

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	1
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	3
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	STAND DER TECHNIK	8
2.1	Sensoren zur Prozessanalyse beim Spritzgießen	8
2.2	Ultraschall als Mittel zur Bauteilprüfung und Prozessanalyse	9
3	GRUNDLAGEN DER (ULTRA-)SCHALLAUSBREITUNG.....	11
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
4	IM RAHMEN DER ARBEIT EINGESETZTE MESSTECHNIK	19
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
5	AKUSTISCHE UNTERSUCHUNGEN BEI RAUMTEMPERATUR	30
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	AKUSTISCH-MECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN	89
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 transientser 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	AKUSTISCHE UNTERSUCHUNGEN BEI VARIATION VON DRUCK UND TEMPERATUR....	108
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	UNTERSUCHUNG DES SPRITZGIEßPROZESSES MITTELS ULTRASCHALL	124
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 Massetemperatur.....	146
8.3.3.3	Variation der Nachdruckhöhe.....	147

8.3.3.4	Variation der Einspritzgeschwindigkeit.....	149
8.4	Untersuchungsergebnisse – teilkristalline Thermoplaste.....	151
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 Masstemperatur.....	157
8.4.2.3	Variation der Nachdruckhöhe.....	158
9	FAZIT UND AUSBLICK	160
10	ZUSAMMENFASSUNG UND SUMMARY	164
10.1	Zusammenfassung.....	164
10.2	Summary.....	165
11	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN & INDIZES	167
11.1	Abkürzungen	167
11.2	Formelzeichen.....	168
11.3	Indizes	170
12	LITERATUR	172
A	ANHANG	184
A1	Chemische Zusammensetzung und physikalische Struktur thermoplastischer Kunststoffe ..	184
A1.1	Einleitung	184
A1.2	Aufbau von Kunststoffen	185
A1.3	Energieelastizität, Entropieelastizität und Plastizität.....	189
A1.4	Homopolymere, Copolymere und Polymerblends	189
A2	Über das viskoelastische Verhalten von Kunststoffen	191
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
A3	Beziehungen zwischen den Moduln (homogen-isotrope Werkstoffe).....	207
A4	Erläuterungen zum Spannungs- und Dehnungstensor	208
A5	Ausgesuchte Materialkennwerte der untersuchten Thermoplaste	212
A5.1	pVT-Verhalten	212
A5.2	Spezifische Wärmekapazität	214
A5.3	Wärmeleitfähigkeit.....	216
A5.4	Scherviskosität.....	218
A6	Maschineneinstellungen der Zentralpunkte	220