

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
2	GRUNDLAGEN DER THERMISCHEN WERKZEUGAUSLEGUNG.....	5
2.1	Phasen im Spritzgießprozess und ihre Bedeutung für den thermischen Haushalt.....	5
2.2	Erstarrungsverhalten thermoplastischer Schmelzen im Spritzgießprozess.....	6
2.3	Thermische Werkzeugauslegung mithilfe thermischer Simulationen	9
2.4	Methodische Ansätze zur automatisierten thermischen Werkzeugauslegung.....	10
2.4.1	Experimentell basiertes Design	11
2.4.2	Design und Optimierung auf Basis von Linien konstanten Abstands.....	12
2.4.3	Optimierung mit spezialisierten Algorithmen	13
2.4.4	Modulares / parametrisches Design konturnaher Temperierkanäle.....	14
2.4.5	Festkörpermodellierung basierend auf Topologieoptimierung.....	15
2.5	Ansatz der inversen thermischen Werkzeugauslegung.....	16
2.6	Schwindungs- und Verzugsvorhersage.....	20
2.6.1	Modellierungsansätze und Einschränkungen.....	21
2.6.2	Kühlratenabhängige pVT-Modellierung nach Wang <i>et al.</i>	22
2.7	Bewertung der aktuellen Forschungsarbeiten und Forschungsfragen.....	24
3	PRAKTISCHE VALIDIERUNG DER INVERSEN THERMISCHEN WERKZEUGAUSLEGUNG .	26
3.1	Konstruktion der Probekörper	26
3.2	Auslegung eines Temperiersystems mithilfe der inversen Temperierkanalauslegung.....	30
3.2.1	Konturerzeugung der Probekörper.....	30
3.2.2	Start- und Randbedingungen der thermischen Optimierung.....	31
3.2.3	Ableitung der morphologischen Flächen und Analyse der Materialauswahl.....	32
3.2.4	Erstellung der Temperierkanalgeometrie basierend auf den morphologischen Flächen.....	34
3.2.5	Konstruktion der Formeinsätze und Integration in die Stammform	38
3.3	Simulative und praktische Versuche zur Konzeptvalidierung.....	39
3.3.1	Definition der Qualitätskriterien.....	39
3.3.2	Spritzgießsimulationen - Aufbau	40
3.3.3	Spritzgießsimulationen - Ergebnisse	41
3.3.4	Spritzgießversuche – Aufbau.....	42
3.3.5	Spritzgießversuche – Ergebnisse	44
3.3.6	Erweiterte Versuche und Durchflussanalyse	48
3.4	Analyse und Fazit der praktischen Umsetzung	49
4	ERWEITERUNG DER INVERSEN THERMISCHEN WERKZEUGAUSLEGUNG	51
4.1	Methodische Erweiterung des Zielfunktionalen der inversen thermischen Werkzeugauslegung ..	51
4.1.1	Analyse der Größenordnung der Teilterme	51
4.1.2	Einfluss der Diskretisierung auf das Zielfunktional	52
4.1.3	Analyse und Überarbeitung der Teilterme.....	54
4.1.3.1	Analyse des Optimierungsverfahrens	55

4.1.3.2	Neuformulierung des Zielfunktionals	56
4.2	Implementierung des Modells in die inverse thermische Optimierung	58
4.2.1	Analyse zum Einfluss der Gewichtung auf das erweiterte Modell	63
4.2.2	Überprüfung an verschiedenen Gütebereichen	67
5	ÜBERTRAGBARKEIT AUF EINEN ANWENDUNGSNAHEN DEMONSTRATOR.....	72
5.1	Demonstrator	72
5.2	Modellaufbau der thermischen Optimierung	74
5.3	Ableitung zweier Temperiersysteme	76
5.4	Simulative und praktische Validierung des neuen Zielfunktionals	78
5.4.1	Versuchsplan und Definition der Qualitätskriterien	78
5.4.2	Spritzgießsimulationen - Aufbau	80
5.4.3	Spritzgießsimulationen - Auswertung	82
5.4.4	Spritzgießversuche - Aufbau	86
5.4.4.1	Versuchsdurchführung	88
5.4.4.2	Messaufbau	89
5.4.5	Spritzgießversuche - Auswertung	91
5.4.6	Fazit der praktischen Umsetzung der inversen thermischen Werkzeugauslegung	97
6	AUTOMATISIERTE ABLEITUNG VON TEMPERIERKANÄLEN.....	99
6.1	Anpassung von Teilsegmenten an die morphologischen Oberflächen.....	99
6.2	Verbindung der Teilsegmente mithilfe eines Pfadplanungsalgorithmus.....	102
6.2.1	Aufbereitung des Hindernisses zur effektiven Kollisionsvermeidung.....	103
6.2.2	Grundbegriffe der Graphentheorie	103
6.2.3	Visibility-Graph und Pfadplanungsalgorithmen	104
6.2.4	Effiziente Verbindung der Teilsegmente zu einem durchgängigen Temperierkanalsystem	106
6.2.5	Glättung der generierten Kurven	108
6.2.6	Überprüfung der generierten Kurve auf Kollisionen	108
6.2.7	Strömungsoptimierung und Generierung des Temperierkanals	109
6.3	Übertragung der Methodik auf das Demonstratorformteil.....	112
6.3.1	Simulative Validierung der automatisierten Ableitung mit Prozesssimulation	114
6.3.2	Auswertung der Simulationen	114
7	ERHÖHUNG DER ABBILDUNGSGENAUIGKEIT DURCH KÜHLRATENABHÄNGIGE PVT- MODELLIERUNG.....	116
7.1	Messdatenerhebung.....	116
7.2	Auswertung.....	120
8	FAZIT & AUSBLICK.....	123
8.1	Fazit.....	123
8.2	Ausblick.....	124
8.2.1	Erweiterung der Methodik auf anisotrope Werkstoffe	124
8.2.2	Berücksichtigung der freien Schwindung.....	125
8.2.3	Lokale Anpassung der Wärmeleitfähigkeit des Formenstahls.....	126

8.2.4	Automatische Oberflächengenerierung	126
9	ZUSAMMENFASSUNG	127
10	SUMMARY	128
11	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	129
11.1	Abkürzungen	129
11.2	Formelzeichen	130
11.3	Indizes.....	131
12	LITERATURVERZEICHNIS.....	132
13	ANHANG.....	144
13.1	Verwendete Stoffdaten.....	144
13.1.1	Kunststoffe	144
13.1.2	Stähle	147
13.1.3	Parameter des Modells nach <i>Wang et al.</i> für PC/ABS.....	147
13.1.4	Berechnung der ThO des pvT-Modells nach <i>Wang et al.</i>	148
13.2	Simulationsdaten	149
13.2.1	Konventionelles Temperierlayout für Kasten mit Rippen und Kasten mit Zentrierung	149
13.2.2	Kühlzeitberechnung für Methodikerweiterung in Comsol nach <i>Hopmann et al.</i>	149
13.2.3	Modell der thermischen Optimierung „Kasten mit Rippen“	150
13.2.4	Parameter der Spritzgießsimulationen Kasten mit Rippen und Kasten mit Zentrierung	151
13.2.5	Modell der thermischen Optimierung PiCase	152
13.2.6	Simulationsparameter Validierung PiCase	153
13.2.7	Effektanalyse PiCase Simulation.....	154
13.2.8	Auswertung automatisierte Temperierkanalauslegung	155
13.3	Praxisversuche.....	156
13.3.1	Prozessparameter Spritzgießversuche – Kasten mit Rippen und Kasten mit Zentrierung.....	156
13.3.2	Prüfaufnahme PiCase	157
13.3.3	Prozessparameter Spritzgießversuche - PiCase	157
13.3.4	Statistische Auswertung Praxisversuche – Vergleich <i>Nikoleizig</i> zu neuem Ansatz	158