

1	EINLEITUNG UND MOTIVATION	1
2	STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG IM THERMOFORMEN	5
2.1	Möglichkeiten zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz im Thermoformen	7
2.1.1	Pneumatisches Vorstrecken	7
2.1.2	Temperaturprofilierung	8
2.1.3	Stempelver Streckung und Einflussgrößen auf die Wanddickenverteilung der Formteile	10
2.2	Kontinuumsmechanik und mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	17
2.3	Angestrebte Wanddickenverteilung thermogeformter Produkte	21
2.4	Zielsetzung und Vorgehen sowie abgeleitete Forschungsfragen	22
3	VERSUCHSAUFBAU UND AUSWERTUNGSMETHODIK	25
3.1	Verwendete Anlagen- und Werkzeugtechnik	25
3.2	Auswahl der Folienmaterialien	25
3.3	Verwendete Mess- und Prüftechnik	26
3.3.1	Messung der Wanddickenverteilung der Formteile	26
3.3.2	Temperaturmessungen von Folien und Stempeln	26
3.3.3	Mechanische Prüfungen von Folien und Formteilen	27
3.3.4	Messung der Sauerstofftransmission	28
3.3.5	Messung der Stempelkräfte	28
3.3.6	Messung der Oberflächenrauheiten der eingesetzten Vorstreckstempel	29
3.3.7	Aufnahmen des Ver Streckprozesses mittels Hochgeschwindigkeitskamera	29
3.4	Darstellung der Wanddickenverteilungen sowie Berechnung der Homogenität	29
3.4.1	Auswertungsmethodik und Darstellung der ermittelten Wanddickenverteilungen	29
3.4.2	Berechnung der Homogenität der Formteile	31
4	AUSLEGUNG UND HERSTELLUNG DER VERWENDETEN VORSTRECKSTEMPEL	34
4.1	Auslegung der Stempelgeometrie nach Illig und Schwarzm ann	34
4.2	Herstellung der Vorstreckstempel	35
4.3	Eingrenzung des Versuchsraums – Basiseinstellung des Prozesses	36
5	EINFLUSS VERSCHIEDENER STEMPELGEOMETRIEN SOWIE FOLIENTEMPERATUREN AUF DIE WANDDICKENVERTEILUNG	39
5.1	Analyse der Wanddickenverteilungen bei Verarbeitung von Polystyrol	40
5.1.1	Einfluss des Stempelkantenradius	40
5.1.2	Einfluss der Stempelwandschräge	44
5.1.3	Einfluss der Folientemperatur	47
5.1.4	Effektanalyse der geometrischen Faktoren und Folientemperatur auf die Homogenität bei Polystyrol	51
5.1.5	Zwischenfazit zur Verarbeitung von Polystyrol	56
5.2	Analyse der Wanddickenverteilungen bei Verarbeitung von Polypropylen	57
5.2.1	Einfluss des Stempelkantenradius	57
5.2.2	Einfluss der Stempelwandschräge	61
5.2.3	Einfluss der Folientemperatur	63

5.2.4	Effektanalyse der geometrischen Faktoren und Folientemperatur auf die Homogenität bei Polypropylen.....	68
5.2.5	Zwischenfazit zur Verarbeitung von Polypropylen.....	72
5.3	Fazit zum Einfluss der Stempelgeometrie sowie der Folientemperatur	73
6	EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER AUF DIE WANDDICKENVERTEILUNG	75
6.1	Auswahl der Vorstreckstempel sowie Eingrenzung des Versuchsraums	75
6.2	Einfluss der Verstreckgeschwindigkeit bei 100 % Formluftzuschaltung.....	77
6.3	Einfluss der Folientemperatur bei 100 % Formluftzuschaltung.....	80
6.4	Einfluss des Verstreckwegs bei 100 % Formluftzuschaltung.....	82
6.5	Einfluss des Zuschaltpunkts der Formluft nach 50 % des Verstreckwegs	83
6.6	Effektanalyse - Einflüsse der Prozessparameter auf die Homogenität der Formteile.....	85
6.6.1	Signifikanzen und Effekte bei der Verarbeitung von Polystyrol	86
6.6.2	Signifikanzen und Effekte bei der Verarbeitung von Polypropylen	91
6.7	Fazit zum Einfluss der Prozessparameter auf die Wanddickenverteilung	96
7	ÜBERTRAGBARKEITSANALYSE DER BISHERIGEN ERKENNTNISSE AUF EINE UNGÜNSTIGE STEMPELGEOMETRIE MIT INHOMOGENER WANDDICKENVERTEILUNG	99
7.1	Auswahl der ungünstigen Stempelgeometrien sowie der Prozessparameter	99
7.2	Analyse der Wanddickenverteilungen bei Verwendung der homogenisierenden Prozesseinstellungen.....	100
7.3	Fazit zur Anpassung der Wanddickenverteilung bei Verwendung einer ungünstigen Stempelgeometrie sowie Variation der Prozessparameter	102
8	ANALYSE DER TOPLOAD-STABILITÄT DER FORMTEILE SOWIE KORRELATION MIT DER WANDDICKENHOMOGENITÄT.....	104
8.1	Korrelation von Topload-Stabilität und Homogenität der Formteile.....	104
8.2	Korrelation von Topload-Stabilität und minimaler Wanddicke der Formteile.....	107
8.3	Fazit zur Korrelation zwischen der Topload-Stabilität und des Bewertungskriteriums	108
9	EINFLUSS SPITZER STEMPEL SOWIE DER STEMPELOBERFLÄCHENRAUHEIT UND -TEMPERATUR AUF DIE WANDDICKENVERTEILUNG	109
9.1	Einfluss von spitzen Stempeln auf die Wanddickenverteilung.....	109
9.2	Einfluss der Stempeltemperatur auf die Wanddickenverteilung.....	112
9.3	Einfluss der Stempelrauheit auf die Wanddickenverteilung.....	113
10	FAZIT & AUSBLICK.....	119
11	ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY	123
11.1	Zusammenfassung.....	123
11.2	Summary.....	124
12	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	125
12.1	Abkürzungen	125

12.2	Formelzeichen.....	125
12.3	Indizes.....	126
13	LITERATUR.....	127
14	ANHANG.....	136
14.1	Einstellungen der Strahlerleistungen von Ober- und Unterheizung	136
14.2	Berechnung der theoretischen ideal homogenen Wanddicke.....	136
14.3	Auswahl der Stempelkantenradien nach [IS16]	137
14.4	Darstellung der Polypropylen-Folienwellung	138
14.5	Auswertung der Formteilgewichte von Polystyrol und Polypropylen	138
14.6	Weitere Wanddickenverläufe von Polystyrol	139
14.6.1	Einfluss des Stempelkantenradius	139
14.6.2	Einfluss der Stempelwandschräge	140
14.6.3	Einfluss der Folientemperatur.....	140
14.7	Weitere Wanddickenverläufe Polypropylen	143
14.7.1	Einfluss des Stempelkantenradius	143
14.7.2	Einfluss der Stempelwandschräge	143
14.7.3	Einfluss der Folientemperatur.....	144
14.8	Vergleich der verwendeten Folien aus [HB19] und [BH20] sowie der vorliegenden Dissertationsschrift.....	147
14.9	Übersicht über die Homogenitäten der Wanddickenverteilungen in Abhängigkeit der Stempelgeometrie sowie Folientemperatur	149
14.10	Übersicht über die Homogenitäten der Wanddickenverteilungen in Abhängigkeit der Prozessparameter	151
14.11	Gegenüberstellung der Absolutwerte von Topload-Stabilität und Homogenität sowie Wanddickenverteilungen	152
14.12	Falschfarbenplots der Rauheitenmessungen	157