

*Grundlagen zur Beschreibung der Feststoffförderung und des Aufschmelzens in einem
Einschneckenextruder sehr kurzer Bauart*

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Sebastian Kleineheismann
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 27.01.2010
Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Potente
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. V. Schöppner

Polymerforschung in Paderborn

Band 28

Sebastian Kleineheismann

**Grundlagen zur Beschreibung der Feststoffförderung
und des Aufschmelzens in einem Einschnecken-
extruder sehr kurzer Bauart**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9070-2

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 und Oberingenieur an der Universität Paderborn am Institut für Kunststofftechnik (KTP) in den Jahren 2003 bis 2008.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Potente für die ausgezeichnete Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Beides hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme des Korreferates und die damit verbundene kritische Durchsicht der Arbeit sowie für die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit als Oberingenieur danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Schöppner.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für die gute und angenehme Zusammenarbeit.

Den zahlreichen Studien- und Diplomarbeitern sowie den studentischen Hilfskräften sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt, ohne deren Einsatz diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere den Herren P. Helm, A. Sebbel und S. Schwarzer danke ich für die langjährige und wertvolle Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen.

Ein Teil der Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen von Forschungstätigkeiten erarbeitet, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert wurden.

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch Maschinen und Versuchsmaterialien der Firmen emendo-tec, BASF und Bayer ermöglicht. Diesen Firmen danke ich für die großzügige Unterstützung.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meiner Familie und insbesondere meiner Frau Jeanette, die mir wenn es notwendig war während der gesamten Zeit den Rücken frei gehalten haben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Abstract	III
Symbolverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 <i>Der Einschneckenextruder</i>	1
1.2 <i>Einführung in die Problemstellung</i>	3
1.3 <i>Zielsetzung und Vorgehensweise</i>	4
2 Tribologisches Verhalten von Kunststoffen	6
2.1 <i>Stand der Technik</i>	6
2.2 <i>Aufbau der Versuchsvorrichtung</i>	9
2.3 <i>Berechnung der Reibungskoeffizienten</i>	11
2.4 <i>Auswertung der Ergebnisse</i>	12
2.4.1 <i>Äußerer Reibwert</i>	13
2.4.2 <i>Innerer Reibwert</i>	18
2.5 <i>Anwendung der erzielten Ergebnisse</i>	23
3 Der Intensivplastifizierer	24
3.1 <i>Aufbau</i>	24
3.2 <i>Plastifiziereinheit</i>	25
3.3 <i>Geometrieparameter</i>	28
3.4 <i>Messtechnik</i>	29
4 Experimentelle Untersuchungen am Intensivplastifizierer	34
4.1 <i>Untersuchungen zur Funktionsweise</i>	34
4.2 <i>Aufschmelzverlauf</i>	38
4.3 <i>Materialabbau</i>	44
4.3.1 <i>Untersuchungen mit Hilfe des Schmelzevolumenindex und des Volumen- Fließindex</i>	47

4.3.2 Untersuchungen mit der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC)	50
4.4 Energiebilanz	53
4.5 Einfluss der Scherspalthöhe	58
4.5.1 Antriebsleistung	58
4.5.2 Energiebilanz	60
5 Theoretische Betrachtungen am Intensivplastifizierer	62
5.1 Feststoffförderung	62
5.1.1 Kinematische Bedingungen	63
5.1.2 Kräfte und Massenbilanzen	66
5.1.3 Berechnung der Leistung und des Aufschmelzenden	71
5.1.4 Anwendung der Modelle	73
5.2 Aufschmelzen	78
5.3 Simulation der Feststoff- und der Schmelzeströmung	80
5.3.1 Partikelströmung	80
5.3.2 Schmelzeströmung	85
5.3.2.1 Druckverläufe in der Schmelzeförderzone	86
5.3.2.2 Strömungsverhältnisse	89
5.3.2.3 Mechanische Beanspruchung	92
5.3.2.4 Temperaturverteilung	95
6 Zusammenfassung und Ausblick	98
7 Literaturverzeichnis	102
8 Anhang	107
9 Lebenslauf	112

Zusammenfassung

Konträr zum derzeitigen Trend im Extrusionsbereich immer länger werdende Plastifiziereinheiten zu entwickeln, ist im Rahmen dieser Arbeit ein Extruder untersucht worden, der sich durch eine besonders kurze Plastifiziereinheit auszeichnet. Dabei wurden sowohl mit empirischen als auch mit theoretischen Ansätzen Grundlagen für die Funktionsweise des Systems erarbeitet. Basierend auf der Begebenheit, dass das zu verarbeitende Material in der Plastifizierung nahezu komplett über Friktion plastifiziert wird und somit das Material einer hohen mechanischen Belastung unterliegt, ist der Materialabbau bedingt durch die Verarbeitung untersucht worden. Weiterführend konnte ein Feststofffördermodell für die Berechnung des mechanischen Energieeintrags in das Material aufgestellt werden und anhand von experimentellen Untersuchungen verifiziert werden. Da bei diesem System für die Energieeinbringung in das zu verarbeitende Material die Reibung von größter Bedeutung ist, ist es erforderlich die tribologischen Eigenschaften der verarbeiteten Kunststoffe zu untersuchen. Dazu ist anders als in der Literatur zu finden ein besonderes Augenmerk auf den inneren Reibwerten, d.h. der Reibwert der bei einer gleichen Materialpaarung vorliegt, gelegt worden.

Abstract

Contrary to the current tendency in extrusion to extend the length of the plasticizing units, the content of this thesis investigate an extruder, which characterized by a very short plasticizing unit. Within the scope of this work the basic functions of this system were studied theoretically as well as empirically. Knowing that the polymer is plasticized almost entirely via frictional heating with high mechanical stresses inserted, the material degradation during the process was investigated. A solid conveying model could be established to determine the mechanical energy input into the polymer and could be verified through experimental tests. Due to the fact that the energy input via friction is of highest importance and interest, the information about the tribological material characteristics of the processed polymer were required. Therefore, a main focus was set on the internal friction coefficient, which is the existent friction coefficient with the same material combination.

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

A	Aktivierungsenergie (Materialabbau)
A	Querschnittfläche
A_0	Ausgangsquerschnitt
A_{Nut}	Freie Querschnittfläche im Nutenbereich
A_Q	Freie Querschnittfläche
A_{Ring}	Ringquerschnittfläche
$A_{\text{R,Sp-N}}$	Reibfläche zwischen Nuten- und Spaltelement
$A_{\text{R,Sp-S}}$	Reibfläche zwischen Schnecken- und Spaltelement
A_{Sch}	Freie Querschnittfläche im Bereich der Schneckengänge
A_{Sp}	Freie Querschnittfläche im Scherspalt
A_{Steg}	Querschnittfläche eines Steges
a	Temperaturleitfähigkeit
B	Scheinbarer Frequenzfaktor
b	Breite
b_N	Breite der Nutengänge
b_S	Breite der Schneckengänge
c_p	Wärmekapazität
$D_{N_{\text{max}}}$	Maximaler Durchmesser der Nutbuchse an den Stegen
$D_{N_{\text{min}}}$	Minimaler Durchmesser der Nutbuchse an den Stegen
$D_{N_{\text{Gr}}}$	Durchmesser der Nutbuchse am Nutengrund
$D_{S_{\text{max}}}$	Maximaler Durchmesser der Schnecke an den Stegen
$D_{S_{\text{min}}}$	Minimaler Durchmesser der Schnecke an den Stegen
$D_{S_{\text{Gr}}}$	Durchmesser der Schnecke am Schneckenganggrund
e	Stegbreite
e_N	Breite des Nutzenstegs

e_{N_Anf}	Breite des Nutzenstegs im Bereich des Materialeinlasses
e_{N_End}	Breite des Nutzenstegs im Bereich der Schneckenspitze
e_S	Breite des Schneckenstegs
e_{S_Anf}	Breite des Schneckenstegs im Bereich des Materialeinlasses
e_{S_End}	Breite des Schneckenstegs im Bereich der Schneckenspitze
$F_{1..11}$	am Volumenelement angreifende Kräfte
F_N	Normalkraft
$F_{N1..9}$	am Nutenelement angreifende Kräfte
F_R	Reibkraft
F_{S1}	am Schneckenelement angreifende Kraft
$F_{Sp1..3}$	am Spaltelement angreifende Kräfte
Gr	Grasshof-Zahl
h	Enthalpie (Energiebilanzierung)
h	Höhe
h_{Gesamt}	Abstand zwischen Nutengrund und Schneckenganggrund
h_N	Nutentiefe
h_{N_Anf}	Nutentiefe im Bereich des Materialeinlasses
h_{N_End}	Nutentiefe im Bereich der Schneckenspitze
h_S	Schneckengangtiefe
h_{S_Anf}	Schneckengangtiefe im Bereich des Materialeinlasses
h_{S_Ende}	Schneckengangtiefe im Bereich der Schneckenspitze
i_N	Anzahl der Nuten
i_S	Anzahl der Schneckengänge
k	Abbaukonstante (Materialabbau)
k	Druckanisotropiekoeffizient
$k_{N1..9}$	Druckanisotropiekoeffizienten im Element im Nutengang
k_{S1}	Druckanisotropiekoeffizient im Element im Schneckengang
$k_{Sp1..3}$	Druckanisotropiekoeffizienten im Element im Scherspalt

L	Länge
M_i	Molekulargewicht
\bar{M}_N	Zahlenmittel (Molekulargewicht)
\bar{M}_W	Gewichtsmittel (Molekulargewicht)
M_d	Drehmoment
\dot{m}	Massestrom
\dot{m}_{ges}	Gesamtmassestrom
\dot{m}_{Nut}	Massestrom in den Nuten
\dot{m}_{Sch}	Massestrom in den Schneckengängen
\dot{m}_{Sp}	Massestrom im Scherspalt
\dot{m}_{spez}	Spezifischer Massestrom
N_i	Anzahl Moleküle mit Molekulargewicht M_i
Nu	Nusselt-Zahl
n	Drehzahl
Pr	Prandtl-Zahl
p	Druck
p_N	Druck im Volumenelement in den Nuten
p_S	Druck im Volumenelement im Schneckengang
P	Leistung
P_{ges}	gesamte Leistung
P_{Nut}	am Nutenelement umgesetzte Leistung
P_{Sch}	am Schneckenelement umgesetzte Leistung
P_{Sp}	am Spaltelement umgesetzte Leistung
\dot{Q}	Wärmestrom
R	Universelle Gaskonstante
r_a	Äußerer Radius der Reibkammer
r_i	Innerer Radius der Reibkammer
$T_1 - T_5$	Temperaturmessstellen am Zylinder

T_R	Absolute Reaktionstemperatur
T_K	Kristallitschmelztemperatur
t	Zeit
t_N	Steigung der Nuten
t_S	Steigung der Schneckengänge
\dot{V}	Volumenstrom
V	Geschwindigkeit / Reibgeschwindigkeit
V_0	Umfangsgeschwindigkeit
V_{0x}	x-Komponente der Umfangsgeschwindigkeit
V_{0z}	z-Komponente der Umfangsgeschwindigkeit
V_{ax}	Axialgeschwindigkeit
V_{Nut}	Geschwindigkeit des Nutenelements
V_{Nut_ax}	Axialgeschwindigkeit des Nutenelements
$V_{rel_Nut_Spalt}$	Relativgeschwindigkeit von Nuten- und Spaltelement
$V_{rel_Sch_SchSt}$	Relativgeschwindigkeit von Schneckenelement und -steg
$V_{rel_Sch_Spalt}$	Relativgeschwindigkeit von Schnecken- und Spaltelement
$V_{rel_Sp_SchSt}$	Relativgeschwindigkeit von Spaltelement und Schneckensteg
V_{Sch}	Geschwindigkeit des Schneckenelements
V_{Sch_ax}	Axialgeschwindigkeit des Schneckenelements
V_{Sp}	Geschwindigkeit des Spaltelements
V_{Sp_ax}	Axialgeschwindigkeit des Spaltelements
V_u	Umfangsgeschwindigkeit
X	Richtungsordinate
Y	Richtungsordinate
Z	Richtungsordinate

Griechische Symbole

α	Wärmeübergangszahl
α	Winkel einer Resultierenden
α_{Nut}	Feststoffförderwinkel des Nutenelements
α_{Sch}	Feststoffförderwinkel des Schneckenelements
α_{Sp}	Feststoffförderwinkel des Scherspaltenelements
β	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
δ_{Nut}	Winkel der Relativgeschwindigkeit von Nuten- und Spaltelement
δ_{Sch}	Winkel der Relativgeschwindigkeit von Schnecken- und Spaltelement
δ_{Sp-Nut}	Winkel der Relativgeschwindigkeit von Spaltelement und Nutensteg
δ_{Sp-Sch}	Winkel der Relativgeschwindigkeit von Spaltelement und Schneckensteg
ε	Emissionsgrad
η	Viskosität
g_{GF}	Grenzflächentemperatur
g_0	Starttemperatur
λ	Dimensionslose Fließzahl (Mischzahl)
λ	Wärmeleitfähigkeit
μ	Reibwert
μ_a	äußerer Reibwert
μ_i	innerer Reibwert
ν	Kinematische Zähigkeit
π	Kreiszahl
ρ	Dichte
ρ_s	Schüttdichte
$\rho_{s,\infty}$	DIN-Schüttdichte
$\rho_{s,0}$	korrigierte Schüttdichte

σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ	Normalspannungen
$\bar{\tau}$	Schubspannungen
φ_N	Steigung der Nuten
φ_{N_Gr}	Steigung der Nuten am Nutengrund
φ_S	Steigung der Schneckengänge
φ_{S_Gr}	Steigung der Schneckengänge am Schneckengrund
$\bar{\varphi}_N$	über die Kanalhöhe gemittelter Gangsteigungswinkel der Nuten
$\bar{\varphi}_S$	über die Kanalhöhe gemittelter Gangsteigungswinkel der Schnecke
ω	Maß für den Wirbelvektor