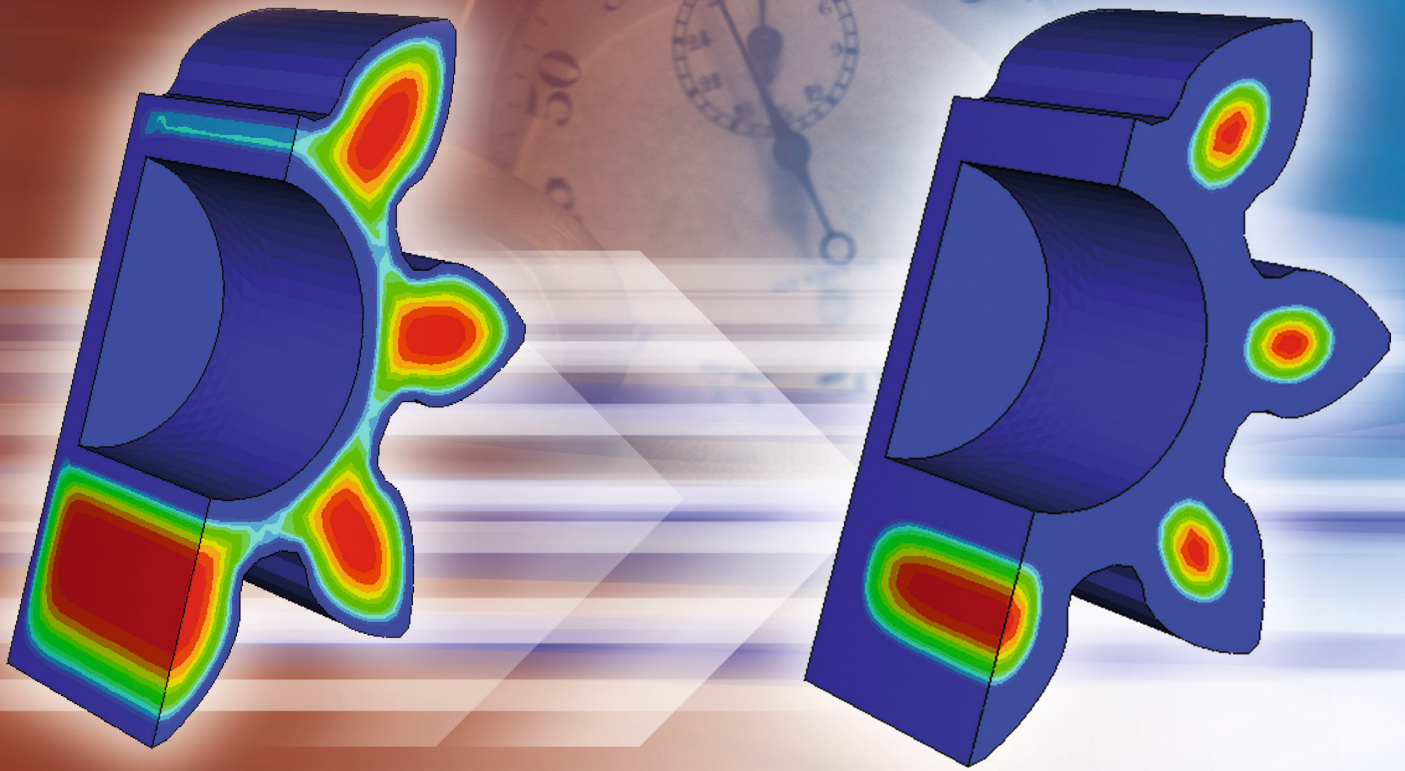


Abschätzung der Kühlzeit beim Spritzgießen

Technische Information





- Die Zykluszeit beim Spritzgießen wird meist durch die Kühlzeit bestimmt.
- Die Kühlzeit kann mit Hilfe der effektiven Temperaturleitfähigkeit einfach ermittelt werden. Das Berechnungsverfahren ist hier beschrieben.
- Mit abnehmender Wanddicke nimmt die Kühlzeit quadratisch, die abzuführende Wärmemenge linear ab.
- Der Angussquerschnitt sollte an die Kühlzeit des Formteils angepasst sein.

Während des Spritzgießprozesses erstarrt die ins Werkzeug eingebrachte Formmasse zum fertigen Formteil. Die dafür benötigte Zeit, die rechnerisch abgeschätzt werden kann, liefert oft einen bedeutenden Beitrag zur Zykluszeit.

Für die Zeitabschätzung gibt es zwei wichtige Anwendungen:

Auslegung von Kühlsystemen

Zu deren Dimensionierung muss die Zeit bekannt sein, in der die Wärme der Thermoplastschmelze abgeführt werden soll.

Bestimmung der Zykluszeit

Diese wird zur Abschätzung der Fertigungskosten benötigt. Zur Bestimmung der Zykluszeit ist die Kenntnis der Kühlzeit erforderlich.

Es wird beschrieben, wie, aufbauend auf der im Spritzgießversuch bestimmten effektiven Temperaturleitfähigkeit, die Kühlzeit mit einfachen Mitteln berechnet werden kann. Da diese Berechnung nur eine grobe Näherung ergibt, ist die Kenntnis der zugrunde liegenden Berechnungsannahmen und Vereinfachungen zur Ergebnisbeurteilung dringend erforderlich.

Kühlzeitbestimmende Wärmetransportmechanismen

Die mit der Formmasse ins Werkzeug eingebrachte Wärmeenergie muss aus dem Kunststoff über das Werkzeug bis in das Temperiermedium transportiert werden. Damit gibt es drei Vorgänge (Abbildung 1), die kühlzeitbestimmend sein können:

- Die Wärmeenergie muss aus der plastischen Kunststoffseele des Formteils über die erstarrte Randschicht ins Werkzeug abgeleitet werden.
- Von der Werkzeugoberfläche bis zum Kühlkanal muss in jedem Zyklus eine ausreichende Wärmemenge durch das Werkzeug transportiert werden, um so die notwendige Werkzeugoberflächentemperatur sicherzustellen.
- Zum Schluss muss die Wärmeenergie von dem Werkzeug in das Temperiermedium übergehen.

Da Thermoplaste relativ schlechte Wärmeleiter sind, stellt die für den Wärmetransport aus der Wandmitte des Formteils bis zur Werkzeugoberfläche benötigte Zeit normalerweise die minimal mögliche Kühlzeit dar. Die Wärmeabfuhr aus dem Kunststoff kann einzig durch eine niedrigere Werkzeugoberflächentemperatur verbessert werden. Die Senkung dieser Temperatur ist jedoch mit einer abnehmenden Oberflächenqualität und bei teilkristallinen Thermoplasten auch mit einer zunehmenden Nachschwindung verbunden und daher als Mittel zur Reduktion der Zykluszeit ungeeignet.

Natürlich kann die minimale Kühlzeit nur realisiert werden, wenn die anfallende Wärmemenge in dieser Zeit auch abgeleitet wird. Ansonsten ist der Wärmetransport von der Werkzeugwand zum Kühlkanal kühlzeitbestimmend. Vor allem dünnwandige Formteile, bei denen sehr kurze Kühlzeiten realisierbar sind, erfordern hohe Kühlleistungen.

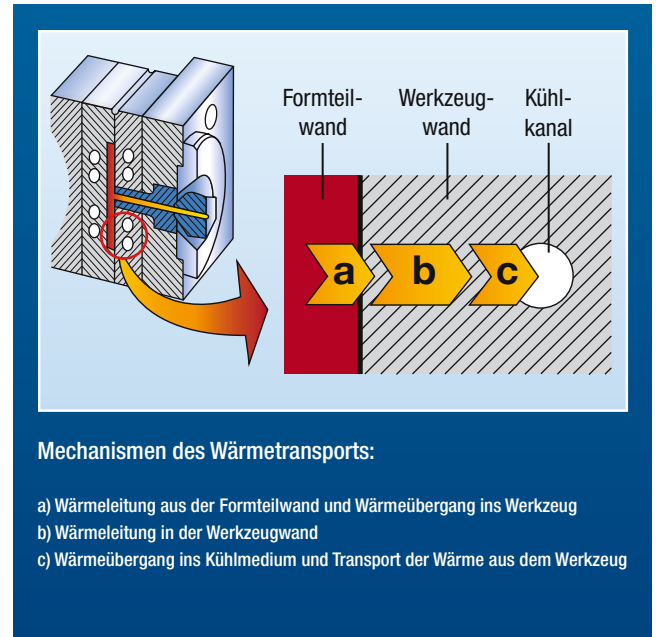


Abb. 1: Unterschiedliche Wärmetransportzonen im Werkzeug

Komplexe Formteilgeometrien mit schlechten Kühlmöglichkeiten, nicht angepasste Kühlsystemauslegung, Korrosion und Verkalkungen der Kühlkanäle können die Ursachen für ein Überschreiten der theoretisch erreichbaren minimalen Kühlzeiten sein. Je dickwandiger die Formteile sind, desto weniger fällt dieses Problem schlechter Kühlsysteme ins Gewicht.

Entformungszeitpunkt

Die Formmasse muss – ausgehend von der Verarbeitungstemperatur – soweit abgekühlt werden, dass das Formteil dimensionsstabil entformt werden kann. Wenn die von den Auswerfern aufgebrauchten Kräfte keine bleibenden Deformationen und unzulässigen Spannungen mehr verursachen können, ist der Entformungszeitpunkt erreicht. Die auftretenden Spannungen und Verformungen sind dabei von der Bauteilgeometrie, dem Auswerfersystem, der Schwindung sowie den Reibkräften zwischen Kunststoffteil und Werkzeug abhängig.

Eine Bestimmung des Entformungszeitpunktes über zulässige Deformationen und Spannungen ist zu kompliziert und nicht praxisgerecht. Ersatzweise wird eine Temperatur, bei der die Formmasse hinreichend erstarrt ist, als Entformungsbedingung angenommen. Diese Entformungstemperatur ist damit ein Ersatzkriterium für die Versagensgrenze beim Entformen und stellt nur eine grobe Näherung für den Entformungszeitpunkt dar, weil die oben beschriebenen Einflussfaktoren nicht berücksichtigt werden.

Bei amorphen Thermoplasten kann das Erreichen der Vicat-Temperatur B50 (ISO 306) als Kriterium für den Entformungszeitpunkt herangezogen werden. Bei teilkristallinen Thermoplasten lässt sich die Entformungstemperatur aus im Abkühlvorgang bestimmten DSC-Messungen ableiten.

Ersatzweise ist auch eine Abschätzung der Entformungstemperatur anhand der Schubmodulkurven möglich. Diese werden jedoch in der Regel in einem Aufheizvorgang ermittelt, so dass die aus ihnen abgelesenen Entformungstemperaturen höher sein werden als die Werte, die sich aus Messungen in einem Abkühlvorgang ergeben würden.

Die Verwendung einer Temperatur als Entformungskriterium ist die größte Schwachstelle bei der Kühlzeitabschätzung. Weder die Bauteilgeometrie, die Schwindung des Formteiles auf Kerne, die Reibkräfte, die Auswerfergeometrie noch die Materialsteifigkeit gehen in die Bestimmung des Entformungszeitpunktes ein. Da vor allem bei dickwandigen Bauteilen zur schädigungsfreien Entformung die Formmasse im Inneren nicht in allen Fällen erstarrt sein muss, kommt es leicht zu einer Überschätzung der minimalen Kühlzeiten. Eine genauere Bestimmung der Entformungstemperaturen ist zwar durch Bauteilversuche möglich; diese sind aber nur bedingt auf andere Bauteile übertragbar.

Neben der Formteilstabilität zum Entformungszeitpunkt kann beispielsweise noch der Bauteilverzug die Kühlzeit bestimmen, da es mit längeren Kühlzeiten möglich ist, den durch ungleichmäßige Temperaturverteilung hervorgerufenen Verzug zu reduzieren. Problemstellungen solcher Art werden mit einem einfachen Entformungskriterium wie der Temperatur nicht erfasst.

Vereinfachte Berechnung der Kühlzeit

Zur Berechnung der Kühlzeit wird vereinfachend angenommen, dass der Erstarrungsvorgang beginnt, wenn der Füllvorgang abgeschlossen ist. Dabei sollen die gesamte Formmasse konstante Schmelzetemperatur und das Werkzeug eine konstante Werkzeugoberflächentemperatur haben. Der Abkühlprozess wird durch die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung beschrieben:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Die Temperaturleitfähigkeit a berechnet sich aus

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

Die Temperaturleitfähigkeit von Thermoplasten ist aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifischen Wärmekapazität c_p , ebenfalls temperaturabhängig. Neben der Temperatur hängen diese Werte auch noch in einem nicht zu vernachlässigenden Maß von der Abkühlgeschwindigkeit ab. Allerdings ist die Messung der thermischen Daten unter Berücksichtigung der im Spritzgießprozess auftretenden Abkühlgeschwindigkeiten mit den momentanen Methoden der Messtechnik nicht möglich. Dieser Umstand sowie die Tatsache, dass die Fouriersche Differentialgleichung mit variabler Temperaturleitfähigkeit analytisch nicht mehr lösbar ist, führt zur Verwendung einer vereinfachenden Annahme: die Temperaturleitfähigkeiten werden als konstant angenommen.

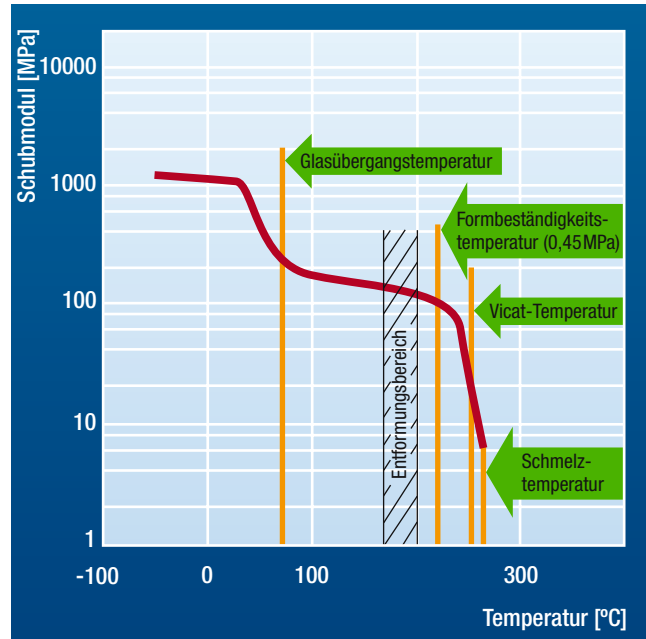


Abb. 2: Schubmodul eines Ultramid® A3K als Funktion der Temperatur

Effektive Temperaturleitfähigkeit

Die konstante Temperaturleitfähigkeit wird nicht aus Gleichung (2) berechnet, sondern in einem Spritzgießversuch so bestimmt, dass die berechneten Kühlzeiten mit den gemessenen übereinstimmen. Zur Unterscheidung von der Temperaturleitfähigkeit nach Gleichung (2) wird der so ermittelte Wert als effektive Temperaturleitfähigkeit a_{eff} bezeichnet.

Die effektive Temperaturleitfähigkeit ist also ein im Spritzgießversuch bestimmter mittlerer Wert, der die Kühlzeitberechnung an die Messung anpasst. Dadurch kann die Abhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit von Temperatur und Abkühlgeschwindigkeit in der vereinfachten Lösung des Wärmeleitproblems berücksichtigt werden. Es handelt sich somit bei der effektiven Temperaturleitfähigkeit nicht um eine reine Materialkonstante, sondern um einen Prozesskennwert, der auch von Prozessbedingungen abhängt (Abbildung 3). Mit der effektiven Temperaturleitfähigkeit können nur die Temperaturen im Bereich des Entformungszeitpunktes berechnet werden. Temperaturberechnungen am Anfang der Nachdruckphase würden zu falschen Ergebnissen führen.

Kühlzeitabschätzung für spezifische Geometrien

Aus der Fourierschen Differentialgleichung ergeben sich mit den effektiven Temperaturleitfähigkeiten vereinfachte Lösungsmöglichkeiten für die Kühlzeit, in die auch die lokale Geometrie des Formteiles und die Temperaturrandbedingungen eingehen. Der so berechnete Entformungszeitpunkt liegt dann vor, wenn „die Formmassentemperatur“ die vorgegebene Entformungstemperatur (siehe Abschnitt „Entformungszeitpunkt“) erreicht.

Es stellt sich die Frage, welche Formmassentemperatur hier relevant ist. Bei dünnwandigen Bauteilen ist es sicherlich die maximale Temperatur in der Formteilmittelpunkt (Abbildung 4). Bei dickwandigen Bauteilen kann die Formteilstabilität für die Entformung auch schon ausreichend sein, wenn die Formmassentemperatur in Formteilmittelpunkt noch über der Entformungstemperatur liegt. Für diesen Fall kann man die Zeit berechnen, bei der die mittlere Temperatur die Entformungstemperatur erreicht hat. Diese Zeit kann aber nur eine untere Grenze für die Kühlzeit darstellen, da nur die Randschichten formstabil sind und die Mitte noch weich ist.

Durch den Vergleich von Praxis und Rechnung an ähnlichen Formteilen kann man zur Auswahl der geeigneten Annahmen kommen. Zudem spielt auch der Anwendungszweck eine Rolle. Bei der Kostenkalkulation liegt man mit einer längeren Kühlzeitschätzung auf der sicheren Seite, bei der Kühlsystemauslegung dagegen mit der kürzeren Kühlzeitschätzung.

In Abbildung 5 ist der Einfluss von Plattendicke sowie Massen- und Werkzeugoberflächentemperatur für ein teilkristallines Produkt dargestellt. Die maximale und die minimale Kühlzeit eines Produktes werden durch Verwendung der maximalen und der minimalen Massen- und Werkzeugoberflächentemperaturen aus der Verarbeitungsempfehlung erzielt. Es zeigt sich deutlich, dass die Formteilmittelpunkt die dominierenden Einfluss auf die Kühlzeit hat.

Durch Zusammenfassung der Massen-, Werkzeugoberflächen- und Entformungstemperaturen sowie der effektiven Temperaturleitfähigkeit zu einer konstanten, durch das Produkt vorgegebenen Größe, ergibt sich eine Vereinfachung der Kühlzeitberechnung auf folgende Gleichung:

$$t_k = \text{Faktor} \cdot s^2 \quad (3)$$

Der konstante Faktor in dieser Gleichung berechnet sich durch Auswertung der Gleichungen in Tabelle 1. Für den wichtigsten Fall der Plattengeometrie sind die Ergebnisse in Abbildung 6 dargestellt.

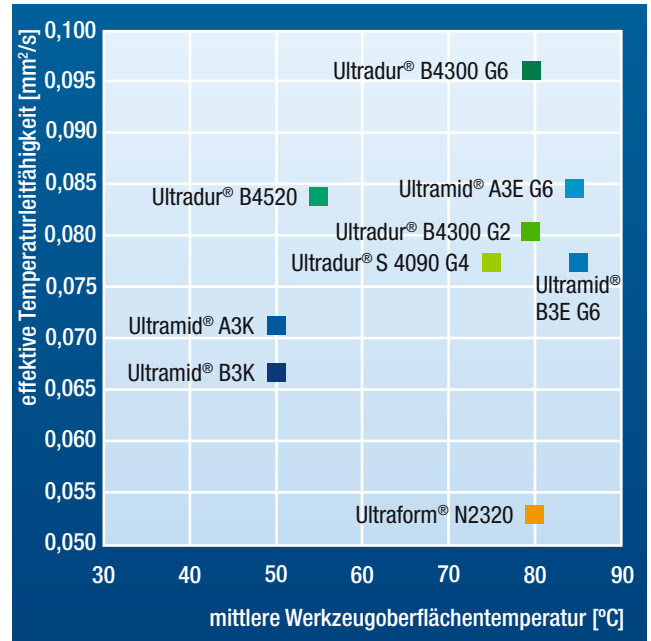


Abb. 3: Effektive Temperaturleitfähigkeiten teilkristalliner Thermoplaste

Bestimmung der mittleren Werkzeugoberflächentemperatur

Die Werkzeugoberflächentemperatur ist eine über die Zykluszeit veränderliche Größe. Ausgehend von einem Sollwert bei Einspritzbeginn steigt sie während der Einspritzphase auf ein Maximum und sinkt bis zum Ende der Zykluszeit wieder auf den Sollwert ab. Für die Berechnung der Kühlzeiten wird eine mittlere Werkzeugoberflächentemperatur benötigt, die näherungsweise als arithmetischer Mittelwert berechnet werden kann.

$$T_w = \frac{1}{2} (T_{w \max} + T_{w \min}) \quad (4)$$

Tabelle 1: Gleichungen zur Berechnung der Kühlzeit

Geometrie	Zeit, nach der die Maximaltemperatur in Formteilmittelpunkt die Entformungstemperatur erreicht hat	Zeit, nach der die mittlere Temperatur die Entformungstemperatur erreicht hat
Platte	$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 a_{\text{eff}}} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$	$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 a_{\text{eff}}} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$
langer Vollzylinder (L » D)	$t_k = \frac{D^2}{23,14 a_{\text{eff}}} \ln \left(1,602 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$	$t_k = \frac{D^2}{23,14 a_{\text{eff}}} \ln \left(0,692 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$
kurzer Vollzylinder	$t_k = \frac{1}{\left(\frac{23,14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L^2} \right) a_{\text{eff}}} \ln \left(2,04 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$	$t_k = \frac{1}{\left(\frac{23,14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L^2} \right) a_{\text{eff}}} \ln \left(0,561 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$

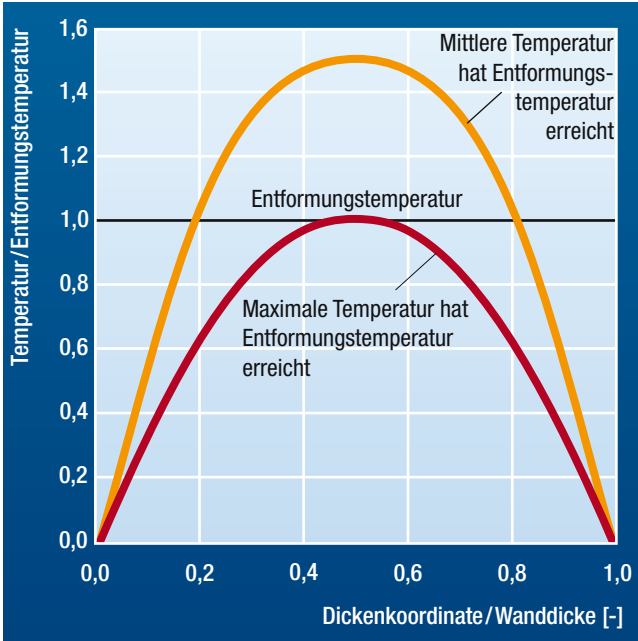


Abb. 4: Temperaturverteilung zum Entformungszeitpunkt

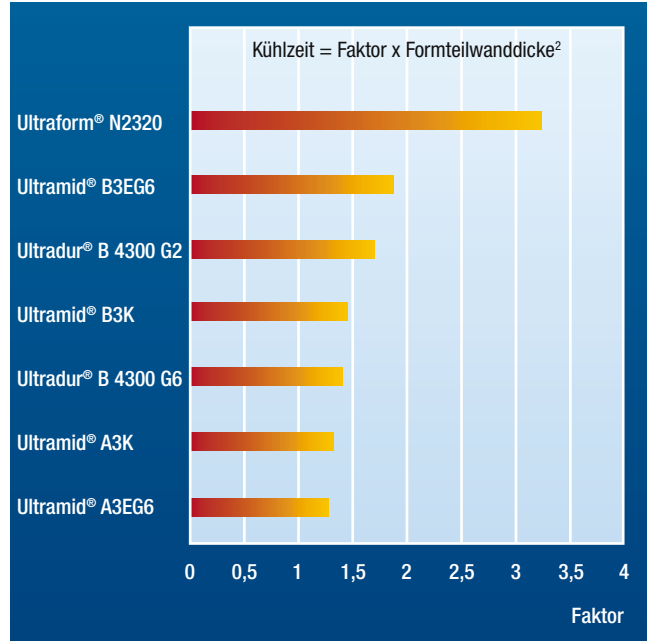


Abb. 6: Proportionalitätsfaktoren zwischen der Kühlzeit und dem Wanddickenquadrat, gültig für Plattengeometrie bei mittleren Verarbeitungstemperaturen

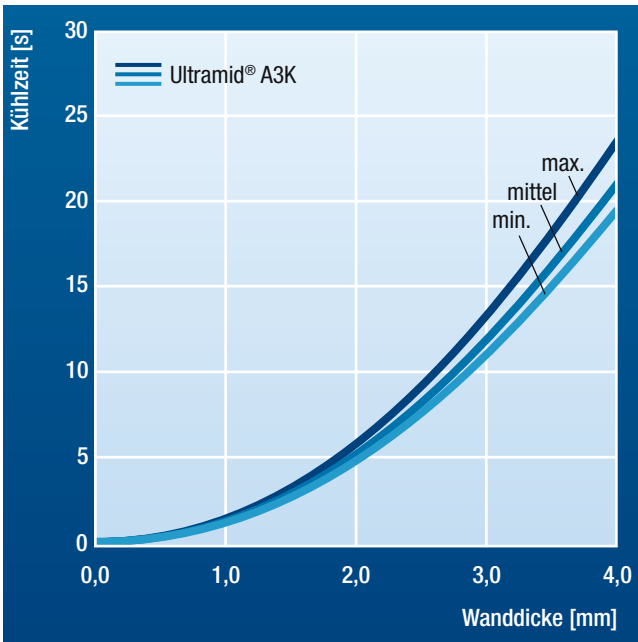


Abb. 5: Kühlzeit einer Platte, bis die max. Wandtemperatur die Entformungstemperatur erreicht

In dieser Gleichung ist allerdings noch die maximale Werkzeugoberflächentemperatur unbekannt, die etwa fünf bis 20 Grad über der unteren Werkzeugoberflächentemperatur liegt. Eine Abschätzung kann mit folgender Gleichung erfolgen:

$$T_{W \max} = \frac{b_W T_{W \min} + b_M T_M}{b_W + b_M} \quad (5)$$

Für $T_{W \min}$ kann näherungsweise die Kühlwassertemperatur eingesetzt werden. b wird als Wärmeeindringzahl bezeichnet und berechnet sich aus

$$b = \sqrt{\rho \lambda c_p} \quad (6)$$

Die Wärmeeindringzahl ist ein Maß für die Fähigkeit, Wärme in einem zeitveränderlichen Vorgang abzuleiten. Neben der reinen Wärmeleitfähigkeit spielt bei zeitveränderlichen Größen die Fähigkeit eine Rolle, die Wärmeenergie zu speichern, was durch Dichte und spezifische Wärmekapazität beschrieben wird. Aus Tabelle 2 sind die Wärmeeindringzahlen für verschiedene Werkstoffe zu entnehmen.

Tabelle 2: Wärmeeindringzahlen	
Material	Wärmeeindringzahl bei Massetemperatur [kg/(s ^{3/2} · K)]
Ultraform®	560
Ultramid® A	785
Ultramid® A3...G6	805
Ultramid® B	730
Ultramid® B3...G6	800
Stahl X40CrMoV51	9 445
Stahl X 155 CrVM121	10 387
Stahl X35CrMo17	8 214
Stahl X5CrNiCuNb1744	7 620
Al-Legierung AlMg3	18 500
Al-Legierung AlMg4,5MN	17 000
Al-Legierung AlMg Si1	21 500
Al-Legierung AlCuMg1	20 000
Al-Legierung AlCuMg2	18 500
Al-Legierung AlCuSiMn	20 500
Al-Legierung AlZnMgCu0,5	18 500
Al-Legierung AlZnMgCu1,5	18 500
Zamak 430 Feinzinkleg. ZnAl4Cu3	16 900
Kupfer/Beryllium. CuBe2	18 390
Kupfer/Beryllium. CuCo2Be	26 227

Wanddickenabhängigkeit der notwendigen Kühlleistung

Die Kühlzeit hängt von der Wanddicke des Formteils, von der Massen-, der Werkzeugoberflächen- sowie der Entformungstemperatur ab. Da die Entformungstemperatur durch den Verarbeitungsprozess praktisch kaum verändert werden kann, scheidet sie zur aktiven Beeinflussung der Kühlzeit aus. Von den übrigen drei Größen hat die Wanddicke des Formteils den größten Einfluss, da sie quadratisch in die Berechnung der Kühlzeit eingeht. Für zwei flächige Teile unterschiedlicher Dicke s_1 und s_2 ergibt sich für die Kühlzeit:

$$t_{k2} = t_{k1} \frac{s_2^2}{s_1^2} \quad (7)$$

Die Zeit, nach der ein Formteil entformt werden kann, verringert sich mit abnehmender Wanddicke quadratisch, die abzuführende Wärmemenge aber nur linear. Für den Vergleich der aus einem Formteil abzuführenden Wärmemengen bei zwei unterschiedlichen Formteiwanddicken gilt

$$Q_2 = Q_1 \frac{s_2}{s_1} \quad (8)$$

Um die theoretisch möglichen kürzeren Kühlzeiten bei geringeren Wanddicken realisieren zu können, muss dementsprechend das Kühlsystem leistungsfähiger sein. Die pro Zeiteinheit abzuführende Wärmemenge erhöht sich mit abnehmender Wanddicke:

$$\frac{Q_2}{t_{k2}} = \frac{s_1 Q_1}{s_2 t_{k1}} \quad (9)$$

In Abbildung 7 ist der Zusammenhang zwischen der realisierbaren Kühlzeit und der notwendigen Kühlleistung grafisch dargestellt.

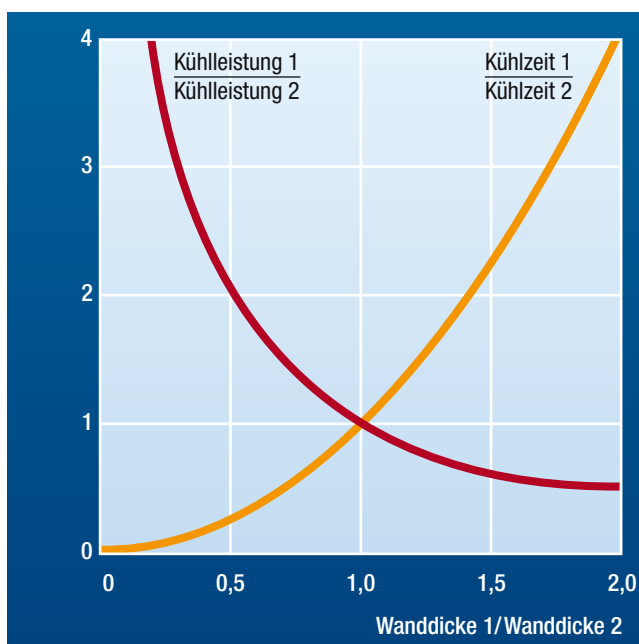


Abb. 7: Einfluss der Wanddicke auf Kühlzeit und notwendige Kühlleistung

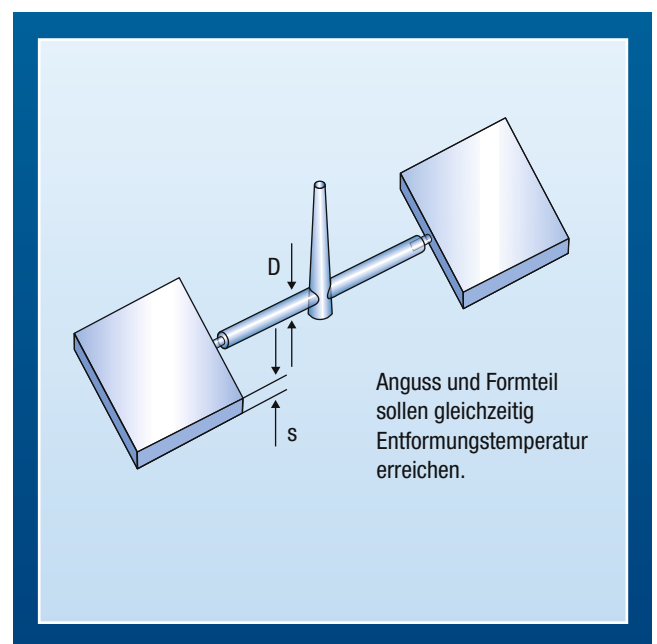


Abb. 8: Auswahl des Angussquerschnitts anhand der Kühlzeiten

Auswahl der Angussquerschnitte im Hinblick auf die Kühlzeit

Wenn das Angussystem nicht kühlzeitbestimmend sein soll, muss die Kühlzeit des Verteiler- oder Angussdurchmessers kleiner oder gleich der Kühlzeit des übrigen Bauteils sein (Abbildung 8).

Für flächige Bauteile ergibt sich mit dieser Bedingung aus dem Vergleich der Kühlzeitgleichungen für Platte und Zylinder (Tabelle 1) ein Verhältnis Angussdurchmesser/Formteilwanddicke, bei dem beide die gleiche Kühlzeit haben. Die Wanddicke s_{\max} bezieht sich dabei nur auf den angussnahen Bereich, da dieser bestimmend ist für die Dauer der Nachdruckwirkung.

$$\frac{d_{\text{Anguss}}}{s_{\max}} = 1,53 \cdot \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{4}{\pi} \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W}\right)}{\ln\left(1,602 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W}\right)}} \quad (10)$$

Dieses Verhältnis Angussdurchmesser/Formteilwanddicke ist nur von den Masse-, Werkzeugoberflächen- und Entformungstemperaturen abhängig. Unabhängig vom Material liegt dieses Verhältnis immer in folgendem Bereich:

$$1,1 \leq \frac{d_{\text{Anguss}}}{s_{\max}} < 1,53 \quad (11)$$

Unter Einbeziehung der produktspezifischen Temperaturen gilt für die meisten Produkte

$$1,4 \leq \frac{d_{\text{Anguss}}}{s_{\max}} \leq 1,46 \quad (12)$$

Durch ein Unterschreiten der so bestimmten Angussdurchmesser erzielt man keine Kühlzeitreduktion, dafür ergeben sich aber Nachteile für die Wirksamkeit des Nachdruckes.

Verwendete Formelzeichen

- a Temperaturleitfähigkeit [m^2/s]
- a_{eff} effektive Temperaturleitfähigkeit [m^2/s]
- b_M Wärmeeindringzahl des Kunststoffes [$\text{kg}/(\text{s}^{3/2} \cdot \text{K})$]
- b_W Wärmeeindringzahl des Werkzeugmaterials [$\text{kg}/(\text{s}^{3/2} \cdot \text{K})$]
- c_p spez. Wärmekapazität [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
- D Durchmesser zylindrischer Formteilmereiche [m]
- L Länge zylindrischer Formteilmereiche [m]
- Q Wärmemenge [J]
- s Wanddicke des Formteils [m]
- t Zeit [s]
- t_k Kühlzeit [s]
- T Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- T_E Entformungstemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- T_M Schmelzetemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- T_W mittlere Werkzeugoberflächentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- x Weg [m]
- λ Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- ρ Dichte [kg/m^3]

Ausgewählte Produktliteratur:

- Ultramid® – Hauptbroschüre
- Ultramid® – Sortimentsübersicht
- Ultradur® – Hauptbroschüre
- Ultradur® – Sortimentsübersicht
- Ultraform® – Hauptbroschüre
- Ultraform® – Sortimentsübersicht
- Ultrason® – Hauptbroschüre
- Ultrason® – Sortimentsübersicht
- Ultramid®, Ultradur® und Ultraform® – Verhalten gegenüber Chemikalien
- Ultrason® – Verhalten gegenüber Chemikalien

Zur Beachtung

Die Angaben in dieser Druckschrift basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei Verarbeitung und Anwendung unseres Produktes nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine Garantie bestimmter Eigenschaften oder die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Alle hierin vorliegenden Beschreibungen, Zeichnungen, Fotografien, Daten, Verhältnisse, Gewichte u. Ä. können sich ohne Vorankündigung ändern und stellen nicht die vertraglich vereinbarte Beschaffenheit des Produktes dar. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Empfänger unseres Produktes in eigener Verantwortung zu beachten. (Mai 2014)

Besuchen Sie auch unsere Internetseiten:

www.plasticsportal.com (Welt)
www.plasticsportal.eu (Europa)

Die einzelnen Produktauftritte finden Sie unter:

www.plasticsportal.eu/Produktname
z. B. www.plasticsportal.eu/ultramid

Broschürenanforderung:

PM/K, F 204
Fax: +49 621 60-49497

Bei technischen Fragen zu den Produkten
wenden Sie sich bitte an den Ultra-Infopoint:

