

Beschreibung und Analyse des Glättbandprozesses bei der Herstellung
von Kunststofffolien im Vergleich zum konventionellen
Glättwerkverfahren

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wirt. Ing. Carl-Jürgen Wefelmeier
aus Bad Oeynhausen

Tag des Kolloquiums: 16. August 2007
Referent: Prof. Dr.-Ing. A. Limper
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. R. Span

Polymerforschung in Paderborn

Band 19

Carl-Jürgen Wefelmeier

**Beschreibung und Analyse des Glättbandprozesses
bei der Herstellung von Kunststofffolien im Vergleich
zum konventionellen Glättwerkverfahren**

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., 2007

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 978-3-8322-6936-4

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

Für Elke

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik der Universität Paderborn in den Jahren 2001 bis 2005.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Limper gilt mein besonderer Dank für die stetige Unterstützung und die wertvollen Fachgespräche. Das hervorragende Verhältnis und die damit verbundene Vertrauensbasis haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Span danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für die gründliche und kritische Durchsicht der Arbeit.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Kunststofftechnik danke ich für die ausgezeichnete und stets angenehme Zusammenarbeit. Herrn Dr.-Ing. S. Seibel gilt mein besonderer Dank für viele nützliche Diskussionen. Den studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Diplomarbeitern möchte ich für die tatkräftige Unterstützung danken. Vor allem Herr R. Düchting hat mit seiner Diplomarbeit einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen von Forschungstätigkeiten zusammengetragen, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert worden sind.

Mein Dank gilt den Firmen Berstorff GmbH, AVI-GmbH Kunststoffverpackungen sowie ETIMEX Primary Packaging GmbH für die Bereitstellung von Anlagentechnik und Versuchsmaterialien. Herrn A. Seide (Fa. Berstorff GmbH) danke ich für die fachlichen Diskussionen und Anregungen während der Glättband-Extrusionsversuche. Herr R. Tebart (Fa. Berstorff GmbH) stand mir bei der praktischen Versuchsdurchführung tatkräftig zur Seite. Dafür danke ich ihm sehr.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Schwester M. Völker und nicht zuletzt bei meiner Frau Elke für die Unterstützung herzlich bedanken.

Carl-Jürgen Wefelmeier

Großburgwedel, im Januar 2008

INHALTSVERZEICHNIS

SYMBOLVERZEICHNIS	V
1. EINLEITUNG	1
2. TECHNOLOGIEN ZUR HERSTELLUNG VON FLACHFOLIEN	3
2.1 CHILL-ROLL-TECHNOLOGIE	3
2.2 GLÄTTWERK-TECHNOLOGIE	4
2.3 WASSERBAD-TECHNOLOGIE	6
2.4 GLÄTTBAND-TECHNOLOGIE	7
3. ZIELSETZUNG	9
4. GRUNDLAGEN DER TEMPERATURBERECHNUNG IN EXTRUDATEN	11
4.1 THERMODYNAMISCHE STOFFDATEN	11
4.1.1 Dichte	11
4.1.2 Spezifische Wärmekapazität	13
4.1.3 Wärmeleiteigenschaften	15
4.2 KRISTALLISATION	16
4.3 GRUNDLAGEN DES WÄRMETRANSPORTS UND DES WÄRMEÜBERGANGS	19
4.3.1 Wärmetransportvorgänge	19
4.3.2 Wärmeübergangskoeffizienten	22
4.3.3 Die Biot-Zahl als Beurteilungskriterium von Wärmeausgleichsvorgängen	25
4.3.4 Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten in der Praxis	26
4.3.5 Größenordnungen von Wärmeübergangskoeffizienten	28
4.4 NUMERISCHE METHODE ZUR BERECHNUNG VON ABKÜHLVERLÄUFEN	30
5. SIMULATIONSPROGRAMME	33
5.1 SCooP - SIMULATION OF THE COOLING PROCESS	33
5.1.1 SCooP - Stammdaten	33
5.1.2 SCooP - Simulationsergebnisse	34
5.2 CHILLROLL	36

5.2.1 ChillRoll - Stammdaten	36
5.2.2 ChillRoll - Simulationsergebnisse.....	37
5.3 UNTERSCHIEDE ZWISCHEN CHILLROLL UND SCOO P	39
5.3.1 Simulationsergebnisse	39
5.3.2 Stammdaten	39
6. SIMULATION DES ABKÜHLPROZESSES BEI DER GLÄTTBANDTECHNOLOGIE.....	41
6.1 ERGEBNISSE AUS DER CHILLROLL-SIMULATION ZUR ERMITTLUNG DER BANDAUFHEIZUNG	50
6.1.1 Typische Bandaufheizcharakteristika.....	50
6.1.2 Wirkung einer Parametervariation auf die Bandaufheizung bei der ChillRoll-Simulation	54
6.2 ERGEBNISSE AUS DER CHILLROLL-SIMULATION ZUR ERMITTLUNG DER ASYMMETRIE DER FOLIENKÜHLUNG	59
6.3 VERGLEICH ZWISCHEN CHILLROLL- UND SCOOP-SIMULATIONEN BEI DER BERECHNUNG DER FOLIENTEMPERATUR IM GLÄTTSPALT	64
6.4 EINFLUSS DER DUMMY-SCHICHT AUF DAS SIMULATIONSERGEBNIS BEI CHILLROLL.....	71
6.5 GANZHEITLICHE ANALYSE DER KÜHLSTRECKE	77
6.5.1 Analyse der gesamten Kühlstrecke für die Glättband-Extrusionslinie	77
6.5.2 Vernachlässigung der 2. Glättwerkwalze.....	91
6.6 PROZESSOPTIMIERUNG BEI DER GLÄTTBAND-TECHNOLOGIE.....	93
6.7 WÄRMESTROMBILANZ IM GLÄTTSPALT	102
7. GLÄTTWERK- UND GLÄTTBANDABKÜHLPROZESSE IM VERGLEICH	107
7.1 ALLGEMEINES ZUR SIMULATION DES ABKÜHLPROZESSES BEI DER GLÄTTWERK-TECHNOLOGIE.....	107
7.2 VERGLEICH VON GLÄTTWERK- UND GLÄTTBANDPROZESSEN.....	108
8. WALZENAUFHEIZUNG.....	119
8.1 WALZENAUFHEIZUNG BEI DER GLÄTTWERK- UND GLÄTTBANDTECHNOLOGIE.....	119
8.2 ÜBERSCHLÄGIGE BERECHNUNG DER WALZENAUFHEIZUNG.....	128
9. PROZESSANALYSE	133
9.1 DSC-ANALYSE ZUR BESTIMMUNG DES KRISTALLISATIONSGRADES	133
9.2 MECHANISCHE PRÜFUNGEN	135
9.2.1 Zugversuche.....	135
9.2.2 Durchstoßversuche	138

9.3 OPTISCHE PRÜFUNGEN	140
9.3.1 Glanzmessung	140
9.3.2 Spektrophotometer-Messung	141
9.3.3 Folienoberflächenphänomene bei der Glättband-Technologie.....	144
9.3.4 Untersuchung des Schichtaufbaus coextrudierter Folien	148
9.3.5 Folienkrümmung infolge Verzug	154
10. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND FAZIT.....	157
LITERATUR	159
ANHANG	163