

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 BESCHREIBUNG DES SPRITZGIEßPROZESSES	6
2.1 Prozessablauf	6
2.2 Maschinengrößen und Störgrößen	7
2.3 Prozessgrößen	8
2.4 Qualitätsgrößen	9
2.5 Modellierung der Zusammenhänge verschiedener Größen	10
2.5.1 Modellkategorien	10
2.5.2 Physikalische Modellbildung	11
2.5.3 Experimentelle Modellbildung	12
2.6 Beschreibung des Prozesses im pVT-Diagramm	13
2.6.1 Bestimmung des pVT-Verhaltens	15
2.6.2 Mathematische Approximation	17
3 IN DEN UNTERSUCHUNGEN EINGESETZTE BETRIEBSMITTEL.....	19
3.1 Spritzgießmaschinen	19
3.2 Formteile	19
3.2.1 Plattengeometrie	20
3.2.2 Fließspiralengeometrie	21
3.2.3 Demonstratorbauteil	22
3.3 Kunststoffe	23
4 REGELUNG DES SPRITZGIEßPROZESSES.....	24
4.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik	24
4.1.1 Definition	24
4.1.2 Entwurf und Anwendung von Reglern	25
4.1.3 Erweiterungen der grundlegenden Regelkreisstruktur	26
4.1.4 Modellbasierte Regelung	26
4.2 Regelung auf Basis von Maschinengrößen	28
4.2.1 Einspritzphase und Umschaltpunkt	28
4.2.2 Nachdruckphase	28
4.3 Kompensation von Störeinflüssen durch Regelung auf Basis von Prozessgrößen	30
4.3.1 Einspritzphase und Umschaltpunkt	31
4.3.2 Nachdruckphase	32
4.4 Zyklusübergreifende Strategien zur Qualitätsregelung	33
4.5 Berücksichtigung des pVT-Verhaltens bei der Prozessführung	34
4.5.1 Zusammenhang zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen	34
4.5.2 Verfahren zur pVT-basierten Prozessführung	36
4.6 Strategien zur Regelung des Werkzeuginnendruckverlaufs	39
4.7 Zwischenfazit	41
5 NEUENTWICKLUNG DES SYSTEMS ZUR WERKZEUGINNENDRUCKREGELUNG.....	43
5.1 Prinzip der modellprädiktiven Regelung	43
5.2 Prozessmodelle für die modellprädiktive Regelung	46
5.2.1 Lineare Modellierung	46

5.2.2	Nichtlineare Modellierung mit Künstlichen Neuronalen Netzen	47
5.2.3	Gewinnung der Modellparameter	51
5.3	Anforderungen an eine Neuentwicklung des bestehenden Regelungssystems	52
5.4	Beschreibung des neu entwickelten Regelungssystems	54
5.4.1	Eingesetzte Entwicklungsplattformen	54
5.4.2	Hauptprogramm <i>IMPL_Control</i>	55
5.4.3	Modul zur Modelleinstellung <i>IMPL_Ident</i>	57
5.5	Analyse der Regelstrecke	58
5.5.1	Überblick der Systemkomponenten	59
5.5.2	Stellsignalformen für die Identifikationsversuche	59
5.5.3	Zeitliches Verhalten der Regelstrecke	63
5.5.4	Nichtlinearität	65
5.5.5	Zeitvarianz	67
5.5.6	Durchführung der Identifikationsversuche	69
5.6	Modellierung des Regelstreckenverhaltens	70
5.6.1	Eingangsgrößen des Modells	70
5.6.2	Innere Struktur des Modells	72
5.6.3	Training und Bewertung der Regelstreckenmodelle	72
5.7	Einsatz des Regelungssystems	76
5.7.1	Methodik zur Bewertung der Regelgüte	76
5.7.2	Vergleich der Regelgüte verschiedener Modelltypen	80
5.7.3	Einfluss der Werkzeuginnendruckregelung auf die Prozesskonstanz	87
6	VERFAHREN ZUR ERMITTlung DES MATERIALVERHALTENS IM PROZESS	91
6.1	Einschränkungen der pVT-Optimierung	91
6.2	Zielsetzung des Verfahrens	92
6.3	Prinzip des Verfahrens	93
6.4	Vorgehen zur Ermittlung eines Materialkennfelds	95
6.4.1	Softwarebausteine zur Messdatenerfassung und Kennfeldermittlung	95
6.4.2	Durchführung der Erfassungsversuche	96
6.4.3	Ermittlung der Stützstellen	99
6.5	Erstellung der Materialkennfelder	100
6.5.1	Störeinfluss: Werkzeugatmung bei der Plattengeometrie	101
6.5.2	Störeinfluss: Infrarot-Temperaturmessung bei der Fließspiralengometrie	103
6.5.3	Schmelzebereich mit konventionellem Ansatz	108
6.5.4	Schmelzebereich mit erweitertem Ansatz	110
6.5.5	Schmelze- und Feststoffbereich	111
6.6	Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die ermittelten Materialkennfelder	114
6.6.1	Vergleich mit Labordaten	114
6.6.2	Nutzung der Abkühlrechnung zur Temperaturermittlung	116
6.6.3	Variation von Werkzeug- und Massestemperatur	118
6.6.4	Reduzierung des Versuchsaufwands	119
6.7	Möglichkeiten zur Bewertung der ermittelten Materialkennfelder	122
6.8	Betrachtung der Erfassungsversuche in den ermittelten Kennfeldern	123
6.9	Vorgabe eines gewünschten Formteilgewichts	125
6.9.1	Plattengeometrie	125
6.9.2	Fließspiralengometrie	128
7	EINSATZ DER pVT-OPTIMIERUNG	132

7.1	Kompensation systematischer Temperaturänderungen	132
7.1.1	Plattengeometrie	132
7.1.2	Fließspiralengeometrie	135
7.2	Kompensation temporärer Störungen.....	138
7.2.1	Störung der MasseTemperatur	139
7.2.2	Störung der Werkzeugtemperatur.....	140
8	FAZIT UND AUSBLICK	145
8.1	Fazit.....	145
8.2	Ausblick.....	146
9	ZUSAMMENFASSUNG & SUMMARY	148
9.1	Zusammenfassung.....	148
9.2	Summary	149
10	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES	151
10.1	Abkürzungen	151
10.2	Formelzeichen.....	152
10.3	Indizes	155
11	LITERATUR	156
12	ANHANG	176
12.1	Übersicht der eingesetzten Spritzgießmaschinen	176
12.2	Hard- und Software des Mess- und Regelungssystems	176
12.2.1	Hardware	176
12.2.2	Software	177
12.3	Effekte von Störeinflüssen auf die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses	178
12.4	Implementierung des modellprädiktiven Regelungsalgorithmus	180
12.5	Ermittlung der dynamischen Ordnung einer Regelstrecke	183
12.6	Möglichkeiten zur Bestimmung des Schmelztemperaturverlaufs.....	185
12.6.1	Infrarot-Thermometrie	185
12.6.2	Abkühlrechnung	189
12.6.3	Vergleich zwischen Infratormessung und Abkühlrechnung	191
12.6.4	Nutzung eines Kontakttemperatursensors.....	194