

HANSER

Willi Steinko

Optimierung von Spritzgießprozessen

ISBN-10: 3-446-40977-7

ISBN-13: 978-3-446-40977-4

Inhaltsverzeichnis

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/978-3-446-40977-4>
sowie im Buchhandel

Inhalt

1 Einleitung	1
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
2 Wahl des Rohstoffs	17
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

3 Die Bedeutung von Zuschlagstoffen für die anwendungstechnischen Eigenschaften von Kunststoffen	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 Farbstoffe	29
3.4 Modifizierung der Polymere	32
3.5 Beeinflussung der Materialeigenschaften durch Blends	33
3.6 Brandschutzmittel	34
3.6.1 Halogenhaltige Flammenschutzmittel	36
3.6.2 Phosphorhaltige Flammenschutzmittel	36
3.6.3 Stickstoffhaltige Flammenschutzmittel	37
3.6.4 Intumeszierende Flammenschutzmittel	37
3.6.5 Anorganische Flammenschutzmittel	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
4 Der Spritzgießprozess	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	Schneckendrehzahl.	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	Schneckendrehzahl.	91
4.4.34	Schneckenstaudruck.	91
4.4.35	Dosierweg.	92
4.4.36	Schneckendekompression.	92
4.4.37	Restmassepolster.	92

4.4.38	Umschaltpunkt auf Nachdruck	92
4.4.39	Umschaltart	92
4.4.40	Flanshtemperatur	92
4.4.41	Werkzeugwandtemperatur	93
4.4.42	Schließkraft	93
4.4.43	Zylindertemperatur	93
5	Das Spritzgießwerkzeug	95
5.1	Vollheißkanal-Spritzgießformen für schnelllaufende 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

6	Heißkanalsysteme und Regelung	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 ² -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 ² -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
7	Einfluss der Werkzeugtemperierung auf die Qualität und Stückkosten von Spritzgießteilen	227
7.1	Die thermische Behandlung von Werkzeugen im Prozess	227
7.1.1	Heißkanalsystem als möglicher Problemindikator	228
7.1.2	Temperierung, Temperiermittelversorgung, 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 ₂ -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 Wärmeinhalt 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 Wärmeinhalt	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 Kühlwasserkonditionierung.	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 ₂ -Werkzeugkühlung, eine Optimierungsvariante	340
7.5.1	Funktionsweise der CO ₂ -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
8	Finite Elemente-Simulation.....	357
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
9	Optimierungsvoraussetzungen	433
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 Prozess- abweichungen	440

9.1.5.1	Auswerte- und Darstellmöglichkeiten von Maschinen-Istwerten.	440
9.1.5.2	Aussagekraft von Maschinen- Istwerten und Prozessgrößen	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	Werkzeuginnendruckensensoren.	453
9.2.6	Positionierung von Werkzeuginnendruckensensoren	454
9.2.7	Sensoren zur Messung des Werkzeuginnendrucks	454
9.2.8	Direkt messende Werkzeuginnendruckensensoren	454
9.2.9	Indirekt messende Werkzeuginnendruckensensoren.	459
9.2.10	Berührungslos messende Werkzeuginnendruckensensoren	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
10	Istanalyse und Optimierung beim Spritzgießprozess.....	503
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