Berechnungs- und Auslegungsmethoden für Werkzeuge der Extrusionstechnik: Schmelzefilter, Breitschlitz- und Profilwerkzeuge

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

genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Ralf Schlottmann
aus Rahden

Tag des Kolloquiums: 05. September 2008

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Potente, Universität Paderborn

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Heim, Universität Kassel

Polymerforschung in Paderborn

Band 20

Ralf Schlottmann

Berechnungs- und Auslegungsmethoden für Werkzeuge der Extrusionstechnik: Schmelzefilter, Breitschlitz- und Profilwerkzeuge

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2008

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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7670-6
ISSN 1618-5005

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 Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik der Universität Paderborn in den Jahren 2004 bis 2008.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Potente für seine fachliche Unterstützung, dem mir jederzeit entgegengebrachten Vertrauen und der großen Freiheit, die er mir einräumte. All dies hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für die freundliche Übernahme des Korreferats sowie die kritische und gewissenhafte Durchsicht der Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-P. Heim.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für die gute und angenehme Zusammenarbeit. Besonders danke ich meinen ehemaligen Bürokollegen Dr.-Ing. C.-J. Wefelmeier und Dipl.-Ing. M. Bornemann für die zahlreichen Diskussionen.

Den Studien- und Diplomarbeitern sowie den studentischen Hilfskräften sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt, ohne deren Einsatz diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere Frau B. Funke hat mit ihrer Diplomarbeit einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Ein Teil der Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen von Forschungstätigkeiten, die von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen “Otto von Guericke“ e.V (AiF) finanziert worden sind. Der AiF und den beteiligten Unternehmen danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Ralf Schlottmann Bielefeld, im September 2008

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis I

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik und Zielsetzung 5

2.1 Stand der Technik 5

2.2 Zielsetzung 7

3 Modellgesetze und Übertragungsregeln: Breitschlitz- und Profilwerkzeuge 9

3.1 Ähnlichkeitstheorie 9

3.2 Modellgesetze für Breitschlitzwerkzeuge 16

3.2.1 Analytische / numerische Berechnung und Auslegung von Breitschlitzwerkzeugen – Stand der Technik 16

3.2.2 Kriterien der Werkzeugauslegung für die Entwicklung der Modellgesetze 25

3.2.3 Modellgesetze und Übertragungsregeln für Breitschlitzwerkzeuge 26

3.2.4 Zusammenfassung der Übertragungsregeln 38

3.2.5 Validierung der Modellgesetze für Breitschlitzwerkzeuge 41

3.3 Modellgesetze für Profilgeometrien 49

3.3.1 Analytische Berechnung 51

3.3.2 Modellgesetze und Übertragungsregeln für Rechteckkanäle 53

3.3.3 Modellgesetze und Übertragungsregeln für Rohrkanäle 58

3.3.4 Modellgesetze und Übertragungsregeln für Ringspalte 60

3.3.5 Modellgesetze und Übertragungsregeln für einen variablen Konsistenzfaktor und eine variable Fließkanallänge 62

3.4 Entwicklung eines Softwareprogramms zur anwenderfreundlichen Handhabung der Übertragungsregeln 63

4 Berechnungsverfahren und Übertragungsregeln: Großflächen-Schmelzefilter 69

4.1 Grundlagen der Großflächen-Schmelzefiltertechnik 70

4.1.1 Bauarten von Schmelzefiltern 70

4.1.2 Strömungsmechanische und rheologische Grundlagen 74

4.1.3 Berechnungsverfahren für Schmelzefilter-Angaben der Filterhersteller 81
4.2 Analytische / numerische Berechnung von Großflächen-Schmelzefiltern 82
4.2.1 Netzwerktheorie 83
4.2.2 Geometrie und Bezeichnungen von Großflächen-Schmelzefiltern 85
4.2.3 Rheologische Modelle zur Berechnung von Großflächen-Schmelzefiltern 87
4.2.4 Aufbau und Ablauf des Berechnungsverfahrens 88
4.2.5 Auswertung der Berechnungen und graphische Darstellungen 105
4.2.6 Übertragung des Berechnungsschemas auf Kerzen-Filter 114
4.3 Verifizierung der Berechnungsergebnisse 122
4.4 Einfluss der Geometrie- und Verfahrensparameter auf das Prozessverhalten von Großflächen-Schmelzefilter 123
4.4.1 Einflussparameter: Polymer 126
4.4.2 Einflussparameter: Filtergeometrie 127
4.4.3 Einflussparameter: Filterkennwerte 129
4.5 Möglichkeiten und Grenzen des Berechnungsansatzes und der Übertragungsregeln bzw. Verhältniskennzahlen 131
5 Zusammenfassung 133
6 Literaturverzeichnis 137
7 Anhang 143

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

A, B, c	Koeffizienten des Carreau-Ansatzes
a_T	Temperaturverschiebungsfaktor
B	Spaltbreite
c_{sW}	spezifische Wärmekapazität
d, D	Durchmesser
d_a, d_i	Außen-, Innendurchmesser
dp_F	spezifischer Filterdruckabfall
e	repräsentativer Abstand Rechteckkanal
e_O	repräsentativer Abstand Kreisrohr
GW	Geometrischer Widerstand
H	Spalthöhe
k	Druckabfallvorfaktor, konstant
K	Konsistenzfaktor
L	Spaltlänge
$\dot{m}$	Massenstrom
n	Fließexponent
n_d	Anzahl Discs
n_Q	Anzahl Querbohrungen im Mittelrohr
p_{Π}	Druckabfall Übertragungsregeln
p_S	Druckabfall Simulation
Δp	Druckdifferenz
Δp_R	Druckdifferenz Rohrkanal
Δp_{RK}	Druckdifferenz Rechteckkanal

R,r	Radius
R(x)	Verteilerkanalradius f(x)
R_0, D_0	maximaler Verteilerkanalradius- /durchmesser
R_a, R_i	äußerer, innerer Radius
$\overline{R}$	mittlerer Radius
T	Auslasstemperatur
T_B	Bezugstemperatur
T_E	Einlauftemperatur
T_S	Schmelzetemperatur
ΔT	Temperaturdifferenz
U	Umfang
v	Fließgeschwindigkeit
$\overline{v}$	mittlere Fließgeschwindigkeit
$v_S(x)$	Fließgeschwindigkeit f(x)
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\dot{V}_S$	Startvolumenstrom
$\dot{V}_K$	Volumenstrom Kanalsegment
$\dot{V}_{ges.}$	Gesamtvolumenstrom
x	Laufvariable
y(x)	Inselfeldlänge f(x)
y_0	maximale Inselfeldlänge

Griechische Symbole

$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
$\overline{\dot{\gamma}}$	repräsentative Schergeschwindigkeit

η	Viskosität
$\overline{\eta}$	repräsentative Viskosität
ρ	Dichte
φ	Überhöhungsfaktor
ε	Porosität
Π_B	dimensionslose Spaltbreite
Π_F	dimensionsloser Formfaktor
Π_{FR}	dimensionsloser Formfaktor Regression
Π_H	dimensionslose Spalthöhe
Π_K	dimensionsloser Konsistenzfaktor
Π_L	dimensionslose Spaltlänge
$\Pi_{\dot{m}}$	dimensionsloser Massedurchsatz
Π_n	dimensionsloser Fileßexponent
Π_p	dimensionsloser Druckabfall
Π_R	dimensionsloser Rohrradius
Θ_A	dimensionslose Verhältniskennzahl, Carreau-Parameter A
Θ_c	dimensionslose Verhältniskennzahl, Carreau-Parameter c
$\Theta_{Gsp.}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, Geshäusespalt
$\Theta_{\dot{m}}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, Massedurchsatz
Θ_p	dimensionslose Verhältniskennzahl, Druckabfall
$\Theta_{sp.p}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, spezifischer Druckabfall
$\Theta_{sp.T}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, spezifischer Temperaturanstieg
Θ_T	dimensionslose Verhältniskennzahl, Auslasstemperatur
Θ_t	dimensionslose Verhältniskennzahl, Verweilzeit
$\Theta_{\dot{\gamma}}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, Schergeschwindigkeit

$\Theta_{\dot{\gamma}\,\text{Geh.}}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, Schergeschwindigkeit Gehäuse
$\Theta_{\dot{\gamma}\,\text{SR}}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, Schergeschwindigkeit Sammelrohr
$\Theta_{\dot{\gamma}\,\text{Querb.}}$	dimensionslose Verhältniskennzahl, Schergeschw. Querbohrung
Θ_{ε}	dimensionslose Verhältniskennzahl, Porosität

Indizes

0	Modellausführung
1, 2	Hauptausführungen
j, k, i	Laufvariablen der Summation
A	Auslaufrohr
D	Düsenzone
E	Einlaufrohr
F	Filter
G	Gehäuse
I	Inselfeld
K	Knoten
k	Filterkerze
KS	Kegelstumpf
M	Masche
Q	Querbohrung
R	Sammelrohr; Regression
RS	Ringspalt
V	Verteiler
~	auf einzelnes Element bezogen