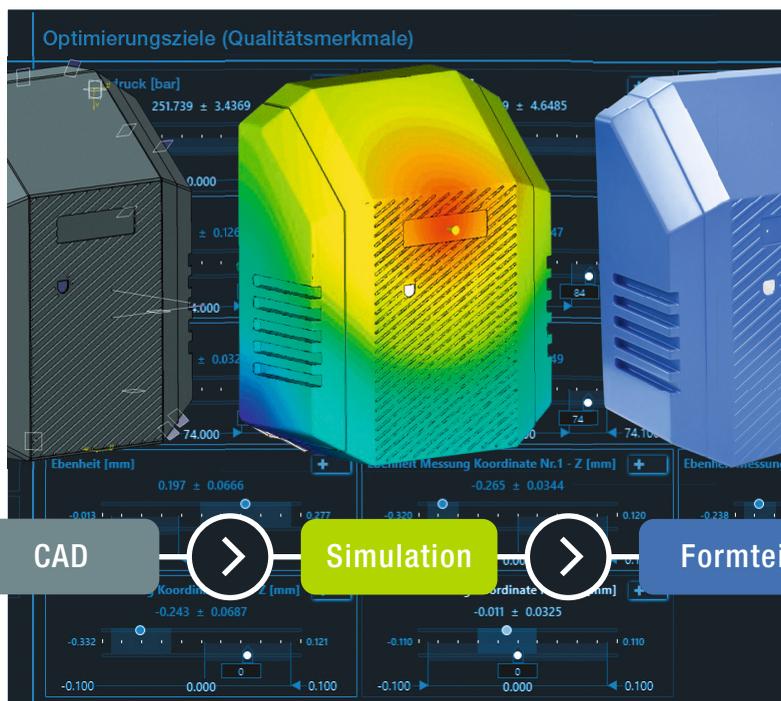


Thomas Schröder



Simulation in der Spritzgießtechnik



HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-m6hkX-wm2dr

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Thomas Schröder

Simulation in der Spritzgießtechnik

HANSER



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern in diesem Buch überwiegend die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Mark Smith

Herstellung: Cornelia Speckmaier

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © Thomas Schröder

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Krugzell, Germany

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-46580-0

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

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 – Overlappings	90
5.3.3	Schnittpunkte – Intersections	90
5.3.4	Dreieck-Seitenverhältnis – Aspect Ratio	91
5.4	Beurteilung der Vernetzungsqualität	91
6	Materialkarten der Simulationsprogramme	95
6.1	Einstell- und Prozessdaten	96
6.2	Rheologische Materialkarte	97
6.3	Thermische Materialkarte	100
6.4	Thermodynamische Materialeigenschaft – das 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 Werkzeuginnendruckes und des spezifischen Schmelzedrucks anhand der Fließspirale	553
16.3	Prozessregelung mittels Sensorik	557
17	Prozessoptimierung mittels statistischer Versuchsplanung [Design of Experiments (DoE)]	561
17.1	Robust Design des Spritzgießprozesses	562
17.1.1	Problemstellung	562
17.1.2	Statistische Prozessmodelle	563
17.1.3	Verwendung von Matrixexperimenten zur Charakterisierung eines Prozesses	564
17.1.4	Unterscheidung von „Robust Design“ und statistischer Versuchsplanung	568
17.1.5	Auswertung von Taguchi-Matrixexperimenten	569
17.1.5.1	Analyse der Mittelwerte	570
17.1.5.2	Varianzanalyse	571
17.2	Prozessoptimierung mittels Autodesk Moldflow	575
17.3	Prozessoptimierung mittels Cadmould Varimos	582
17.3.1	Auswahl der Qualitätsmerkmale	586
17.3.2	Definition der Faktoren/Inputparameter	587

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

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

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

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. Des 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 Corpoplast 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.

1

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].

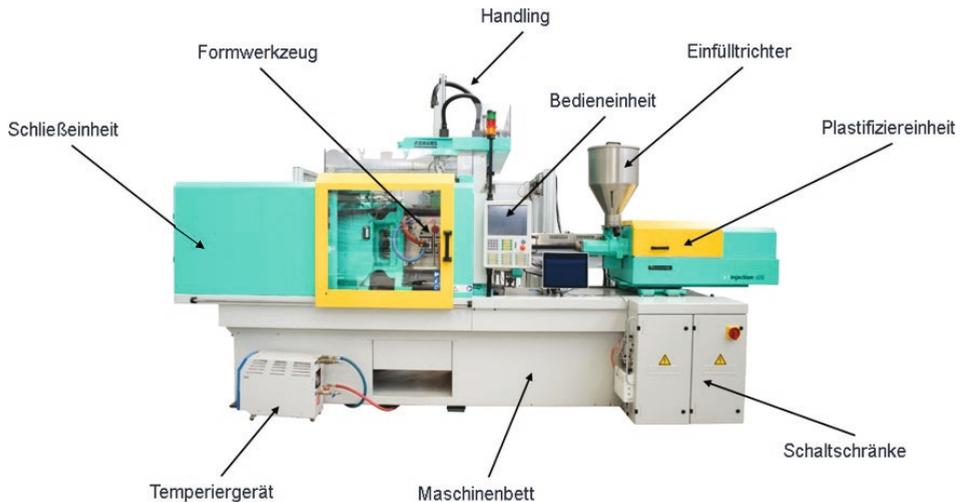


Bild 1.1 Aufbau einer Spritzgießanlage

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 Zuhaltkraft 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.

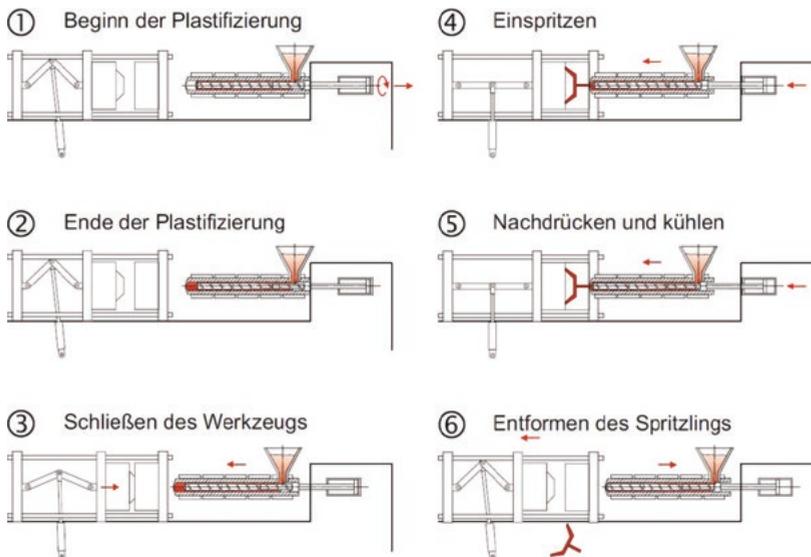


Bild 1.2 Verfahrensablauf beim Spritzgießen [1]

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].

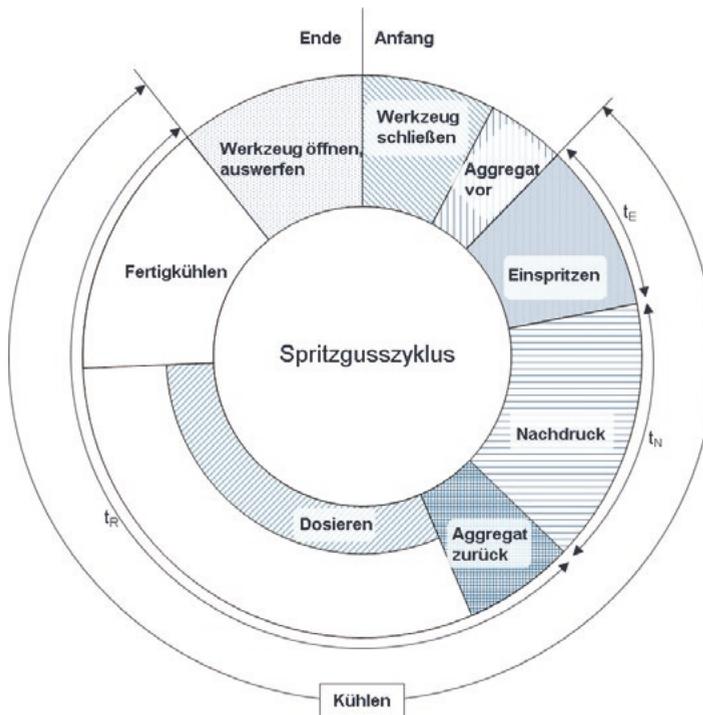


Bild 1.3 Spritzgießzyklus

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

$$t_z = t_E + t_N + t_{RK} + t_{Wz\text{auf}} + t_{\text{Auswerfer/Handling}} + t_{Wz\text{zu}} \quad (1.1)$$

Mit:

t_z = Zykluszeit

t_E = Einspritzzeit

t_N = Nachdruckzeit

t_{RK} = Restkühlzeit

$t_{\text{Auswerfer/Handling}}$ = Entnahmezeit

$t_{Wz\text{auf/zu}}$ = 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.

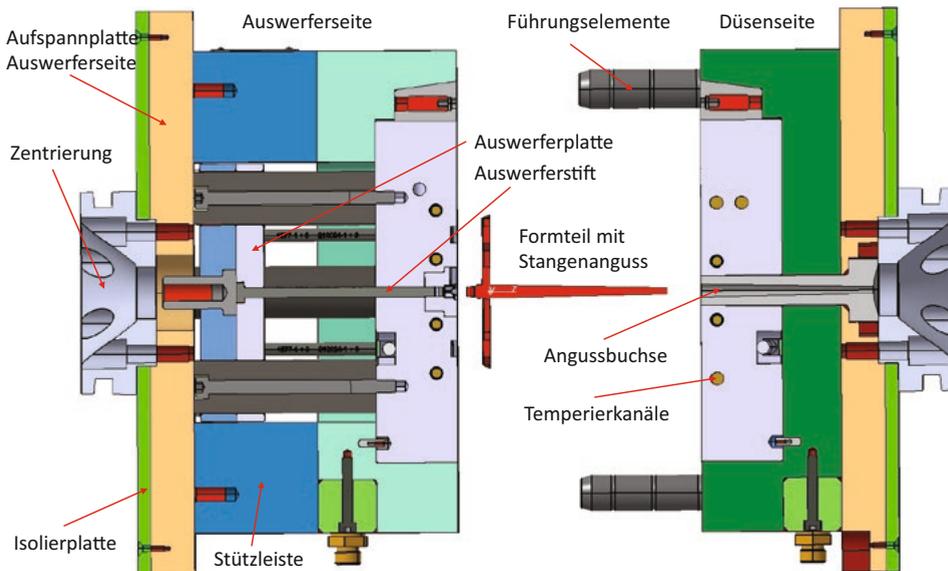


Bild 1.4 Aufbau eines Zweiplatten-Spritzgießwerkzeugs (Quelle: PlastSolutions GmbH)

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.

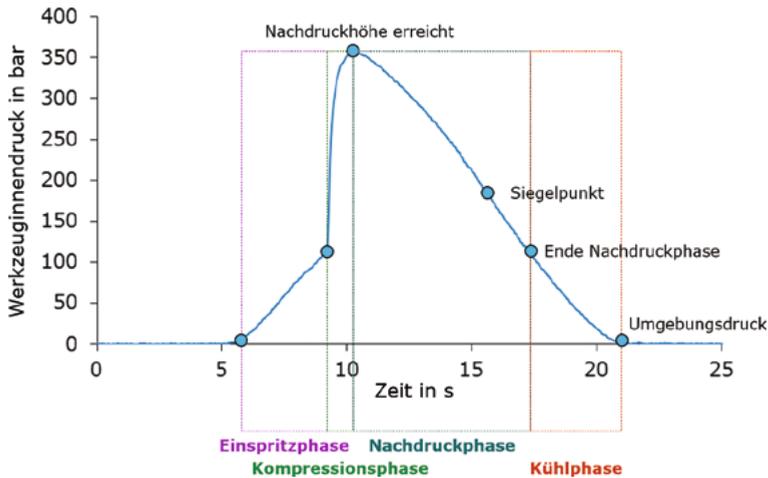


Bild 1.5 Werkzeuginnendruckverlauf beim Spritzgießen

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.

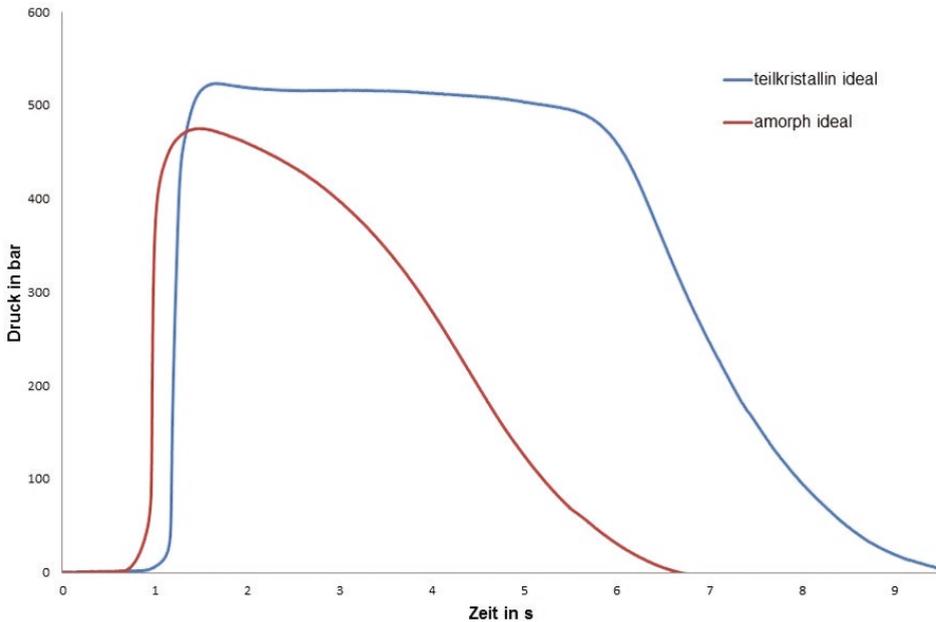


Bild 1.6 Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei korrektem Umschaltzeitpunkt

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).

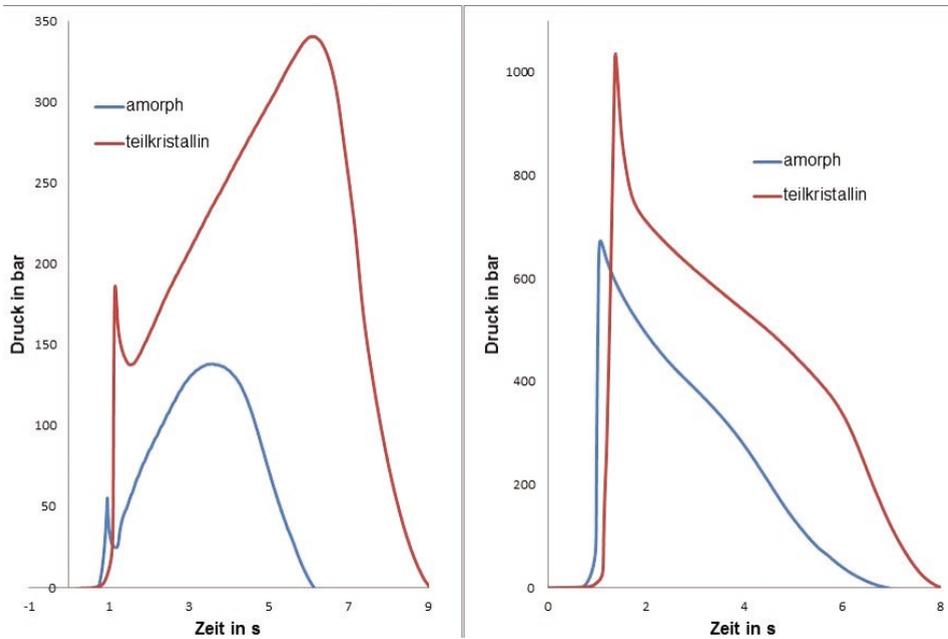


Bild 1.7 Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei nicht korrektem Umschaltpunkt

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 Werkzeuggrennung 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 Nadelverschlussdüse 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 p/vT 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 p v T -Diagramm ermitteln. Bei amorphen Kunststoffen liegt diese ca. 30 – 50 °C unter der Glasatemperatur (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.

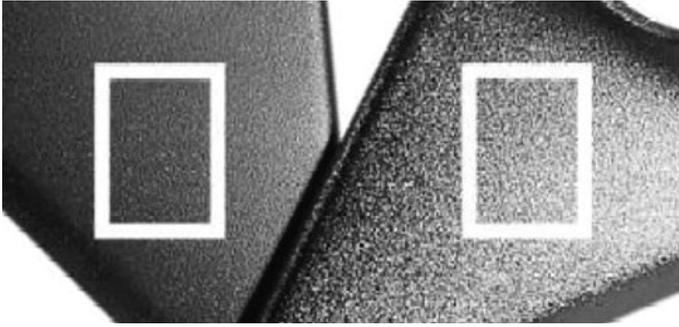


Bild 1.8
Glanzunterschiede

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 Schmelzefläßfronten relativ stumpf aufeinander. Im Bereich der Bindenaht entsteht oftmals auf der Formteilerfläche 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 Schmelzefläßfronten mit zu niedrigen Drücken und Temperaturen aufeinander, so bildet sich auf der Oberfläche in diesem Bereich eine Kerbe aus und die Schmelzefläßfronten 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 Verstärkungstoffe wie Glasfasern. Je kleiner der Winkel zwischen den beiden Schmelzeflächenfronten ist, desto extremer ist in der Regel die Ausprägung der Bindenaht.

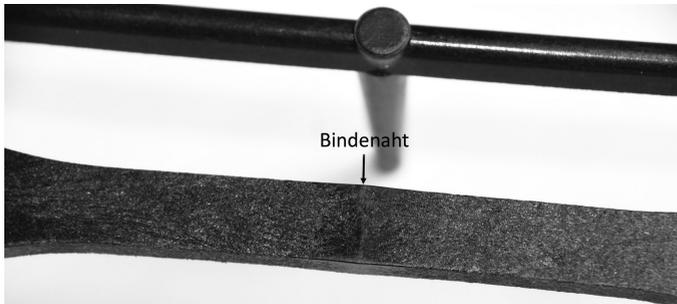


Bild 1.9 Bindenähte

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 Aufspaltung 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 (Variotherme 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 Schmelzeflächen kann der Nachdruck erhöht werden.
- Füll- und Verstärkungsstoffe oder Pigmente verschlechtern in der Regel die Bindahtqualität.
- Um die Position der Bindahten 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 Bindahten 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 Antihaftbeschichtung 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.

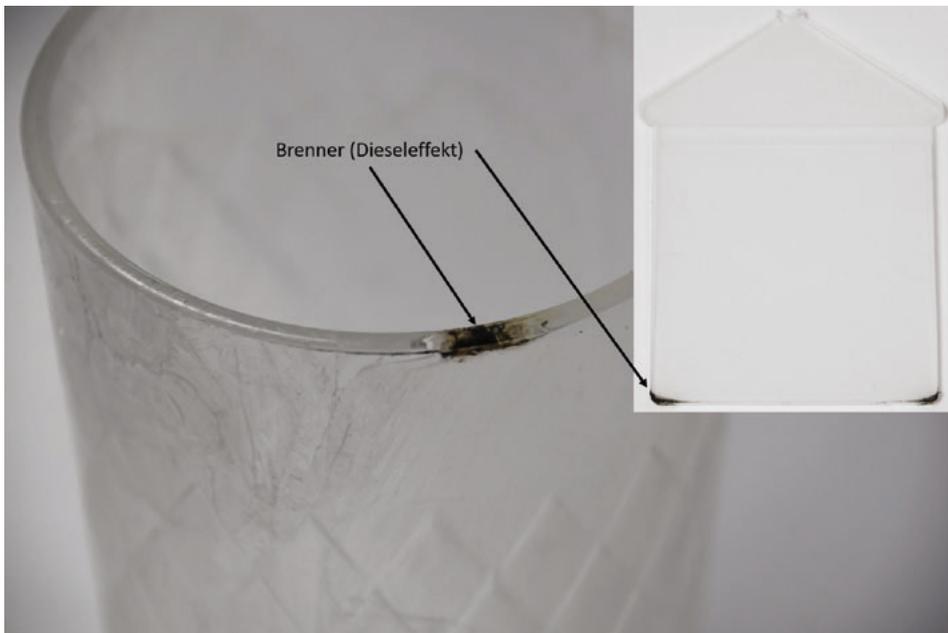


Bild 1.12 Diesel-Effekt (Brenner)

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 Masstemperatur 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 geackten Polymeren oder auch anderen Zersetzungsprodukten, wie beispielsweise Flammschutzmitteln, zusammen.

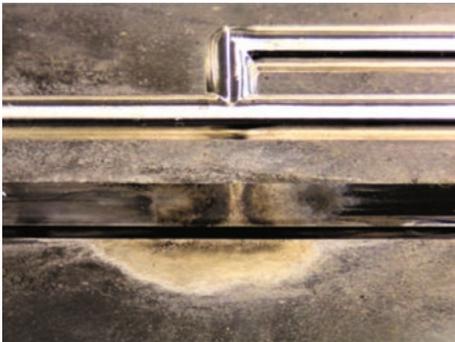


Bild 1.13
Werkzeugbelag

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).

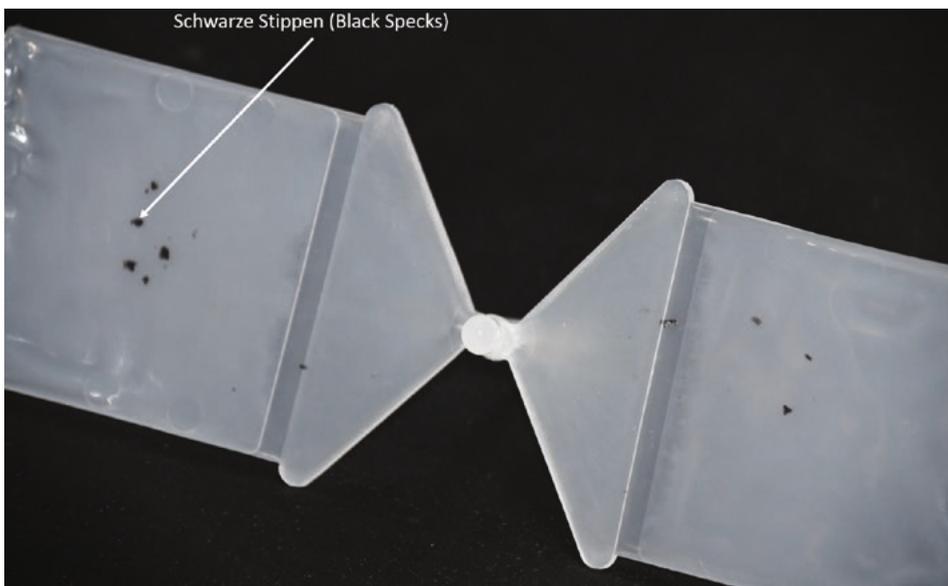


Bild 1.14 Dunkle Punkte (Black Specks)

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 Massetemperatur 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 Volumenschwindigkeit, 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 Formneests 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.

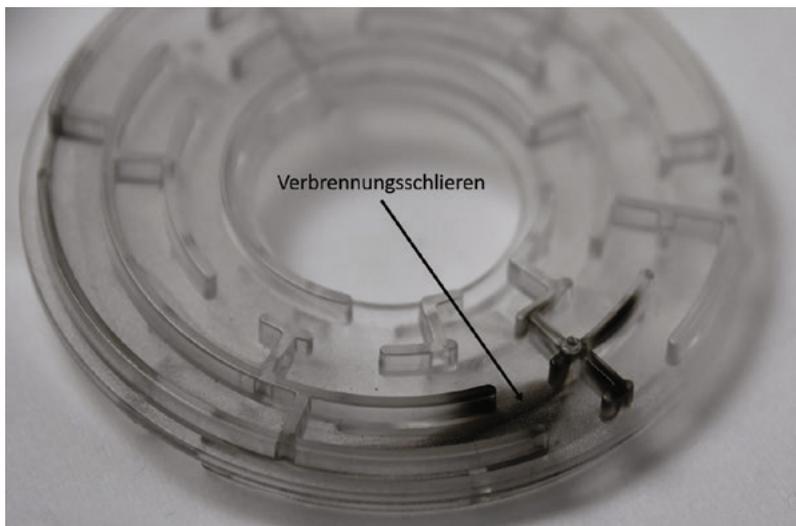


Bild 1.16 Verbrennungsschlieren

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 Schmelzetemperatur 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 Schmelzetemperatur 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 Formteillinneren auf.

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

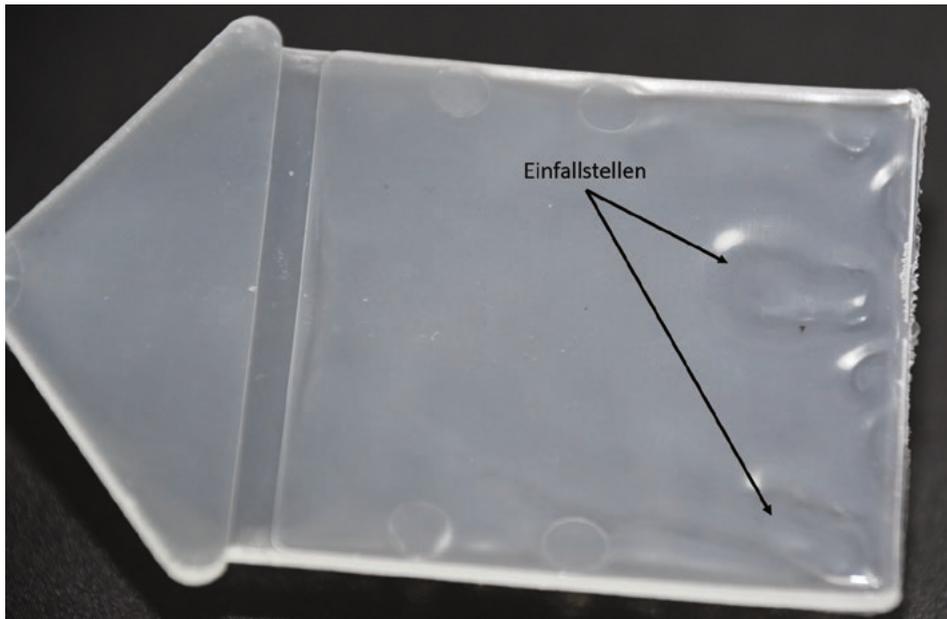


Bild 1.17 Einfallstellen

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

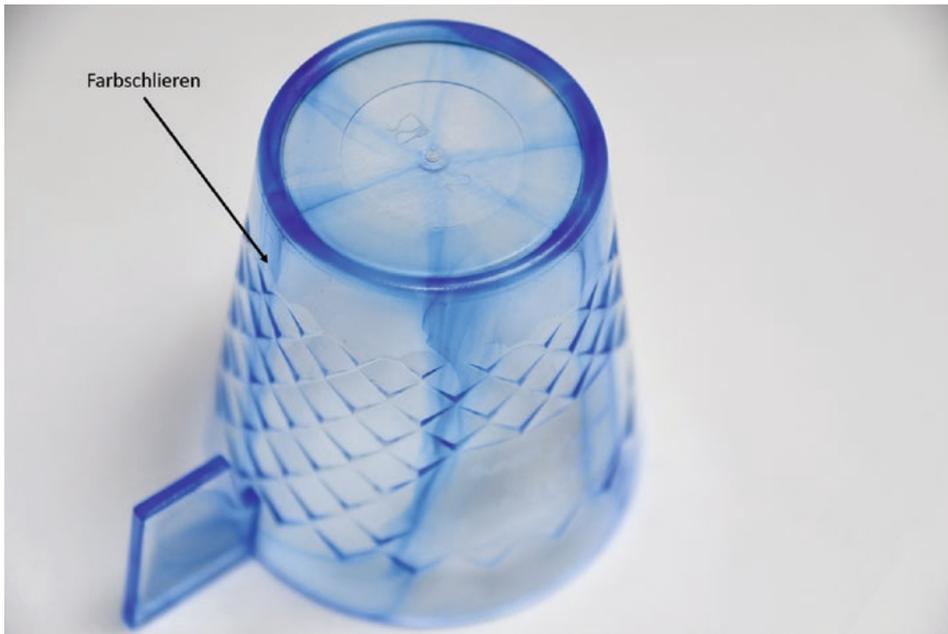


Bild 1.20 Farbschlieren

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.

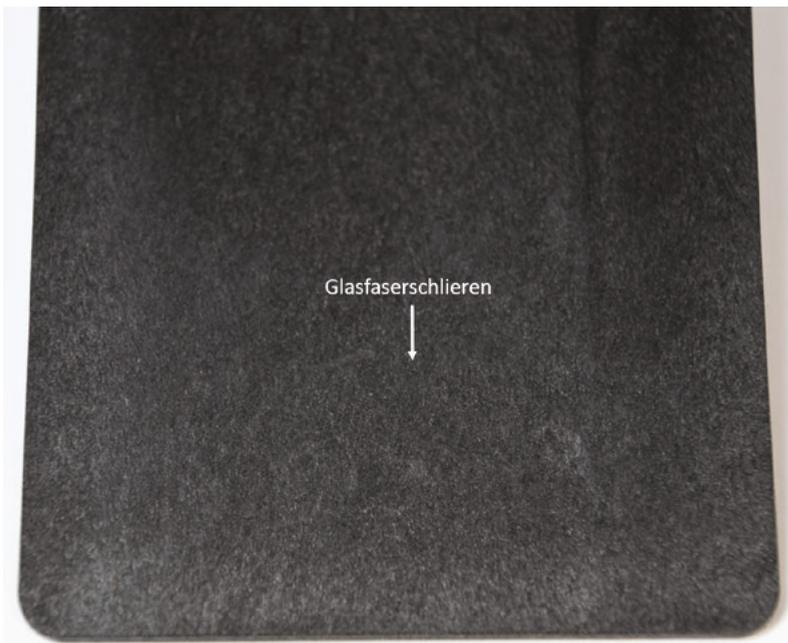


Bild 1.21 Glasfaserschlieren

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.

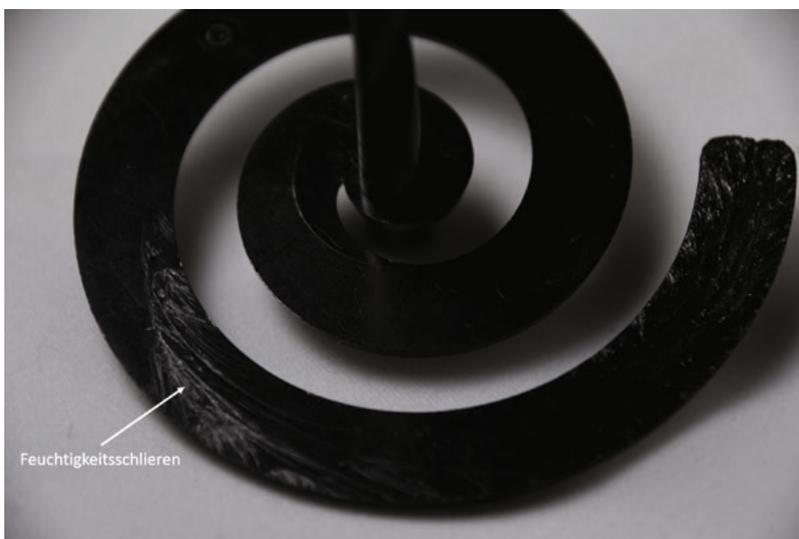


Bild 1.22 Feuchtigkeitsschlieren

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.

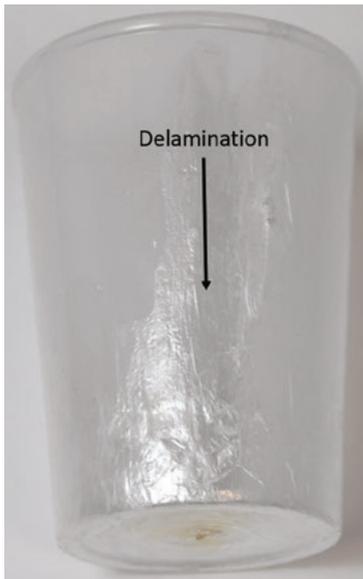


Bild 1.23
Delamination

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 Formteilfläche 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 Kunststoffes 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).

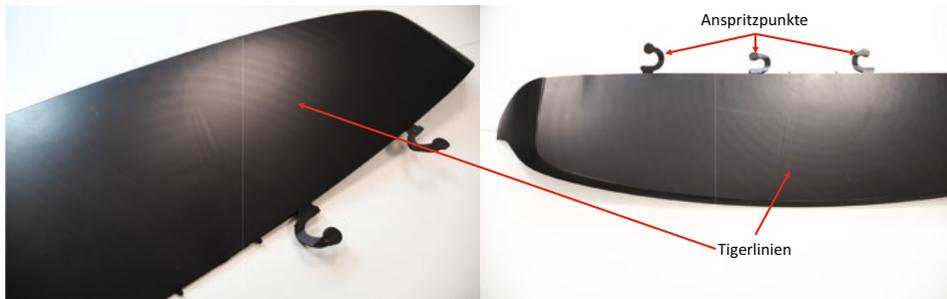


Bild 1.24 Schubmarkierungen

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 Spannungsrissebildung, 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.

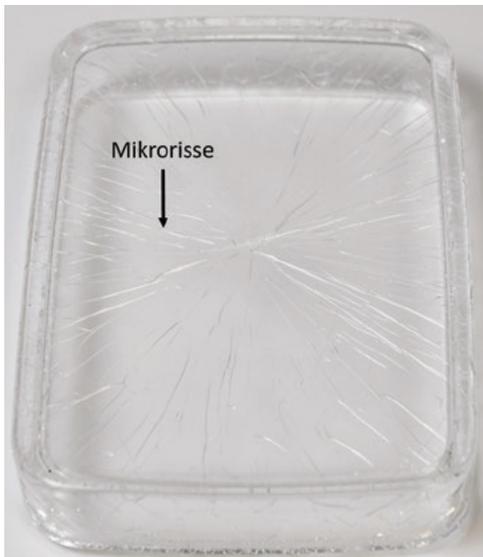


Bild 1.25
Spannungsrissebildung, Mikrorisse

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 schlängelförmig 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.

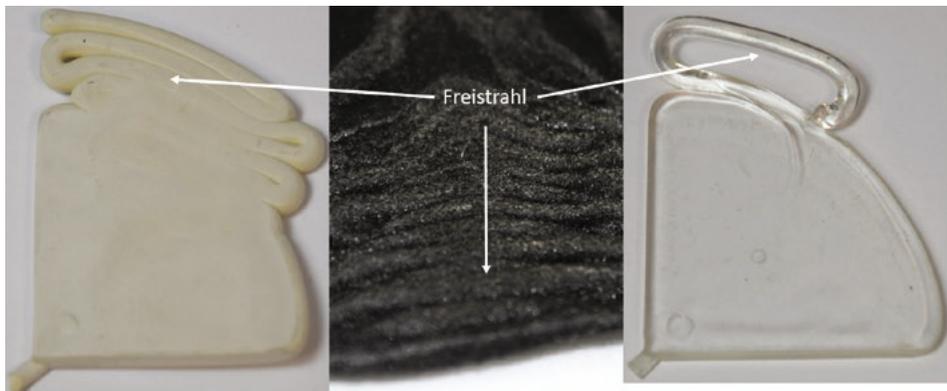


Bild 1.26 Freistrahlbildung

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.

- Der Freistrahlbildung kann vorgebeugt werden, wenn der Übergang zwischen Formteil und Anschnitt abgerundet wird.
- Weiterhin sollte die austretende Kunststoffmasse unmittelbar nach dem Anschnitt auf ein Hindernis treffen.
- Ein Freistrahll lässt sich nicht sinnvoll simulieren. Zum einen gehen die Simulationsprogramme von Wandhaftung aus, was der Entstehung eines Freistrahls widerspricht. Des Weiteren ist ein Freistrahll nicht reproduzierbar und damit nicht simulierbar.

1.5.20 Lunker

Nachdem das Formteil abgekühlt ist, können sich in dessen Inneren blasenförmige oder mikrozellige Hohlräume, auch Vakuolen genannt, bilden. Bohrt man das Formteil in gefärbten Wässern an und diese füllen sich nicht mit Wasser, so haben sich Gasblasen im Formteilinneren gebildet. Handelt es sich jedoch tatsächlich um einen leeren Hohlraum und Wasser kann eindringen, so spricht man von Lunkern (Bild 1.27). Diese sind häufig, im Kontrast zu Gasblasen, in der Nähe der plastischen Seele, die sich meist in der Wandmitte befindet, oder bei Masseanhäufungen zu finden. Ebenso wie Einfallstellen können die Lunker an Stellen mit großer Volumenschwindigkeit, wo Masseverdichtung durch den Nachdruck unzureichend ist, entstehen. Im Gegensatz zu Einfallstellen treten Lunker jedoch auf, wenn die erstarrten Randschichten eingefroren und infolgedessen so unnachgiebig sind, dass während der Masseabkühlung die Kontraktionskräfte im Inneren nicht mehr ausgeglichen werden können. Die Folge ist ein Hohlraum im Inneren des Formteils in diesen Bereichen.

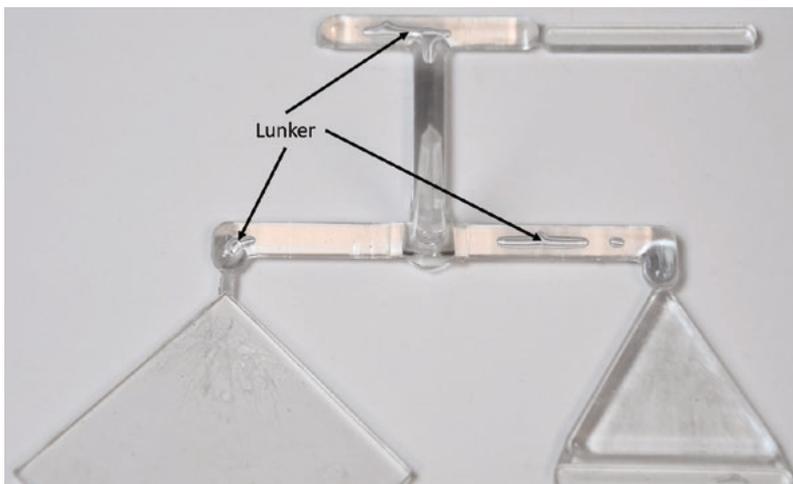


Bild 1.27 Lunker

Lösungsvorschläge:

- Eine Vergrößerung des Anschnitts kann die Bildung von Lunkern reduzieren. Ebenso kann der Anschnitt auch verlegt werden, falls der Anspritzpunkt an einem Bereich mit geringer Wandstärke liegt. Auch hier ist die Simulation ein Tool, welches unterstützend wirken kann.
- Bei der Gestaltung der Rippen etc. sollten die Gestaltungsrichtlinien beachtet werden.
- 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.
- Eine weitere Lösungsmöglichkeit ist das Erhöhen des Nachdrucks.
- Eine Vergrößerung des Dosierwegs kann sich positiv auswirken.
- Gegebenenfalls sollte die Einspritzgeschwindigkeit verlangsamt werden.
- Die Verringerung der Masstemperatur und der Werkzeugtemperatur kann hilfreich sein.
- Die Rückstromsperre sollte überprüft werden.
- Lunker können an lokalen Dickstellen oder durch eine fehlende Nachdruckwirkung etc. von den Simulationsprogrammen dargestellt werden. Dementsprechend helfen die Programme bei der Problemlösung.

1.5.21 Grate und Schwimmhäute

Steht am Rand des Formteils Material über, so nennt man dies, je nach Intensität, Schwimmhäute oder Grate (Bild 1.28). Letztere sind oft gut zu ertasten, jedoch trotz ihrer Größe relativ fein. Schwimmhäute hingegen sind nochmals größer als Grate und erinnern in ihrem Aussehen an die Füße von Wasservögeln. Beide Formen des Überstands bilden sich durch das Eindringen von Schmelze in Werkzeugbereiche wie Trennungen, Einsätze, Schieber oder Auswerferstifte. In die Trennebenen dringt die Schmelze bevorzugt ein, wenn die Maschinenzuhaltkraft nicht ausreichend ist. Da die Gratbildung aufgrund der großen Flächenpressung dauerhaft zu einer Werkzeugbeschädigung führt, sollte diese vermieden werden. Dabei wird das Werkzeug nicht zu dem Zeitpunkt beschädigt, wo die Schmelze in diese Bereiche eindringt. Die Beschädigung des Werkzeugs erfolgt in den Bereichen der Gratbildung durch die wirkende Zuhaltkraft. Das Formteil löst sich nach Ende der Nachdruckzeit von der Kavitätenwand. Nun drückt die Zuhaltkraft der Spritzgieß-

maschine auf den Grat oder die Schwimmhaut in der Trennebene und verursacht die Werkzeugbeschädigung.

**Bild 1.28**

Grate und Schwimmhäute

Lösungsvorschläge:

- Um den Hauptauslöser für Grate und Schwimmhäute zu eliminieren, sollte zuerst versucht werden, die Zuhaltkraft der Spritzgießmaschine zu erhöhen, insofern dies machbar ist. Hier kann die Simulationstechnologie Hilfestellung bieten, da die Programme die notwendige Zuhaltkraft berechnen können.
- In Bezug auf das Werkzeug sollte die Abstimmung der Einzelteile im Werkzeugbau und der Werkzeughälften optimiert werden, sowie die Steifigkeit erhöht werden.
- Außerdem kann sich eine Verringerung der Werkzeug- und/oder Masstemperatur vorteilhaft auswirken.
- Alternativ kann der maximale Forminnendruck (Druckspitzen in der Einspritzphase und Nachdruckhöhe) vermindert werden. Der Umschaltzeitpunkt sollte kontrolliert und ggf. sollte früher auf Nachdruck umgeschaltet werden.
- Die Einspritzgeschwindigkeit kann ebenso reduziert werden.
- Optimieren die oben genannten Methoden nicht merklich den Prozess, so sollte eine Werkzeugüberarbeitung in Betracht gezogen werden.
- Grate und Schwimmhäute lassen sich nicht wirklich direkt durch die Simulation darstellen. Die Simulationsprogramme sind jedoch in der Lage den Druck in der Kavität und die notwendige Zuhaltkraft der Spritzgießmaschine zu berechnen. Der Anwender kann daraus ableiten, ob die Zuhaltkraft der später eingesetzten Spritzgießmaschine ausreichend ist.

1.5.22 Lufteinschlüsse

Lufteinschlüsse zeigen sich in unterschiedlicher Form abhängig von ihrer Ursache (Bild 1.29). Zum einen kann es sein, dass die Luft in der Plastifizier- und Einspritzereinheit nicht ausreichend in Richtung Trichter entweichen kann. Des Weiteren kann Luft im Bereich des Kontakts der Maschinendüse zur Angussbuchse eingezogen werden. Gleiches gilt auch für die Werkzeugfüllung, bei welcher an scharfen Umlenkungen Luft mitgeschleppt werden kann. Im Gegensatz zu Lunkern sind die Blasen in der Regel in der Nähe der Formteilwand zu finden und durch sie wird oft die Strömungsrichtung ersichtlich. Die Struktur der Blasen kann alle Bereiche von fein bis grob umfassen. Jedoch kann die Luft auch von der Schmelze umschlossen werden, wobei es unter anderem zu einer unvollständigen Formteilfüllung kommen kann. Weitere Fehlerbilder, die dadurch ausgelöst werden können, sind beispielsweise Fehlstellen an der Formteiloberfläche, aber auch der Diesel-Effekt, welcher schließlich zu Verbrennungen führen kann.

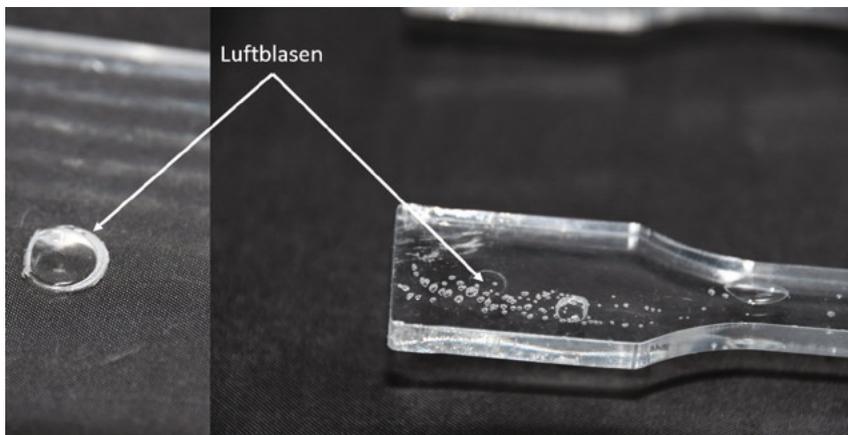


Bild 1.29 Lufteinschlüsse

Lösungsvorschläge:

- Im ersten Schritt sollte der Dosierweg der Schnecke überprüft werden, d. h. die Plastifiziereinheit sollte auf Ihre Größe überprüft und ggf. ausgetauscht werden. Der optimale Dosierweg s_D liegt beim zweifachen Schneckendurchmesser D . Allgemein gilt $D < s_D < 3D$. Liegt der Dosierweg s_D über dem dreifachen Schneckendurchmesser, so nimmt die wirksame Einzugszone unzulässig ab und die Luft kann nicht mehr ausreichend in Richtung Trichter entweichen.
- Eine Verbesserung des Materialeinzugs kann die Bildung von Lufteinschlüssen vermindern. Hierzu sollte die Schneckenbewegung beobachtet werden: Bewegt sich diese nicht in einem gleichmäßigen Rhythmus nach hinten, sondern tendenziell ruckartiger, dann ist eine Erhöhung des Staudrucks notwendig.

- Des Weiteren sollte in Erwägung gezogen werden, die Kompressionsentlastung zu vermindern, da Lufteinschlüsse weniger auftreten, wenn der Schneckenrückhub langsamer oder kleiner eingestellt wird.
- Eine Anpassung der Füllbilds durch Fließbremsen und/oder -hilfen kann sich ebenso positiv auswirken.
- Auch bei diesem Formteilfehler kann eine Anschnittverlegung sinnvoll sein. Insofern kann eine Simulation zur Fehlerbeseitigung dienen.
- Außerdem sollte erneut die Verbindung von Maschinendüse zu Angussbuchse geprüft werden, da hier keine undichten Stellen vorkommen sollten.
- Lufteinschlüsse, die z.B. durch das Aufeinandertreffen von Schmelzefronten entstehen, können sehr gut simuliert werden, wie das Kapitel 7 in diesem Buch verdeutlicht.

1.5.23 Kalter Pfropfen

Sind die Temperaturverhältnisse nicht günstig, so können Abschnitte der Schmelze in der Düse erstarren (Bild 1.30). Diese erstarrten Teile können dann bei dem nachfolgenden Einspritzvorgang in die Kavität gelangen und so insbesondere bei transparenten oder dünnwandigen Formteilen im Angussbereich sichtbar werden. Sollte der Pfropfen nicht aufschmelzen, so kann es passieren, dass er den Fließquerschnitt blockiert, sodass eine Bindenaht durch die sich aufteilende Schmelze entsteht. Im schlimmsten Fall kann er den Anschnitt verschließen und als Resultat die Formfüllung vollständig unterbinden. Außerdem können sich die mechanischen Eigenschaften erheblich verschlechtern, wenn sich der kalte Pfropfen nicht mit der Restschmelze verbindet. Als kritisch müssen immer die Bereiche betrachtet werden, wo kalte Elemente des Werkzeugs mit warmen Elementen der Spritzgießmaschine, wie z.B. die Maschinendüse, aufeinandertreffen. An diesen Stellen findet ein Wärmeaustausch zwischen den Komponenten statt. Ähnlich kritisch kann die thermische Trennung im Heißkanal sein, da die heiße Düse am Anschnitt des Formteils mit der kalten Werkzeugwand in Berührung steht. Hier spielt die sogenannte thermische Trennung eine große Rolle.



Bild 1.30
Kalter Pfropfen

Lösungsvorschläge:

- Die Bildung des kalten Pfropfens kann durch Kürzen der Anlagezeit der Maschinendüse am kühlen Werkzeug unterbunden werden.
- Des Weiteren kann die Temperatur der Maschinendüse angehoben werden.
- Es kann versucht werden, den Pfropfen in einen Blindkanal umzuleiten.
- Die Optimierung des Schneckenrückzugs kann ebenfalls die Pfropfenbildung verhindern. Hierbei wird die Schnecke nach der Aufdosierung vorsichtig einige wenige Millimeter zurückgezogen (Dekompression), sodass keine Schmelze aus der Düse austreten kann.
- Auch in Bezug auf die Heißkanaldüse können mehrere Verbesserungsmöglichkeiten unternommen werden. So kann beispielsweise die Temperatur der Düse erhöht werden, jedoch ohne dass die empfohlene Höchstgrenze der Masstemperatur übertroffen wird. Weiterhin wäre es möglich, den Düsenquerschnitt zu vergrößern. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass es zu einem unsauberen Abriss oder anderen negativen Konsequenzen kommen könnte. Daher sollte vor einer Anpassung immer der Hersteller des Heißkanals kontaktiert werden.
- Auch das Verwenden einer Verschlussdüse kann die Pfropfenbildung vermeiden.

1.5.24 Matte Stellen um Anschnitte oder hinter Querschnittsübergängen

Um den Anschnitt, und in einigen Fällen auch an Querschnittsübergängen im Formteil, können matte, kreisrunde Flecken auftreten, wenn dort zu hohe Schubspannungen auftreten (Bild 1.31). Auch wenn die Wandhaftung an den Querschnittsübergängen eingeschränkt ist, kann dies einen Einfluss auf dieses Fehlerbild haben.



Bild 1.31

Matte Stellen um Anschnitte oder hinter Querschnittsübergängen

Lösungsvorschläge:

- Durch ein gestuftes Einspritzprofil kann ein positiver Effekt erzielt werden. Zu Beginn der Formteilkfüllung, d.h. im Anschnittbereich, sollte die Schnecken-
vorlaufgeschwindigkeit daher reduziert werden.
- Der Anschnitt kann außerdem optimiert werden, indem er soweit wie möglich
mit Radien versehen und im Bereich der Kavität vergrößert wird.
- Die Werkzeug- und/oder Massetemperatur kann erhöht werden, damit die Fle-
cken ausbleiben. Dabei sollte zuerst die Massetemperatur gesteigert werden,
da diese wesentlich zur Problemlösung beiträgt und kaum Auswirkungen auf
die Zykluszeit hat.
- Es ist außerdem wichtig den Querschnittsübergang harmonisch zu gestalten.
- Evtl. kann ein besser fließendes Material Abhilfe schaffen.

1.5.25 Ungewöhnlicher Geruch

Tritt während des Spritzgießprozesses ein ungewöhnlicher Geruch auf, so handelt es sich in der Regel um Spaltprodukte, die durch Degradation oder Zersetzung entstehen. Diese Spaltprodukte können aus dem Kunststoff selbst stammen. So spaltet PVC zum Beispiel Salzsäure (HCl) bei zu hohen Temperaturen und zu langer Verweilzeit ab. Bei POM entsteht Formaldehyd als Spaltprodukt. Auch Zusatzstoffe, wie Farbpigmente oder Flammschutzmittel, können sich zersetzen und zu Spaltprodukten führen. In diesem Fall sollten folgende Lösungsmöglichkeiten in Erwägung gezogen werden:

- Bereits eine Reduktion der Massetemperatur kann den Geruch reduzieren
oder sogar vermeiden.
- Es sollte der Dosierweg der Spritzgießmaschine überprüft werden. Der opti-
male Dosierweg s_D liegt beim zweifachen Schneckendurchmesser 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 der Heißkanal sollte auf die Verweilzeit der Schmelze in diesem Bereich
geprüft werden.
- Vor längeren Fertigungspausen sollte die Zylinderheizungstemperatur gesenkt
werden. Eventuell kann auch die Temperatur des Heißkanals gesenkt werden.
Weiterhin sollte das Material, welches noch im Zylinder verblieben ist, aus-
gespritzt werden, bevor die Maschine abgestellt wird.

■ 1.6 Spritzgießsimulation

Im Vordergrund steht beim Spritzgießen die Auslegung der Spritzgießwerkzeuge inklusive Anguss-/Anschnittsystem und der Kühlung zur Herstellung von Kunststoffformteilen. Der Konstruktionsprozess lässt sich in drei Phasen unterteilen (Bild 1.32). Im Anschluss an die Werkzeugfindungsphase folgt die Werkzeugdimensionierung. Diese beinhaltet neben der mechanischen und thermischen auch die rheologische Auslegung. D.h. an dieser Stelle sind vorwiegend rheologische Kenntnisse, also Kenntnisse über das Fließverhalten der Kunststoffschmelzen, notwendig.

Die rheologische Werkzeugauslegung bietet sich als erster Auslegungsschritt der zweiten Werkzeugauslegungsphase an, da hier kaum Restriktionen aus den Ergebnissen der anderen Auslegungsschritte zu erwarten sind. Sie dient zunächst dazu, die Lage von Bindenähten und Lufteinschlüssen in Abhängigkeit von Art und Lage der Anschnitte und Wanddicke festzuhalten. Da für eine solche Analyse das Materialverhalten eine untergeordnete Rolle spielt und da hier weder Drücke noch Geschwindigkeiten der Schmelze gefragt sind, ist dieser Auslegungsschritt im Bild 1.32 als qualitativ bezeichnet. Hier kann zum Beispiel die Füllbildmethode Anwendung finden.

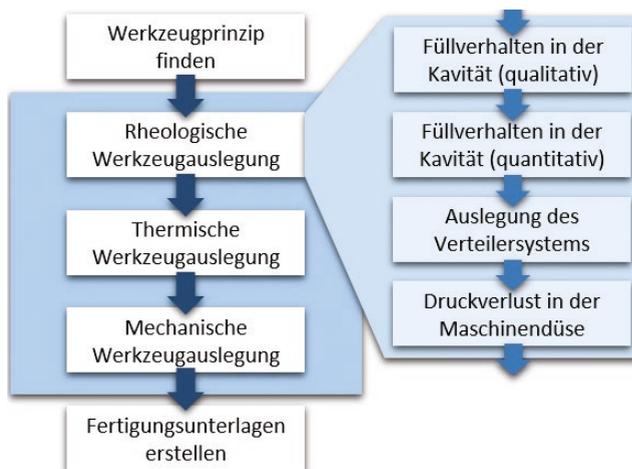


Bild 1.32 Die Phasen der Werkzeugkonstruktion und die Schritte der rheologischen Werkzeugauslegung [5]

Nachdem durch diese Analyse die Fließwege der Schmelze im Formnest bestimmt sind, kann eine quantitative Analyse durchgeführt werden. Hierzu ist die Kenntnis des Materialverhaltens, d.h. der Viskositätsfunktion und thermischen Stoffwerte, Voraussetzung. In diesem Schritt der Auslegung wird der Druckbedarf zur Form-

nestfüllung berechnet. Dieser ist außer vom Materialverhalten von den Prozessparametern abhängig. Somit werden hier auch die optimalen Einspritzgeschwindigkeiten und Masse- und Wandtemperaturen ermittelt. Ferner können die Grenzwerte (Druck, Temperatur, Schergeschwindigkeit, Schubspannung etc.) der Prozessparameter festgelegt werden, deren Überschreiten zu Materialschädigung durch zu hohe Schergeschwindigkeiten oder durch zu hohe Friktionserwärmung führt.

Aus den ersten beiden rheologischen Auslegungsschritten resultieren die Positionen von Anschnitten und die erforderlichen Schmelzeströme, sowie die erforderliche Massetemperatur. Dies sind entscheidende Randbedingungen für das im dritten Schritt auszulegende Verteilersystem. Durch die Position von Anschnitten sind die Grobmessungen und mögliche Verteilervarianten festgelegt. In den meisten Fällen muss der Konstrukteur durch die gleiche Simulationsrechnung wie unter Schritt zwei die Durchmesser der Verteilerkanäle dimensionieren. Ergebnisse sind auch hier zusätzliche Druckverluste im Verteilersystem, sowie Temperatur- und Scherbeanspruchung des Materials.

Nach dieser Dimensionierung liegt der zur Werkzeugfüllung benötigte Druck fest. Dieser muss von der Maschine bereitgestellt werden. Zusätzlich muss noch der in der Maschinendüse selbst entstehende Druckverlust berücksichtigt werden. Je nach Höhe des Druckverlustes muss überprüft werden, ob der zur Verfügung stehende Maschinendruck (max. Einspritzdruck) ausreicht.

Entscheidend ist bei der Berechnung von Druckverlusten in der Maschinendüse und im Schmelzeverteilersystem auch die Berücksichtigung der sogenannten Einlauf- oder Dehndruckverluste. Diese entstehen immer dann, wenn eine Änderung des Strömungskanalquerschnitts (Querschnittssprung) vorliegt. So verändert sich z.B. der Durchmesser einer Maschinendüse immer vom Schneckendurchmesser auf einen Durchmesser, der kleiner ist als jener der Angussbuchse im Werkzeug. Somit ergeben sich schon hier zusätzliche Druckverluste, die zu den Scherdruckverlusten hinzuaddiert werden müssen. Auch auf dieses Thema wird später noch detailliert eingegangen.

Computerunterstützte Simulationsprogramme vernachlässigen diese Druckverluste in der Regel, weil die rheologischen Stoffdaten (Dehnviskositäten, Speichermodul etc.), die zur Berechnung dieser Druckverluste notwendig sind, nicht oder nur mangelhaft in den Materialkarten vorhanden sind. Dies kann gerade bei der Auslegung von Heißkanalsystemen zu fehlerhaften Rechnungen führen. So liegen die berechneten Druckverluste je nach Komplexität des Verteilersystems oftmals weit unter den realen Druckverlusten.

Der rheologischen Auslegung schließt sich die thermische Auslegung an. Hierbei sind bereits einige Restriktionen aus der rheologischen Berechnung zu beachten. So ist die Massetemperatur vorgegeben und auch die Temperatur an der Formnestwand liegt in engen Grenzen fest.

Da ein empirisches Ermitteln der optimalen Werkzeugauslegung z. B. mittels Versuchswerkzeugen recht zeit- und auch kostenintensiv ist, werden in der Werkzeugfindungsphase zunehmend computerunterstützte Simulationsprogramme genutzt. Diese Programme sind z. B. in der Lage, die Strömungsvorgänge im Werkzeug recht exakt vorherzusagen. Um dies zu ermöglichen, ist jedoch eine Reihe an mathematischen Ansätzen, die das Strömungsverhalten der Kunststoffschmelze beschreiben, notwendig. Des Weiteren werden zur Berechnung der Strömungsvorgänge Daten über die charakteristischen Fließeigenschaften der Kunststoffschmelze benötigt. An dieser Stelle kommt die Rheometrie ins Spiel. Mithilfe von unterschiedlichen Messeinrichtungen werden die typischen Fließeigenschaften der Kunststoffschmelzen gemessen und aufgezeichnet.

Bild 1.33 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer Spritzgießsimulation. Steht das CAD-Modell (Formteil, Werkzeug etc.) im geeigneten Datenformat (STEP etc.) fehlerfrei zur Verfügung, so können die gängigen Simulationsprogramme eine Vernetzung der Geometrie durchführen. Mittlerweile hat sich hier die dreidimensionale Vernetzung (Tetraeder, Hexaeder etc.) etabliert. Anschließend erfolgt die Festlegung der Anspritzposition, d. h. der Schmelzezuführung. Nachdem ein Material aus der Datenbank der Simulationsprogramme ausgewählt wurde, legt man die Prozesseinstellungen (Einspritzzeit, Umschaltzeitpunkt, Nachdruckhöhe, Nachdruckzeit etc.) fest. Die Programme schlagen an dieser Stelle Werte, die in den Datenbanken hinterlegt sind, vor. Auf die detaillierte Beschreibung des Ablaufs wird später eingegangen.



Bild 1.33 Schematischer Ablauf einer Spritzgießsimulation

Das Ergebnis einer Spritzgießsimulation ist im Bild 1.34 dargestellt. Das linke obere Bild zeigt die Füllzeit und die Isochronen, womit die Füllung (Bindenähte etc.) des Formteils bewertet werden kann. Rechts daneben sieht man die Fließfronttemperatur während der Füllung. Unten links wird der notwendige Fülldruck aufgezeigt und rechts daneben der Formteilverzug in allen Richtungen.

Die computerunterstützten Simulationsprogramme können das Füllverhalten (Isochronen und Isovelen), das Temperaturfeld (Isothermen), den Fülldruck (Isobaren), Orientierungen, Schwindung und Verzug und andere strömungsabhängige Größen berechnen und grafisch darstellen.

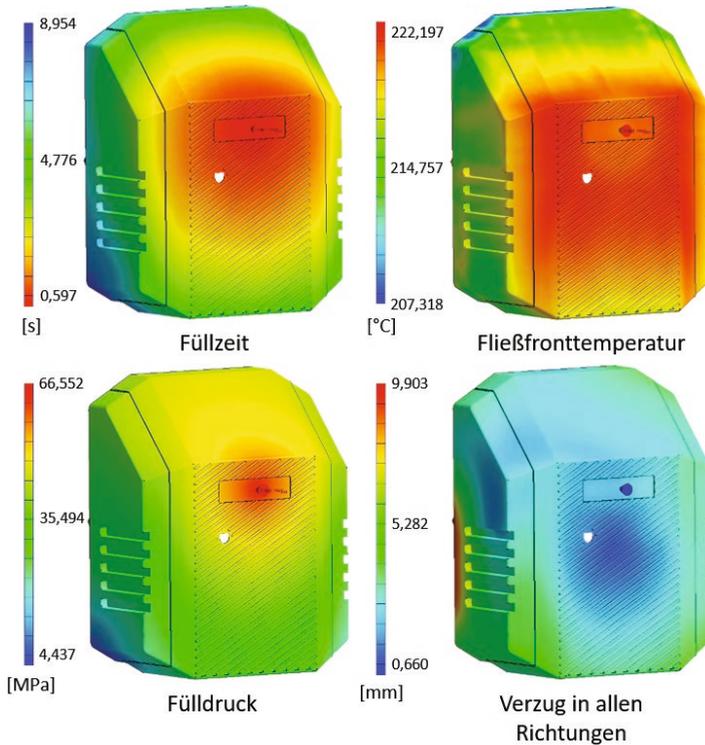


Bild 1.34 Ergebnisse einer computerunterstützten Simulation

Die Kunst liegt nicht darin, diese bunten Bilder zu erzeugen, sondern diese vielen bunten Bilder zu verstehen, zu interpretieren und Schlüsse daraus abzuleiten.

Bei komplexeren Werkzeuggeometrien (Stoßfänger, Armaturentafel etc.) erfolgt in der Regel in einer frühen Phase eine computerunterstützte rheologische Auslegung des Werkzeugs. So definiert und variiert man die Position und die Anzahl der Anspritzpunkte. Des Weiteren ermöglichen die Programme eine Vorhersage der Bindenähte und des Verzugs. Durch eine Variation der Anspritzpunkte kann das komplexe Formteil im Vorfeld optimiert werden. Damit lassen sich die Kosten und die Zeit für die Entwicklung, die Werkzeugfertigung und die sich anschließende Bemusterung reduzieren. Heute lassen sich auch Sonderverfahren, wie das Mehrkomponenten-Spritzgießen, das Gasinjektionsverfahren, das Hinterspritzen, das Kaskadenspritzgießen oder Dynamic Feed[®] mit den Simulationsprogrammen darstellen.

Die computerunterstützte Simulation von Spritzgießprozessen, als Unterstützung von speziellen Problemstellungen, hat in den letzten 30 Jahren stark an Bedeutung gewonnen und befindet sich in ständiger Weiterentwicklung. Hauptsächlich wird diese zum Zeitpunkt der Formteil- und Werkzeugentwicklungsphase vor der Produktion eingesetzt, um das Füllverhalten der Bauteile zu optimieren und Spritzgießwerkzeuge auszulegen.

Bei der klassischen Spritzgießsimulation sind aufgrund von unterschiedlichen physikalischen Bedingungen die Berechnungen in verschiedene Phasen (Füllsimulation, Nachdrucksimulation, Kühlsimulation und Verzugssimulation) unterteilt. Um diese Berechnungen durchführen zu können, werden die Bauteile in eine Vielzahl von kleinen Elementen unterteilt. Somit kann das Verhalten für jeden einzelnen Teilbereich berechnet werden. Anschließend wird das Verhalten aller einzelnen Teile zusammengefasst, um die Verhaltensweise des gesamten Bauteils abzubilden [6]. Hier stellt sich die Frage, wann und warum man die Simulation einsetzen sollte. Die Beurteilung des Bauteilversagens durch Simulationsberechnungen hat eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Simulationen minimieren die Kosten und die Projektlaufzeiten, da Fehler und mögliche Verbesserungen in frühen Phasen der Produktentwicklung ermittelt werden können. Hierdurch können besonders Kosten eingespart werden, da diese Verbesserungen ansonsten erst in den Testphasen deutlich werden würden. Dies wäre jedoch fatal, da bis zu diesem Entwicklungsstandpunkt bereits eine Menge Zeit und Geld in das Projekt investiert wurde. Bild 1.35 verdeutlicht den Verlauf der Kosten über den Entwicklungszeitraum.

Wie in Bild 1.35 zu erkennen ist, steigen die Kosten mit laufender Entwicklungszeit. Zu Beginn eines Projektes kann noch viel Einfluss auf die Gestaltung und Ausführung genommen werden, was zu einem späteren Zeitpunkt enormen Aufwand bedeutet. Simulationen decken jedoch nicht nur Fehlerquellen im Bauteil auf, sondern können ebenfalls für eine Prozessoptimierung sorgen. Hierbei kann beispielsweise eine Kostenersparnis durch die Reduktion der Zykluszeit entstehen. Werkzeuge für Spritzgießmaschinen können so in frühen Phasen noch durch Änderungen der Konstruktion verbessert werden, ohne dass ein fertiges Werkzeug unbrauchbar wird.

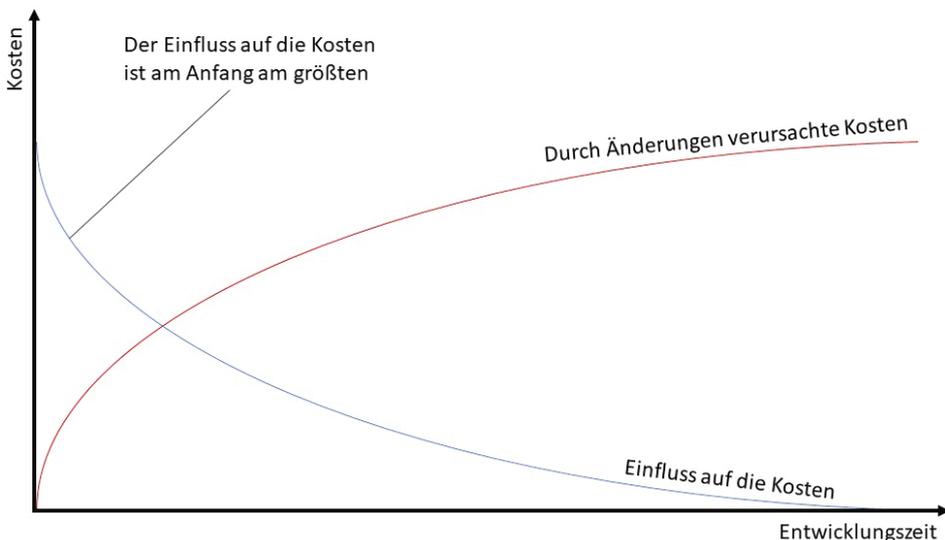


Bild 1.35 Einfluss der Kosten einer Produktentwicklung

Auf dem Markt existiert diverse Software zur Füllsimulation wie beispielsweise Moldflow, Cadmould, Sigmasoft und Moldex3D. Im Allgemeinen benötigen solche Anwendungen große Speicher- und Rechensysteme, da sie komplexe numerische Systeme und Differentialgleichungen lösen müssen. Die Grundlage hinter der Simulation von Strömungsmechaniken sind Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung. Diese werden durch die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben.

1.6.1 Ablauf einer Simulationsrechnung – klassische Lösungsmethoden

Die Berechnung mittels Software folgt grundsätzlich einer Struktur, die sich in drei Bestandteile unterteilen lässt. Beginnend mit der Dateneingabe (Präprozessor/Preprocessing) erfolgt die nötige Vorarbeit, um eine Simulationsberechnung durchführen zu können. Hierfür ist zuvor ein CAD-Modell des zu berechnenden Bauteils notwendig. Dazu wird ein CAD-Modell des Bauteils in einem entsprechenden Austauschformat (.igs, .stp etc.) in die Spritzgießsoftware importiert. Dieses wird im Präprozessor diskretisiert, was in der jeweiligen Simulationssoftware oder in einem externen Vernetzungstool erfolgen kann. Großflächige dünne Bauteile können mit Schalenelementen zweidimensional vernetzt werden. Sobald größere Sprünge in der Bauteildicke oder komplexe Geometrien (Rippen, Schraubdomen, Ausbrüche, etc.) vorliegen, werden dreidimensionale Elemente verwendet. Die Art der Elemente ist vom Anwendungsfall und der geforderten Diskretisierungsgüte abhängig. Im Präprozessor wird das Modell dann mit Materialdaten und Randbedingungen festgelegt, sowie mit Belastungen versehen. Im zweiten Schritt erfolgen die Berechnung und Lösung der Gleichungssysteme über Methoden wie FEM-, FDM- oder die FVM-Analyse. Die Beschreibung dieser Methoden wird in Kapitel 3 genauer aufgeführt. Der letzte Schritt ist die Ergebnisausgabe (Postprozessor), wo die Ergebnisse in Listen oder grafischer Form dargestellt werden. Bild 1.36 verdeutlicht den strukturellen Ablauf einer Spritzgieß-Simulations-Software für die Module Kühlen, Füllen, Nachdruck und Schwindung und Verzug [6 – 9].

Der Berechnung von Strömungen liegen die Navier-Stokes-Gleichungen zugrunde, welche die Massenerhaltung, Impulserhaltung und die Energieerhaltung des betrachteten Mediums beschreiben. Dabei wird für jedes Element mit einer Ansatzfunktion das Verhalten numerisch angenähert. In Verbindung mit Materialeigenschaften wie Viskosität, Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit ergibt sich ein System von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung, welche numerisch gelöst werden müssen. Bevor jedoch eine solche Berechnung starten kann, müssen die Modelle diskretisiert werden. Die Diskretisierung beschreibt dabei die Aufteilung des Modells in eine Vielzahl von kleinen Teilen,

auch Vernetzung genannt. Im Kapitel 5 wird genauer auf die Diskretisierung und die Unterscheidung der Elementarten der jeweiligen Programme eingegangen.

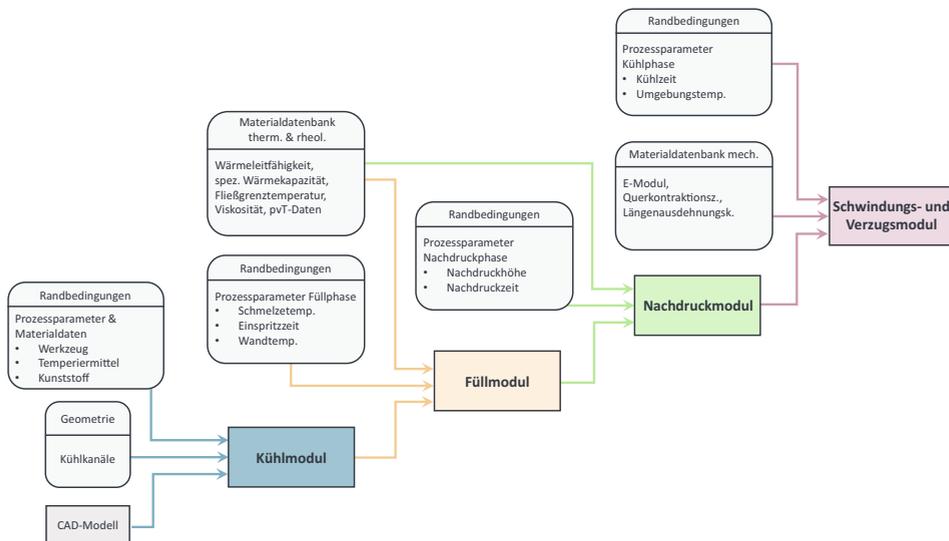


Bild 1.36 Ablauf einer Spritzgießsimulation

Literatur

- [1] HOPMANN, C., MICHAELI, W., H.R. GREIFELD, H.R., EHRIG, F., H. GREIF, H.: Technologie des Spritzgießens. Lern- und Arbeitsbuch. 4., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2017. ISBN 9783446450424
- [2] JOHANNABER, F., MICHAELI, W.: Handbuch Spritzgießen. 2. Aufl. München: Hanser, 2004. ISBN 9783446229663
- [3] SIMCON. CADMOULD Unwarp [online]. Werkzeugvorhaltung, Export von verzogener Geometrie und Schnittstellen zu Messtechnik-Software. Verfügbar unter: www.simcon.com/de/cadmould/unwarp-werkzeugvorhaltung
- [4] SIMCON. VARIMOS – Software zur Optimierung des Spritzgießens [online]. Automatisiert Designalternativen anlegen, simulieren und auswerten. Verfügbar unter: <https://www.simcon.com/de/varimos-spritzgiessen-doe>
- [5] KRETZSCHMAR, O.: Rechnerunterstützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mit segmentbezogenen Berechnungsverfahren. Dissertation. Aachen, 1985.
- [6] MÖNNICH, S.: Entwicklung einer Methodik zur Parameteridentifikation für Orientierungsmodelle in Spritzgießsimulationen. Dissertation. Magdeburg, 2015
- [7] CORETECH SYSTEM CO. LTD. Moldex 3D [Software], 2014
- [8] AUTODESK. Simulation Moldflow Insight [Software], 2013
- [9] SIMCON. Cadmould User Manual [online]. Verfügbar unter: www.simcon.com/de/schulungen

2

Rheologische Grundlagen

Grundsätzlich kann bei Kunststoffschmelzen von einer laminaren Schichtenströmung ausgegangen werden. Die Grenze zwischen einer laminaren Schichtenströmung und einer turbulenten Strömung wird durch die Reynoldszahl definiert. Für eine Reynoldszahl kleiner 2300 liegt eine laminare Strömung vor. Ist der Wert größer als 2300, muss von einer turbulenten Strömung ausgegangen werden.

Die Reynoldszahl wird wie folgt berechnet (Formel 2.1):

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (2.1)$$

Dabei ist:

\bar{v} : mittlere Strömungsgeschwindigkeit

D : Rohrdurchmesser

ν : kinematische Viskosität

ρ : Dichte

η : dynamische Zähigkeit, d. h. Viskosität

Damit beschreibt die Reynoldszahl das Verhältnis:

$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}}$$

Setzt man in die obige Gleichung reale Werte für die Verarbeitungsprozesse von Kunststoffschmelzen ein, so stellt man schnell fest, dass die Reynoldszahl wesentlich kleiner als 2300 ist. Infolgedessen kann bei Kunststoffschmelzen immer von einer laminaren Schichtenströmung ausgegangen werden, da die Zähigkeitskräfte aufgrund der hohen Viskosität überwiegen.

Des Weiteren wird bei den Strömungsvorgängen von Kunststoffschmelzen von Wandhaftung ausgegangen. Betrachtet man eine Druckströmung, so haftet die Flüssigkeit, die sich zwischen zwei ruhenden Platten befindet an den beiden Platten. Es bildet sich unter Annahme des *newtonschen* Fließverhaltens ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil zwischen den beiden Platten aus. Es gilt für *newtonsche* Medien (Formel 2.2):

$$v(y) = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot \left(\frac{H^2}{8} - \frac{y^2}{2} \right) \quad (2.2)$$

Diese Gleichung besagt, dass der Geschwindigkeitsverlauf die Form einer quadratischen Parabel hat (Bild 2.1).

In der Mitte des Strömungskanal liegt die Maximalgeschwindigkeit $v(y=0) = v_{max}$ vor, während bedingt durch die Wandhaftung die Geschwindigkeit an der Kanalwandung oben und unten gleich Null ist $v(y = h/2) = 0$. Zwischen diesen Punkten ändert sich die Geschwindigkeit und damit auch die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. An der Kanalwandung ist diese Änderung maximal, infolgedessen liegt hier die maximale Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_{max}$ vor, während in der Kanalmitte die Schergeschwindigkeit gleich Null ist. Zwischen diesen Punkten muss der Verlauf der Schergeschwindigkeit als Ableitung der quadratischen Parabel bei einer *newtonschen* Flüssigkeit linear verlaufen.

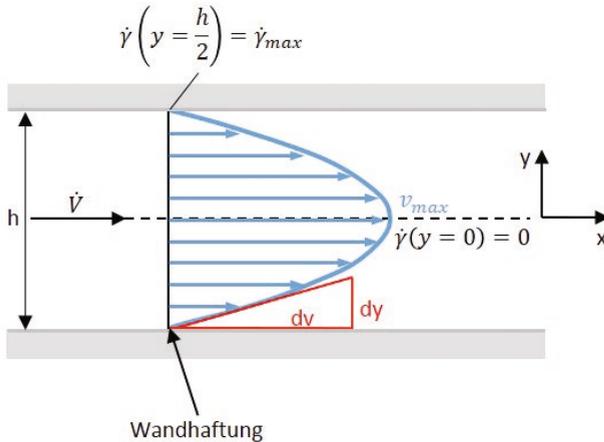


Bild 2.1 Geschwindigkeitsverlauf einer Schlitzzströmung (Druckströmung)

Für eine Rohrströmung erhält man unter Berücksichtigung des *newtonschen* Reibungsgesetzes bei der Herleitung Formel 2.3 für den Geschwindigkeitsverlauf. Auch hier handelt es sich wieder um die Form einer quadratischen Parabel.

$$v_z(r) = \frac{R^2 \Delta p}{4\eta L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

Dies gilt jedoch nur für *newtonsche* Flüssigkeiten, da bei der Herleitung der obigen Gleichung das *newtonsche* Reibungsgesetz verwendet wurde. Bei strukturviskosen Flüssigkeiten wird sich die Form des Geschwindigkeitsverlaufs als Funktion der Strukturviskosität (m) ändern. Bei der Herleitung des Geschwindigkeitsverlaufs für Kunststoffschmelzen verwendet man dann nicht das *newtonsche* Reibungs-

gesetz, sondern ein Stoffgesetz (Potenz-Ansatz, Carreau-Ansatz oder Cross-Ansatz), welches die Strukturviskosität der Kunststoffschmelze berücksichtigt [1, 2].

Formel 2.4 verdeutlicht dies für eine Rohrströmung. Im nachfolgenden Fall wird die örtliche Geschwindigkeit $[v(r)]$ auf die Maximalgeschwindigkeit (Formel 2.5) bezogen. Es gilt dann:

$$\frac{v(r)}{v_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{m+1} \quad (2.4)$$

Mit:

$$v_{max} = \dot{\phi} \cdot \frac{2}{m+1} \cdot \left(\frac{R}{2}\right)^{m+1} \cdot \left(\frac{\Delta p}{L}\right)^m \quad (2.5)$$

Bild 2.2 zeigt normierte Geschwindigkeitsverläufe als Funktion des Fließexponenten m , welcher ein Maß für die Strukturviskosität des Kunststoffes ist. Für $m = 1$ verhält sich der Stoff *newtonsch*, je strukturviskoser der Stoff ist, desto größer wird m . Für Kunststoffschmelzen gilt $1 < m < 4$. Je strukturviskoser der Kunststoff strömt, d.h. je stärker die Viskosität von der Schergeschwindigkeit abhängig ist, desto stumpfer wird das Geschwindigkeitsprofil. D.h. die Maximalgeschwindigkeit in der Kanalmitte nimmt ab und der Geschwindigkeitsgradient (Schergeschwindigkeit) an der Kanalwandung nimmt zu.

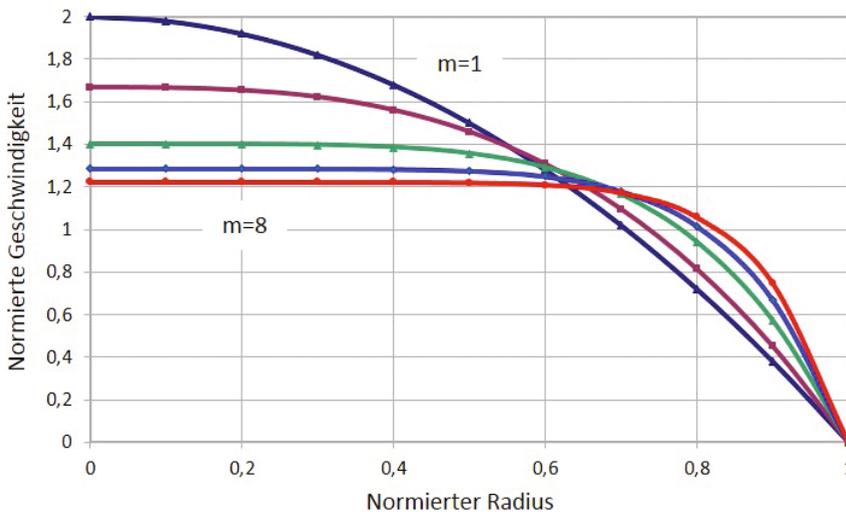


Bild 2.2 Normierte Geschwindigkeit als Funktion des normierten Rohrradius

Da bei strukturviskosen Stoffen der Geschwindigkeitsverlauf eine Funktion der Strukturviskosität ist, wird sich auch der Verlauf der Schergeschwindigkeit als Funktion von m ändern. Die Gleichungen für die Beschreibung der Schergeschwin-