultrasonic unit and for the innovative filter, a pressure increase is prevented over the examination time. Due to its lower price, the innovative filter is from an economic point of view the more promising step under consideration of the cost-benefit ratio.

By the chosen investigation methods, it is proven for both new developments that no polymer damage occurs in the polymer processing. Merely the particle agglomerates and not the polymer chains are reduced in size. This allows an increase of the filler content while maintaining a good particle dispersion. The problem originally presented can thus be solved.

The dispersing processes presented here can expand the market for dispersing methods and make it possible to process new materials. Using the material example of electrically conductive fibers for sensor applications, potentials in the medical as well as fiber composite area will be demonstrated.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ansatz und Anwendungsbeispiel dieser Arbeit	2
1.2	Lösungsweg und Aufbau der Arbeit	4
2	Elektrisch leitfähige Fasern und Verfahren zu ihrer Herstellung	6
2.1	Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit	6
2.2	Grundlagen zu leitfähigen Polymerfasern	12
2.3	Grundlagen zu Kohlenstoffpartikeln	14
2.4	Stand der Technik von elektrisch (ab)leitfähigen Fasern	17
2.4.1	Elektrisch ableitfähigen Monofilamente	20
2.4.2	Elektrisch ableitfähigen Multifilamente	22
2.5	Elektrisch leitfähige Fasern auf Basis von Polymer-Nanoverbundwerkstoffen	24
2.6	Stand der Technik zur Herstellung spinngefärbter Filamente	27
2.6.1	Spinnfärben im Doppelschneckenextruder	28
2.6.2	Spinnfärben im Einschneckenextruder	29
2.6.3	Spinnfärben bei BCF	30
2.7	Theorie des Mischens	30
2.8	Entmischung von additiver Schmelze	31
2.8.1	Entmischung durch Wandhaftung	32
2.8.2	Agglomeration und Reagglomeration	34
2.9	Schmelzefiltration in der Spinndüse	36
2.10	Verfahren zur distributiven und dispersiven Verarbeitung	39
2.10.1	Schmelzmischprozess (Melt Mixing)	41
2.10.2	Lösungsmischprozess (Solution Mixing)	44
2.10.3	In-situ-Polymerisation	45
2.10.4	Partikelfunktionalisierung	46
2.10.5	Einsatz von Dispergiermitteln	46
2.10.6	Pumpmischen	47
2.10.7	Ultraschall-Dispergierung	49
2.10.8	Zusammenfassung der Herstellungs- und Homogenisierungsverfahren	53
3	Entwicklungsziel	56

3.1	Identifikation der bestehenden Defizite am Markt	56
3.2	Wissenschaftliche Fragestellung	57
4	Methodische Herangehensweise	59
4.1	Vorgehen in Anlehnung an die TRIZ-Methode	61
4.2	Methodik zum Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221) Kreativitätstechniken (morphologische Matrix)	61 64
5	Auswahl der Materialien und Anlagentechnik	67
5.1	Materialübersicht	67
5.1.1	Polyamid 6	67
5.1.2	Carbon Nanotubes	67
5.1.3	Carbon Black	68
5.1.4	Graphene Nanoplatelets	68
5.2	Übersicht der genutzten Extrusionsanlagen	69
5.2.1	Masterbatchherstellung am Doppelschneckenextruder	69
5.2.2	Compoundherstellung am Doppelschneckenextruder	72
5.2.3	Filamentherstellung am Mikrocompounder	72
5.2.4	Filtertests am Filtertester A800	73
5.2.5	Schmelzspinnen an der Bikomponenten- Schmelzspinnanlage	76
5.3	Übersicht der genutzten Analytik	78
5.3.1	Druckmessung	79
5.3.2	Gel-Permeations-Chromatographie	79
5.3.3	Pulverdiffraktometrie	80
5.3.4	Elektronenmikroskopie	81
5.3.5	Widerstandsbestimmung	81
6	Anlagenentwicklungen	83
6.1	Entwicklung eines Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschallwellen in den Schmelzestrom	83
6.1.1	Aufgabenpräzisierung	83
6.1.2	Konzeptphase	86
6.1.3	Entwurfsphase	94
6.1.4	Ausarbeitungsphase	95
6.2	Weiterentwicklung der Schmelzefiltrationseinheit	97
6.2.1	Aufgabenpräzisierung	97

---

6.2.2	Konzeptphase	98
6.2.3	Entwurfsphase	101
6.2.4	Ausarbeitungsphase	102
7	Analyse der Prozessmodifikationen	103
7.1	Analyse eines Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschallwellen in den Schmelzestrom	103
7.1.1	Filterdruckuntersuchungen	103
7.1.2	Pulverdiffraktometeranalyse an PA6	107
7.1.3	Ausschluss von Fremdeinflüssen	117
7.1.4	Analyse der Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit	119
7.2	Analyse der Schmelzefiltrationseinheit	120
7.2.1	Filterdruckuntersuchungen	120
7.2.2	Ausschluss von Fremdeinflüssen	121
7.2.3	Analyse der Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit	122
8	Bewertung der Prozessmodifikationen	124
8.1	Technische Bewertung	124
8.1.1	Technische Bewertung des Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschall	124
8.1.2	Technische Bewertung der Schmelzefiltrationseinheit	125
8.1.3	Zwischenfazit	125
8.2	Wirtschaftliche Betrachtung	126
8.2.1	Kostenbetrachtung des Maschinenelements zur Einbringung von Ultraschall	126
8.2.2	Kostenbetrachtung der Schmelzefiltrationseinheit	128
8.2.3	Zwischenfazit anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse	129
8.2.4	Betrachtung der Wertschöpfungskette	130
8.2.5	Marktbeispiele für elektrisch leitfähige Polymerfasern als Sensor	135
8.2.6	Kosten für die Herstellung eines fadenbasierten Sensors	140
9	Zusammenfassung	141
10	Ausblick	144

10.1 Scale Up	144
10.2 Materialvariation	144
10.3 Übertragbarkeit auf andere Prozesse	145
10.4 Produktmodifikation	146
11 Summary	147
12 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	149
12.1 Abbildungen	149
12.2 Tabellen	154
13 Literatur	156
14 Anhang A: Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	175
15 Anhang C: Übersicht über die Ausführungen der Ultraschallschwinger	178
16 Anhang D: Bewertung des Erfüllungsgrades des Lastenheftes	180
17 Anhang E: Patentübersicht	181