

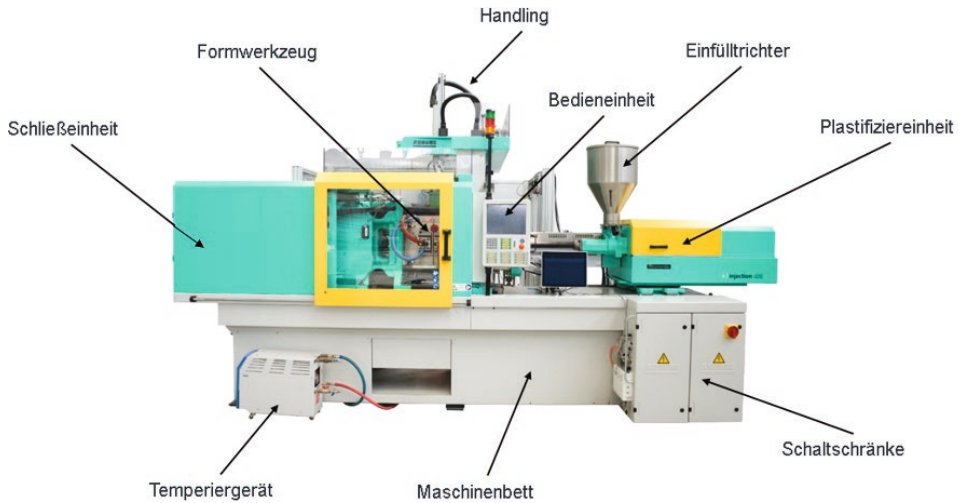
# 1

# Grundlagen des Spritzgießprozesses

## ■ 1.1 Komponenten einer Spritzgießmaschine

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

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



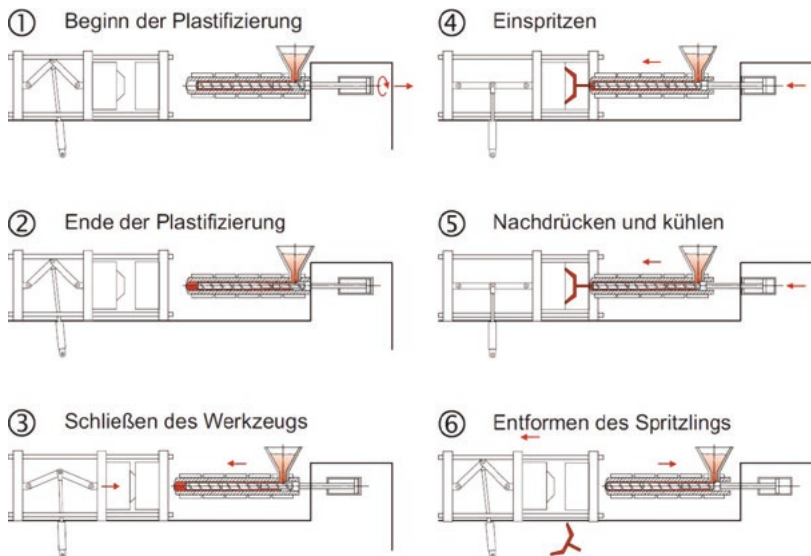
**Bild 1.1** Aufbau einer Spritzgießanlage

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

## ■ 1.2 Der Zyklusablauf beim Spritzgießen

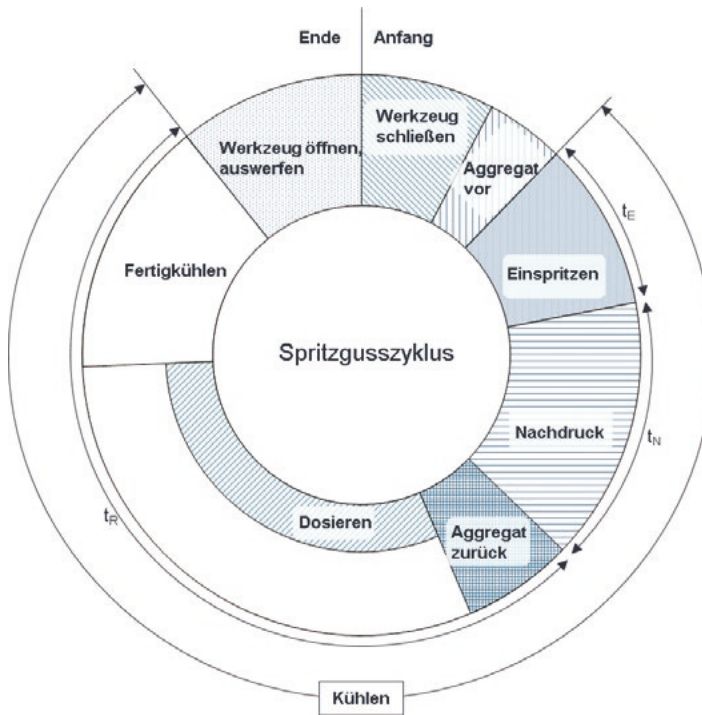
Der klassische Spritzgießzyklus läuft in fünf Schritten ab. Ein neuer Zyklus wird mit dem Schließen des Werkzeugs begonnen. Wenn das Werkzeug geschlossen und die Zuhaltkraft aufgebaut ist, wird die Plastifizier- und Einspritzeinheit nach vorne an das Werkzeug gefahren. Daraufhin wird das bereits aufgeschmolzene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

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



**Bild 1.2** Verfahrensablauf beim Spritzgießen [1]

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



**Bild 1.3** Spritzgießzyklus

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

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

Mit:

$t_z$  = Zykluszeit

$t_E$  = Einspritzzeit

$t_N$  = Nachdruckzeit

$t_{RK}$  = Restkühlzeit

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

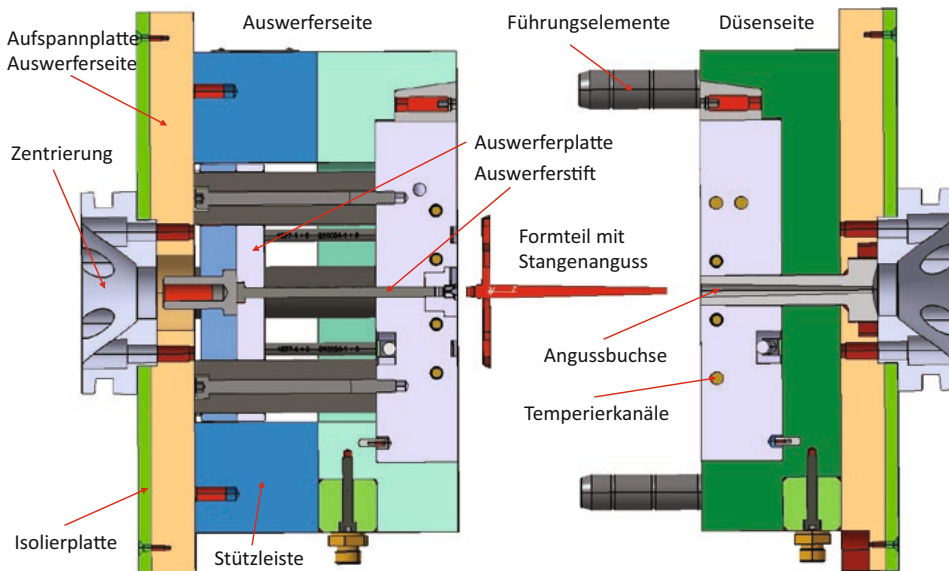
$t_{Wz\text{auf/zu}}$  = Werkzeug öffnen und schließen

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

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

## ■ 1.3 Das Spritzgießwerkzeug

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ■ 1.4 Die Prozessphasen des Spritzgießprozesses – der Formteilbildungsprozess

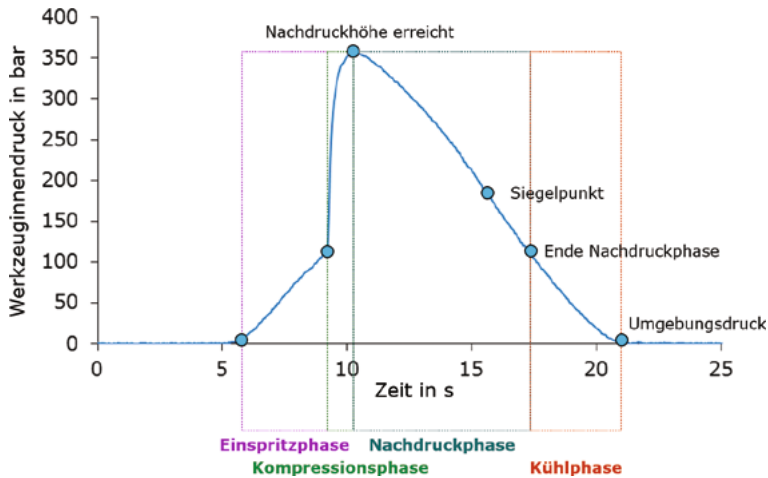
Grundsätzlich besteht der Formteilbildungsprozess beim Spritzgießen aus den drei Prozessphasen:

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

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

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





**Bild 1.5** Werkzeuginnendruckverlauf beim Spritzgießen

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

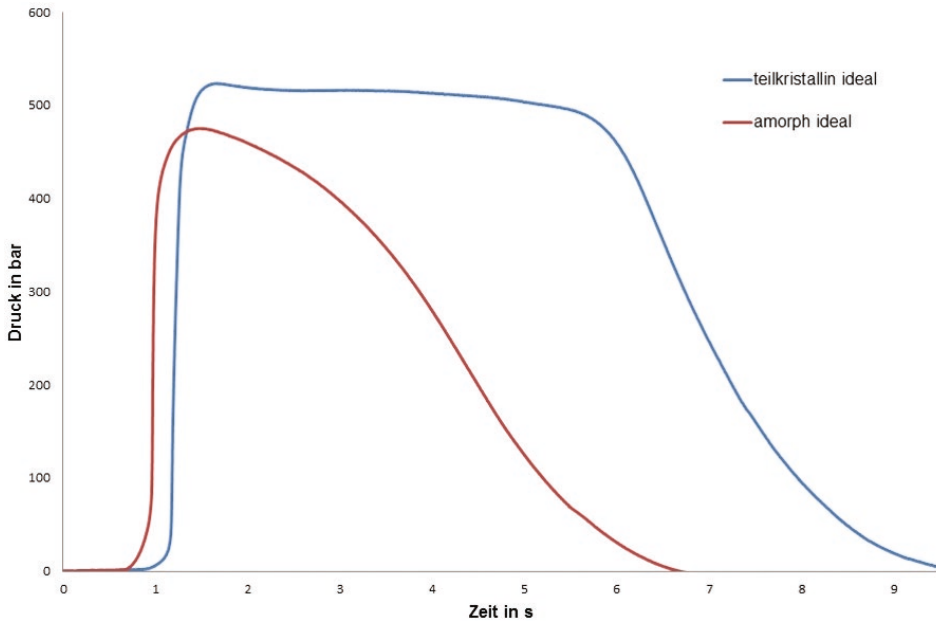
### 1.4.1 Die Einspritzphase

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

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



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



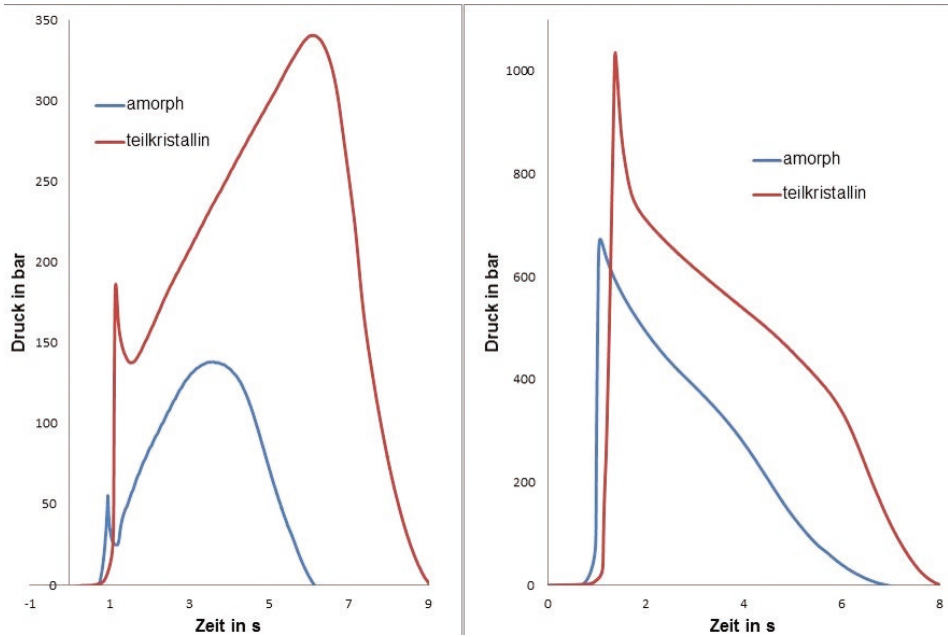
**Bild 1.6** Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei korrektem Umschaltzeitpunkt

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

### 1.4.2 Die Kompressionsphase

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

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



**Bild 1.7** Forminnendruckverlauf beim Spritzgießen bei nicht korrektem Umschaltpunkt

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

### 1.4.3 Die Nachdruckphase

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

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

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

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

### 1.4.4 Die Abkühlphase

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

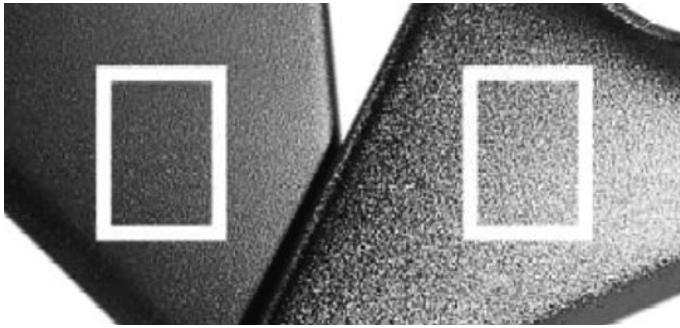
Kunststoffe Anwendung. In den Simulationsprogrammen ist hier ein fester Wert hinterlegt. Die Entformungstemperatur lässt sich auch aus dem Verlauf der 1 bar Linie im pVT-Diagramm ermitteln. Bei amorphen Kunststoffen liegt diese ca. 30 – 50 °C unter der Glasatemperatur (Knick der 1 bar Linie), während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

## ■ 1.5 Formteilefehler beim Spritzgießen

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

### 1.5.1 Glanzunterschiede

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



**Bild 1.8**  
Glanzunterschiede

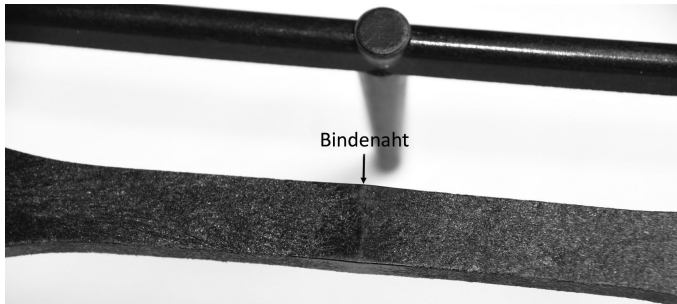
Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.2 Bindenähte

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

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



**Bild 1.9** Bindenähte

Lösungsvorschläge:

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

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

### 1.5.3 Deformation

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



**Bild 1.10**  
Deformation

Lösungsvorschläge:

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



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

### 1.5.4 Verzug

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



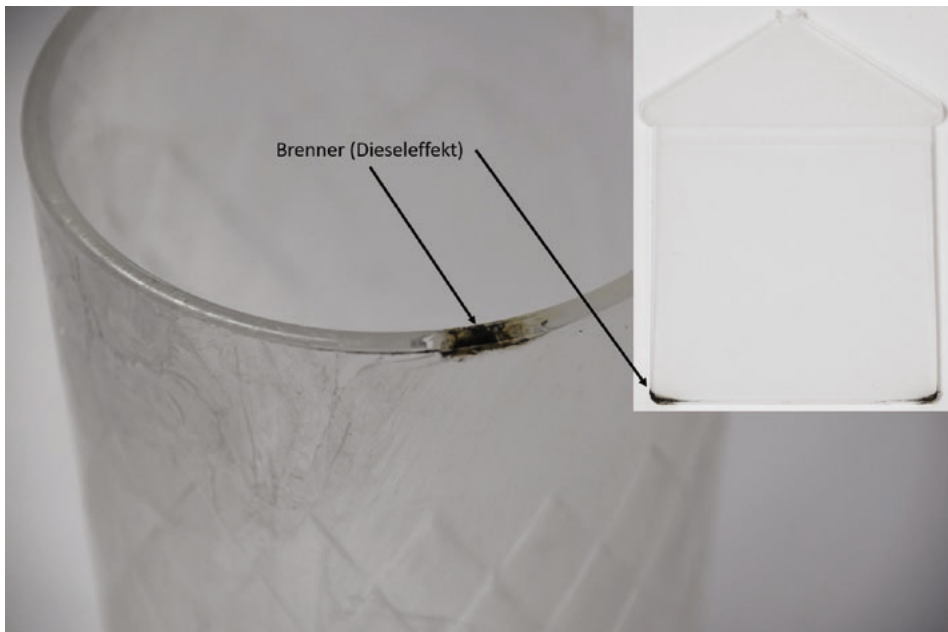
**Bild 1.11** Verzug

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.5 Diesel-Effekt (Brenner)

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



**Bild 1.12** Diesel-Effekt (Brenner)

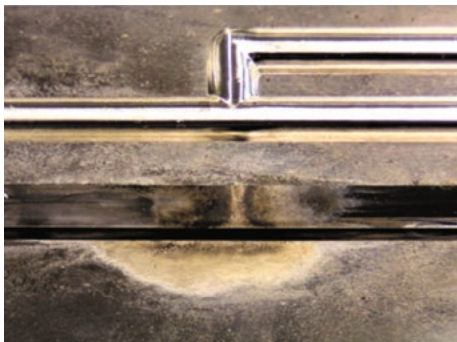
Lösungsvorschläge:

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

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

### 1.5.6 Werkzeugbelag (Formbelag)

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



**Bild 1.13**  
Werkzeugbelag

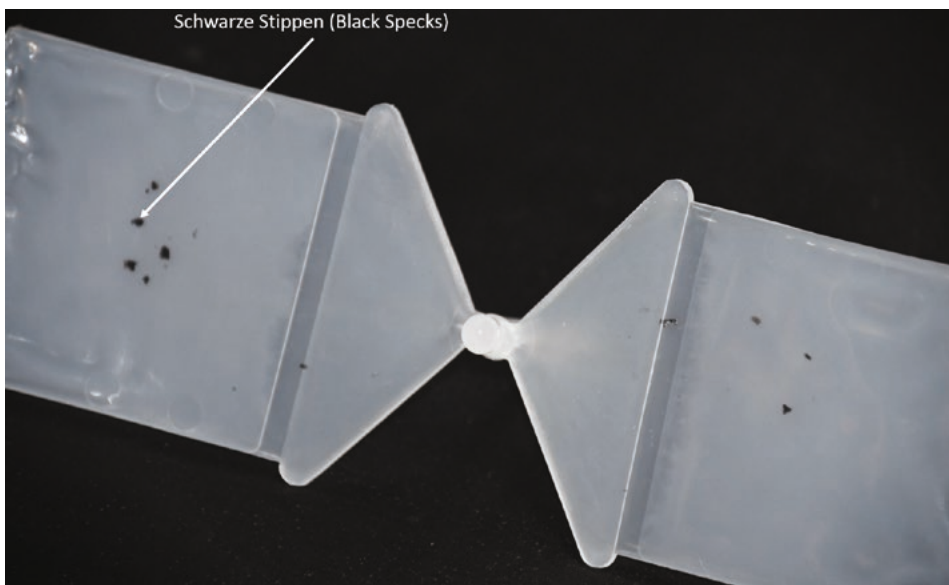
Lösungsvorschläge:

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

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

### 1.5.7 Dunkle Punkte (Black Specks)

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



**Bild 1.14** Dunkle Punkte (Black Specks)

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.8 Auswerfermarkierungen

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



**Bild 1.15** Auswerfermarkierungen

#### Lösungsvorschläge:

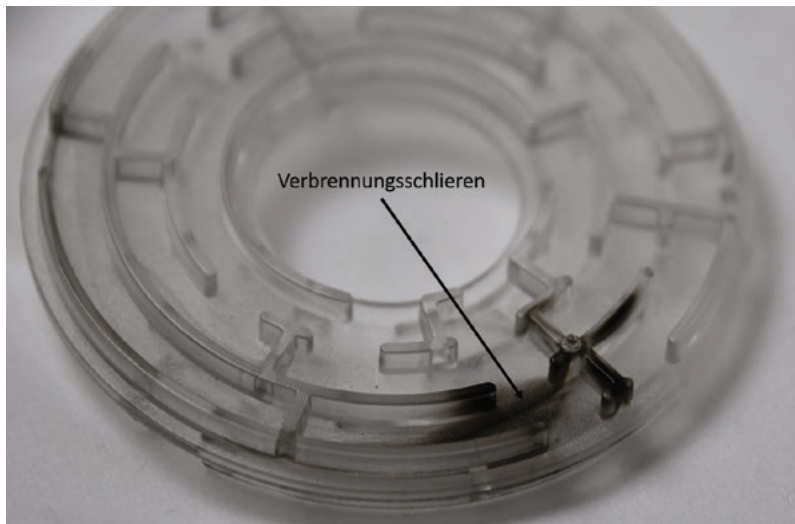
- Die Pausenzeit und/oder die Nachkühl- bzw. Restkühlzeit kann verlängert werden.
- Der Nachdruck sollte angepasst, d. h. in der Regel reduziert werden.
- Die Verarbeitungstemperaturen sollten reduziert werden.
- Die Kavität kann mit einer Gleit- oder Antihafbeschichtung ausgestattet werden.
- Schließen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



### 1.5.9 Verbrennungsschlieren

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

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



**Bild 1.16** Verbrennungsschlieren

Lösungsvorschläge:

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

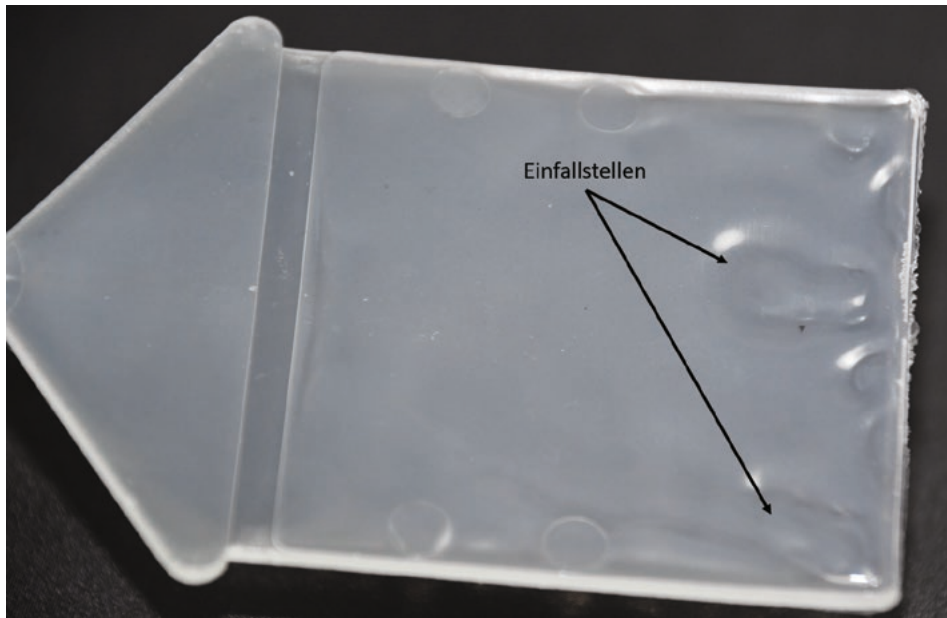
weg  $s_D$  unter dem Schneckendurchmesser, so ist die Verweilzeit der Schmelze in der Plastifiziereinheit auf jeden Fall zu lang.

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

### 1.5.10 Einfallstellen

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

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



**Bild 1.17** Einfallstellen

#### Lösungsvorschläge:

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

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

### 1.5.11 Schallplatteneffekt (Kaltfließlinien)

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

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



**Bild 1.18**  
Schallplatteneffekt

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.12 Unvollständige Werkzeugfüllung

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



**Bild 1.19** Unvollständige Werkzeugfüllung

Lösungsvorschläge:

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

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

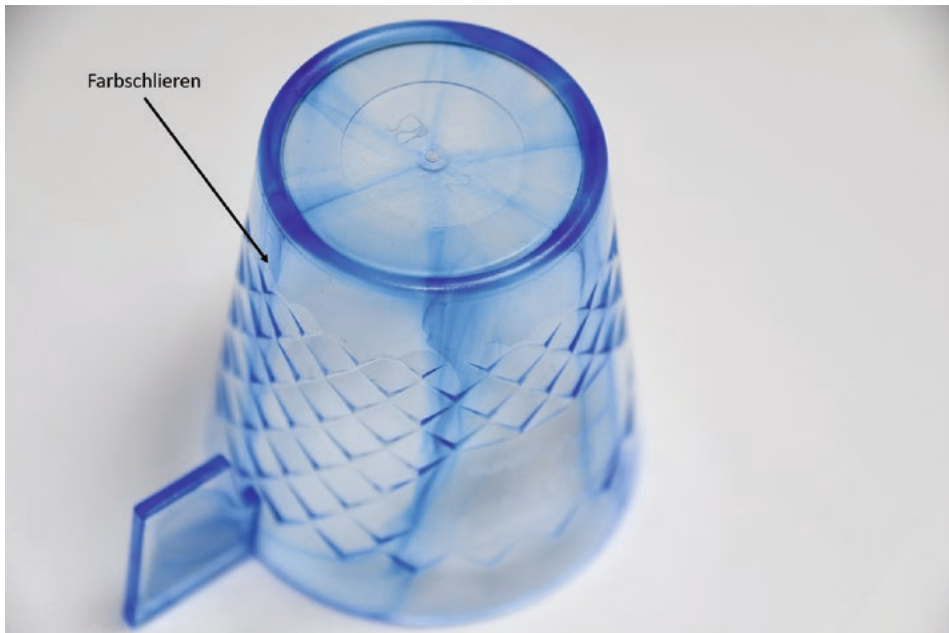
- Zu hohe Druckverluste im Anguss und der Kavität sollten vermieden werden.
- Eine spätere Umschaltung von Spritz- auf Nachdruck kann sich positiv auf den Effekt auswirken.
- Alternativ kann die Einspritzgeschwindigkeit optimiert, d.h. in der Regel erhöht werden.
- Am Ende des Fließwegs sollte die Entlüftung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

### 1.5.13 Farbschlieren

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

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





**Bild 1.20** Farbschlieren

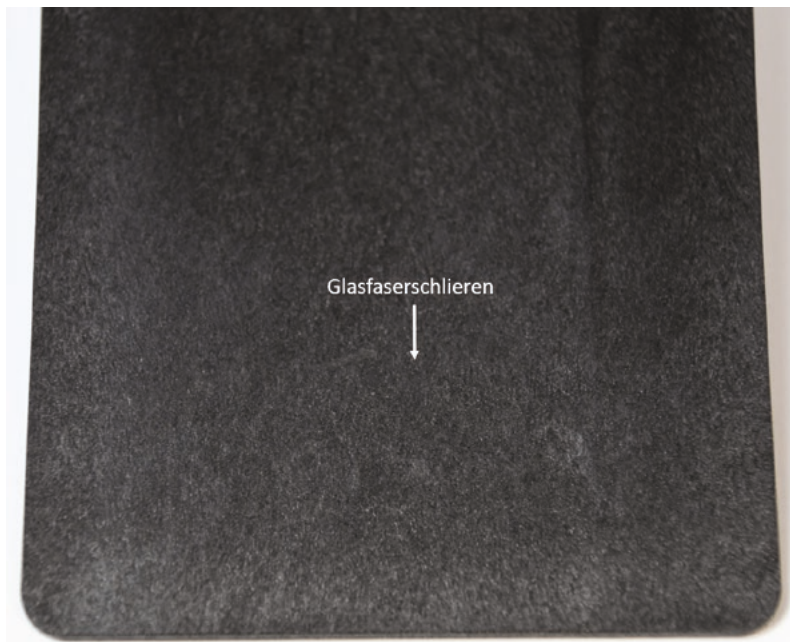
#### Lösungsvorschläge:

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

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

### 1.5.14 Glasfaserschlieren

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



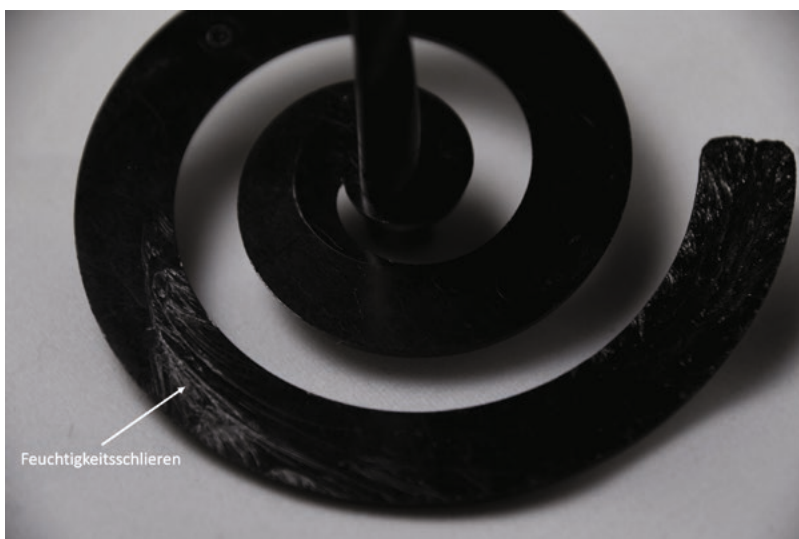
**Bild 1.21** Glasfaserschlieren

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.15 Feuchtigkeitsschlieren

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



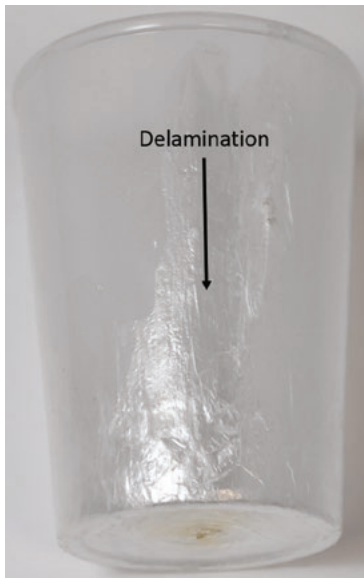
**Bild 1.22** Feuchtigkeitsschlieren

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.16 Delamination

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



**Bild 1.23**  
Delamination

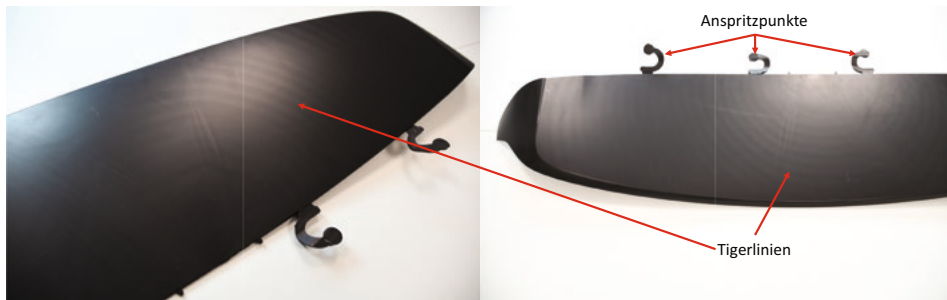
Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.17 Schubmarkierungen (Tiger-Lines)

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

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



**Bild 1.24** Schubmarkierungen

Lösungsvorschläge:

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

### 1.5.18 Spannungsrissebildung, Mikrorisse

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



**Bild 1.25**  
Spannungsrissebildung, Mikrorisse

Lösungsvorschläge:

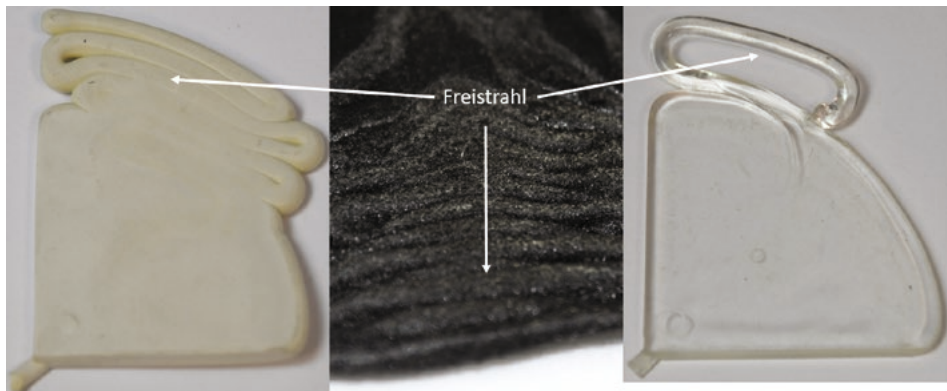
- Die Werkzeugtemperatur sollte erhöht werden, ohne dabei die Höchstgrenze zu überschreiten. Besonders vorteilhaft kann es sein, wenn beide Wände des Formteils gleichmäßig über die Kühlkreislauftemperaturen abkühlen.
- Außerdem sollte der Nachdruck verringert werden.
- Eine konstruktive Versteifung des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



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

### 1.5.19 Freistrahlbildung

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



**Bild 1.26** Freistrahlbildung

Lösungsvorschläge:

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

# Index

## Symbole

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

## A

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

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

## B

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

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

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

## E

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

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

## F

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

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

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

## H

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

## I

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

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

## K

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

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

## L

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

## M

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

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

## N

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

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

## O

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

## P

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

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

## Q

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

## R

Radien 696  
Randeffekte 157



- Randomisierung 569
- Randschicht 508, 510, 539, 626
- Randschichten 87, 191, 437, 505
  - eingefroren 125, 130, 157, 171
  - eingefrorene 117
- Rechenaufwand 649
- Rechenzeit 86
- Reduced Strain Closure (RSC-Model) 519
- Regelgrößen 559
- Renner-Ansatz 103
- Restfeuchtigkeit 424
- Restkühlzeit 3f., 169
- Restspannungen 475
- Restwanddicke 478, 608ff.
- Restwanddickenausbildung 608
- Reynoldszahl 53, 301, 312
- Robust Design 562, 568
- Rücklauftemperatur 304, 346
  
- S**
- Sandwichaufbau 599
- Sandwichspritzgießen 599
- Schalenelementen 156
- Schalenmodelle 87
- Schallplatteneffekt 26
- Schäumen 410
- Schererwärmung 140, 497
- Schergeschwindigkeit 54, 276, 283, 285, 502, 504, 513, 558
- Scherrate 96, 206
- Scherströmung 517
- Scherung 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
- Siegepunkt 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, 161f.  
Stahlkern 479  
Standardkühlung 351  
Standardmaterialkarte 110, 113  
Stangenanguss 183, 186f., 248  
statistische Prozessmodelle 563  
statistisches Prozessmodell 564  
statistische Versuchsplanung 561, 586  
Steifigkeit 449, 453  
Steifigkeitsmatrix 502  
Steigerkühlung 356, 363, 378  
Stellgrößen 563f.  
Steuergrößen 564  
Stick-Slip-Effekt 628  
Störgrößen 563  
Streuung 571  
Strömungsformen 517  
Strömungsinstabilitäten 602  
Strömungsquerschnitt 118f.  
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  
teilkonstante Versuchsplänen 588  
teilkristalliner Kunststoff 549  
Temperatur 255  
Temperaturdifferenz 147, 291f., 304f.,  
307, 309f., 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, 399f.  
Trennmittel 424  
Trimmen 700, 702  
Tunnelanguss 186f., 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  
 Verarbeitungsschwindigkeit 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
  - Wärmeleitfähigkeit 644
  - Wasseraufnahme 442
  - Wechselbelastungen 450
  - Wechselwirkung 427f., 566, 573
  - Wechselwirkungen 583
  - Weißbruch 21
  - Werkzeug 1
  - Werkzeugauslegung
    - rheologisch 48
  - Werkzeugbelag 19
  - Werkzeugbelastung 455, 462
  - Werkzeugdeformation 462
  - Werkzeugdeformationen 478
  - Werkzeugdimensionierung 45
  - Werkzeugfüllung
    - unvollständig 28
  - Werkzeuginnendruck 449, 553, 555
  - Werkzeuginnendrucksensor 547, 553, 557
  - Werkzeuginnendruckverlauf 547
  - Werkzeugkühlung 342
  - Werkzeugoberflächentemperatur 293
  - Werkzeugschädigung 205
  - Werkzeugtemperatur 303, 355, 360
  - Werkzeugverformung 451, 461
  - Williams, Landel und Ferry Ansatz 98
  - Wirtschaftlichkeit 289, 380, 608
- Z**
- Zentraleinstellung 407
  - Zentralstufe 587
  - Zentrierung 492
  - Zielgröße 561, 583
  - Zugbeanspruchung 500f.
  - Zugscherfestigkeit 475
  - Zugspannung 526
  - Zugversuch 500, 526, 531
  - Zuhaltekraft 10, 204, 209, 449, 614, 618f.
  - Zusammenfügen 677
  - Zyklus 2
  - Zykluszeit 3f., 386
  - Zykluszeitoptimierung 636