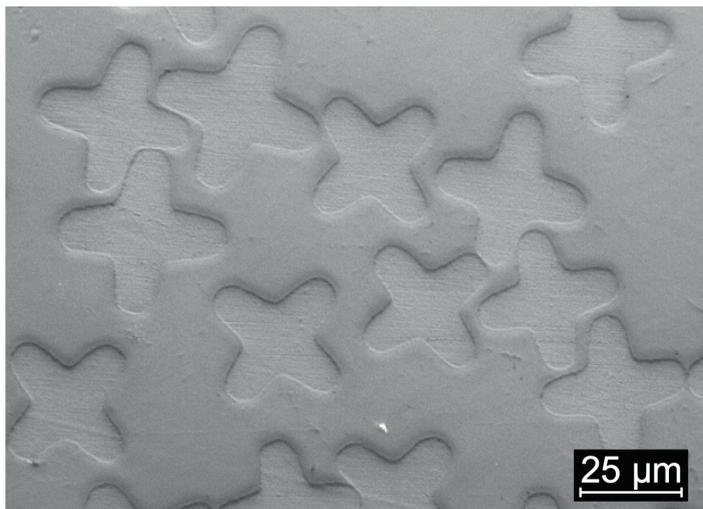


## Erhöhung des Formfaktors in der Filamentextrusion durch die Entwicklung modifizierter Kapillaren

---

Inga Noll



**Erhöhung des Formfaktors in der Filamentextrusion durch die  
Entwicklung modifizierter Kapillaren**

**Increasing the shape factor in filament extrusion by  
developing a capillary modification**

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

vorgelegt von

Inga Noll

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

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juni 2019



**Textiltechnik/Textile Technology**

herausgegeben von

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

**Inga Noll**

**Erhöhung des Formfaktors in der Filamentextrusion  
durch die Entwicklung modifizierter Kapillaren**

Shaker Verlag  
Düren 2019

**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, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6931-0

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 Arbeit ist während meiner Beschäftigung als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University entstanden. An dieser Stelle möchte mich bei allen Personen bedanken, die zu der vorliegenden Dissertation beigetragen haben.

Meinem Doktorvater, Univ.-Prof. Prof. h.c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries, danke ich für die Übernahme der inhaltlichen Betreuung und die persönliche Förderung, die ich während meiner Zeit am Institut erfahren habe. Für die Übernahme des Koreferates und die zahlreichen fachlichen Gespräche während der Entstehung der Dissertation danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Gunnar Seide. Weiterhin danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs und Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Frank Piller für die Übernahme des Vorsitzes und des Beisitzes im Promotionsverfahren.

Meinen Kollegen im Bereich Technische Fasern gilt mein persönlicher Dank. Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Kollegen Jonas Hunkemöller, Dr. rer. nat. Thomas Vad, Dr.-Ing. Robert Brüll, David Schmelzeisen und Sebastian Oppitz für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen und den freundschaftlichen Rückhalt. Weiterhin danke ich Edgar Haustov, Amrei Becker und Christian Hofmeister, die mit ihren wissenschaftlichen Abschlussarbeiten maßgeblich zu dem Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben. Ich danke meinen Kollegen im Technikum und Kolleginnen in der Mikroskopie für die tatkräftige Unterstützung bei den Versuchen und der Analyse. Herrn Dr. Dieter Veit gilt mein Dank für das fachliche Feedback bei der Finalisierung meiner Dissertation. Frau Christiane Cremer danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit.

Meinen Projektpartnern aus der Industrie und der Wissenschaft danke ich für die zielgerichtete Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester Judith. Ich danke Ihnen für die liebevolle Unterstützung und den bedingungslosen Zusammenhalt. Vielen Dank!



## Kurzfassung

In der Textilindustrie gehen mehr als 20 % des erwirtschafteten Umsatzes auf Produktneuheiten zurück, bei denen zunehmend sogenannte Profilfasern zum Einsatz kommen. Profilfasern sind Fasern mit einem unrunder Querschnitt, die gegenüber Rundfasern aufgrund der höheren Oberfläche, Einkerbungen oder Hohlräumen eine gezielte Funktionalisierung von Textilien ermöglichen. Infolge der Strangaufweitung der Polymerschmelze nach Düsenaustritt ist ein Rückschluss von der Filament- auf die Kapillargeometrie nicht möglich. Zur Entwicklung von Spinn Düsen für neuartige Faserquerschnittsgeometrien sind daher mehrere Iterationsschritte notwendig. Dies limitiert Faser- und Textilhersteller in ihrem Innovationsgrad.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Zeit zur Spinn Düsenentwicklung für neuartige Faserquerschnittsgeometrien zu reduzieren. Der Ansatz liegt in der Fertigung von Kapillaren mit divergentem Ausgangsquerschnitt. Durch die Aufweitung wird die Relaxation des Polymers, die zur Strangaufweitung führt, in die Kapillare verlagert und der Spannungsabbau kontrolliert. Somit kann ein Rückschluss von dem resultierenden Faserquerschnitt auf die Kapillargeometrie erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Einflussfaktoren auf die Formbildung in der Extrusion profilierter Filamente unter Variation von Polymertypen und Prozessparametern untersucht. Es werden modifizierte Kapillaren mit unterschiedlichen Aufweitungslängen und -winkeln im Sinne einer statistischen Versuchsplanung entwickelt und deren Effekte auf den Formfaktor bestimmt. Zur Quantifizierung der Ergebnisse wird eine geometrieunabhängige, teilautomatisierte Formfaktorbestimmungsmethode entwickelt. Die Kapillarmodifikation, die Formfaktorbestimmungsmethode sowie Gestricke aus kreuzförmigen Filamenten werden aus produkt-, prozess- und anwendungstechnischer Sicht technologisch und wirtschaftlich bewertet.

## Abstract

In the textile industry, more than 20 % of the obtained revenue goes back to product innovations. Here, an intensified use of fibers with a noncircular cross-section is observed. Compared to round fibers, noncircular fibers enable a targeted functionalization of textiles due to their increased surface area, notches or cavities. In particular, for noncircular fibers, the development of spinning nozzles is very time consuming. This goes back to the die swell effect as for which the relaxation of the polymer at the die exit leads to a low conformity between the desired and the realized cross-sectional shape. Therefore, multiple iteration steps are necessary to obtain the geometry of the capillaries of the spinning nozzle. Hence, the production of individual shaped fibers is inefficient and limits the degree of innovation of fiber and textile producers.

The aim of this work is to reduce the time for spinneret development for novel fiber geometries. The approach is to manufacture capillaries with uniformly increasing cross-sections. Therefore, the relaxation of the polymer, which leads to the die swell, is shifted into the capillary. The stress reduction is controlled. Thus, the resulting fiber cross section can be traced back to the capillary geometry.

Within the scope of this work, the influencing factors on the shape formation in the extrusion of noncircular fibers under variation of polymer types and process parameters are investigated. Modified capillaries with different expansion lengths and angles are developed in the sense of a statistical design of experiments. The shape factor of the extruded filaments is quantified by developing a geometry-independent, partially automated shape factor determination method. The capillary modification, the shape factor determination method as well as knitted fabrics made of cruciform filaments are evaluated technologically and economically from a product, process and application point of view.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Motivation	2
1.2	Aufbau und Umfang der Arbeit	5
2	Materialwissenschaftliche Grundlagen	8
2.1	Werkstoffverhalten von Polymerschmelzen	8
2.2	Fließverhalten von Polymerschmelzen	15
3	Grundlagen zur Herstellung von Profilfasern	21
3.1	Typische Chemiefaserprodukte	21
3.2	Schmelzspinnverfahren	22
3.3	Spinndüsen	29
3.4	Profilfasern	33
4	Entwicklungsziel	43
4.1	Defizite bei der Herstellung von Profilfasern	43
4.2	Wissenschaftliche Fragestellung und Definition von Teilzielen	46
5	Vorgehen in dem Entwicklungsprozess	49
6	Anlagentechnik und Analysemethoden	53
6.1	Anlagentechnik	54
6.2	Analysemethoden	59
7	Hypothese	73
7.1	Theoretische Herleitung	73
7.2	Mathematische Betrachtung	80
7.3	Simulative Untersuchung	82
8	Entwicklung eines geometrieunabhängigen Formfaktors	87
8.1	Definition von Anforderungen	87
8.2	Formfaktorbestimmung	88

9	Identifikation von Einflussfaktoren auf die Formbildung	95
9.1	Material	96
9.2	Prozessparameter	110
10	Entwicklung einer Kapillarmodifikation	115
10.1	Definition technischer und wirtschaftlicher Anforderungen	116
10.2	Grundlegende Effekte einer Kapillarmodifikation	117
10.3	Auslegung modifizierter Kapillaren	129
10.4	Übertragbarkeit der Effekte einer Kapillarmodifikation	145
11	Technische Bewertung	173
11.1	Kapillarmodifikation	173
11.2	Korrelation zwischen Formfaktor und Funktion	174
11.3	Zusammenfassung	179
12	Wirtschaftliche Bewertung	182
12.1	Effizienzsteigerung in der Entwicklung neuer Faserquerschnittsgeometrien	182
12.2	Wertanalyse	187
12.3	Technologietransferstrategie	191
12.4	Zusammenfassung	210
13	Ausblick	213
13.1	Erhöhung des Formfaktors	213
13.2	Entwicklung neuartiger Faserquerschnittsgeometrien	215
13.3	Automatisierung und Übertragbarkeit der Formfaktorbestimmung	216
14	Zusammenfassung	218
15	Summary	224

16 Verzeichnisse	230
16.1 Literaturverzeichnis	230
16.2 Studentische Arbeiten	251
16.3 Abbildungen	254
16.4 Tabellen	263
16.5 Abkürzungen	267
17 Anhang	271