

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 Grundlagen eigenverstärkter Thermoplaste	6
2.1 Werkstoffkunde	6
2.1.1 Aufbau, Eigenschaften und Einsatzgebiete von Polycarbonat	6
2.1.2 Materialverhalten	8
2.1.3 Molekülorientierungen	20
2.2 Verfahren zur Einbringung von Molekülorientierungen	26
2.2.1 Molekülorientierungen im Schmelzbereich	26
2.2.2 Molekülorientierungen im energieelastischen und entropieelastischen Bereich	28
2.3 Stand der Forschung	34
3 Herstellung monoaxial gereckter Polycarbonatfolie	37
3.1 Verwendete Materialien	37
3.2 Flachfohlenextrusion	38
3.3 Uniaxiales Recken	39
4 Materialcharakterisierung	42
4.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	42
4.2 Analyse der Orientierungsfreudigkeit	43
4.3 Spannversuche unter Temperatur	44
4.3.1 Einfluss der Geschwindigkeit	47
4.3.2 Einfluss der Dehnung	48

4.3.3	Einfluss der Temperatur.....	49
4.3.4	Spannversuch mit Abkühlen in der Haltephase.....	49
5	Modelle zur Beschreibung des Folientemperaturverlaufs	51
5.1	Arten der Wärmeübertragung	51
5.1.1	Wärmeleitung.....	51
5.1.2	Wärmekonvektion	52
5.1.3	Wärmestrahlung.....	53
5.2	Thermische Zusammenhänge.....	53
5.3	Analytische Beschreibung des Folientemperaturverlaufs.....	54
5.3.1	Modellentwicklung.....	55
5.3.2	Messgrößen zur Beschreibung des Folientemperaturverlaufs	61
5.3.3	Modellverifizierung	68
5.4	Numerische Beschreibung des Folientemperaturverlaufs	73
5.4.1	Anwendung der FDM	74
5.4.2	Beschreibung des Folientemperaturverlaufs mit der FDM	76
6	Modell zur Beschreibung des Reckprozesses.....	79
6.1	Herleitung der Differentialgleichung	79
6.2	Spannungsexplizite Integralform.....	80
6.3	Grenzwertbetrachtung	83
6.4	Verallgemeinertes Modell	84
6.5	Parameteridentifikation	85
6.6	Einfluss der Anzahl der Maxwell-Elemente	88
6.7	Interpretation	90
6.7.1	Zugphase	92
6.7.2	Haltephase.....	94
7	Foliendickenhomogenisierung durch Recken.....	97
8	Experimentelle Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften	108

8.1	Vorversuche	109
8.2	Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften	110
8.2.1	Einfluss der Recktemperatur.....	110
8.2.2	Einfluss des Reckverhältnisses	111
8.2.3	Einfluss der Reckgeschwindigkeit.....	114
8.2.4	Einfluss des Reckverhältnisses bei optimierten Prozesseinstellungen.....	117
8.2.5	Fazit	120
8.3	Robustheit des Reckprozesses	121
8.3.1	Vorhersage des Modells	122
8.3.2	Schwankung der Prozessparameter.....	126
8.3.3	Robustheitsoptimierung	128
8.4	Beständigkeit der gereckten Polycarbonatfolien	129
8.4.1	Wärmebeständigkeit	129
8.4.2	Witterungsbeständigkeit.....	130
9	Vergleich unterschiedlicher Recktechnologien	136
9.1	Gegenüberstellung der beiden Reckverfahren	136
9.1.1	Planares Recken auf dem Reckrahmen KARO IV	137
9.1.2	Uniaxiales Recken auf der monoaxialen Reckanlage	137
9.2	Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften	138
10	Wettbewerbsvergleich	142
10.1	Aufbau und Eigenschaften	142
10.1.1	Biaxial orientierte Polypropylenfolie (BOPP)	142
10.1.2	Biaxial orientierte Polyethylenterephthalatfolie (BOPET)	143
10.1.3	Biaxial orientierte Polyamidfolie (BOPA)	144
10.1.4	Monoaxial orientierte Polycarbonatfolie (MOPC).....	144
10.2	Rohstoffpreise	144
10.3	Experimentelle Untersuchungen	145

10.3.1	Zugversuche	145
10.3.2	Schlagzugversuche.....	146
10.3.3	Messung der Wärmeformbeständigkeit	147
10.3.4	Messung der Transmission.....	149
10.3.5	Glanzmessung	151
10.4	Gegenüberstellung der Eigenschaften	152
11	Zusammenfassung	153
12	Ausblick.....	157
12.1	Herstellung biaxial orientierter Polycarbonatfolien.....	157
12.2	Erzeugung einer Gradierung in der Polycarbonatfolie.....	158
12.2.1	Lokale Wärmebehandlung nach dem Recken.....	158
12.2.2	Lokal unterschiedliche Temperierung während des Reckens	162
12.2.3	Lokale Vernetzung vor der Umformung	163
13	Literaturverzeichnis.....	167
Anhang	1
A1	Versuchsplan für die Spannversuche unter Temperatur	2
A2	Technische Zeichnung der Reckanlage	3
A3	Modell zur Berechnung des Folientemperaturverlaufs	4
A3.1	Temperaturmessung der Temperiermedien (langsame Reckgeschwindigkeit)	4
A3.1.1	Ergebnisse der Walzen 1 bis 3	4
A3.1.2	Ergebnisse der Walzen 4 bis 6	4
A3.1.3	Ergebnisse der Walzen 7 bis 9	5
A3.1.4	Ergebnisse der Walzen 10 und 11.....	5
A3.2	Temperaturmessung der Temperiermedien (schnelle Reckgeschwindigkeit)	6
A3.2.1	Ergebnisse der Walzen 1 bis 3	6
A3.2.2	Ergebnisse der Walzen 4 bis 6	6

A3.2.3	Ergebnisse der Walzen 7 bis 9	7
A3.2.4	Ergebnisse der Walzen 10 und 11	7
A3.3	Berechnung des Verlustfaktors f	8
A4	Beispieltabelle FDM	10
A4.1	Temperaturverlauf auf Walze sechs	10
A4.2	Temperaturverlauf zwischen Walze sechs und sieben	11
A5	Robustheitsanalyse	12
A5.1	Versuchsplan zur Modellbildung	12
A5.2	Versuchsplan zur Ermittlung der Schwankung der Prozessparameter	13
A5.3	Schwankung der Prozessparameter	14
Lebenslauf	15