

1

Grundregel: Temperatureinsatzbereich

■ 1.1 Phasenübergänge bei Kunststoffen

1.1.1 Der Übergang vom festen in den geschmolzenen Zustand

In unserer Vorstellung verbinden wir einen Phasenübergang von fest nach flüssig oder umgekehrt, mit dem Abschmelzen von Eis oder dem Erstarren von Wasser. Herabfallende Tropfen verziehen einen festen Eisblock oder ein spiegelglatte Wasseroberfläche bildet eine Haut aus Eis. Bei vielen anderen Materialien erfolgt die Eigenschaftsveränderung aufgrund des Phasenübergangs ähnlich plötzlich an einem gut definierten Temperaturpunkt, wie am Gefrierpunkt des Wassers. So erfolgt das Aufschmelzen oder die Erstarrung für chemisch reine Metalle plötzlich bei einer definierten Temperatur.

Werden Kunststoffe betrachtet, kann kein plötzlicher Phasenübergang beobachtet werden. In der uns aus dem Alltag vertrauten, festen Phase erscheinen uns Gegenstände aus Kunststoff relativ weich und mehr oder weniger biegsam, also weniger steif als Metalle.

Werden Kunststoffherzeugnisse hohen Temperaturen ausgesetzt, versagen sie in der Regel. Viele kennen die Erfahrung einer geschmolzenen Vorratsdose, die unbedacht in den heißen Backofen gestellt wurde. Einige Kunststoffe versagen bereits bei Temperaturen unter einhundert Grad Celsius. Aus anderen polymeren Materialien können Erzeugnisse hergestellt werden, die auch noch bei zweihundert oder dreihundert Grad Celsius ihre Funktion erfüllen. Duroplastische Kunststoffe und Gummi widerstehen tendenziell höheren Temperaturen als Thermoplaste, werden aber noch im festen Zustand chemisch zersetzt. Thermoplaste können geschmolzen werden.

Kunststoffschmelzen sind extrem zähe Flüssigkeiten, die einen sehr großen Fließwiderstand haben. Der Übergang von „fest“ nach „flüssig“ erfolgt bei den thermoplastischen Kunststoffen nicht bei einer klar bestimmbaren Temperatur, sondern über einen mehr oder weniger breit ausgeprägten Temperaturbereich. Anders als

bei reinen Metallen verliert so ein Körper, der kurzzeitig knapp über die untere Grenze des Schmelztemperaturbereichs erwärmt wurde, nicht sofort seine Gestalt, wie wir es von einem schmelzenden Eiszapfen kennen. Bei einem Gegenstand aus Thermoplast bleibt die geometrische Gestalt zunächst erhalten. Es kommt lediglich zu einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Verziehen des Gegenstands.



Produkte aus Thermoplasten sind je nach Kunststofftyp bis zu Temperaturen von 80 bis 250 °C formstabil.

Die hochtemperaturfesten Polymere sind um ein mehrfaches teurer als die Massenplaste, die schon unter 100 °C ihre Formstabilität verlieren. In Bild 1.1 ist der Zusammenhang zwischen Wärmebeständigkeit und Preis in einem quantitativen Diagramm dargestellt. Allgemein gilt, dass eine erwünschte Formstabilität auch bei erhöhten Temperaturen den Einsatz von preisintensiveren Thermoplasten erfordert.

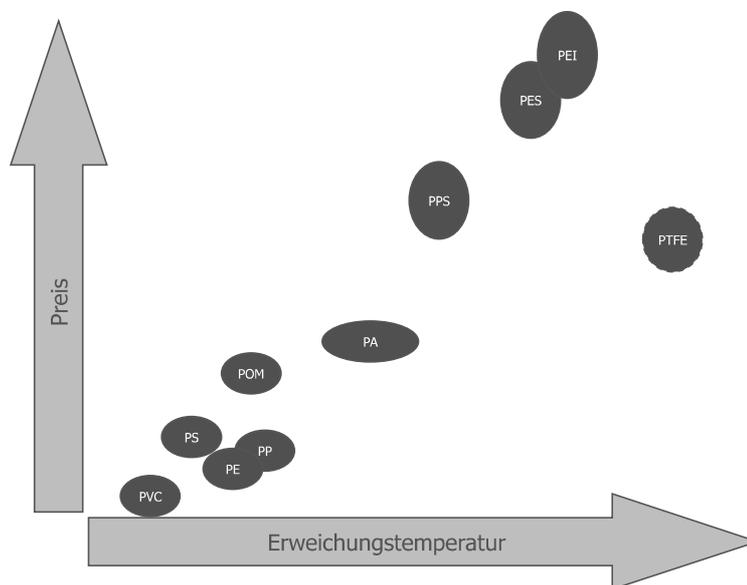


Bild 1.1 Qualitativer Zusammenhang zwischen Temperaturformbeständigkeit und Materialpreis einiger Kunststoffe

Im Gegensatz zu Kunststoffprodukten sind Erzeugnisse aus Metall widerstandsfähig gegen mehrere hundert Grad Celsius. Allerdings gibt es auch hier Gegenbeispiele wie Quecksilber, Zinn oder Blei.



Nicht nur in Bezug auf die Schmelztemperatur gibt es einige Metalle, die den hier zugrunde gelegten Modellvorstellungen nicht entsprechen.

Für reine Metalle erfolgt der Phasenwechsel fest/flüssig analog zu schmelzendem Eis/Wasser an einem klar zu bestimmenden Schmelzpunkt. Die meisten Metalllegierungen verändern ihren Phasenzustand über einen Temperaturbereich. Ab der Überschreitung eines bestimmten Temperaturwerts beginnt ein Wechsel in eine zunächst breiige Struktur. Mit zunehmender Temperatur vermindert sich die Viskosität des Breis. Ab einer bestimmten Temperatur sind beide Komponenten verflüssigt und es liegt nun eine Metallschmelze mit den Eigenschaften einer Flüssigkeit und der charakteristischen geringen Viskosität vor.

Zum klassischen Metallgießen sind solche Stoffgemische weniger geeignet. Ein sehr modernes Urformverfahren für einige solcher Metalllegierungen stellt das Thixotropiespritzgießen dar.

Eine bekannte Anwendung, bei der eine breiartige Struktur der Masse wichtig ist, kennen wir vom Löten bei Elektronikteilen. Bei dieser Technologie ist die Viskosität neben der Oberflächenspannung des Lots ein wichtiger Prozessparameter.

Bei diesen Metalllegierungen ist der unterschiedliche Schmelzpunkt der einzelnen Komponenten Ursache für den breiten Phasenübergangsbereich. Im Gegensatz zu Kunststoffen vermindert sich bei diesen Metallgemischen mit zunehmender Temperatur die Viskosität zunächst enorm. Sind beide Komponenten erschmolzen, bleibt die Viskosität auf einem konstant geringen Wert.

Bei Kunststoffschmelzen vermindert sich die Viskosität bei zunehmender Temperatur nur moderat, sie bleibt aber insgesamt auf einem hohen Niveau.

Bei länger einwirkenden hohen Temperaturen oberhalb des Erweichungsbereiches schmelzen Thermoplaste und verlieren ihre Form. Wird die Schmelze überhitzt, zersetzen sich die Polymere. Bei Elastomeren und Duromeren erfolgt die chemische Veränderung des Materials bei starker Wärmeeinwirkung, ohne dass vorher ein Zustandswechsel von fest nach flüssig erfolgte.

Der für Kunststoffe relativ niedrige Temperaturbereich, bei dem der Phasenübergang erfolgt, kann nicht allein auf Beschränkungen beim Einsatz der Produkte reduziert werden. Dadurch, dass man sich bei der Herstellung der Produkte auf moderate Temperaturen beschränken kann, ist die zur Produktformung notwendige Energie überschaubar. Zur Formübertragung kann man Werkzeuge aus gebräuchlichen Metallen verwenden. Die hervorragenden Abformeigenschaften von Kunststoffen schon bei relativ geringen Temperaturen machen die Polymerwerkstoffe so zu einem Material, mit dem die Erzeugung von unschlagbar preisgünstigen, komplex geformten und multifunktionalen Produkten mit einem überschaubaren Energieeinsatz möglich ist.

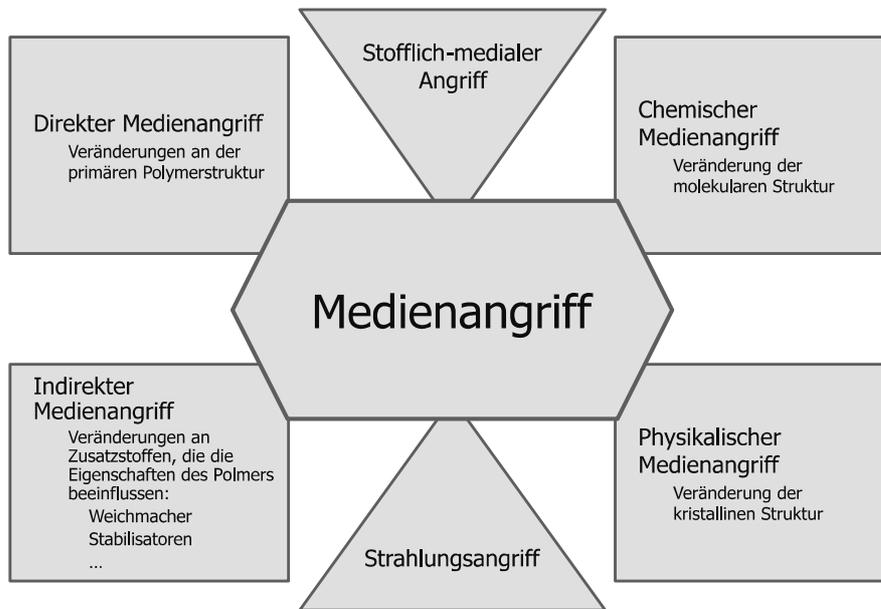


Bild 2.1 Übersicht: Medienangriff auf Kunststoffe

Wirken Medien auf das Stoffsystem „Kunststoff“, so muss also immer die Wirkung auf das gesamte Stoffsystem betrachtet werden.

2.1.2 Direkter und indirekter Medienangriff

Tritt die Wirkung am polymeren Grundstoff auf, spricht man von einem direkten Medienangriff (Bild 2.1, links). Der indirekte Medienangriff charakterisiert eine Wirkung an einem Zuschlagstoff. Ein direkter und ein indirekter Medienangriff können gleichzeitig auftreten.

Beim unmittelbaren Medienangriff wird das Bauteil funktionsbedingt von aggressiven Medien umgeben. Beispielsweise sind Kunststoffbauteile im Kraftstofftank funktionsbedingt dem Medium „Benzin“ oder „Diesel“ oder anderen zugelassenen Kraftstoffen ausgesetzt. Bei Funktionsversuchen wird der Angriff mit genormten Prüfflüssigkeiten simuliert. Problematisch wird es, wenn Agrarfette wie Rapsmethylester verwendet werden, weil diese in ihren Bestandteilen und in ihrer Zusammensetzung nicht definiert sind.

Ähnliches gilt auch für Anwendungen im Lebensmittelbereich für solch selbstverständliche und im Allgemeinen als unbedenklich angesehene Umgebungsmedien wie Fruchtsäfte, Milch oder Cola.

Bei den Überlegungen, mit welchen Medien Erzeugnisse in Kontakt kommen können, sind sämtliche Stationen des Produktlebenszyklus zu beachten. So sind Fälle

bekannt, bei denen das Einfetten der Teile zur besseren Montage eine nachhaltige Schädigung der Produkte bewirkte. Auch Schmierstoffe an Fördereinrichtungen können kritisch sein, beispielsweise auf den Transportanlagen für Getränkeflaschen.

Beim mittelbaren Medienangriff wird das Bauteil bei einer Nebenfunktion aggressiven Medien ausgesetzt. Hier sind beispielweise Schmierstoffe oder Reinigungsmittel zu beachten. Weiterhin wird mit dem Begriff „Fremdbenutzung“ der mittelbare Angriff von Medien beschrieben, die bei der ursprünglichen Spezifikation des Bauteils nicht vorgesehen sind, aber bei einer Nachnutzung durch den Verbraucher vorkommen. Denkbar ist zum Beispiel, dass in Getränkeflaschen heißer Tee oder Flüssigkeiten mit aggressiveren Inhaltsstoffen abgefüllt werden.

2.1.3 Strahlungs- und stofflich-medialer Angriff

Im Gegensatz zu Metallen bewirken nicht nur stofflich-mediale Belastungen an Kunststoffen Schädigungen, sondern auch Belastungen durch Strahlung (Bild 2.1, unten Mitte). Deshalb ist die Unterscheidung zwischen stofflich-medialem und Strahlungsangriff sinnvoll, auch wenn der physikalische Begriff „Medium“ normalerweise nicht auf Strahlung anwendbar ist. Bei den hier angestellten Betrachtungen wird dieser Lapsus in Kauf genommen, um die anwendungstechnisch relevanten und in ihren Konsequenzen ähnlichen Auswirkungen im Komplex zu behandeln.

Wegen der relativ geringen Schmelzpunkte können bereits langwellige Strahlen eine kritische Überhitzung der polymeren Materialien bewirken. Jeder kennt die saunaartige Atmosphäre im Innenraum eines Fahrzeuges, das im Sommer lange Zeit in der Sonne stand. Hier sind die Temperaturen aufgrund der Sonneneinstrahlung viel höher als in der Umgebung. Besonders bei dunkel eingefärbten Erzeugnissen und vor allem bei Produkten mit einem lichtdurchlässigen Gehäuse besteht die Gefahr der Überhitzung aufgrund der Erwärmung durch Strahlung.

Die Wirkung von Wärmestrahlen erfolgt indirekt über die Temperaturerhöhung und ist in erster Linie physikalischer Natur. In Kapitel 1 wurde erklärt, was bei der Überschreitung einer bestimmten kritischen Temperatur passieren kann. Bei teilkristallinen Thermoplasten vollziehen sich Änderungen in der Kristallstruktur. Zunächst setzen bei zunehmender Erwärmung Mechanismen der Nachkristallisation ein, bei weiter zunehmenden Temperaturen laufen die Nachkristallisationseffekte zunächst schneller ab, bis dann schließlich beim Erreichen des Schmelztemperaturbereiches die Auflösung von kristallinen Strukturen beginnt.

Im Gegensatz zur langwelligen Wärmestrahlung führen kurzwellige Strahlen, die auf Kunststoffe treffen, zu einer unmittelbaren Schädigung des Werkstoffs. Durch den Strahlungsangriff werden Radikale gebildet, die an Makromolekülen chemische

Reaktionen starten. Diese Veränderungen haben massive Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe (Bild 2.2, rote Kurve unten, „ohne Stabilisierung“)

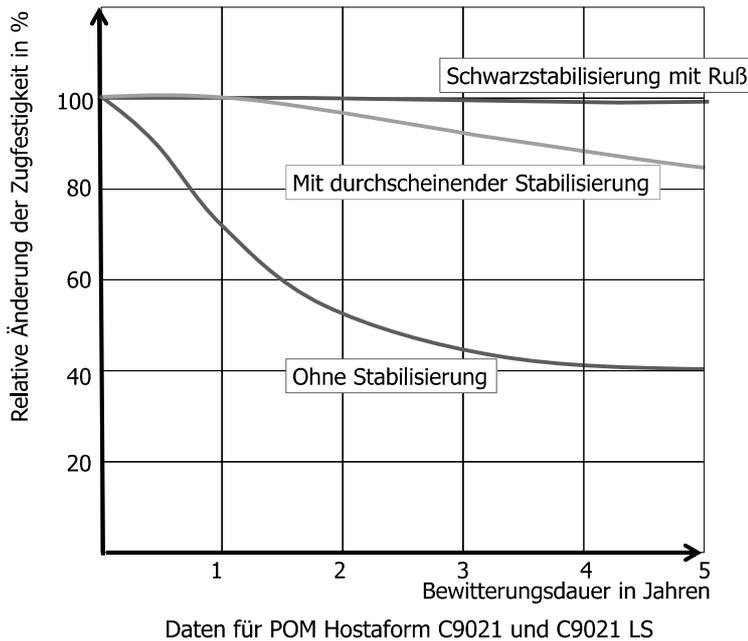


Bild 2.2 Auswirkungen der Bestrahlung von Kunststoffen

Um die Wirkung der UV-Strahlen auf die Polymere zu reduzieren, wurden spezielle UV-Stabilisatoren entwickelt und diese Zusatzstoffe den Polymeren zugesetzt. Die gelbe Kurve in der Mitte der Darstellung von Bild 2.2 „mit durchscheinender Stabilisierung“ zeigt ein solches Stoffsystem. Wird das Eindringen von UV-Strahlen in den Kunststoffkörper durch das Untermischen von schwarzen (Ruß-)Pigmenten verhindert, kann die Wirkung der UV-Bestrahlung nahezu vollständig neutralisiert werden (grüne Kurve, „Schwarzstabilisierung mit Ruß“ in Bild 2.2, oben).

Eine Stabilisierung mit schwarzen Pigmenten sollte immer mit einer chemischen Stabilisierung kombiniert werden, weil sonst mit länger andauernder Bewitterung die Oberflächen der Erzeugnisse unansehnlich werden.

Die in Bild 2.2 dargestellten Verhältnisse gelten für Polyoxymethylen. Dieses Polymer ist aufgrund des chemischen Aufbaus seines Monomers gegen UV-Licht besonders empfindlich. Trotzdem kann für einige Anwendungen auf eine Stabilisierung gegen UV-Licht verzichtet werden, wenn das Erzeugnis vor unmittelbarer Sonneneinstrahlung geschützt ist, was beispielsweise bei Ventilen im Kraftstoff-

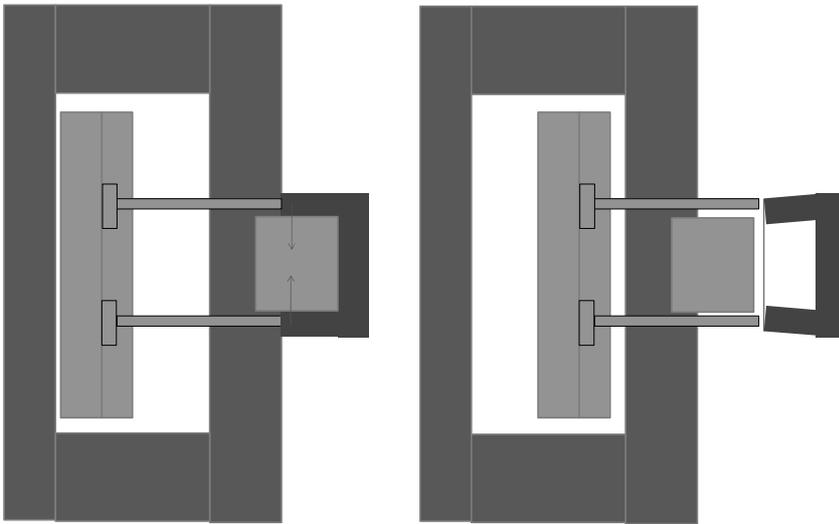


Bild 3.19 Entformungsverzug beim Auswerfen des Spritzgussteils

Eine rohrförmige Geometrie des Formteils verformt sich gleichmäßig (Bild 3.20, links). Der Durchmesser des Hohlzylinders reduziert sich längs der Achse um den gleichen Betrag. Bei becherförmigen Teilen dagegen wird der Hohlzylinder einseitig vom Boden gestützt. Bei der Entformung entsteht ein kegelförmiger Verzug (Bild 3.20, rechts).

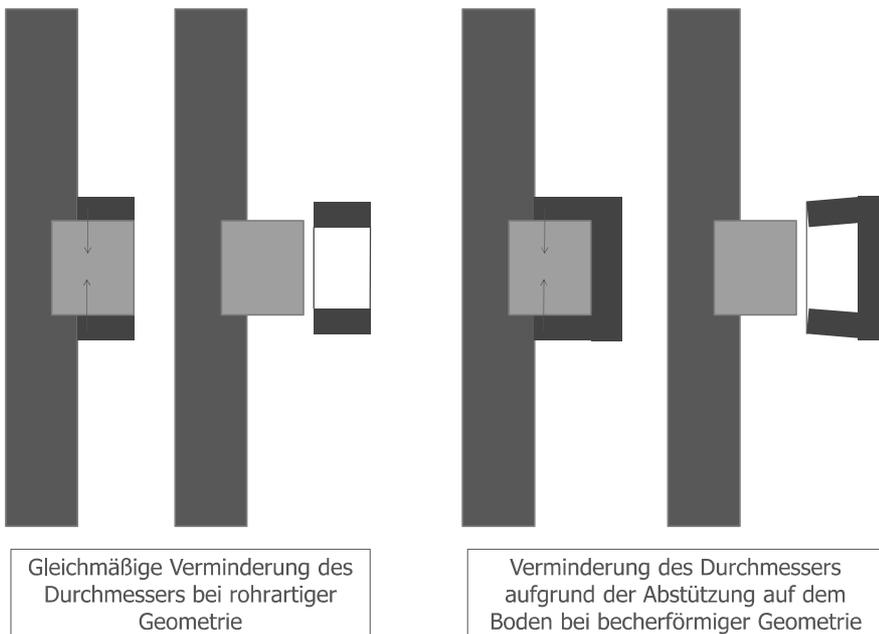


Bild 3.20 Entformung eines rohrartigen und eines becherartigen Spritzgussteils

3.5.3.4 Auswirkungen einer Schwindungsbehinderung auf Eigenspannungen

Grundsätzlich bewirkt jede die Schwindung behindernde Geometrie einen Entformungsverzug. Neben der formschlüssigen geometrischen Behinderung kommt noch eine Behinderung aufgrund von Reibung des Spritzgussteils an der Wand der Kavität vor. Besonders bei eingearbeiteten Oberflächen oder wenn eine grobe Erodierstruktur beibehalten wurde, ist eine Schwindungsbehinderung auch ohne Hinterschneidung möglich. In Bild 3.21 ist ein Zugprüfstab gezeigt, der zur Visualisierung des Entformungsverzugs unmittelbar nach dem Ausstoßen wieder in die Form eingelegt wurde. Die Schwindung bei der Entformung betrug im gezeigten Beispiel mehr als 2 mm.

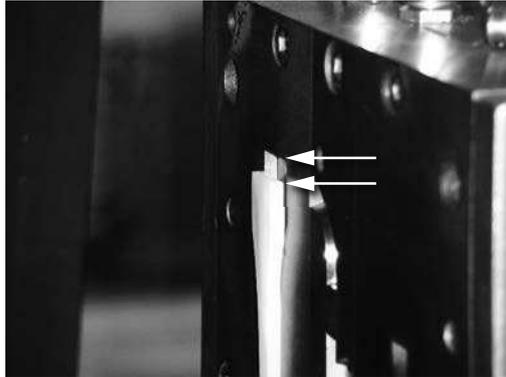


Bild 3.21 Schwindung eines Prüfkörpers

Wird die Kompression der Formmasse zu groß gewählt, dann steht das Spritzgussteil unmittelbar vor dem Öffnen des Werkzeugs noch unter Druck. Weil sich Kunststoffmaterial in den Strukturen der Werkzeugoberfläche verankert, muss eine erhöhte Kraft zur Öffnung der Form aufgewendet werden. Da es sich hier um ein Reibungsproblem handelt, bestimmt die konkrete Formteilgeometrie die Ausprägung und die Folgen dieses Effekts. Besonders, wenn große Flächenanteile des Spritzgussteils senkrecht zur Entformungsrichtung liegen, können die für die Öffnung des Werkzeugs notwendigen Kräfte enorm werden. Es wurden schon Fälle beobachtet, bei denen die Hydraulik überfordert war oder die Düsenseite beim Öffnen von der Aufspannplatte um mehrere Millimeter weggezogen wurde. Eine enorme Geräuschentwicklung ist kennzeichnend für solche extremen Erscheinungen.

Becherförmige Formteile reagieren auf eine zu starke Kompression der Formmasse besonders deutlich. Die Spritzgussteile verklemmen sich beim Öffnen der Form in der Düsenseite. So ist kein Auswerfen möglich und der Prozess muss unterbrochen werden. Das verhindert eine stabile Produktion.

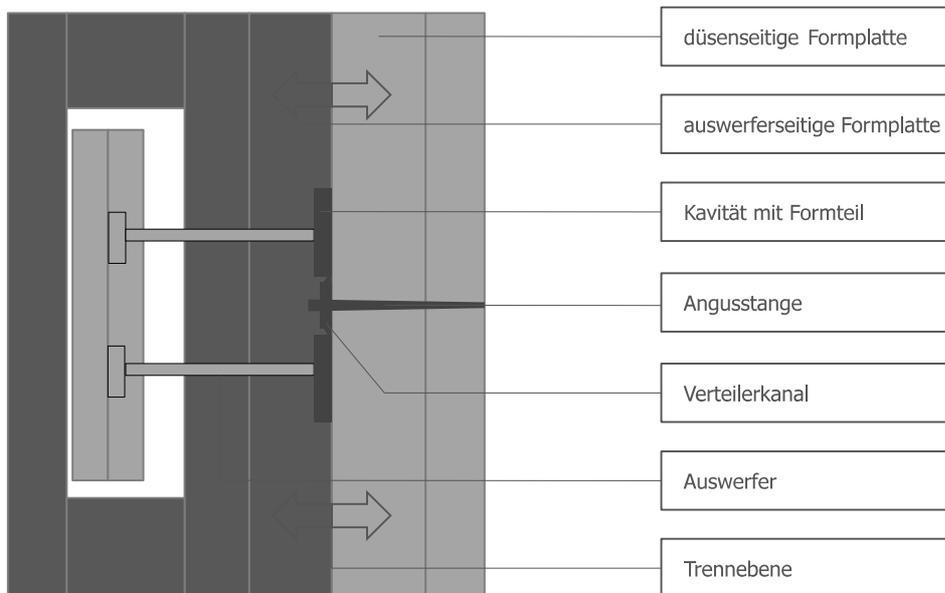


Bild 5.4 Schematische Darstellung eines einfachen Spritzgießwerkzeuges

Ein großer Vorteil der hier beschriebenen einfachen Auf-Zu-Werkzeuge (Bild 5.4) ist das einfache Einbringen von vielen Kavitäten in ein Werkzeug. Ein Faktor, der die Anzahl der Formnester in einem solchen Spritzgießwerkzeug beschränkt, ist die Zuführung der Schmelze. Die Verteilerkanäle kann man nicht unendlich lang gestalten. Werden eine Vielzahl von Formnestern benötigt, kann man mit dem Einsatz eines Heißkanals das Problem entschärfen.

Die Anbindung des Formteils soll immer im Bereich der dicksten Wandstärke des Kunststoffteils liegen. Weil die Kunststoffschmelzen eine sehr dickflüssige Konsistenz haben, erfolgt die Füllung der Kavität mit einer Quellströmung (vergleiche Abschnitt 3.5.2), bei der die Materialzuführung von der Anbindung des Formnestes aus erfolgt. Das ist ein Unterschied zum Gießen von Metallschmelzen. Hier bildet die Schmelze einen Strahl aus, der bis auf die der Zuführung gegenüber liegenden Seite der Kavität durchschießt, sodass die Füllung des Hohlraums von hinten aus erfolgt, in der entgegengesetzten Richtung wie beim Spritzgießen.

Bei der Füllung der Kavität mit Kunststoff strebt man das homogene Fortschreiten der Schmelzefront an. So erfolgt ein gleichmäßiges und prozesstechnisch stabiles Einspritzen der heißen Masse. Vor der Schmelzefront wird die in der Kavität befindliche Luft komprimiert. Es muss die Möglichkeit für ein Entweichen des Gases aus der Kavität bestehen. Kann dieses Problem nicht gelöst werden, kommt es aufgrund des Dieseleffekts am Ende des Fließwegs zu Brandstellen an den Teilen. Mit der Herstellung des Werkzeugs müssen geeignete Vorkehrungen getroffen werden,

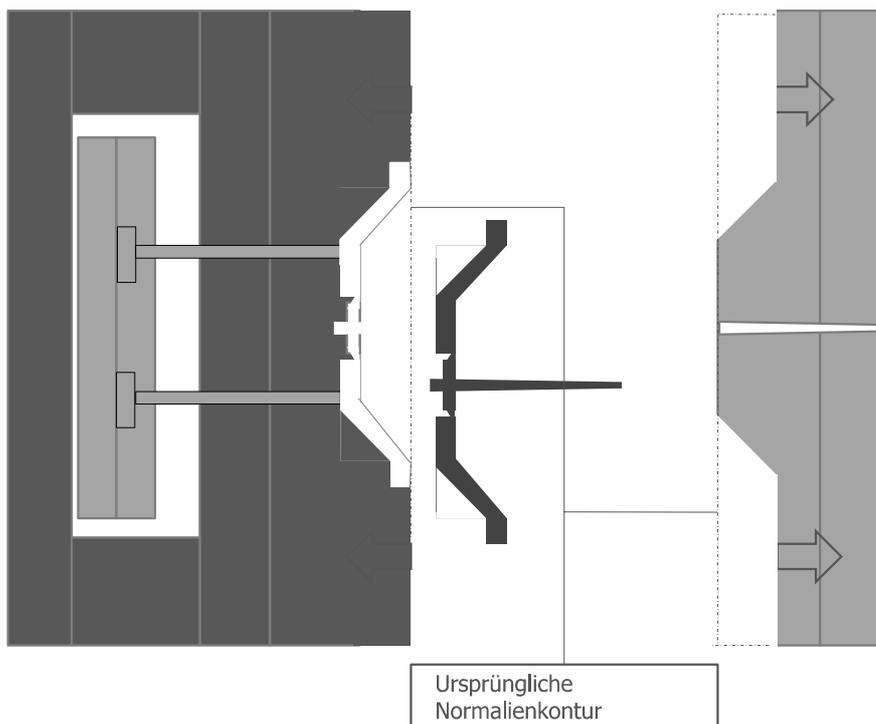


Bild 5.9 Werkzeug mit Trennungssprung, Normalien wurden abgetragen

Über viele Jahre bestand aufgrund der nicht ausreichenden Präzision der Metallbearbeitungsverfahren und -maschinen das Problem, dass über eine geneigte Trennfläche nicht an jeder Stelle der Trennebene der direkte Kontakt zwischen den Formplatten realisiert werden konnte. Erst durch die Verbesserung der zur Verfügung stehenden Präzision und der Möglichkeit, auch gehärtete Stähle spanend zu bearbeiten, hat man in den letzten Jahren hier neue Wege eröffnet.

Werden Normalien nicht exakt abgearbeitet, bleibt an einigen Stellen ein Spalt zwischen auswerferseitiger und düsenseitiger Formplatte. In diesen Spalt kann Schmelze eindringen und es werden Teile mit Grat (ein dünnes Kunststoffhäutchen, das sich in der Trennebene abformt) gefertigt. An anderen Stellen konzentrieren sich die Kräfte beim Zusammendrücken der Formhälften. Sind die vorstehenden Flächen relativ klein, kommt es aufgrund der großen lokal wirksamen Spannungen zu einer bleibenden Verformung an den betreffenden Werkzeugteilen. Das kann die Funktion einer Form soweit einschränken, dass eine Neuanfertigung erforderlich wird.

Um die Probleme zu umgehen, wurde eine Vorgehensweise entwickelt, bei der nur an einer Normalie die Kontur abgetragen wird, in der anderen Formhälfte wird die Kontur durch einen aufmontierten Einsatz gebildet (Bild 5.10).

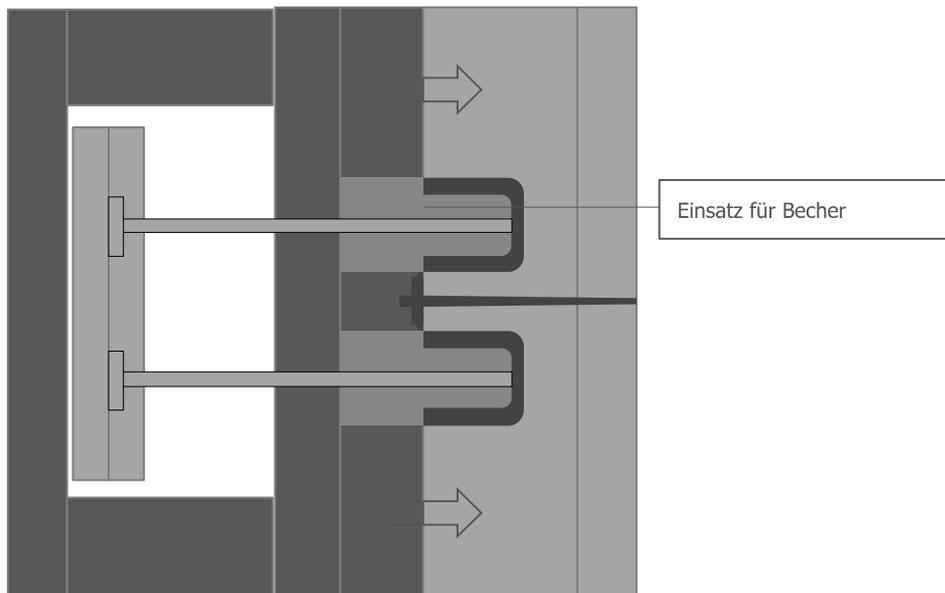


Bild 5.19 Becherwerkzeug mit Punktanguss – geschlossen

Die Lage des Formteils im Werkzeug wird so gewählt, dass die inneren Flächen hauptsächlich durch die Kerne der Auswerferseite gebildet werden. Oft sind die Kerne hinreichend groß, so dass innen Kanäle eingebracht werden können, damit ein durchströmendes Medium eine effiziente Kühlung des Spritzgussteils bewirkt.

5.5.2 Auswerfen

Damit die Formteile bei einem vollautomatischen Prozess frei auf ein Förderband unter dem Spritzgusswerkzeug fallen können, müssen die Auswerfer die Spritzgussteile über die Kerne streifen. Bei Werkzeugen für becherförmige Teile müssen daher lange Wege für die Auswerferbewegung vorgesehen werden. Die Werkzeuge haben eine große Werkzeugeinbauhöhe, das heißt, sie bauen in Maschinenlängsachse entsprechend groß auf (Obwohl es keine vertikale Dimension ist, spricht man von einer „Höhe“ – vielleicht weil einige der ersten Maschinen vertikal angeordnet waren).

Für eine stabile Produktion ist das sichere Entformen zwingend erforderlich. Deshalb müssen bei der Werkzeugerstellung zur Produktion von becherförmigen Formteilen folgende konstruktive Besonderheiten beachtet werden:

- Hinterschneidungen in der Düsenseite müssen zwingend vermieden werden.
- Ausreichende Entformungsschrägen sind vorzusehen.

- Die Entformungsschräge der Außenwand des Bechers, die von der Düsenseite abgeformt wird, darf auf keinen Fall kleiner sein als die auf dem Werkzeugkern eingebrachte Entformungsschräge.
- Die Oberfläche des Kerns sollte rauer gestaltet werden als die düsenseitige Buchse.
- Die Vorzugsrichtung beim Einbringen der Oberflächenstruktur ist auf dem Kern radial, senkrecht zur Entformungsrichtung einzubringen. In der Buchse der Düsenseite erfolgt die Politur vorzugesweise axial, senkrecht zur Entformungsrichtung.
- Kern hinreichend kühlen: Kern kälter temperieren als Düsenseite.

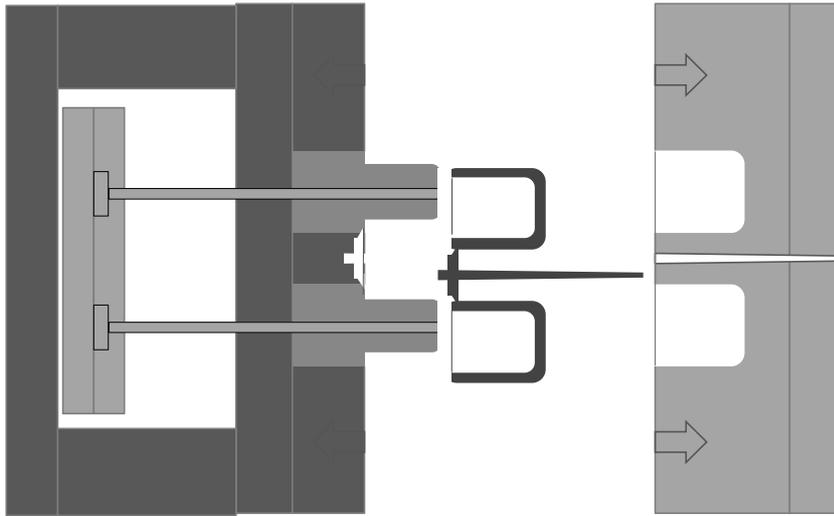


Bild 5.20 Becherwerkzeug mit Punktanguss – geöffnet

Wenn die Form geöffnet ist und sich die Spritzlinge auf der Auswerferseite befinden, erfolgt die Entformung, indem das Spritzgussteil vom Kern abgestreift wird. Mit den in Bild 5.20 schematisch dargestellten Stiftauswerfern ist dies grundsätzlich möglich, die Aufgabe kann aber mit alternativen Konstruktionen effektiver erfüllt werden (vergleiche Bild 5.22 bis Bild 5.24).



Das grundsätzliche Problem beim Entformen becherförmiger Teile besteht darin, dass

1. wegen des Aufschrumpfens des Spritzgussteils auf den Kern große Entformungskräfte auf das Formteil übertragen werden müssen und
2. beim Entformen der Becher im Inneren ein Vakuum erzeugt wird, das ausgeglichen werden muss.

Checkliste zur Konstruktion von Kunststoffteilen

Um die vermittelten Inhalte schnell im Konstruktionsalltag anwenden zu können, hilft es, eine Checkliste der 10 Grundregeln zu bearbeiten. Es bietet sich an, zunächst für ein bestehendes Teil die Tabellen zu bearbeiten. Neben der anwendungsbezogenen Wiederholung der Inhalte des Buches hat diese Vorgehensweise den Vorteil, dass man sehr schnell in der Lage ist, alternative Lösungsmöglichkeiten für ein technisches Erzeugnis zu erkennen.

Wenn man sich an bestehenden Erzeugnissen Routine bei der Arbeit mit der Checkliste erarbeitet hat, steht mit der unten abgedruckten Tabelle ein effektives Hilfsmittel zur Entwicklung von neuen Kunststoff-Erzeugnissen zur Verfügung, das hervorragend geeignet ist, die besonderen Möglichkeiten dieser Werkstoffklasse auszuschöpfen.

Tabelle 11.1 Checkliste

1. Temperatureinfluss	Bezug auf konkretes Erzeugnis	Erforderliche/mögliche Handlung
Einsatz des Erzeugnisses		
Temperaturbelastung beim Gebrauch		
Temperaturbereich bei Nachbearbeitung, Lagerung und Transport		
Temperaturbelastung bei (nicht-)beabsichtigten Sekundäranwendungen		
Vorgesehener/eingesetzter Kunststoff		
Temperatureinsatzbereich		
Eigenschaftsveränderungen im Temperatureinsatzbereich		
Geometrie		
Einseitiger oder beidseitiger Wärmeangriff		
Möglichkeiten der Abstützungen zur besseren Wärmestabilität		