

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Spritzgießfertigung als Verbund Mensch, Werkzeug und Maschine	1
1.1.1	Produktionsmittel	1
1.1.2	Ausbildung	1
1.1.3	Wirtschaftlichkeit, Rentabilität	1
1.1.4	Energieverbrauch	2
1.1.5	Festlegung der Herstellkosten, Fehlerverursachung	2
1.1.6	Ständige Überwachung der Fertigung	2
1.1.7	Systematische Analyse, Optimierung	3
1.2	Die Situation der Spritzgießverarbeiter in den Fertigungsbetrieben	3
1.2.1	Hersteller von Eigenprodukten	4
1.2.2	Lohnverarbeiter/Zulieferer der Automobilindustrie	4
1.2.3	Systemlieferanten	5
1.3	Die Erkenntnis daraus	6
1.4	Ganzheitlicher Optimierung von Spritzgießprozessen – was ist darunter zu verstehen?	7
1.4.1	Einzelne Phasen in der Prozesskette Spritzgießen	8
1.5	Qualifikation der Mitarbeiter – Personalschulung	9
1.5.1	Intensive Weiterbildung gegen akuten Fachkräftemangel	10
1.5.2	Institute zur Weiterbildung im Bereich Spritzgießverarbeitung	11
1.5.3	Seminare bei Rohstoff- und Spritzgießmaschinenherstellern	12
1.5.4	Fachliteratur und Erfahrungskompendien	14
1.5.5	Ratgeber auf PC-Basis	15
1.5.6	Computerunterstützte Fehlerbehebung	16
<b>2</b>	<b>Wahl des Rohstoffs</b>	<b>17</b>
2.1	Die Wahl des Kunststoffwerkstoffs	17
2.2	Materialvorauswahl – Einflussnahme durch folgende Bedingungen	18
2.3	Werkstoffauswahl	19
2.4	Mechanische Eigenschaften	19
2.5	Oberflächeneigenschaften	19
2.6	Chemikalienbeständigkeit ,Kraftstoffe, Öle	20
2.7	Elektrische Eigenschaften	20
2.8	Thermische Belastung und thermische Eigenschaften	20
2.9	Verhalten gegenüber Umgebungseinflüssen	20
2.10	Fazit zur Rohstoffauswahl	21
2.11	Stetig wachsender Kunststoffverbrauch	21

---

<b>3 Die Bedeutung von Zuschlagstoffen für die anwendungstechnischen Eigenschaften von Kunststoffen</b> .....	23
3.1 Zuschlagstoffe für Polymere .....	23
3.2 Wirkungsmechanismen von Zuschlagstoffen in Thermoplasten .....	23
3.3 Wirkungsmechanismen ausgewählter Zuschlagstoffe .....	24
3.3.1 Antioxidantien .....	24
3.3.2 Füll- und Verstärkungsstoffe .....	25
3.3.3 Farbmittel .....	29
3.4 Modifizierung der Polymere .....	32
3.5 Beeinflussung der Materialeigenschaften durch Blends .....	33
3.6 Brandschutzmittel .....	34
3.6.1 Halogenhaltige Flammschutzmittel .....	36
3.6.2 Phosphorhaltige Flammschutzmittel .....	36
3.6.3 Stickstoffhaltige Flammschutzmittel .....	37
3.6.4 Intumeszierende Flammschutzmittel .....	37
3.6.5 Anorganische Flammschutzmittel .....	37
3.7 Wechselwirkungen von Zuschlagstoffen .....	38
3.8 Die Entwicklung und Fertigung von anwendungsspezifischen Compounds ..	39
3.9 Anwendungen .....	40
3.10 Lasersensitive Compounds .....	41
3.11 Kochplatte von IMS .....	42
3.12 Polyman® CA und Schulablend® CA .....	43
<b>4 Der Spritzgießprozess</b> .....	45
4.1 Auswahlkriterien für eine Spritzgießmaschine .....	45
4.1.1 Allgemeine Anforderung an die Maschinengrundausrüstung .....	45
4.1.2 Spezifische Anforderungen .....	46
4.2 Verfahrenstechnische Voraussetzungen – die qualitätsbestimmenden Parameter .....	46
4.2.1 Materialvorbereitung .....	46
4.2.2 Formfüllung, Balancierung des Angussystems .....	46
4.2.3 Einspritzgeschwindigkeit .....	48
4.2.4 Spritzdruck .....	48
4.2.5 Umschaltung auf Nachdruck, Kompressionsphase .....	48
4.2.6 Die Nachdruck – und Restkühlphase .....	49
4.2.7 Faustregel zum Druckbedarf bzw. Druckverlust im System .....	51
4.2.8 Werkzeugtemperierung/Anforderungen .....	51
4.2.8.1 Temperierkanallayout, prozessbestimmende Parameter .....	52
4.3 Einflüsse der Peripherie Trocknen und Fördern .....	53
4.3.1 Trocknung .....	53
4.3.2 Verweilzeit .....	56
4.3.3 Taupunktregelung .....	58
4.3.3.1 Temperaturabsenkung .....	59
4.3.3.2 Absperrung der Trichter vom Trockenluftstrom .....	59
4.3.3.3 Durchsatzabhängige Luftmengenregelung .....	59
4.3.3.4 Wärmetauschersysteme .....	59

4.3.3.5	Absenkung des Füllstandes. . . . .	60
4.3.3.6	Doppelbauchtrichter. . . . .	60
4.3.4	Förderung. . . . .	61
4.3.4.1	Beschickung der Trocknungstrichter. . . . .	61
4.3.4.2	Förderung von getrocknetem Material. . . . .	61
4.3.4.3	Auslegung von Förderanlagen. . . . .	62
4.3.5	Beispiele aus der Praxis. . . . .	63
4.4	Werkzeugabmusterung und Prozessoptimierung beim Spritzgießen. . . . .	65
4.4.1	Werkzeugabmusterung, Vorgehensweise und Parameter. . . . .	65
4.4.2	Qualitätsermittlung. . . . .	70
4.4.3	Messen und Auswerten der Formteilmaße. . . . .	70
4.4.4	Vorgehensweise Maschineneinstellung. . . . .	73
4.4.5	Schneckenhub. . . . .	73
4.4.5	Berechnen der Zuhaltekraft. . . . .	74
4.4.6	Nachdruckhöhe. . . . .	75
4.4.7	Nachdruckzeit. . . . .	76
4.4.8	Abkühlzeit. . . . .	77
4.4.9	Zylindertemperatur. . . . .	79
4.4.10	Flanschttemperatur. . . . .	80
4.4.11	Werkzeugwandtemperatur. . . . .	80
4.4.12	Schneckenendrehzahl. . . . .	80
4.4.13	Schneckenstaudruck. . . . .	80
4.4.14	Drehmoment an der Schnecke. . . . .	81
4.4.15	Einspritzvorgang. . . . .	81
4.4.16	Umschaltpunkt von Spritzdruck auf Nachdruck optimieren. . . . .	82
4.4.17	Wegabhängige Umschaltung. . . . .	82
4.4.18	Zeitabhängige Umschaltung. . . . .	82
4.4.19	Hydraulikdruckabhängige Umschaltung. . . . .	82
4.4.20	Werkzeuginnendruckabhängige Umschaltung. . . . .	83
4.4.21	Vorgehensweise zur Ermittlung des optimalen Umschaltpunktes. . . . .	83
4.4.22	Formfüllstudie. . . . .	84
4.4.23	Nachdruckhöhe optimieren. . . . .	84
4.4.24	Ermittlung der erforderlichen Zuhaltekraft durch Spritzversuche. . . . .	84
4.4.25	Restmassepolster. . . . .	86
4.4.26	Prozessoptimierung. . . . .	86
4.4.27	Zusammenfassung. . . . .	89
4.4.28	Einspritzgeschwindigkeit. . . . .	91
4.4.29	Einspritzdruck. . . . .	91
4.4.30	Nachdruckhöhe. . . . .	91
4.4.31	Nachdruckdauer. . . . .	91
4.4.32	Abkühlzeit. . . . .	91
4.4.33	Schneckenendrehzahl. . . . .	91
4.4.34	Schneckenstaudruck. . . . .	91
4.4.35	Dosierweg. . . . .	92
4.4.36	Schneckenendkompression. . . . .	92
4.4.37	Restmassepolster. . . . .	92

4.4.38	Umschaltpunkt auf Nachdruck	92
4.4.39	Umschaltart	92
4.4.40	Flanschtemperatur	92
4.4.41	Werkzeugwandtemperatur	93
4.4.42	Schließkraft	93
4.4.43	Zylindertemperatur	93
<b>5</b>	<b>Das Spritzgießwerkzeug</b>	<b>95</b>
5.1	Vollheißkanal-Spritzgießformen für schnellaufende Produkte	95
5.1.1	Erwartungshaltung	95
5.1.2	Voraussetzungen	95
5.1.3	Simulationsberechnungen	95
5.1.4	Anforderungen an die Werkzeugkonstruktion	96
5.1.5	Optimal ausgelegte Formenkühlung	98
5.1.6	Geeignete Stahlauswahl	99
5.1.7	Fertigung im Präzisionswerkzeugbau	103
5.1.8	Formen-Beispiele aus dem Präzisionswerkzeugbau	104
5.1.8.1	Produkt: Schutzkappen – 64-fach-Heißkanal-Spritzgießwerkzeug	104
5.1.8.2	Produkt: 3-ml-Spritzenzylinder – 48-fach-Heißkanal-Spritzgießwerkzeug	104
5.1.8.3	Produkt: 1000-µl-Pipettenspitzen – 16-fach-Heißkanal-Spritzgießwerkzeug	105
5.1.8.4	Produkt: Nadelschutz – 96-fach-Heißkanal-Spritzgießwerkzeug	105
5.1.8.5	Produkt: 20-ml-Spritzenzylinder – 48-fach-Heißkanal-Spritzgießwerkzeug	106
5.1.8.6	Produkt: Kanülenträger – 64-fach-Heißkanal-Spritzgießwerkzeug	106
5.1.9	Schlusswort	108
5.2	Das prozessoptimierte Spritzgießwerkzeug im Großformenbau	108
5.2.1	Spezielle Anforderungen an ein „Großwerkzeug“	109
5.2.2	Temperierung und Werkzeugstabilität	110
5.2.3	Neu entwickelte Werkzeugkonzepte	111
5.2.4	Das Kernkappen-Konzept	111
5.2.5	Charakteristik	112
5.2.6	Vorteile gegenüber herkömmlichem Konzept mit Auswerferplatte	113
5.2.7	Das Spreizschieber-Konzept	113
5.2.7.1	Charakteristik	113
5.2.8	Das Schnellwechselsystem	114
5.2.8.1	Charakteristik	114
5.2.8.2	Übernahmeelemente	115
5.2.9	Prozessoptimierung	116
5.2.9.1	Zielführende Prozessoptimierung gemeinsam mit dem Kunden	116
5.2.10	Infrarotaufnahmen zur Verifizierung thermischen Potenzials	117

5.2.11	Thermische Optimierung, Prozessablaufoptimierung. . . . .	117
5.2.12	Artikelentnahme. . . . .	117
5.2.13	Zykluszeitreduzierung durch Berücksichtigung aller prozessrelevanten Details . . . . .	120
5.2.14	Betriebswirtschaftliche Aspekte. . . . .	120
5.2.15	Reduktion der Projekt-Durchlaufzeit . . . . .	121
5.2.16	Zusammenfassung . . . . .	122
5.3	Werkzeuge, Werkzeugkonzepte . . . . .	122
5.3.1	Spritzgießwerkzeuge/Aufbau/Konzepte/Temperierung . . . . .	122
5.3.2	Bezeichnungen am Spritzgießwerkzeug . . . . .	123
5.3.2	Werkzeugtechnik und Werkzeugbeschaffung . . . . .	125
5.3.3	Verschiedene Arten von Kunststoffformenstählen [2] . . . . .	127
5.3.4	Oberflächenbeschichtung von Spritzgießwerkzeugen . . . . .	128
5.3.5	Belagbildung . . . . .	130
5.3.6	Angusssystem, Angussart, Angusslage. . . . .	130
5.3.7	Heißkanalsysteme, beheizte Düsen . . . . .	131
5.3.8	Isolation von Heißkanälen und Werkzeugaufspannplatten . . . . .	132
5.3.9	Entlüftung . . . . .	132
5.3.10	Temperiersystem im Werkzeug/Grundsätzliches . . . . .	132
5.4	Produktivitätssteigerung bei der PET-Vorformlingsherstellung durch den Einsatz von Hochkavitätenwerkzeugen. . . . .	135
5.4.1	Marktanalyse – Bestimmung des zu bedienenden Marktsegments . . . . .	136
5.4.1.1	Einschätzung des Marktwachstums für PET-Flaschen. . . . .	136
5.4.1.2	Marktlücken und Trends im PET-Verpackungsmarkt erkennen . . . . .	137
5.4.2	Analyse der grundsätzlichen PET-Systemanforderungen . . . . .	138
5.4.2.1	Besonderheiten eines PET-Spritzgießsystems . . . . .	139
5.4.2.2	Qualitätsansprüche an den Vorformling. . . . .	140
5.4.3	Optimierungspotentiale erkennen und bewerten . . . . .	141
5.4.3.1	Ausstoßleistung als Erfolgskonzept . . . . .	141
5.4.3.2	Maßgeschneidertes Werkzeugkonzept für das gewählte Marktsegment . . . . .	143
5.4.3.3	Lastenheft. . . . .	146
5.4.4	Optimierungsdurchführung . . . . .	149
5.4.4.1	Form (kalte Werkzeughälfte) . . . . .	149
5.4.4.2	Formteile . . . . .	149
5.4.4.3	Schieberrahmen und Kombikeile. . . . .	150
5.4.4.4	Kühlung . . . . .	151
5.4.4.5	Heißkanal (heiße Werkzeughälfte) . . . . .	154
5.4.5	Prototypenbau, Testphase und Evaluierung. . . . .	162
5.4.5.1	Kurzschuss (Short-Shot). . . . .	162
5.4.5.2	Acetaldehyd-Gehalt . . . . .	163
5.4.5.3	Wasserverbrauch . . . . .	164
5.4.6	Ausblick – aktuelle Optimierungsansätze . . . . .	165

<b>6 Heißkanalsysteme und Regelung</b> .....	171
6.1 Aufbau und Konzepte .....	171
6.1.1 Einige Auswahlkriterien für Heißkanalsysteme .....	171
6.1.2 Position der Heizung und Thermoelemente, Prozessfenster .....	172
6.1.3 Heißkanalregler .....	172
6.1.4 HK-Düsen für Anwendungen im Hochleistungsbereich .....	173
6.1.5 Die rheologische Werkzeugauslegung .....	175
6.2 Heißkanalsysteme – Beispiele einiger Spezialanwendungen .....	175
6.2.1 Beispiel „Fahrrad-Stoßdämpfer“ .....	175
6.2.2 Aufbau Nadelverschlussystem .....	178
6.2.3 Wärmeleitfähigkeit und thermische Isolierung .....	179
6.2.4 Gekühlter Anschnitteinsatz .....	181
6.2.5 Beispiel „B-Säulenverkleidung“ .....	182
6.2.6 Beispiel „Abdeckplatte“ .....	186
6.2.7 Schlussbemerkung .....	186
6.3 Heißkanaltechnik .....	188
6.3.1 Schmelzeführung .....	190
6.3.2 Düsenarten .....	191
6.3.2.1 Gestaltung der Anbindung an das Formteil .....	192
6.3.2.2 Auswahl des Düsentyps .....	192
6.3.2.3 Auswahl der Düsenklasse .....	193
6.3.2.4 Auswahl des Verteilers .....	193
6.3.2.5 Wahl der Fließregulierungstechnik .....	193
6.3.3 Verschiedene Anwendungsbeispiele .....	194
6.3.4 Etagenwerkzeuge .....	195
6.3.5 Heiße Seiten .....	196
6.3.6 Kaskadensteuerung .....	196
6.3.7 Dynamic Feed® – die individuelle Schmelzedruckregelung für jeden Anschnitt .....	198
6.3.8 Funktionsweise Dynamic Feed® .....	199
6.3.9 Zielsetzungen von Dynamic Feed® .....	200
6.3.10 Verbesserung der Bauteilqualität .....	200
6.3.11 Verbesserung der Produktivität .....	200
6.3.12 Anwendungsgebiete für Dynamic Feed® .....	200
6.3.13 Anwendungsbeispiele Dynamic Feed® .....	201
6.3.14 Lösungsvorschlag und Vorgehensweise .....	202
6.3.15 Beispiel: Familienwerkzeug am Beispiel einer Türverkleidung mit Kartentasche .....	203
6.3.16 Lösungsvorschlag und Vorgehensweise .....	205
6.3.17 Reduzierung der maximalen Zuhaltekraft durch den Einsatz von Dynamic Feed® .....	207
6.3.18 Zusammenfassung und Gesamtbetrachtung .....	208
6.4 Leistungsfähige Heißkanalregelung zur Qualitätsgarantie .....	209
6.4.1 Heißkanalregler analysiert den Werkzeugzustand .....	209
6.4.2 PID <sup>2</sup> -Regelung steuert den Heizstrom vorausschauend .....	210
6.4.3 Phasenanschnittsteuerung bietet „unendliche“ Leistungsvorgaben .....	211

6.4.4	Exakte Temperaturen sichern hohe Produktivität und Qualität . . . . .	211
6.4.5	PID <sup>2</sup> -Regler ist prädestiniert für den Einsatz thermisch empfindlicher Rohstoffe . . . . .	212
6.4.6	Probleme erkennen, bevor Schäden entstehen . . . . .	213
6.4.7	Zusammenfassung . . . . .	216
6.5	Wirtschaftliches Temperieren erfordert die Steigerung des Wirkungsgrades an Werkzeug und Heißkanalverteiler durch Einsatz von Wärmeschutz . . . . .	216
6.5.1	Aktuelle Erfahrungen . . . . .	216
6.5.2	Aufwand für den Wärmeschutz . . . . .	217
6.5.3	Wärmeverluste . . . . .	218
6.5.4	Wärmeleitung . . . . .	219
6.5.5	Konvektion . . . . .	219
6.5.6	Strahlung . . . . .	220
6.5.7	Trägheit . . . . .	221
6.5.8	Thermischer Wirkungsgrad . . . . .	221
6.5.9	Weiterer Nutzen von Wärmeschutz . . . . .	224
6.5.10	Zusammenfassung . . . . .	225
<b>7</b>	<b>Einfluss der Werkzeugtemperierung auf die Qualität und Stückkosten von Spritzgießteilen . . . . .</b>	<b>227</b>
7.1	Die thermische Behandlung von Werkzeugen im Prozess . . . . .	227
7.1.1	Heißkanalsystem als möglicher Problemindikator . . . . .	228
7.1.2	Temperierung, Temperiermitterversorgung, Schlauchverbindungen . . . . .	228
7.1.3	Werkzeugtemperatur, Temperaturführung . . . . .	229
7.1.4	Regelung der Werkzeugtemperatur über im Werkzeug integrierten Thermofühler . . . . .	231
7.1.4.1	Abstand des Temperaturfühlers zur Formnestoberfläche . . . . .	232
7.1.4.2	Platzierung des Thermofühlers . . . . .	234
7.1.5	Werkzeugwandtemperatur, Abhängigkeit des Druckverlustes im Temperierkanalsystem . . . . .	234
7.1.5.1	Übersicht von Schnellkupplungs-Verbindungen beim Medium Wasser . . . . .	237
7.1.5.2	Schlauchleitungen, Verlegung, Isolation . . . . .	237
7.1.6	Feststoffablagerungen als „Wärmeübertragungsbremse“ . . . . .	238
7.1.6.1	Vorbeugende Maßnahmen zur Wasserbehandlung: . . . . .	241
7.1.6.2	Dauerhaft geschützte Temperierkanäle . . . . .	241
7.1.6.3	Einfluss der Stahlqualität auf Korrosion und Belagbildung in den Temperierkanälen . . . . .	242
7.1.6.4	Praxisbeispiel einer zuwachsenden Temperierung . . . . .	243
7.1.7	Die thermische Auslegung der Temperierkanäle im Spritzgießwerkzeug . . . . .	245
7.1.8	Das Spritzgießwerkzeug als Wärmetauscher . . . . .	245
7.1.8.1	Berechnung der Kühlzeit, Kühlzeitformel . . . . .	246
7.1.9	Ideales Temperierkanallayout . . . . .	248
7.1.10	Unterschiedliche Ausbildung der Temperierkanäle/mögliche Verfahren . . . . .	248

7.1.10.1	Bohrtechnik	248
7.1.10.2	Konturführende Einsatztechnik	249
7.1.10.3	Vakuum-Einschmelztechnik	250
7.1.10.4	System Mecobond®	251
7.1.10.5	Rapid-Technologien	251
7.1.10.6	CO <sub>2</sub> -Kühltechnik	253
7.1.11	Thermische Berechnungen, Voraussetzungen, Möglichkeiten	254
7.1.11.1	Berechnung mit Simulationsprogrammen	255
7.1.11.2	Berechnung mit dem Programm <i>GWK-S-Therm</i>	256
7.1.11.3	Berechnung nach dem Bilanzraumverfahren	256
7.1.12	Zusammenfassung	257
7.2.1	Physikalisches/Grundlegendes zur Thermografie – was macht die Thermografie eigentlich?	258
7.2.2	Das Spektrum der Wellenlängen	259
7.2.3	Gerätetechnik – gängige Kameratypen	260
7.2.4	Einsatz der Infrarotmesstechnik im Bereich Spritzguss-/Kunststoffverarbeitung:	265
7.2.5	Beispiele weiterer Einsatzmöglichkeiten von Infrarotkamera-Messsystemen	266
7.3	Die Werkzeugtemperierung, Mehrkreis-Temperierung, Anforderungen an die Wasserqualität	270
7.3.1	Die Werkzeugtemperierung – ein komplexer Prozess	270
7.3.2	Temperiergeräte	271
7.3.3	Die Heizung	272
7.3.4	Die Kühlung	273
7.3.5	Kältemaschinen	274
7.3.6	Das Prinzip	274
7.3.7	Temperiergeräte richtig auswählen	275
7.3.8	Berechnungsgrundlagen	275
7.3.8.1	Der Wärmehalt der Schmelze	275
7.3.8.2	Die Kühlzeit	277
7.3.8.3	Der Wärmeübergangskoeffizient	280
7.3.8.4	Die Druckverluste	282
7.3.8.5	Die Wahl des Temperiermediums	284
7.3.8.6	Auswahlkriterien	284
7.3.8.7	Der Wärmehalt	285
7.3.8.8	Schlussfolgerungen	286
7.3.8.9	Die Auslegung von Temperiergeräten	287
7.3.8.10	Zielsetzung und Leistungskriterien	287
7.3.8.11	Zusammenfassung	289
7.3.8.12	Die Auswahl des richtigen Temperiergeräts	289
7.3.8.13	Einteilung nach Wärmeträgermedium	289
7.3.8.14	Temperiergeräte für Wasser	289
7.3.8.15	Temperiergeräte für Wärmeträgeröl	292
7.3.8.16	Einteilung nach Art der Kühlung	293
7.3.8.17	Einteilung nach Bauart	295

7.3.8.18	Einteilung nach Verfahren .....	299
7.3.8.19	Diskontinuierliche Temperierung .....	300
7.3.8.20	Dynamische Temperierung .....	300
7.3.8.21	Werkzeugvorwärmung .....	302
7.3.8.22	Zusammenfassung .....	302
7.3.8.23	Die Einbindung des Temperiergeräts in den Verarbeitungs- prozess .....	303
7.3.8.24	Die hydraulische Anbindung .....	303
7.3.8.25	Schnittstellen zur Spritzgießmaschine .....	304
7.3.8.26	Durchflussüberwachung .....	307
7.3.7.27	Die Wasserqualität .....	308
7.3.8.28	Organische Verunreinigungen .....	309
7.3.8.29	Anorganische Ablagerungen .....	310
7.3.8.30	Die wichtigsten Faktoren für eine optimale Wasserqualität ..	311
7.3.8.31	Der Einfluss von Verunreinigungen auf die Prozesskosten ...	311
7.3.8.32	Maßnahmen zur Erzielung der optimalen Wasserqualität ...	314
7.3.8.33	Die Anlagentechnik zur Kühlwasserconditionierung .....	315
7.3.8.34	Enthärtungsanlage .....	316
7.3.8.35	Nebenstrom-Filteranlage .....	316
7.3.8.36	Zustands- und Qualitätsüberwachung .....	316
7.3.8.37	Zusammenfassung .....	317
7.4	Quasi-kontinuierliche Temperierung, Impulskühlung .....	318
7.4.1	Warum? Was versteckt sich dahinter? .....	318
7.4.2	Definition .....	320
7.4.2.1	Wärmeströme im Werkzeug bei Vollautomatik-Betrieb .....	321
7.4.2.2	Was geschieht bei Unterbrechungen/beim Anfahren? .....	322
7.4.2.3	Wie geht man also bei der Impulskühlung mit dieser Problematik um? .....	322
7.4.2.4	Werkzeugtechnik bei Impulstemperierung .....	325
7.4.2.5	Einflüsse des zu verarbeitenden Kunststoffes .....	325
7.4.2.6	Maschinenfähigkeit .....	326
7.4.2.7	Probleme in der Praxis .....	328
7.4.2.8	Anlagenbeschreibung .....	329
7.4.2.9	PulseTemp® RPT 100 .....	331
7.4.2.10	Zusätzliche Betriebsart „Automatik“ .....	332
7.4.2.11	PulseTemp® RPT 200 .....	332
7.4.2.12	Praxisbeispiel Optimierung eines Saugrohrgehäuseteils .....	337
7.4.2.13	Optimierungsschritt .....	338
7.4.2.14	Optimierungsschritt (Bild 7.128a und 7.128b) .....	338
7.4.2.15	Bei welchen Prozessen schlagen die besonderen Vorteile dieser technischen Lösung gegenüber herkömmlicher Temperierung durch? .....	339
7.4.2.16	Hochleistungsspritzguss – Mehrkavitätenfertigung .....	339
7.4.2.17	Ergebnis .....	340
7.5	Die geregelte CO <sub>2</sub> -Werkzeugkühlung, eine Optimierungsvariante .....	340
7.5.1	Funktionsweise der CO <sub>2</sub> -Regelung .....	341

7.5.2	Aufbau Regelkreis	343
7.5.3	Funktionsprinzip der Temperaturregelung	345
7.5.4	Synchroner Regelmodus	346
7.5.5	Asynchroner Regelmodus	346
7.5.6	Verfahrenstechnische und metallurgische Überlegungen	349
7.5.7	Projekt Batteriedeckel	350
7.5.8	Kosten und Nutzen des „Rapid Cooling Systems“	353
7.5.8.1	Kosten	353
7.5.8.2	Nutzen	354
7.5.9	Beispielrechnung am Beispiel eines 2-K-Spritzgussteils	354
7.5.10	Zusammenfassung	355
<b>8</b>	<b>Finite Elemente-Simulation</b>	<b>357</b>
8.1	Finite-Elemente-Berechnungen an thermoplastischen Kunststoffbauteilen	357
8.1.1	Grundlagen der FE-Berechnung	358
8.1.2	Grundlagen	358
8.1.3	Modellbildung/FE-Netze	359
8.1.4	Randbedingungen	360
8.1.5	Lineare/Nicht lineare Berechnung	361
8.1.6	Grundlagen des Materialverhaltens von thermoplastischen Kunststoffen	362
8.1.6.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	362
8.1.7	Viskoelastizität	363
8.1.8	Kriechen/Relaxieren	365
8.1.9	Abminderungsfaktoren	367
8.1.9.1	Mechanische Auslegung von Kunststoffbauteilen	367
8.1.9.2	Statik	367
8.1.9.3	Strukturanalyse und linearelastische Analyse	367
8.1.9.4	Zeitabhängige Berechnung (Kriechen/Relaxieren)	368
8.1.10	Dynamik	368
8.1.11	Modalanalyse (Eigenfrequenzermittlung)	368
8.1.12	Aufschwingen von Bauteilen	369
8.1.13	Crash	370
8.1.14	Temperatur	370
8.1.15	Kopplung der FEM mit der Füllsimulation	370
8.1.16	Berücksichtigung der Faserorientierung	370
8.1.17	Berechnung des Kernversatzes	371
8.1.18	Ergebnisinterpretation	371
8.1.19	Allgemein	371
8.1.20	Auslegungskriterien	372
8.1.21	Erforderliche Vorgaben	373
8.1.22	CAD-Daten	373
8.1.23	Schnittstellen	373
8.1.24	Randbedingungen	373
8.2	Simulation an Spritzgießbauteilen	374
8.2.1	Warum Simulation	374

8.2.1.1	Säule 1 – der Bauteilentwurf .....	374
8.2.1.2	Säule 2 – der Werkzeugbau .....	375
8.2.1.3	Säule 3 – Die Fertigung .....	376
8.2.2	Berechnungsverfahren .....	377
8.2.2.1	FEM – Finite-Elemente-Methode .....	377
8.2.2.2	FDM – Finite-Differenzen-Methode .....	378
8.2.2.3	Volumenkontrollmethode .....	379
8.2.2.4	Boundary Methode .....	380
8.2.3	Spritzgießsimulation .....	380
8.2.3.1	Berechnung der volumetrischen Formfüllung .....	382
8.2.3.2	Berechnung der Nachdruckphase .....	385
8.2.3.3	Berechnung des Kühlsystems .....	387
8.2.4	Sonderverfahren .....	388
8.2.4.1	Hinterspritzen/In-mold Decoration .....	388
8.2.4.2	Spritzprägen .....	391
8.2.4.3	Sandwichspritzgießen .....	394
8.2.4.4	Gasinjektionsverfahren .....	394
8.2.4.4.1	Angaben zur Größe der Überlaufkavität .....	396
8.2.5	Zusammenfassung .....	400
8.3	Computerunterstützte Fehlerbehebung in der Spritzgießtechnik .....	401
8.3.1	Vorbeugende Maßnahmen .....	401
8.3.2	Herausforderung durch ein Assessment-Tool .....	405
8.3.3	Praktikum an virtuellen Verarbeitungsanlagen .....	406
8.3.4	Computer Basiertes Training (CBT) .....	407
8.3.5	Spritzgieß-Simulation .....	410
8.3.6	Repräsentative Fallstudien .....	414
8.3.7	Praxisnähe .....	417
8.3.8	Erläuterndes und visualisierendes Programm .....	418
8.3.9	Computer unterstützte Seminar-Nachbereitung .....	421
8.3.10	Akzeptanz .....	424
8.3.11	Hohe Attraktivität .....	427
8.3.12	Kompetenz-Sicherung .....	428
8.3.13	Kosten-Nutzen-Aspekte .....	429
8.3.14	Einbindung von CBT .....	429
<b>9</b>	<b>Optimierungsvoraussetzungen</b> .....	<b>433</b>
9.1	Möglichkeiten ganzheitlicher Produktionsoptimierung und Qualitätssicherung im Spritzgießprozess aus der Erfahrung des Maschinenherstellers .....	433
9.1.1	Produktionsoptimierung beginnt bereits beim Rüsten .....	433
9.1.2	Die Spritzgießmaschine, zentrales Funktionselement der Produktion qualitativ hochwertiger Kunststoffbauteile .....	436
9.1.3	Aktive Qualitätsbeeinflussung der Spritzgießprozesses durch die Regelungstechnik der Spritzgießmaschine .....	437
9.1.4	Spritzzeitige Regelungstechnik .....	437
9.1.5	Die Spritzgießmaschine als Messmittel zur Erkennung von Prozessabweichungen .....	440

9.1.5.1	Auswerte- und Darstellmöglichkeiten von Maschinen- Istwerten. . . . .	440
9.1.5.2	Aussagekraft von Maschinen- Istwerten und Prozess- größen . . . . .	440
9.1.5.3	Überwachung der Qualitätsmerkmale. . . . .	443
9.1.6	Überwachung der Prozessparameter . . . . .	445
9.2	Der Werkzeuginnendruck zur Prozess- und Qualitätsüberwachung. . . . .	446
9.2.1	Werkzeuginnendruck. . . . .	446
9.2.2	Prozessanalyse und Prozessoptimierung . . . . .	446
9.2.3	Prozesssteuerung. . . . .	450
9.2.4	Prozess- und Qualitätsüberwachung . . . . .	452
9.2.5	Werkzeuginnendrucksensoren. . . . .	453
9.2.6	Positionierung von Werkzeuginnendrucksensoren . . . . .	454
9.2.7	Sensoren zur Messung des Werkzeuginnendrucks . . . . .	454
9.2.8	Direkt messende Werkzeuginnendrucksensoren . . . . .	454
9.2.9	Indirekt messende Werkzeuginnendrucksensoren. . . . .	459
9.2.10	Berührungslos messende Werkzeuginnendrucksensoren . . . . .	460
9.3	Die Werkzeugwandtemperatur als Basis zur Qualitätssicherung. . . . .	461
9.3.1	Am Anfang war der Werkzeuginnendruck. . . . .	461
9.3.2	Das Prinzip des Werkzeugwandtemperatur-Sensors . . . . .	462
9.3.3	Das Prinzip des Werkzeuginnendruck -Sensors . . . . .	463
9.3.4	Schnellkupplungen für den einfachen Austausch von Werkzeug- einsätzen . . . . .	465
9.3.5	Messdatenerfassung und Prozessüberwachung . . . . .	467
9.3.6	Echtzeit-Steuerungen mit Hilfe der Werkzeugwandtemperatur. . . . .	468
9.3.7	Mehrkomponenten – Spritzgießen. . . . .	470
9.3.8	Schmelzefrontabhängige Steuerungen . . . . .	471
9.3.9	Die automatische Kaskadensteuerung . . . . .	471
9.3.10	Automatische Entlüftung der Kavität. . . . .	472
9.3.11	Automatisches Spritzprägen in Abhängigkeit der Schmelzefront . . . . .	472
9.3.12	Automatische Gasinnendruckverfahren . . . . .	473
9.3.13	Die Bedeutung von Reaktionszeiten – oder „Was ist eigentlich Echtzeit?“ . . . . .	474
9.3.14	Online-Prozess-Regelung mit Hilfe der Werkzeugwandtemperatur . . . . .	475
9.3.15	Die Balancierung und Regelung von Heißkanalwerkzeugen . . . . .	475
9.3.16	Heißkanalwerkzeuge mit Mehrfachkavitäten. . . . .	476
9.3.17	Unterschiedliche Regelprinzipien . . . . .	479
9.3.18	Die Balancierung von Temperiersystemen. . . . .	482
9.3.19	Regelungen für Duroplast- und Elastomeranwendungen. . . . .	484
9.3.20	Fabrikweit vernetzte Systeme und Prozess-Informationssysteme . . . . .	486
9.3.21	Ausblick. . . . .	487
9.4	Anwendung von statistischen Prozessmodellen zur Optimierung und Qualitätssicherung . . . . .	487
9.4.1	Herausforderung an die Spritzgieß-Industrie . . . . .	487
9.4.2	Prozessoptimierung – Einflüsse und Ziele beim Spritzgießen . . . . .	488

9.4.3	Aufgaben des Spritzgießers= Anforderungen an die CQC Systematik [1].....	488
9.4.3.1	Optimieren des Werkzeuges: .....	488
9.4.3.2	Finden des optimalen Arbeitspunktes: .....	488
9.4.3.3	Halten des optimalen Arbeitspunktes: .....	489
9.4.3.4	Dokumentation der Produktion:.....	489
9.4.4	Leistungen der CQC® Systematik.....	490
9.4.5	Der CQC® Arbeitsablauf.....	490
9.4.5.1	Das Brainstorming .....	490
9.4.5.2	Der Bemusterungsplan .....	490
9.4.5.3	Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE) .....	492
9.4.5.4	Versuchsdurchführung .....	492
9.4.5.5	Formteilmerkmale erfassen – Aufnahme der Prozesskurvenverläufe.....	494
9.4.5.6	Bemusterungsanalyse .....	494
9.4.5.7	Maschineneinstell-Optimierung .....	495
9.4.5.8	Werkzeugänderungen .....	495
9.4.5.9	Berechnung von Prozesskennzahlen .....	495
9.4.6	CQC Ausrüstungs-/Leistungsvarianten .....	496
9.4.6.1	CQC® – Einrichten (Offline).....	496
9.4.6.2	CQC – Überwachen (Online) .....	498
9.4.6.3	CQC® – Regeln (Online).....	498
9.4.7	Vorteile der Bemusterung mit Versuchsplan (CQC® Einrichten) .....	499
9.4.8	Zusätzliche Vorteile CQC® Überwachen/Regeln: .....	499
9.4.9	Zusammenfassung .....	499
9.4.10	Erfahrungen der Firma Geberit Produktions- AG mit dem CQC® - System im produktiven Einsatz.....	500
9.4.10.1	Vor- und Nachteile des CQC® Systems im Produktionsalltag.....	501
9.4.10.2	Fazit .....	502
<b>10</b>	<b>Istanalyse und Optimierung beim Spritzgießprozess.....</b>	<b>503</b>
10.1	Istanalyse am Formteil und im Prozess .....	503
10.1.1	Verfahrenstechnisches Potenzial .....	503
10.1.2	Systematisches Vorgehen bei einer Istanalyse und Prozessoptimierung .....	505
10.2	Rheologische und Thermische Analyse an Spritzgießwerkzeugen und Prozessen.....	505
10.2.1	Die rheologische Analyse.....	505
10.2.2	Die thermische Analyse .....	506
10.2.3	Symmetrische Wärmeabfuhr, Werkzeugwandtemperatur.....	506
10.3	Die thermische Prozesskette .....	507
10.4	Ermittlung und Berechnung von Zeiten und Kosten .....	508
10.4.1	Maschinenablauf, Maschinenbewegungen, Peripherie .....	510
10.5	Optimierungsbeispiele an Formteilen und Prozessen.....	510

---

10.5.1	Feinwerktechnik, Elektronikindustrie . . . . .	510
10.5.2	Messwerk – Bodenplatte für KFZ – Armaturen . . . . .	510
10.5.3	Ausgangsbasis . . . . .	511
10.5.4	Erkenntnis aus der Ergebnisanalyse . . . . .	511
10.5.5	Optimierung der Werkzeugeinsätze . . . . .	513
10.5.6	Optimierungsergebnis . . . . .	513
10.6	Elektro-Schaltgerätegehäuse . . . . .	515
10.6.1	Gehäuse – Oberteil . . . . .	515
10.6.2	Gehäuse – Unterteil . . . . .	516
10.6.3	Ergebnisse der Istanalyse . . . . .	516
10.6.4	Temperierung der Kerne nicht optimal . . . . .	517
10.6.5	Mögliche Potenziale bei geändertem Werkzeugkonzept . . . . .	518
10.6.6	Steckerleisten für den technischen Elektrobereich . . . . .	518
10.6.7	Hohe Anforderungen an die Werkzeugtemperierung . . . . .	518
10.6.8	Möglichkeiten zur Optimierung der Temperierung . . . . .	521
10.6.9	Optimierungsergebnis . . . . .	524
10.7	Steckverbinder für die Kfz-Elektronik . . . . .	524
10.7.1	Füllsimulation, thermische Berechnung, Verzugsberechnung . . . . .	524
10.7.2	Verzug am Fertigteil . . . . .	525
10.8	Haushalt- und Weißgeräteindustrie . . . . .	526
10.8.1	Traverse als Waschmaschinensockel . . . . .	526
10.8.2	Ergebnisse der Istanalyse . . . . .	526
10.8.3	Optimierungsvorschläge . . . . .	529
10.8.4	Optimierungsergebnis . . . . .	530
10.9	Automobilindustrie . . . . .	530
10.9.1	Türinnenverkleidung für AUDI A3/2-Türer. Optimierung eines Großwerkzeuges im Partnerverbund . . . . .	530
10.9.2	Istanalyse am Fertigteil . . . . .	531
10.9.3	Optimierungskonzept . . . . .	532
10.9.4	Optimierungsergebnis . . . . .	534
10.10	Bug Stoßfänger für PORSCHE 911 . . . . .	534
10.10.1	Erarbeitung und Umsetzung eines Werkzeugkonzeptes für höchste Qualitätsansprüche . . . . .	534
10.10.2	Spritzgießsimulation, Infrarotanalyse . . . . .	535
10.10.3	Spritzgießsimulation, Thermische Werkzeugauslegung . . . . .	537
10.10.4	Infrarotanalyse von Formteil und Werkzeug . . . . .	537