

# Analyse und Simulation der Strömungsverhältnisse in tangierenden Innenmischern

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Markus Hesse

Tag des Kolloquiums:  
Referent:  
Koreferent:

12.04.2012  
Prof. Dr.-Ing. A. Limper  
Prof. Dr.-Ing. E. Haberstroh



Schriftenreihe Institut für Polymere Materialien und Prozesse

Band 6/2012

**Markus Hesse**

**Analyse und Simulation der Strömungsverhältnisse  
in tangierenden Innenmischern**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.: Paderborn, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1141-8

ISSN 2191-2025

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand in den Jahren 2003 bis 2007, während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Limper, sowohl für seine Unterstützung als auch für die zahlreichen Anregungen und konstruktiven Diskussionen.

Für die Übernahmen des Koreferates sowie für die kritische Durchsicht der Arbeit danke ich Prof. Dr.-Ing. Edmund Haberstroh.

Für die zahlreichen, oft bis spät in die Nacht andauernden Diskussionen, möchte ich mich bei meinen Kollegen M. Witt, Dr. I. Rübhelke, Dr. T. Preuß, Dr. K. Anger, Dr. R. Kleeschulte und L. Wilke bedanken. Weiterhin gilt mein Dank allen Kollegen (besonders Dr.-Ing. T. Wilhelmsmeyer) des Institutes sowie Studenten und studentischen Hilfskräften.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden von der Deutschen Kautschuk Gesellschaft DKG gefördert.

Danke sagen möchte ich ebenfalls den Unternehmen GE-Bayer Silicones und BASF, welche freundlicherweise das Material für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben, sowie der Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH, die uns bei der konstruktiven Gestaltung von Rotorprofilen kenntnisreich unterstützte.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
3.1	Von Kautschuk zu Gummi	5
3.2	Kontinuierliches und diskontinuierliches Mischen von Elastomeren	7
3.2.1	Vorteile des kontinuierlichen Mischens	8
3.2.2	Nachteile des kontinuierlichen Mischens	9
3.3	Der Innenmischer	14
3.3.1	Beschickung und Stempel	15
3.3.2	Rotoren, Mischkammern und Seitenwände	17
3.3.3	Das Temperiersystem eines Innenmischers	22
3.4	Nachgeschaltete Prozesse	24
3.4.1	Vor- und Nachteile von Walzwerken	25
3.4.2	Vor- und Nachteile von Einschneckenstopfextrudern	25
3.4.3	Vor- und Nachteile von Konische Doppelschneckenextrudern	26
3.5	Aufbereitung von thermoplastischen Materialien in Innenmischern	26
<b>4</b>	<b>Die Versuchsanlage</b>	<b>28</b>
4.1	Basis Idee	28
4.2	Versuchsmaterial	30
<b>5</b>	<b>Praktische Versuchsdurchführung</b>	<b>33</b>
5.1	Messung der Schlittenschubkraft	33
5.1.1	Berechnung von Leistung und Arbeit	34
5.1.2	Versuchsvorbereitung für die Schubkraftmessung	34
5.1.3	Beschreibung der Schubkraftmessung	36
5.1.4	Untersuchung des Strömungsabrisses	38
5.2	Messung der Volumenströme	44
5.3	Ergebnisse der praktischen Untersuchung	45
5.3.1	Variation des Anstellwinkels	45
5.3.2	Variation des Rotorspaltes	48
5.3.3	Einfluss einer zusätzlichen, seitlichen Öffnung auf die Schlittenschubkraft	50
5.4	Visualisierung der Strömungsvorgänge	53

5.4.1	Verwendete Tracer- Materialien	53
5.4.2	Vorbereitung der Visualisierungsversuche	55
5.5	Ergebnisse der Strömungsvisualisierung	56
5.5.1	Charakterisierung der Strömungsverhältnisse mittels Fotografie	58
<b>6</b>	<b>Modellierung der Strömungsvorgänge</b>	<b>62</b>
6.1	Mischeffekte	62
6.2	Distributives Mischen	62
6.3	Laminares Mischen	63
6.4	Dispersives Mischen	63
6.5	Grundlagen	64
6.5.1	Rotorgeometrie	65
6.5.2	Materialverhalten	66
6.6	Numerische Berechnung der Strömungsvorgänge unter dem Rotorflügel für strukturviskose Medien	66
6.6.1	Berechnung der Druckgradienten der Zone I	72
6.6.2	Berechnung der Druckgradienten der Zone II	73
6.6.3	Berücksichtigung des Rotorwinkels $\alpha$	74
6.6.4	Berücksichtigung einer seitlich offenen Rotorgeometrie	75
6.6.5	Berechnung der Verweilzeit	84
6.6.6	Berechnung der dissipierten Energie	85
6.6.7	Berechnung der Materialscherung	87
6.6.8	Berechnung der Materialdehnung	88
6.6.9	Berechnung der Materialrotation	88
6.6.10	Berechnung der laminaren Deformation	91
<b>7</b>	<b>Berechnungsergebnisse</b>	<b>94</b>
7.1	Zuordnung und Gewichtung	94
7.2	Bewertung des Mischverhaltens verschiedener Rotorgeometrien	97
7.2.1	Vergleich des distributiven Mischverhaltens unterschiedlicher Rotorgeometrien	99
7.2.2	Vergleich des dispersiven Mischverhaltens unterschiedlicher Rotorgeometrien	101
7.2.3	Vergleich der laminaren Deformation unterschiedlicher Rotorgeometrien	102

---

7.2.4	Vergleich des Dissipationsenergieeintrages unterschiedlicher Rotorgeometrien	103
7.3	Flankenformunabhängig Einflussgrößen auf das Mischverhalten	105
7.3.1	Einfluss der Rotorgeschwindigkeit auf das Mischverhalten	105
7.3.2	Einfluss durch Rotorverschleiß	107
7.3.3	Verschleiß der Mischkammer	109
7.3.4	Verschleiß des Rotors	110
7.3.5	Einfluss des Füllgrades	111
7.3.6	Einfluss der Materialparameter	113
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>114</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>118</b>
<b>10</b>	<b>Vorveröffentlichungen</b>	<b>125</b>
<b>11</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>126</b>



## Symbolverzeichnis

$\Delta t_n$	Messfrequenz
$\frac{\Delta p}{\Delta x}$	Druckgradient in x-Richtung
$\frac{\Delta p}{\Delta z}$	Druckgradient in z-Richtung
$\dot{V}_{Schlepp}$	Schleppvolumenstrom
$\Delta y$	Schrittweite in y-Richtung
$\Delta z$	Schrittweite in z-Richtung
$\dot{V}$	Volumenstrom
$p_{max}$	Maximaldruck
$\dot{m}$	Massenstrom
$\dot{V}_{zs}$	Schleppvolumenstrom des seitlich offenen Bereiches
$\dot{V}_{xd}$	Druckvolumenstrom des seitlich offenen Bereiches
$\dot{V}_{Spalt(l=q)}$	Spaltvolumenstrom
$\dot{\epsilon}_{diss}$	Spezifische dissipierte Energie eines Volumenelementes
$\epsilon$	Dehnung
$\dot{V}_{Rot}$	Rotationsvolumenstrom
$\dot{V}_{min}$	Minimaler Volumenstrom
$R_{pot}$	Rotationspotenzial
$\Delta y_0, \Delta y_1, \Delta y_2$	Deformationslängen
B	Breite des seitlich offenen Bereiches in x-Richtung
B <sub>1</sub>	Gesamtbreite der Rotorgeometrie in x-Richtung
B <sub>2</sub>	Projizierte Flügelbreite in x-Richtung
D	Deformation
F	Schubkraft
h <sub>(z)</sub>	Geometrie der aktiven Rotorflanke
h*	Ort des Druckmaximums in y-Richtung
h**	Ort des Flankenbeginns in y-Richtung
H <sub>1</sub>	Abstandshöhe zwischen Mischkammer und Rotorwelle
H <sub>2</sub>	Abstandshöhe zwischen Rotorspitze und Mischkammerwand

K	Konsistenzfaktor des Potenzgesetzes
L	Materialvorlage in z-Richtung
$L_I, L_{II}$	Zonen mit unterschiedlichen Vorzeichen des Druckgradienten
n	Fließexponent des Potenzgesetzes
P	Leistung
t	Verweilzeit
$t_i$	Verweilzeit in einem Volumenelement
v	Schlittengeschwindigkeit
$v_0$	Geschwindigkeit des Schlittens
$v_{0x}$	Geschwindigkeit in x-Richtung
$v_{0z}$	Geschwindigkeit in z-Richtung
$v_{Luft}$	Strömungsgeschwindigkeit der Luft
W	Arbeit
x, y, z	Kartesische Koordinaten
$Y^*, Y^{**}$	Ort des Geschwindigkeitsextremums
$z^*$	Ort des Druckmaximums in z-Richtung
$z^{**}$	Ort des Flankenbeginns in z-Richtung

### Griechische Symbole

$\alpha$	Anstellwinkel des Rotorflügels
$\tau$	Schubspannung
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
$\rho$	Dichte
$\varphi$	Geschwindigkeitswinkel
$\eta$	Viskosität

## **Kurzfassung - deutsch**

Damit aus Rohkautschuk ein Profil oder Formteil mit gummielastischen Eigenschaften werden kann, muss er mit einer Vielzahl von Zugabestoffen modifiziert werden. Für die Einarbeitung der Rezepturbestandteile in das Polymer werden in der Regel diskontinuierlich arbeitende Innenmischer eingesetzt.

Einen großen Einfluss auf die verfahrenstechnischen Eigenschaften eines Mixers haben die gegensinnig drehenden Rotoren. Wichtige Merkmale, wie die dispersive und distributive Mischleistung, werden von der Geometrie der Rotoren beeinflusst.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Rotorversuchsstand erlaubt es, den Energieeintrag eines Rotorflügels zu messen und die Strömungsverhältnisse, welche sich vor dem Flügel ausbilden, zu visualisieren. Zudem konnte eine Quantifizierung der einzelnen Volumenströme vorgenommen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Entwicklung eines numerischen Modells für die Simulation der Strömungs- und Mischvorgänge in der Materialvorlage eines Rotorflügels. Auch hier konnten mit Hilfe der Versuchsergebnisse Randbedingungen definiert werden, die zur Steigerung der Modellqualität beigetragen haben.

Ausgehend von den Erhaltungssätzen für Energie, Masse und Impuls wurde, unter Berücksichtigung des strukturviskosen Materialverhaltens von Kautschukmischungen, ein Modell zur Beschreibung der Druck- und Strömungsverhältnisse entwickelt.

Im weiteren Verlauf wurde eine Bewertung der Strömungsverhältnisse hinsichtlich des Einflusses auf das Mischverhalten eines Rotorflügels vorgenommen. Im Fokus standen diesbezüglich die dissipierte Energie, die distributive und dispersive Mischleistung und die laminare Deformation des Materials.

## Summary - englisch

To achieve the typical elastic properties of rubber, the raw polymer has to be modified with several additives. For the incorporation of recipe components usually discontinuous internal mixers are used.

The counter rotating rotors have a particularly large influence on the process behaviour of an internal mixer. Important features, such as the dispersive and distributive mixing performance can be influenced by the geometry of the rotors.

With the described rotor test rig it is possible to measure the energy entry of a tangential rotor wing into the material. In addition the flow behaviour in front of the geometry can be visualized. Besides this, the quantification of flow rates was another important topic of this work.

Another focus of this work is to develop a numerical model for simulating the flow and mixing processes in the material in front of a rotor blade. With the help of the test rig it was possible to define reliable boundary conditions, which helps to improve the model quality.

Based on the conservation law of energy, mass and impulse, and under consideration of the shear thinning behaviour of rubber compounds, the model describes the pressure and flow conditions in front of the active rotor flank.

In a further step, the influence of flow conditions on mixing properties was evaluated. In this case the focus was on the dissipated energy, the distributive and dispersive mixing performance and the laminar deformation of the material.