

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit .....	3
1.3	Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>8</b>
2.1	Sensoren zur Prozessanalyse beim Spritzgießen .....	8
2.2	Ultraschall als Mittel zur Bauteilprüfung und Prozessanalyse.....	9
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN DER (ULTRA-)SCHALLAUSBREITUNG.....</b>	<b>11</b>
3.1	Einleitung.....	11
3.2	Zusammenhang von akustischen und mechanischen Eigenschaften.....	12
3.2.1	Wellenausbreitung in linear elastischen Stoffen .....	12
3.2.2	Wellenausbreitung in viskoelastischen Materialien .....	14
3.3	Energien und Leistungen sowie das Verhalten an Grenzflächen .....	16
<b>4</b>	<b>IM RAHMEN DER ARBEIT EINGESETZTE MESSTECHNIK .....</b>	<b>19</b>
4.1	Einleitung.....	19
4.2	Das Wellenbild als Ergebnis einer Ultraschallmessung.....	21
4.2.1	Lattice-Diagramm.....	23
4.3	Verwendete Geräte.....	24
4.3.1	Ultraschallwandler und deren Frequenzspektrum .....	26
4.3.1.1	Zum Begriff des Frequenzspektrums .....	26
4.3.1.2	Auswahlkriterien.....	28
4.3.1.3	Kopplungsmittel.....	29
4.3.1.4	Schallfeld der eingesetzten Ultraschallwandler .....	29
<b>5</b>	<b>AKUSTISCHE UNTERSUCHUNGEN BEI RAUMTEMPERATUR.....</b>	<b>30</b>
5.1	Untersuchte Materialien.....	30
5.2	Versuchsaufbau und Durchführung .....	31
5.3	Bestimmung akustischer Eigenschaften bei Betrachtung der Signale im Frequenzbereich ....	33
5.3.1	Ausbreitung anharmonischer Wellen .....	35
5.3.2	Modellierung der Ultraschallübertragung basierend auf Methoden der Signalübertragung .....	37
5.3.2.1	Systemtheorie.....	37
5.3.2.2	Anwendung der Systemtheorie am Beispiel des Impuls-Transmission-Verfahrens .....	40
5.3.2.3	Zeitvariante und zeitinvariante Formulierung des Übertragungsverhaltens .....	42
5.3.3	Modellierung des Übertragungsverhaltens des gezeigten Versuchsaufbaus .....	44
5.4	Untersuchungsergebnisse bei Betrachtung der Signale im Frequenzbereich.....	50
5.4.1	Longitudinale und transversale Phasengeschwindigkeit .....	51
5.4.2	Longitudinaler Schwächungskoeffizient .....	59
5.4.3	Kramers-Kroning-Beziehung .....	64
5.4.4	Frequenzunabhängige Formulierung des Reflektionsverhaltens .....	68
5.4.5	Transversaler Schwächungskoeffizient .....	69
5.4.6	Abschließende Diskussion des Schwächungsverhaltens .....	70
5.5	Bestimmung akustischer Eigenschaften bei Betrachtung der Signale im Zeitbereich.....	71

5.5.1	Ermittlung der Schallgeschwindigkeit durch Laufzeitbewertung .....	72
5.5.1.1	Variante 1: Peak-Kriterium.....	74
5.5.1.2	Variante 2: Gruppenlaufzeit (Schwerpunkt-Kriterium) .....	75
5.5.1.3	Diskussion der unterschiedlichen Kriterien zur Laufzeitzuordnung.....	76
5.5.1.4	Dispersion.....	77
5.5.2	Ermittlung des Schwächungskoeffizienten durch Amplitudenbewertung .....	78
5.5.2.1	Variante 1: Signalamplitude .....	78
5.5.2.2	Variante 2: Impulsenergie.....	79
5.6	Untersuchungsergebnisse bei der Betrachtung der Signale im Zeitbereich .....	79
5.7	Zwischenfazit zu den akustischen Untersuchungen bei Raumtemperatur.....	87
6	<b>AKUSTISCH-MECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>89</b>
6.1	Untersuchte Materialien und Probekörper .....	89
6.2	Untersuchung der Zugstabgeometrie.....	89
6.2.1	Akustische Untersuchungen.....	89
6.2.2	Berechnung der mechanischen Kennwerte auf Grundlage der akustischen Eigenschaften .....	92
6.2.3	Vergleich mit mechanischen Untersuchungen bei transienter Belastung.....	94
6.3	Untersuchungen der Plattengeometrie.....	95
6.3.1	Akustische Untersuchungen .....	95
6.3.2	Vergleich mit mechanischen Untersuchungen bei dynamischer Belastung .....	97
6.3.2.1	Polypropylen .....	98
6.3.2.2	Polyamid 6 .....	101
6.3.2.3	Polystyrol, schlagzäh modifiziert .....	103
6.3.2.4	Polymethylmethacrylat .....	105
6.4	Zwischenfazit zu den akustisch-mechanischen Untersuchungen.....	106
7	<b>AKUSTISCHE UNTERSUCHUNGEN BEI VARIATION VON DRUCK UND TEMPERATUR....</b>	<b>108</b>
7.1	Untersuchte Materialien und Versuchsdurchführung .....	109
7.1.1	Angewandte Methode zur Berechnung der akustischen Eigenschaften .....	110
7.2	Ergebnisse .....	111
7.2.1	Polystyrol, schlagzähmodifiziert (HiPS) .....	111
7.2.2	Polymethylmethacrylat (PMMA) .....	115
7.2.2.1	Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Schallgeschwindigkeit .....	116
7.2.3	Polypropylen (PP) .....	119
7.2.4	Polyamid 6 (PA6).....	121
8	<b>UNTERSUCHUNG DES SPRITZGIEßPROZESSES MITTELS ULTRASCHALL .....</b>	<b>124</b>
8.1	Untersuchte Materialien und Versuchsaufbau.....	124
8.2	Angewandte Methoden zur Berechnung akustischer Kennwerte.....	128
8.3	Untersuchungsergebnisse – amorphe Thermoplaste .....	132
8.3.1	Diskussion eines ausgewählten Versuchspunkts .....	132
8.3.2	Simulationsrechnung zum Verlauf der Schallgeschwindigkeit über der Zykluszeit .....	136
8.3.3	Variation ausgewählter Maschinenparameter .....	143
8.3.3.1	Variation der Werkzeugtemperatur .....	143
8.3.3.2	Variation der Masetemperatur .....	146
8.3.3.3	Variation der Nachdruckhöhe .....	147

8.3.3.4	Variation der Einspritzgeschwindigkeit.....	149
<b>8.4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse – teilkristalline Thermoplaste .....</b>	<b>151</b>
8.4.1	Diskussion eines ausgewählten Versuchspunkts (Polypropylen).....	152
8.4.2	Variation ausgewählter Maschinenparameter .....	156
8.4.2.1	Variation der Werkzeugtemperatur.....	156
8.4.2.2	Variation der Massestemperatur.....	157
8.4.2.3	Variation der Nachdruckhöhe.....	158
<b>9</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK .....</b>	<b>160</b>
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY .....</b>	<b>164</b>
10.1	Zusammenfassung.....	164
10.2	Summary.....	165
<b>11</b>	<b>ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN &amp; INDIZES .....</b>	<b>167</b>
11.1	Abkürzungen .....	167
11.2	Formelzeichen.....	168
11.3	Indizes .....	170
<b>12</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>172</b>
<b>A</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>184</b>
<b>A1</b>	<b>Chemische Zusammensetzung und physikalische Struktur thermoplastischer Kunststoffe ..</b>	<b>184</b>
A1.1	Einleitung .....	184
A1.2	Aufbau von Kunststoffen .....	185
A1.3	Energieelastizität, Entropieelastizität und Plastizität.....	189
A1.4	Homopolymere, Copolymere und Polymerblends .....	189
<b>A2</b>	<b>Über das viskoelastische Verhalten von Kunststoffen .....</b>	<b>191</b>
A2.1	Zeitabhängigkeit am Beispiel von Retardation und Relaxation .....	191
A2.2	Boltzmann'sches Superpositionsprinzip .....	193
A2.3	Frequenzabhängigkeit bei dynamischer Belastung .....	194
A2.4	Einfluss der Temperatur .....	195
A2.5	Zeit-Temperatur-Verschiebung .....	197
A2.6	Mechanische Analogiemodelle .....	199
A2.7	Mechanische Kennwerte und deren Beziehungen.....	205
<b>A3</b>	<b>Beziehungen zwischen den Moduln (homogen-isotrope Werkstoffe).....</b>	<b>207</b>
<b>A4</b>	<b>Erläuterungen zum Spannungs- und Dehnungstensor.....</b>	<b>208</b>
<b>A5</b>	<b>Ausgesuchte Materialkennwerte der untersuchten Thermoplaste .....</b>	<b>212</b>
A5.1	pVT-Verhalten .....	212
A5.2	Spezifische Wärmekapazität .....	214
A5.3	Wärmeleitfähigkeit .....	216
A5.4	Scherviskosität.....	218
<b>A6</b>	<b>Maschineneinstellungen der Zentralpunkte .....</b>	<b>220</b>