

**Erprobung und Modellbildung eines  
Extrusionswerkzeuges mit rotierender  
Verteilergeometrie**

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

vorgelegte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Ingo Rübhelke  
aus Lippstadt

Tag des Kolloquiums: 23.01.2009  
Referent: Prof. Dr.-Ing. A. Limper  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. V. Schöppner



Polymerforschung in Paderborn

Band 25

**Ingo Rübhelke**

**Erprobung und Modellbildung  
eines Extrusionswerkzeuges mit  
rotierender Verteilergeometrie**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2009

**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., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8212-7

ISSN 1618-5005

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Kunststofftechnologie der Universität Paderborn in den Jahren 2003 - 2008.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Limper möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für die wertvollen Anregungen und die stete Unterstützung aussprechen, welche maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Schöppner.

Mein herzlicher Dank gilt auch allen Mitarbeitern der Fachgruppe, den studentischen Hilfskräften und den Studien- und Diplomarbeitern, ohne deren Beitrag diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonders erwähnen möchte ich hier die Herren M. Witt, P. Kloke und S. Berdnorz.

Die Ergebnisse der Arbeit wurden zum Teil im Rahmen eines Gemeinschaftsforschungsvorhabens zusammengetragen. Für die Zusammenarbeit in diesem Projekt danke ich den teilnehmenden Unternehmen. Die experimentelle Verifikation der Berechnungen wurde durch Versuchsmaterialien, Maschinen und Werkzeugkomponenten der Firmen Battenfeld (Bad Oeynhausen), Reifenhäuser (Troisdorf) sowie Windmüller & Hölscher (Lengerich) ermöglicht.

Den Firmen danke ich für diese großzügige Unterstützung.

Meiner Familie und insbesondere meiner lieben Carolin danke ich für den Rückhalt und das Selbstvertrauen, welches sie mir für meinen persönlichen und beruflichen Werdegang mit auf den Weg gegeben haben.



## Veröffentlichungen

- Limper A., Rübbelke I.: „Vorstellung eines neuen Werkzeugkonzeptes zur Extrusion von schlauchförmigen Thermoplasthalbzeugen“ Tagungsband zur KTP-Jahrestagung im Juni 2004 in Paderborn, SHAKER Verlag ISBN 3-8322-3384-9, Seiten 141-151.
- Kleineheismann S., Rübbelke I.: „Blasfolienanlage als Miniaturausgabe“ Messebericht der K-Extra zur internationalen Kunststoffmesse im Oktober 2004, Düsseldorf.
- Limper A., Rübbelke I.: „Vorstellung eines neuen Werkzeugkonzeptes“ Erschienen in der Fachzeitschrift Extrusion im Oktober 2004, Heft Nr. 11, Seiten 32-35.
- Limper A., Rübbelke I.: „Homogene Schmelzeverteilung durch Rotation“ Erschienen in der Fachzeitschrift Kunststoffe des Carl Hanser Verlag, Heft Nr. 12/2004, Seiten 140-143.
- Schöppner V., Limper A., Rübbelke I.: „Entwicklung eines Werkzeugkonzeptes mit rotierender Verteilergeometrie“ Fachvortrag zur Tagungsveranstaltung des Süddeutschen Kunststoffzentrums „Neuigkeiten in der Extrusion“ im Juli 2007 in Würzburg.
- Schöppner V., Limper A., Rübbelke I.: „Development of a Die Concept with a Rotating Distributor Geometry“ Fachvortrag im Rahmen der PPS–Europe im September 2007 in Göteborg, Schweden.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>0. Symbol – und Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>1. Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Werkzeuge zur Rohr- und Folienextrusion.....	2
1.2 Rotierende Verteilersysteme .....	8
1.3 Vorgehensweise und Zielsetzung .....	13
<b>2. Druckströmungsberechnung.....</b>	<b>15</b>
2.1 Erhaltungssätze .....	15
2.2 Stoffgesetze .....	16
2.3 Analytische Auslegungsverfahren für Extrusionswerkzeuge.....	19
2.4 Numerische Berechnungsverfahren.....	24
<b>3. Berechnungen für Druck – Schleppestromungen .....</b>	<b>26</b>
3.1 Idealisierung der kinematischen und geometrischen Verhältnisse.....	26
3.2 Eindimensionale Strömung newtonscher Schmelzen .....	27
3.3 Mehrdimensionale Strömung strukturviskoser Schmelzen.....	30
3.4 Fehlerquellen bei der Beschreibung von Strömungsvorgängen.....	33
<b>4. Grundlegende Strömungsanalyse im dynamischen Verteiler .....</b>	<b>36</b>
4.1 Aufbau des Versuchswerkzeuges .....	37
4.2 Experimentelle Ermittlung von Rotordrehzahlen .....	39
4.3 Vergleichende Extrusionsversuche zu Rotorvariationen .....	43
4.4 Visualisierung des Rotordurchströmverhaltens.....	50
<b>5. Gesamtenergetische Betrachtung des Rotordrehverhaltens .....</b>	<b>54</b>
5.1 Möglichkeiten und Grenzen zur Drehenergieberechnung .....	54
5.2 Experimentelle Untersuchung der Rotationsenergie .....	67
5.3 Vergleich zwischen Theorie und Experiment .....	78
5.4 Modifiziertes Modell zur Berechnung der Rotordrehzahl.....	84
<b>6. Praktische Konsequenzen für die Rohr- und Folienextrusion.....</b>	<b>100</b>
6.1 Gegenüberstellung statische / dynamische Rotoranordnung.....	101
6.2 Potentiale und Risiken für die Rohrextrusion .....	104
6.3 Potentiale und Risiken für die Folienextrusion .....	111
6.4 Optimierungsbedarf zum rotierenden Verteilersystem .....	116

<b>7. Zusammenfassung / Abstract.....</b>	<b>121</b>
<b>8. Literatur .....</b>	<b>124</b>
<b>9. Anhang.....</b>	<b>129</b>

**Symbolverzeichnis**

Lateinische Symbole:

A	Nullviskosität
A	Grundgröße Fläche
$a_T$	Temperaturverschiebungsfaktor
b	Breite des Durchlasskanals
$\bar{b}$	mittlere Breite
B	Grundgröße Breite
B	Reziproke Übergangsgeschwindigkeit des CARREAU-Modells
C	Fließgesetzexponent des CARREAU-Modells
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität
D	Grundgröße Durchmesser
$D_A$	Außendurchmesser des Rotors
$D_I$	Innendurchmesser des Rotors
$D_S$	Schneckenaußendurchmesser
$D_Z$	Zylinderinnendurchmesser
$e_B$	Stegbreite
$F_p$	Korrekturfaktor der Druckströmung
$f_p$	Steginflusskorrekturfaktor der Druckströmung
$f_s$	Steginflusskorrekturfaktor der Schleppströmung
g	Gravitationskonstante
$g_z$	Gravitationskonstante in z-Richtung
H	Grundgröße Höhe

$H_R$	Höhe des Rotors
$h$	Höhe des Durchlasskanals
$K$	Konsistenzfaktor des Potenzfließgesetzes
$K_0$	Viskosität bei der Schergeschwindigkeit $1\text{s}^{-1}$
$L$	Grundgröße Länge
$L_D$	verkürzte Kanallänge
$L_K$	angepasste Kanallänge
$M_{\text{diss}}$	Dissipationsmoment
$m$	Durchsatz
$n$	Exponent des Potenzfließgesetzes
$n_K$	Anzahl der Durchlasskanäle
$n_0$	Schneckendrehzahl
$N$	Drehzahl; Betriebsdrehzahl
$N_{\text{Grenz}}$	Grenzdrehzahl
$N_{\text{gem}}$	gemessene Drehzahl
$N_{\text{max}}$	maximale Drehzahl
$N_{\text{opt}}$	Drehzahloptimum
$p$	Druck
$\Delta p$	Druckdifferenz in Kanalrichtung
$\Delta p_{\text{dyn}}$	Druckdifferenz im dynamischen Fall
$\Delta p_{\text{dyn,(N)}}$	dynamischer Druckverlust bei Betriebsdrehzahl
$\Delta p_{\text{dyn,(NGrenz)}}$	dynamischer Druckverlust bei Grenzdrehzahl
$\Delta p_{\text{red}}$	reduzierte Druckdifferenz

---

$\Delta p_{\text{stat}}$	Druckdifferenz im statischen Fall
$P_{\text{dyn}}$	durch die Druckreduzierung freigesetzte Energie
$P_{\text{diss}}$	Dissipationsenergie
$R$	Grundgröße Radius
$\bar{R}$	mittlerer Radius
$s$	Spalthöhe
$t$	Zeit
$T$	Temperatur, Grundgröße Temperatur
$T_B$	Bezugstemperatur
$T_S$	Standardtemperatur
$T_0$	Bezugstemperatur
$\vec{v}$	Geschwindigkeitsvektor
$\bar{v}_u$	mittlere Umfangsgeschwindigkeit
$v_u$	Umfangsgeschwindigkeit
$v_{u,\text{max}}$	maximale Umfangsgeschwindigkeit
$v_x$	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung
$v_y$	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung
$v_z$	Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung
$v_0$	Geschwindigkeit der oberen Platte
$v_{0x}$	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung der oberen Platte
$v_{0z}$	Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung der oberen Platte
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\dot{V}_{\text{dyn}}$	Volumenstrom im dynamischen Fall

$\dot{V}_K$	Volumenstrom pro Durchlasskanal
$\dot{V}_{korrigiert}$	korrigierter Volumenstrom
$\dot{V}_{stat}$	Volumenstrom im statischen Fall
x	Koordinatenrichtung
y	Koordinatenrichtung
z	Koordinatenrichtung, Zylinderkoordinatenrichtung
Griechische Symbole:	
$\alpha$	Umschlingungswinkel
$\beta$	Parameter des Arrhenius-Ansatzes
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
$\delta$	Leckspalthöhe
$\eta$	Viskosität
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\Pi_m$	Dimensionsloser Durchsatz
$\Pi_p$	Dimensionsloser Druckgradient für Potenzgesetzfluide
$\Pi_{\dot{V}}$	Dimensionsloser Volumenstrom
$\rho$	Dichte
$\rho_s$	Schmelzedichte
$\tau$	Schubspannung
$\tau_{xz}$	Schubspannung in y-Ebene in x-Richtung
$\tau_{yz}$	Schubspannung in y-Ebene in z-Richtung
$\tau_w$	Wandschubspannung

$\phi$	Parameter der Änderung der inneren Energie
$\phi_{1,2}$	Korrekturfaktoren der Schnecken­theorie
$\varphi$	Gang­steigungswinkel
$\omega$	Winkel­geschwindigkeit