

1	EINLEITUNG UND MOTIVATION.....	1
2	STAND DER TECHNIK UND ABLEITUNG DER FORSCHUNGSFRAGE	5
2.1	Schaumextrusion thermoplastischer Kunststoffe.....	5
2.2	Grundlagen der Schaumentstehung im Extrusionsprozess	8
2.2.1	Sorptions- und Diffusionsvorgänge in der Schmelze	9
2.2.2	Rheologisches Verhalten treibmittelbeladener Schmelzen	10
2.2.3	Nukleierung und Einfluss der Strömung auf die Zellkeime	13
2.2.4	Einfluss des Schaumextrusionsprozesses auf die Nukleierung	17
2.2.5	Zellwachstum und Erstarrung	17
2.3	Aktuelle Herausforderungen bei der Schaumextrusion.....	20
2.3.1	Schäumfähigkeit von Polypropylen	20
2.3.2	Einsatz von nachhaltigen Treibmitteln in der Schaumextrusion	21
2.3.3	Schäumen thermoplastischer Kunststoffe mit Treibmittelgemischen	23
2.3.4	Modellierung des Schäumprozesses in der Extrusion	25
2.4	Zielsetzung und methodischer Ansatz	29
3	EINGESETZTE MATERIALIEN UND METHODEN	32
3.1	Anlagentechnik.....	32
3.1.1	Schaumextrusionsanlage	32
3.1.2	Schaumextrusionswerkzeuge	33
3.2	Materialien	35
3.2.1	Kunststoffe	35
3.2.2	Treibmittel	36
3.2.3	Additive	37
3.3	Analysemethoden.....	37
3.3.1	Bestimmung der Rohmaterialeigenschaften	37
3.3.2	Inline-Messung der Schmelzeviskosität	39
3.3.3	Inline-Erfassung der Sorptionseigenschaften	42
3.3.4	Analyse der Schaumeigenschaften	42
4	MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -MODELLIERUNG	45
4.1	Scherviskosität.....	46
4.1.1	Ermittlung der Viskosität von PP mit Treibmittelbeladung	49
4.1.2	Einfluss der Co-Treibmittel auf die Viskosität der Schmelze	51
4.1.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	54
4.2	Dehnviskosität.....	55
4.3	Löslichkeitsverhalten	57
4.3.1	Ermittlung der Löslichkeitskoeffizienten mittels Inline-Rheometer	58
4.3.2	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	61
4.4	Dichte und Phasenübergänge.....	63
4.4.1	Schmelzedichte (pvT-Verhalten) und Phasenübergänge der Kunststoffe	63
4.4.2	Treibmitteldichte	67
4.4.3	Dichte der treibmittelbeladenen Schmelze	69

4.5 Diffusionskoeffizienten und Aktivierungsenergie.....	72
4.5.1 Ermittlung von Diffusionskoeffizienten aus Molekulardynamiksimulationen	73
4.5.2 Bestimmung der Aktivierungsenergie mittels Arrheniusgraphen	74
4.6 Oberflächenspannung	75
5 PROZESSMODELL	76
5.1 Modellierung des Schäumprozesses im Extrusionswerkzeug.....	77
5.1.1 Verwendung von dimensionslosen Kennzahlen	77
5.1.2 Randbedingungen, Annahmen und Voraussetzungen	79
5.2 Implementierung des Modells	80
5.2.1 Berücksichtigung der Blasenbildung im Fließkanal	82
5.2.2 Berücksichtigung der Scherung bei der Nukleierung	84
5.2.3 Bedingungen für das Zellwachstum	86
5.2.4 Berechnung der Kristallisationstemperatur.....	86
5.2.5 Grafische Bedienoberfläche (GUI).....	88
5.2.6 Erweiterbarkeit und Performance des Prozessmodells	89
5.3 Einflussanalyse mittels Parameterstudie.....	89
5.3.1 Durchführung der Parameterstudie	90
5.3.2 Einfluss des Massedurchsatzes auf die Ausgangsgrößen.....	90
5.3.3 Temperatoreinfluss	92
5.3.4 Einfluss des Werkzeugspalts	94
5.3.5 Variation des Gesamtreibmittelanteils.....	96
5.3.6 Einfluss der Treibmittelzusammensetzung	98
5.3.7 Vergleich der unterschiedlichen Co-Treibmittel.....	99
5.3.8 Methodische Auswertung der Kennzahlverläufe	100
5.3.9 Sensitivitätsanalyse	101
5.3.10 Einordnung und Bewertung der Parameterstudie	102
6 VALIDIERUNG DES PROZESSMODELLS	104
6.1 Schaumfolienextrusion von PP.....	104
6.1.1 Versuchsdurchführung.....	104
6.1.2 Herstellung von Referenzschaumfolien mit CO ₂	108
6.1.3 Schaumfolienherstellung mit Treibmittelgemischen	110
6.2 Einfluss der Prozessparameter und der Treibmittel auf das Schäumverhalten	111
6.2.1 Beurteilung der hergestellten Schaumfolien	111
6.2.2 Validierung des Prozessmodells anhand gemessener Prozessdaten	116
6.2.3 Analyse der Wirkbeziehungen mit dem Prozessmodell	117
6.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	118
7 FAZIT UND AUSBLICK	120
8 ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY	123
8.1 Zusammenfassung	123
8.2 Summary	124

9	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	125
9.1	Abkürzungen	125
9.2	Formelzeichen.....	126
9.3	Indizes.....	129
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	131
11	ANHANG.....	149
11.1	Materialmodell HMS-PP	149
11.2	Materialmodell PP-UMS.....	150
11.3	DSC-Kurven PP-UMS.....	152
11.4	Formeln zur Berechnung der Kristallisationstemperatur	153
11.5	Spezifikation Material- und Prozessmodell.....	153
11.6	Anlageneinstellungen und Temperaturprofil Extruder (Schaumfolienextrusion)	154
11.7	Anlageneinstellungen und Temperaturprofil Extruder (Inline-Rheometer)	155