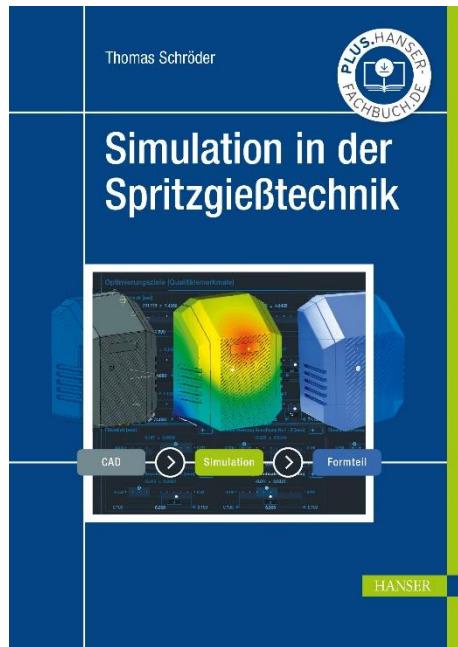


# HANSER



## Leseprobe

zu

# Simulation in der Spritzgießtechnik

von Thomas Schröder

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446465800>  
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>XV</b>
<b>Geleitwort</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Der Autor</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1 Grundlagen des Spritzgießprozesses</b> .....	<b>1</b>
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 Formteilverfehler 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	Spannungsrißbildung, 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 Ppropfen . . . . .	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
<b>2</b>	<b>Rheologische Grundlagen</b> . . . . .	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>Einführung in die Simulationstechnik</b> . . . . .	<b>59</b>
3.1	Grundlagen vereinfachter Spritzgießsimulation . . . . .	60
3.2	Grundlagen der erweiterten Spritzgießsimulation . . . . .	61
3.2.1	Unsicherheiten im Simulationsergebnis . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b> . . . . .	<b>67</b>
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

<b>5</b>	<b>Vernetzungsarten, Vernetzungsfehler und Vernetzungsqualität</b>	<b>73</b>
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
<b>6</b>	<b>Materialkarten der Simulationsprogramme</b>	<b>95</b>
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
<b>7</b>	<b>Einfache Grundlagenübungen für die Simulation von Spritzgießvorgängen</b>	<b>115</b>
7.1	Vergleich von Angussystemen im Hinblick auf den Druckbedarf	115
7.2	Fließweg-Wanddicken-Diagramme	122
7.3	Ermittlung des optimalen Prozessfensters beim Spritzgießen	127
7.4	Platte mit Durchbruch – Füllverhalten	132

7.4.1	Platte mit Durchbruch ohne Dünnstelle . . . . .	133
7.4.2	Platte mit Durchbruch und anschnittnaher Dünnstelle von 2 mm . . . . .	134
7.4.3	Platte mit Durchbruch und anschnittnaher Dünnstelle von 1,2 mm . . . . .	138
7.4.4	Platte mit Durchbruch und anschnittferner Dünnstelle von 1,2 mm . . . . .	141
7.5	Platte mit quer angestromten 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
<b>8</b>	<b>Simulation des Formteilbildungsprozesses im Spritzgießwerkzeug . . . . .</b>	<b>169</b>
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
<b>9</b>	<b>Angusssysteme beim Spritzgießen . . . . .</b>	<b>183</b>
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 Mehrfachkavitätenwerkzeugen . . . . .	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 Espresso-Becher 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 Nadelverschluss-System .....	286
<b>10</b>	<b>Temperiersysteme eines Spritzgießwerkzeugs .....</b>	<b>289</b>
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 Beispieldetailen .....	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
<b>11</b>	<b>Bindenähte und Fließlinien .....</b>	<b>413</b>
11.1	Entstehung von Bindenähten und Fließlinien .....	414
11.2	Einflussgrößen auf die Bindenähtqualität .....	419
11.3	Auswirkungen der Bindenäht 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
<b>12</b>	<b>Mechanische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen</b> .....	<b>449</b>
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
<b>13</b>	<b>Simulation von Einlegeteilen</b> .....	<b>467</b>
13.1	Einfaches Grundbeispiel einer Simulation .....	467
13.2	Simulation eines hinterspritzten Einlegers aus Guss .....	474
<b>14</b>	<b>Simulation von Kernversatz</b> .....	<b>477</b>
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
<b>15</b>	<b>Integrative Simulation – Strukturanalyse</b> .....	<b>499</b>
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 Bindenahrt .....	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
<b>16</b>	<b>Sensorik beim Spritzgießen .....</b>	<b>547</b>
16.1	Simulation der Forminnendruckkurve anhand des Schäfer-Kästchen-Werkzeugs .....	550
16.2	Simulation des Werkzeuginnendrucks und des spezifischen Schmelzedrucks anhand der Fließspirale .....	553
16.3	Prozessregelung mittels Sensorik .....	557
<b>17</b>	<b>Prozessoptimierung mittels statistischer Versuchsplanung [Design of Experiments (DoE)] .....</b>	<b>561</b>
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 teilstatistischen Versuchsplan mit Varimos . . . . .	588
17.3.4	Analyse des statistischen Versuchsplans/Optimierung . . . . .	590
17.3.5	Gewichtung und Reduzierung der Qualitätsmerkmale . . . . .	595
<b>18</b>	<b>Sonderverfahren des Spritzgießens . . . . .</b>	<b>599</b>
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
<b>19</b>	<b>Vernetzende Formmassen . . . . .</b>	<b>625</b>
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
<b>20</b>	<b>Vernetzungsfreundliche Optimierung von CAD-Modellen mit CATIA V5 . . . . .</b>	<b>647</b>
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
<b>Index</b>	.....	<b>737</b>

# Vorwort

Computerunterstützte Simulationsprogramme sind im Bereich Spritzgießen mittlerweile etablierte Hilfsmittel bei der Formteil- und Werkzeugauslegung. Sie unterstützen den Konstrukteur frühzeitig bei der Formteilentwicklung und der Auslegung des Werkzeugs und reduzieren damit die oftmals aufwändigen Änderungsschleifen. Damit kann die Entwicklungszeit reduziert werden und die Entwicklungskosten lassen sich senken. Das Weiteren lassen sich die Formteile mit den Programmen qualitativ und der Spritzgießprozess im Hinblick auf Effizienz optimieren. Da die Programme sehr unterschiedliche und vielfältige Simulationen ermöglichen, ist der Umfang der erstellten Simulationsergebnisse dementsprechend groß. Die Schwierigkeit liegt in der Regel nicht in der Erstellung der Simulationsergebnisse, da die Programme alle sehr anwenderfreundlich sind. Die Schwierigkeit besteht vielmehr darin, die von den Programmen ausgegebenen Ergebnisse zu verstehen und zu interpretieren. Nur wenn das der Fall ist, ist der Anwender auch in der Lage, entsprechende Schlüsse aus dem Ergebnis zu ziehen und ggf. Maßnahmen zu 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](http://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 ikd 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 vielzähligen 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 vieler Bachelor- und Masterstudenten entstehen können. Insofern möchte ich mich zuallererst bei den vielen Absolventen, die ich in unterschiedlichen Themengebieten betreuen durfte, bedanken. Ich wünsche Ihnen für Ihren beruflichen Werdegang und auch privat

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

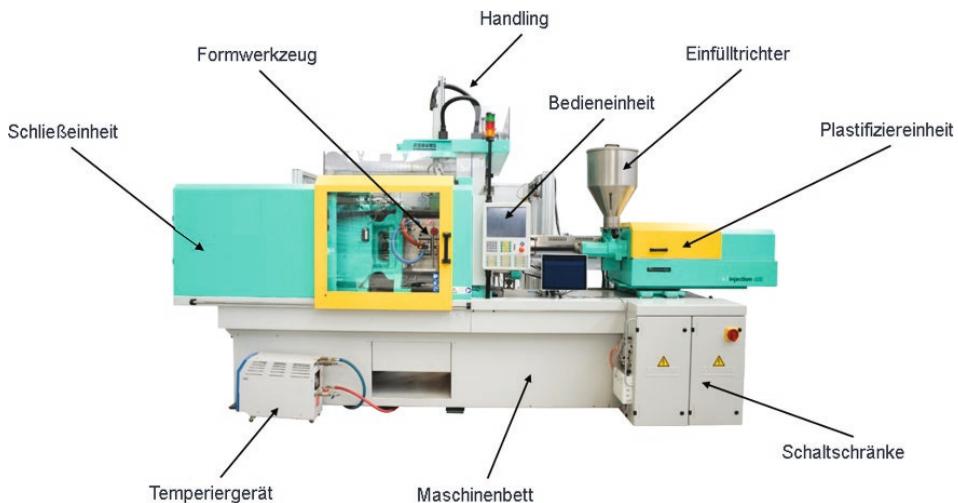
Des Weiteren gilt mein Dank der Firma Simcon, die mich mit den Softwaremodulen Cadmould und Varimos stets bestens unterstützt hat. Weiterhin möchte ich mich bei der Firma Mold and Hotrunner Technology MHT bedanken, die mich ebenfalls bei der Erstellung des Buches unterstützt hat.

# Grundlagen des Spritzgießprozesses

## ■ 1.1 Komponenten einer Spritzgießmaschine

Rund ein Drittel aller Kunststoffe werden im Spritzgießverfahren verarbeitet. Dieses Urformverfahren zählt zu den diskontinuierlichen Verarbeitungsverfahren. Für die Herstellung der Spritzgießformteile aus Thermoplasten, Elastomeren und Duromeren werden Spritzgießmaschinen eingesetzt. Diese Spritzgießmaschinen bestehen aus verschiedenen Baugruppen (Bild 1.1). Sie setzen sich aus dem Maschinenbett, der Plastifizier- und Einspritzeinheit, der Schließ- und Zuhalteeinheit, einer Temperierzvorrichtung, 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 Hauptbewegungssachsen (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 Zuhaltetekräfte. 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 Schneckenvorraum gefördert. Aus diesem Schneckenvorraum wird er im Anschluss in das geschlossene Werkzeug weitergeleitet. Die Steuerung wird zum Einstellen und Überwachen der Einstellparameter benötigt und die Temperierzvorrichtung dient zur Temperierung des Werkzeugs mit einer vorgegebenen Einstelltemperatur [1].



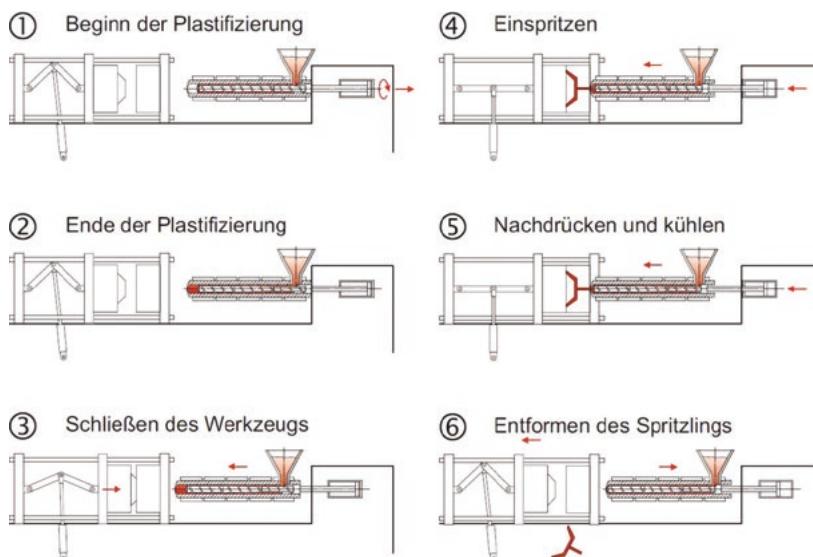
**Bild 1.1** Aufbau einer Spritzgießanlage

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

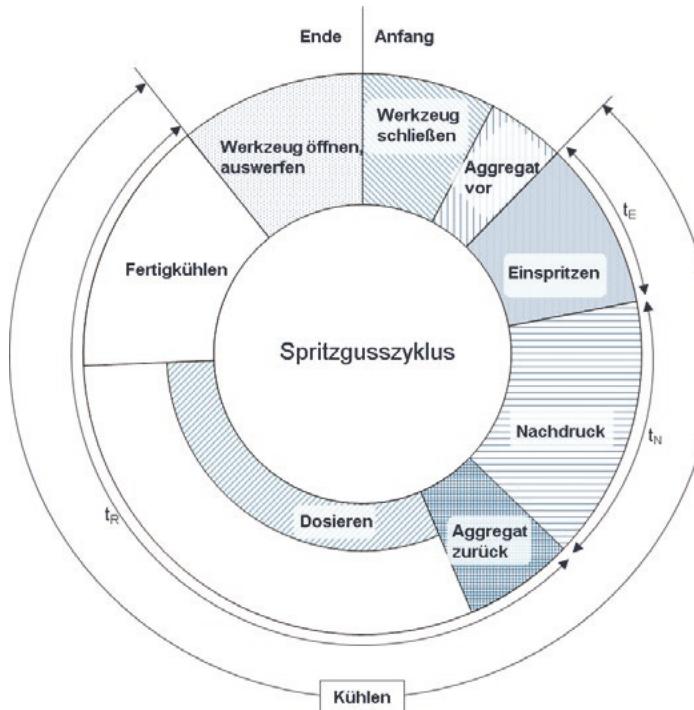
Der klassische Spritzgießzyklus läuft in fünf Schritten ab. Ein neuer Zyklus wird mit dem Schließen des Werkzeugs begonnen. Wenn das Werkzeug geschlossen und die Zuhaltkraft aufgebaut ist, wird die Plastifizier- und Einspritzeinheit nach vorne an das Werkzeug gefahren. Daraufhin wird das bereits aufgeschmolzene Kunststoffgranulat, d.h. die Schmelze durch einen axialen Vorschub der Schnecke geschwindigkeitsgeregt 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 Dosievorgang für den nächsten Zyklus, was bedeutet, dass der Schneckenvorraum 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 Auswerfern, 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

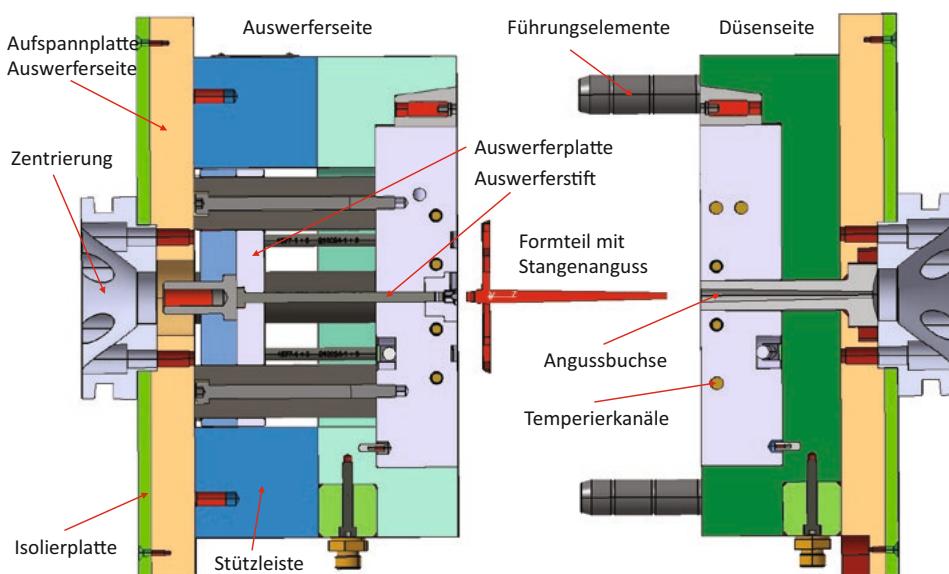
$t_{WZ \text{ auf/zu}}$  = Werkzeug öffnen und schließen

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 Bau teil 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 hat.

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 angetriebenen, 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 aufzspannen 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 Wärmetauscher. 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 Schnekkenspitze 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.

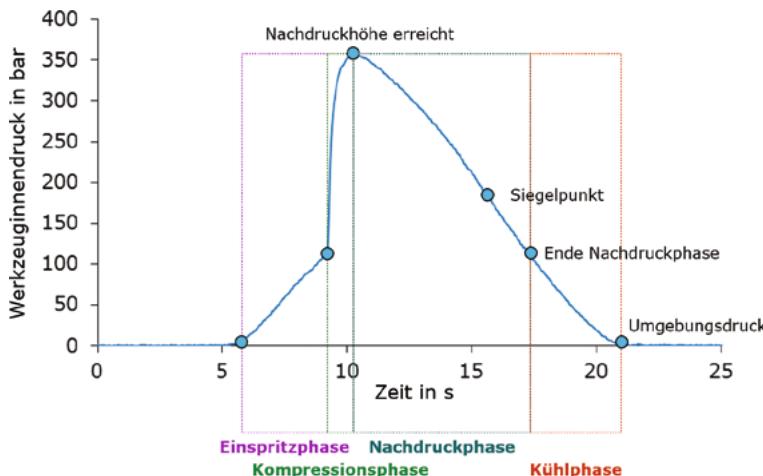
## ■ 1.4 Die Prozessphasen des Spritzgießprozesses – der Formteilbildungsprozess

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

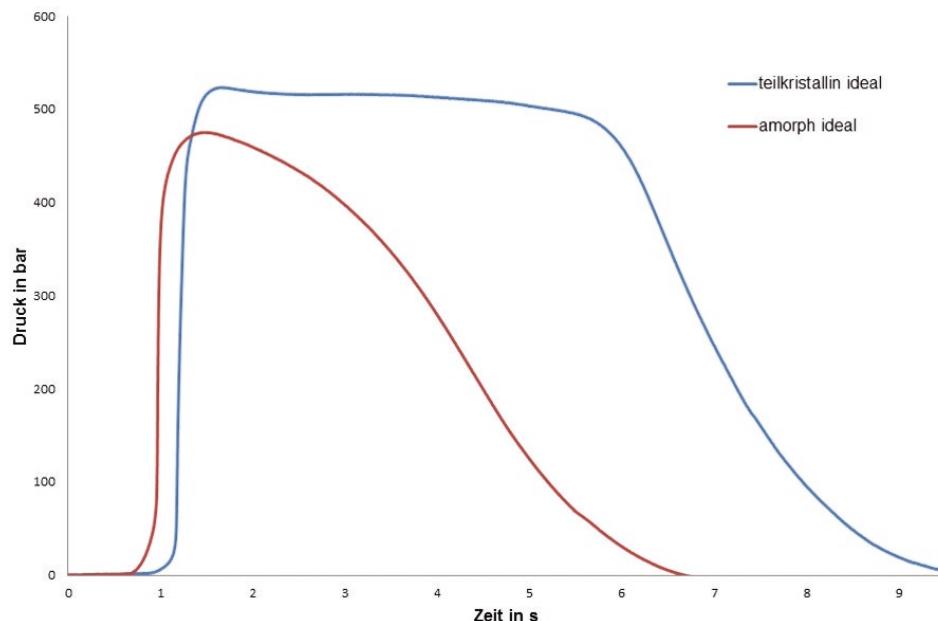
Auch an dieser Stelle sind computerunterstützte Simulationsprogramme sehr hilfreich. Mit diesen Programmen lassen sich Aussagen über den Formteilbildungsprozess (Druck, Fließfrontgeschwindigkeit, Scherung, Schubspannung, Temperatur etc.) tätigen. Da der Formteilbildungsprozess, wie Bild 1.5 zeigt, in 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 Einspritzeinheit aufbereitete flüssige Kunststoff durch den axialen Vorschub der Schnecke in das geschlossene Werkzeug eingespritzt. Dieser Vorgang erfolgt in der Regel geschwindigkeitsgeregt. Das bedeutet, dass die Spritzgießmaschine den zur Füllung notwendigen Spritzdruck (bis zu 2600 bar) zur Verfügung stellt. Insofern ist der rechtzeitige Umschaltpunkt, d.h. die Umschaltung von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase auf die druckgeregelte Nachdruckphase, von großer Bedeutung. Dieser Umschaltpunkt 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 Umschaltpunkt von der Einspritzphase auf die Nachdruckphase zum richtigen Zeitpunkt, so sieht der Forminnendruck wie in Bild 1.6 dargestellt aus.



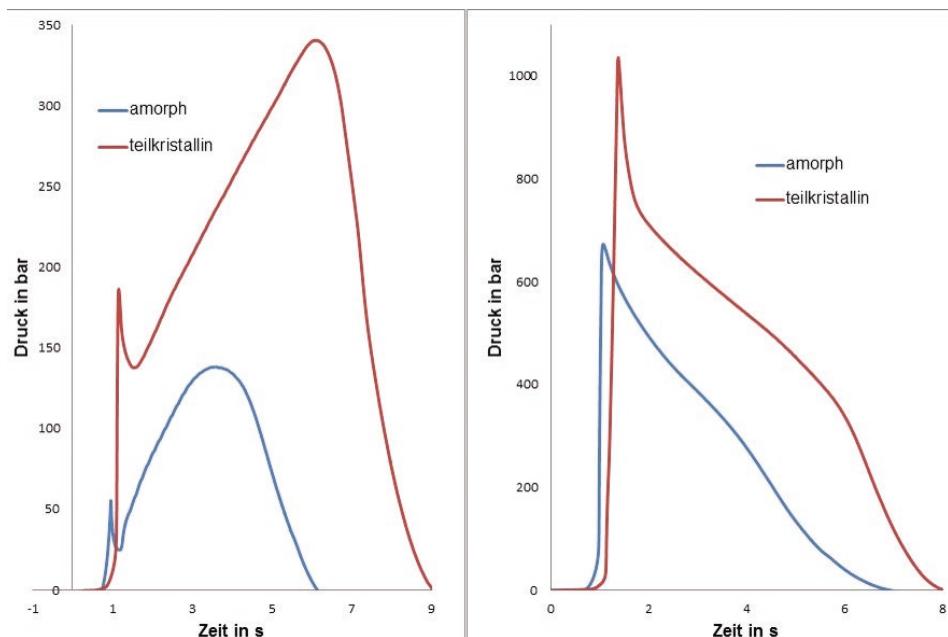
**Bild 1.6** Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei korrektem Umschaltpunkt

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 Umschaltpunkt von 98 – 99 % volumetrischer Füllung hinterlegt. Dieser Wert muss nicht zwingend der korrekte Punkt für den Umschaltvorgang sein. Gleichermaßen 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 Umschaltpunkt 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 Werkzeugtrennung 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 Nachfordern 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 Schneckenvorraum). 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 Schneckenvorraum, nicht kennen, müssen sie mit diesen Tabellenwerten rechnen. Diese gilt es unbedingt zu überprüfen und mit Werten aus der Praxis, d. h. Erfahrungswerten, abzulegen. Gleichermaßen gilt für die Nachdruck- und die Restkühlzeit.

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

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

### 1.4.4 Die Abkühlphase

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

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

## ■ 1.5 Formteilfehler 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 Kavitätsoberfläche beeinflusst (Bild 1.8). Eine mattreiche 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, Reflexion 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 Massestemperatur, 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

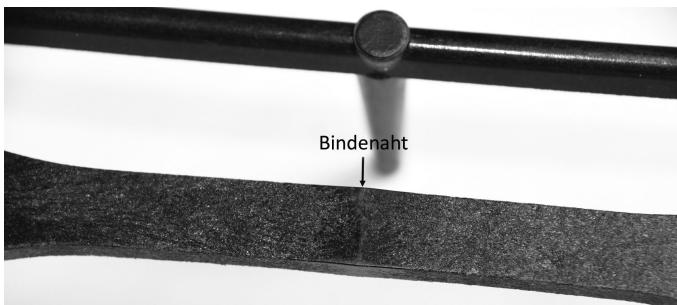
Lösungsvorschläge:

- 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 Umschaltpunkt 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 Bindenähre treffen zwei Schmelzefließfronten relativ stumpf aufeinander. Im Bereich der Bindenähre entsteht oftmals auf der Formteiloberfläche eine Kerbe. In den meisten Fällen sind auch ein Glanz- oder Farbunterschiede erkennbar. Vor allem bei transparenten oder dunklen Formteilen, deren Oberfläche poliert ist, oder Kunststoffen, die Effektpigmente oder Glasfasern enthalten, ist die Bindenähre besonders deutlich zu erkennen. Treffen die Schmelzefließfronten mit zu niedrigen Drücken und Temperaturen aufeinander, so bildet sich auf der Oberfläche in diesem Bereich eine Kerbe aus und die Schmelzefließfronten werden unzureichend miteinander verschweißt. Aus diesem Grund ist unter diesen Bedingungen mit

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



**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 Bindenahrt nicht ausreichend entweichen, so wird diese zusammengepresst, d. h. komprimiert, und es kommt u. U. zu einem Diesel-Effekt. In diesem Fall ist an dieser Stelle eine ausreichende Entlüftung vorzusehen. Der Einbau von weiteren Auswerfern oder von speziellen Einsätzen, beispielsweise Lamellenpakete, sowie eine Aufsplittung des Formeinsatzes in diverse kleinere Komponenten ermöglichen unter anderem Entlüftungen.
- Die Werkzeugtemperatur kann, unter Beachtung der empfohlenen Höchstgrenze, erhöht werden. Eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur hat immer eine Verlängerung der Zykluszeit zur Folge. Stand der Technik sind auch lokale Einsätze im Werkzeug, die sich temperieren lassen (Variotherme dynamische Temperierung siehe Kapitel 10). So kann der Bereich der Bindenahrt 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 Umschaltpunkt auf den Nachdruck kann bis zum Erreichen eines Füllgrades von ca. 98 % hinausgezögert werden und so zu einer Prozessoptimierung führen.

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

### 1.5.3 Deformation

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



**Bild 1.10**  
Deformation

Lösungsvorschläge:

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

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

#### 1.5.4 Verzug

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



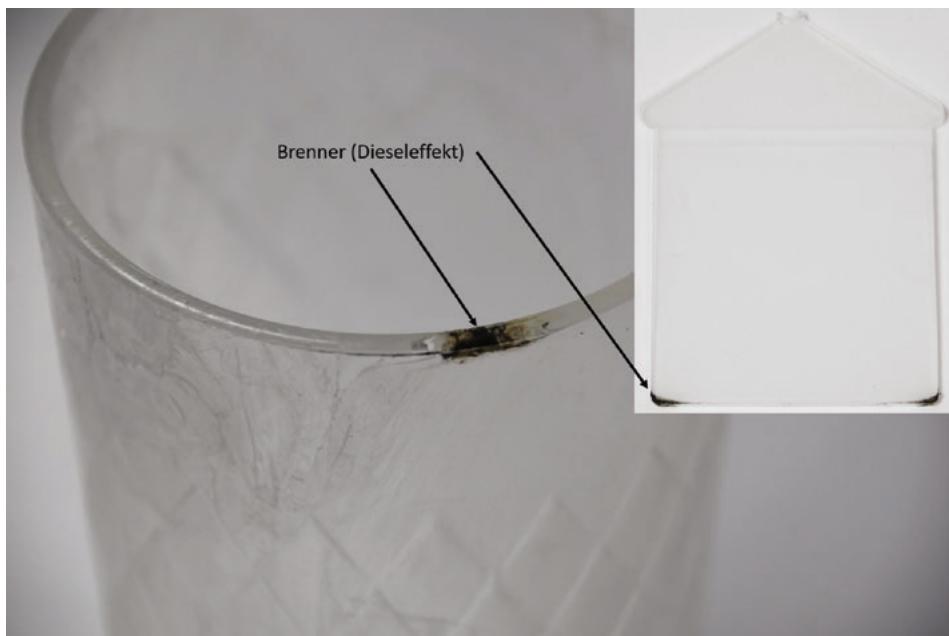
**Bild 1.11** Verzug

### Lösungsvorschläge:

- Das Formteil sollte an allen Stellen gleichmäßig abkühlen. Insofern ist die Werkzeugtemperierung zu prüfen.
- Die Volumenschwindung sollte in der Nachdruckphase ausreichend kompensiert werden. Insofern ist ein ausreichend hoher und langer Nachdruck zu wählen.
- Um Verzug zu vermeiden, kann die Einspritzgeschwindigkeit erhöht werden.
- Eine gleichmäßige Werkzeugfüllung sollte gewährleistet werden.
- Auch die Auswahl eines besser fließbaren Materials kann hilfreich sein.
- Bei der Auswahl des Materials kann eine Variante mit niedrigerem Schwindungswerten den Verzug reduzieren. Teilkristalline und ungefüllte Kunststoffe schwinden tendenziell mehr als gefüllte Kunststoffe und amorphe Formmassen.
- Mehrere Anschnitte verbessern die Nachdruckwirkung und reduzieren den Verzug.
- Verzug kann ebenfalls durch gleichmäßiges Verdichten der Masse über den Fließweg reduziert werden.
- Scharfe Kanten sollten vermieden werden.
- Bereiche, in denen Verzug vorwiegend vorkommt, sollten verstieft (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 vereinzelten 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)

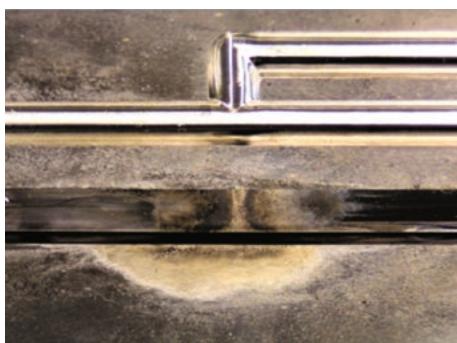
Lösungsvorschläge:

- 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 MasseTemperatur 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 gerackten Polymeren oder auch anderen Zersetzungsprodukten, wie beispielsweise Flammenschutzmitteln, 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 Schmelztemperatur 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 Schneckenendurchmessers  $D$ . Allgemein gilt  $D < s_D < 3D$ . Liegt der Dosierweg  $s_D$  unter dem Schneckenendurchmesser, 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 Massestemperatur 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, un dichte Stellen und Ablagerungen von Schmutz kontrolliert werden.

### 1.5.8 Auswerfermarkierungen

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



**Bild 1.15** Auswerfermarkierungen

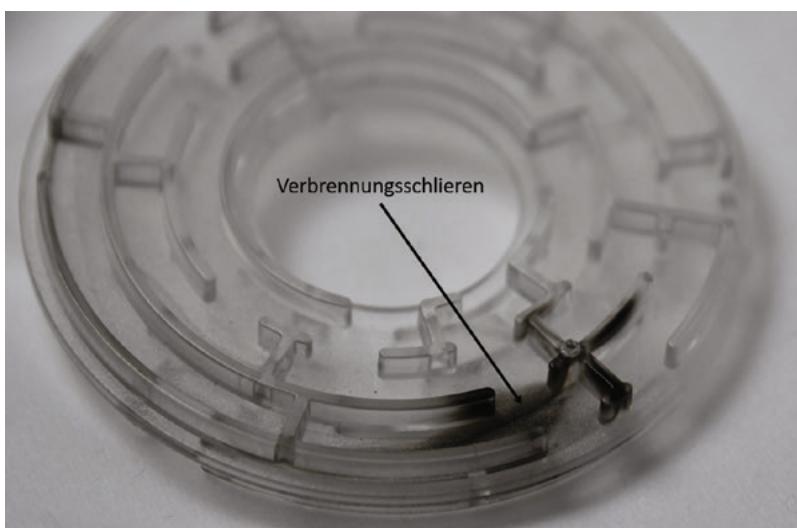
Lösungsvorschläge:

- 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 Antihaftbeschichtung 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 verstieft 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 Kunststoffs frei werden. Durch Zerscheren der Blasen an der Wandung des Formnests werden hellbraune oder silberne, aber auch auffällig dunkle Verfärbungen unregelmäßig auf der Oberfläche des Formteils oder begrenzt auf den Anschnittbereich sichtbar.

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



**Bild 1.16** Verbrennungsschlieren

Lösungsvorschläge:

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

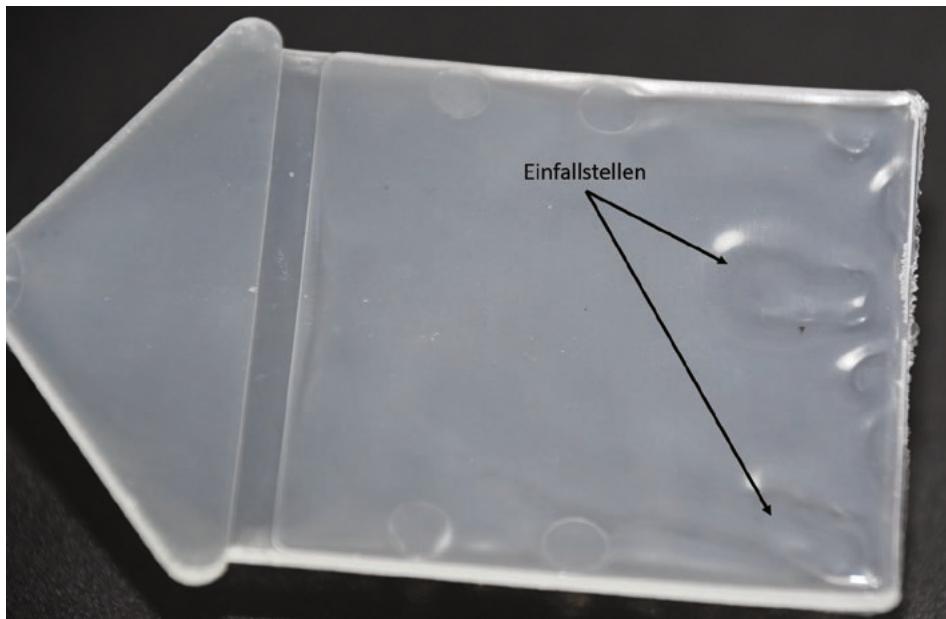
weg  $s_D$  unter dem Schneckendurchmesser, so ist die Verweilzeit der Schmelze in der Plastifiziereinheit auf jeden Fall zu lang.

- Mithilfe eines Einstichthermometers sollte beim Austreten aus der Maschinentdüse 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 Formteilinneren auf.

Oftmals entstehen Einfallstellen erst im Anschluss an die Entformung des Teils aus dem Werkzeug, da die bereits gekühlten Randschichten erneut durch das heiße Formteilinnere 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 Formteilgewicht 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/Ge- wicht, kleiner als 3 – 5 mm ist.
- Des Weiteren sollte die Funktionsfähigkeit der Rückstromsperre überprüft werden. Ein schwankendes Restmassepolster kann auf eine defekte Rückstrom- sperre hindeuten.
- Die Formteile sollten nach der Entformung einer weiteren Kühlung unterzogen werden.
- Einfallstellen werden von den Simulationsprogrammen visualisiert. Der Anwen- der 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 Werk- zeugs anliegen, kühlen zu weit ab. Dadurch kann eine vollflächige Anpressung an die Werkzeugwand trotz kontinuierlich steigendem Druck und dem Fortschreiten der Füllung nicht mehr gewährleistet werden und es entstehen Rillen über den kompletten Verlauf der Schmelzefront hinweg.

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



**Bild 1.18**  
Schallplatteneffekt

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.12 Unvollständige Werkzeugfüllung

Eine unvollständige Werkzeugfüllung kann dazu führen, dass das Formteil in Zonen mit dünner Wandstärke oder angussfernen Bereichen nicht komplett ausgefüllt ist (Bild 1.19). Ein zu geringer Dosierweg (Restmassepulster), mangelnder Druck, Rückströmungen in der Rückstromspur 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 Restmassepulster 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

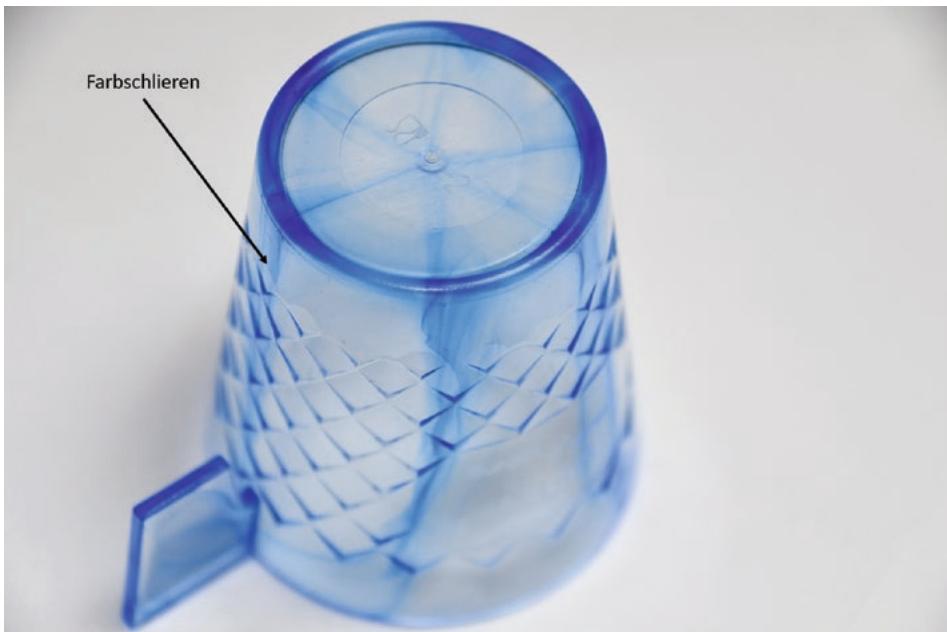
Fülldruck nicht so stark reduziert werden. Außerdem bewirkt eine Steigerung der Werkzeugtemperatur eine stärkere Verlängerung der Kühlzeit als die Erhöhung der Massetemperatur.

- 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 Formteilwand 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

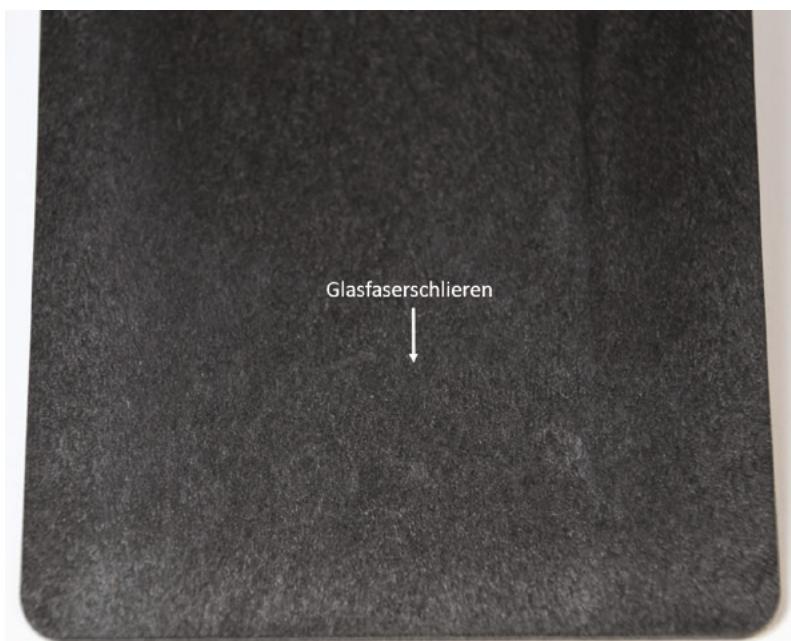
Lösungsvorschläge:

- 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 Schmelztemperatur 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 rauhe 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.



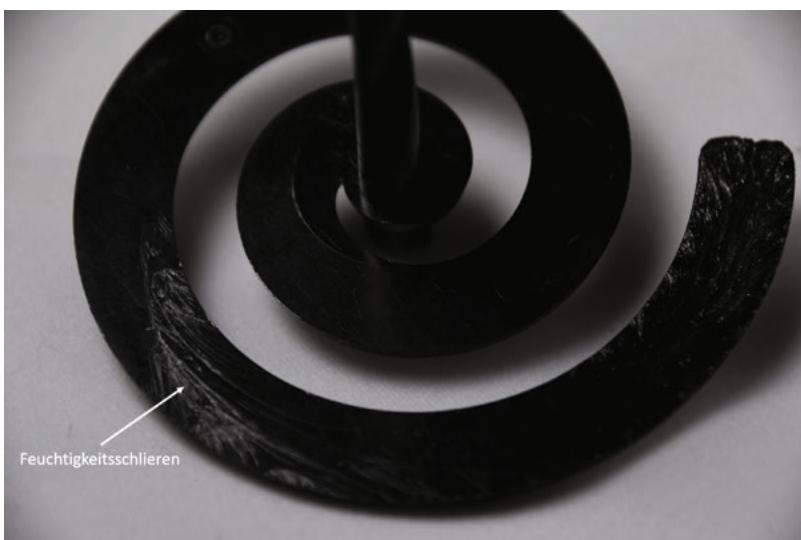
**Bild 1.21** Glasfaserschlieren

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 Be-achtung der Kühlzeit erhöht werden.
- Die Vorlaufgeschwindigkeit der Schnecke kann, wenn möglich durch ein ge-stuftes 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 Tempe-riersystem oder Kondenswasser. Die Schlieren sind aufgrund ihrer länglichen, pa-rabelähnlichen Form sehr auffällig. Jedoch ist zu beachten, dass sie immer mit ihrer Spitze in Richtung des Fließwegs zeigen. Die Feuchtigkeit verursacht deut-lich sichtbare Markierungen an der Formteiloberfläche, da sich in der Einspritz-pha-se Wasserdampfbläschen bilden, die dann an der Fließfront platzen und durch die Quellströmung an die Oberfläche gelangen. Infolgedessen führen die aufplat-zenden Wasser-/Gasblasen zu den langgezogenen Schlieren.



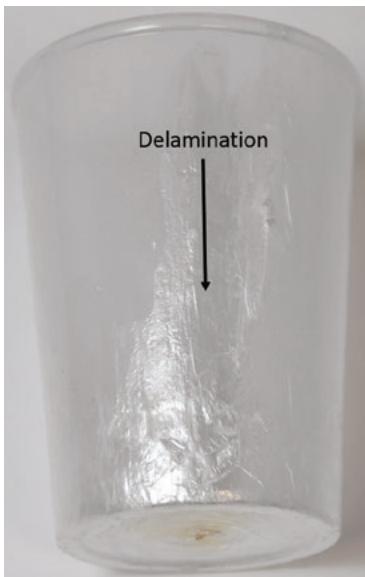
**Bild 1.22** Feuchtigkeitsschlieren

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. aufspleißt (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

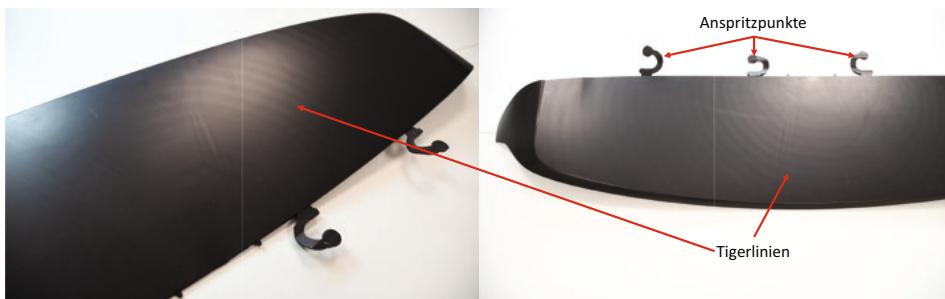
Lösungsvorschläge:

- 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 Anschliffs vermieden werden, da diese zu einer hohen Scherung des Materials führen. Auch sollten zu hohe Wandschubspannungen (siehe Kapitel 16) vermeiden 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 Kunststoffs für dieses Phänomen verantwortlich. Kunststoffe haben immer mehr oder weniger elastische Eigenschaften. Die elastische Komponente wirkt dabei wie eine Feder und verursacht das Pulsieren. Insbesondere wenn die Kunststoffschmelze unter Druck entlastet wird und unter diesem Zustand in das Werkzeug einströmt treten diese Phänomene auf (siehe Kapitel 9 Kaskadenspritzgießen).



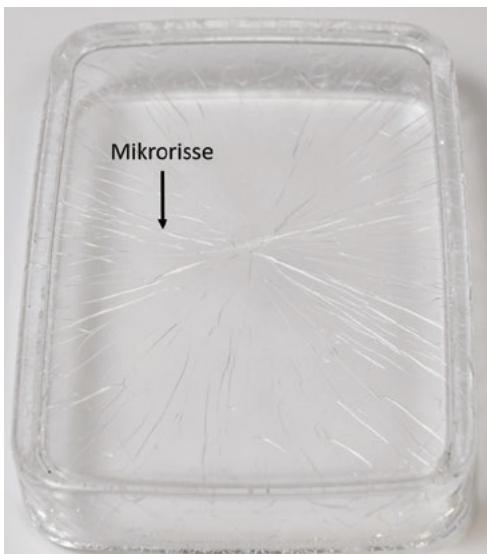
**Bild 1.24** Schubmarkierungen

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.18 Spannungsrißbildung, 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**  
Spannungsrißbildung, Mikrorisse

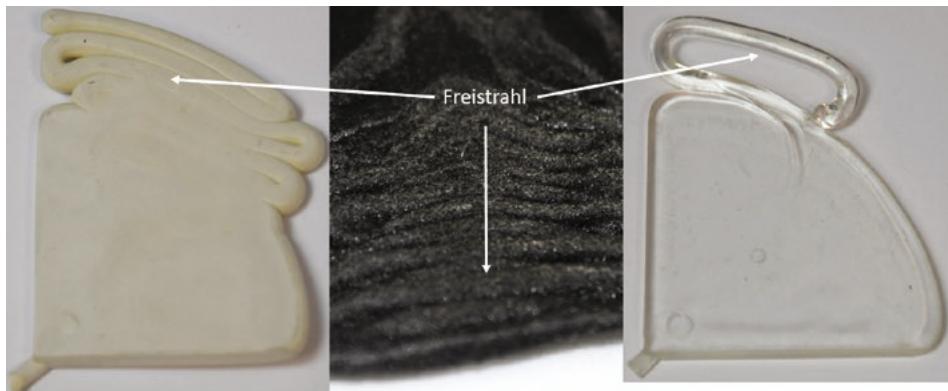
Lösungsvorschläge:

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

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

### 1.5.19 Freistrahlbildung

Bei diesem Formteilfehler bildet sich ein Strang an Kunststoffmasse vom Anschnitt als Ausgangspunkt schlangenförmig in der Kavität und sichtbar im Formteil aus (Bild 1.26). Normalerweise hat die Schmelze beim Quellfluss Kontakt mit der Wand beim Übergangspunkt in den großen Querschnitt. Wenn jedoch die Fließgeschwindigkeit zu hoch ist, trifft die Masse in Form eines Strahles in den noch ungefüllten Hohlraum. Dort wo der Freistahl 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 Freistahl 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 Freistrahlbildung zu vermindern, ist die Reduktion der Einspritzgeschwindigkeit.
- Bezüglich des Anschnitts ist es einerseits eine Option diesen zu vergrößern oder ihn alternativ in einen Bereich mit geringerem Fließquerschnitt zu verlegen.

# Index

## Symbolle

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

## A

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

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

## B

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

- Berechnungsdauer 714  
 Bestätigungsexperiment 567  
 Best-Fit 390, 393  
 Betriebspunktabhängigkeit 210  
 Bezugstemperatur 98  
 Biege- und Knickbelastung 541  
 Bilanzgleichungen 67  
 Bindenaht 13, 132, 437, 531, 533  
 - stagnierend 417  
 Bindenähte 235, 240, 245f., 248, 260, 269, 335, 383, 413  
 Bindenahtfaktor 428, 435  
 Bindenahtfestigkeit 420, 422f., 428, 433, 435f., 440  
 Bindenahtqualität 134, 140, 158, 160, 419f., 427, 442, 538  
 Bindenahttypen 416  
 Biot-Zahl 296  
 Black Specks 20  
 BLM-Methode 80  
 BLM-Netz 437  
 Bombierung 243  
 Booleschen Operationen 663  
 Boolescher Operatoren 729  
 Boundary Layer Mesh (BLM) 532  
 Bremseffekt 139  
 Brenner 18  
 Brinkmanzahl 171  
 Bruchspannung 435, 440, 442
- C**  
 Carreau-WLF-Ansatz 98, 512  
 Cauchy Spannungstensor 70  
 Computertomograph 519  
 Cross-WLF-Ansatz 556  
 Cross-WLF-Ansatzes 97
- D**  
 Darstellungsgenauigkeit 653  
 Dashboard 590, 595  
 Data Fitting 110  
 Datenaustausch 722  
 Datentransfer 651
- Datenvolumen 692  
 Dauerbeanspruchung 482  
 Deformation 15, 344, 348, 406f., 469  
 Degradation 233, 250f., 445  
 Dehndruckverluste 279  
 Dehngeschwindigkeit 502  
 Dehnströmung 504, 506f., 517  
 Dehnströmungen 279  
 Dehn- und Scherströmungen 601  
 Dehnviskosität 280, 608  
 Delamination 33, 630  
 Designelemente 720  
 Design of Experiments (DoE) 638  
 Detailbereiche 648  
 Detailgeometrien 649  
 Dickenmomentkoeffizienten 520  
 Diese auch als Design of Experiments (DoE) 561  
 Dieseleffekt 160, 164, 429  
 Diesel-Effekt 18, 426  
 Diskretisierung 50, 73, 78, 530, 606, 622  
 Dissipation 150, 444  
 DoE 631  
 DoE-Programm 582  
 DoE-Versuchsplan 595  
 Dreieck-Seitenverhältnis 91  
 Dreiplattenwerkzeug 187  
 Druckbedarf 204, 224, 230f., 246, 251, 263, 633  
 Druckgradient 468, 470  
 Druckgradienten 480, 490, 493  
 Druckregelung 275  
 Druckschwankungen 258f., 268  
 Drucksensoren 627  
 Druckverbraucher 191  
 Druckverlauf 618  
 Druckverlust 115, 119, 199f., 206f., 211, 217, 253, 255, 285  
 Dual Domain 76  
 dunkle Punkte 20  
 Dünnstelle 132, 134, 136, 149, 158  
 - angussfern 144  
 - anschnittfern 143  
 - anschnittnah 138

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

## E

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

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

## F

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

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

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

## H

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

## I

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

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

## K

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

Kristallitschmelzebereich 131

Kugelmethode 83

Kühlkanäle 5

Kühlmedium 5

Kühlmitteltemperatur 362

Kühlmodul 69

Kühlsystem 334

Kühlung 350

- konturnahe 346

Kühlzeitgleichungen 181, 299

Kupferlegierungen 324, 346, 366

Kupferstiften 366, 370

Kurvenabschnitt 686

## L

Lagrangesche Betrachtungsweise 514

laminaren Schichtenströmung 502

laminare Schichtenströmung 57

Längenausdehnungskoeffizienten 107

Langglasfasern 350, 434, 543

Laplace-Gleichung 69

Laserschmelzen 381

Lebensmittelfreigabe 606

Liquid Silicon Rubber (LSR) 625

LSR-Spritzguss 629

Lufteinschluss 41, 160f., 164, 472, 633f.

Lunker 38, 315, 409

## M

Makromoleküle 420

Manifold Edge 89

Mapping 436, 438, 461, 536

Mappingprogramm 501, 523, 527, 542

Maschinenparameter 563

Masseanhäufung 337, 340, 409

Maßhelligkeit 548

Materialbelastung 127

Materialgesetz 68

Materialgesetze 536

Materialkart 233

Materialkarte 175, 177f., 502, 525, 542,

555, 631

- mechanisch 107

- rheologisch 97

- thermisch 100

Materialkarten 62, 95

Materialkennwerte 500

Materialmodell 440, 527, 530

- linear-elastische 439

Matrix 499

Matrixbruch 431

Matrixexperiment 565, 569

Matrix-Gleichungssystem 72

mechanische Eigenschaften 477, 499

mechanischen Auslegung 501

mechanischen Berechnung 461

mechanischen Eigenschaften 418, 432,

440, 483, 494, 498, 500, 525, 542

mechanische Werkzeugauslegung 453

Mehrfachanspritzung 234f., 244

Mehrfachkavitätenwerkzeug 197

Melt Volume Rate 423

Midplane 75, 156

Mittelflächennetz 75

Mittelschicht 507, 540

Mittelwert 569

mittlere quadrierte Abweichung 571

Modellgleichung 566

Molekülverschlaufung 425

Morphologie 385

## N

Nachbarflächen 687

Nachdruck 2, 251, 325, 410, 614

Nachdruckhöhe 178

Nachdruckmodul 63

Nachdruckphase 4, 9, 11, 178, 549, 552, 618

Nachdruckwirkung 338, 550

Nachdruckzeit 169, 178

Nachschwindung 318, 320

Nadelverschluss 116, 189f.

Nadelverschlussdüse 245, 636

Nadelverschlusssystem 117, 233, 253, 613

Navier-Stokes 85

Navier-Stokes-Gleichungen 67

Netzdichte 73, 436

Netzfehler 89

Netzqualität 93

Newtonscche Reibungsgesetz 558

newtonsches Reibungsgesetz 54

Non-Manifold Edge 89

Normklima 389

Nukleierungsmittel 112

Nullpunkt 670, 722

Nullviskosität 97f.

Nusseltzahl 297

## O

Oberflächenmarkierungen 271

Oberflächenmodell 393

Oberflächenqualität 272, 548, 557

Optimierung 586, 645

Optimierungsziel 595

Optimierungsziele 590

optischen Abstandsmessung 387

Orientierung 421, 431, 501, 504ff., 517, 519, 539

Orientierungen 328, 334, 350, 414, 418, 501f.

Orientierungsdynamik 519

Orientierungsgrad 520

Orientierungstensor 63, 432, 508, 519

Originalgeometrie 649

orthogonale Felder 566

Ostwald und de Waele 512

## P

Parameter 583

Pareto-Diagramm 404

Part Design 672, 690, 736

Pfropfen 42

piezoelektrische Sensoren 547

Plastifiziereinheit 541

Platten

- mit Rippen 144

Plattendicke 455

Poisson-Gleichung 69

Polygonisieren 389

Positionierung 656, 668, 670

Positionierungsfehler 733

Post-Processor 61

Postprozessor 50

Potenzansatz 512

Prandtlzahl 297

Preprocessing 50

Pre-Processor 61

Produkteigenschaft 564

Produkteigenschaften 562

Produktentwicklung 49

Produktgestaltung 423

Prozessablauf 106, 316

Prozessdaten 96

Prozessführung

- variotherm und dynamisch 382

Prozessoptimierung 49, 559, 561

Prozessparameter 561, 563, 595

Prozessphasen 7, 547

Prozessregelung 559

pVT-Diagramm 106, 178, 549

pVT-Parameter 102

pVT Verhalten 555

pVT-Verhalten 64

## Q

Qualität 209, 289

Qualitätsmanagement 566

Qualitätsmerkmal 575, 577, 582, 590, 638

Qualitätsmerkmale 548, 559, 579, 586, 597, 631, 633

quasistationären Zustand 291

Quellfluss 424

Quellströmung 57, 79, 418, 435, 502, 509

Querkontraktion 107

Querschnittsprung 279

Querströmung 505

## R

Radien 696

Randeffekte 157

- Randomisierung 569  
 Randschicht 508, 510, 539, 626  
 Randschichten 87, 191, 437, 505  
 – eingefroren 125, 130, 157, 171  
 – eingefrorene 117  
 Rechenaufwand 649  
 Rechenzeit 86  
 Reduced Strain Closure (RSC-Model)  
 519  
 Regelgrößen 559  
 Renner-Ansatz 103  
 Restfeuchtigkeit 424  
 Restkühlzeit 3f., 169  
 Restspannungen 475  
 Restwanddicke 478, 608 ff.  
 Restwanddickenausbildung 608  
 Reynoldszahl 53, 301, 312  
 Robust Design 562, 568  
 Rücklauftemperatur 304, 346
- S**
- Sandwichaufbau 599  
 Sandwichspritzeßen 599  
 Schalenelementen 156  
 Schalenmodelle 87  
 Schallplatteneffekt 26  
 Schäumen 410  
 Schererwärmung 140, 497  
 Schergeschwindigkeit 54, 276, 283,  
 285, 502, 504, 513, 558  
 Scherrate 96, 206  
 Scherströmung 517  
 Scherung 216f.  
 Schichtgrenzprofil 601  
 Schieber 247  
 Schieberegler 580, 582, 590, 633  
 Schlieren 32, 383, 385  
 Schließkräfte 495  
 Schließungsformulierung 520  
 Schmelzebelastung 459  
 Schmelzedruck  
 – spezifisch 172, 174, 177f.  
 Schmelzefließfront 227f., 230  
 Schmelzetemperatur 251, 263
- Schriftzüge 703  
 Schubbelastungen 541  
 Schubmarkierungen 34  
 Schubspannung 96f., 136, 143, 150f.,  
 155, 206, 216, 443, 504  
 Schubspannungen 140, 609  
 Schubspannungsprofile 56  
 Schwachstelle 416  
 Schwimmhaut 39  
 Schwindung 314f., 320, 333f., 347,  
 407, 575, 584  
 Schwindungsart 320  
 Schwindungsdifferenz 322  
 Schwindungsdifferenzen 329, 337, 354  
 Schwindungskompensation 338  
 Schwindungsplatte 332  
 Schwindungsplatte Typ D2 326  
 Schwindungs- und Verzugsverhalten 387  
 Schwindungsunterschiede 333  
 Screening 566  
 Sensor 227, 242, 253, 257, 260, 266  
 Sensoren 226, 228, 550, 557, 644  
 Siegelpunkt 3, 11, 179, 550  
 Signal-Rausch-Verhältnis 569f.  
 Simulationsergebnis 65  
 Simulationsmodell 61  
 Simulationsprogramm 6, 46  
 Simulationsrechnung 46  
 – Ergebnisse 59  
 Six Sigma 566  
 Sollwert 591  
 Sonderverfahren 599  
 Spaltpunkte 424  
 Spannungs-Dehnungsdiagramm 439,  
 500, 502, 525f.  
 Spannungsrisse 36  
 Spannungsspitzen 458, 466  
 spezifischen Wärmekapazität 290  
 spezifische Schmelzedruck 556  
 spezifische Volumen 104  
 spezifische Wärmekapazität 100  
 Spritzgießmaschine 1  
 Spritzgießwerkzeug 5, 449  
 – Belastung 464  
 Spritzgießzyklus 2f.

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

## T

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

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

## U

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

## V

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

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

## W

- Wanddickensprünge 415  
 Wanddickenverteilung 497  
 Wandgleitens 627  
 Wandhaftung 57, 502 f., 627 f.  
 Wandschergeschwindigkeit 559  
 Wandschergeschwindigkeiten 557  
 Wandschubspannung 233, 558  
 Wandschubspannungen 557  
 Wandviskositäten 557  
 Wärmeabfuhr 346, 483  
 - inhomogen 296  
 Wärmeaustausch 299  
 Wärmebild 194  
 Wärmehaushalt 203  
 Wärmeleiteinsätzen 381

- wärmeleitfähige Werkzeugeinsätze 382  
Wärmeleitfähigkeit 100, 324, 477, 483, 494, 498  
Wärmeleitung 299  
Wärmestrom 323  
Wärmestrombilanz 289  
Wärmeübergangskoeffizient 296, 301  
Wärmleitfähigkeit 644  
Wasseraufnahme 442  
Wechselbelastungen 450  
Wechselwirkung 427f., 566, 573  
Wechselwirkungen 583  
Weißbruch 21  
Werkzeug 1  
Werkzeugauslegung  
– rheologisch 48  
Werkzeugbelag 19  
Werkzeugbelastung 455, 462  
Werkzeugdeformation 462  
Werkzeugdeformationen 478  
Werkzeugdimensionierung 45  
Werkzeugfüllung  
– unvollständig 28  
Werkzeuginnendruck 449, 553, 555  
Werkzeuginnendrucksensor 547, 553, 557  
Werkzeuginnendruckverlauf 547  
Werkzeugkühlung 342  
Werkzeugoberflächentemperatur 293  
Werkzeugschädigung 205  
Werkzeugtemperatur 303, 355, 360  
Werkzeugverformung 451, 461  
Williams, Landel und Ferry Ansatz 98  
Wirtschaftlichkeit 289, 380, 608
- Z**
- Zentraleinstellung 407  
Zentralstufe 587  
Zentrierung 492  
Zielgröße 561, 583  
Zugbeanspruchung 500f.  
Zugscherfestigkeit 475  
Zugspannung 526  
Zugversuch 500, 526, 531  
Zuhaltkraft 10, 204, 209, 449, 614, 618f.  
Zusammenfügen 677  
Zyklus 2  
Zykluszeit 3f., 386  
Zykluszeitoptimierung 636