

# HANSER



## **Leseprobe**

zu

## **Spritzgussteile konstruieren für Praktiker**

von Christoph Jaroschek

ISBN (Buch): 978-3-446-45508-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-45632-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45508-5>  
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Der Autor



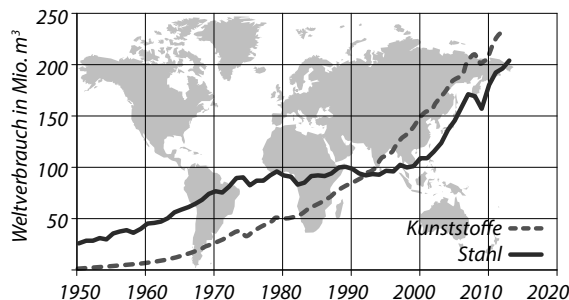
**Prof. Dr. Christoph Jaroschek** arbeitete nach seinem Maschinenbaustudium elf Jahre als Leiter der Anwendungstechnik und Verfahrensentwicklung bei einem namhaften Maschinenhersteller, im Bereich Spritzgießverfahren. Seit 1998 ist er Professor für Kunststoffverarbeitung der FH-Bielefeld, im Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Mathematik.



# Einleitung

Viele Konstrukteure sind unsicher, wenn die Materialanforderung für eine Entwicklungsaufgabe ein Kunststoff ist. Ein Grund liegt auch im Ausbildungssystem bzw. dem Wissensstand der Ausbilder und Professoren. Bis ungefähr 1990 war der Weltverbrauch an Kunststoffen noch kleiner als der Verbrauch an Stählen (Bild 1). Als Vergleichsgröße gilt hier das Volumen und nicht das Gewicht. Wenn man die beiden Werkstoffgruppen vergleicht ist mit Blick auf eine Konstruktion das Volumen eine geeignete Größe, weil speziell bei Kunststoffbauteilen nicht das Gewicht, sondern vielmehr die Größe bzw. das Volumen eine Rolle spielt.

Der Kunststoffbedarf wächst schneller als der Wissenszuwachs bei Konstrukteuren



**Bild 1** Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Stahl und Kunststoffen  
[Datenquellen: World steel assoc., PlasticsEurope Deutschland e.V.]

Vor 1990 waren Konstruktionen überwiegend aus Metall und die Bedeutung der Kunststoffe auch im Bereich der Ausbildung noch eher gering. Heute hat sich das Bild wesentlich verändert, aber es braucht noch Zeit, bis die Ausbildung sich entsprechend anpasst. Sehr viele Bücher zum Thema Kunststoffkonstruktionen sind von ausgewiesenen Experten auf dem Gebiet der Kunststoffe selbst verfasst. Vielfach liegt dabei der Schwerpunkt auf der Berechnung bzw. der Dimensionierung von Bauteilen, weniger auf deren Gestaltung. Das vorliegende Buch setzt den Fokus auf die Gestaltung von Bauteilen.

Dimensionierung und Berechnung

Da die überwiegende Anzahl der Kunststoff-Bauteile nur geringe Belastungen aushalten müssen, geht es bei sehr vielen Anwendungen meist um die eigentliche Gestaltung. Hier ist wesentlich, dass die meisten Kunststoffbauteile im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Ein Konstrukteur sollte daher in erster Linie wissen, was das für die Konstruktion bedeutet.

Spritzgusstaugliche Gestaltung

In diesem Buch liegt der Schwerpunkt auf dem Gebiet der Spritzgießwerkzeuge. Der Konstrukteur sollte sich bewusst sein, dass sich seine gestalterischen Vorgaben letztendlich mit einem Spritzgießwerkzeug umsetzen lassen müssen.

Kunststoffe im Folgenden synonym für Thermoplaste

Wegen des Schwerpunkts auf das Gebiet der Spritzgussteile werden in diesem Buch überwiegend die thermoplastischen Kunststoffe behandelt. Das sind solche Kunststoffe, die bei höheren Temperaturen schmelzflüssig sind. Im Folgenden wird daher, wenn nicht anders vermerkt, der Einfachheit halber der Begriff Kunststoff synonym für die Thermoplaste verwendet.

Literatur

An vielen Stellen ist der Inhalt dieses Buches vielleicht etwas knapp gehalten. Das Buch soll zunächst die wichtigsten Zusammenhänge aufzeigen, damit der Konstrukteur versteht warum bei Spritzgussteilen anders konstruiert werden muss als bei Metallteilen. Aktuell sind konkrete Angaben an vielen Stellen noch nicht formuliert, dies könnte in einer zweiten Auflage noch vertieft werden.

Die Zusammenstellung des notwendigen Wissens für den Konstrukteur in diesem Buch greift auf bestehende Literatur zu.

▪ *Prozesswissen*

- Jaroschek – Spritzgießen für Praktiker, Carl Hanser Verlag – Erklärung der physikalischen Vorgänge beim Spritzgießen, konkrete Handlungsempfehlung für das Einstellen einer Maschine, Strategie zur Sicherstellung der Qualität in der Produktion
- Johannaber – Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag – Sehr umfangreiches Kompendium zum Spritzgießprozess inklusive auch selten verwendeter Spezialverfahren, den verwendeten Maschinen und Werkzeugen.
- Stitz, Keller – Spritzgießtechnik, Carl Hanser Verlag – Spritzgießen von thermoplastischen und vernetzenden Materialien, Maschinen- und Werkzeugtechnik, Kostenrechnung.
- Wübken – Thermisches Verhalten und thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen, technisch wissenschaftlicher Bericht, IKV-Aachen, 1975 – Darstellung von zeitlichen Temperaturverläufen innerhalb von Spritzgießwerkzeugen

▪ *Werkzeugtechnik*

- Gastrow – Der Spritzgießwerkzeugbau, Carl Hanser Verlag – Beispielsammlung von Konstruktionszeichnungen von Spritzgießwerkzeugen mit kurzen Erklärungen zur Funktion, guter Fundus als Ideenspeicher für wiederkehrende konstruktive Fragestellungen.
- Menges, Michaeli, Mohren – Spritzgießwerkzeuge, Carl Hanser Verlag – umfangreiches Kompendium zur Entwicklung und zum Bau von Spritzgießwerkzeugen.
- Menning – Werkzeugbau in der Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag – Werkzeuge allgemein (nicht nur Spritzgießwerkzeuge).
- Mörwald, Karl – Einblicke in die Konstruktion von Spritzgusswerkzeugen, Verlag Brunke Garrels, 1965 – guter Überblick über Spritzgießwerkzeuge, enthält sehr viele Bildvorlagen, die in der nachfolgenden Literatur erneut genutzt werden.

- *Konstruktion*

- Ehrenstein – Mit Kunststoffen konstruieren, Carl Hanser Verlag – Materialwissen und Berechnung von Kunststoff-Bauteilen.
- Erhard – Konstruieren mit Kunststoffen, Carl Hanser Verlag – Materialwissen und Berechnung von Kunststoff-Bauteilen.
- Falke, Meyer – Maßhaltige Kunststoff-Formteile, Carl Hanser Verlag – Übersicht über Toleranzen und Erklärung der aktuellen DIN16742.

- *Materialwissen*

- Ehrenstein – Polymere Werkstoffe, Carl Hanser Verlag – gut verständliches Grundlagenwissen über Eigenschaften der Kunststoffe.
- Weißbach, Dahms, Jaroschek – Werkstofftechnik, Springer Verlag – metallische und polymere Materialien, gemeinsame Darstellung der Prüfverfahren und Anwendung von Kennwerten.

Viele Helfer haben an diesem Buch mitgewirkt. Mein Dank gilt meinem Kollegen Steffen Ritter von der Hochschule Reutlingen; Frau Wittmann vom Carl Hanser Verlag für das geduldige Lektorat; den Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern Christian Falkenstein, Vincent Hüttemann, Stefan Kartelmeyer und Simon Schneiders.

Dank



Das E-Book inside enthält die farbigen Abbildungen.



# Inhalt

<b>Der Autor .....</b>	<b>V</b>
<b>Einleitung .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Bauteile aus Kunststoff .....</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines .....	1
1.1.1 Vergleich der Konstruktion (konventionell vs. Kunststoff) ...	2
1.1.2 Besonderheiten von Kunststoffen .....	5
1.1.2.1 Vergleich der Eigenschaften von Kunststoffen und Metallen .....	5
1.1.2.2 Spezielles mechanisches Verhalten .....	6
1.1.3 Gründe für den Einsatz von Kunststoffen .....	10
1.2 Gestaltungsregeln .....	13
1.2.1 Konstruktive Besonderheiten von Spritzgussteilen .....	15
1.2.1.1 Entformbarkeit .....	15
1.2.1.2 Fließweg-Wanddicken-Verhältnis .....	20
1.2.1.3 Angussposition .....	21
1.2.1.4 Masseanhäufungen vermeiden, Dünnwandigkeit ....	22
1.2.1.5 Versteifungen .....	23
1.2.1.6 Maßänderung infolge von Temperaturschwankungen .....	25
1.3 Maßabweichungen zwischen CAD und Spritzgussbauteil .....	26
1.3.1 Schwindung .....	26
1.3.2 Verzug .....	29
1.3.3 Korrekturmaßnahmen bei Maßabweichungen .....	31
1.4 Gestaltung von Verbindungen .....	35
1.4.1 Schraubverbindung .....	35
1.4.2 Schnappverbindungen .....	38



1.4.3	Verklebungen und Schweißnähte .....	39
1.4.3.1	Klebeverbindungen .....	39
1.4.3.2	Schweißverbindungen .....	41
1.4.3.3	Filmscharniere .....	43
1.5	Toleranzen und Maße .....	45
1.6	Dimensionierung .....	50
<b>2</b>	<b>Herstellverfahren Spritzgießen .....</b>	<b>53</b>
2.1	Prozess und Wissen für den Konstrukteur .....	53
2.1.1	Fließweglängen sind begrenzt .....	54
2.1.2	Formteifläche bestimmt die Maschinengröße .....	56
2.1.3	Wanddicken bestimmen die Kühlzeit .....	57
2.1.4	Beim Kühlen schwindet Kunststoff .....	58
2.2	Einfluss des Verfahrens auf Bauteileigenschaften .....	60
2.2.1	Bindenähte, Fließlinien .....	60
2.2.2	Oberflächenqualität .....	62
2.3	Faserorientierungen beeinflussen die Bauteilmaße .....	63
2.4	Vorausschauende Qualitätssicherung .....	65
2.4.1	Einfallstellen .....	65
2.4.2	Freistrahle .....	66
2.4.3	Dieseleffekt .....	67
2.4.4	Unvollständige Füllung, Gratbildung und Deformation beim Entformen .....	68
2.5	Spezielle Verfahren .....	69
2.5.1	Mehrkomponententechnik .....	70
2.5.1.1	Verfahren allgemein .....	71
2.5.1.2	Werkzeugtechniken .....	72
2.5.1.3	Bauteilgestaltung .....	74
2.5.2	Fluid-Injektionstechnik (FIT) .....	80
2.5.2.1	Prozesse .....	81
2.5.2.2	Bauteilgestaltung .....	86
<b>3</b>	<b>Werkzeuge .....</b>	<b>91</b>
3.1	Allgemeine Aufgaben und Funktionen .....	92
3.2	Herstellung und Kosten .....	94
3.2.1	Allgemeine Bearbeitung .....	95
3.2.2	Oberflächen .....	98
3.2.2.1	Erodieren .....	98
3.2.2.2	Ätzen .....	99

3.2.2.3	Laserstrukturierung .....	101
3.2.2.4	Keramische Oberflächen .....	101
3.2.3	Stähle .....	103
3.3	Normalien .....	107
3.3.1	Standardisierte Zukaufteile .....	108
3.4	Schmelzeführung .....	111
3.4.1	Kaltkanäle .....	113
3.4.1.1	Anordnung der Kavitäten .....	113
3.4.1.2	Anbindung an die Kavitäten .....	115
3.4.1.3	Entformung des Angussystems .....	118
3.4.2	Werkzeug mit Vorkammerdüse .....	120
3.4.3	Isolierkanäle .....	121
3.4.4	Heißkanäle .....	122
3.4.4.1	Innenbeheizte Systeme .....	124
3.4.4.2	Außenbeheizte Systeme .....	125
3.4.4.3	Heißkanaldüsen .....	126
3.4.4.4	Kaskadentechnik .....	128
3.5	Temperierung .....	129
3.5.1	Konzepte für die Temperierung .....	134
3.5.1.1	Kontinuierliche Durchflusstemperierung .....	134
3.5.1.2	Impulskühlung/diskontinuierliche Temperierung ...	136
3.5.1.3	Variotherme Konzepte, bzw. intermittierende Temperierung .....	137
3.5.2	Realisierung .....	138
3.6	Entformung .....	142
3.6.1	Geradlinige Entformung in der Achsrichtung der Öffnungsbewegung .....	143
3.6.2	Entformung von Konturbereichen, die nicht parallel zur Öffnungsbewegung sind .....	147
3.6.3	Entformung von Innenhinterschneidungen .....	149
3.6.4	Entformung von Innengewinden .....	151
<b>4</b>	<b>Simulation .....</b>	<b>153</b>
4.1	Ziele der Simulation .....	155
4.1.1	Füllsimulation (rheologische Simulation) für gute Oberflächen .....	155
4.1.2	Vorhersage des Verzugs .....	157
4.1.3	Wärmeflussanalyse .....	159
4.1.4	Berechnung der mechanischen Belastbarkeit (Strukturmechanik) .....	160

4.2	Modellgrundlagen für die rheologische Simulation .....	160
4.2.1	Geometriemodelle .....	160
4.2.2	Berechnungsmodelle .....	164
4.2.3	Materialmodelle .....	166
4.3	Beispiele und Berechnungsergebnisse .....	167
4.3.1	Füllverhalten .....	167
4.3.2	Nachdruckphase .....	169
4.3.3	Verzug .....	171
<b>5</b>	<b>Materialauswahl .....</b>	<b>173</b>
5.1	Übliches Vorgehen bei der Materialauswahl .....	173
5.1.1	Auswahlkriterium Temperatur .....	174
5.1.2	Auswahlkriterium Medienbelastung .....	175
5.1.3	Auswahlkriterium mechanische Belastung .....	175
5.1.4	Auswahlkriterium spezielle Anforderung .....	177
5.1.5	Datenbanken .....	178
5.2	Wichtige Kennwerte .....	182
5.2.1	Charakteristische Temperaturen .....	182
5.2.1.1	Glastemperatur .....	182
5.2.1.2	Schmelztemperatur .....	182
5.2.1.3	Zersetzungstemperatur .....	183
5.2.2	Wärmeformbeständigkeitstemperatur .....	183
5.2.3	Dauergebrauchstemperatur .....	185
5.2.4	E-Modul und Kriechmodul .....	186
5.2.5	Temperaturfunktion des E-Modul .....	191
5.3	Bemessungsgrenzen für die mechanische Auslegung .....	193
5.3.1	Kurzzeitbelastungen .....	193
5.3.2	Langzeitbelastung .....	194
5.3.3	Abschätzung von Bemessungsgrenzen mit Abminderungsfaktoren .....	196
	<b>Index .....</b>	<b>197</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>201</b>

# Bauteile aus Kunststoff

Dieses Kapitel zeigt die Besonderheiten von Kunststoffbauteilen, im Vergleich zu Alternativen aus Metallen oder anderen Werkstoffen. Es gibt Gestaltungsregeln, die unmittelbar durch den Herstellungsprozess begründet sind. Die hier zusammengestellten Angaben sollen dem Konstrukteur einen groben Überblick geben.

## ■ 1.1 Allgemeines

Im Vergleich zu Bauteilen aus Metall zeigen Spritzgussbauteile interessante Unterschiede:

- Bei gleicher Funktion haben Kunststoffteile eine andere Geometrie.
- Häufig sind Kunststoffteile bereits eine Baugruppe, d. h. viele Funktionen lassen sich direkt mit einem einzigen Bauteil umsetzen.

Beispielsweise gibt es Hefterklammern aus Metall, Kunststoff und Materialkombinationen (Bild 1.1). Wichtig ist zunächst, dass die Anforderungen erfüllt werden. Die Frage nach besser oder schlechter ist bei der Materialwahl ohne eindeutige Bewertungskriterien nicht möglich.

Unterschied zwischen Metall- und Kunststoffteilen



**Bild 1.1** Hefterklammern aus Metall und Kunststoff

Die Anforderungen an die Klemme sind auf jeden Fall:

- Funktion: Klemmkraft
- Wirtschaftlichkeit: Herstellkosten

Allgemeine Anforderungen

Die Klemmkraft wird bei den Metallvarianten durch die Verformung eines Drahts im elastischen Bereich erzeugt, bei der Vollkunststoffvariante durch die Verformung des Kunststoffs. Wegen des erheblich geringeren E-Moduls eines Kunststoffs ist die Kunststoffvariante nur für kleine Kräfte geeignet und sollte nicht für sehr dicke Aktenordner verwendet werden.

Herstellkosten sind bei Spritzgussteilen nur bei großen Serien günstig

Bei Spritzgussteilen setzen sich die Herstellkosten zusammen aus den Kosten für das Material, der Produktionsanlage (Maschine und Werkzeug) und den Lohnkosten. Überschlägig entsprechen die Materialkosten der Hälfte der Herstellkosten. Der Materialpreis liegt bei den sehr häufig genutzten Kunststoffen in der Größenordnung von 2 bis 4 €/kg. Bei der Vollkunststoffversion sind die Kosten sehr gering, weil das Produkt in einem einzigen Prozessschritt entsteht und keine Montage verschiedener Einzelteile notwendig ist. Zwar sind die Maschinen- und Werkzeugkosten sehr hoch, wenn aber die erwartete Stückzahl die Grenze von ca. 10.000 übersteigt sind die Werkzeugkosten pro Teil gering. Und wenn pro Stunde viele Spritzgussteile mit einer Maschine hergestellt werden können, sind die Maschinenkosten pro Teil ebenfalls gering.

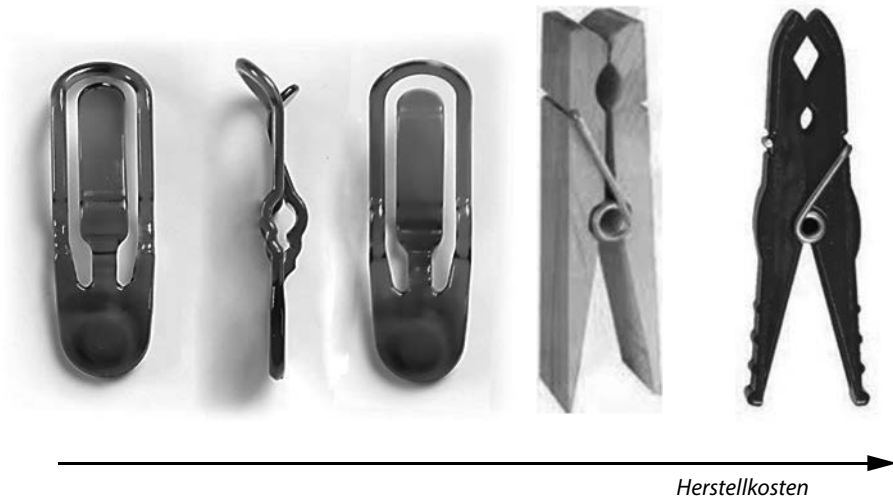
Funktionsintegration führt zu einfacherer Herstellung

Die Metallklammen bestehen aus mehreren Elementen, die zusammengefügt werden müssen. Grundsätzlich gilt, je weniger Prozessschritte notwendig sind, desto geringer ist das Ausfallrisiko in der Produktion. Auch das sollte bei einer Zusammenstellung der Herstellkosten berücksichtigt werden.

### 1.1.1 Vergleich der Konstruktion (konventionell vs. Kunststoff)

Umdenken bei der Konstruktion beim Einsatz von Kunststoff

Der Einsatz von Kunststoffen erfordert ein grundsätzliches Umdenken. Am Beispiel einer Wäscheklammer wird deutlich, dass das ältere Produkt aus Holz preiswerter ist, als eine ähnliche Kunststoffklammer (Bild 1.2). Beide Versionen bestehen aus zwei Klammerelementen, die über eine Metallfeder zusammengedrückt werden. Die Holzklammer kann aus einem profilgefrästen Brett sehr schnell zugeschnitten werden. Die ähnliche Kunststoffklammer ist in der Herstellung teurer und hat zudem schlechtere Eigenschaften, denn sie kann durch Witterungseinfluss verspröden und brechen.



**Bild 1.2** Herstellkosten von Wäscheklammern unterschiedlicher Ausführungen

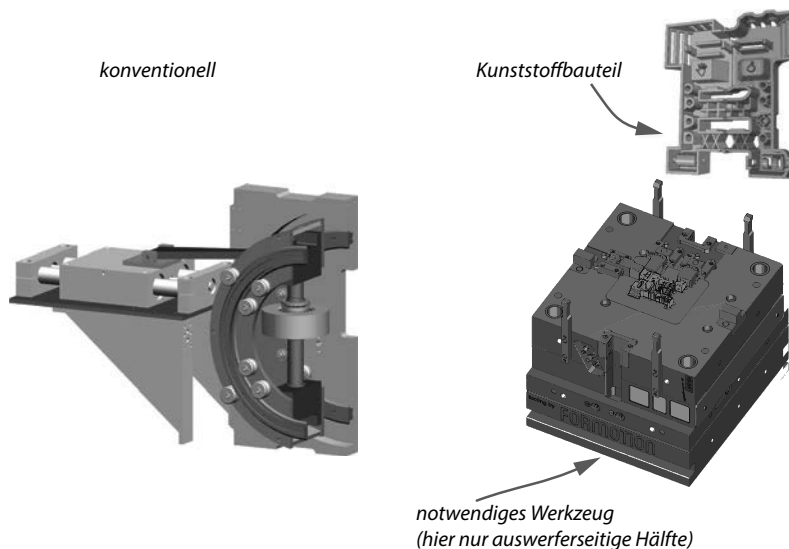
Eine gelungene Kunststoffklammer besteht aus nur einem einzigen Element, womit der Montageaufwand entfällt. Grundsätzlich können Kunststoffbauteile sehr viele Funktionen beinhalten, man spricht dann von Funktionsintegration.

Ein Kunststoffbauteil kann sehr komplex aufgebaut sein, wenn es im Spritzgießverfahren hergestellt wird. Aufgrund des Gießverfahrens für die Herstellung kann die Geometrie eines Kunststoffbauteils aus beliebigen Freiformflächen bestehen. Bei konventionellen Bauelementen werden die Einzelteile überwiegend aus dem Vollen gefräst und gedreht, so dass hier überwiegend einfache Geometrien vorherrschen.

Im Vergleich zu konventionellen Produkten lässt sich verallgemeinert formulieren:

Konventionelle Bauteile bestehen oft aus verschiedenen Einzelteilen und bilden eine Baugruppe. Gute Kunststoffbauteile sind im Vergleich oft schon selbst eine Baugruppe (Bild 1.3).

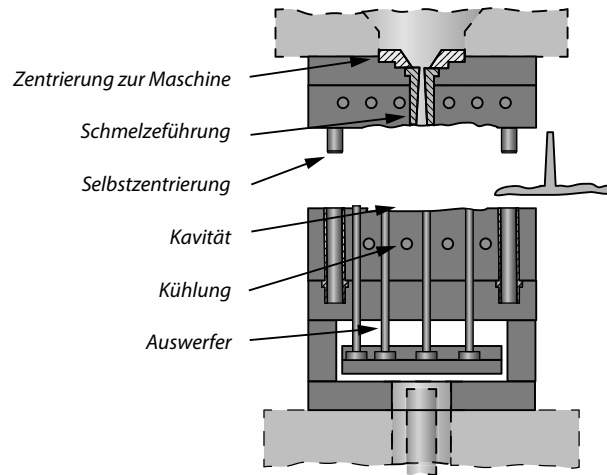
Gusskonstruktionen können sehr frei geformte Oberflächen haben



**Bild 1.3** Vergleich einer konventionellen Baugruppe aus unterschiedlichen Einzelteilen und einem Kunststoffbauteil mit dem zur Herstellung notwendigen Werkzeug  
[Bild: Ziebart/FH-Bielefeld, Ritter/HS-Reutlingen]

Bei der Entwicklung eines Kunststoffbauteils muss bereits in der Konstruktionsphase ein Werkzeug mitüberlegt werden, das schränkt in gewisser Weise die konstruktive Freiheit ein. Auf jeden Fall sollte der Konstrukteur eines Spritzgussteils die Möglichkeiten der Werkzeugtechnik kennen, denn leichte Veränderungen der Gestalt eines Kunststoffbauteils können sehr große Wirkung auf die Kosten eines Werkzeugs haben. Diese Werkzeuge bestehen aus vielen Einzelteilen und sind wiederum eine sehr aufwendige Baugruppe. Die Werkzeuge müssen unterschiedliche Aufgaben erfüllen (Bild 1.4). Der eigentliche Formhohlraum, die Kavität, muss mit Schmelze gefüllt werden. Die Wärme der Schmelze muss abgeführt werden (Kühlung), damit das Kunststoffteil fest und stabil wird und über ein Auswerfersystem entformt werden kann.

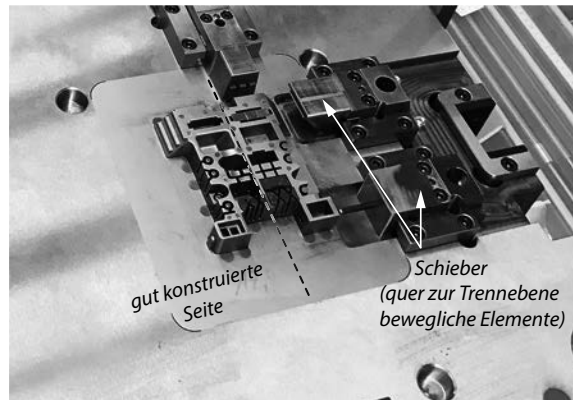
Gute Konstruktionen mit Kunststoff berücksichtigen die mögliche Umsetzung mit Spritzgießwerkzeugen



**Bild 1.4** Aufbau und Funktionen eines einfachen Spritzgießwerkzeugs

Demonstrationswerkzeug für „Polyman“ zeigt Auswirkung guter Bauteilgestaltung auf das Werkzeug

Das Kunststoffbauteil „Polyman“ in Bild 1.3 ist zu Demonstrationszwecken auf der linken Seite schlecht und auf der rechten Seite gut gestaltet. Die Beurteilung bezieht sich insbesondere auf die werkzeugtechnische Umsetzung. Für die verschiedenen seitlichen Öffnungen sind auf der schlechten Seite drei Schieber notwendig, die für die Entformung der Hinterschnitte notwendig sind (Bild 1.5). Durch geringfügige Änderungen an der Gestalt kann die gut konstruierte Bauteilseite völlig ohne Schieber auskommen. Dadurch wird das Werkzeug preiswerter und im Produktionsbetrieb weniger störanfällig bzw. kommt mit geringerem Wartungsaufwand aus.



**Bild 1.5** Auswerferseite für das Demonstrationsbauteil „Polyman“  
[Bild: Ritter/HS-Reutlingen]

### 1.1.2 Besonderheiten von Kunststoffen

Die wichtigste Eigenschaft von Kunststoffen ist der Schmelzpunkt mit nur ca. 1/10 im Vergleich zu Metall (Bild 1.6), denn damit ist es möglich, Kunststoffe in Stahlformen mit sehr komplexer Formgebung zu gießen. Die Präzision der Stahlformen kann weitgehend ohne Nacharbeit auf das Kunststoffbauteil übertragen werden und fast beliebig oft wiederholt werden. Die Stahlformen sind jedoch sehr aufwendig und teuer, so dass sich dieses Produktionsverfahren kaum für geringe Stückzahlen eignet. Die Kunststoffteilefertigung ist somit fast immer eine Massenfertigung.

Der größte Vorteil von Kunststoffen ist der niedrige Schmelzpunkt

Zwecks Genauigkeit sollte hier von der Temperatur der Kunststoffschmelze gesprochen werden, damit ist nicht die definierte Schmelztemperatur gemeint. Nur teilkristalline Kunststoffe können schmelzen, denn das Schmelzen betrifft die kristallinen Bereiche. Amorphe Kunststoffe können daher nur erweichen. Das wird möglicherweise erst in Kapitel 5 deutlich, hier werden die speziellen Materialeigenschaften und die charakteristischen Temperaturen behandelt.

Temperatur der Kunststoffschmelze

#### 1.1.2.1 Vergleich der Eigenschaften von Kunststoffen und Metallen

Im weiteren Vergleich mit den Metallen sind die Eigenschaften sehr verschieden. Somit sind spezielle Anwendungsfälle nur mit einem der beiden Werkstoffe sinnvoll.

Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen sind denen der Metalle unterlegen

**Tabelle 1.1** Vergleich von Metallen und Kunststoffen

Eigenschaft	Metall	Kunststoff
E-Modul	hoch	niedrig
Festigkeit	hoch	mittel
Dichte/Gewicht	hoch	gering
Transparenz	keine	möglich

- Der E-Modul der Metalle und speziell der Stähle ist ca. 1000-mal höher als bei Kunststoffen. Anwendungen mit hohen Lastanforderungen sind daher weitgehend auf Metalle beschränkt. Kunststoffbauteile würden sich zu sehr verformen.
- Die Festigkeit der Metalle ist besser als die der Kunststoffe. Hierbei geht es um das Versagen eines Bauteils. Das kann sowohl ein Bruch sein, aber auch eine unzulässige bleibende Verformung.
- E-Modul und Festigkeit der Kunststoffe sind stark von der Temperatur abhängig. Für Anwendungen bei höheren Temperaturen, das können auch schon 50 °C sein, muss bei längerfristigen Belastungen die Materialwahl besonders sorgfältig erfolgen.
- Die Dichte der Kunststoffe ist nur ca. 1/7 im Vergleich zu Stahl. Anwendungen, die ein bestimmtes Gewicht erfordern (z. B. Pendel für Uhren oder Vorhanggewichte) sind nicht ohne weiteres in Kunststoff ausführbar.
- Einige Kunststoffe sind transparent.

E-Modul von Kunststoffen ist temperaturabhängig und somit nicht konstant



# 2

## Herstellverfahren Spritzgießen

Die Herstellverfahren für Kunststoffbauteile zählen weitgehend zu den Urformverfahren, sie werden also direkt aus der Schmelze geformt. Unter diesen Verfahren hat Spritzgießen die größte Bedeutung. Man schätzt allerdings, dass die Extrusionsprozesse für Halbzeuge (Profile, Rohre, Folien, Platten, ...) mengenmäßig mehr Kunststoffe verbrauchen. Mit Blick auf die Vielzahl der Kunststoffprodukte, ist Spritzgießen bedeutender.

Im Folgenden wird der Prozess kurz erläutert, um damit das für den Konstrukteur wichtige Grundverständnis zu erlangen.

Unter den Urformverfahren ist Spritzgießen das Verfahren mit der größten Bedeutung

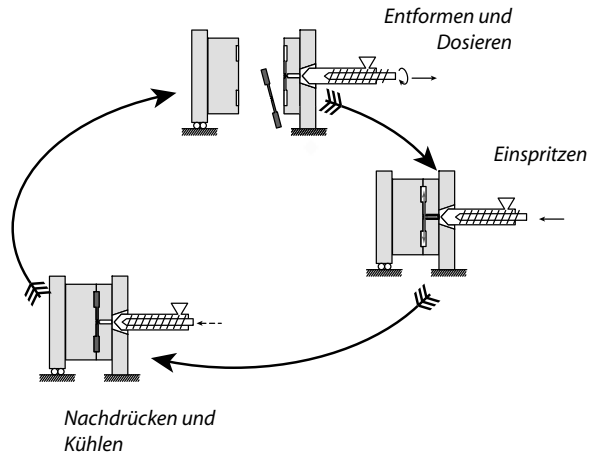
### ■ 2.1 Prozess und Wissen für den Konstrukteur

Spritzgussteile werden in einem zyklisch ablaufenden Verfahren hergestellt (Bild 2.1). Der Kunststoff wird in einem Einspritzaggregat aufgeschmolzen und in der für einen Schuss notwendigen Menge dosiert. Diese Schmelze wird mit Drücken bis zu 2.000 bar in einen Werkzeughohlraum (Kavität) eingespritzt.

Allgemeine Prozesskennwerte

Ein sehr hoher Spritzdruck herrscht nur unmittelbar im Düsenbereich des Spritzaggregats. Vom Einspritzpunkt bis zum Fließwegende fallen die Drücke insgesamt ab. Mit einer groben Abschätzung kann man davon ausgehen, dass über die Bauteilfläche ein mittlerer Druck von ca. 300 bar wirkt.

Im Vergleich zur Schmelzetemperatur ist das Werkzeug kalt. Damit kann der eingespritzte Kunststoff erstarren und als Bauteil nach dem Öffnen des Werkzeugs entformt werden. Weil sich das Volumen des Kunststoffs beim Abkühlen verringert, muss nach dem Einspritzen und während des Abkühlens weitere Kunststoffschmelze in die Kavität gedrückt werden. Dieser Nachdruck ist nur bis zu einer bestimmten Abkühltemperatur wirksam, d. h. der Kunststoff wird während der Abkühlphase weiter schwinden und schließlich ein geringeres Volumen als die Kavität darstellen.



**Bild 2.1** Spritzgießen als zyklisch ablaufender Prozess mit den wesentlichen Prozessschritten

Wichtige allgemeine Informationen für den Konstrukteur

Für den Konstrukteur ergeben sich zunächst vier wesentliche Informationen:

- Fließweglängen sind begrenzt und damit die Bauteilgröße
- Bauteilfläche bestimmt die Schließkraft und damit die Maschinengröße
- Wanddicken bestimmen die Zyklusgeschwindigkeit und damit die Kosten
- Schwindung verändert die Bauteilgröße

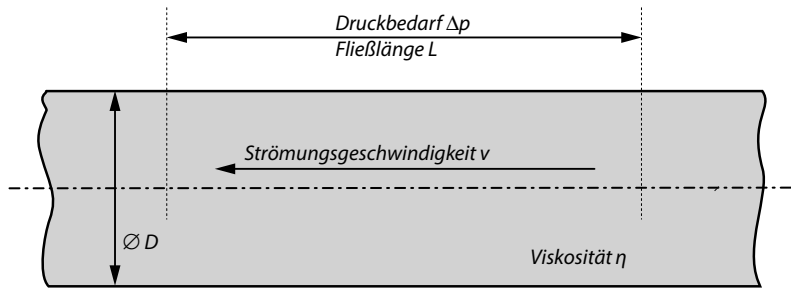
### 2.1.1 Fließweglängen sind begrenzt

Fülldruck begrenzt die Fließweglänge

Die Fließfähigkeit des Kunststoffs macht diese hohen Drücke notwendig und begrenzt die möglichen Fließweglängen, die mit einer Spritzgießmaschine einer Leistungsklasse möglich sind. Die physikalische Grundlage ist hier in der Hagen-Poiseuille-Formel zusammengefasst:

$$\Delta p = K \frac{\eta L v}{G^2} \quad (2.1)$$

Hierin ist  $\Delta p$  die Differenz des Drucks zwischen der Düse und der Fließfront, die notwendig ist eine Schmelze mit einer Viskosität  $\eta$  und einer Geschwindigkeit  $v$  über eine Strecke  $L$  und einer Geometrie  $G$  strömen zu lassen (Bild 2.2,  $K$  steht hier für einen konstanten Proportionalitätsfaktor). Die Viskosität ist ein Wert, der die Fließfähigkeit der Schmelze beschreibt. Hohe Werte bedeuten schlechte Fließfähigkeit und somit hohe Fülldrücke. Die Geometrie beschreibt die charakteristische Dicke, bei einem zylindrischen Querschnitt also den Durchmesser und bei einer rechteckigen Geometrie die vorherrschende Dicke der Platte.

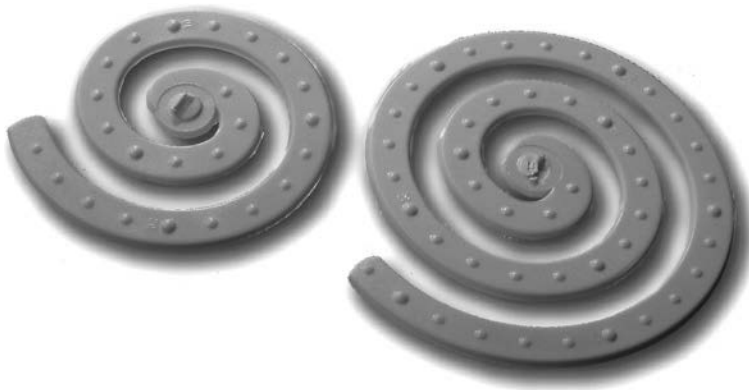


**Bild 2.2** Druckverlust bzw. Druckbedarf für die Strömung einer Kunststoffschmelze

Eine Berechnung der Fließweglängen ist mit der sehr vereinfachten Formel nach Hagen-Poiseuille nicht zuverlässig durchführbar, denn die Viskosität wird sehr stark beeinflusst u. a. durch die Temperatur. Wenn man sicher die Fließweglängen ermitteln will, ist eine rheologische Simulation notwendig (siehe Kapitel 4 „Simulation“). Mit diesen Simulationen lässt sich der Einspritzvorgang sehr zuverlässig berechnen.

Für Abschätzungen können auch Ergebnisse des Fließspiralenversuchs genutzt werden. Hierbei handelt es sich um streifenförmige Bauteile mit sehr großen Fließweglängen (Bild 2.3). Je nach Fließfähigkeit eines Kunststoffs lassen sich unterschiedlich große Fließweglängen mit vorher festgelegten Einspritzdrücken erzielen.

Maximal realisierbare Fließweglängen können mit dem Fließspiralenversuch abgeschätzt werden



**Bild 2.3** Fließspirale zur Messung der Fließweglänge

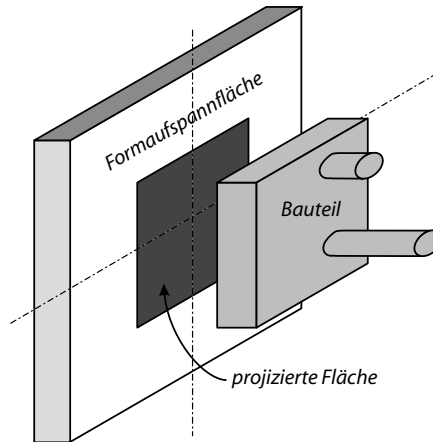
Bild 2.3 zeigt die üblichen Fließweglängen, die sich mit den Fließspiralen-Versuchen ergeben. Demnach sind die Verhältnisse aus Fließweglänge und Wanddicken nicht größer als 150 (siehe Bild 1.26). Im Verpackungsbereich werden spezielle Materialien verwendet, die besonders leicht fließen. Dann sind Fließweglängendickenverhältnisse von bis zu 300 möglich.

Wenn die Bauteile größer werden, müssen zwangsläufig mehrere Anspritzpunkte verwendet werden. Eine Platte mit einer Breite von ca. 300 mm und einer Länge von 600 mm könnte man folglich noch mit zwei Anspritzpunkten füllen. Es ergäbe sich dann aber zwingend eine Bindenaht genau in der Mitte der Platte, weil dort die beiden Schmelzeströme zusammenfließen werden.

### 2.1.2 Formteilfläche bestimmt die Maschinengröße

Schließkraft, Formteilfläche, projizierte Fläche und Maschinengröße

Die beiden Werkzeughälften werden über die Schließeinheit der Spritzgießmaschine zusammengedrückt. Die Schließkraft der Maschine muss größer sein als die in der Kavität wirkende Kraft, die in Richtung der Öffnungsachse der Maschine wirkt. Diese Kraft ergibt sich aus der projizierten Fläche des Bauteils und dem mittleren Forminnen-druck. Für eine grobe Abschätzung nimmt man einen mittleren Forminnendruck von 300 bar an.



**Bild 2.4** Projizierte Fläche eines Spritzgussteils

Abschätzung der Schließkraft

Für die Abschätzung der Schließkraft reicht eine Faustformel:

$$F_{\text{Schließ}} = 3 A_{\text{proj.}} \quad (2.2)$$

Hierin wird die Schließkraft in kN errechnet, unter der Annahme, dass ein mittlerer Druck von 300 bar auf eine projizierte Fläche  $A_{\text{proj.}}$  in  $\text{cm}^2$  wirkt. Für ein Bauteil mit einer Fläche von  $100 \text{ cm}^2$  bräuchte man also eine Schließkraft von mindestens 300 kN, bzw. 30 t.

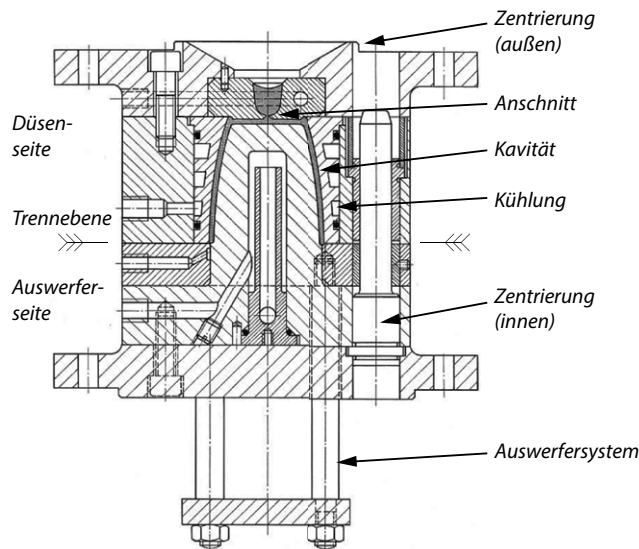
Die Maschinengröße hat Einfluss auf die Herstellkosten

Die Formteilgröße bestimmt auf diese Weise die Maschinengröße und damit auch die Herstellkosten. Die Größe der Maschine wird durch die Schließeinheit bestimmt, hierbei gibt es Abstufungen bei denen die Aufspannfläche und die Schließkraft gleichmäßig ansteigen. Entweder sind die Maße des Bauteils groß und die projizierte Fläche ist klein, das ist z. B. bei einem Rahmen für einen Bildschirm der Fall. Dann wird eine große Aufspannfläche benötigt. Oder die Bauteilmaße sind insgesamt bei einer großen projizierten Fläche klein, dann wird eine große Schließkraft benötigt.

## ■ 3.1 Allgemeine Aufgaben und Funktionen

Standardwerkzeug,  
auch Zweiplattenwerk-  
zeug genannt

Bild 3.1 zeigt ein einfaches Zweiplattenwerkzeug. Mit Platte ist in der Regel ein Plattenpaket gemeint. Hier besteht ein Paket aus jeweils einer Aufspannplatte zur Fixierung im Schließsystem der Spritzgießmaschine und den Kavitätplatten. Bei einem Zweiplattenwerkzeug bildet die Trennung der beiden Hälften die Trennebene. Das Bauteil selbst wird in der Kavität, dem Formhohlraum abgebildet. Die Schmelze wird üblicherweise zentral durch die Aufspannplatte der Düsenhälfte eingeleitet. Die Wärme der Schmelze wird über die Kühlflüssigkeit abgeleitet, die durch die diversen Kühlkanäle fließt. Das weitgehend erkaltete Bauteil kann nach dem Öffnen der Form mit Hilfe einer Auswerfmechanik entformt werden.



**Bild 3.1** Schnitt durch ein einfaches Becherwerkzeug mit den wesentlichen Funktionen  
[Bildquelle: nach Menning, Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung]

Einsätze in Kavität-  
platten

Die Kavität kann entweder direkt in die Werkzeugplatte eingearbeitet werden, oder ein entsprechender Kavitäteeinsatz wird verwendet (Bild 3.2). Für die Einsatzvariante gibt es folgende Gründe:

- Die Trennebene wird über die Kontur des Bauteils vorgegeben und ist nicht zwingend plan. Bei einer gewölbten Trennebene ist der Bearbeitungsaufwand größer, wenn die Kavität direkt in die Werkzeugplatte eingebracht wird.
- Wenn die Bauteile eine große Höhe haben würden sehr dicke Werkzeugplatten notwendig, von denen viel Material abgetragen werden müsste. Mit Einsätzen lassen sich dünnere Formplatten nutzen.
- Sollte es zu Änderungen an der Kavität kommen, ist ein Austausch eines Einsatzes immer kostengünstiger und schneller.

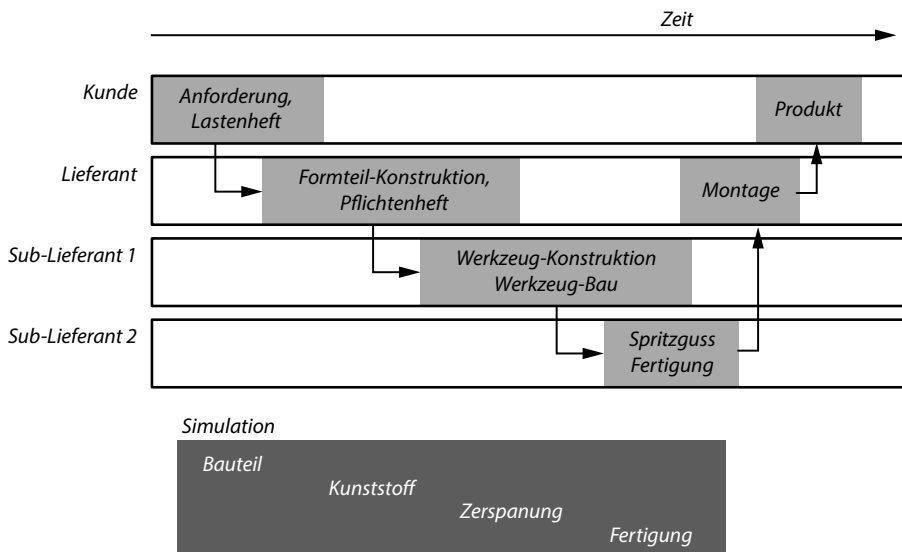
# 4

## Simulation

Die Zeit für die Entwicklung von Bauteilen und Baugruppen wird zunehmend kürzer, auch weil der Produktlebenszyklus kürzer und die Produktvielfalt größer wird. Mit Simulationen kann Zeit gespart werden, weil sich die Wirkung von Maßnahmen so vorhersagen lassen.

Häufig sind bei der Produktentwicklung unterschiedliche Partner beteiligt, die jeweils sehr verschiedene Kompetenzen und Blickwinkel haben und nicht zwingend im gleichen Unternehmen sind (Bild 4.1). Ein Kunde möchte ein Produkt, das er ggf. weiterverkaufen möchte. Er formuliert die Wünsche und Anforderungen in einem Lastenheft. Ein Lieferant wird aus dem Lastenheft ein Pflichtenheft machen, das die vertragliche Grundlage für den Auftrag ist. Die Aussagen dieses Pflichtenhefts sind verpflichtend, konkret wird der Lieferant eine definierte Produktqualität zusichern.

Simulation verkürzt  
Entwicklungszeit



**Bild 4.1** Entwicklungsschritte und Simulationen in zeitlicher Abfolge

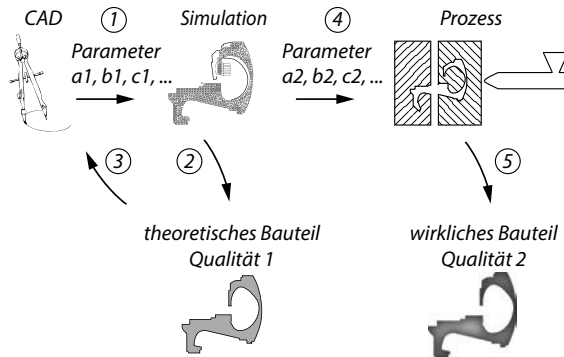
Unterschiedliche Ziele zwischen Kunde und (Sub-)Lieferant

Die Konstruktionsabteilung des Lieferanten wird das Produkt möglicherweise umkonstruieren oder modifizieren, damit die Qualität stimmt. Während der Kunde z. B. die Optik und die Form eines Bauteils im Sinn hat, wird der Lieferant auch die Herstellbarkeit und mögliche Qualitätsminderungen durch beispielsweise Bindenähte oder Bauteilverzug berücksichtigen. In gleicher Weise verhält es sich mit den Sublieferanten, die das Spritzgießwerkzeug bauen und das Bauteil selbst herstellen.

In allen Abschnitten sind Simulationen möglich und sinnvoll. Beim Kunden geht es möglicherweise um das Verhalten des Bauteils oder der Baugruppe unter Belastung, bei den verschiedenen Lieferanten steht eher die Spritzgießsimulation (rheologische Simulation) und die Berechnung von Zerspanungsvorgängen (CAM) im Vordergrund.

Differenz zwischen Simulation und Praxis durch verschiedene Prozesseinstellung

Die Grundproblematik im Bereich der Spritzgießsimulation verdeutlicht Bild 4.2. Für die Spritzgießsimulation müssen dem Berechnungsprogramm Produktionseinstellgrößen ( $a_1, b_1, c_1, \dots$ ) gegeben werden. Das Berechnungsergebnis liefert Erkenntnisse über z. B. einen sehr wahrscheinlichen Verzug. Der Konstrukteur wird Änderungen an der Geometrie vornehmen und nach einigen Entwicklungsschleifen wird ein Werkzeug in Auftrag gegeben. In der Produktion werden garantiert andere Einstellwerte ( $a_2, b_2, c_2, \dots$ ) für die Maschine gewählt, denn Einstellwerte lassen sich zwar schätzen, nicht aber exakt vorhersagen. Oberflächendefekte wird ein Einrichter durch einige Versuche während des Anfahrvorgangs erst optimieren können.



**Bild 4.2** Die Ergebnisse von Simulation und Produktion stimmen nicht unbedingt überein

Bauteile sollten unabhängig von Prozesseinstellungen eine gleiche Qualität haben

Im Prinzip sollte der Konstrukteur gemeinsam mit dem Simulationsfachmann eine Geometrie entwerfen, die völlig unabhängig von den Produktionsparametern immer die gleiche Qualität ermöglicht.

Die Wahl eines geeigneten Kunststoffs erfolgt nach unterschiedlichen Gesichtspunkten:

- Technische Gründe: Transparenz, Temperatureinsatz, Steifigkeit etc.
- Erfahrung: „Das haben wir immer schon so gemacht!“
- Gesetzliche Vorschriften:
  - Zulassungsvorschrift nach langwierigen Freigaben, in z. B. Luftfahrt oder Medizintechnik
  - Zulassungsanforderungen z. B. bei Kontakt mit Trinkwasser und Lebensmitteln

Fragestellungen für die Wahl des richtigen Kunststoffs

Im Folgenden wird eine Systematik gezeigt, die eine Materialwahlauswahl erleichtert. Die angesprochenen Kennwerte unterscheiden sich wesentlich von denen der Metalle. Sie werden daher ausführlich im Anschluss an die Systematik erläutert.

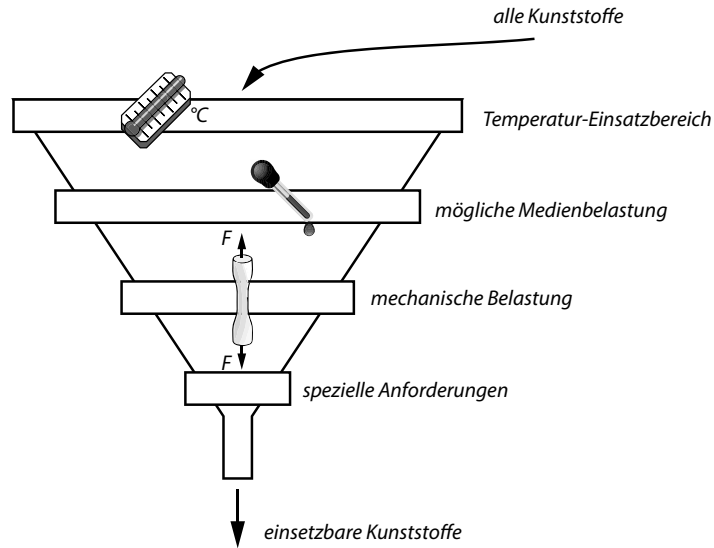
Nicht jede Entwicklung erfordert eine umfangreiche Werkstoffauswahl. Beim Trinkwasser- und Lebensmitteleinsatz sowie in den Bereichen Medizin und Pharma spielen Zulassungen von Kunststoffen eine kostenintensive Rolle, so dass man in diesen Branchen den Werkstoff nur wechselt, wenn signifikanter Nutzen aktivierbar ist. Der gleiche Zusammenhang gilt für Werkstoffe, mit denen man sehr gute Erfahrungen gemacht hat, wie z. B. Polyamide im Motorraum.

## ■ 5.1 Übliches Vorgehen bei der Materialauswahl

Die Wahl eines Kunststoffs erfolgt nach einem Filterprinzip (Bild 5.1). Die Reihenfolge der Siebeinsätze ist willkürlich. Die hier dargestellte Reihenfolge orientiert sich an der jeweiligen Anzahl der verfügbaren Materialien. Nur sehr wenige Kunststoffe können eine sehr spezielle Anforderung erfüllen, z. B. Transparenz bei gleichzeitig hohem Temperatureinsatzbereich. Relativ viele Kunststoffe sind geeignet für eine Einsatztemperatur im Bereich bis 60 °C.

Das konventionelle Vorgehen bei der Materialauswahl ist ein Filterprinzip





**Bild 5.1** Auswahlfilter bei der Wahl eines geeigneten Kunststoffs

Für jede Stufe des Filtervorgangs sind die für den Anwendungsfall wesentlichen Anforderungen zu benennen. Für einen Anwendungsfall kommen nur solche Kunststoffe in Frage, die die gestellten Anforderungen erfüllen.

### 5.1.1 Auswahlkriterium Temperatur

Die Wärmeformbeständigkeit und die Dauergebrauchstemperatur sind wichtige Filterkriterien

Für die Temperatur als Auswahlfilter gilt immer die obere Grenze. Mit zunehmender Temperatur verringern sich die mechanischen Eigenschaften und es kann zu thermischer Schädigung kommen. Eine untere Temperaturgrenze gibt es nicht. Bei tiefen Temperaturen wird das Material zwar spröde, diese Eigenschaft wird aber nachfolgend bei den mechanischen Eigenschaften abgefragt.

Für die Einsatztemperatur ist die Frage nach der Einwirkdauer zu beantworten.

- a) **Kurzfristig:** für nicht lang anhaltend hohe Temperaturen ist die Wärmeformbeständigkeit bzw. genauer genommen die Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT (engl.: heat deflection temperature) zu verwenden. Das ist die Temperatur, bei der ein genormter Prüfkörper eine zulässige Verformung unter Last nicht überschreitet. Mit steigender Temperatur wird der E-Modul und somit die Steifigkeit eines Bauteils geringer. Sollte es bei der gewünschten Anforderung keine wesentlichen Lastanforderungen geben, kann diese Temperaturgrenze auch übergangen werden.
- b) **Langfristig:** Für lang anhaltende hohe Temperaturen ist die Dauergebrauchstemperatur zu verwenden. Diese Temperatur zeigt an, dass sich eine Eigenschaft nach einer Einwirkzeit von 20.000 Stunden um 50 % vermindert hat.

# Index

## Symbole

1D-Vernetzung 161

## A

Abminderungsfaktoren 196  
Abstreiferwerkzeug 145  
Anbindung  
– Anschnitt 115  
Anguss-  
– -stange, -kanal, -verteiler 111  
Angusskrallen 118  
Anschnitt 111, 115  
Ätzen 99  
Aufschwinden 27  
Ausblasverfahren 85  
Ausdrehwerkzeuge 151  
Auskern 22, 26  
Auswerferplatte 105  
Auswerfersicherung 142  
Auswerferstifte 143

## B

Balancierung 112  
Bauteilmaße  
– gebunden, ungebunden 47  
Belastung 175  
Bemessungsgrenzen 193  
Berechnungsmodell 160  
Bindenähte 60  
Bombierung 23

## C

Charpy 179  
Crazes 51, 194

## D

Datenbanken 178  
Dauergebrauchstemperatur 185  
Dehngrenze 6  
Dichte 5  
Diseleffekt 67  
DIN 16742 46  
Drehtechnik 73  
Drehwerkzeugtechnik 71, 73  
Dreiplattenwerkzeug 117  
Durchbrüche 18  
Durchflusstemperierung 134  
Düse  
– mit Spitze 127  
– Nadelverschluss 128  
Düsen  
– offen 126

## E

Eckeneinfall 29  
Einfallkern 150  
Einfallstellen 26, 65  
E-Modul 5  
Entformbarkeit 15  
Entformung 142  
Entformungsschrägen 16  
Erodieren 98  
ESU Qualität 106

## F

Fachzahl 94  
Fallkern 150  
Fasern  
– Ausrichtung 64  
Faserorientierungen 63  
Feuchtigkeitsaufnahme 187  
Filmscharnier 43  
FIT 80

Fließbremsen 33  
 Fließlinien 60  
 Fließquerschnitt  
 – Angussverteiler 115  
 Fließweglänge 20, 55  
 Fluid-Injektionstechnik 80  
 Fluidinjektor 84  
 Formeinbauhöhe 91  
 Freistrah 66  
 Führungsbuchse 108  
 Funktionsintegration 11

## G

Gas-Injektionstechnik 80  
 Gasinjektor 84  
 Gelenke  
 – beweglich, Overmolding 79  
 GIT 80  
 Glastemperatur 8, 182  
 grafische Füllbildermittlung 156  
 Gratbildung 68

## H

Hagen-Poiseuille 155  
 HDT 183  
 Heißkanal 122  
 – außenbeheizt 125  
 – innenbeheizt 124  
 Herstellkosten 2  
 Hinterschnitt, Hinterschneidung 18  
 H-Verteiler 114

## I

Impulskühlung 136  
 Induktionserwärmung 137  
 Innenhinterschneidung 149  
 isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme 51, 188  
 Isolierkanal 121

## K

Kaltkanal 113  
 Kanteneinfall 28  
 Kaskadentechnik 128  
 Kavität 93  
 Kavitäteneinsatz 92  
 Keramische Oberflächen 101  
 Kernhubtechnik 74  
 Kernzug 148  
 Klebeverbindung 39  
 Klebstoff 39  
 Kompressionsvolumen 122  
 Konstruktionsphase 3

Kriechmodul 189  
 Kühlung  
 – CO<sub>2</sub> 136  
 Kühlzeit 22, 57

## L

Längenänderung pro °C 25  
 Lasersintern 141  
 Laserstrukturierung 101  
 Lastenheft 153  
 Lastgrenze 7, 52  
 Luftauswerfer 146  
 Lunker 26, 65

## M

Maßhaltigkeit von Bauteilen 31  
 Maßvorhaltung 33  
 Materialmodell 166  
 Materialsubstitution 11  
 Medienbelastung 175  
 Mehrkomponententechnik 70  
 MFI 179  
 Mittelflächenetz 162  
 Mittenflächenetz 162  
 Multipoint-Daten 179  
 MVR 179

## N

Nadelverschlussdüse 127  
 Nebenkavitätenverfahren 85, 90  
 Negativkorrektur 33  
 Normalien 107

## O

Oberfläche  
 – Abformung 130  
 – Bearbeitung 98  
 Oberflächennetze 162  
 Öffnungsweite 119  
 Overmoldingtechnik 70

## P

Pflichtenheft 153  
 PM-Stähle 106  
 Polieren 103  
 projizierte Fläche 56  
 Prozessfenster 29

**Q**

quasistationär 131  
 Quellströmung 64

**R**

rheologische Simulation 154

**S**

Sandwichverfahren 70  
 Schieber 147  
 Schließkeils 148  
 Schließkraft 56  
 – notwendige 94  
 Schmelzetemperatur 5, 182  
 Schmelzpunkt 5  
 Schnappverbindung 38  
 Schrägbolzen 147  
 Schrägschieber 110  
 Schraubdom, Anschraubdom 36  
 Schulter-Hals-Verformung 8  
 Schweißen 41  
 Schwindung 26, 179  
 Sekantenmodul 186  
 Sicken 24  
 Singlepoint Daten 179  
 Spaltmaß 93  
 Speichermodul 191  
 spezifisches Volumen 58  
 Spiralkern 139  
 Standardwerkzeug 92  
 Stauboden 116  
 STEP Format 161  
 Sternverteiler 113  
 Streckgrenze 6  
 Strukturmechanik 160  
 Stützleiste 105

**T**

Tauchkanten 93  
 Temperierfehler 133  
 Temperierkanal 131  
 Temperierkreislauf 138  
 Temperierung 129  
 – parallel, in Reihe 135  
 – variotherm 137  
 Toleranzen 45  
 Toleranzgruppe 48  
 Topf-  
 – -führung, -zentrierung 110  
 Touchieren 97  
 transiente Berechnung 159  
 Trennfläche, Trennebene 14  
 Tunnelanbindung 116  
 Tuschieren 97

**U**

Umsetztechnik 72

**V**

Vakuumlöten 140  
 Verdrehsicherung 144  
 Verlustmodul 192  
 Vernetzung 161  
 Verschweißbarkeit 75  
 Verzug 29  
 Verzugsanalyse 158  
 Vicat Erweichungstemperatur 185  
 viskose Verformung 7  
 Vorkammendüse 120  
 Vorspritzling 71

**W**

Wärmeausdehnungskoeffizienten 58  
 Wärmedehnung 109  
 Wärmeflussanalyse 159  
 Wärmeformbeständigkeitstemperatur 183

**Z**

Zentrierelement 109  
 Zersetzungstemperatur 183  
 Zweiplattenwerkzeug 92  
 Zweistufenauswerfer 146  
 Zykluszeit 57