

Inhalt

Vorwort	XIII
1 Überblick über Angussysteme und Anschnittpositionierung	1
1.1 Angussysteme in der primären Trennebene	1
1.2 Angussysteme in einer parallelen Trennebene	2
1.2.1 Kaltkanalsysteme	2
1.2.2 Heißkanalsysteme	3
1.3 Kombinationen aus Heiß- und Kaltkanalsystemen	4
1.4 Gestaltung des Anschnitts	4
2 Rheologie der Kunststoffe	7
2.1 Vergleich von laminarer und turbulenter Strömung	7
2.2 Quellströmung	9
2.3 Einflussfaktoren der Viskosität	10
2.3.1 Viskositätsmodelle	11
2.3.2 Nicht-newtonsche Fluide	13
2.3.3 Temperatur	15
2.3.4 Druck	16
2.4 Kompressibilität der Schmelze	16
2.5 Bestimmung der Fließeigenschaften der Schmelze	17
3 Einfluss des Füll- und Verdichtungsvorgangs auf das Material und das Formteil	23
3.1 Einfluss der Verarbeitung auf die Viskosität	23
3.1.1 Thermisches Gleichgewicht der Schmelze – Wärmeverlust durch Wärmeleitung und Schererwärmung	24
3.1.2 Entwicklung einer erstarrten Randschicht	26
3.2 Einflussfaktoren beim Materialabbau von Kunststoffen	27
3.2.1 Übermäßige Scherbelastung	28
3.2.2 Übermäßige Temperaturbelastung	30

3.3	Einfluss der Füllgeschwindigkeit auf den Fülldruck	31
3.4	Nachdruck- oder Verdichtungsphase	33
3.4.1	Thermische Schwindung bei Abkühlen des Kunststoffes	33
3.4.2	Ausgleich der volumetrischen Schwindung durch Kompensationsströmung	34
3.4.3	Druckverteilung während der Verdichtungsphase	35
3.4.4	Einfrieren des Anschnitts	36
3.5	Auswirkungen der Schmelzeströmung auf das Material und das Formteil	37
3.5.1	Schwindung	37
3.5.1.1	Volumenschwindung	38
3.5.1.2	Schwindung durch Orientierung	40
3.5.2	Entwicklung von Eigenspannungen und Verzug	44
3.5.2.1	Verzug und Eigenspannungen durch ungleichmäßige Schwindung der Bauteilseiten	45
3.5.2.2	Verzug und Eigenspannungen durch ungleichmäßige Schwindung in bestimmten Bereichen	46
3.5.2.3	Verzug und Eigenspannungen durch ungleichmäßige Schwindung aufgrund von Orientierung	46
3.5.3	Einfluss der Orientierung auf die physikalischen Eigenschaften	47
3.6	Tempern von Formteilen	47
3.7	Zusammenfassung	48
4	Auswahl des Anspritzpunkts und Spritzgießstrategien	53
4.1	Überlegungen zur Auswahl des Anspritzpunkts	53
4.2	Gestaltungs- und Verfahrensrichtlinien für das Spritzgießen	56
4.2.1	Bauteilgestaltung mit gleichbleibender Wanddicke	56
4.2.2	Anwendung allgemeiner Richtlinien für die Gestaltung von Spritzgießteilen	58
4.2.3	Vermeidung der Schmelzeströmung aus dünnen Bereichen in dicke Bereiche	59
4.2.4	Aufbau eines einfachen Strömungsmusters in der Kavität	60
4.2.5	Vermeidung von Lufteinschlüssen	63
4.2.6	Filmscharniere	65
4.2.7	Balancierte Füllung des Werkzeugs	68
4.2.7.1	Lage des Anschnitts innerhalb einer Kavität	68
4.2.7.2	Mehrfachwerkzeuge	73
4.2.8	Gleichmäßige Werkzeug- und Schmelzetemperaturen	75
4.2.9	Vermeidung von Fließnähten	76
4.2.10	Vermeidung von Fließverzögerung	78
4.2.11	Begrenzung der Reibungswärme der Schmelze	79
4.2.12	Minimierung des Volumens der Angusskanäle bei Kaltkanalsystemen	80
4.2.13	Vermeidung übermäßiger Scherung	81
4.2.14	Vermeidung übermäßiger Scherspannungen, Erzeugung gleichmäßiger Scherspannungen	83

5	Systeme zur Verteilung der Schmelze im Werkzeug	85
5.1	Grundlagen für die Gestaltung von Fließkanälen	85
5.2	Übersicht des Schmelzeverteilungssystems	86
5.2.1	Maschinendüse	88
5.2.1.1	Filterdüsen	89
5.2.1.2	Statische Mischer	90
5.2.2	Angusskegel	90
5.2.3	Angussverteiler	90
5.2.4	Anschnitt	91
5.3	Schmelzeströmung im Schmelzeverteilungssystem	91
5.3.1	Aufbereitung der Schmelze in der Spritzgießmaschine	91
5.3.1.1	Druckaufbau durch die Spritzgießmaschine	92
5.3.1.2	Strömung durch ein Angussystem	94
5.3.2	Einfluss der Temperatur auf die Schmelzeströmung	95
5.3.2.1	Temperatur der Schmelze	95
5.3.2.2	Werkzeugtemperatur	96
5.3.3	Vergleich von Kalt- und Heißkanalsystemen	97
5.3.4	Druckverlust innerhalb des Schmelzeverteilungssystems (Düse, Angusskegel, Angusskanal, Anschnitt und Kavität)	97
5.4	Simulation des Füllvorgangs	99
5.5	Querschnitt des Angussystems	101
5.5.1	Effizienz des Angusskanals	101
5.5.2	Druckverlauf im Angussystem	102
5.5.2.1	Vergleich der Strömung in Heiß- und Kaltkanalsystemen	103
5.5.3	Einfluss des Angussystems auf die Zykluszeit	103
5.5.3.1	Kühlzeit des Kaltkanalsystems und des Angusskegels	103
5.5.3.2	Heißkanalsysteme	104
5.5.4	Gegenüberstellung von Angussystemen mit konstantem und variablem Durchmesser	104
5.6	Gestaltung des Angussystems für scher- und temperaturempfindliche Materialien	107
5.7	Auslegung des Angussystems	108
5.7.1	Geometrisch balancierte Angussysteme	109
5.7.2	Geometrisch nicht balancierte Angussysteme	110
5.7.3	Vergleich des Angussystems mit Reihenanordnung mit dem geometrisch balancierten Angussystem	110
5.7.3.1	Fließwegverhältnis	112
5.7.3.2	Abweichungen der Schmelzeigenschaften in unbalancierten Werkzeugen	113
5.7.3.3	Künstliche Balancierung von Angussystemen	114
5.7.3.4	Reduziert ein künstlich balanciertes Angussystem das Angussvolumen?	115
5.7.4	Familienwerkzeuge	118

6	Ungleichmäßige Schmelzeigenschaften in Mehrfachwerkzeugen	121
6.1	Ursachen für ungleichmäßige Werkzeugfüllung	122
6.1.1	Ungleichgewichte, die durch das Angussystem entstehen	122
6.1.2	Ungleichgewichte, die nicht durch die Auslegung des Angussystems verursacht werden	124
6.2	Auswirkungen der Ungleichgewichte auf den Prozess, die Produkteigenschaften und die Produktivität	128
6.3	Scherinduzierte Ungleichgewichte in geometrisch balancierten Angussystemen	134
6.3.1	Entstehung und Aufteilung abweichender Schmelzeigenschaften in einem Angussystem	134
6.3.2	Ungleichmäßige Kavitätenfüllung durch Aufteilung von Schmelzeschichten in verzweigten Angussystemen	135
6.3.3	Scherinduzierte Ungleichgewichte in der Schmelze in Etagenwerkzeugen	139
6.3.4	Entstehung von Abweichungen innerhalb einer Kavität	139
6.3.4.1	Verzug	141
6.3.4.2	Kernversatz	142
6.3.4.3	Auswirkungen auf konzentrische Teile	143
6.3.5	Alternative Theorien zur Ursache der Ungleichgewichte bei der Formfüllung	144
6.3.5.1	Ungleichmäßige Werkzeugkühlung	144
6.3.5.2	Werkzeugdurchbiegung	145
6.3.5.3	Auswirkungen von Ecken	146
6.3.5.4	Schmelzedruck als Ursache ungleichmäßiger Füllung	146
6.4	Auslegung von Angussystemen	147
6.4.1	Bestimmung verschiedener Fließgruppen in geometrisch balancierten Angussystemen	147
6.4.2	Scheinbar geometrisch balancierte Angussysteme	149
6.5	Auswirkungen scherinduzierter Abweichungen der Schmelzeigenschaften auf zweistufige Spritzgießverfahren	150
6.5.1	Gas-Innendruck-Spritzgießen	151
6.5.2	Zwei-Komponenten-Spritzgießen	153
6.5.3	Spritzgießen von geschäumten Kunststoffen	153
6.6	Kosten durch ungleichmäßige Schmelzeigenschaften	155
7	Erfolgreiches Spritzgießen trotz scherinduzierter Abweichungen der Schmelzeigenschaften	159
7.1	Statische Mischer	159
7.2	Künstliche Balancierung	162
7.2.1	Gleichmäßige Füllung durch Anpassung der Größen von Fließkanälen und Anschnitten	162
7.2.2	Gleichmäßige Füllung durch Anpassung der Temperaturen	163
7.3	Schmelze-Rotations-Technik	164
7.3.1	Schmelze-Rotations-Technik in Heißkanalwerkzeugen	170
7.3.2	Schmelze-Rotations-Technik in Kaltkanalwerkzeugen	172
7.3.3	Schmelze-Rotations-Technik bei Ungleichgewichten innerhalb einer Kavität	173
7.3.4	Mehrachsiges Symmetrien in der Schmelze	174
7.3.5	Verstellbares rheologisches Kontrollsystem (In-Mold Adjustable Rheological Control, iMARC)	177
7.3.5.1	3D-Spritzgießen	177

7.4	Schmelze-Rotations-Technik zur Regelung zweistufiger Spritzgießverfahren	181
7.5	Steuerung des Verzugs durch Schmelze-Rotations-Technik	183
7.5.1	Entstehung des Verzugspotentials	186
7.5.2	Kontrollierter Verzug durch Schmelze-Rotations-Technik	188
7.5.3	Neue Anwendungen für das 3D-Molding	192
8	Kaltkanalwerkzeuge	195
8.1	Angusskegel	197
8.1.1	Kalter Angusskegel	197
8.1.2	Heißer Angusskegel	201
8.2	Kaltkanalsysteme	202
8.2.1	Wichtige Überlegungen zur Bearbeitung des Kaltkanalssystems	204
8.2.2	Dimensionierung von Fließkanälen	205
8.2.3	Entlüftung	206
8.2.4	Auswerfen des Angussystems	207
8.2.4.1	Angusszieher	207
8.2.4.2	Sekundäre Angusskegel	207
8.2.4.3	Angusskanäle	208
8.2.5	Pfropfenfänger	209
8.3	Angussysteme für Dreiplattenwerkzeuge mit Kaltkanalsystem	210
8.4	Anschnittgestaltung	213
8.4.1	Stangenanguss	215
8.4.2	Seitenanschnitt	216
8.4.3	Bandanschnitt	217
8.4.4	Filmanschnitt	218
8.4.5	Ringanschnitt	219
8.4.6	Schirmanschnitt	220
8.4.7	Tunnelanschnitt	221
8.4.8	Gebogener Tunnelanschnitt	223
8.4.9	Innen liegender Tunnelanschnitt	224
8.4.10	Punktanschnitt	224
8.4.11	Meißelförmiger Anschnitt	224
8.4.12	Anschnitt mit Überlauf	225
8.5	Einfluss des Anschnittdurchmessers bei Mehrfachwerkzeugen	225
8.5.1	Untersuchung 1	226
8.5.2	Untersuchung 2	227
8.5.3	Messtoleranzen	229
9	Heißkanalwerkzeuge	235
9.1	Übersicht	235
9.1.1	Vor- und Nachteile von Heißkanalsystemen	236
9.1.1.1	Vorteile von Heißkanalsystemen	237
9.1.1.2	Nachteile von Heißkanalsystemen	240
9.1.1.3	Zusammenfassung der Merkmale verschiedener Angussysteme	243

9.2	Vergleich der Heißkanalsysteme für Mehrfachwerkzeuge	244
9.2.1	Außenbeheizung von Verteiler und Düsen	245
9.2.2	Extern beheizter Verteiler mit innenbeheizter Düse	246
9.2.3	Innenbeheizung von Verteiler und Düse	247
9.2.4	Isoliertes Verteiler- und Düsensystem	248
9.3	Etagenwerkzeuge	250
10	Gestaltung des Fließkanals bei Heißkanalsystemen	253
10.1	Gestaltungsregeln für balanciertes Spritzgießen	254
10.2	Querschnittsform	255
10.3	Ecken	256
10.4	Einfluss des Durchmessers	257
10.4.1	Druck	257
10.4.2	Regelung des Einspritzvorgangs	260
10.4.3	Farbwechsel	262
10.4.4	Materialwechsel	265
11	Düsen und Anschnitte für Heißkanalsysteme	267
11.1	Heißkanaldüsen	268
11.1.1	Außenbeheizte Düsen	268
11.1.2	Innenbeheizte Düsen	269
11.1.3	Wärmeleitende Düsen	270
11.2	Punktanschnitte	271
11.3	Überlegungen zur Gestaltung des Anschnitts	273
11.3.1	Einfrieren des Anschnitts	273
11.3.2	Fadenbildung und Nachtropfen	274
11.3.3	Verdichtung	275
11.3.4	Mechanische Verschlussdüsen	277
11.3.4.1	Sequentielle Nadelverschlussdüsen	280
11.3.5	Anschnitte mit thermischem Verschluss	281
11.3.6	Heißer Seitenanschnitt	281
11.3.7	Düsen mit mehreren Spitzen	282
12	Thermische Auslegung von Heißkanalsystemen	283
12.1	Heizelemente	283
12.1.1	Heizwendeln	284
12.1.2	Heizbänder	285
12.1.3	Rohrheizkörper	285
12.1.4	Heizpatronen	286
12.1.5	Wärmerohr-Technik	287
12.2	Temperaturregelung	288
12.2.1	Thermoelemente	288
12.2.2	Temperaturregler	289

12.3	Strombedarf	290
12.4	Thermische Isolation von Heißkanalsystemen	292
12.5	Temperaturregelung am Anschnitt	294
12.5.1	Anschnittheizung	295
12.5.2	Anschnittkühlung	296
13	Mechanische Aspekte beim Betrieb von Heißkanalsystemen	297
13.1	Montage und Leckage	297
13.1.1	Auslegung des Systems	298
13.1.2	Bearbeitung und Montage von Heißkanalsystemen	301
13.2	Verformung des Werkzeugs und der Maschine	306
13.3	Vorgehensweisen bei der Inbetriebnahme	308
13.4	Farb- und Materialwechsel	309
13.5	Anschnitte	310
13.5.1	Angussrest	310
13.5.2	Verstopfung	311
13.5.3	Verschleiß	312
13.6	Wartung	312
14	Vorgehensweise bei der Gestaltung des Angussystems – Zusammenfassung	313
14.1	Anzahl der Anschnitte	313
14.2	Position des Anschnitts am Bauteil	314
14.2.1	Ästhetik	314
14.2.2	Einfluss auf Schwindung, Verzug und Eigenspannungen	314
14.2.2.1	Orientierung	314
14.2.2.2	Volumenschwindung in einzelnen Bauteilbereichen	315
14.2.2.3	Ungleichmäßige Füllung	316
14.2.3	Strukturelle Aspekte	317
14.2.3.1	Spannungen im Anschnittbereich	317
14.2.3.2	Fließorientierung	317
14.2.4	Anspritzen an schwer zugänglichen Stellen	318
14.3	Anordnung der Kavität	318
14.4	Material	318
14.5	Freistrahlbildung	319
14.6	Dicke und dünne Bereiche des Spritzgießteils	319
14.6.1	Volumenschwindung	320
14.6.2	Fließverzögerung	320
14.7	Anzahl der Kavitäten	320
14.8	Produktionszahlen	321
14.9	Präzisionsspritzgießen	321
14.10	Farbwechsel	321
14.11	Materialwechsel	322
14.12	Einmahlen von Angüssen	323

14.13	Dicke der Spritzgießteile	323
14.13.1	Dünnwandige Spritzgießteile	323
14.13.2	Dickwandige Spritzgießteile	324
14.14	Größe des Spritzgießteils	324
14.15	Erfahrung der Mitarbeiter	325
14.16	Handhabung nach dem Spritzgießen	325
14.17	Spannungsprobleme im Bauteil und im Anschnitt	326
14.18	Kombination von Heißkanal- und Kaltkanalsystemen	326
14.19	Zweistufige Spritzgießverfahren	327
15	Fehlerbehebung	329
15.1	5 Step Process	330
15.1.1	Scherinduzierte Ungleichgewichte in geometrisch balancierten Angussystemen	330
15.1.2	Abweichungen im Werkzeug	331
15.1.3	Kühlwirkung	332
15.1.4	Heißkanalsysteme	332
15.1.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	332
15.1.6	Anwendung des 5 Step Process	333
15.2	Leitlinien zur Problembehandlung beim Spritzgießen	336
15.3	Einrichtung des Spritzgießprozesses in zwei Stufen	379
15.4	Übersetzungsverhältnis	394
15.5	Beschreibung des Fließverhaltens in einem Spritzgießwerkzeug	395
15.6	Liste amorpher und teilkristalliner Kunststoffe	396
Index		399