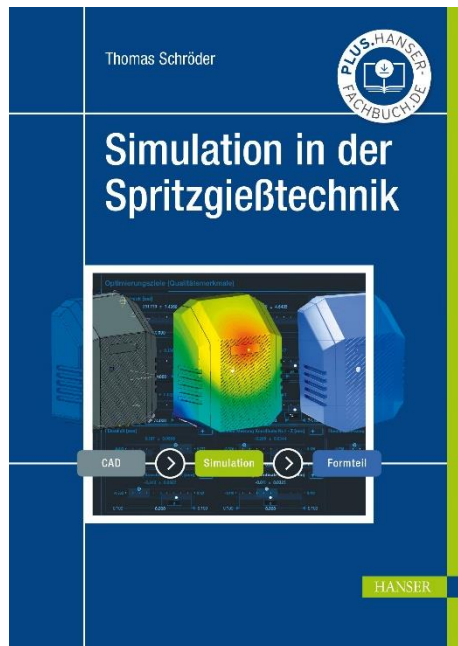


HANSER



Leseprobe

zu

Simulation in der Spritzgießtechnik

von Thomas Schröder

Print-ISBN: 978-3-446-46580-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47462-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446465800>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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	Spannungsrisssbildung, Mikrorisse	36
1.5.19	Freistrahlbildung	37
1.5.20	Lunker	38
1.5.21	Grate und Schwimmhäute	39
1.5.22	Lufteinschlüsse	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 – Overappings	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 pvT-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 Angussssystemen 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 Werkzeuginnendrucks 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

Vorwort

Computerunterstützte Simulationsprogramme sind im Bereich Spritzgießen mittlerweile etablierte Hilfsmittel bei der Formteil- und Werkzeugauslegung. Sie unterstützen den Konstrukteur frühzeitig bei der Formteilentwicklung und der Auslegung des Werkzeugs und reduzieren damit die oftmals aufwändigen Änderungsschleifen. Damit kann die Entwicklungszeit reduziert werden und die Entwicklungskosten lassen sich senken. Das Weiteren lassen sich die Formteile mit den Programmen qualitativ und der Spritzgießprozess im Hinblick auf Effizienz optimieren. Da die Programme sehr unterschiedliche und vielfältige Simulationen ermöglichen, ist der Umfang der erstellten Simulationsergebnisse dementsprechend groß. Die Schwierigkeit liegt in der Regel nicht in der Erstellung der Simulationsergebnisse, da die Programme alle sehr anwenderfreundlich sind. Die Schwierigkeit besteht vielmehr darin, die von den Programmen ausgegebenen Ergebnisse zu verstehen und zu interpretieren. Nur wenn das der Fall ist, ist der Anwender auch in der Lage, entsprechende Schlüsse aus dem Ergebnis zu ziehen und ggf. Maßnahmen zur Verbesserung vorzuschlagen. Genau an dieser Stelle setzt dieses Buch an. Nach einer allgemeinen Einführung in den Spritzgießprozess, in die Vernetzung und in die mathematischen Grundlagen folgen einfache Grundlagenübungen. Diese dienen dazu, dass die Leserinnen und Leser im ersten Schritt einen Einblick in die Simulationstechnik erhält und die Ergebnisse zu interpretieren lernt. Anschließend werden in jedem Kapitel die spritzgießtechnischen Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und mathematischen Zusammenhänge erläutert, bevor Beispielrechnungen an realen Bauteilen durchgeführt werden. In Abhängigkeit vom jeweiligen Simulationsfall werden die Ergebnisse der Simulation interpretiert und Lösungskonzepte erarbeitet. Schlussendlich ist es das Ziel, die Leserinnen und Leser anhand dieser Simulationen für die wesentlichen Punkte, die je nach Formteil ganz unterschiedlich sein können, zu sensibilisieren.

Da das Buch eine Vielzahl an Bildern und Grafiken enthält und diese aufgrund der Größe nicht immer sehr gut zu erkennen sind, haben wir uns entschlossen, dem Leser alle Bilder zusätzlich als Bilddaten zur Verfügung zu stellen. Unter plus.hanser-fachbuch.de können Sie mit dem Code auf der ersten Seite des Buches auf die Bilder zugreifen.

Darmstadt 2022

Dr. Thomas Schröder

Geleitwort

Die erfolgreichsten Unternehmen der Spritzguss-Branche arbeiten inzwischen nach dem Motto: „Bei uns wird jedes Teil im Voraus simuliert.“ Egal ob Sie schon viele Jahre Erfahrung als Konstrukteur, Werkzeugmacher oder Spritzgießer haben oder ob Sie gerade noch mitten in Ihrer Ausbildung oder Ihrem Studium stecken: im Zusammenspiel mit Simulationen kommen Ihre Fähigkeiten noch besser zum Tragen, weil Sie Probleme im Prozess oder am Bauteil erkennen und vermeiden können, noch bevor der erste Span im Werkzeugbau geflogen ist. Dazu gehören Füllfehler, Verzüge, Oberflächenprobleme u. V.m. Es gibt aber noch einen weiteren entscheidenden Vorteil, den man auf den ersten Blick leicht übersehen kann. Simulationsergebnisse und -bilder machen es Ihnen um ein Vielfaches einfacher, mit Kollegen, Vorgesetzten und Kunden über neue Lösungsansätze zu sprechen, da sie anschaulich darstellen können, was passiert, wenn man vorgeht, wie ursprünglich geplant. Das spart Ihnen Zeit und Nerven im Umgang mit Ihren Kollegen und Kunden.



So ein mächtiges Werkzeug will natürlich erlernt werden – ein wichtiger Teil davon ist, die Arbeitsweise zu erlernen und zu durchdringen, wie man die Realität möglichst genau und pragmatisch abbildet. Doch auch hier gilt, wie in so vielen Fällen: die beste Simulation nützt wenig, wenn danach nicht die richtigen Schlüsse aus den Ergebnissen gezogen werden. Die Ergebnisse sind nur so wertvoll wie ihre Interpretation. Prof. Dr. Thomas Schröder trifft deshalb mit diesem Buch den Nagel auf den Kopf, indem er den Fokus auf das richtige Interpretieren der Simulationsergebnisse legt. Er hat für Sie 30 Jahre Expertise in der Kunststofftechnik in dieses Werk gepackt, was Ihnen den einen oder anderen Trugschluss ersparen kann. Sie können das geballte Wissen als echten Vorsprung für Ihre Karriere nutzen, denn gute „Simulanten“ werden am Arbeitsmarkt immer dringender gesucht. Sie stei-

gern mit der Lektüre dieses Buches deshalb nicht nur Ihr fachliches Wissen, sondern auch Ihren Marktwert.

Ines Oud

Vorsitzende Kunststoffland NRW und Managing Director Simcon kunststofftechnische Software GmbH

Der Autor

Prof. Dr. Thomas Schröder lehrt an der Hochschule Darmstadt (h_da Hochschule für Angewandte Wissenschaften) die Fächer Spritzgießen, Rheologie, Werkzeugtechnik und Simulationstechnologie. Nach seinem Maschinenbaustudium der Fachrichtung Kunststofftechnik an der RWTH Aachen promovierte er bei Prof. Dr. Dr. h.c. Walter Michaeli mit dem Themengebiet Gasinjektionstechnik. Nach einigen Jahren bei einem namhaften Kunststoffverarbeiter wechselte er zur Fa. Krupp Coroplast nach Hamburg, wo er für die Spritzgießsysteme zur Herstellung von Vorformlingen verantwortlich war. Im Anschluss an diese Tätigkeit wechselte er zu Fa. Netstal Maschinen AG nach Näfels in die Schweiz. Dort leitete er die Anwendungstechnik SPA des Spritzgießmaschinenherstellers, bis er im Jahr 2001 einen Ruf an die Hochschule Darmstadt erhielt. Er ist außerdem der Autor des Buches „Rheologie der Kunststoffe“, welches im Jahr 2020 in der zweiten Auflage vom Hanser Verlag herausgegeben wurde. Prof. Dr. Thomas Schröder ist Mitglied des Instituts für Kunststofftechnik Darmstadt ikt und Vorsitzender der Gesellschaft zur Förderung technischen Nachwuchses GFTN e. V. Institut an der Hochschule Darmstadt. Des Weiteren ist er Mitglied des Promotionszentrums Nachhaltigkeitswissenschaften und verfügt aufgrund seiner vielfältigen Forschungen, d.h. Drittmittelprojekte im Bereich Spritzgießen, Rheologie, Simulations- und Werkzeugtechnologie, über das Promotionsrecht. Prof. Dr. Thomas Schröder ist weiterhin geschäftsführender Gesellschafter der Fa. Plast-Solutions Consulting GmbH mit Sitz in Mannheim.



Danksagung

Dieses Buch hätte nicht ohne die wertvolle Mitarbeit unzähliger Bachelor- und Masterstudenten entstehen können. Insofern möchte ich mich zuallererst bei den vielen Absolventen, die ich in unterschiedlichen Themengebieten betreuen durfte, bedanken. Ich wünsche Ihnen für Ihren beruflichen Werdegang und auch privat

alles Gute und viel Erfolg! Insbesondere möchte ich mich bei den nachfolgenden Personen für die aktive Mitarbeit am Buchprojekt bedanken: Aletta Berger, Sophie Dolata, Mary Göhler, Laura Gollan, Markus Hammermeister, Fabian Nebel, Bardo Palmberg, Bastian Paulsen und Maximilian Teich.

Des Weiteren gilt mein Dank der Firma Simcon, die mich mit den Softwaremodulen Cadmould und Varimos stets bestens unterstützt hat. Weiterhin möchte ich mich bei der Firma Mold and Hotrunner Technology MHT bedanken, die mich ebenfalls bei der Erstellung des Buches unterstützt hat.

Grundlagen des Spritzgießprozesses

■ 1.1 Komponenten einer Spritzgießmaschine

Rund ein Drittel aller Kunststoffe werden im Spritzgießverfahren verarbeitet. Dieses Urformverfahren zählt zu den diskontinuierlichen Verarbeitungsverfahren. Für die Herstellung der Spritzgießformteile aus Thermoplasten, Elastomeren und Duromeren werden Spritzgießmaschinen eingesetzt. Diese Spritzgießmaschinen bestehen aus verschiedenen Baugruppen (Bild 1.1). Sie setzen sich aus dem Maschinenbett, der Plastifizier- und Einspritzeinheit, der Schließ- und Zuhalteeinheit, einer Temperiereinrichtung, sowie dem Werkzeug und der Steuereinheit zusammen [1].

Das Maschinenbett dient hierbei der Aufnahme der Schließ-/Zuhalte- und der Plastifizier- und Einspritzeinheit. Bei Maschinen, die eine Hydraulik benötigen, werden im Maschinenbett zusätzlich die Pumpen und Tanks für das Hydrauliköl verbaut. Bei vollelektrischen Spritzgießmaschinen werden die fünf Hauptbewegungsachsen (Dosieren, Einspritzen, Verfahren der Plastifizier- und Einspritzeinheit, Werkzeugbewegung und Auswerfen) über Elektromotoren angetrieben. Die Schließeinheit ist zum einen zur Aufnahme des Werkzeugs erforderlich und zum anderen zum Aufbringen der Zuhaltekräfte. Diese Kräfte verhindern ein Öffnen des Werkzeugs bei der Formgebung. Eine weitere Aufgabe der Schließeinheit ist das Öffnen und Schließen des Werkzeugs. Das angesprochene Werkzeug dient der Formgebung des Kunststoffes und der Abfuhr der Wärme, sodass aus der Kunststoffschmelze ein Formteil entsteht. Die Plastifizier- und Einspritzeinheit dient dem Aufschmelzen und Bereitstellen des Kunststoffes. Die Kunststoffgranulate werden über einen Trichter einer, in einem beheizten Zylinder verlaufenden, Schnecke zugeführt. Durch die Bewegung der Schnecke und die Wärmeleitung des Zylinders wird der Kunststoff plastifiziert und in einen Schneckenorraum gefördert. Aus diesem Schneckenorraum wird er im Anschluss in das geschlossene Werkzeug weitergeleitet. Die Steuerung wird zum Einstellen und Überwachen der Einstellparameter benötigt und die Temperiereinrichtung dient zur Temperierung des Werkzeugs mit einer vorgegebenen Einstelltemperatur [1].

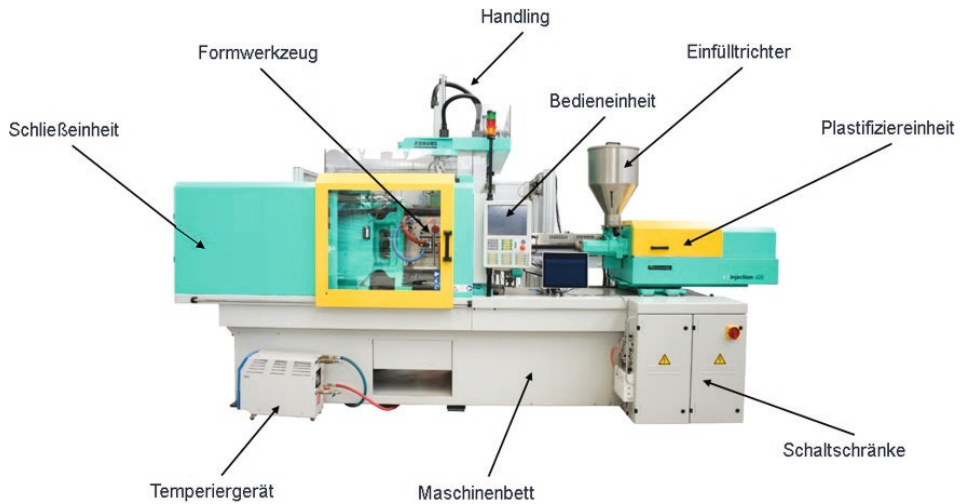


Bild 1.1 Aufbau einer Spritzgießanlage

Spritzgießmaschinen können anhand ihrer Bauform und ihres Antriebskonzepts unterschieden werden. So kann zwischen horizontalen und vertikalen Spritzgießmaschinen und zwischen vollelektrischen, hydraulischen und hybriden Maschinen unterschieden werden. Die Unterscheidung zwischen einer horizontalen und einer vertikalen Spritzgießmaschine erfolgt durch die Lage des Werkzeugs bzw. der Trennebene in der Maschine. Die Unterscheidung zwischen vollelektrischen, hybriden und hydraulischen Spritzgießmaschinen geht auf die eingesetzte Antriebsart zurück. Bei vollelektrischen Maschinen werden die Achsen elektrisch angetrieben, bei hydraulischen Maschinen hydraulisch und bei einer hybriden Maschine ist eine Mischung zwischen hydraulisch und elektrisch angetriebenen Achsen vorhanden [2].

■ 1.2 Der Zyklusablauf beim Spritzgießen

Der klassische Spritzgießzyklus läuft in fünf Schritten ab. Ein neuer Zyklus wird mit dem Schließen des Werkzeugs begonnen. Wenn das Werkzeug geschlossen und die Zuhaltekraft aufgebaut ist, wird die Plastifizier- und Einspritzeinheit nach vorne an das Werkzeug gefahren. Daraufhin wird das bereits aufgeschmolzene Kunststoffgranulat, d. h. die Schmelze durch einen axialen Vorschub der Schnecke geschwindigkeitsgeregelt in das Formnest eingespritzt. Ist das Werkzeug zu 95 – 98 % gefüllt, beginnt die Nachdruckphase, um die Schwindung des zu fertigenden Bauteils auszugleichen. Bei dieser wird der Nachdruck geregelt und Schmelze

in das Werkzeug nachgedrückt, um die temperaturbedingte Volumenschwindung auszugleichen. Diese Phase endet, wenn die Verbindung zum Formteil, also der Anschnitt erstarrt, d. h. der sogenannte Siegelpunkt erreicht ist. Ab diesem Punkt wird die Plastifizier- und Einspritzeinheit vom Werkzeug zurückgefahren und die sogenannte Restkühlzeit beginnt. Während dieser Zeit erfolgt der Dosiervorgang für den nächsten Zyklus, was bedeutet, dass der Schneckenorraum wieder mit Schmelze gefüllt wird. Sobald das Bauteil seine Entformungstemperatur erreicht hat, wird das Werkzeug geöffnet und das Formteil ausgeworfen oder über ein Handling-System entnommen. Bild 1.2 veranschaulicht den Ablauf eines Spritzgießzyklus.

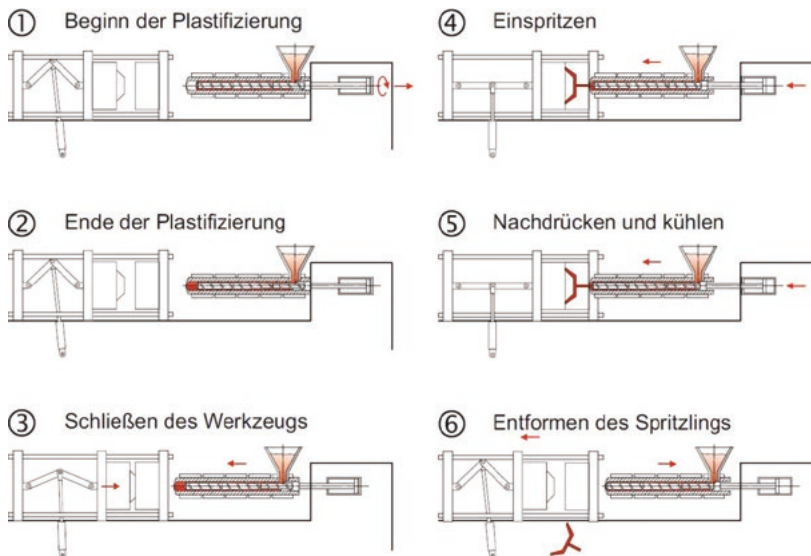


Bild 1.2 Verfahrensablauf beim Spritzgießen [1]

Die Zykluszeit setzt sich demnach aus der benötigten Zeit zum Öffnen und Schließen des Werkzeugs, Einsatz von Handling und Auswerfen, sowie der Einspritzzeit, der Nachdruckzeit und der Restkühlzeit zusammen. Die Zykluszeit ist für eine wirtschaftliche Planung besonders wichtig, da die Verringerung dieser meist eines der wichtigsten Ziele im Spritzgießprozess ist. Anhand dieser kann mit der geforderten Stückzahl pro Jahr das Werkzeug und die Kavitätanzahl ausgelegt werden. Bild 1.3 veranschaulicht einen klassischen Zyklusverlauf beim Spritzgießen [2, 1].

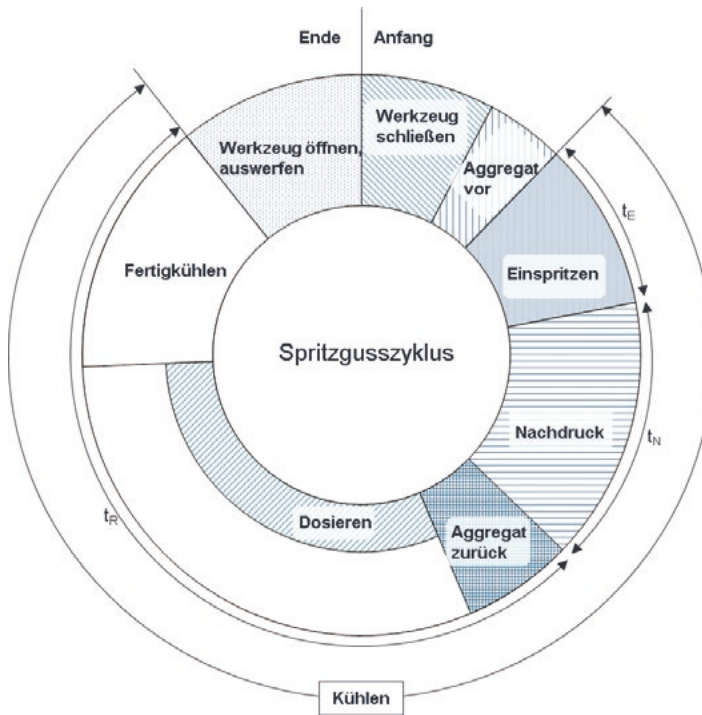


Bild 1.3 Spritzgießzyklus

Die Zykluszeit kann demnach wie folgt berechnet werden (Formel 1.1):

$$t_z = t_E + t_N + t_{RK} + t_{WZauf} + t_{Auswerfer/Handling} + t_{WZzu} \quad (1.1)$$

Mit:

t_z = Zykluszeit

t_E = Einspritzzeit

t_N = Nachdruckzeit

t_{RK} = Restkühlzeit

$t_{Auswerfer/Handling}$ = Entnahmezeit

$t_{WZauf/zu}$ = Werkzeug öffnen und schließen

Sobald das Werkzeug geschlossen ist beginnt die Einspritzphase. Diese fließt zugleich in die Kühlzeit mit ein, denn sobald das Material in das Werkzeug eintritt, beginnt die Kühlung durch den Kontakt der Schmelze mit der Werkzeugwand einzusetzen. Die Nachdruckphase dient dem Ausgleich der Volumenschwindung beim Erstarren. Dabei wird Schmelze unter definiertem Nachdruck nachgefördert. Sobald die Nachdruckphase abgeschlossen ist, beginnt die Restkühlzeit, bis das Bauteil entformt werden kann. Während der Restkühlzeit wird die für den nächsten Schuss benötigte Masse aufbereitet, d. h. plastifiziert. Sobald der Spritzgießkörper eine ausreichende Stabilität zum Entformen erreicht hat, öffnet sich das Werkzeug

und das Bauteil kann über Auswerfer ausgeworfen werden. Die Bauteile können auch über ein Handling entnommen werden. Die hierfür benötigte Zeit muss bei der Berechnung der Zykluszeit berücksichtigt werden.

■ 1.3 Das Spritzgießwerkzeug

In der Regel besteht jedes Spritzgießwerkzeug (Bild 1.4) aus zwei Werkzeughälften, einer feststehenden Düsenseite, sowie einer Auswerferseite, die beweglich ist. Das Formteil wird dabei durch die sogenannte Kavität gebildet. Die Formmasse strömt durch die Angussbuchse bis sie in die Kavität hineingelangt. Diese Angussbuchse befindet sich auf der feststehenden Düsenseite und ist beim Einspritzvorgang in Kontakt mit der Plastifizier- und Einspritzeinheit. In der Regel besteht die Kavität aus einem Gesenk und aus einem Kern, wobei sich das Gesenk oftmals auf der Düsenseite und der Kern auf der Auswerferseite befindet.

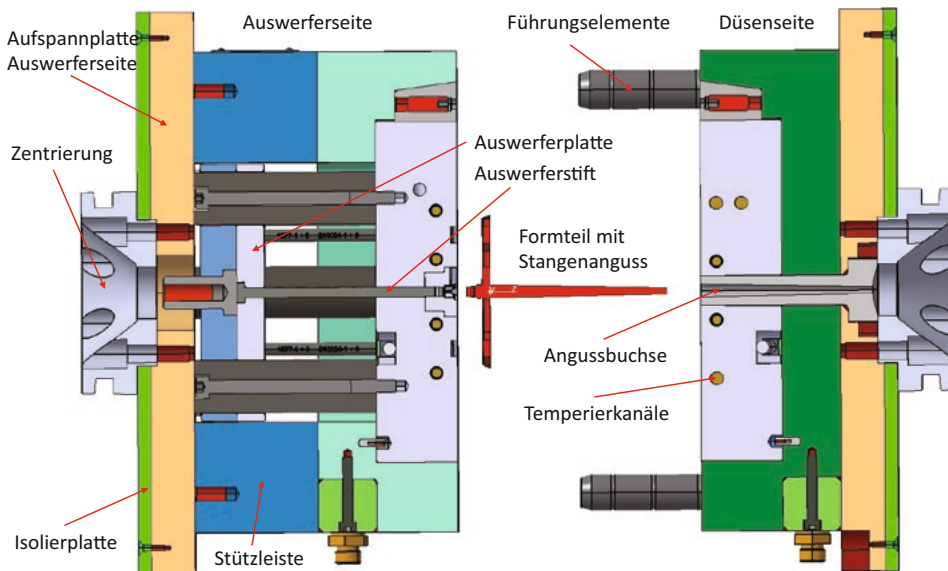


Bild 1.4 Aufbau eines Zweiplatten-Spritzgießwerkzeugs (Quelle: PlastSolutions GmbH)

Um die Wärme aus dem Formteil abführen zu können sind Kühlkanäle, durch die ein Kühlmedium (in der Regel Wasser) strömt, in den beiden Werkzeughälften notwendig. Dies ist bis zu einer Temperatur von 200 °C unter Druck mit Wasser möglich. Bei höheren Temperaturen wird üblicherweise Öl als Wärmeträgermedium verwendet, wobei Wasser im Vergleich zu Öl die besseren Wärmeträgereigenschaften

ten hat. Es wird eine turbulente Strömung angestrebt, da eine turbulente Strömung zu einer besseren Wärmeabfuhr führt.

Sowohl das Gesenk als auch der Kern befinden sich in einer Formplatte. Im Anschluss an den Formteilbildungsprozess, wenn das Formteil die Entformungstemperatur erreicht hat, werfen Auswerferstifte das Formteil vom Kern, d. h. von der beweglichen Auswerferseite aus. Dabei wird der sogenannte Auswerferbolzen von einem, meist hydraulisch angetriebenem, Auswerfer nach vorne gestoßen und die Auswerferplatte, in welcher die Auswerferstifte sitzen, drückt das Formteil aus der beweglichen Auswerferseite heraus.

Hinter der Zwischenplatte befinden sich die Stützleisten und zwischen den Stützleisten die bewegliche Auswerferplatte. Um das Werkzeug auf der beweglichen Maschinenplatte aufspannen zu können, befindet sich ganz am Ende eine Aufspannplatte auf der Auswerferseite. Gleiches gilt für die Düsenseite, an deren Ende sich die Aufspannplatte der feststehenden Düsenplatte befindet, um diese Seite auf der feststehenden Maschinenplatte befestigen zu können. Ggf. sind diese beiden Platten noch mit einer zusätzlichen Isolierplatte versehen, um eine Wärmeleitung vom Werkzeug in die Aufspannplatten zu reduzieren.

Sowohl auf der Düsenseite als auch auf der Auswerferseite ist ein Zentrierring vorgesehen, um das Werkzeug besser in der Maschine montieren und zentrieren (Mittellinie zur Plastifiziereinheit) zu können. Führungselemente führen das Werkzeug und halten das Werkzeug bei demontiertem Zustand zusammen.

Zu den wesentlichen Aufgaben des Spritzgießwerkzeugs zählt es die Formmasse von der Plastifizier- und Einspritzeinheit über die Angussbuchse in die Kavität strömen zu lassen und dort aufzunehmen. In der Kavität muss die Wärme des Kunststoffes abgeführt werden, bis das Formteil auf Entformungstemperatur abgekühlt ist, d. h. das Werkzeug hat die Aufgabe die Formgebung durchzuführen und dient als Wärmtauscher. Anschließend wird nach Erreichen der Entformungstemperatur das Formteil durch die Auswerfer ausgestoßen. Generell ist darauf zu achten, dass das Werkzeug steif genug ist, um dem hohen Druck während der Einspritzphase standzuhalten und um einer Deformation durch die hohe Zuhaltkraft entgegenzuwirken.

Spritzgießsimulationsprogramme können Spritzgießwerkzeuge rheologisch, thermisch und mechanisch auslegen. Das bedeutet, dass das Strömen der Kunststoffschmelze von der Schneckenspitze über das Anguss-/Anschnittsystem bis zum Formteilende, d. h. bis zum Fließwegende, simuliert werden kann. Anschließend ist das Spritzgießsimulationsprogramm in der Lage die Nachdruckphase und auch die Abkühlphase zu simulieren. Damit lassen sich während der Einspritz-, der Nachdruck- und der Abkühlphase, Drücke, Geschwindigkeiten, Schergeschwindigkeiten, Schubspannungen, Temperaturverläufe und andere Größen wiedergeben. Der Spritzgießsimulationsprozess und die Kühlung lassen sich optimieren und das

Schwindungs- und Verzugsverhalten kann vorhergesagt werden. Die Schwindungs- und Verzugsvorhersage ermöglicht eine frühzeitige Optimierung des Spritzgießwerkzeugs und ggf. auch eine Vorhaltung des Werkzeugs [3]. Statistische Versuchspläne (Design of Experiments DoE) unterstützen den Anwender der Simulationsprogramme bei der Beurteilung der Einflussparameter auf die Qualitätsmerkmale und der Prozessoptimierung [4].

Die heutigen Simulationsprogramme ermöglichen es auch den Anfahrprozess einer Spritzgießmaschine zu simulieren. Da es eine Zeitlang dauert bis das thermische Gleichgewicht des Spritzgießwerkzeugs erreicht ist, ist eine solche Simulation des Anfahrvorganges sehr wichtig. Neben der Deformation von einzelnen Werkzeugelementen lässt sich auch der Kernversatz durch Spritzgießprogramme vorhersagen. Eine mechanische Auslegung des Werkzeugs ist mithilfe der Simulationsprogramme möglich.

■ 1.4 Die Prozessphasen des Spritzgießprozesses – der Formteilbildungsprozess

Grundsätzlich besteht der Formteilbildungsprozess beim Spritzgießen aus den drei Prozessphasen:

- Einspritzphase (dynamische Phase)
- Kompressionsphase (quasistatische Phase)
- Nachdruckphase (quasistatische Phase)

In diesen drei Phasen wird die Qualität eines Spritzgießformteils definiert. Bild 1.5 zeigt den Forminnendruckverlauf mit den drei Phasen des Formteilbildungsprozesses beim Spritzgießen.

Alle wesentlichen Qualitätsmerkmale, wie das Gewicht, die Maßhaltigkeit, die Oberflächenqualität etc. werden in erster Linie in diesen drei Formteilbildungsphasen geprägt. Insofern ist eine Kenntnis über den Druckverlauf in den Prozessphasen von großer Bedeutung.

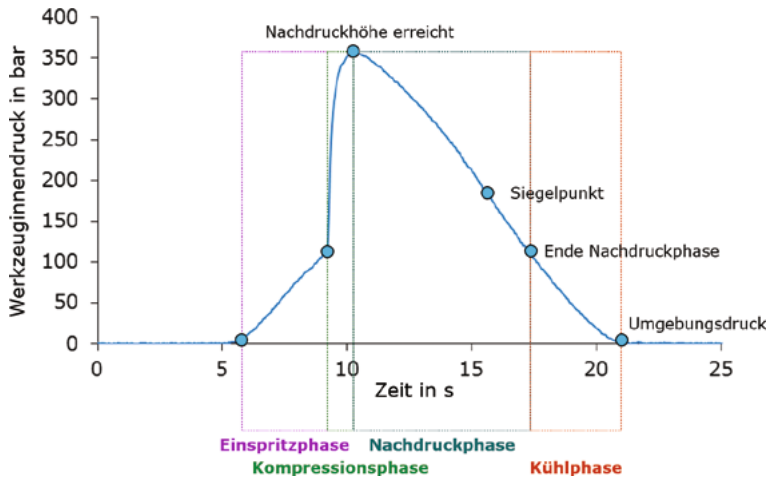


Bild 1.5 Werkzeuginnendruckverlauf beim Spritzgießen

Auch an dieser Stelle sind computerunterstützte Simulationsprogramme sehr hilfreich. Mit diesen Programmen lassen sich Aussagen über den Formteilbildungsprozess (Druck, Fließfrontgeschwindigkeit, Scherung, Schubspannung, Temperatur etc.) tätigen. Da der Formteilbildungsprozess, wie Bild 1.5 zeigt, in einem direkten Zusammenhang mit der Formteilqualität steht, sind im Vorfeld Aussagen über evtl. Schwachstellen oder Formteilfehler möglich. Dazu ist jedoch generell ein hohes Fachwissen notwendig, da die Zusammenhänge in der Regel recht komplex sind.

1.4.1 Die Einspritzphase

In der dynamischen Einspritzphase wird der von der Plastifizier- und Einspritz-einheit aufbereitete flüssige Kunststoff durch den axialen Vorschub der Schnecke in das geschlossene Werkzeug eingespritzt. Dieser Vorgang erfolgt in der Regel geschwindigkeitsgeregelt. Das bedeutet, dass die Spritzgießmaschine den zur Füllung notwendigen Spritzdruck (bis zu 2600 bar) zur Verfügung stellt. Insofern ist der rechtzeitige Umschaltzeitpunkt, d.h. die Umschaltung von der geschwindigkeitsgeregelt auf die druckgeregelt Nachdruckphase, von großer Bedeutung. Dieser Umschaltzeitpunkt sollte zwischen 95 und 98 % der volumetrischen Füllung der Kavität liegen. Im Anschluss an die Einspritzphase folgt die Kompressionsphase.

Durch den Quellströmungsvorgang an der Fließfront und die Wandhaftung der Schmelze wird die Oberflächenqualität des Formteils in dieser Phase definiert. Des Weiteren bilden sich die strömungsbedingten Orientierungen von Molekülketten und Füllstoffen, wie Glasfasern, in dieser Phase aus.

Erfolgt der Umschaltzeitpunkt von der Einspritzphase auf die Nachdruckphase zum richtigen Zeitpunkt, so sieht der Forminnendruck wie in Bild 1.6 dargestellt aus.

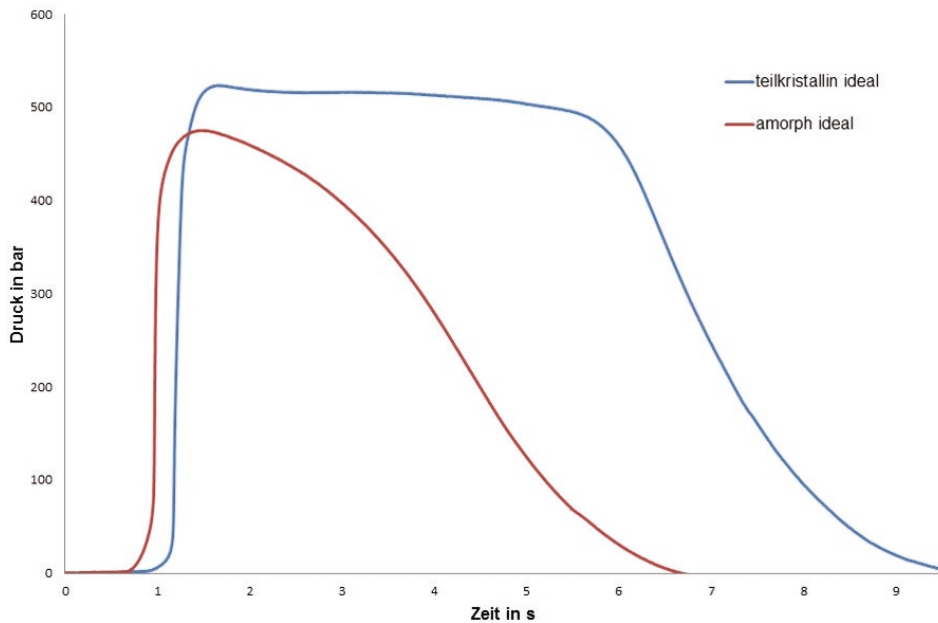


Bild 1.6 Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei korrektem Umschaltzeitpunkt

In Bild 1.6 ist der Forminnendruckverlauf für einen amorphen Kunststoff (rot) und einen teilkristallinen Kunststoff (blau) dargestellt. Bei amorphen Kunststoffen ist der Verlauf aufgrund des Abkühlverhaltens eher harmonisch rund, während bei einem teilkristallinen Kunststoff zunächst ein ausgeprägtes Nachdruckniveau zu erkennen ist und der Forminnendruck anschließend recht abrupt abfällt. Als Standardwert ist in den Simulationsprogrammen oftmals ein Umschaltzeitpunkt von 98 – 99 % volumetrischer Füllung hinterlegt. Dieser Wert muss nicht zwingend der korrekte Punkt für den Umschaltvorgang sein. Gleiches gilt für die Einspritzzeit, bzw. die Einspritzgeschwindigkeit. Diese voreingestellten Werte sollten immer vor einer Simulation auf Plausibilität geprüft werden.

1.4.2 Die Kompressionsphase

Im Anschluss an die Einspritzphase folgt die quasistatische Kompressionsphase. Die Ausbildung der Kompressionsphase hängt entscheidend vom Umschaltzeitpunkt ab. Wird zu früh von Einspritzen auf Nachdruck umgeschaltet, so bricht der Forminnendruck ein (Bild 1.7 links) und die volumetrische Restfüllung der Kavität

erfolgt druckgeregelt, was sich auf die Qualität des Formteils (Oberfläche, Orientierungen etc.) auswirkt. Erfolgt die Umschaltung zu spät, d. h. nach 99 % der volumetrischen Füllung, so versucht die Spritzgießmaschine die Einspritzgeschwindigkeit konstant zu halten, auch wenn die Kavität schon zu 100 % gefüllt ist. Das hat große Druckspitzen im Spritzgießwerkzeug zur Folge (Bild 1.7 rechts).

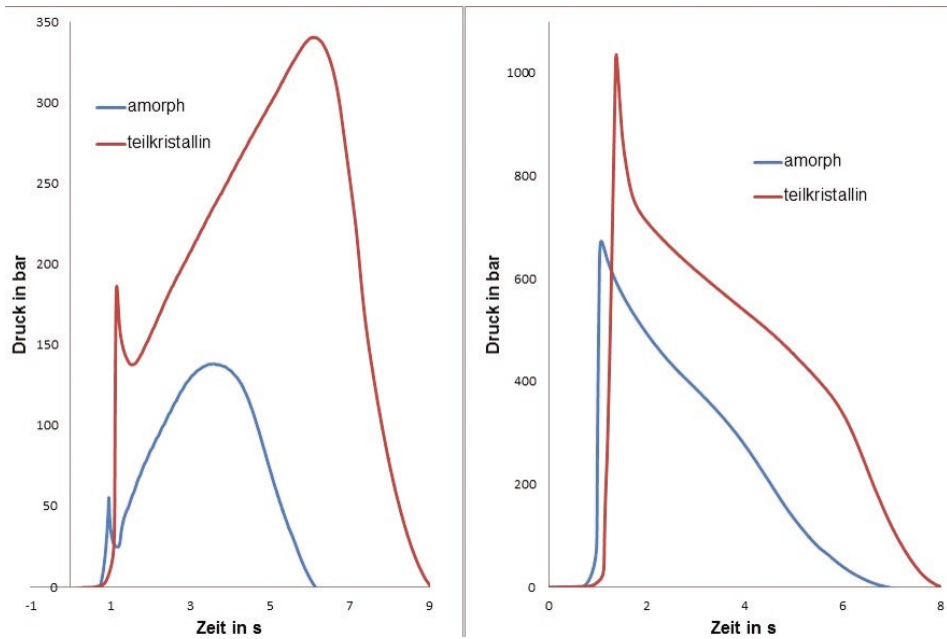


Bild 1.7 Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei nicht korrektem Umschaltpunkt

Unter Umständen reicht bei einer zu späten Umschaltung die Zuhaltkraft der Spritzgießmaschine nicht aus und das Werkzeug öffnet sich. Ein Überspritzen und die damit verbundene Gratbildung ist die Folge. Der Grat verbleibt auch in der Abkühlphase in der Formtrennung. Da sich das Formteil von der Kavitätenoberfläche während der Abkühlphase löst, drückt die Zuhaltkraft der Spritzgießmaschine auf den Grat (Schwimmhaut), der sich in der Werkzeuggestaltung befindet. Eine Werkzeugschädigung kann die Folge dieses Vorgangs sein. Des Weiteren kann es dazu kommen, dass die Schmelze durch den hohen Forminnendruck wieder zurück in die Plastifiziereinheit strömt, insofern der Innendruck höher ist als der eingestellte Nachdruck und die Maschine oder das Werkzeug über keine Nadelverschlusssdüse verfügt.

1.4.3 Die Nachdruckphase

In der quasistatischen Nachdruckphase soll die Volumenschwindung des Formteils kompensiert, d. h. ausgeglichen werden. Diese Volumenschwindung, die sich durch das Abkühlen des Formteils und die Relaxationsvorgänge der Molekülketten ergibt, wird durch das langsame Nachfördern von heißer Schmelze unter hohem Druck kompensiert. Als Startwert für die Nachdruckhöhe wählt der Bediener einer Spritzgießmaschine in der Regel einen Prozentsatz vom Einspritzdruck (spez. Schmelzedruck im Schneckenorraum). Als Startwert können 30 % vom Einspritzdruck angesetzt werden. Dieser Wert wird angehoben, bis die gewünschte Formteilqualität (Maßhaltigkeit, Einfallstellen, Lunker, Gewicht etc.) erreicht ist. Der Nachdruck sollte dabei nur so hoch wie notwendig eingestellt werden, da sich ein hoher Nachdruck auch negativ auf die Formteilqualität (Eigenspannungen, Orientierungen etc.) auswirken kann. Des Weiteren belastet ein hoher Nachdruck die Maschine und das Werkzeug und der Energieverbrauch steigt an.

Die Simulationsprogramme haben in der Regel eine Vorgabe für die Nachdruckhöhe, die aus Tabellenwerken stammt. Dieser Wert ist unter anderem vom Kunststoff und der Formteilgeometrie abhängig. Da die Simulationsprogramme den Einspritzdruck, d. h. den spez. Schmelzedruck im Schneckenorraum, nicht kennen, müssen sie mit diesen Tabellenwerten rechnen. Diese gilt es unbedingt zu überprüfen und mit Werten aus der Praxis, d. h. Erfahrungswerten, abzugleichen. Gleiches gilt für die Nachdruck- und die Restkühlzeit.

Beendet ist die Nachdruckzeit, wenn der sogenannte Siegelpunkt erreicht ist. In der Regel ist es der dünnwandige Anschnitt, der zunächst einfriert und das Ende des wirkenden Nachdrucks bewirkt. Im Forminnendruckverlauf ist der Siegelpunkt bei dem amorphen Kunststoff (Bild 1.7 rot) sehr schön am Wendepunkt in der abfallenden Nachdruckwirkung zu erkennen.

Die Simulationsprogramme nutzen diesen Verlauf nicht zur Ermittlung eines Siegelpunkts, sondern definieren eine sogenannte Fließgrenz- oder No-Flow Temperatur, die aus den pvT Daten und der spezifischen Wärmekapazität errechnet wird. Dies ist der Grenzwert, ab dem der Kunststoff einfriert und, wie der Name schon sagt, nicht mehr fließt.

1.4.4 Die Abkühlphase

In der Abkühlphase erfolgt die Abkühlung des Formteils bis zur Entformungstemperatur. In der Literatur unterscheidet man hier eine mittlere und eine maximale Entformungstemperatur. Während man die Abkühlgleichung für die mittlere Entformungstemperatur tendenziell eher für amorphe Kunststoffe anwendet, findet die Gleichung für die maximale Entformungstemperatur eher für teilkristalline

Kunststoffe Anwendung. In den Simulationsprogrammen ist hier ein fester Wert hinterlegt. Die Entformungstemperatur lässt sich auch aus dem Verlauf der 1 bar Linie im pvT-Diagramm ermitteln. Bei amorphen Kunststoffen liegt diese ca. 30 – 50 °C unter der Glas temperatur (Knick der 1 bar Linie), während man bei teilkristallinen Kunststoffen jeweils eine Tangente an den Verlauf im Übergangsbereich von flüssig zum Feststoff anlegt und der Schnittpunkt die Entformungstemperatur wiedergibt.

■ 1.5 Formteilefehler beim Spritzgießen

Beim Spritzgießen von Kunststoffformteilen kann es in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen (Einstellparameter, Maschine, Werkzeug, Material etc.) zu unterschiedlichen Fehlern am Formteil kommen. Die Ursachen für diese Fehler sind oft vielfältig, was die Behebung des Fehlers nicht immer trivial erscheinen lässt. Viele Fehler lassen sich durch eine Simulation im Vorfeld erkennen und durch entsprechende Maßnahmen in der Simulation abstellen. Insofern kann eine frühzeitige Simulation oftmals zu einer erheblichen Kostenreduktion führen und zeitaufwendige Nachkorrekturen am Werkzeug reduzieren.

1.5.1 Glanzunterschiede

Beim Spritzgießprozess kann es zu Glanzunterschieden auf der Formteiloberfläche kommen. Diese entstehen, wenn sich trotz einer einheitlich strukturierten Kavität an der Oberfläche des Formteils unterschiedlich stark glänzende Stellen herausbilden oder wenn der Glanz der gesamten Oberfläche zu intensiv oder zu schwach ist. Im Allgemeinen wird die Stärke des Glanzes durch die Abformung der Kavitätenoberfläche beeinflusst (Bild 1.8). Eine mattere Oberfläche des Formteils kann erzeugt werden, wenn diese gut abgeformt wird und die Oberfläche des Werkzeugs eine Strukturierung aufweist, da diese Unebenheiten zu einer diffusen, also nicht gezielten, Reflektion der Lichtstrahlen führt. Ist die Oberfläche des Werkzeugs jedoch poliert, wird ein guter Abformprozess zu einer stärker glänzenden Oberfläche des Formteils führen. Entscheidend für diese Vorgänge sind die Werkzeug- und Massetemperatur, sowie die Einspritzgeschwindigkeit und die Nachdruckhöhe. Diese Einstellgrößen haben einen signifikanten Einfluss auf die Entstehung der erstarrten Randschicht und damit auf die Abformung der Oberfläche. Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die Oberflächenqualität eines Kunststoffformteils primär durch die Quellströmung der Schmelze in der Einspritzphase definiert wird.

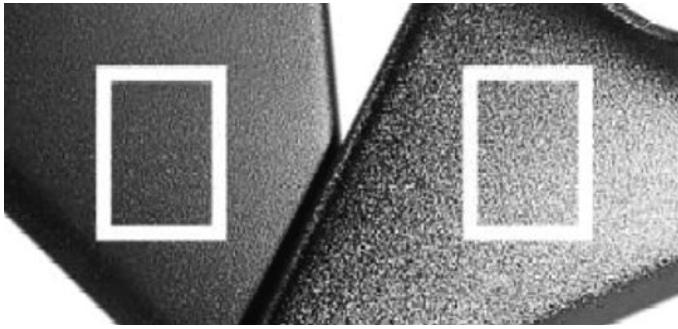


Bild 1.8
Glanzunterschiede

Lösungsvorschläge:

- Die Einspritzgeschwindigkeit sollte optimiert, d. h. in der Regel erhöht werden.
- Die Werkzeugtemperatur sollte, unter Beachtung der empfohlenen Höchstgrenze, erhöht werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass eine höhere Werkzeugtemperatur die Kühlzeit und damit die Zykluszeit verlängert.
- Ebenso kann die Massetemperatur erhöht werden, jedoch sollte auch hier die Empfehlung bezüglich der Höchstgrenze beachtet werden. Die Massetemperatur geht auch in die Kühlzeit ein, jedoch nicht so stark wie die Werkzeugtemperatur.
- Des Weiteren kann zur Behebung des Fehlers der Nachdruck erhöht werden und ggf. die Nachdruckzeit verlängert werden.
- Der Umschaltzeitpunkt auf den Nachdruck kann bis zum Erreichen eines Füllgrades von ca. 98 % hinausgezögert werden und so zu einer Prozessoptimierung führen.

1.5.2 Bindenähte

Bindenähte lassen sich beim Spritzgießen kaum vermeiden (Bild 1.9). Sie können z. B. hinter einem Durchbruch, durch mehrere Fließwege, durch Einlegeteile, durch Wanddickenunterschiede oder durch eine Mehrfachanspritzung entstehen. Bei einer Bindenaht treffen zwei Schmelzefließfronten relativ stumpf aufeinander. Im Bereich der Bindenaht entsteht oftmals auf der Formteiloberfläche eine Kerbe. In den meisten Fällen sind auch ein Glanz- oder Farbunterschiede erkenntlich. Vor allem bei transparenten oder dunklen Formteilen, deren Oberfläche poliert ist, oder Kunststoffen, die Effektpigmente oder Glasfasern enthalten, ist die Bindenaht besonders deutlich zu erkennen. Treffen die Schmelzefließfronten mit zu niedrigen Drücken und Temperaturen aufeinander, so bildet sich auf der Oberfläche in diesem Bereich eine Kerbe aus und die Schmelzefließfronten werden unzureichend miteinander verschweißt. Aus diesem Grund ist unter diesen Bedingungen mit

einer reduzierten mechanischen Festigkeit zu rechnen. Eine weitere Problematik, die im Bereich der Bindenaht eintreten kann, ist die Orientierung der Verstärkungsstoffe wie Glasfasern. Je kleiner der Winkel zwischen den beiden Schmelzeflächenfronten ist, desto extremer ist in der Regel die Ausprägung der Bindenaht.

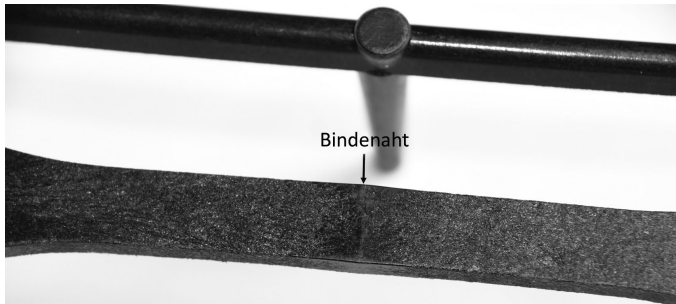


Bild 1.9 Bindenähte

Lösungsvorschläge:

- Die Einspritzgeschwindigkeit sollte optimiert werden. Bei einer ausreichend guten Entlüftung sollte die Einspritzgeschwindigkeit erhöht werden.
- Eine Überprüfung der Entlüftung kann anhand einer Füllstudie mit dem Formteil durchgeführt werden. Kann die Luft im Bereich der Bindenaht nicht ausreichend entweichen, so wird diese zusammengepresst, d. h. komprimiert, und es kommt u. U. zu einem Diesel-Effekt. In diesem Fall ist an dieser Stelle eine ausreichende Entlüftung vorzusehen. Der Einbau von weiteren Auswerfern oder von speziellen Einsätzen, beispielsweise Lamellenpakete, sowie eine Aufsplittung des Formeinsatzes in diverse kleinere Komponenten ermöglichen unter anderem Entlüftungen.
- Die Werkzeugtemperatur kann, unter Beachtung der empfohlenen Höchstgrenze, erhöht werden. Eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur hat immer eine Verlängerung der Zykluszeit zur Folge. Stand der Technik sind auch lokale Einsätze im Werkzeug, die sich temperieren lassen (Varietherme dynamische Temperierung siehe Kapitel 10). So kann der Bereich der Bindenaht in der Einspritzphase lokal aufgeheizt werden, wodurch diese in der Qualität verbessert oder sogar unsichtbar wird.
- Ebenso kann die Massetemperatur erhöht werden, jedoch sollte auch hier die Empfehlung bezüglich der Höchstgrenze und die Zykluszeitverlängerung beachtet werden.
- Der Umschaltzeitpunkt auf den Nachdruck kann bis zum Erreichen eines Füllgrades von ca. 98 % hinausgezögert werden und so zu einer Prozessoptimierung führen.

- Zur Verbesserung des Verschweißens der beiden Schmelzefließfronten kann der Nachdruck erhöht werden.
- Füll- und Verstärkungsstoffe oder Pigmente verschlechtern in der Regel die Bindahtqualität.
- Um die Position der Bindenähte über das Füllverhalten zu beeinflussen, kann eine Anschnittverlegung und wenn nötig auch eine Anpassung der Wandstärke vorgenommen werden. Jedoch ist hier zu beachten, dass dies nachträglich nur in Verbindung mit einer Werkzeugänderung möglich ist und daher eine vorausgehende Prüfung zur Effektivität dieser Maßnahme mithilfe einer Füllsimulation vorgenommen werden sollte. Die Simulationsprogramme stellen die Bindenähte farblich als Funktion des Auftreffwinkels dar und ermöglichen eine einfache Änderung an der Geometrie des Formteils, des Anspritzpunktes etc.

1.5.3 Deformation

Wirken beim Auswerfen des Formteils aus dem Werkzeug zu starke oder ungleichmäßige Kräfte ein, so kann dies zu einer Deformation führen (Bild 1.10). Dies zeigt sich meist im Material, welches durch die hohen Ausstoßkräfte überdehnen, reißen oder sogar brechen kann. Die Deformation findet in den meisten Fällen verstärkt im Bereich der Auswerfer oder an schwer entformbaren Hinterschnitten statt und unterscheidet sich damit vom Verzug. Des Weiteren können bei dieser Art der Verformung in Richtung der Entformung Riefen oder Kratzer auftreten.



Bild 1.10
Deformation

Lösungsvorschläge:

- Eine Überprüfung der Entformungsschrägen sollte durchgeführt werden, nach deren Auswertung im gegebenen Fall eine Vergrößerung der Schrägen vorgenommen werden sollte.

- Die Position und die Anzahl der Auswerfer sollten überprüft werden.
- Um Deformationen zu verhindern, kann der Nachdruck angepasst werden.
- Die Kavität kann mit einer Gleit- oder Antihafbeschichtung ausgestattet werden.
- Die Temperatur des Werkzeugkerns kann reduziert werden.
- Die Werkzeugtemperatur kann, unter Beachtung der empfohlenen Höchstgrenze, erhöht werden.
- Die Kühlzeit kann reduziert oder verlängert werden.
- Weiterhin kann die Kernbelüftung optimiert werden, indem Entlüftungskanäle, spezielle Einsätze oder Auswerfer etc., durch welche Luft strömen kann, zwischen dem Formteil und dem Kern eingebracht werden.

1.5.4 Verzug

Eine unterschiedliche Volumenschwindung in den verschiedenen Bereichen des Formteils kann zu einer Abweichung von der geplanten Form, d.h. zum Formteilverzug, führen (Bild 1.11). Dies kann sich durch Verwerfungen, wellenförmige Oberflächen, Verwindungen oder Winkelabweichungen zeigen. Unterschiede in der Nachdruckwirkung (Schwindungskompensation) und Orientierungen lösen diese Differenzen zwischen den Schwindungen aus. Hinzu kommen Eigenspannungen die auch Verzug bewirken.



Bild 1.11 Verzug

Lösungsvorschläge:

- Das Formteil sollte an allen Stellen gleichmäßig abkühlen. Insofern ist die Werkzeugtemperierung zu prüfen.
- Die Volumenschwindung sollte in der Nachdruckphase ausreichend kompensiert werden. Insofern ist ein ausreichend hoher und langer Nachdruck zu wählen.
- Um Verzug zu vermeiden, kann die Einspritzgeschwindigkeit erhöht werden.
- Eine gleichmäßige Werkzeugfüllung sollte gewährleistet werden.
- Auch die Auswahl eines besser fließbaren Materials kann hilfreich sein.
- Bei der Auswahl des Materials kann eine Variante mit niedrigerem Schwindungswerten den Verzug reduzieren. Teilkristalline und ungefüllte Kunststoffe schwinden tendenziell mehr als gefüllte Kunststoffe und amorphe Formmassen.
- Mehrere Anschnitte verbessern die Nachdruckwirkung und reduzieren den Verzug.
- Verzug kann ebenfalls durch gleichmäßiges Verdichten der Masse über den Fließweg reduziert werden.
- Scharfe Kanten sollten vermieden werden.
- Bereiche, in denen Verzug vorwiegend vorkommt, sollten versteift (Rippen etc.) werden.
- Ebenfalls sollte überprüft werden, ob eine Änderung der Faserorientierung möglich ist.
- Ein möglicher Verzug kann bereits bei der Werkzeugherstellung durch eine Vorhaltung beachtet werden, sodass das Formteil mit Verzug mit der Soll-Form übereinstimmt.
- Unterschiede in der Wanddicke und unübliche Anhäufungen von Masse sollten reduziert werden.
- Durch die Bildung von beispielsweise bombierten Flächen oder Randsicken im Formteil, deren Verformung keinen Einfluss hat, kann Verzug minimiert werden. Die Simulationsprogramme können den Verzug vorhersagen und schlagen, wie z.B. Cadmould mit Unwarp, Vorkorrekturen im Werkzeug vor. Diese sind jedoch immer kritisch zu hinterfragen, bevor man diese im Werkzeug umsetzt. Aus diesem Grund erscheint bei Cadmould auch ein entsprechender Hinweis (siehe Kapitel 10).

1.5.5 Diesel-Effekt (Brenner)

Kann die Luft während des Einspritzvorgangs nicht ausreichend aus dem Werkzeug entweichen, so kann es an Bindenähten, an denen die Masseströme aufeinandertreffen, oder in bestimmten Bereichen des Formteils, z.B. an Rippen oder am Fließwegende, lokal zu schwarzen Verfärbungen kommen. Die Luft wird in diesem Fall während des Füllprozesses verdichtet und so stark komprimiert, dass es zu dem sogenannten Diesel-Effekt kommt (Bild 1.12). In vereinzelt Fällen kann dies dazu führen, dass sich das Formteil nicht vollständig füllt und sich auf der Werkzeugoberfläche ein Belag bildet oder diese sogar thermisch beschädigt wird. Die verdichtete Luft erhitzt so stark, dass sich in diesem Bereich Brandstellen oder auch Brenner ergeben.

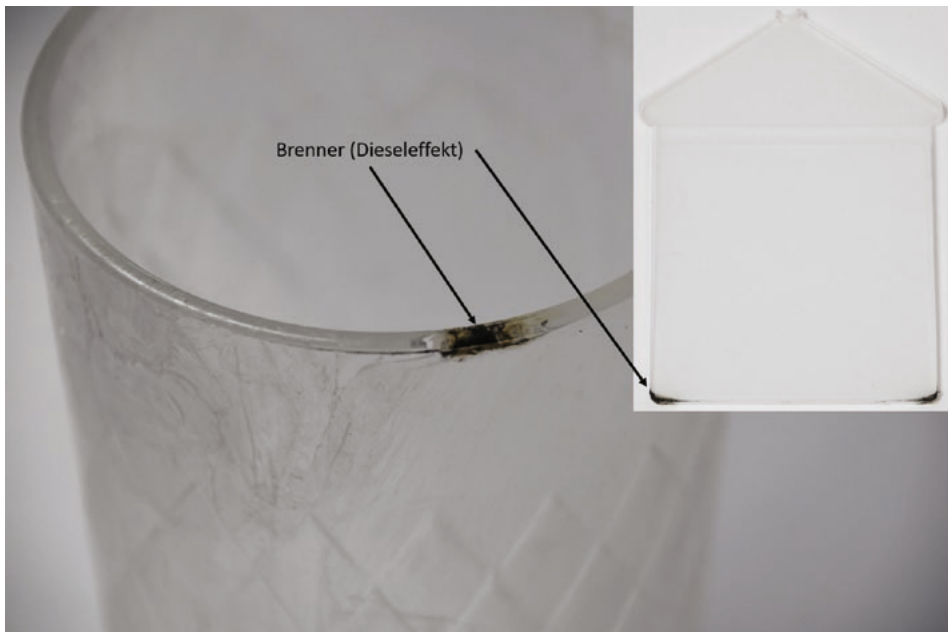


Bild 1.12 Diesel-Effekt (Brenner)

Lösungsvorschläge:

- Zur Verhinderung des Diesel-Effekts sollten Entlüftungskanäle im Werkzeug eingeplant werden. Des Weiteren können spezielle Einsätze zur Entlüftung, Trennfugen oder Auswerfer zum Entweichen der Luft vorgesehen werden.
- Die Entlüftungskanäle sollten auf Verschmutzung geprüft werden.
- Damit Luft über bereits existierende Trennfugen verdrängt werden kann, sollte der Füllprozess des Formteils entsprechend optimiert werden.

- Durch eine Reduktion der Masstetperatur und der Werkzeugtemperatur kann oftmals ein positiver Effekt erzielt werden.
- Die Vorlaufgeschwindigkeit der Schnecken sollte reduziert werden, um die Einspritzgeschwindigkeit zu reduzieren. Alternativ ist es eventuell auch ausreichend ein gestuftes Einspritzprofil zu fahren, wobei nur in der Endphase der Füllbildung die Geschwindigkeit vermindert wird.
- Sind die Brandstellen hauptsächlich im nahen Umfeld der Trennebene zu finden, so kann die Schließkraft der Spritzgießmaschine reduziert werden.
- Alle Simulationsprogramme machen die Stellen kenntlich, an welchen eine Entlüftung im Werkzeug vorgesehen werden sollte. Insofern können sie an dieser Stelle eine große Hilfestellung bieten.

1.5.6 Werkzeugbelag (Formbelag)

Bei zu hohen Temperaturen während der Verarbeitung oder bei unzureichender Entlüftung kann sich Belag in Spritzgießwerkzeugen bilden. Die Bildung des Werkzeugbelags ist das Resultat von miteinander reagierenden Kunststoffspaltprodukten, bzw. Kunststoffzusätzen (Bild 1.13). Diese Spaltprodukte setzen sich aus ge-crackten Polymeren oder auch anderen Zersetzungsprodukten, wie beispielsweise Flammschutzmitteln, zusammen.

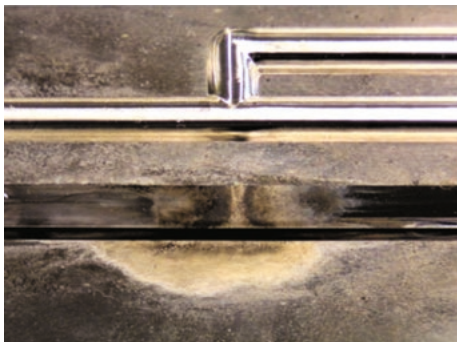


Bild 1.13
Werkzeugbelag

Lösungsvorschläge:

- Die Vorlaufgeschwindigkeit der Schnecke sollte reduziert werden, um die Einspritzgeschwindigkeit zu reduzieren. Alternativ ist es eventuell auch ausreichend ein gestuftes Einspritzprofil zu fahren, wobei nur in der Endphase der Füllbildung die Geschwindigkeit vermindert wird.
- Die im Werkzeug angewendete Anspritzung sollte mit den Gestaltungsrichtlinien der Anschnitt- und Angussgröße abgeglichen werden. Bei einer unzureichenden Ausführung sollten diese Bereiche entsprechend korrigiert werden.

- Auch die Schmelzetemperatur beim Austreten aus der Maschinendüse oder aus dem Heißkanal sollte mithilfe eines Einstichthermometers mit den empfohlenen Werten verglichen werden. Bei Abweichungen sollte die Temperatur auf den vorgegebenen Verarbeitungsbereich gesenkt werden.
- Die Verweilzeit der Schmelze sollte in der Plastifiziereinheit und im Heißkanal überprüft werden.
- Die Scherung in der Plastifiziereinheit sollte bei einer empfindlichen Schmelze durch die Reduzierung der Schneckendrehzahl und des Staudrucks vermindert werden.
- Die Effektivität und die Position der Entlüftungskanäle sollte überprüft werden und bei Bedarf zur weiteren Anbringung von Entlüftungskanälen führen.

1.5.7 Dunkle Punkte (Black Specks)

Nicht nur thermische Schädigungen, d.h. die Zersetzung des Polymers, sondern auch Verschmutzungen können zu dunklen Punkten (Black Specks), in Gestalt von plättchen- oder punktförmigen Einlagerungen, auf der Oberfläche des Formteils und im Inneren führen, die besonders bei transparentem Material deutlich erkennbar sind (Bild 1.14).

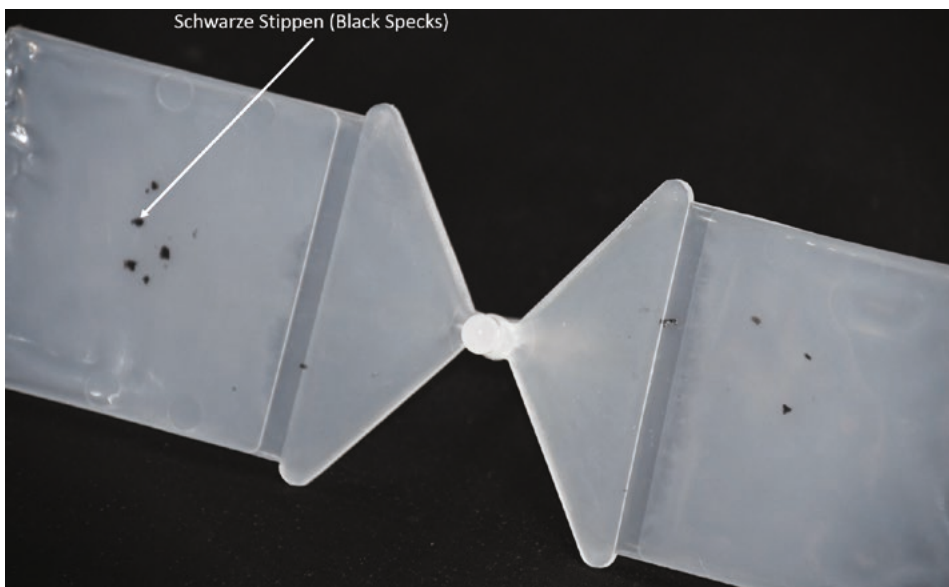


Bild 1.14 Dunkle Punkte (Black Specks)

Lösungsvorschläge:

- Es sollte der Dosierweg der Spritzgießmaschine überprüft werden. Der optimale Dosierweg s_D liegt beim Zweifachen des Schneckendurchmessers D . Allgemein gilt $D < s_D < 3D$. Liegt der Dosierweg s_D unter dem Schneckendurchmesser, so ist die Verweilzeit der Schmelze in der Plastifiziereinheit auf jeden Fall zu lang. Auch die Verweilzeit der Schmelze im Heißkanal, insofern vorhanden, sollte überprüft werden.
- Die Masstemperatur sollte reduziert werden.
- Der Staudruck und/oder die Drehzahl der Schnecke sollte reduziert werden.
- Muss das Material gewechselt werden, so sollte vorab die Plastifizier- und Einspritzeinheit und ggf. der Heißkanal gründlich gereinigt werden.
- Tote Ecken sollten vermieden werden, indem die Strömung der Schmelze in den Bereichen des Zylinders und Werkzeugs überprüft wird.
- Ebenso sollte analysiert werden, ob das verwendete Masterbatch oder Farbpulver in Kombination mit dem zu verarbeitenden Kunststoff eingesetzt werden kann.
- Die Beschichtung des Werkzeugs und/oder der Plastifiziereinheit (sofern vorhanden) sollte auf ihren Zustand überprüft werden.
- Ist ein Materialfördersystem vorhanden, so sollte dieses auf Verschleiß, undichte Stellen und Ablagerungen von Schmutz kontrolliert werden.

1.5.8 Auswerfermarkierungen

Auch durch die Auswerfer können optische Schäden in Form von Glanzunterschieden am Formteil entstehen. Mögliche Mängel sind Unterschiede im Glanz, Weißbruch (weißliche Verfärbungen) oder Erhebungen bzw. Vertiefungen (Bild 1.15). In einigen Fällen können sich in Entformungsrichtung auch zusätzlich Kratzer oder Riefen ausbilden. Auslöser hierfür können fertigungstechnische Mängel des Werkzeugs sein, zum Beispiel eine nicht ausreichende Steifigkeit und unzureichend große Auswerferflächen. Des Weiteren führt auch eine zu geringe Entformungsschräge des Formteils zu einer erschwerten Entformung und kann damit Markierungen zur Folge haben. Wird außerdem das Werkzeug aufgrund unvorteilhafter Verarbeitungsbedingungen überladen, so könnte dies in einer Verklemmung des Formteils enden und die Entformung ebenfalls erschweren. Gleiches gilt für eine zu hohe Volumenschwindung, die zur Folge hat, dass das Formteil sehr stark auf den Kern aufschumpft.



Bild 1.15 Auswerfermarkierungen

Lösungsvorschläge:

- Die Pausenzeit und/oder die Nachkühl- bzw. Restkühlzeit kann verlängert werden.
- Der Nachdruck sollte angepasst, d. h. in der Regel reduziert werden.
- Die Verarbeitungstemperaturen sollten reduziert werden.
- Die Kavität kann mit einer Gleit- oder Antihafbeschichtung ausgestattet werden.
- Schließen die Auswerfer nicht gleichmäßig mit der Werkzeugoberfläche ab, so sollte eine entsprechende Modifizierung durchgeführt werden. Dies gilt jedoch nur für Markierungen und nicht für Weißbruch.
- Die Entformungsschrägen sollten bei Bedarf vergrößert werden.
- Bereits bestehende Auswerfer sollten vergrößert werden und/oder weitere Auswerfer sollten eingeplant werden.
- Das Werkzeug sollte konstruktiv versteift werden.

1.5.9 Verbrennungsschlieren

Ausgelöst durch schwerwiegende thermische Beschädigungen der Schmelze können sich an der Formteiloberfläche Verbrennungsschlieren bilden (Bild 1.16). Grund hierfür ist, dass in der Einspritzphase Blasen entstehen, da gasförmige Anteile des Kunststoffes frei werden. Durch Zerschneiden der Blasen an der Wandung des Formnests werden hellbraune oder silberne, aber auch auffällig dunkle Verfärbungen unregelmäßig auf der Oberfläche des Formteils oder begrenzt auf den Anschnittbereich sichtbar.

Die Verfärbungen verweisen in den meisten Fällen bereits auf die Form bzw. Ursache der Beschädigung hin. Starke thermische Schäden ausgelöst durch Zersetzung oder Oxidation, welche oft nach einem langen Stillstand der Maschine, während die Zylinderheizung noch eingeschaltet ist, auftreten, verursachen hellbraune bis zu tiefdunkle Schlieren. Im Gegensatz dazu sind silberne Verfärbungen meist das Resultat starker Reibung und sind oft lokal auf beispielsweise enge Querschnitte des Fließkanals oder auf die Bereiche kleiner Düsen begrenzt.

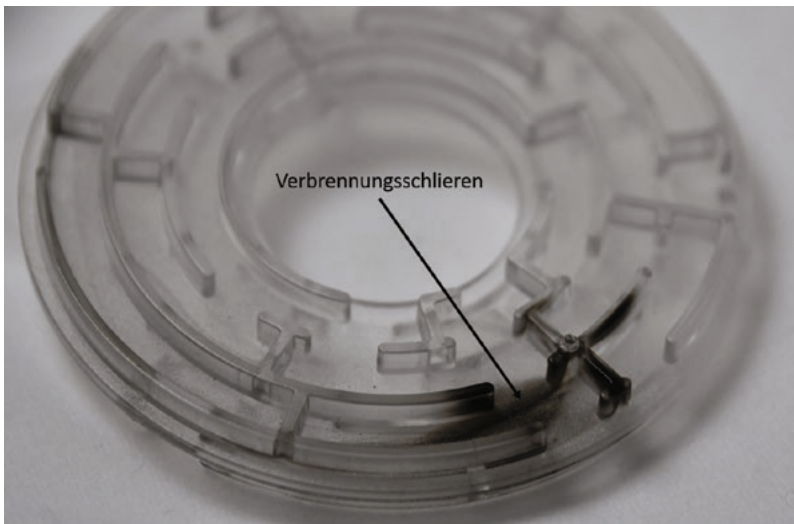


Bild 1.16 Verbrennungsschlieren

Lösungsvorschläge:

- Zuerst sollte geprüft werden, ob die Maschine vor dem Eintreten der Verbrennungsschlieren stillstand.
- Die Plastifiziereinheit sollte auf Ihre Größe, d.h. auf die Verweilzeit, überprüft und ggf. ausgetauscht werden. Der optimale Dosierweg s_D liegt beim zweifachen Schneckendurchmesser D . Allgemein gilt $D < s_D < 3D$. Liegt der Dosier-

weg s_D unter dem Schneckendurchmesser, so ist die Verweilzeit der Schmelze in der Plastifiziereinheit auf jeden Fall zu lang.

- Mithilfe eines Einstichthermometers sollte beim Austreten aus der Maschinendüse die Schmelztemperatur gemessen werden. Die Temperatur sollte reduziert werden, sofern sie nicht im empfohlenen Verarbeitungsbereich liegt.
- Zusätzlich sollte auch beim Austritt aus dem Heißkanal, insofern vorhanden, kontrolliert werden, ob sich die Schmelztemperatur noch im empfohlenen Verarbeitungsbereich befindet und auch hier gegebenenfalls angepasst werden.
- Der Staudruck sollte gesenkt werden und die resultierenden Auswirkungen auf die Bildung der Schlieren sollte beurteilt werden.
- Die Schneckendrehzahl kann variiert werden, um deren Einfluss auf die Schlieren bewerten zu können.
- Die Einspritzgeschwindigkeit sollte reduziert werden.
- Ebenso sollte die Anschnittgeometrie überprüft und bei Bedarf angepasst werden.
- Im Formnest sollten, sofern dies möglich ist, scharfe Übergänge und auch enge Fließquerschnitte entfernt werden.
- Die Fließquerschnitte der Maschinendüse und/oder des Heißkanals sollten optimiert werden.
- Die Schmelze sollte weniger lange im Heißkanal, insofern vorhanden, verweilen. Die Verminderung der Verweilzeit kann über die Reduzierung der gesamten Zykluszeit erfolgen. Ansonsten muss der Heißkanal neu dimensioniert werden.

1.5.10 Einfallstellen

Eine weitere Fehlstelle an der Oberfläche des Formteils kann sich in Form von Vertiefungen, sogenannten Einfallstellen, bemerkbar machen (Bild 1.17). Besonders in Bereichen von Masseanhäufungen, z. B. im Fuß einer Rippe auf dem Formteil, kann es zu Einfallstellen kommen. Werden die konstruktiven Richtlinien bei der Formteilgestaltung nicht eingehalten, so führen lokale Masseanhäufungen zu einer erhöhten Schwindung in diesen Bereichen, wodurch die Oberflächenschicht nach innen gezogen wird. Gibt die Oberfläche in diesen Bereichen jedoch nicht nach, so treten Lunker anstelle von Einfallstellen im Formteilkern auf.

Oftmals entstehen Einfallstellen erst im Anschluss an die Entformung des Teils aus dem Werkzeug, da die bereits gekühlten Randschichten erneut durch das heiße Formteilkern erwärmt und somit auch wieder verformbar gemacht werden.

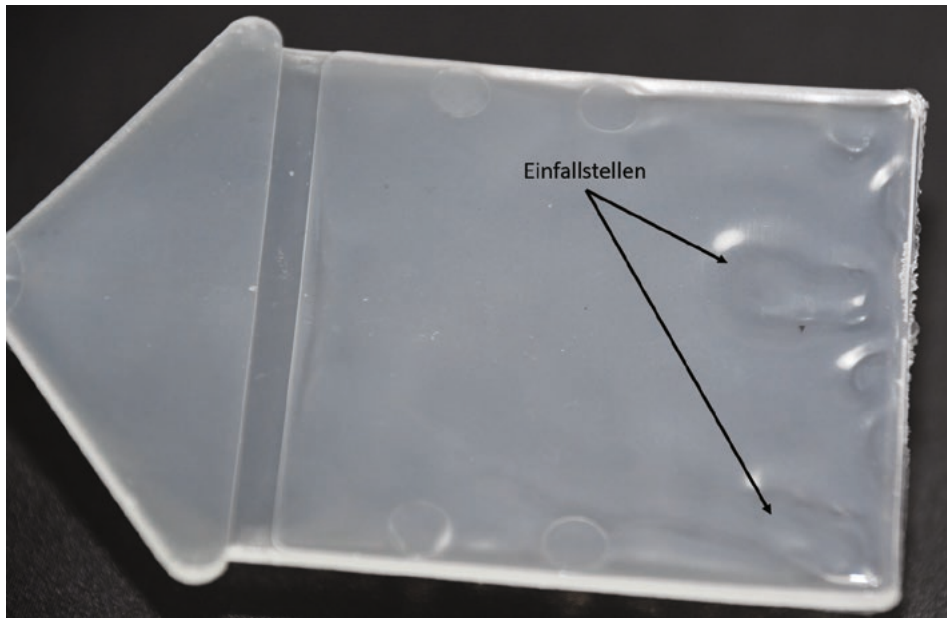


Bild 1.17 Einfallstellen

Lösungsvorschläge:

- Um Einfallstellen zu reduzieren, kann die Werkzeug- und/oder die Massetemperatur verringert werden.
- Der Nachdruck sollte, insbesondere kurz nach der volumetrischen Füllung, erhöht und ggf. verlängert werden.
- Alternativ sollte man auch erwägen die Restkühlzeit zu verlängern.
- Die Nachdruckzeit sollte um eine oder zwei Sekunden länger gewählt werden als die Siegelzeit. Zur Ermittlung der Siegelzeit wird, beginnend mit einer kurzen Nachdruckzeit, die Zeit in kleinen Schritten erhöht. Gemessen wird das Formteilmgewicht für die jeweilige Nachdruckzeit. Ändert sich das Gewicht nicht mehr, so ist der Siegelpunkt erreicht und der Nachdruck kann nicht mehr wirken.
- Die Einspritzgeschwindigkeit kann reduziert werden.
- Befindet sich der Anspritzpunkt in einer dünnwandigen Zone, so sollte eine Verlegung des Anschnitts in Betracht gezogen werden. Hier kann im Vorfeld eine Simulation helfen.
- Ebenso kann der Anschnitt vergrößert werden.
- Eine weitere Maßnahme wäre, die Rippen dünner zu gestalten.

- Da der Weg der Schnecke sowohl beim Einspritzen als auch beim Nachdrücken nicht auf den Wert Null sinken sollte, sollte das Restmassepolster diesbezüglich überprüft werden, um zu verhindern, dass es, je nach Formteilgröße/Gewicht, kleiner als 3 – 5 mm ist.
- Des Weiteren sollte die Funktionsfähigkeit der Rückstromsperre überprüft werden. Ein schwankendes Restmassepolster kann auf eine defekte Rückstromsperre hindeuten.
- Die Formteile sollten nach der Entformung einer weiteren Kühlung unterzogen werden.
- Einfallstellen werden von den Simulationsprogrammen visualisiert. Der Anwender kann somit entsprechende Maßnahmen im Vorfeld untersuchen und treffen.

1.5.11 Schallplatteneffekt (Kaltfließlinien)

Bilden sich quer zur Fließrichtung Markierungen auf der Oberfläche des Formteils in Form von parallelen oder konzentrischen Rillen aus, so nennt man dies Schallplatteneffekt oder Kaltfließlinien (Bild 1.18). Ist die Fließgeschwindigkeit, eventuell auch nur für einen kurzen Zeitraum, zu gering, so kann dies dafür sorgen, dass sich die ballige Schmelzefront abkühlt und so diesen Effekt auslöst. Die Bereiche der Schmelzefront, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht an der Wand des Werkzeugs anliegen, kühlen zu weit ab. Dadurch kann eine vollflächige Anpressung an die Werkzeugwand trotz kontinuierlich steigendem Druck und dem Fortschreiten der Füllung nicht mehr gewährleistet werden und es entstehen Rillen über den kompletten Verlauf der Schmelzefront hinweg.

Eine weitere Ursache kann auch ein temporärer Stillstand der Schmelze vor einer dünnen Rippe oder anderen Engstellen sein. Auch ein verfrühtes Umschalten auf Nachdruck kann zum Schallplatteneffekt führen.



Bild 1.18
Schallplatteneffekt

Lösungsvorschläge:

- Die Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit kann den Schallplatteneffekt reduzieren.
- Außerdem kann die Massetemperatur, bei Bedarf auch im Heißkanal, erhöht werden. Es sollte hierbei jedoch die empfohlene Höchstgrenze nicht überschritten werden.
- Ebenso kann die Temperatur des Werkzeugs, auch nur bis zur empfohlenen Höchstgrenze, erhöht werden. Es muss beachtet werden, dass die Erhöhung der Verarbeitungstemperaturen immer eine Kühlzeitverlängerung zur Folge hat.
- Der Umschaltpunkt auf den Nachdruck kann bis zum Erreichen eines Füllgrades von ca. 98 % herausgezögert werden und so zu einer Prozessoptimierung führen.
- Eine Verlegung des Anschnitts oder eine Änderung der Wanddicke sollte in Erwägung gezogen werden.

1.5.12 Unvollständige Werkzeugfüllung

Eine unvollständige Werkzeugfüllung kann dazu führen, dass das Formteil in Zonen mit dünner Wandstärke oder angussfernen Bereichen nicht komplett ausgefüllt ist (Bild 1.19). Ein zu geringer Dosierweg (Restmassepolster), mangelnder Druck, Rückströmungen in der Rückstromsperre oder auch ein übermäßig starker Füllwiderstand können diesen Effekt verursachen. Der Füllwiderstand setzt sich aus der Länge des Fließwegs, der Wanddicke und der Viskosität zusammen.



Bild 1.19 Unvollständige Werkzeugfüllung

Lösungsvorschläge:

- Im ersten Schritt sollten das Restmassepolster und der Dosierweg überprüft werden.
- Durch Auswahl eines fließfähigeren Materials kann das Werkzeug besser ausgefüllt werden.
- Eine weitere Option ist eine Erhöhung der Masse- und/oder Werkzeugtemperatur. Hierbei ist es jedoch von Vorteil zuerst die Massetemperatur zu steigern, denn durch ein vergleichbares Erhöhen der Werkzeugtemperatur kann der

Fülldruck nicht so stark reduziert werden. Außerdem bewirkt eine Steigerung der Werkzeugtemperatur eine stärkere Verlängerung der Kühlzeit als die Erhöhung der Masstemperatur.

- Zu hohe Druckverluste im Anguss und der Kavität sollten vermieden werden.
- Eine spätere Umschaltung von Spritz- auf Nachdruck kann sich positiv auf den Effekt auswirken.
- Alternativ kann die Einspritzgeschwindigkeit optimiert, d.h. in der Regel erhöht werden.
- Am Ende des Fließwegs sollte die Entlüftung optimiert werden und im Bereich des Lufteinschlusses sollte eine entsprechende Entlüftung angebracht werden.
- Die Füllung sollte balanciert werden.
- Weiters kann eine Verbesserung durch die Anpassung des Füllbilds mithilfe von Fließbremsen und/oder -hilfen erreicht werden.
- Auch eine Anschnittverlegung sollte in Betracht gezogen werden. Hier kann die Simulationstechnologie Hilfe bieten.
- Auch an dieser Stelle können die Simulationsprogramme bei einigen Punkten Unterstützung leisten.

1.5.13 Farbschlieren

Werden Pigmente eines Farbpulvers, Masterbatch oder einer Flüssigfarbe unregelmäßig in der Kunststoffmatrix homogenisiert, so kann dies zu Farbunterschieden an der Formteiloberfläche, den sogenannten Farbschlieren, führen (Bild 1.20). Oft entstehen diese angussnah oder -fern und großflächig in Bereichen der Fließlinien, in einigen Fällen jedoch auch hinter scharfkantigen Stellen. Dort ballen sich die Pigmente zusammen und bilden die für die Farbunterschiede verantwortlichen Agglomerate. Die Agglomerate, die sich nahe an der Oberfläche befinden, sind in Form von Schlieren sichtbar, wohingegen eine Anhäufung von Pigmenten im Innenbereich der Formteilmwand eher fleckige Farbänderungen verursachen.

Grund für diesen Formteilefehler können einerseits Farbpigmente mit unpassender Plastifiziereinheit, durch z. B. ein inkorrekt L/D -Verhältnis sein, oder auch ungeeignete Verarbeitungsparameter, wie beispielsweise eine nicht ausreichend hohe Schmelzetemperatur. Andererseits können auch Farb- oder Trägerkomponenten, die mit dem einzufärbenden Kunststoff nicht verträglich sind, ein Auslöser für ungleichmäßige Farberscheinungen/Farbschlieren sein.

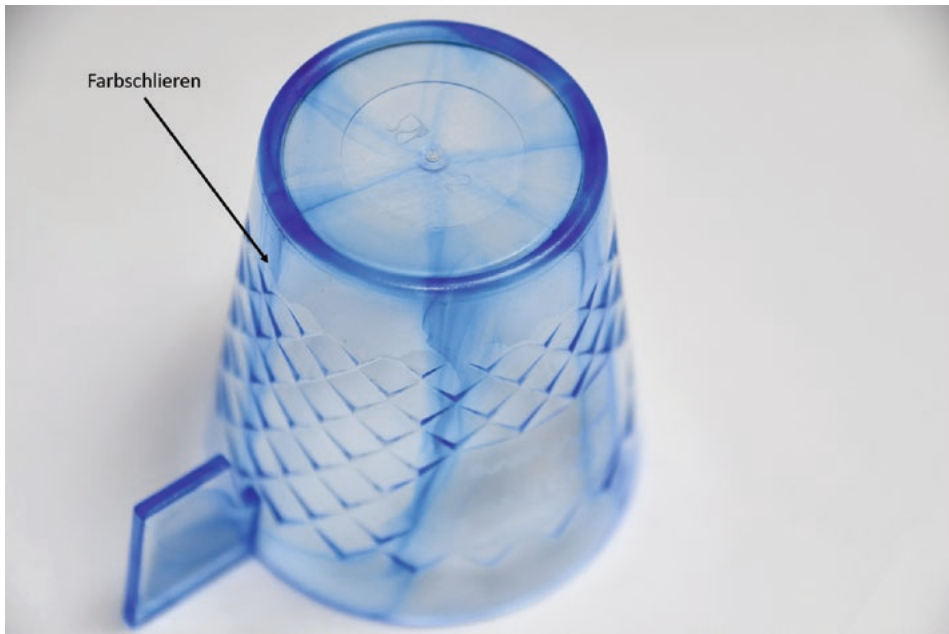


Bild 1.20 Farbschlieren

Lösungsvorschläge:

- Zuerst sollte anhand des vom Lieferanten bereitgestellten Masterbatchdatenblatts geprüft werden, ob das Masterbatch zusammen mit dem ausgewählten Kunststoff verwendet werden kann. Im gleichen Zug sollte die eingestellte Masterbatchkonzentration mit den Herstellerangaben abgeglichen werden.
- Ebenso sollte geprüft werden, ob auch die Heißkanaltemperatur für das Masterbatch geeignet ist und in dessen Verarbeitungsbereich liegt. Hierbei sollten entsprechend die Temperaturfühler und die Regelung des Heißkanalsystems kontrolliert werden.
- Eine erhöhte Einspritzgeschwindigkeit kann zu weniger Farbschlieren führen.
- Auch eine Erhöhung des Staudrucks kann vermeiden, dass Pigmentanhäufungen auftreten.
- Nach einer Erhöhung oder Reduktion der Schneckendrehzahl sollten die jeweiligen Auswirkungen auf die Schlierenbildung analysiert werden.
- Um die Bildung der Farbschlieren zu reduzieren, sollte geprüft werden, ob beim Werkzeugeintritt die Schmelzetemperatur angemessen hoch ist.
- Alternativ kann auch eine Verlegung des Anschnitts oder eine Anpassung der Wanddicke in Betracht gezogen werden.

- Die Plastifiziereinheit sollte auf Ihre Größe, d. h. auf die Verweilzeit, überprüft und ggf. ausgetauscht werden. Der optimale Dosierweg s_D liegt beim zweifachen Schneckendurchmesser D . Allgemein gilt $D < s_D < 3D$. Liegt der Dosierweg unter dem Schneckendurchmesser, so ist die Verweilzeit der Schmelze in der Plastifiziereinheit auf jeden Fall zu lang. Die Verweilzeit sollte mit den Rohstoffherstellerangaben abgeglichen werden und die Schneckenspezifikationen (L/D-Verhältnis, Misch- und/oder Scherteil notwendig, etc.) sollte anhand der Vorgaben überprüft werden.

1.5.14 Glasfaserschlieren

Unregelmäßig verteilte und raue Flecken an der Formteiloberfläche werden Glasfaserschlieren genannt (Bild 1.21). Teilweise treten sie auch in regelmäßigen Abständen zur Fließfrontform auf und je nach Lichteinfall können sie einen metallischen Glanz haben oder eher matt erscheinen. Besonders häufig bilden sie sich an Umlenkungen, Fließnähten und Durchbrüchen aus, da hier Strömungsprozesse an Rippen und in Bereichen großer Wanddicke und die Verarbeitungsparameter (Werkzeug- und Massetemperatur, Einspritzgeschwindigkeit) die Ausbildung stark beeinflussen.



Bild 1.21 Glasfaserschlieren

Lösungsvorschläge:

- Glasfaserschlieren können häufig erheblich reduziert werden, wenn die Homogenität der Schmelze optimiert wird. Dies kann durch Erhöhen der Schnecken-drehzahl und/oder des Staudrucks erreicht werden.
- Die Werkzeugtemperatur und/oder die Massetemperatur (wenn möglich auch im Heißkanal) kann im Rahmen der empfohlenen Höchstgrenze unter Beachtung der Kühlzeit erhöht werden.
- Die Vorlaufgeschwindigkeit der Schnecke kann, wenn möglich durch ein gestuftes Einspritzprofil, erhöht werden.
- Es sollte geprüft werden, ob der Anschnitt verlegt werden kann.

1.5.15 Feuchtigkeitsschlieren

Eine andere Schlierenform auf der Formteiloberfläche kann sich aufgrund von zu hoher Restfeuchte im Granulat oder im bzw. am Werkzeug bilden (Bild 1.22). Letztere entsteht durch das Freiwerden von Feuchtigkeit durch Leckagen im Temperiersystem oder Kondenswasser. Die Schlieren sind aufgrund ihrer länglichen, parabelähnlichen Form sehr auffällig. Jedoch ist zu beachten, dass sie immer mit ihrer Spitze in Richtung des Fließwegs zeigen. Die Feuchtigkeit verursacht deutlich sichtbare Markierungen an der Formteiloberfläche, da sich in der Einspritzphase Wasserdampfbläschen bilden, die dann an der Fließfront platzen und durch die Quellströmung an die Oberfläche gelangen. Infolgedessen führen die aufplatzenen Wasser-/Gasblasen zu den langgezogenen Schlieren.

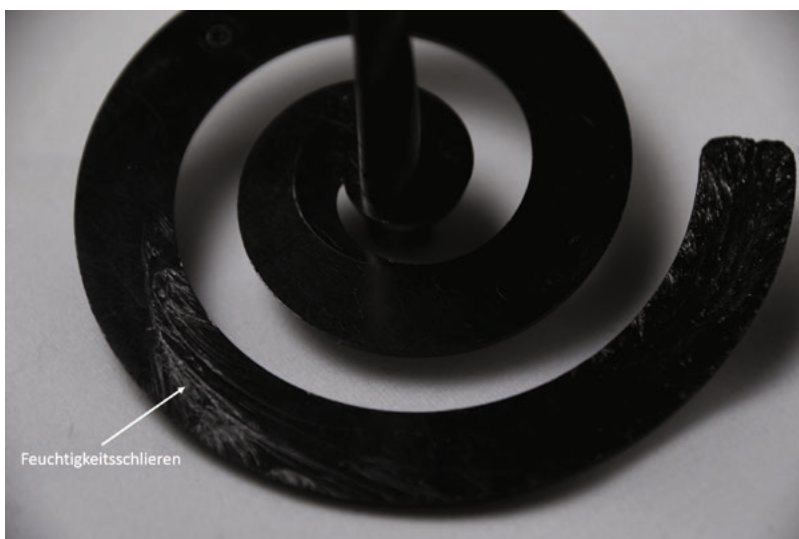


Bild 1.22 Feuchtigkeitsschlieren

Lösungsvorschläge:

- Im ersten Schritt sollte die Granulatverpackung auf äußere Schäden geprüft werden.
- Insbesondere bei hygroskopischen Kunststoffen, die zur Wasseraufnahme neigen (PA, PET, PC etc.) muss eine Messung der Restfeuchte des Granulats durchgeführt werden. Die vorgeschriebene maximal zulässige Restfeuchte ist unbedingt einzuhalten, da diese nicht nur zu Oberflächenschlieren führt, sondern auch zu einer hydrolytischen Degradation der Polymerketten.
- Die Menge an Granulat, die im Materialtrichter vorgehalten wird, sollte reduziert werden.
- Gemäß den Angaben des Rohstofflieferanten sollten die Lagerbedingungen für das Granulat geprüft werden und die eingestellten Parameter für die Vortrocknungen verglichen werden.
- Im Werkzeug sollte geprüft werden, ob das Temperiersystem frei von Leckagen ist und sich kein Kondenswasser auf der Werkzeugoberfläche bildet.

1.5.16 Delamination

Wenn zwischen den Oberflächenschichten des Formteils keine ausreichende Verbindung herrscht, kann dies zu einer Delamination führen. Dies bedeutet, dass das Formteil an der Oberfläche abblättert bzw. aufspießt (Bild 1.23). Dieser Effekt kann auch entstehen, wenn die bereits abgekühlte Randschicht durch die Schubspannungen, die durch den Strömungsprozess entstehen, wieder bewegt werden und sich durch diese Kräfte abschälen. Je nach Kunststoffart wirkt sich dies etwas unterschiedlich auf das Formteil aus, und so entstehen bei teilkristallinen Kunststoffen Schichten mit unterschiedlicher Kristallstruktur, wohingegen sich amorphe Thermoplaste als Reaktion im Additiv-/Schmelze-/Pigment-Gemisch eher entmischen.



Bild 1.23
Delamination

Lösungsvorschläge:

- Die aktuellen Einstelldaten sollten mit den Daten der letzten Fertigung, die erfolgreich durchgeführt wurde, verglichen werden.
- Anhand des vom Lieferanten bereitgestellten Masterbatchdatenblatts sollte kontrolliert werden, ob das Masterbatch zusammen mit dem ausgewählten Kunststoff verwendet werden kann, d.h. kompatibel ist.
- Die Einspritzgeschwindigkeit kann reduziert werden. Gleichzeitig kann die Verarbeitungstemperatur erhöht werden.
- Es sollte außerdem beachtet werden, dass vor einem Materialwechsel eine gründliche Reinigung der Plastifiziereinheit durchgeführt werden sollte.
- Scharfe Umlenkungen sollten insbesondere im Bereich des Anschnitts vermieden werden, da diese zu einer hohen Scherung des Materials führen. Auch sollten zu hohe Wandschubspannungen (siehe Kapitel 16) vermieden werden.

1.5.17 Schubmarkierungen (Tiger-Lines)

Ein pulsierender Schmelzfluss, der meist als Resultat eines „Blends“ (thermoplastisches Mehrphasensystem) auftritt, kann diagonal zur Fließrichtung durch Schubmarkierungen auf der Formteillfläche sichtbar werden. Diese Markierungen werden auch „Tiger-Lines“ genannt, da die periodischen Schatten in der Musterung einem Tigerfell stark ähneln (Bild 1.24). In der Regel sind die elastischen Eigen-

schaften des Kunststoffs für dieses Phänomen verantwortlich. Kunststoffe haben immer mehr oder weniger elastische Eigenschaften. Die elastische Komponente wirkt dabei wie eine Feder und verursacht das Pulsieren. Insbesondere wenn die Kunststoffschmelze unter Druck entlastet wird und unter diesem Zustand in das Werkzeug einströmt treten diese Phänomene auf (siehe Kapitel 9 Kaskadenspritzgießen).

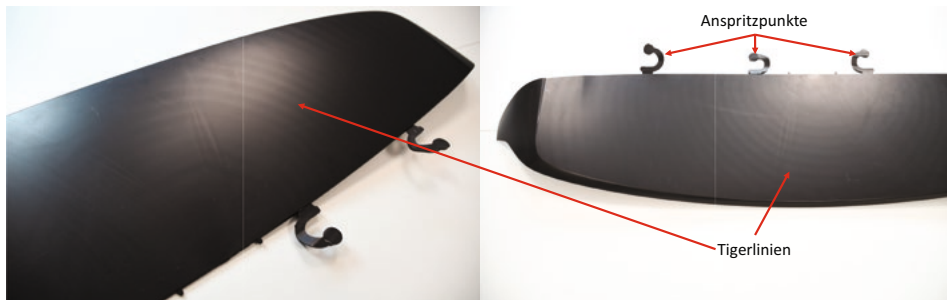


Bild 1.24 Schubmarkierungen

Lösungsvorschläge:

- Wird die Wanddicke des Formteils und der Angussquerschnitt vergrößert, so kann dies verhindern, dass die „Tiger-Lines“ entstehen.
- Des Weiteren kann auch eine Steigerung der Werkzeug- und/oder Massetemperatur zur Vermeidung des Formteilfehlers beitragen. Jedoch sollte zuerst die Massetemperatur angepasst werden, da diese sich oftmals effektiver auswirkt und zu einer geringeren Verlängerung der Zykluszeit führt.
- Außerdem sollte ein Material gewählt werden, welches eine bessere/andere Fließfähigkeit besitzt. In der Regel kann ein Material mit geringeren elastischen Eigenschaften (Speichermodul) den Effekt reduzieren.
- Beim Kaskadenspritzgießen sollten Druckstöße vermieden werden. Die Simulationstechnologie kann hier deutliche Unterstützung bieten.
- Schubmarkierungen lassen sich mit Simulationsprogrammen teilweise abbilden. Da in der Regel Druckschwankungen dafür verantwortlich sind, lassen sich durch spezielle Heißkanaltechnologien, die man simulieren kann, Lösungen finden.

1.5.18 Spannungsrisssbildung, Mikrorisse

Im Material können ausgelöst durch Spannungen, die geringer als die Bruchspannung sind, außen und innen Risse entstehen. Bevor diese sogenannten Spannungsrisse entstehen, bilden sich vorerst „Crazes“ (Bild 1.25). „Crazes“ sind rissähnliche und ausgedehnte Abschnitte, die durch Fibrillen, d.h. hochverstreckte Stränge aus Molekülen, verbunden sind. Sie reißen u. a. auf, wenn lokal Eigenspannungen und andere Zugbeanspruchungen von außen auf sie einwirken. Verantwortlich für die Risse können auch aggressive Medien sein. Eine erhöhte Kerbwirkung oder ein Spreiz- und Quelldruck, aber auch die Eigenspannungen im Formteil, deren Stärke von der Verarbeitung beeinflusst wird, wirken auf die Risse ein. Bedingt durch den Abkühlprozess der Schmelze im kalten Werkzeug lassen sich Eigenspannungen im Formteil nie ganz vermeiden. Mit den genannten Medien können die fertigungsbedingten Eigenspannungen oft nachgewiesen werden.



Bild 1.25
Spannungsrisssbildung, Mikrorisse

Lösungsvorschläge:

- Die Werkzeugtemperatur sollte erhöht werden, ohne dabei die Höchstgrenze zu überschreiten. Besonders vorteilhaft kann es sein, wenn beide Wände des Formteils gleichmäßig über die Kühlkreislauftemperaturen abkühlen.
- Außerdem sollte der Nachdruck verringert werden.
- Eine konstruktive Versteifung des Werkzeugs kann bei der Vermeidung von Mikrorissen behilflich sein.

- Masseanhäufungen sollten generell vermieden und ggf. reduziert werden. Beispielsweise kann die Wanddicke einer Rippe im Rippenfuß reduziert werden.
- Auch Eigenspannungen können von Simulationsprogrammen wiedergegeben werden.

1.5.19 Freistrahlbildung

Bei diesem Formteilfehler bildet sich ein Strang an Kunststoffmasse vom Anschnitt als Ausgangspunkt schlangenförmig in der Kavität und sichtbar im Formteil aus (Bild 1.26). Normalerweise hat die Schmelze beim Quellfluss Kontakt mit der Wand beim Übergangspunkt in den großen Querschnitt. Wenn jedoch die Fließgeschwindigkeit zu hoch ist, trifft die Masse in Form eines Strahles in den noch ungefüllten Hohlraum. Dort wo der Freistrahл zufällig und kurzzeitig an der Wand des Werkzeugs anhaftet bzw. die Wand berührt, faltet sich die Masse auf. Sobald sich die Oberfläche des Stranges abkühlt, kann dann auch keine richtige Verbindung mehr mit der nachkommenden Schmelze erfolgen und so kommt es sowohl zu optischen Mängeln als auch einer deutlich geringeren Festigkeit des Formteils. Ein Freistrahл ist nicht reproduzierbar in seiner Ausbreitung, d. h. er ändert seine Gestalt von Schuss zu Schuss. Insofern ist eine Voraussage eines Freistrahls mittels eines Simulationsprogramms nicht sinnvoll. Die Programme gehen immer von Wandhaftung aus.

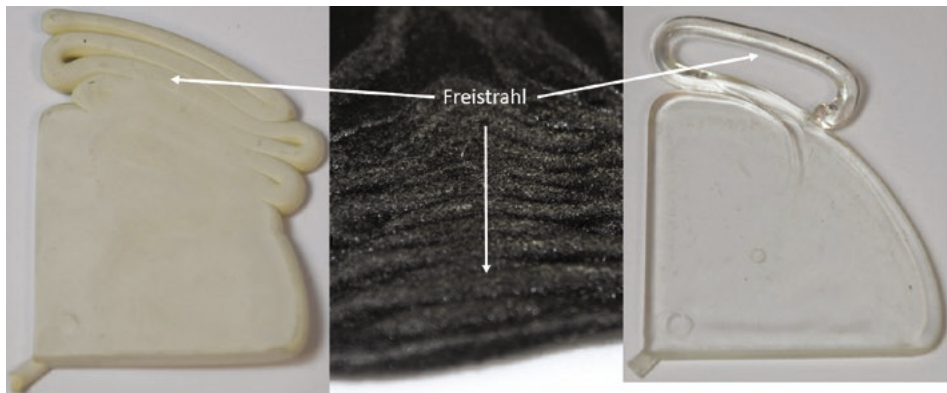


Bild 1.26 Freistrahlbildung

Lösungsvorschläge:

- Eine Möglichkeit, die Freistrahлbindung zu vermindern, ist die Reduktion der Einspritzgeschwindigkeit.
- Bezüglich des Anschnitts ist es einerseits eine Option diesen zu vergrößern oder ihn alternativ in einen Bereich mit geringerem Fließquerschnitt zu verlegen.

Index

Symbole

3D-F-Verfahren 82
3D-Messtechnik 388
3D-Netztypen 80
3D-Punktewolken 390
3D-RSC-Orientierungsmodell 522
3D-V Verfahren 84
96-fach Werkzeug 220

A

Abformgenauigkeit 383
Abkühlfehler 295
Abkühlgeschwindigkeit 317
Abkühlgleichung 180
Abkühlgrad 178, 300
Abkühlphase 11, 180
Abkühlprozesses 298
Abkühlraten 102
Abkühlverhalten 322
Abkühlvorgänge 171
Abkühlzeit 182, 295
Abstützung 451, 473
amorphe Randschichten 385
amorpher Kunststoff 549
Ampcoloy 324, 346, 366, 483, 485
Analysis of Variance Tabellen 571
Angussystem 183
anisotropen Eigenschaften 499
anisotrope Schwindungseigenschaften 325
anisotrop nichtlineare Material-
beschreibung 535

ANOVA-Tabellen 571
Anspritzposition 631
Anspritzpunkt 240, 415, 426
– Position 158
Anspritzpunkte 245
arithmetische Mittelwert 570
Aspect Ratio 89, 91
Assembly Design 734
Aufheizphase 643
Auftreffwinkel 413, 416, 447
Auftriebskräfte 457
Ausgangslänge 541
Ausrichtung 671, 684
Austauschformate 61
Auswerferkasten 451
Auswerferplatte 6
Auswerferseite 6
Auswurftemperatur 96
Axialspannung 539

B

Backen 247
Backenwerkzeug 452, 463
Balancierung 199f., 210
– mathematisch rheologisch 201, 206,
210f., 226
– natürlich rheologisch 201, 222
– thermisch 225f.
Barriereeigenschaft 606
Beams 82
Beanspruchungsrichtung 431
Belastungsberechnung 478

Berechnungsdauer 714
 Bestätigungsexperiment 567
 Best-Fit 390, 393
 Betriebspunktabhängigkeit 210
 Bezugstemperatur 98
 Biege- und Knickbelastung 541
 Bilanzgleichungen 67
 Bindenaht 13, 132, 437, 531, 533
 – stagnierend 417
 Bindenähte 235, 240, 245 f., 248, 260,
 269, 335, 383, 413
 Bindenahtfaktor 428, 435
 Bindenahtfestigkeit 420, 422 f., 428,
 433, 435 f., 440
 Bindenahtqualität 134, 140, 158, 160,
 419 f., 427, 442, 538
 Bindenahttypen 416
 Biot-Zahl 296
 Black Specks 20
 BLM-Methode 80
 BLM-Netz 437
 Bombierung 243
 Booleschen Operationen 663
 Boolescher Operatoren 729
 Boundary Layer Mesh (BLM) 532
 Bremsseffekt 139
 Brenner 18
 Brinkmanzahl 171
 Bruchspannung 435, 440, 442

C

Carreau-WLF-Ansatz 98, 512
 Cauchy Spannungstensor 70
 Computertomograph 519
 Cross-WLF-Ansatz 556
 Cross-WLF-Ansatzes 97

D

Darstellungsgenauigkeit 653
 Dashboard 590, 595
 Data Fitting 110
 Datenaustausch 722
 Datentransfer 651

Datenvolumen 692
 Dauerbeanspruchung 482
 Deformation 15, 344, 348, 406 f., 469
 Degradation 233, 250 f., 445
 Dehndruckverluste 279
 Dehngeschwindigkeit 502
 Dehnströmung 504, 506 f., 517
 Dehnströmungen 279
 Dehn- und Scherströmungen 601
 Dehnviskosität 280, 608
 Delamination 33, 630
 Designelemente 720
 Design of Experiments (DoE) 638
 Detailbereiche 648
 Detailgeometrien 649
 Dickenmomentkoeffizienten 520
 Diese auch als Design of
 Experiments (DoE) 561
 Dieseleffekt 160, 164, 429
 Diesel-Effekt 18, 426
 Diskretisierung 50, 73, 78, 530, 606,
 622
 Dissipation 150, 444
 DoE 631
 DoE-Programm 582
 DoE-Versuchsplan 595
 Dreieck-Seitenverhältnis 91
 Dreiplattenwerkzeug 187
 Druckbedarf 204, 224, 230 f., 246, 251,
 263, 633
 Druckgradient 468, 470
 Druckgradienten 480, 490, 493
 Druckregelung 275
 Druckschwankungen 258 f., 268
 Drucksensoren 627
 Druckverbraucher 191
 Druckverlauf 618
 Druckverlust 115, 119, 199 f., 206 f., 211,
 217, 253, 255, 285
 Dual Domain 76
 dunkle Punkte 20
 Dünnstelle 132, 134, 136, 149, 158
 – angussfern 144
 – anschnittfern 143
 – anschnittnah 138

Durchbiegung 451
 Durchbruch 132, 414
 Duromere 625
 Düsenseite 6
 Düsenspitze 189
 Düsentemperatur 226
 Dynamic Feed 274

E

effektive Temperaturleitfähigkeit 100
 Eigenschaften
 – äußere und innere 561
 Eigenspannungen 205, 315
 Einfallstellen 24, 617
 Einfärbung 112
 Einflussfaktoren 561
 Einfriereffekte 171
 Einfrierzeit 338
 Einlaufdruckverlust 280
 Einlauf- oder Dehndruckverluste 46
 Einlegeteil 415, 467
 Einschwingen 643
 Einspannpunkte 479
 Einspritzdruck 236
 Einspritzgeschwindigkeit 127
 Einspritzphase 4, 8, 170, 552
 Einspritzzeit 127
 Einstellparameter 1, 96, 426 f., 587
 Einzelteilformat 660
 Elastizitätsmodul 107, 540
 Elastomere 625
 Elementarten 73
 Elementnormalen-Methode 84
 Elternelementen 675
 emperierssystem 322
 Entformungshilfen 424
 Entformungsrichtung 495
 Entformungsschwindigkeit 317
 Entformungstemperatur 3, 105, 180,
 289, 299, 353, 358, 363, 368, 372,
 374, 377, 409, 548
 – maximale 180 f., 300
 – mittlere 180 f., 300
 Entformungstemperaturen 295

Entlüftung 164, 166, 419, 425 ff., 439,
 531, 633
 Entlüftungen 637
 Erhaltungsgleichungen 514
 Eulersche Betrachtungsweise 516
 Evakuierung 629
 Experiment 564, 580
 Exportvorbereitungen 725
 Extrapolieren 682

F

Faktoren 561, 565
 Familienwerkzeug 197 f., 202, 211
 Farbschlieren 29
 Faserausrichtung 437
 Faserbruch 431
 Faserenthaftung 431
 Faserinteraktionskoeffizienten 520 f.
 Faserlängenanalyse 541
 Faserorientierungsdatei 530
 Faserschädigungen 542
 FEA Interface 524
 Fehlerschätzung 572
 Fehlstelle 680
 Fehlstellen 497, 667, 673, 681, 683
 Festigkeit 413, 421, 538
 Festigkeitseigenschaften 609
 Festigkeitslehre 451
 Festigkeitswert 536 f.
 Filmanschnitt 507
 Fingereffekt 606
 Fingereffekte 605
 Finite-Differenzen-Methode 70
 Finite Elemente 78
 Finite-Elemente-Methode 71
 Finiten Elemente (FE) 514
 Finiten-Volumen-Methode 71
 fitten 62
 Fitten 542
 Fitting 489
 Fitting Prozess 110
 Fixierung 493
 Flächenbegrenzungen 653, 679
 Flächendifferenz 400

- Flächenmodell 667, 690
 - Flächenverband 673, 687, 702
 - Flächenverbänden 679
 - Flächenvergleich 392
 - Flatness 348
 - Flecken 43
 - Fließbremse 415
 - Fließeigenschaften 177
 - Fließfront 135f., 503
 - Fließfrontgeschwindigkeit 171
 - Fließgrenztemperatur 96, 140, 144, 155, 162, 178, 256, 472
 - Fließlinie 161
 - Fließlinien 335, 413
 - Fließnaht 133
 - Fließspirale 113, 172, 175, 233, 553
 - Fließweg 123
 - Fließweg-/Wanddickendiagramm 172
 - Fließweg-Wanddickendiagramm 232, 244, 459
 - Fließweg-Wanddicken-Diagramm 122, 125
 - Fließweg/Wanddickenverhältnis 459
 - Fließwiderstand 131, 138, 216, 276, 612
 - Flüssigsilikon 625
 - Folgar-Tucker Gleichung 517
 - Folgar-Tucker Modell 517
 - Folgar-Tucker-Modell 522
 - Forminnendruck 547
 - Forminnendruckaufnehmer 551
 - Forminnendrucksensoren 192
 - Forminnendruckverlauf 9, 179, 552
 - Formteilauslegung 423, 426
 - Formteilmbildungsprozess 7f., 169, 316, 547, 609
 - Formteileigenschaften 548, 557
 - Formteilfehler 12
 - Formteilmerkmale 557
 - Formteilqualität 547, 608
 - Formteilverzug 148, 341
 - Freie Kanten 89
 - Freiheitsgrad 571
 - Freimachung 457, 461
 - Freistrahle 37, 57
 - Freistrahlbildung 79
 - Füllbild 163, 242, 257
 - Fülldruck 127, 191, 240
 - Fülldruckgrenze 233
 - Füllmodul 63
 - Füllphase 67
 - Füllsimulationen
 - schnell 60
 - Füllverhalten 235
 - Füllzeit 171, 254, 554
 - Funktionssicherheit 449
 - Fusion 76
 - F-Wert 571
- G**
- Gasblasenausbreitung 617
 - Gaseinleitung 611, 616
 - Gasführungskanäle 611, 615
 - Gasinnendrucktechnik 599, 608
 - Gasinnendruckverfahren 238, 244
 - G.B. Jeffery 516
 - gefittet 95
 - Generative Shape Design 667, 670, 693, 729
 - Geometrieänderungen 649
 - Geruch 44
 - Gesamtkühlzeit 169, 178
 - gescherte Randschichten 277
 - geschnittene Elemente 90
 - Geschwindigkeit 55
 - Geschwindigkeitsgradient 55, 504
 - Geschwindigkeitsprofil 510, 608
 - Geschwindigkeitsverlauf 54
 - Gesenk 5
 - Glanzunterschied 12
 - Glasfaser 325, 333, 431, 499, 541
 - Glasfaseranteil 510, 521, 609
 - Glasfaserausrichtung 432
 - Glasfasergehalt 609
 - Glasfasergehalts 433
 - Glasfaserlänge 434, 544
 - Glasfasern 421
 - Glasfaserorientierung 436
 - Glasfaserorientierungsrichtung 431
 - Glasfaserschlieren 31

Glastemperatur 97
 Gleitfilm 626
 GOM 387
 GOM Inspect 390
 Grat 39
 Gratbildung 205
 Grenzdruck 125
 Grenzscherungsspannung 443
 Grundlagenübungen 115

H

Hagen-Poiseuille 120, 122, 130 f., 171, 210, 558
 Hauptnormalspannung 461
 Hautkomponente 599, 620, 622
 Heißkanal 115, 117, 184, 188, 200, 223, 234, 245, 253, 451, 731
 – außen beheizt 188
 – innen beheizt 188
 Heißkanaldüsen 242
 Heißkanalsyst
 – innenbeheizt 119
 Heißkanalsystem 193
 – offen 192
 – thermischer Haushalt 191
 – thermisch und rheologische Auslegung 191
 Heizpatronen 630, 638 f.
 Hele-Shaw-Strömung 75, 78
 Hilfsachsensystem 671
 Historie 676, 726
 Hochdruckkapillarrheometer 176
 Höhengschlag 347
 Hotspot 196, 312, 336, 354, 359, 364, 369, 373 f., 378, 394, 410
 Hybridkonstruktion 656

I

IKV-Ansatz 103
 Inhibitor 630
 Injektionsbausteine 611
 Innendruck 539
 Instabilitäten 606

instationäre Zustand 291
 Institut für Kunststofftechnik Darmstadt
 ikd 536
 integrativen Simulation 501, 523
 integrative Simulation 436
 Interaktionsterm 517
 Isochronen 160, 272, 274
 Isochronenverlauf 177

K

Kalibrieren 542
 kalibriert 95
 Kaltkanal 115, 117, 184, 186
 Kaltkanalsystem 636
 Kaltkanaltechnologie 629
 Kaskade 242, 253
 Kaskadenspritzgießen 257, 259, 269, 463
 Kaskadensteuerung 214
 Kavität 5
 Kennzahlen 557 f.
 Kerbe 418, 422
 Kerben 413
 Kern 5, 477
 Kerndeformation 478
 Kerne 494 f.
 Kernkomponente 599, 608, 620, 622
 Kernschichtanteil 603
 Kernversatz 478, 483, 492, 495
 Kesselformel 539
 Knotennormalen-Methode 84
 Kollision 729 f.
 Kollisionsanalyse 653, 735
 Kompressionsphase 8 f.
 Konfidenzintervall 590
 Kontaktbedingung 734
 Kontrollvolumen 68
 konturnahe Kühlung 378, 381, 385, 410
 konturnahe Kühlungen 382
 konturnahen Kühlung 384
 Korrekturfaktor 669
 Kreisringquerschnitt 118, 120
 Kristallinität 385
 Kristallisationsverhalten 423, 549

Kristallitschmelzebereich 131
 Kugelmethode 83
 Kühlkanäle 5
 Kühlmedium 5
 Kühlmitteltemperatur 362
 Kühlmodul 69
 Kühlsystem 334
 Kühlung 350
 – konturnahe 346
 Kühlzeitgleichungen 181, 299
 Kupferlegierungen 324, 346, 366
 Kupferstiften 366, 370
 Kurvenabschnitt 686

L

Lagrangesche Betrachtungsweise 514
 laminaren Schichtenströmung 502
 laminare Schichtenströmung 57
 Längenausdehnungskoeffizienten 107
 Langglasfasern 350, 434, 543
 Laplace-Gleichung 69
 Laserschmelzen 381
 Lebensmittelfreigabe 606
 Liquid Silicon Rubber (LSR) 625
 LSR-Spritzguss 629
 Lufteinschluss 41, 160 f., 164, 472, 633 f.
 Lunker 38, 315, 409

M

Makromoleküle 420
 Manifold Edge 89
 Mapping 436, 438, 461, 536
 Mappingprogramm 501, 523, 527, 542
 Maschinenparameter 563
 Masseanhäufung 337, 340, 409
 Maßhaltigkeit 548
 Materialbelastung 127
 Materialgesetz 68
 Materialgesetze 536
 Materialkart 233
 Materialkarte 175, 177 f., 502, 525, 542, 555, 631
 – mechanisch 107

– rheologisch 97
 – thermisch 100
 Materialkarten 62, 95
 Materialkennwerte 500
 Materialmodell 440, 527, 530
 – linear-elastische 439
 Matrix 499
 Matrixbruch 431
 Matrixexperiment 565, 569
 Matrix-Gleichungssystem 72
 mechanische Eigenschaften 477, 499
 mechanischen Auslegung 501
 mechanischen Berechnung 461
 mechanischen Eigenschaften 418, 432, 440, 483, 494, 498, 500, 525, 542
 mechanische Werkzeugauslegung 453
 Mehrfachanspritzung 234 f., 244
 Mehrfachkavitätenwerkzeug 197
 Melt Volume Rate 423
 Midplane 75, 156
 Mittelflächennetz 75
 Mittelschicht 507, 540
 Mittelwert 569
 mittlere quadrierte Abweichung 571
 Modellgleichung 566
 Molekülverschlaufung 425
 Morphologie 385

N

Nachbarflächen 687
 Nachdruck 2, 251, 325, 410, 614
 Nachdruckhöhe 178
 Nachdruckmodul 63
 Nachdruckphase 4, 9, 11, 178, 549, 552, 618
 Nachdruckwirkung 338, 550
 Nachdruckzeit 169, 178
 Nachschwindung 318, 320
 Nadelverschluss 116, 189 f.
 Nadelverschlussdüse 245, 636
 Nadelverschlussystem 117, 233, 253, 613
 Navier-Stokes 85
 Navier-Stokes-Gleichungen 67

Netzdichte 73, 436
Netzfehler 89
Netzqualität 93
Newtonsche Reibungsgesetz 558
newtonsches Reibungsgesetz 54
Non-Manifold Edge 89
Normklima 389
Nukleierungsmittel 112
Nullpunkt 670, 722
Nullviskosität 97f.
Nusseltzahl 297

O

Oberflächenmarkierungen 271
Oberflächenmodell 393
Oberflächenqualität 272, 548, 557
Optimierung 586, 645
Optimierungsziel 595
Optimierungsziele 590
optischen Abstandsmessung 387
Orientierung 421, 431, 501, 504 ff., 517, 519, 539
Orientierungen 328, 334, 350, 414, 418, 501 f.
Orientierungsdynamik 519
Orientierungsgrad 520
Orientierungstensor 63, 432, 508, 519
Originalgeometrie 649
orthogonale Felder 566
Ostwald und de Waele 512

P

Parameter 583
Pareto-Diagramm 404
Part Design 672, 690, 736
Pfropfen 42
piezoelektrische Sensoren 547
Plastifiziereinheit 541
Platten
– mit Rippen 144
Plattendicke 455
Poisson-Gleichung 69
Polygonisieren 389

Positionierung 656, 668, 670
Positionierungsfehler 733
Post-Processor 61
Postprozessor 50
Potenzansatz 512
Prandlzahl 297
Preprocessing 50
Pre-Processor 61
Produkteigenschaft 564
Produkteigenschaften 562
Produktentwicklung 49
Produktgestaltung 423
Prozessablauf 106, 316
Prozessdaten 96
Prozessführung
– variotherm und dynamisch 382
Prozessoptimierung 49, 559, 561
Prozessparameter 561, 563, 595
Prozessphasen 7, 547
Prozessregelung 559
pvT-Diagramm 106, 178, 549
pvt-Parameter 102
pvT Verhalten 555
pvT-Verhalten 64

Q

Qualität 209, 289
Qualitätsmanagement 566
Qualitätsmerkmal 575, 577, 582, 590, 638
Qualitätsmerkmale 548, 559, 579, 586, 597, 631, 633
quasistationären Zustand 291
Quellfluss 424
Quellströmung 57, 79, 418, 435, 502, 509
Querkontraktion 107
Querschnittsprung 279
Querströmung 505

R

Radien 696
Randeffekte 157

Randomisierung 569
 Randschicht 508, 510, 539, 626
 Randschichten 87, 191, 437, 505
 – eingefroren 125, 130, 157, 171
 – eingefrorene 117
 Rechenaufwand 649
 Rechenzeit 86
 Reduced Strain Closure (RSC-Model)
 519
 Regelgrößen 559
 Renner-Ansatz 103
 Restfeuchtigkeit 424
 Restkühlzeit 3f., 169
 Restspannungen 475
 Restwanddicke 478, 608 ff.
 Restwanddickenausbildung 608
 Reynoldszahl 53, 301, 312
 Robust Design 562, 568
 Rücklauftemperatur 304, 346

S

Sandwichaufbau 599
 Sandwichspritzgießen 599
 Schalenelementen 156
 Schalenmodelle 87
 Schallplatteneffekt 26
 Schäumen 410
 Schererwärmung 140, 497
 Schergeschwindigkeit 54, 276, 283,
 285, 502, 504, 513, 558
 Scherrate 96, 206
 Scherströmung 517
 Scherung 216 f.
 Schichtgrenzprofil 601
 Schieber 247
 Schieberegler 580, 582, 590, 633
 Schlieren 32, 383, 385
 Schließkräfte 495
 Schließungsformulierung 520
 Schmelzebelastung 459
 Schmelzedruck
 – spezifisch 172, 174, 177 f.
 Schmelzefließfront 227 f., 230
 Schmelzetemperatur 251, 263

Schriftzüge 703
 Schubbelastungen 541
 Schubmarkierungen 34
 Schubspannung 96 f., 136, 143, 150 f.,
 155, 206, 216, 443, 504
 Schubspannungen 140, 609
 Schubspannungsprofile 56
 Schwachstelle 416
 Schwimmhaut 39
 Schwindung 314 f., 320, 333 f., 347,
 407, 575, 584
 Schwindungsart 320
 Schwindungsdifferenz 322
 Schwindungsdifferenzen 329, 337, 354
 Schwindungskompensation 338
 Schwindungsplatte 332
 Schwindungsplatte Typ D2 326
 Schwindungs- und Verzugsverhalten 387
 Schwindungsunterschiede 333
 Screening 566
 Sensor 227, 242, 253, 257, 260, 266
 Sensoren 226, 228, 550, 557, 644
 Siegelpunkt 3, 11, 179, 550
 Signal-Rausch-Verhältnis 569 f.
 Simulationsergebnis 65
 Simulationsmodell 61
 Simulationsprogramm 6, 46
 Simulationsrechnung 46
 – Ergebnisse 59
 Six Sigma 566
 Sollwert 591
 Sonderverfahren 599
 Spaltpunkte 424
 Spannungs-Dehnungsdiagramm 439,
 500, 502, 525 f.
 Spannungsrisse 36
 Spannungsspitzen 458, 466
 spezifischen Wärmekapazität 290
 spezifische Schmelzedruck 556
 spezifische Volumen 104
 spezifische Wärmekapazität 100
 Spritzgießmaschine 1
 Spritzgießwerkzeug 5, 449
 – Belastung 464
 Spritzgießzyklus 2 f.

Stagnation 143, 150, 155, 161 f.
Stahlkern 479
Standardkühlung 351
Standardmaterialkarte 110, 113
Stangenanguss 183, 186 f., 248
statistische Prozessmodelle 563
statistisches Prozessmodell 564
statistische Versuchsplanung 561, 586
Steifigkeit 449, 453
Steifigkeitsmatrix 502
Steigerkühlung 356, 363, 378
Stellgrößen 563 f.
Steuergrößen 564
Stick-Slip-Effekt 628
Störgrößen 563
Streuung 571
Strömungsformen 517
Strömungsinstabilitäten 602
Strömungsquerschnitt 118 f.
Strömungsrichtung 501
Strömungssimulation 501, 515, 528
Strukturanalyse 436, 501, 542
Strukturbaum 654, 661
strukturmechanische Simulation 537
Struktursimulation 514, 523, 528, 544
Strukturviskosität 55, 276, 503, 510, 512
Stufen 565, 579, 587

T

Taguchi 576
Taguchi-Experiment 566, 573
Taguchi-Methode 578
Tait-Ansatz 103
Tangentialspannung 539
teilkriegerielle Versuchsplänen 588
teilkristalliner Kunststoff 549
Temperatur 255
Temperaturdifferenz 147, 291 f., 304 f.,
307, 309 f., 312, 357, 640
Temperaturdifferenzen 296
Temperaturkonstante 445
Temperaturprofil 298
Temperatursensor 226, 558
Temperierfehler 297

Temperierkanal 294
Temperierkreislauf 340, 351
Temperierkreisläufe 342
Temperiermitteldurchsatz 291
Temperiermittelstrom 290
Temperiermitteltemperatur 367
Temperiersystem 193, 289, 302, 340
Tensorkomponenten 522
thermische Ausdehnung 731
thermische Kennwerte 555
thermischen Trennung 196
thermische Trennung 189, 286
Tiger-Lines 34
Tigerlinien 271
Toleranz 586
Toleranzbereiches 590
topologische Fehler 677
Total Displacement 392, 395, 399 f.
Trennmittel 424
Trimmen 700, 702
Tunnelanguss 186 f., 479
Tunnelanschnitt 187
turbulenten Strömung 301

U

Übergangsbereich 105
Übergangsschergeschwindigkeit 98
Übergangstemperatur 105
Überlappung 90
Umlenkungen 283, 541
Umschaltpunkt 8
Unterverteiler 219
unverdichteter Bereich 626
Unvollständiger Versuchsplan 565
Unwarp 243, 407
Ursache-Wirkungs-Modell 561

V

Vakuum-Löttechnik 380
Vakuums 637
Variablen 577
Varianz 562, 568
Varianzanalyse 571

- Varimos 340, 582, 595, 597
 - Verarbeitungsschwindung 318, 320, 325, 592
 - Verbindung 678
 - Verbrennungen 429
 - Verbrennungsschlieren 23
 - Verdichtungslinie 627
 - Vereinfachung 651
 - Vereinfachungspotenzial 648
 - Verformung 450, 453, 455, 471, 477, 488
 - Verformungen 575
 - Verformungsanalyse 387
 - Vergleichsspannung 469 f., 482
 - Vergleichsspannungen 488
 - vernetzenden Formmassen 625
 - Vernetzung 61, 73 f., 82, 528, 621, 647
 - Vernetzungsarten 75
 - Vernetzungsgeschwindigkeit 628
 - Vernetzungsgrad 636
 - Vernetzungskinetik 630
 - Vernetzungsproblemen 648
 - Vernetzungsqualität 91
 - Vernetzungsreaktion 625
 - Vernetzungstechnologien 73
 - Vernetzungszeit 636
 - Verrundung 695
 - Versatz 480, 488
 - Verschiebung 489
 - Verschlaufung 420
 - Verschleiß 450
 - Verschlussnadel 189
 - Verschlussnadeln 242, 258, 270
 - Verschlussnadeln, 286
 - Verschweißvorgang 418, 435
 - Verstärkungsstoffe 424
 - Versuchsplan 341, 403, 441, 579, 638
 - Versuchsplans 631
 - Verteilersystem 215
 - Verweilzeit 200, 246
 - Verwendbarkeit 651
 - Verzögerungszeit 618
 - Verzug 16, 243, 252, 263, 266, 295, 304, 309, 315, 329, 334, 346 f., 349, 407, 585, 593
 - Verzugsberechnung 70
 - Vielfachkavitätenwerkzeug 198
 - Vielfachwerkzeug 197, 199, 202, 215
 - Vielzweckkörper 427
 - Vielzweckkörpern 531
 - viskoelastische Effekte 68
 - viskoelastische Fließeigenschaften 268
 - viskoelastischen Fließverhalten 271
 - Viskosität 53, 176, 230, 246, 276, 283, 285, 383, 423, 558, 602, 620, 629, 637
 - Viskositätenexponent 97
 - Viskositätenverhältnis 602 f.
 - Viskositätskurve 98
 - Viskositätsverlauf 625
 - vollfaktorielle Versuchsplänen 588
 - Vollständiger Versuchsplan 565
 - Volumenkontraktion 317
 - Volumenkörper 661, 667
 - Volumenmodell 78, 649, 690
 - Volumennetz 77
 - Volumenschwindung 11, 106, 316, 322, 325, 329, 336, 410, 613, 617
 - Volumenvernetzung 82
 - Voreileffekt 497
 - Vorfüllgrad 603 f., 614, 618 f.
 - Vorlaufterperatur 304
- W**
- Wanddickensprünge 415
 - Wanddickenverteilung 497
 - Wandgleitens 627
 - Wandhaftung 57, 502 f., 627 f.
 - Wandschergeschwindigkeit 559
 - Wandschergeschwindigkeiten 557
 - Wandschubspannung 233, 558
 - Wandschubspannungen 557
 - Wandviskositäten 557
 - Wärmeabfuhr 346, 483
 - inhomogen 296
 - Wärmeaustausch 299
 - Wärmebild 194
 - Wärmehaushalt 203
 - Wärmeleiteinsätzen 381

wärmeleitfähige Werkzeugeinsätze 382
Wärmeleitfähigkeit 100, 324, 477, 483,
494, 498
Wärmeleitung 299
Wärmestrom 323
Wärmestrombilanz 289
Wärmeübergangskoeffizient 296, 301
Wärmeleitfähigkeit 644
Wasseraufnahme 442
Wechselbelastungen 450
Wechselwirkung 427f., 566, 573
Wechselwirkungen 583
Weißbruch 21
Werkzeug 1
Werkzeugauslegung
– rheologisch 48
Werkzeugbelag 19
Werkzeugbelastung 455, 462
Werkzeugdeformation 462
Werkzeugdeformationen 478
Werkzeugdimensionierung 45
Werkzeugfüllung
– unvollständig 28
Werkzeuginnendruck 449, 553, 555
Werkzeuginnendrucksensor 547, 553,
557

Werkzeuginnendruckverlauf 547
Werkzeugkühlung 342
Werkzeugoberflächentemperatur 293
Werkzeugschädigung 205
Werkzeugtemperatur 303, 355, 360
Werkzeugverformung 451, 461
Williams, Landel und Ferry Ansatz 98
Wirtschaftlichkeit 289, 380, 608

Z

Zentraleinstellung 407
Zentralstufe 587
Zentrierung 492
Zielgröße 561, 583
Zugbeanspruchung 500f.
Zugscherfestigkeit 475
Zugspannung 526
Zugversuch 500, 526, 531
Zuhaltekraft 10, 204, 209, 449, 614,
618f.
Zusammenfügen 677
Zyklus 2
Zykluszeit 3f., 386
Zykluszeitoptimierung 636