Prozessgrößen beim Spritzgießen von Thermoplasten als Produktionskostenfaktoren

Schmelze-, Werkzeug-, Entformungstemperatur, Zykluszeit, p-v-ϑ-Diagramme

Inhalt

1 Einführung

2 Schmelzetemperatur
2.1 Schmelzetemperatur während der Formteilfüllung
2.2 Schmelzetemperatur in der Nachdruckphase und in der Kühlphase

3 Abkühlung der Schmelzen von Thermoplasten, thermodynamischer Zustandsverlauf
3.1 Einfluss des Umgebungsdrucks
3.2 Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit

4 Schmelztemperatur

5 Zustandsverlauf beim Spritzgießen

6 Entformungstemperatur

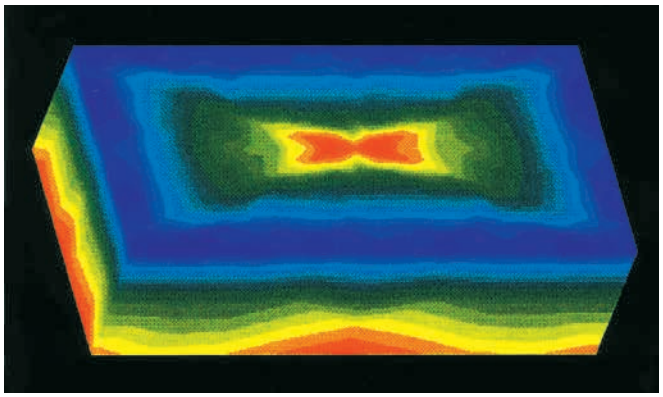
7 Kühlzeit

8 Zykluszeit

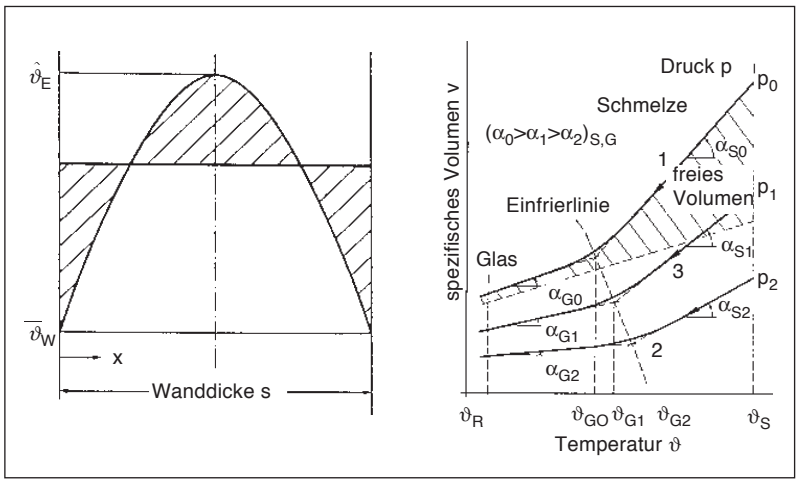
9 Wärmeinhalt einer Kunststoffschmelze

10 Zusammenfassung

11 Literaturverzeichnis



$$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\vartheta_M - \overline{\vartheta}_W}{\hat{\vartheta}_E - \overline{\vartheta}_W}\right)$$



1 Einführung

Der Spritzgießprozess von thermoplastischen Kunststoffen gehört zu den Verarbeitungsverfahren, bei denen sehr komplexe physikalische Prozesse stattfinden.

Die zu verarbeitende Formmasse muss zunächst aufgeschmolzen werden, um sie dann mit hohem Druck in eine „kalte" Form zu spritzen. Bedingt durch dieses kältere Werkzeug kühlt das abgeformte Spritzgussteil ab und kann nach der Erstarrung aus dem Werkzeug entformt werden.

Die einzelnen Prozessschritte – Aufschmelzen, Einspritzen, Abkühlen – bestimmen die Qualität des späteren Formteils.

Einen großen Anteil an einer qualitätsbewussten und wirtschaftlichen Herstellung von Spritzgussteilen hat die Werkzeugtemperierung. Es ist bekannt, dass sie sehr entscheidende Qualitätsmerkmale wie das Oberflächenaussehen und den Verzug beeinflussen kann.

Eine gute Werkzeugtemperierung hilft aber auch, Kosten zu sparen, da durch sie die Kühlzeit und damit auch die Zykluszeit optimiert werden kann.

Um die Wichtigkeit der Kühlung in einem Spritzgießwerkzeug zu verstehen, ist es sinnvoll, sich mit den thermodynamischen Prozessen während des Spritzgießvorgangs zu befassen.

Hierdurch erhält man Antworten auf die folgenden Fragen: Wie verändern sich die Temperaturen in der Kunststoffschmelze in den einzelnen Prozessabschnitten und was passiert in einer abkühlenden Kunststoffschmelze? Wo liegen die Unterschiede zwischen den amorphen und teilkristallinen Kunststoffen?

2 Schmelzetemperatur

2.1 Schmelzetemperatur während der Formteilfüllung

Beim Spritzgießen von Thermoplasten wird Granulat in einer Schnecke aufgeschmolzen und in den Schneckenvorraum gefördert.

Nach dem Einspritzsignal fährt die Schnecke nach vorn und drückt die Kunststoffschmelze durch die Maschinendüse und das Anguss-Anschnitt-System in die Kavität. Der Füllvorgang beansprucht die Schmelze mechanisch und thermisch oft stark. Haupteinflussgrößen sind hierbei:

- Düsen-Anguss-Geometrie
- Formteilwanddicke
- Füllgeschwindigkeit
- Temperatur der Formmasse
- Werkzeugwandtemperatur

Durch diese Beanspruchung während des Fließens kann es infolge von inneren Reibungsvorgängen zu Temperaturerhöhungen in der Schmelze kommen.

Experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Angüssen und unterschiedlichen Materialien [1] haben gezeigt, dass die mittlere Temperaturerhöhung ΔϑM näherungsweise als Funktion des Druckverlustes Δp beschrieben werden

$$\Delta\overline{\vartheta}_M = \frac{\Delta p}{\rho \cdot c_p}$$

$\Delta\overline{\vartheta}_M$ = mittlere Temperaturerhöhung der Schmelze
Δp = Druckdifferenz (Druckverlust) auf einem Fließabschnitt im Anguss-Anschnitt-System
ρ = Dichte der Schmelze
c_p = spezifische Wärmekapazität

Die besondere Bedeutung dieser Gleichung liegt darin, dass sie den Vorgang unabhängig von der Geometrie, der Schmelzetemperatur, der Wandtemperatur und den rheologischen Stoffwerten beschreiben kann. Unberücksichtigt bleibt, wie erwähnt, der Wärmeaustausch mit dem kalten Werkzeug.

Bei der genaueren Betrachtung der Schmelzetemperatur während der Formteilfüllung stellt man fest, dass der Einfluss der Kühlung auf die Schmelzetemperatur erheblich sein kann. Aufgrund der Wärmeabfuhr zur Werkzeugwand ergibt sich über dem Fließkanalquerschnitt ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Temperaturprofil. Bild 1 zeigt ein typisches Temperaturprofil in einer strömenden Kunststoffschmelze in einem gekühlten Spritzgießwerkzeug.

Unmittelbar an der Werkzeugwand ist die Schmelze eingefroren. Es ergibt sich eine in ihrer Dicke von den Verarbeitungsbedingungen (Einspritzzeit, Schmelze- und Werkzeugwandtemperatur) abhängige, eingefrorene Randschicht. In der Fließkanalmitte liegt eine gleichmäßig hohe Temperaturverteilung vor. Zwischen Kanalmitte und Werkzeugwand kann es zu den dargestellten Temperaturspitzen kommen. Hier liegt die größte Scherbeanspruchung der Schmelze vor, es wird am stärksten Wärme durch innere Reibung erzeugt.

Das Temperaturprofil kann an verschiedenen Stellen in der Kavität (angussnah, angussfern) unterschiedlich sein. So kann beispielsweise durch eine zunehmend eingefrorene Randschicht das Temperaturmaximum (Temperaturspitzen in Bild 1) zur Kanalmitte wandern. Diese Situation ist in Bild 2 dargestellt.

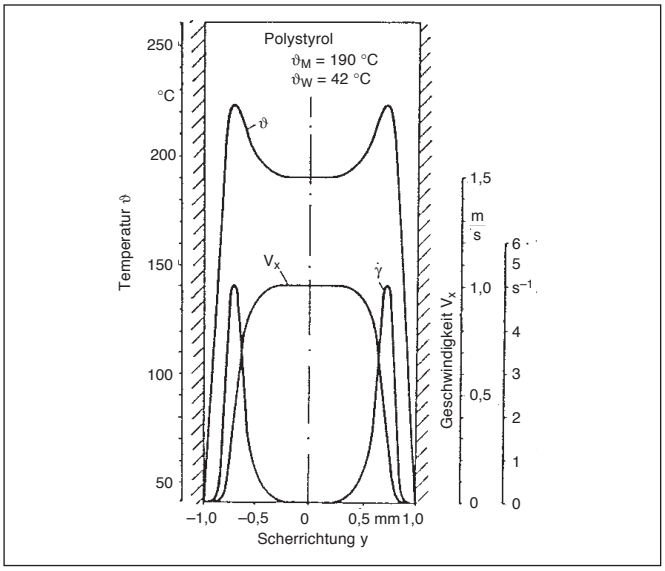


Bild 1: Temperaturprofil in einer strömenden Kunststoffschmelze [1]

kann, wobei angenommen wird, dass kein Wärmeaustausch mit dem Werkzeug auftritt (adiabat => $Q_{ab} = 0$).

2.2 Schmelzetemperatur in der Nachdruckphase und in der Kühlphase

Der volumetrischen Füllung folgt die Nachdruckphase, in der zum Ausgleich der Volumenkontraktion so lange wie möglich weiter Schmelze in den Werkzeughohlraum gefördert wird. Da der Schmelzefluss im Vergleich zur Füllphase sehr klein ist, tritt keine Temperaturerhöhung mehr durch innere Reibung auf. Die Temperatur der Schmelze nimmt kontinuierlich ab.

Nach dem Ende der Nachdruckphase schließt sich die Restkühlphase an, in der die Temperatur der nun fast vollständig erstarrten Kunststoffschmelze bis auf Entformungstemperatur abnimmt.

Im Bild 3 sind berechnete Temperaturprofile während der Kühlphase über den Querschnitt eines Formteils dargestellt (Platte s = 3 mm, Werkstoff ABS). Mit zunehmender Zeit flacht das Temperaturprofil immer weiter ab. Nach etwa 16 s ist die Temperatur in der Mitte auf Entformungstemperatur gesunken.

Aus den vorausgegangenen Ausführungen ist ersichtlich, dass sich die Schmelzetemperatur während des gesamten Spritzgießprozesses ständig verändert. Neben den Verarbeitungsparametern Einspritzzeit, Einspritzmassetemperatur und dem Anguss-Anschnitt-System hat auch die Werkzeugkühlung einen großen Einfluss auf die Temperatur in der Schmelze. Vor allen Dingen trägt die Werkzeugkühlung den entscheidenden Anteil daran, wie gleichmäßig und wie schnell dem Kunststoff die Wärme entzogen wird, um eine Entformung zuzulassen.

Was passiert in einer abkühlenden Kunststoffschmelze? Wo liegt ihre Einfriertemperatur? Ab wann ist eine Entformung möglich? Und wie groß ist der Wärmeinhalt, d. h., wie groß ist der Leistungsbedarf beim Aufheizen oder Abkühlen von Kunststoffen? Die Klärung dieser Fragen soll im nächsten Abschnitt geschehen.

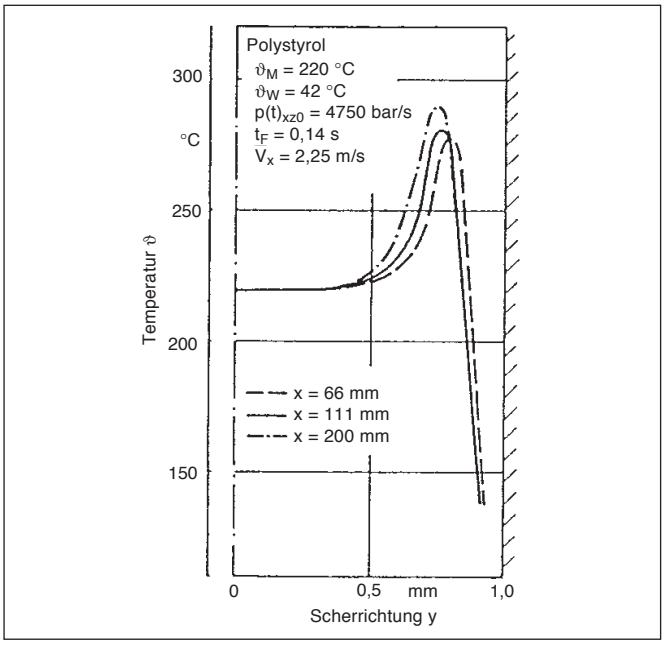


Bild 2: Temperaturprofil an verschiedenen Fließorten zum Zeitpunkt der Formteilfüllung [1]

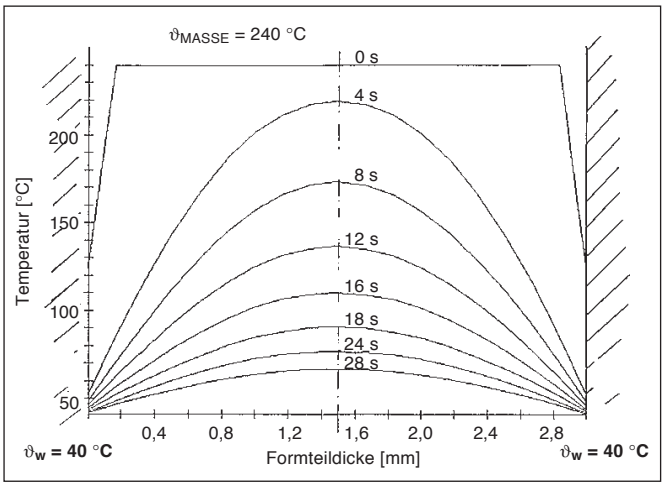


Bild 3: Temperaturprofile zu verschiedenen Zeiten in einer abkühlenden Thermoplastschmelze (berechnet)

3 Abkühlen der Schmelzen von Thermoplasten, thermodynamischer Zustandsverlauf

Wenn einer Polymerschmelze Wärme entzogen wird, verlieren die Ketten ihre Beweglichkeit und Segment um Segment wird von den Nebenvalenzfeldern der Nachbarn eingefangen. Die Schmelze wird hochviskos.

Zur physikalischen Interpretation der Abkühlung einer Polymerschmelze eignet sich die so genannte „Freie-Volumen-Theorie“ besonders gut. Hiernach kann eine Polymerschmelze als eine aus Leerstellen gesättigte Flüssigkeit aufgefasst werden (Bild 4).

$V_g = V_m + V_f$
V_g = Gesamtvolumen
V_m = Partialvolumen der Moleküle (Schwingungsausdehnungsvolumen)
V_f = freies Volumen (Leerstellenvolumen)

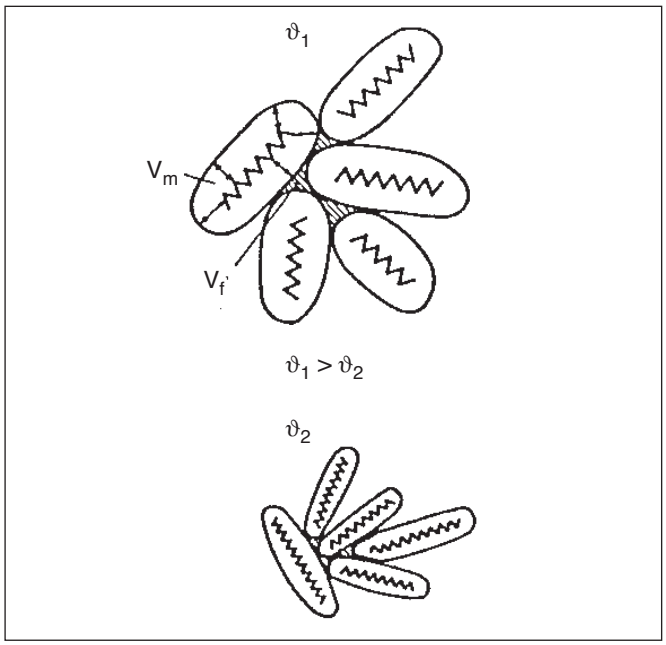


Bild 4: Freies-Volumen-Modell nach [2]

Das Gesamtvolumen V_G ergibt sich aus der Summe des Partialvolumens der Moleküle V_m (Schwingungsausdehnungsvolumen der Moleküle) und des Leerstellenvolumens bzw. freien Volumens V_f. Veranschaulichen lässt sich die Änderung des Schmelzevolumens bei veränderter Temperatur in einem Druck-Volumen-Temperatur-Diagramm (p-v-ϑ-Diagramm) (Bild 5).

Die untere Eintragung in Bild 5 zeigt den Verlauf eines rein kristallinen Stoffes. Bei der Kristallisationstemperatur T_K kristallisiert der Stoff vollständig aus. Das freie Volumen wird zu Null. Im weiteren Verlauf verändert sich nur noch das Schwingungsausdehnungsvolumen.

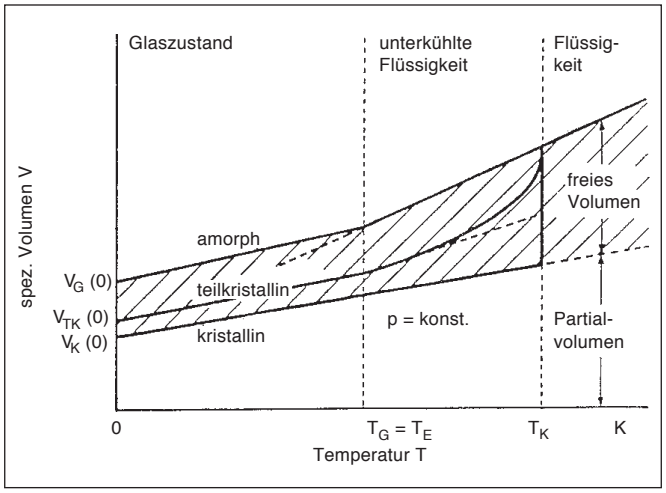


Bild 5: Druck-Volumen-Temperatur-Diagramm (p-v-ϑ-Diagramm)

Bei amorphen Thermoplasten (obere Kurve) ist eine Unterkühlung der Schmelze bei abnehmender Temperatur festzustellen. Nach dem Unterschreiten der Glastemperatur T_G nimmt das spezifische Volumen weniger stark ab (geringe Steigung der Geraden). Unterhalb von T_G befindet sich das Material in einem Glaszustand – „unterkühlte Flüssigkeit“. Das bei der Glastemperatur vorhandene freie Volumen wird eingefroren und bleibt im Glaszustand nahezu konstant.

Der mittlere Kurvenverlauf stellt das Volumen-Temperatur-Verhalten für einen teilkristallinen Kunststoff dar. Bei dieser Stoffklasse liegen bei der Abkühlung Polymerketten teilweise dicht parallel nebeneinander und bilden submikroskopisch feine Kristallite. Innerhalb der Kristallite besteht bis auf wenige Defektstellen eine fast vollkommene Ordnung.

Im Gegensatz zu den rein kristallinen Stoffen gibt es hier anstelle des Kristallisationspunktes einen Kristallisationsbereich. Neben den teilkristallinen treten auch amorphe Bereiche auf. Diese gehen beim Unterschreiten von T_G in den Glaszustand über. Das freie Volumen ist – bedingt durch die kristallinen Anteile – geringer als bei den rein amorphen Materialien.

Die dargestellten Überlagerungen der Zustandsverläufe von amorphen und teilkristallinen Thermoplasten bedingen für jede Temperatur eine gewisse Zeit, in der sich das zugehörige spezifische Volumen einstellen kann. Abkühl- oder Aufheizgeschwindigkeit sowie Umgebungsdruck haben einen großen Einfluss auf den Zustandsverlauf.

3.1 Einfluss des Umgebungsdruckes

Wird eine Kunststoffschmelze mit Druck beaufschlagt und dann abgekühlt, so stellen sich zu jeder Temperatur geringere spezifische Volumina ein. Die Glastemperatur (bei amorphen Thermoplasten) und die Kristallisationstemperatur (teilkristalline Thermoplaste) verschieben sich zu höheren Temperaturen. Bild 6 zeigt für einen amorphen Kunststoff (links) und für einen teilkristallinen Kunststoff (rechts) die Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Temperatur bei unterschiedlichen Drücken.

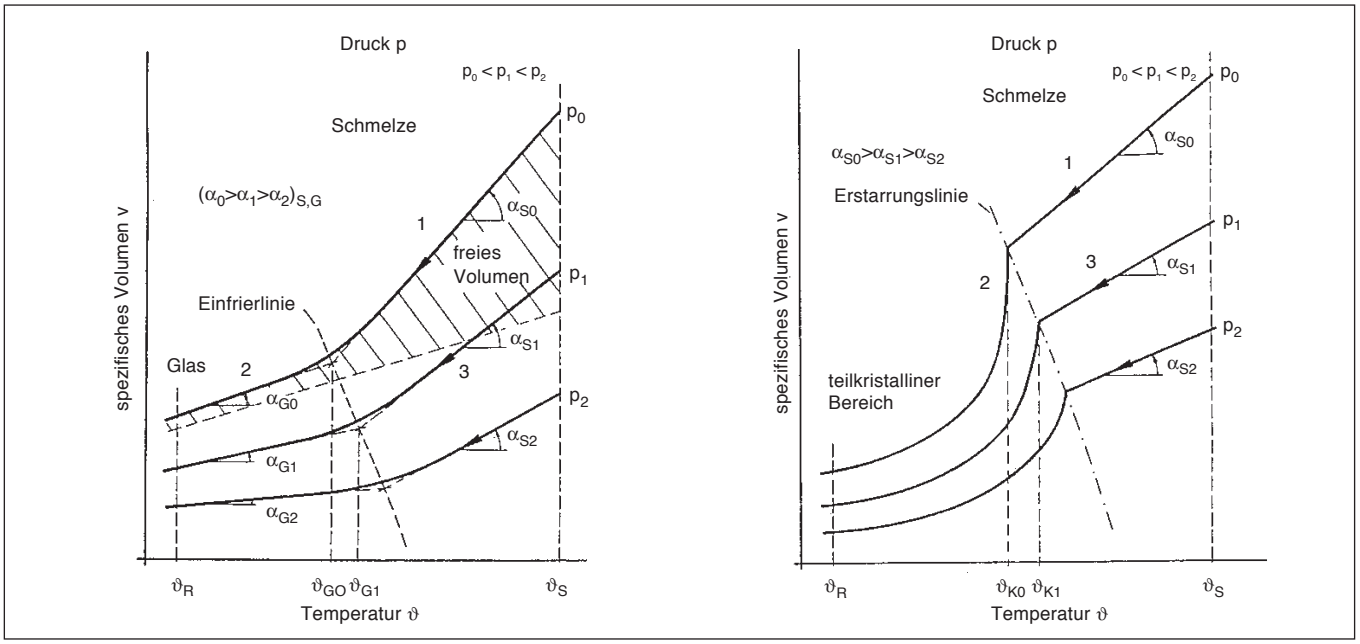


Bild 6: p-v-ϑ-Diagramm eines amorphen (links) und teilkristallinen (rechts) Kunststoffs bei langsamer Abkühlung (Quelle: IKV)

Das Bild verdeutlicht die Unterschiede beider Materialklassen beim Übergang aus den Schmelze- in den Feststoffbereich. Das spezifische Volumen ist bei den teilkristallinen Materialien wegen des kristallierenden Gefügeanteils im Allgemeinen geringer als bei den amorphen Thermoplasten.

Bei teilkristallinen Materialien zeigt der Kurvenverlauf einen starken Knick. Diese plötzliche Veränderung des spezifischen Volumens ist durch den Beginn der Kristallisation bedingt. Die Unstetigkeitsstelle kennzeichnet die Kristallisationstemperatur ϑ_K. Unterhalb dieser Temperatur beruht die Abnahme des spezifischen Volumens neben der verringerten thermischen Schwingung der Moleküle hauptsächlich auf der fortschreitenden Kristallisation. Die Überlagerung beider ergibt den parabelförmigen Kurvenverlauf im teilkristallinen Bereich.

3.2 Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit

Das sich bei Raumtemperatur einstellende spezifische Volumen ist ebenfalls von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Bei amorphen Thermoplasten verschiebt sich die Glastemperatur zu hohen Werten bei hoher Abkühlgeschwindigkeit. Die Zeitspanne, in der sich für jede Temperatur ein innerer Gleichgewichtszustand einstellen kann, nimmt ab. Es kann sich bereits bei hoher Temperatur kein Gleichgewichtszustand einstellen.

In Bild 7 ist bei zwei Abkühlgeschwindigkeiten die Verschiebung der Glastemperatur für ein amorphes Material dargestellt. Bei der höheren Einfriertemperatur wird ein größeres freies Volumen eingefroren, wodurch auch das Gesamtvolumen im Feststoffbereich größer ist.

Da die Moleküle das Bestreben haben, den Zustand des inneren Gleichgewichts zu erreichen, kann es nach einer Fertigung zum nachträglichen „Abbau“ des zu großen freien Volumens kommen, und zwar umso schneller, je höher die Einsatztemperatur des Fertigteils ist – Stichwort „Nachschwindung“.

Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit kommt es allerdings nicht zur weiteren Zunahme des spezifischen Volumens und auch nicht zur weiteren Veränderung der Glastemperatur. Spezifisches Volumen und Glastemperatur streben einem Grenzwert zu.

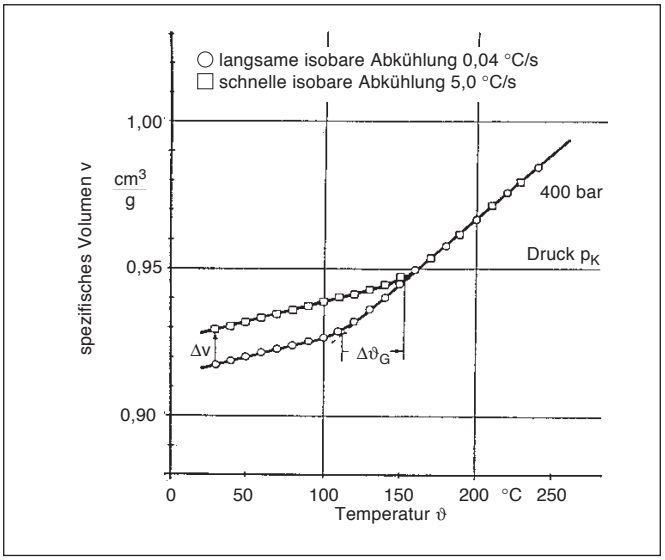


Bild 7: Vergleich einer langsamen und einer schnellen isobaren Abkühlung eines amorphen Thermoplasten (Quelle: IKV)

In Bild 8 ist die Abhängigkeit des spezifischen Volumens bei RT und Normalatmosphäre von der Abkühlgeschwindigkeit und dem Druck während der Abkühlung dargestellt.

Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wird das spezifische Volumen zwar größer, strebt aber relativ rasch einen Grenzwert an. Das bedeutet, dass bei praxisüblichen Abkühlgeschwindig-keiten > 20 °C/s mit einer konstanten Erhöhung des Volumens zu rechnen ist.

Bei teilkristallinen Kunststoffen stellt man bei höheren Abkühlgeschwindigkeiten ebenfalls ein größeres spezifisches Volumen fest. Die Kristallisationsbedingungen werden verschlechtert. Der Kristallisationsgrad ist geringer, das spezifische Volumen wird größer. Bei erhöhter Abkühlgeschwindigkeit bleibt die Kristallisationstemperatur aber fast konstant. Im Falle der höheren Abkühlgeschwindigkeit kann es aber zur Nachkristallisation und damit zu einer späteren Verringerung des spezifischen Volumens kommen. Dies ist oft der Grund für Formteilverzug und Maßabweichungen.

Besonders bei den teilkristallinen Thermoplasten ist deshalb eine gute und gleichmäßige Werkzeugkühlung notwendig. Durch den „Verarbeitungsprozess im Werkzeug" werden die Formteileigenschaften bestimmt. Gelten zum Beispiel für alle Formteilbereiche gleiche Abkühlgeschwindigkeiten, erreicht durch gleiche Abkühlbedingungen, so ist ein großer Schritt in Richtung gleiche Formteileigenschaften getan.

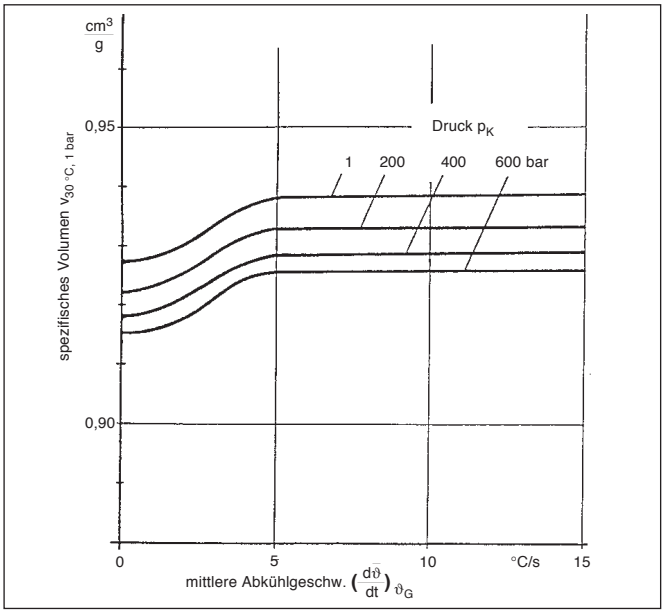


Bild 8: Spezifisches Volumen als Funktion von Abkühlgeschwindigkeit und Druck eines amorphen Thermoplastes (Quelle: IKV)

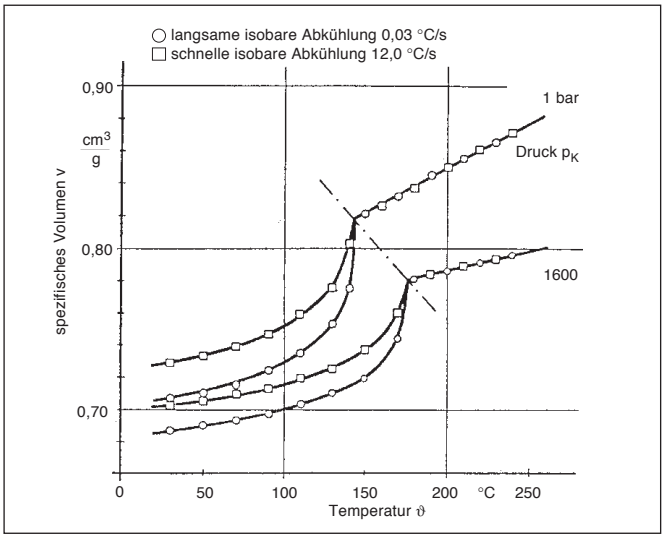


Bild 9: Vergleich einer langsamen und schnellen isobaren Abkühlung eines teilkristallinen Thermoplastes bei zwei Drücken (Quelle: IKV)

4 Schmelztemperatur

Aus der Betrachtung des p-v-ϑ-Verhaltens ist ersichtlich, dass Thermoplaste keine Schmelztemperatur in dem Sinne haben, dass bei einer bestimmten Temperatur der Stoff den Aggregatzustand wechselt (Schmelze → Feststoff). Thermoplaste haben einen Schmelzbereich bzw. einen Einfriertemperaturbereich.

Den Übergang bzw. den Beginn des Übergangs vom Schmelze- in den Feststoffbereich nennt man bei amorphen Thermoplasten Glas- bzw. Einfriertemperatur. Ihr Wert ist von der Abkühlgeschwindigkeit und vom Umgebungsdruck abhängig (siehe Bilder 6 und 7). Bei teilkristallinen Thermoplasten spricht man von der Kristallisationstemperatur. Ihr Wert ist druckabhängig, wohingegen kaum ein Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit vorliegt (Bild 9). Allerdings können Unterschiede bei der Abkühlung und dem Aufschmelzen von teilkristallinen Thermoplasten auftreten.

Bild 10 zeigt den Unterschied zwischen einer langsamen isobaren Abkühlung und Erwärmung bei Umgebungsdruck und und einer langsamen isobaren Abkühlung und Erwärmung bei 400 bar für einen Polypropylentyp. Erst deutlich oberhalb der im langsamen Abkühlversuch ermittelten Kristallisationstemperatur wird die Schmelzegerade erreicht. Der Berührungspunkt kennzeichnet das Schmelzende der Kristallite und wird als Kristallitschmelztemperatur ϑ_{KS} bezeichnet.

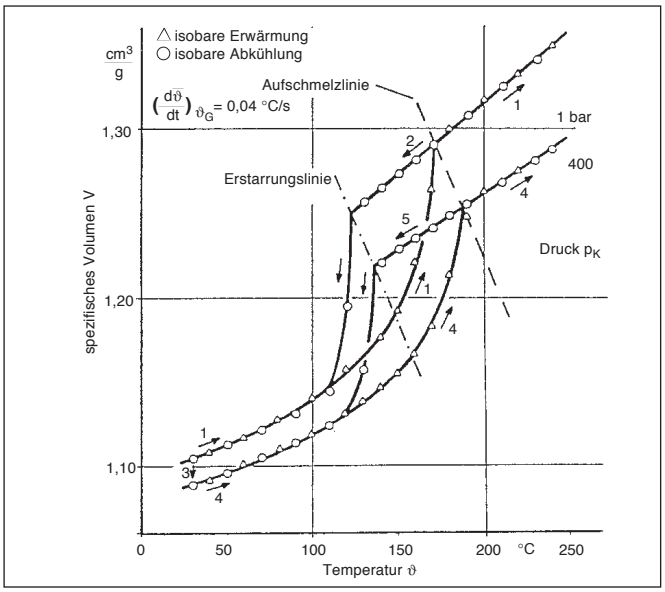


Bild 10: langsame isobare Abkühlung und Erwärmung eines teilkristallinen Thermoplastes (Quelle: IKV)

Die Hysterese zwischen Aufheizen und Abkühlen kommt durch eine schon bei sehr geringen Abkühlgeschwindigkeiten unterdrückte Kristallisation während der Abkühlung zustande [3], d. h. der Kristallisationsbeginn startet bei niedrigeren Temperaturen.

Bei praxisüblichen Abkühlgeschwindigkeiten (>> 0,02 °C/s) ist die Absenkung der Kristallisationstemperatur nahezu konstant (Bild 11).

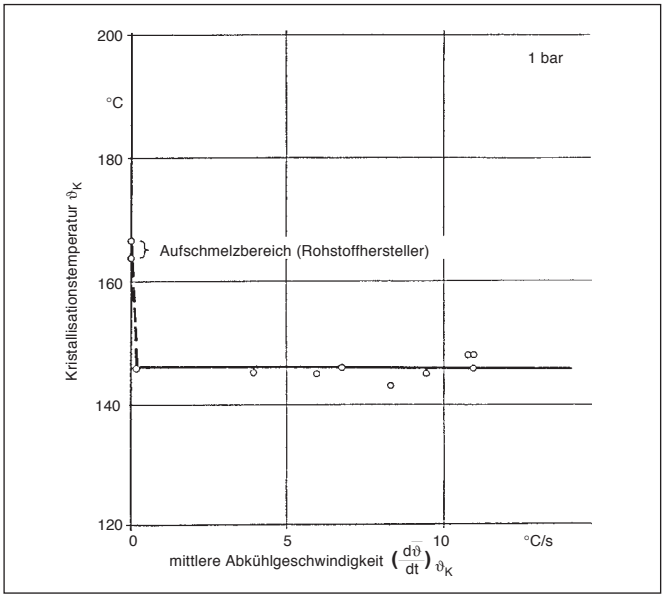


Bild 11: Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit auf die Kristallisationstemperatur (Quelle: IKV)

5 Zustandsverlauf beim Spritzgießen

Mit Hilfe der vorgestellten p-v-ϑ-Diagramme lässt sich der thermodynamische Zustandsverlauf beim Spritzgießen in den drei Prozessabschnitten Formteilfüllvorgang, Nachdruckphase und Restkühlphase darstellen.

Dies geschieht durch die zeitgleiche Übertragung der Drücke und der Temperaturen in den Prozessabschnitten in ein p-v-ϑ-Diagramm. Bild 12 zeigt einen gemessenen, angussnahen Druckverlauf und einen berechneten mittleren Temperaturverlauf im Formteil während des Spritzgießzyklus. Die gekennzeichneten Punkte werden in das p-v-ϑ-Diagramm für den Werkstoff übertragen (Bild 13).

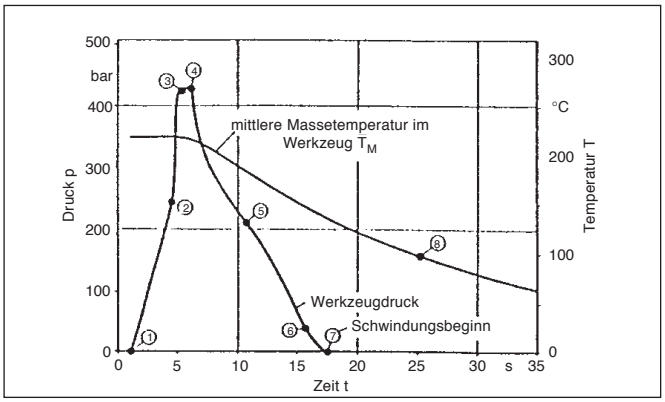


Bild 12: Druck- und Temperaturverlauf während des Spritzgießzyklus [4]

Die in den Bildern 12 und 13 eingetragenen Zustandspunkte haben folgende Bedeutung:

1 Beginn der Formfüllung (Schmelze berührt den Druckaufnehmer)
2 Formnest ist volumetrisch gefüllt.
3 Ende der Kompressionsphase
4 Umschaltung auf Nachdruck (teilweise Entladung der Form, Schmelzefluss in den Schmelzevorraum)
5 Nachdruckniveau
6 Anschnitt ist eingefroren.
7 Druck ist auf Atmosphärendruck abgesunken (Beginn der Schwindung).
8 Mittlere Massetemperatur hat die Einfriertemperatur erreicht.
9 Entformung
10 Formteil hat Raumtemperatur erreicht.

Anhand solcher Zustandsverläufe lassen sich für jeden Prozessabschnitt über den Schwindungsverlauf und die Schmelzebewegung wichtige Aussagen machen. Von Bedeutung für den Schwindungsbeginn ist der in den Bildern dargestellte Punkt 7 (Erreichen des Atmosphärendrucks). Durch unterschiedliche Nachdruckprofile oder veränderte Abkühlbedingungen kann dieser Punkt bei unterschiedlichen Temperaturen liegen. Die Schwindung lässt sich dadurch beeinflussen.

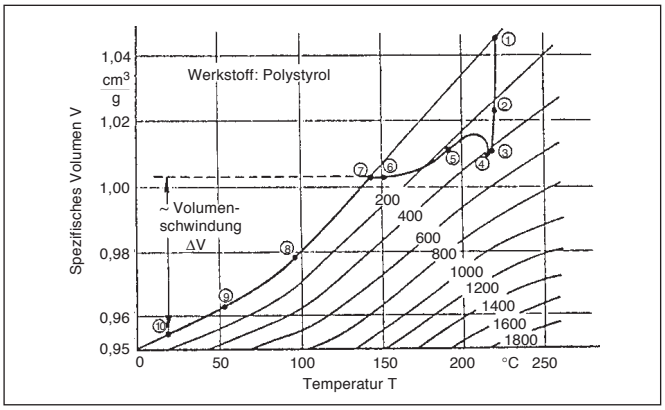


Bild 13: Zustandsverlauf beim Spritzgießen [4]

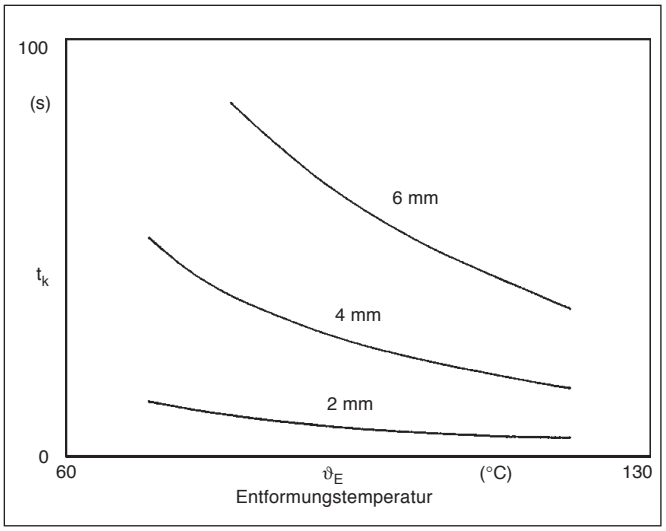


Bild 14: Einfluss der Entformungstemperatur auf die Kühlzeit

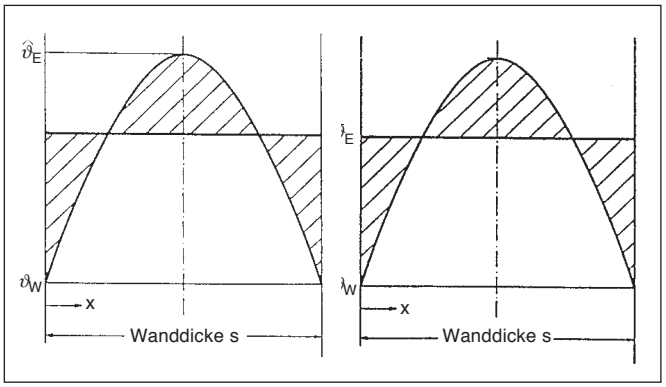


Bild 15: Temperaturprofil zum Zeitpunkt der Entformung in einem Thermoplastformteil, Entformungstemperatur $\hat{\vartheta}_E$ in der Mitte

Bild 16: Mittlere Entformungstemperatur $\bar{\vartheta}_E$

Abkürzungen	Thermoplaste	Mittlere Entformungstemperaturen (°C) (Richtwerte)*
PC-HT	Apec® HT	150
(PC+ABS)	Bayblend®	110
PC	Makrolon®	130

*Typabhängig können Abweichungen vom Tabellenwert erforderlich sein.

Bild 17: Empfohlene mittlere Entformungstemperaturen für einige Thermoplaste [5]

6 Entformungstemperatur und Kühlzeit

Ein Spritzgussteil kann oder darf frühestens dann entformt werden, wenn es so weit abgekühlt ist, dass es formstabil ist. Starke Markierungen der Auswerferstifte oder ihr Durchstoßen sollen verhindert werden.

Eine kurze Zykluszeit erfordert die Kenntnis der materialabhängigen Entformungstemperatur notwendig. Oftmals wird aus Sicherheitsgründen der Spritzling zu lange im Werkzeug belassen, obwohl die Kühlzeit zum Erreichen der Entformungstemperatur längst überschritten ist.

Die Kenntnis der Entformungstemperatur ist aus wirtschaftlichen Gründen wichtig. Bild 14 zeigt den Einfluss der Entformungstemperatur auf die zu erwartende Kühlzeit. Je niedriger die Entformungstemperatur ist, desto länger die Kühlzeit.

Definitionsgemäß versteht man unter der Entformungstemperatur die Temperatur, welche in der mittleren Schicht der Wanddicke an einer Stelle des Formteils zur Zeit der Entformung herrscht. Das nachfolgende Bild 15 zeigt ein Temperaturprofil in einem Thermoplastformteil zum Zeitpunkt der Entformung.

Daneben findet man häufig die Angabe einer mittleren Entformungstemperatur ϑ_E. Diese ist der Temperaturwert als integraler Mittelwert aus dem Temperaturprofil zum Zeitpunkt der Entformung.

Wie erhält man praxisgerechte Entformungstemperaturen?

Da gibt es zunächst einmal den Rohstoffhersteller, der für seine Produkte mittlere Entformungstemperaturen empfiehlt (Bild 17).

Liegen keine empfohlenen Richtwerte für die Entformungstemperatur vor, so lässt sie sich aus der Schubmodulkurve des entsprechenden Werkstoffs bestimmen [6]:

Um eine Entformung zu garantieren, darf die mittlere Temperatur $\bar{\vartheta}_E$ oder die Temperatur in der Formteilmitte $\hat{\vartheta}_E$ nicht in einem Bereich liegen, in dem der Kunststoff „fließt“ und keine Kräfte aufnehmen kann. Diese Temperatur kann Schubmodulkurven entnommen werden. Bild 18 zeigt die Schubmodulkurve für ein ABS. Oberhalb einer Temperatur von ca. 106 °C fällt der Schubmodul steil ab, es ist hier also keine Formstabilität mehr gewährleistet. Die maximal mögliche Entformungstemperatur liegt somit bei ca. 106 °C.

ϑ_E max = 106 °C

Liegen keine Schubmodulkurven vor, so kann aus den zuvor beschriebenen p-v-ϑ-Diagrammen für das betreffende Material eine maximal zulässige Entformungstemperatur ermittelt werden. Dies kann für amorphe Stoffe die Erweichungstemperatur bzw. Glastemperatur und für teilkristalline Stoffe die Kristallisationstemperatur sein. Für das in Bild 18 (Schubmodulkurve) gezeigte ABS ergibt sich aus dem p-v-ϑ-Diagramm eine Erweichungstemperatur von etwa 110 °C, welche mit dem Wert aus der Schubmodulkurve annähernd übereinstimmt.

Liegen keine Kurven vor, so kann die Entformungstemperatur auch der Wärmeformbeständigkeitstemperatur (Vicat-Temperatur) gleichgesetzt werden.

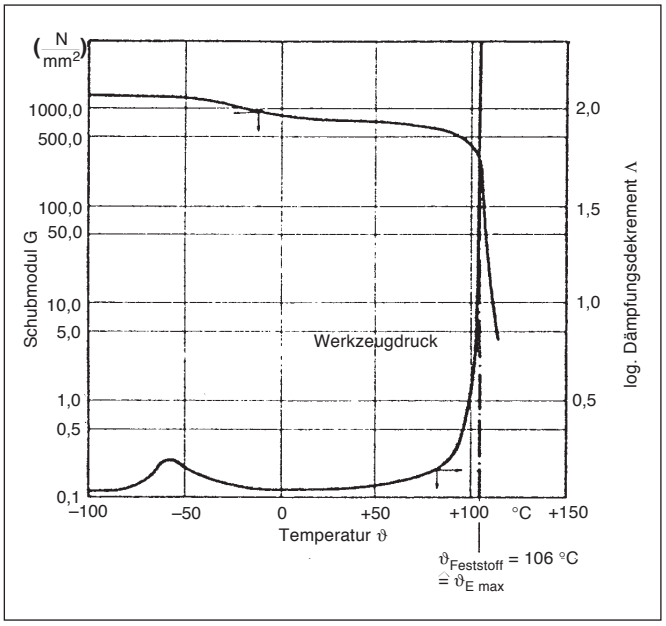


Bild 18: Bestimmung der maximalen Entformungstemperatur aus einer Schubmodulkurve, Material ABS

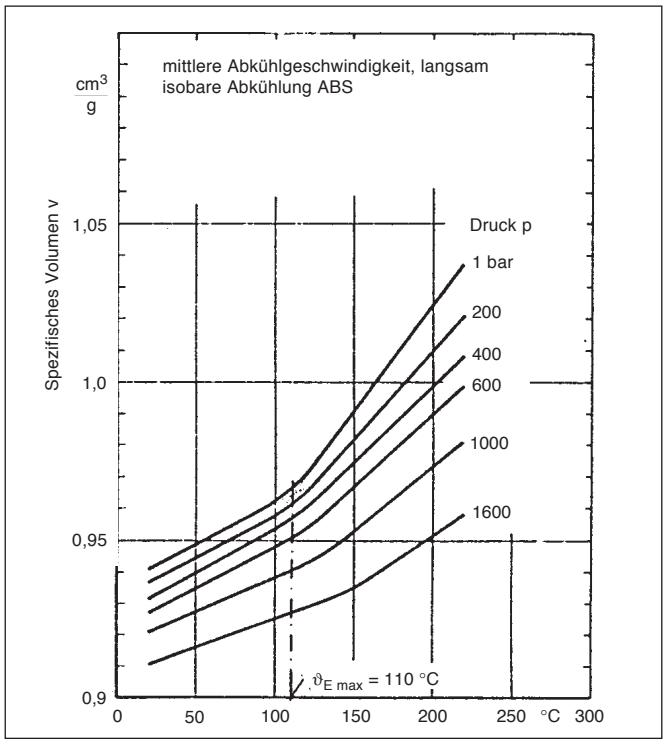


Bild 19: Entformungstemperatur aus dem p-v-ϑ-Diagramm, Material ABS

Messung der Entformungstemperatur [7]

Wie bereits erwähnt, ist die Entformungstemperatur ein wichtiges Kriterium für die erforderliche Kühlzeit und die Formstabilität des Spritzlings bei der Entformung. Sie sollte daher möglichst genau am gerade entformten Formteil kontrolliert werden.

Nach dem Auswerfen steigt die Formteiloberflächentemperatur relativ schnell auf einen Spitzenwert an und fällt dann allmählich ab (Bild 20). Hervorgerufen wird dieser Anstieg durch den Ausgleich des Temperaturprofils, das sich während der Abkühlung ausgebildet hat (besonders ausgeprägt bei größeren Wanddicken).

Als relevante Entformungstemperatur ist der gemessene Maximalwert zu verwenden, da er letztlich ein Maß für die mittlere Formteiltemperatur darstellt. Wichtig ist die Messung der Entformungstemperatur sowohl für die Optimierung der Kühlzeit als auch für die Kontrolle der Werkzeugtemperatur. Bei einer guten Werkzeugtemperierung Voraussetzung: keine großen Wanddickenunterschiede im Formteil) sollte die gemessene mittlere Entformungstemperatur in allen Bereichen des Formteils möglichst gleich sein. Unterschiede deuten auf eine unzureichende Werkzeugtemperierung hin.

Zur Messung der Entformungstemperatur eignen sich temperierbare Kontaktfühler oder berührungslos messende Infrarotmesszellen.

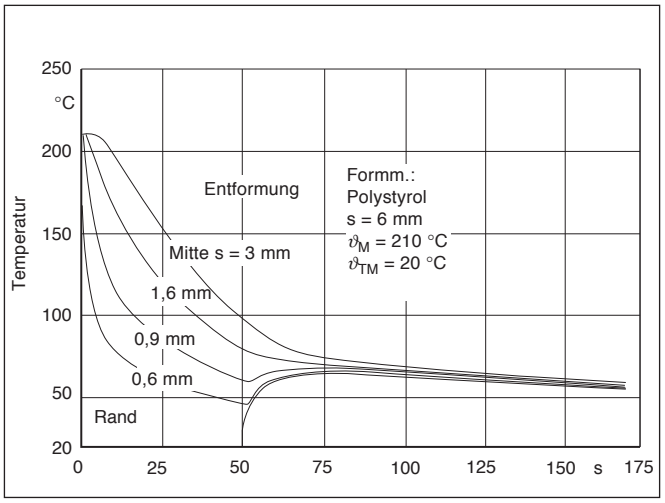


Bild 20: Temperaturverlauf in einem Kunststofformteil vor und nach der Entformung

7 Kühlzeit

Die Kühlzeit beim Spritzgießen von Thermoplasten beginnt genau genommen mit dem Einspritzsignal und endet mit dem Signal „Werkzeug öffnen". Denn sobald die heiße Kunststoffschmelze die kältere Werkzeugwand an irgendeiner Stelle im Werkzeug berührt, beginnt für diesen Bereich die Kühlung.

Allerdings soll während der Füllphase das Einfrieren der Schmelze verhindert werden. Der Wärmeverlust zur Werkzeugwand soll durch die Fließwärme ausgeglichen werden. Die Hauptwärmemenge wird in der Standzeit (Nachdruckphase und Restkühlphase) abgegeben.

Zur Abschätzung der Kühlzeit bzw. des Zeitpunktes, bis die Entformungstemperatur (siehe oben) erreicht ist, können reine Abkühlgleichungen verwendet werden. Für eine flächige Platte, bei der nur der Wärmeaustausch in Dickenrichtung erfolgt, kann man mit nachfolgender Gleichung die Kühlzeit abschätzen (weitere Kühlzeitgleichungen siehe Technische Information „Optimierte Werkzeugtemperierung“):

$$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\vartheta_M - \overline{\vartheta}_W}{\widehat{\vartheta}_E - \overline{\vartheta}_W}\right)$$

t_K = Kühlzeit
s = Wanddicke
a_{eff} = effektive Temperaturleitfähigkeit
ϑ_M = Massetemperatur nach Ende der Füllphase
ϑ_W = mittlere Werkzeugwandtemperatur
$\widehat{\vartheta}_E$ = Entformungstemperatur in der Formteilmitte

Im vergangenen Kapitel wurde erwähnt, dass die richtige Entformungstemperatur auch entscheidend die Wirtschaftlichkeit der Produktion beeinflussen kann. Ein einfaches Beispiel soll dies belegen.

Für ein ABS-Formteil wird eine Entformungstemperatur von ca. 100 °C empfohlen. Wie verändert sich nun die Kühlzeit, wenn anstatt bei 100 °C bei ca. 80 °C entformt wird?

Beispiel: „Entformungstemperatur“

Platte mit Wanddicke:	s = 3 mm
Effektive Temperaturleitfähigkeit für ABS:	a_{eff} = 0,08 mm²/s
Massetemperatur nach der Füllung:	ϑ_M = 240 °C
Mittlere Werkzeugwandtemperatur:	ϑ_W = 50 °C
Entformungstemperatur in der Formteilmitte:	$\widehat{\vartheta}_{E1}$ = 100 °C
	$\widehat{\vartheta}_{E2}$ = 80 °C

Kühlzeit 1:

$$t_{K1} = \frac{3^2\,mm^2}{\pi^2 \cdot 0{,}08\ mm^2/s} \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{240\ °C - 50\ °C}{100\ °C - 50\ °C}\right)$$

$t_{K1} = 11.3986 \cdot 1{,}5766$

$t_{K1} = 18$ s

Kühlzeit 2:

$$t_{K2} = 11.3986 \cdot \ln\left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{240\ °C - 50\ °C}{80\ °C - 50\ °C}\right)$$

$t_{K2} = 11{,}3986 \cdot 2{,}0874$

$t_{K2} = 24$ s

Dieses einfache Beispiel zeigt – auch wenn es sich nur um eine Abschätzung handelt –, dass sich bei zu niedriger Entformungstemperatur die Kühlzeit stark ändert. Im Beispiel wird durch die um 20 °C niedrigere Entformungstemperatur die Kühlzeit um ca. 30 %(!) verlängert.

Neben der Entformungstemperatur hat auch die Werkzeugwandtemperatur einen Einfluss auf die Länge der Kühlzeit (Einfluss der Wanddicke s und der Massetemperatur sowie Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Qualität der Formteile siehe Technische Information „Optimierte Werkzeugtemperierung“).

Im Bild 21 ist eine berechnete Werkzeugoberflächentemperatur auf der Düsenseite für ein kastenförmiges Formteil dargestellt. Aufgrund der Lage der Kühlkanäle und der übrigen Temperierverhältnisse (Kühlmediumtemperatur, Strömungsgeschwindigkeit) ergibt sich die dargestellte Temperaturverteilung. Die Deckfläche und die Seitenflächen des Kästchens werden nicht optimal temperiert.

Das Kästchen besitzt eine gleichmäßige Wanddicke, und trotzdem ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Werkzeugoberflächentemperaturen unterschiedliche Kühlzeiten für die jeweiligen Bereiche.

Zur Abschätzung der Kühlzeit bei den verschiedenen Wandtemperaturen wird das obige Beispiel erneut aufgegriffen.

Beispiel: „Werkzeugtemperatur“

Wanddicke:	s = 3 mm
Effektive Temperaturleitfähigkeit für ABS:	a_{eff} = 0,08 mm²/s
Entformungstemperatur:	ϑ_E = 100 °C
Massetemperatur nach der Füllung:	ϑ_M = 240 °C
Wandtemperatur 1 – Deckelmitte und Seitenflächen:	$\vartheta_{WD} \approx$ 50 °C
Wandtemperatur 2 – Deckelrand:	$\vartheta_{WR} \approx$ 30 °C

Für die zwei Wandtemperaturen ergeben sich mit der Kühlzeitformel und den angegebenen Bedingungen zwei Kühlzeiten:
Deckelmitte und Seitenflächen: $t_{WD} \approx 18$ s
Deckelrand: $t_{WR} \approx 15$ s

Da für beide die Entformungstemperatur ϑ_E = 100 °C gilt, verlängert sich aufgrund der längeren Kühlzeit für die Deckelmitte und Seitenflächen die Zykluszeit um ca. 20 %.

Unterschiedliche Werkzeugwandtemperaturen bedeuten unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten und damit unterschiedliche Eigenschaften wie Schwindung, Oberflächenaussehen, Gefügestruktur und Verzug.

Die beiden Beispiele haben gezeigt, wie sensibel die Kühlzeit auf die Verarbeitungsbedingungen reagiert und wie wichtig die Temperierung im Werkzeug sowie optimale Verarbeitungsbedingungen für die Wirtschaftlichkeit der Produktion sind.

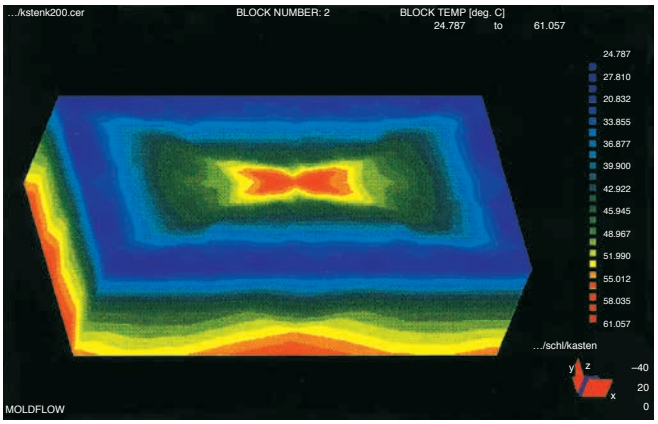


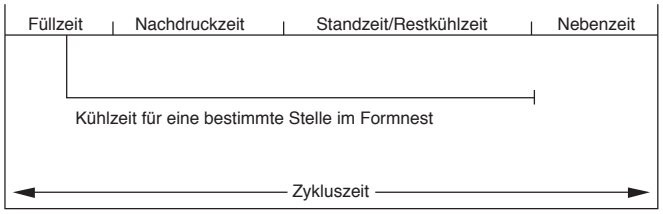
Bild 21: Berechnete Werkzeugoberflächentemperaturen auf der Düsenseite eines kastenförmigen Formteils

8 Zykluszeit

Die Zykluszeit ist die Zeit, in der sich der Fertigungsablauf periodisch wiederholt. Sie setzt sich aus den einzelnen Fertigungsschritten und den Nebenzeiten zusammen.

Zykluszeit = Füllzeit + Nachdruckzeit + Standzeit (Restkühlzeit) + Nebenzeiten (Werkzeug öffnen und schließen, Auswerfer, Umschaltzeiten + eventuell Plastifizierzeit)

Grafisch lässt sich die Zykluszeit wie unten gezeigt darstellen: Je nach Verarbeitungsbedingungen können die verschiedenen Zeiten unterschiedliche Größen annehmen. Normalerweise nimmt aber die Standzeit oder Restkühlzeit die größte Spanne ein.



9 Wärmeinhalt einer Kunststoffschmelze

Zur Bestimmung der erforderlichen Kühlleistung einer Werkzeugtemperierung benötigt man den Wert des Wärmeinhalts, den eine Kunststoffschmelze abgibt.

Die mittlere pro Zeiteinheit abzuführende Wärme ist:

$$Q_{Pl} = \frac{m \cdot \Delta h}{t_{Zyl}}$$

$\dot{Q}_{Pl}$ = Wärmestrom des Formteils
m = Masse des Formteils
t_{Zyl} = Zykluszeit
Δh = Differenz der spez. Enthalpie zwischen Schmelze- und Entformungstemperatur

Als spezifische Enthalpie bezeichnet man den massebezogenen Wärmeinhalt eines Stoffes als Funktion von Temperatur und Druck. Enthalpiewerte von Kunststoffen findet man häufig in Form von Diagrammen, in denen die Abhängigkeit der Enthalpie von der Temperatur dargestellt ist. Das Bild 22 zeigt spezifische Enthalpiediagramme für einige amorphe und einige teilkristalline Thermoplaste. Da die Druckabhängigkeit gegenüber der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Enthalpie nur eine untergeordnete Rolle spielt (Größenordnung etwa 10 %/1.000 bar), reichen die gemessenen Diagramme bei p = 1 bar für den praktischen Gebrauch aus.

Der Vergleich zwischen den beiden Werkstoffklassen zeigt, dass die teilkristallinen Werkstoffe einen erheblich höheren Wärmeinhalt im Schmelzebereich besitzen als die amorphen. Man benötigt etwa die doppelte Leistung, um teilkristalline Formmassen in der gleichen Zeit aufzuschmelzen oder abzukühlen wie amorphe [6].

Zeigen amorphe Thermoplaste eine fast stetige Abnahme der spezifischen Enthalpie, so weisen teilkristalline Thermoplaste im Kristallisationsbereich einen Knickpunkt auf.

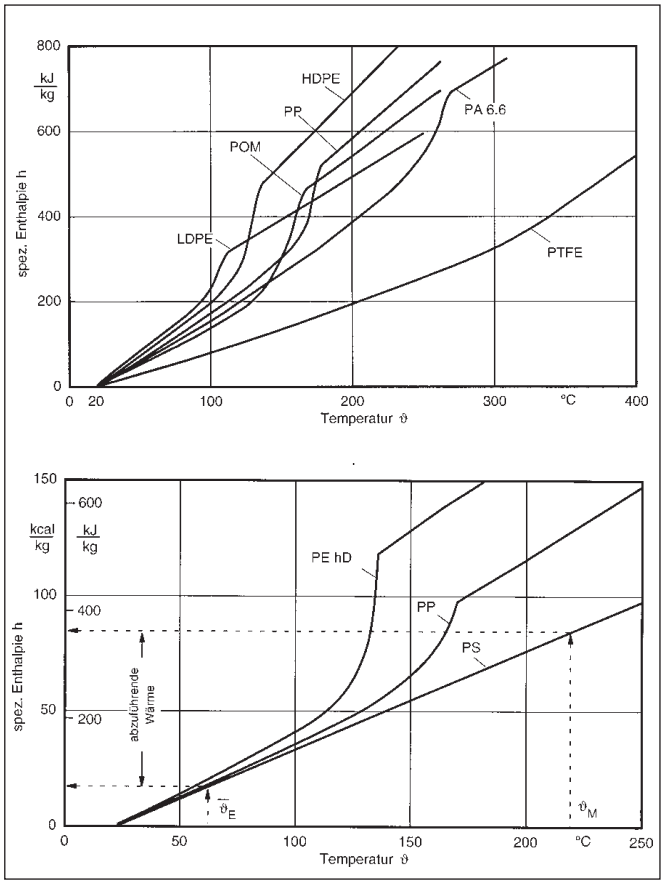


Bild 22: Spezifische Enthalpie als Funktion der Temperatur für einige amorphe Thermoplaste; p = 1 bar

10 Zusammenfassung

Der zu verarbeitende Thermoplast durchläuft bei dem Spritzgießprozess verschiedene thermodynamische Zustände. Die Kenntnis des Zustandsverlaufs während der Verarbeitung hilft, den Verarbeitungsablauf gezielt zu steuern und positiv zu beeinflussen.

Durch die Kühlung in dem Spritzgießwerkzeug lässt sich das Abkühlverhalten des Kunststoffes stark beeinflussen. Unterschiedliche Werkzeugoberflächentemperaturen können zu unterschiedlichen Kühlzeiten innerhalb des Formteils führen. Das Erstarrungsverhalten, d. h. die Größe der Glas- bzw. der Kristallisationstemperatur, ist abhängig von den Umgebungsbedingungen (Druck, Abkühl- und Aufheizgeschwindigkeit), wobei erhöhte Abkühlgeschwindigkeiten bei amorphen und teilkristallinen Thermoplasten relativ schnell zu konstant bleibenden spezifischen Volumina führen. Dies wird auch durch die Lage der Kühlkanäle beeinflusst. Es kann also bei ungleichmäßiger Kühlung unterschiedliche Gefügeausbildung in einem Formteil auftreten und unterschiedliches Schwindungs- und Verzugsverhalten entstehen.

Eine gut gewählte Entformungstemperatur hilft, die Produktion wirtschaftlicher zu gestalten.

Besonders bei der Verarbeitung von technischen Thermoplasten für hochbeanspruchte und qualitativ hochwertige Teile ist es wichtig, Kenntnis über den Zustandsverlauf des Materials während der Verarbeitung und besonders während der Kühlphase zu besitzen.

11 Literaturverzeichnis

[1] Thienel, P.: Der Formfüllvorgang beim Spritzgießen von Thermoplasten. Dissertation, RWTH Aachen, 1977
[2] Hirai, N./Eyring, H. B.: Viscosity of Polymeric Systems, Journal Appl. Phys., Vol. 29, Nr. 5 (1958), S. 810–816
[3] Stuart, H. A.: Die Physik der Hochpolymeren. (Bd. 3, 1955, Springerverlag, Berlin
[4] Thienel, P./Kemper, W./Schmidt, L.: Praktische Anwendungsbeispiele für die Benutzung von p-v-ϑ-Diagrammen. Mitteilung aus dem Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen
[5] N.N.: Verarbeitungsdaten für den Spritzgießer. Informationsschrift. Covestro, Leverkusen
[6] Sarholz, R.: Rechnerische Abschätzung des Spritzgießprozesses als Hilfsmittel zur Maschineneinstellung. Dissertation, RWTH Aachen, 1980
[7] N.N.: Spritzgießen – Verfahrensablauf, Verfahrensparameter, Prozessführung. Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen

Typischer Wert
Die angegebenen Werte sind typische Werte. Sofern nicht ausdrücklich schriftlich mit uns vereinbart, stellen sie keine garantierten Werte oder Produktspezifikation im Sinne einer vereinbarten Beschaffenheit dar. Die angegebenen Werte können durch Werkzeuggestaltung, die Verarbeitungsbedingungen oder durch die Einfärbung des Produkts beeinflusst werden. Die angegebenen Eigenschaftswerte wurden, soweit nicht anders angegeben, an genormten Prüfkörpern bei Raumtemperatur ermittelt.

Es liegt außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten, wie und zu welchem Zweck Sie unsere Produkte, unsere technische Unterstützung und unsere Informationen (in Wort, Schrift oder durch Produktionsbewertung), einschließlich vorgeschlagener Formulierungen und Empfehlungen, anwenden und einsetzen. Daher ist es unerlässlich, dass Sie unsere Produkte, unsere technische Unterstützung und unsere Informationen selber zu Ihrer eigenen Zufriedenheit daraufhin prüfen, ob unsere Produkte, unsere technische Unterstützung bzw. unsere Informationen für die von Ihnen beabsichtigten Zwecke und Anwendungen geeignet sind. Diese anwendungsspezifische Untersuchung muss mindestens eine Prüfung auf Eignung in technischer Hinsicht sowie im Hinblick auf Gesundheit, Sicherheit und Umwelt umfassen. Derartige Untersuchungen wurden nicht notwendigerweise von uns durchgeführt. Der Verkauf aller Produkte erfolgt – sofern nicht schriftlich anders mit uns vereinbart – ausschließlich nach Maßgabe unserer Allgemeinen Verkaufsbedingungen, die wir Ihnen auf Wunsch gerne zusenden. Alle Informationen und sämtliche technische Unterstützung erfolgen ohne Gewähr (jederzeitige Änderungen vorbehalten). Es wird ausdrücklich vereinbart, dass Sie jegliche Haftung (Verschuldenshaftung, Vertragshaftung und anderweitig) für Folgen aus der Anwendung unserer Produkte, unserer technischen Unterstützung und unserer Informationen selber übernehmen und uns von aller diesbezüglichen Haftung freistellen. Hierin nicht enthaltene Aussagen oder Empfehlungen sind nicht autorisiert und verpflichten uns nicht. Keine hierin gemachte Aussage darf als Empfehlung verstanden werden, bei der Nutzung eines Produkts etwaige Patentansprüche in Bezug auf Werkstoffe oder deren Verwendung zu verletzen. Es wird keine konkludente oder tatsächliche Lizenz aufgrund irgendwelcher Patentansprüche gewährt.

Zum Schutz von Gesundheit, Sicherheit und Umwelt beachten Sie bitte vor Verarbeitung unserer Produkte das betreffende Sicherheitsdatenblatt (MSDS) und sonstige Produktkennzeichnungen.

Covestro Deutschland AG
Business Unit Polycarbonates
D-51365 Leverkusen

plastics@covestro.com
www.plastics.covestro.com