

THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM
TEMPERATUR- UND DURCHSATZVERHALTEN VON
KAUTSCHUKEXTRUDERN

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Sebastian Brockhaus, M.Sc.
aus Mülheim an der Ruhr

Tag des Kolloquiums: 30.01.2017
Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner
Korreferent: Prof. Dr. Ulrich Giese

Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 24/2017

Sebastian Brockhaus

**Theoretische und experimentelle Untersuchungen
zum Temperatur- und Durchsatzverhalten von
Kautschukextrudern**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5186-5

ISSN 2196-2200

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 in der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) der Universität Paderborn in den Jahren 2013 bis 2016.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner für die Ermöglichung der Promotion, die gute und kontinuierliche Unterstützung sowie die zahlreichen und intensiven Diskussionen.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. Ulrich Giese vom Deutschen Institut für Kautschuktechnologie e.V. (DIK) in Hannover.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Kunststofftechnik Paderborn für die positive Atmosphäre, die gute Zusammenarbeit und die vielen anregenden Diskussionen. Ebenfalls gilt mein Dank den studentischen Hilfskräften sowie den zahlreichen Bachelor-, Studien- und Masterarbeitern, die durch ihre tatkräftige Unterstützung einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Ein Teil der hier vorliegenden Ergebnisse ist in Kooperation mit dem Deutschen Institut für Kautschuktechnologie e.V. (DIK) in Hannover entstanden. Für die hierbei jederzeit gute und konstruktive Zusammenarbeit danke ich sehr herzlich.

Sebastian Brockhaus

Bad Lippspringe, im Oktober 2016

KURZFASSUNG

Durch die vorliegende Arbeit sollen Möglichkeiten zur Verbesserung des Durchsatzverhaltens von Kautschukextrudern aufgezeigt und ein Beitrag zum besseren Prozessverständnis der Kautschukextrusion geliefert werden. Dabei liegt der Fokus zum einen auf dem Temperierungseinfluss und der Temperaturentwicklung im Extrusionsprozess und zum anderen auf den Möglichkeiten einer Durchsatzsteigerung durch eine Erhöhung der Schneckendrehzahl.

Hinsichtlich der Temperierung wird gezeigt, dass der Durchsatz maßgeblich von der Schneckentemperatur und die mittlere Austrittstemperatur hauptsächlich von der Zylindertemperatur beeinflusst werden. Die Ursache dafür liegt in der zirkulierenden Querströmung, die einen großen Einfluss auf die thermischen Gegebenheiten im Schneckenkanal hat. Daher wird auch eine Modellierung der nicht-isothermen Strömungen im Schneckenkanal vorgestellt, die insbesondere den Querströmungseinfluss berücksichtigt. Hinsichtlich einer deutlichen Drehzahlsteigerung stellte bisher immer die Austrittstemperatur das begrenzende Kriterium dar. Um jedoch eine solche Drehzahlerhöhung bei temperaturkritischen Materialien zu ermöglichen, können Schnecken wandgleitoptimiert ausgelegt werden, um den dissipativen Wärmeeintrag während des Extrusionsprozesses zu verringern. In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen führte eine dahingehend ausgelegte Schnecke zu einer deutlichen Reduktion der Austrittstemperatur insbesondere bei hohen Drehzahlen.

ABSTRACT

This work presents the possibilities for the improvement of the throughput behaviour of rubber extruders and provides a contribution to a better understanding of the rubber extrusion process. Besides, the focus lies on the one hand on the influence of the heating units and the temperature development in the extrusion process and on the other hand on the possibilities of an increase in throughput by a rise of the screw speed.

Regarding to the barrel and screw heating it will be shown, that the screw heating mainly influences the throughput and the barrel heating largely influences the average melt temperature. The primary cause of this is the circulating transverse flow, which has a big influence on the thermal conditions in the screw channel. Hence, a modelling of the non-isothermal flow in the extrusion process is presented, which takes the influences of the transverse flow and also the influences

of the heating units into account. Concerning to an increase of the screw speed the outlet temperature was the limiting criterion. However, to allow such an increase of the rotational speed during processing of temperature critical materials, wall slip optimised screws can be developed. A high wall slip velocity on the screw root results in a decrease of the dissipative heating in the melt. Experimental investigations with such an optimised screw show, that a significant reduction of the average outlet temperature is possible at high screw speeds.

VORVERÖFFENTLICHUNGEN

- S. BROCKHAUS „Grundlegende Studie und alternative Methode zur
V. SCHÖPPNER Bewertung des Wandgleiteffekts bei hochviskosen
B. KLIE Kautschukmischungen“, Kautschuk Gummi Kunststoffe
U. GIESE 11-12, 2014, S. 44-51
- S. BROCKHAUS „Einflüsse der Zylinder- und Schneckenemperierung in
V. SCHÖPPNER der Kautschukextrusion“, Gummi Fasern Kunststoffe 68,
7/2015, S. 470-474
- S. BROCKHAUS „Investigations about High-Speed rubber extrusion“, 11th
V. SCHÖPPNER Fall Rubber Colloquium, Conference Proceedings, 2014
B. KLIE
U. GIESE
- S. BROCKHAUS „Effects of Barrel and Screw Heating in Rubber
T. HALLMANN Extrusion“, Annual Conference of the Society of Plastics
Engineers (ANTEC), Conference Proceedings, 2015
- S. BROCKHAUS „Influence of the flow channel coating using high
V. SCHÖPPNER pressure capillary viscometry to evaluate wall slippage
B. KLIE effects of polymer melts“, Kautschuk Gummi Kunststoffe
E. 7-8, 2015, S. 46-58
HABERSTROH
- S. BROCKHAUS „Möglichkeiten und Grenzen schnelldrehender
T. HALLMANN Kautschukextruder“, Kautschuk Gummi Kunststoffe 10,
2015, S. 39-45
- S. BROCKHAUS „Influence of barrel and screw heating in rubber
V. SCHÖPPNER extrusion“, International Polymer Science & Technology,
Nr. 10, Vol. 42, 2015, S. 1-6

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	I
1 EINLEITUNG.....	1
2 GRUNDLAGEN ZUR KAUTSCHUKVERARBEITUNG	5
2.1 EIGENSCHAFTEN VON KAUTSCHUK.....	5
2.1.1 THERMODYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN	6
2.1.2 RHEOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN	7
2.1.3 VERNETZUNGSREAKTION UND -KINETIK	12
2.2 EXTRUSION VON KAUTSCHUKEN.....	13
2.2.1 EXTRUDER-BAUARTEN	14
2.2.2 PROZESSVERHALTEN	15
2.2.3 SCHNECKENAUSLEGUNG	17
3 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE.....	19
3.1 ZIELSETZUNG	19
3.2 VORGEHENSWEISE	21
3.2.1 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	22
3.2.2 NUMERISCHE STRÖMUNGSSIMULATIONEN.....	25
4 STRÖMUNGEN IM SCHNECKENKANAL	31
4.1 KINEMATISCHE UMKEHR	31
4.2 ABWICKLUNG DES SCHNECKENKANALS (RINNENMODELL).....	35
4.3 STRÖMUNGSBESCHREIBUNG.....	44
4.3.1 FÖRDERWIRKSAME STRÖMUNG	44
4.3.2 QUERSTRÖMUNG	46
5 DAS PHÄNOMEN DES WANDGLEITENS	51
5.1 MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DES WANDGLEITEFFEKTS.....	51
5.1.1 COULOMBSCHES WANDGLEITEN	51
5.1.2 GLEITFILM-MODELL.....	52
5.1.3 DISKUSSION DER MODELLE UND EINFLÜSSE.....	52
5.2 ERMITTLUNG DER WANDGLEITGESCHWINDIGKEIT.....	55

5.2.1	MÖGLICHKEITEN ZUR BESTIMMUNG DER WANDGLEITGESCHWINDIGKEIT ...	55
5.2.2	ALTERNATIVE BESTIMMUNG DER WANDGLEITEIGENSCHAFTEN	59
6	TEMPERIERUNGSEINFLUSS UND TEMPERATURENTWICKLUNG IM EXTRUSIONSPROZESS	71
6.1	EINFLUSS AUF DEN DURCHSATZ UND DIE AUSTRITTSTEMPERATUR	73
6.1.1	DURCHSATZ.....	73
6.1.2	AUSTRITTSTEMPERATUR	76
6.1.3	TEMPERATURABHÄNGIGER DURCHSATZ.....	80
6.2	THERMISCHE HOMOGENITÄT.....	81
6.2.1	EINFLUSS DER TEMPERIERUNG.....	81
6.2.2	EINFLUSS DER BESTIFTUNG.....	84
6.2.3	EINFLUSS DER GANGZAHL	85
6.2.4	EINFLUSS DES KOPFDRUCKS	86
6.2.5	KALTER KERN	87
6.3	EINFLUSS AUF DAS DRUCKAUFBAUVERMÖGEN.....	91
6.4	WEITERE TEMPERIERUNGSSTRATEGIEN	93
6.4.1	MEHRSTUFIGE ZYLINDERTEMPERIERUNG	94
6.4.2	TEMPERIERUNG DER EINZUGSZONE.....	96
6.5	ZUSAMMENFASSUNG	97
7	MODELLIERUNG NICHT-ISOTHERMER STRÖMUNGEN IM SCHNECKENKANAL	99
7.1	MODELLAUFBAU	102
7.2	MODELLIERUNG DER GESCHWINDIGKEIT	105
7.3	MODELLIERUNG DES TEMPERATURPROFILS	108
7.4	NICHT-ISOTHERME DRUCK-DURCHSATZ-BERECHNUNG.....	111
7.4.1	BERECHNUNGSABLAUF.....	112
7.4.2	DISKUSSION VON BERECHNUNGSERGEBNISSEN	113
8	MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN SCHNELLAUFENDER KAUTSCHUKEXTRUDER.....	117
8.1	THERMISCHES PROZESSFENSTER	117
8.2	TEMPERATURREDUKTION DURCH WANDGLEITEN.....	123
8.2.1	SCHNECKENGEOMETRIE.....	124

8.2.2	FUNKTIONALE BESCHICHTUNGEN.....	133
8.3	PROZESS- UND EXTRUDATQUALITÄT BEI HOHEN DREHZAHLEN.....	138
8.3.1	THERMISCHE HOMOGENITÄT	138
8.3.2	STOFFLICHE EXTRUDATEIGENSCHAFTEN.....	141
8.3.3	ZEITLICHE PROZESSSTABILITÄT	146
8.4	ABSCHLIEßENDE BEWERTUNG	149
9	WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE DER KAUSCHUKEXTRUSION	151
9.1	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE	151
9.2	ENERGIEEFFIZIENZ VON KAUSCHUKEXTRUSIONSANLAGEN.....	154
10	ZUSAMMENFASSUNG	161
11	LITERATURVERZEICHNIS	V
12	ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	XV
13	LEBENSLAUF	XXI