

Simulation und Analyse der Luftströmungsverhältnisse in Luftspinndüsen zur Herstellung von Stapelfasergarnen

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sibylle Schmied

aus Esslingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Schütz

Tag der mündlichen Prüfung:

02. Mai 2013

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
Wissenschaftliche Institute in Verbindung mit der Universität Stuttgart

2013

Berichte aus der Textiltechnik

Sibylle Schmied

**Simulation und Analyse der Luftströmungs-
verhältnisse in Luftspinnndüsen zur Herstellung
von Stapelfasergarnen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1979-7

ISSN 1430-0559

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF).

Mein besonderer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Planck für seine stete Förderung und Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Schütz danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Ich bedanke mich bei meinem Abteilungsleiter der Forschungsgruppe Stapelfasertechnologie, Herrn Dipl.-Ing. Uwe Heitmann sowie Herrn Dr.-Ing. Peter Artzt und meinen Kolleginnen und Kollegen für die fachliche Unterstützung und Diskussionen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herzlichen Dank für die ausgezeichnete Atmosphäre in der Abteilung, die meine persönliche und berufliche Entwicklung wesentlich prägte.

Meinem Abteilungsleiter der Forschungsgruppe Automatisierung und Smart Textiles, Herrn Dipl.-Ing. Hansjürgen Horter und den Kolleginnen und Kollegen danke ich für die Unterstützung und das gute Arbeitsklima.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Zentrallabors und der Mechanischen Werkstatt danke ich für die gute Zusammenarbeit und ihre stets ausgezeichnete Arbeit.

Mein Dank gilt der Firma Rieter, Winterthur (Schweiz) und der Zürcher Stiftung für die Ermöglichung dieser Arbeit und die freundliche Bereitstellung von Düsenzeichnungen und Air-Jet-Spinndüsen.

Herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern Kurt und Rita Schmied sowie meinen Geschwistern Iris (mit Armin, Lara und Mika) und Dagmar (mit Michael, Hannah und Emily) für ihre ausdauernde Unterstützung und ihren steten Glauben an mich.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen.....	VII
Abkürzungen.....	VII
Lateinische Buchstaben.....	VII
Griechische Symbole.....	IX
Indizes	IX
Kurzfassung.....	XI
Abstract.....	XIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Grundlagen der Garnherstellung	3
2.2 Technologie des Luftspinnens	6
2.3 Stand der Forschung im Eindüsen-Luftspinnen.....	13
3 Problemstellung und Zielsetzung	17
4 Theoretische Grundlagen	21
4.1 Strömungsmechanische Grundgleichungen	21
4.2 Turbulenzmodellierung	23
Das Realizable-k- ϵ -Modell	24
4.3 Gasdynamik	26
5 Hypothese und Lösungsweg.....	29
6 Geometrie und Ähnlichkeitskennzahlen	33
7 Berechnung der Strömungsverhältnisse in der Spinndüse.....	41
7.1 Standardgeometrie	44
7.2 Messung der Luftmassenströme.....	61

7.3	Verifizierung des Simulationsmodells	62
7.4	Parametervariationen.....	65
7.4.1	Variation des Flächenverhältnisses A_B	65
7.4.2	Variation des Drallbohrungswinkels γ_B	75
7.4.3	Variation des Flächenverhältnisses A_{FFE}	80
7.4.4	Variation des Flächenverhältnisses A_G	84
7.4.5	Variation der Exzentrizität X_B der Drallbohrungen	87
7.4.6	Veränderung der Drallkammergeometrie an der Drallbohrungsmündung	93
8	Experimentelle Untersuchung ausgewählter Spinndüsengeometrien.....	103
8.1	Versuchsplan und Versuchsauswertung.....	104
8.2	Untersuchung des Flächenverhältnisses A_B	106
8.3	Untersuchung des Flächenverhältnisses A_G	112
8.4	Untersuchung der Bohrungsmündung γ_R	117
8.5	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	124
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
	Literaturverzeichnis	131

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direkte Numerische Simulation
FFE	Faserführungselement
ITMA	Internationale Textilmaschinen-Ausstellung
MVS	Murata Vortex Spinning
MJS	Murata Jet Spinning
OE	Open End (Offenes Ende)
RSM	Reynoldsspannungsmodell

Lateinische Buchstaben

a	$[m^2]$	Fläche
a	$[m]$	Überdeckung
A	$[1]$	dimensionslose Fläche
c_p	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$	Wärmekapazität
C		Konstante
d	$[m]$	Durchmesser
Ec	$[1]$	Eckertzahl
Eu	$[1]$	Eulerzahl
g	$[m\ s^{-2}]$	Erdbeschleunigung
h	$[J\ kg^{-1}]$	spezifische Enthalpie
h	$[m]$	Höhe
H	$[1]$	dimensionslose Höhe
I	$[kg\ m^3\ s^{-2}]$	Impulseintrag

k	$[\text{m}^2 \text{s}^{-2}]$	turbulente kinetische Energie
l	$[\text{m}]$	Länge
L	$[1]$	dimensionslose Länge
$\dot{m}$	$[\text{kg s}^{-1}]$	Massenstrom
M	$[1]$	dimensionsloser Massenstrom
Ma	$[1]$	Machzahl
p	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}], [\text{bar}]$	Druck
p^*	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}], [\text{bar}]$	kritischer Druck
Pr	$[1]$	Prandtlzahl
Q		Quellterm
r	$[\text{m}]$	Radius
R	$[1]$	dimensionsloser Radius
Re	$[1]$	Reynoldszahl
R_i	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	individuelle Gaskonstante
S	$[1]$	Drallzahl
S		Senkenterm
t	$[\text{s}]$	Zeit
T	$[\text{K}]$	Temperatur
v	$[\text{m s}^{-1}]$	Geschwindigkeit
$\bar{v}$	$[\text{m s}^{-1}]$	Geschwindigkeitsvektor
w_S	$[\text{m s}^{-1}]$	Schallgeschwindigkeit
x	$[\text{m}]$	Abstand
X	$[1]$	dimensionslose Exzentrizität
x	$[\text{m}]$	Ortskoordinate x
y	$[\text{m}]$	Ortskoordinate y
z	$[\text{m}]$	Ortskoordinate z

Griechische Symbole

ε	$[\text{m}^2 \text{s}^{-3}]$	turbulente Energiedissipationsrate
γ	$[\text{°}]$	Winkel
κ	$[1]$	Isentropenexponent
λ	$[\text{kg m s}^{-3} \text{K}^{-1}]$	Wärmeleitfähigkeit
μ	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$	dynamische Viskosität
μ_t	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$	turbulente Viskosität
ν	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	kinematische Viskosität
ρ	$[\text{kg m}^{-3}]$	Dichte
ρ^*	$[\text{kg m}^{-3}]$	kritische Dichte
τ	$[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}]$	Schubspannung

Indizes

$*$	kritisch
a	Atmosphäre
a	axial
abs	absolut
B	Bohrung
D	Drallkammer
eff	effektiv
ein	Eintritt
$Faser$	Faser(-strang)
FFE	Faserführungselement
G	Garnkanal

Garn

I

R

rot

S

t

t

x

Z

Garn

Injektorwirkung

Ring

Rotation

Spinnspitze

turbulent

tangential

Ortskoordinate x

Zylinder

Kurzfassung

Durch die Markteinführung des Murata Vortex-Spinnverfahrens (MVS) und des Rieter Air-Jet-Spinnverfahrens gewinnt das Stapelfaserspinnen mit Luft eine immer größere Bedeutung gegenüber den konventionellen und seit Jahren etablierten Spinnverfahren Ring- und Rotor-spinnen. Aufgrund ihres technologischen Entwicklungsstandes besitzen sowohl das MVS-Verfahren von Murata, Osaka (Japan) als auch das Air-Jet-Verfahren von Rieter, Winterthur (Schweiz) große Potentiale zur Produktions- und Qualitätssteigerung der hergestellten Garne. Diese können durch ein besseres Verständnis der Luftströmung in der Spinndüse und des Garnbildungsprozesses abgerufen und optimiert werden.

Als Zielgrößen für die Verbesserung des Spinnprozesses werden die Injektorwirkung und die Drallwirkung definiert:

- Die Injektorwirkung transportiert die Fasern vom Streckwerksausgang in die Garnbildungszone.
- Die Drallwirkung versetzt die Mantelfasern in Rotation um den Garnkern.

Während die Injektorwirkung direkt über den Luftmassenstrom an der Fasereintrittsöffnung gemessen werden kann, ist die Bestimmung der Drallwirkung nur indirekt über die Garndrehung möglich. Aufgrund der kleinen Düsenabmessungen und der schlechten optischen und mechanischen Zugänglichkeit sind klassische Messmethoden zur Strömungsmessung und zur Bestimmung der Drallwirkung ungeeignet. Durch den Einsatz der computergestützten numerischen Simulation ist eine Berechnung der Luftströmung in der Spinndüse jedoch möglich.

Für die Modellierung und Berechnung der Luftströmung in der Spinndüse wird die kommerzielle Simulationssoftware Fluent™ der Fa. Ansys™ verwendet. Die Software enthält alle notwendigen Modelle zur Lösung der strömungsmechanischen Grundgleichungen für die Berechnung von Strömungen kompressibler Fluide. Die Erstellung der Düsengeometrie und die Diskretisierung des Rechengebiets in Bilanzelemente erfolgt mit der Gittergenerierungssoftware Gambit™ (Fa. Ansys™).

Mit dem Modell wird die Luftströmung in der Standard-Spinndüse berechnet und analysiert. Die Ergebnisse zeigen den Zusammenhang zwischen Drallwirkung und Injektorwirkung in der Spinndüse: Durch die Wirbelströmung in der Drallkammer entsteht im Wirbelinnern ein Unterdruck und an der Drallkammerwand ein Überdruck. Dieses radiale Druckgefälle erzeugt an der Fasereintrittsöffnung eine Injektorwirkung, wodurch die Fasern aus dem Streckwerk angesaugt und in die Garnbildungszone transportiert werden.

Die Luftströmung in der Standarddüse wird unter Variation des an den Drallbohrungen anliegenden Eingangsdrucks berechnet. Die Injektorwirkung durchläuft in Abhängigkeit des Drucks ein Maximum. Die Analyse der Luftströmung in der Spinddüse zeigt, dass dieses Maximum aufgrund des limitierenden Ringspalts zwischen Spinnspitze und Drallkammerwand entsteht, durch den die Luft aus der Düse ausströmt.

Für weitergehende Strömungsuntersuchungen mit dem Simulationsmodell werden folgende Parameter der Spinddüsengeometrie variiert:

- Flächenverhältnis A_B (Drallbohrungsquerschnitt / Ringspaltfläche),
- Drallbohrungswinkel γ_B ,
- Flächenverhältnis A_{FFE} (Fasereintrittsöffnung / Ringspaltfläche),
- Flächenverhältnis A_G (Garnkanalquerschnitt / Ringspaltfläche),
- Exzentrizität X_B (radialer Versatz) der Drallbohrungen und
- Geometrie der Drallbohrungsmündung (Ringeinsatz mit Winkel γ_R).

Anschließend werden Spinddüsen unter Variation der Parameter A_B , A_G und γ_R hergestellt. Die Messung der Luftmassenströme an den Spinddüsen bestätigen die Ergebnisse der Strömungssimulation.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden mit den Spinddüsen Ausspinnungen am ITV Luftspinnester durchgeführt und die Garnwerte der ausgesponnenen Garne ermittelt.

Die Auswertung der Spinnversuche zeigt einen Zusammenhang zwischen Drallzahl und Garnqualität. Eine höhere Drallzahl ergibt eine festere Umwindung der Mantelfasern und führt zu einem glatteren, kompakteren, gleichmäßigeren und festeren Garn.

Eine höhere Injektorwirkung wirkt sich nicht eindeutig auf die Garnwerte aus. Sie ermöglicht es aber, die Liefargeschwindigkeit und somit die Produktivität des Spinnprozesses zu erhöhen, da ein höherer Fasermassenstrom in die Garnbildungszone transportiert werden kann.

Durch die Kenntnis der Luftströmung können im Zusammenhang mit den Garnwerten Rückschlüsse auf die Zusammenhänge zwischen Drallzahl, Injektorwirkung und Spinnprozess gezogen werden. Diese tragen zukünftig zu einer gezielten Optimierung von Luftspinddüsen bei.

Abstract

Staple-fiber spinning by means of air attaches more importance after the product placement of Murata Vortex Spinning process and Rieter Air-Jet Spinning process. Compared to the conventional and established ring spinning and rotor spinning processes, its importance is rising.

Due to their technological development status, MVS-Spinning of Murata, Osaka (Japan) and Air-Jet Spinning of Rieter, Winterthur (Switzerland) possess a great potential to increase production and quality of the produced yarns. This can be retrieved by better understanding of airflow in the spinning nozzle and yarn production process.

As aim numbers for the improvement of the spinning process, injection effect and twist effect are defined:

- The injection effect transports the fibers from the drafting unit to the yarn building zone.
- The swirl rate rotates the outer fibers around the yarn core.

The injection effect can be measured directly via the mass flow rate at the fiber inlet. Only indirect determination of the twist effect is possible by analyzing the yarn twist of the built yarn. Due to the small scale of the nozzle and the poor optical and mechanical accessibility, conventional methods of airflow measurement to analyze the twist effect are not usable. To analyze the nozzle airflow, it is possible to calculate the airflow using a computational fluid dynamics (CFD) program.

To model airflow in the spinning nozzle the CFD-program Fluent™ by Ansys™ is used. This software contains all required modeling tools to solve the basic equation system of fluid mechanics in order to calculate compressible airflows.

The geometry and calculation mesh of the nozzle is modeled using the mesh generating program Gambit™ (Ansys™).

The airflow of the standard-nozzle is calculated and analyzed with the developed simulation model. The results show the relationship between injection effect and twist effect in the spinning nozzle. Because of the twisting airflow (vortex) in the twisting chamber of the nozzle, there is a radial pressure gradient: overpressure at the twisting chamber wall, and low-pressure in the eye of the vortex. The radial pressure gradient generates the injection effect, which sucks in the fibers from the drafting unit and transports them to the yarn building zone.

To analyze the airflow in the standard-nozzle, the inlet pressure of the air-jet nozzle bore is varied. The injection effect, as a function of inlet pressure increases to a maximum and decreases afterwards. The analysis of the nozzle airflow has shown that the maximum emerges as a result of the limited ring section between spinning tip and twisting chamber wall. Through this section the whole air mass flow streams out of the nozzle.

Continuative airflow studies with the simulation model are executed with the following parameters:

- section ratio A_B (air-jet nozzle bores / ring section),
- angle of air-jet nozzle bores γ_B ,
- section ratio A_{FFE} (fiber inlet section / ring section),
- section ratio A_G (yarn channel section / ring section),
- eccentricity X_B (radial displacement) of air-jet nozzle bores and
- geometry of the intersection air-jet nozzle bores and twisting chamber (ring input with angle γ_R)

For experimental studies spinning nozzles with varied parameters A_B , A_G and γ_R are built. The measurements of the air mass flow confirm the simulation results.

At the ITV Denkendorf Air-Jet Spinning tester yarns are spun with the test nozzles and the yarn parameters are determined.

The results of the spinning test show the following relationships between the swirl rate and yarn quality:

A rising swirl rate causes firmer winding of the outer fibers and leads to a smooth, compact, even and firm yarn.

A rising injection effect definitely does not cause a change of the yarn quality, but it makes it possible to produce yarn with higher velocities and higher productivity, due to the higher fiber mass flow, which can be transported into the yarn building zone.

The knowledge of the nozzle airflow and the yarn parameters provide conclusions to the relationships between injection effect, twist effect and spinning process. This leads to a more systematic optimization of air-jet spinning nozzles in the future.