

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	XV
Geleitwort	XVII
Der Autor	XIX
1 Grundlagen des Spritzgießprozesses	1
1.1 Komponenten einer Spritzgießmaschine	1
1.2 Der Zyklusablauf beim Spritzgießen	2
1.3 Das Spritzgießwerkzeug	5
1.4 Die Prozessphasen des Spritzgießprozesses – der Formteilbildungsprozess	7
1.4.1 Die Einspritzphase	8
1.4.2 Die Kompressionsphase	9
1.4.3 Die Nachdruckphase	11
1.4.4 Die Abkühlphase	11
1.5 Formteilfehler beim Spritzgießen	12
1.5.1 Glanzunterschiede	12
1.5.2 Bindenähte	13
1.5.3 Deformation	15
1.5.4 Verzug	16
1.5.5 Diesel-Effekt (Brenner)	18
1.5.6 Werkzeugbelag (Formbelag)	19
1.5.7 Dunkle Punkte (Black Specks)	20
1.5.8 Auswerfermarkierungen	21
1.5.9 Verbrennungsschlieren	23

1.5.10	Einfallstellen	24
1.5.11	Schallplatteneffekt (Kaltfließlinien)	26
1.5.12	Unvollständige Werkzeugfüllung	28
1.5.13	Farbschlieren	29
1.5.14	Glasfaserschlieren	31
1.5.15	Feuchtigkeitsschlieren	32
1.5.16	Delamination	33
1.5.17	Schubmarkierungen (Tiger-Lines)	34
1.5.18	Spannungsrisse, Mikrorisse	36
1.5.19	Freistrahlbildung	37
1.5.20	Lunker	38
1.5.21	Grate und Schwimmhäute	39
1.5.22	Luft einschließen	41
1.5.23	Kalter Pfropfen	42
1.5.24	Matte Stellen um Anschnitte oder hinter Querschnittsübergängen	43
1.5.25	Ungewöhnlicher Geruch	44
1.6	Spritzgießsimulation	45
1.6.1	Ablauf einer Simulationsrechnung – klassische Lösungsmethoden	50
2	Rheologische Grundlagen	53
3	Einführung in die Simulationstechnik	59
3.1	Grundlagen vereinfachter Spritzgießsimulation	60
3.2	Grundlagen der erweiterten Spritzgießsimulation	61
3.2.1	Unsicherheiten im Simulationsergebnis	64
4	Mathematische Grundlagen	67
4.1	Berechnungsphase der Spritzgießsimulation	67
4.2	Berechnungsvarianten	70
4.2.1	Finite-Differenzen-Methode (FDM)	70
4.2.2	Finite-Volumen-Methode (FVM)	71
4.2.3	Finite-Elemente-Methode (FEM)	71

5	Vernetzungsarten, Vernetzungsfehler und Vernetzungsqualität	73
5.1	Arten von Finiten Elementen	73
5.1.1	Vernetzungsarten Moldflow	75
5.1.1.1	Die Midplane (2D) Vernetzung	75
5.1.1.2	Die Dual Domain (2,5D) Vernetzung	76
5.1.1.3	Die dreidimensionale (3D) Vernetzung	77
5.1.2	Unterschied zwischen 2,5D- und 3D-Berechnung	78
5.1.3	Vernetzungsarten Moldex3D	79
5.1.4	Vernetzungsarten Cadmould	82
5.1.4.1	Cadmould 3D-F Vernetzung	82
5.1.4.2	Cadmould 3D-V Vernetzung	84
5.2	Einfluss der Vernetzung auf das Simulationsergebnis	85
5.3	Mögliche Netzfehler	89
5.3.1	Freie Kanten – Free Edges	89
5.3.2	Überlappungen – Overlappings	90
5.3.3	Schnittpunkte – Intersections	90
5.3.4	Dreieck-Seitenverhältnis – Aspect Ratio	91
5.4	Beurteilung der Vernetzungsqualität	91
6	Materialkarten der Simulationsprogramme	95
6.1	Einstell- und Prozessdaten	96
6.2	Rheologische Materialkarte	97
6.3	Thermische Materialkarte	100
6.4	Thermodynamische Materialeigenschaft – das pV-T-Diagramm	102
6.5	Mechanische Kenngrößen	107
6.6	Erstellen einer Materialkarte	110
7	Einfache Grundlagenübungen für die Simulation von Spritzgießvorgängen	115
7.1	Vergleich von Angussystemen im Hinblick auf den Druckbedarf	115
7.2	Fließweg-Wanddicken-Diagramme	122
7.3	Ermittlung des optimalen Prozessfensters beim Spritzgießen	127
7.4	Platte mit Durchbruch – Füllverhalten	132

7.4.1	Platte mit Durchbruch ohne Dünnstelle	133
7.4.2	Platte mit Durchbruch und anschnittnaher Dünnstelle von 2 mm	134
7.4.3	Platte mit Durchbruch und anschnittnaher Dünnstelle von 1,2 mm	138
7.4.4	Platte mit Durchbruch und anschnittferner Dünnstelle von 1,2 mm	141
7.5	Platte mit quer angeströmten Rippen	144
7.6	Platte mit zwei Strömungsrichtungen und einseitiger Dünnstelle	149
7.7	Parallele Fließwege mit unterschiedlicher Breite	155
7.8	Platte mit zentraler Dünnstelle	158
7.9	Kästchen mit umlaufenden dicken Rand	163
8	Simulation des Formteilbildungsprozesses im Spritzgießwerkzeug	169
8.1	Einspritzphase	170
8.1.1	Ermittlung der optimalen Einspritzgeschwindigkeit/-zeit	171
8.1.2	Vergleich des realen Einspritzdrucks mit dem simulierten Einspritzdruck anhand einer Fließspirale	172
8.1.2.1	Fließweg-/Wanddickendiagramm – Vergleich Realität/Simulation mit der Standardmaterialkarte	174
8.1.2.2	Fließweg-/Wanddickendiagramm – Vergleich Realität/Simulation mit der Kundenmaterialkarte . .	177
8.2	Nachdruckphase	178
8.3	Abkühlphase	180
9	Angusssysteme beim Spritzgießen	183
9.1	Allgemeines zu Angusssystemen	184
9.2	Kaltkanalsysteme bei Thermoplasten	186
9.3	Heißkanalsysteme	188
9.3.1	Simulation Einfachanspritzung offener Heißkanal	192
9.3.2	Mehrfachkavitätenwerkzeuge	197
9.3.2.1	Balancierungsmethoden von Mehrfachkavitäten- werkzeugen	200
9.3.2.2	Mathematisch rheologische Balancierung von Familienwerkzeugen	211

9.3.2.3	Natürliche rheologische Balancierung eines Vielfachspritzgießwerkzeugs	215
9.3.2.4	Thermische Balancierung eines 2+2-fach Espressobecher Familienwerkzeugs	225
9.3.3	Großwerkzeuge mit Mehrfachanspritzung	231
9.3.3.1	Interpretation der Simulationsergebnisse für Standard-Mehrfachanspritzungen	234
9.3.3.2	Kaskadenspritzgießen	257
9.3.4	Einfluss gescherter Randschichten in Heißkanalsystemen ...	276
9.3.5	Druckverluste an Querschnittsprüngen	278
9.3.6	Druckverluste an Umlenkungen	283
9.3.7	Simulation Nadelverschlussystem	286
10	Temperiersysteme eines Spritzgießwerkzeugs	289
10.1	Beispiel einer Temperierung	302
10.2	Einflussgrößen auf Schwindung und Verzug	314
10.2.1	Einfluss des Temperiersystems auf Schwindung und Verzug	322
10.2.2	Einfluss von Füllstoffen auf Schwindung und Verzug	325
10.2.3	Vergleich der simulierten Schwindungswerte mit der Realität	331
10.2.4	Simulation von Schwindung und Verzug anhand von Beispielformteilen	334
10.2.4.1	Simulation von Schwindung und Verzug mit ausgeprägter Oberflächentemperatur und mit realem Kühlkreislauf	334
10.2.4.2	Möglichkeiten der Kühloptimierung	351
10.2.4.3	Variotherme Prozessführung	382
10.2.4.4	Vergleich des simulierten Formteilverzugs mit gemessenen Verzugswerten	386
10.2.5	Lunkerbildung beim Spritzgießen	409
11	Bindenähte und Fließlinien	413
11.1	Entstehung von Bindenähten und Fließlinien	414
11.2	Einflussgrößen auf die Bindenahtqualität	419
11.3	Auswirkungen der Bindenaht auf die mechanischen Eigenschaften des Formteils	420

11.4	Einflussgrößen auf die Bindenahtfestigkeit	422
11.4.1	Einfluss der Einstellparameter auf die Bindenahtfestigkeit ...	427
11.4.2	Einfluss der Entlüftung auf die Bindenahtfestigkeit	429
11.4.3	Einfluss des Glasfasergehalts auf die Bindenahtfestigkeit	431
11.5	Simulation der Bindenahtfestigkeit	436
11.5.1	Vergleich der simulierten Festigkeit eines Zugstabs ohne Bindenaht und mit Bindenaht	441
11.6	Beispiele Bindenähte	442
12	Mechanische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen	449
12.1	Mechanische Werkzeugauslegung anhand von Beispielen	455
12.1.1	Beispiel Rahmenabdeckung Interieur	456
12.1.1.1	Das Spritzgießwerkzeug	456
12.1.1.2	Simulationsergebnisse	459
12.1.1.3	Mechanische Werkzeuganalyse	461
12.1.1.4	Folgen der Werkzeugbelastung	462
12.1.2	Beispiel Mittelkonsole	463
12.1.2.1	Formteil Mittelkonsole mit Heißkanal	463
13	Simulation von Einlegeteilen	467
13.1	Einfaches Grundbeispiel einer Simulation	467
13.2	Simulation eines hinterspritzten Einlegers aus Guss	474
14	Simulation von Kernversatz	477
14.1	Beispiele einer Simulation von Kernversatz	478
14.1.1	Beispiel Taster	479
14.1.2	Beispiel Fitting Automotive	489
14.1.3	Beispiel Pumpengehäuse	494
15	Integrative Simulation – Strukturanalyse	499
15.1	Entstehung von Orientierungen beim Spritzgießen	502
15.2	Eulersche und Lagrangesche Betrachtungsweise	514
15.3	Materialmodelle für die Orientierungsberechnung	516
15.4	Der Ablauf der integrativen Struktursimulation	523
15.5	Die Simulation des Spritzgießprozesses	524

15.6	Prozess-Strukturkopplung: Kenndatenermittlung und Erstellung der Materialkarte für Digimat	525
15.7	Mapping mit Digimat	528
15.8	Beispiel der integrativen Struktursimulation anhand eines Zugstabs ohne und mit Bindenaht	531
15.8.1	Prozesssimulation	532
15.8.2	Mapping mit Digimat	535
15.8.3	Struktursimulation mit Ansys Workbench	537
15.9	Beispiel der integrativen Simulation anhand eines mit Druck belasteten Behälters	539
15.10	Einfluss der Glasfaserlänge auf die mechanischen Eigenschaften	541
16	Sensorik beim Spritzgießen	547
16.1	Simulation der Forminnendruckkurve anhand des Schäfer-Kästchen-Werkzeugs	550
16.2	Simulation des Werkzeuginnendruckes und des spezifischen Schmelzedrucks anhand der Fließspirale	553
16.3	Prozessregelung mittels Sensorik	557
17	Prozessoptimierung mittels statistischer Versuchsplanung [Design of Experiments (DoE)]	561
17.1	Robust Design des Spritzgießprozesses	562
17.1.1	Problemstellung	562
17.1.2	Statistische Prozessmodelle	563
17.1.3	Verwendung von Matrixexperimenten zur Charakterisierung eines Prozesses	564
17.1.4	Unterscheidung von „Robust Design“ und statistischer Versuchsplanung	568
17.1.5	Auswertung von Taguchi-Matrixexperimenten	569
17.1.5.1	Analyse der Mittelwerte	570
17.1.5.2	Varianzanalyse	571
17.2	Prozessoptimierung mittels Autodesk Moldflow	575
17.3	Prozessoptimierung mittels Cadmould Varimos	582
17.3.1	Auswahl der Qualitätsmerkmale	586
17.3.2	Definition der Faktoren/Inputparameter	587

17.3.3	Erstellung des teilfaktoriellen Versuchsplan mit Varimos	588
17.3.4	Analyse des statistischen Versuchsplans/Optimierung	590
17.3.5	Gewichtung und Reduzierung der Qualitätsmerkmale	595
18	Sonderverfahren des Spritzgießens	599
18.1	Grundlagen Sandwichspritzgießen	599
18.2	Simulation Sandwichspritzgießen	603
18.3	Grundlagen Gasinnendrucktechnik (GID)	608
18.3.1	Simulation Gasinnendrucktechnik (GID): Beispiel Griff einer Kettensäge	609
18.3.2	Simulation Gasinnendrucktechnik (GID): Beispiel Luftfiltergehäuse	611
18.3.3	Simulation Gasinnendrucktechnik (GID): Beispiel großflächige Abdeckhaube	615
18.3.4	Simulation Gasinnendrucktechnik (GID): Großflächiges, dickwandiges Formteil	620
19	Vernetzende Formmassen	625
19.1	Allgemeines zu vernetzenden Formmassen	625
19.2	Strömungsverhalten vernetzender Formmassen	626
19.3	Beispiel einer Simulation eines Liquid Silicon Rubbers (LSR)	628
19.3.1	Werkzeugtechnik für LSR-Formmassen	629
19.3.2	Vernetzungskinetik von LSR- Formmassen	630
19.3.3	Optimierung der Anspritzposition des Topflappens	631
19.3.4	Formteiloptimierung des Topflappens im Hinblick auf die Vernetzungszeit	636
19.3.5	Entlüftung des Topflappenwerkzeugs	637
19.3.6	Optimierung des Heizsystems des Topflappenwerkzeugs	638
19.3.7	Simulation des thermischen Einsschwingprozesses des Topflappenwerkzeugs	643
20	Vernetzungsfreundliche Optimierung von CAD-Modellen mit CATIA V5	647
20.1	Bewertung der Eingangsdaten	650
20.2	Anleitung zur Optimierung der Daten	652

20.3	Analyse der Eingangsdaten	656
20.3.1	Baugruppe oder Einzelteil	657
20.3.2	Geschlossenes Volumen in einem Verbundkörper im Einzelteil	661
20.3.3	Mehrere Körper im Einzelteil	662
20.3.4	Flächenverband mit einzelnen Fehlstellen im Einzelteil	667
20.3.5	Positionierung mehrerer Bauteile passt nicht zueinander ...	668
20.4	Aufbereitung eines Flächenverbandes mit Fehlstellen	673
20.4.1	Funktionen des Generative Shape Designs	674
20.4.2	Hinweise zur Organisationsstruktur in Generative Shape Design	675
20.4.3	Vorhandene Flächen zusammenfügen	677
20.4.4	Zerlegen des Verbandes in Teilbereiche	678
20.4.5	Fehlstellen (Begrenzungen) lokalisieren	679
20.4.6	Flächensegmente (Unterelemente) entfernen	680
20.4.7	Vorhandene Flächen vergrößern	681
20.4.8	Offene Flächen an Randkurven trennen	683
20.4.9	Geschlossenen Flächenverband an Randkurven trennen	684
20.4.10	Allgemeines zur Flächenerzeugung mit Hilfe der Nachbargeometrie	686
20.4.11	Übergang erzeugen	687
20.4.12	Füllen erzeugen	688
20.4.13	Geschlossenen Flächenverband herstellen	689
20.4.14	Flächenverband zum Volumen schließen	690
20.5	Vereinfachung der Geometrie zur Reduzierung des Rechenaufwandes	692
20.5.1	Symmetrien ausnutzen	692
20.5.2	Komfortables Entfernen von Radien	693
20.5.3	Manuelles Entfernen von Radien	698
20.5.4	Schriftzug entfernen	703
20.5.5	Designelemente entfernen	714
20.6	Dateiausgabe	722
20.6.1	Stp-Format	722
20.6.2	Stl-Format	725

20.7	Optimierungs-Historie entfernen	726
20.8	Körper mittels Boolescher Operatoren zusammenfügen	729
20.9	Kollisionsanalyse als Kontrollmittel	729
20.10	Verschneidung von Flächen als Kontrollmittel	730
20.11	Verbindung von Heißkanaldüsen mit der Kavität	731
20.12	Positionierung und Skalierung von Kern und Formteil	733
	Index	737