

# Abschätzung der Kühlzeit beim Spritzgießen

Philipp Gerke, Hochschule Bielefeld, philipp.gerke@hsbi.de

Zusammenfassung: Bisher konnte die Kühlzeit beim Spritzgießen mithilfe einer Abschätzungsformel ermittelt werden. Diese Formel ist jedoch nur anwendbar, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeuges als sehr groß angenommen werden kann. Beim Rapid Tooling werden hingegen Werkzeuge mit geringer Wärmeleitfähigkeit, wie z.B. aus Beton oder Kunststoff, eingesetzt. Für solche Werkzeuge liefert die Formel keine verwendbaren Ergebnisse. Daher wurde eine neue Formel hergeleitet, die die thermischen Eigenschaften des Werkzeuges berücksichtigt.

Stichworte: Spritzgießen, Rapid Tooling, Abschätzung, Berechnung, Kühlzeit

## 1 Einleitung, Problemstellung und Stand der Technik

Mit dem Spritzgussprozess können Bauteile in großen Stückzahlen hergestellt werden. Dazu wird eine Kunststoffschmelze zwischen zwei Formhälften, die meist aus Stahl oder Aluminium gefertigt werden, hineingespritzt. Die beiden Formhälften müssen dabei die Negativform des herzustellenden Bauteils abbilden. Die Kühlzeiten von solchen Werkzeugen können mit der Kühlzeitformel (1) abgeschätzt werden [1, 2]:

$$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 * \alpha_{eff}} * \ln \left( \frac{8}{\pi^2} * \frac{T_m - \bar{T}_W}{\bar{T}_E - \bar{T}_W} \right) \quad (1)$$

$t_k$  Kühlzeit

$s$  Wanddicke des Formteils

$\alpha_{eff}$  effektive Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes

$T_m$  Temperatur der Schmelze

$\bar{T}_W$  mittlere Werkzeugtemperatur

$\bar{T}_E$  mittlere Entformungstemperatur

Die Grundlage für diese Gleichung ist die *FOURIERSche* Differentialgleichung der ein-dimensionalen Wärmeleitung, die analytisch nicht lösbar ist. Die Gleichung (1) als Lösung gilt ausschließlich für den Wärmeausgleich innerhalb der Kunststoffschmelze und für die Randbedingung einer sehr großen Biot-Zahl. Das bedeutet, dass der Wärmetransport in das Werkzeug deutlich größer als die Wärmeleitung innerhalb der Schmelze ist. Konkret heißt das, die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugs ist unendlich und die Werkzeugtemperatur an der Stelle des Schmelzekontakts ist zeitlich konstant. Dadurch hängt die Kühlzeit lediglich von den thermischen Eigenschaften des Kunststoffes ab (hier: effektive Temperaturleitfähigkeit). Bei Werkzeugen aus Aluminium oder Stahl wird dies angenommen, da diese Werkstoffe eine im Vergleich zur Kunststoffschmelze hohe Wärmeleitfähigkeit haben. Durch Einsetzen von plausiblen Werten für Schmelze-, Werkzeug- und Entformungstemperatur in die Kühlzeitformel, entsteht außerdem die vereinfachte Abschätzformel (2) [3]:

$$t_k = 2s^2 \quad (2)$$

Bei komplexen Bauteilgeometrien ist die Herstellung von Spritzgussformen aus Aluminium und Stahl sehr aufwendig und teuer. Eine Möglichkeit diesen Prozess zu vereinfachen, besteht darin, das Werkzeug mittels Rapid Tooling aus z.B. Beton oder Kunststoff herzustellen. Diese Werkzeuge haben jedoch im Vergleich zu Aluminium- und Stahlwerkzeugen deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten, weshalb die Kühlzeitformel für diese nicht angewendet werden kann. Daher wurde eine neue Gleichung hergeleitet, die einen Zusammenhang zwischen den thermischen Eigenschaften des Werkzeuges und der Kühlzeit beschreibt.

## 2 Thermisch-transiente Simulationen mit COMSOL

Zur Herleitung einer Formel zur Bestimmung der Kühlzeit werden vereinfachte Spritzgussprozesse mithilfe einer eindimensionalen thermisch-transienten Analyse mit der Multiphysik-Software COMSOL 6.0 simuliert. Anders als bei der Kühlzeitformel aus Kapitel 1 werden die thermischen Eigenschaften des Werkzeuges betrachtet. Der Wärmeübergang von der Schmelze zum Werkzeug wird somit nicht mehr als unendlich groß angenommen, sondern mitsimuliert (s. Abbildung 1).

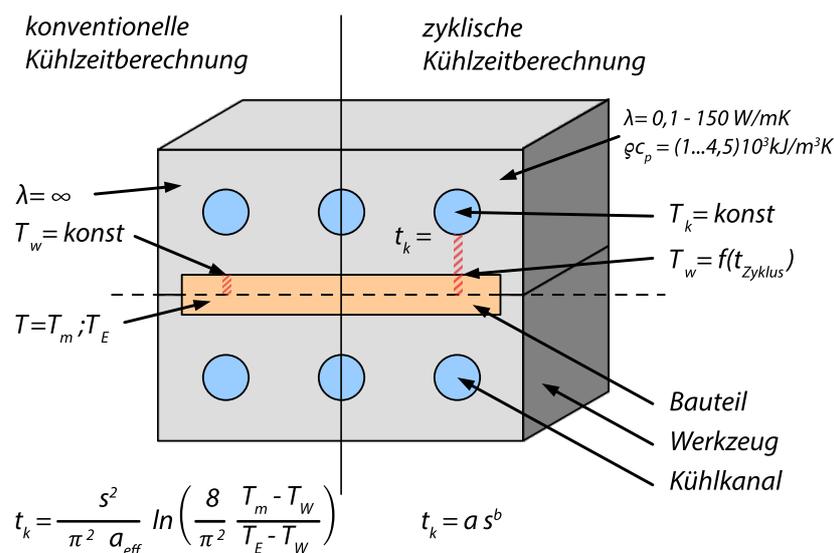


Abbildung 1: Modellgrundlage für die Abschätzung der Kühlzeit

Bei diesen Simulationen werden jeweils die Wanddicke des Bauteils, die Wärmespeichereigenschaft, sowie die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeuges variiert. Es werden Wärmeleitfähigkeiten zwischen  $0,1 \text{ W/(m K)}$  und  $150 \text{ W/(m K)}$  untersucht. Die Wärmespeichereigenschaft wird zwischen  $1000 \text{ kJ/(m}^3 \text{ K)}$  bis  $4500 \text{ kJ/(m}^3 \text{ K)}$  betrachtet. In diesen Bereichen liegen die meisten Werkstoffe, die für Spritzgusswerkzeuge in Frage kommen. Beton hat beispielsweise eine Wärmespeichereigenschaft von ca.  $2100 \text{ kJ/(m}^3 \text{ K)}$  und X37CrMoV5-1 von  $3700 \text{ kJ/(m}^3 \text{ K)}$ . Die Wärmeleitfähigkeit von Beton liegt ungefähr bei  $1,6 \text{ W/(m K)}$ , die von EN AW 7075 bei  $145 \text{ W/(m K)}$ . In diesem Fall wird im Vergleich zur konventionellen Kühlzeitformel die effektive Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes vernachlässigt, da die Eigenschaften des Formteiles als konstant angenommen werden. Die Temperatur

wird bei allen Knoten und Elementen der Schmelze bzw. des Formteils nach jedem Zyklus mit einem expliziten Ereignis auf 240 °C (= Schmelztempertur) reinitialisiert. Die Schmelze hat dabei in jeder Simulation die thermischen Eigenschaften von Polyamid 6. Die Zykluszeit entspricht der Kühlzeit. Die Nebenzeiten werden vernachlässigt. Die Temperatur des Werkzeuges und des Formteils beträgt zu Beginn einer jeden Simulation 20 °C. Die Temperatur der Kühlkanäle beträgt durchgehend 20 °C. Der dementsprechende Aufbau des Modelles in COMSOL ist in Abbildung 2 dargestellt.

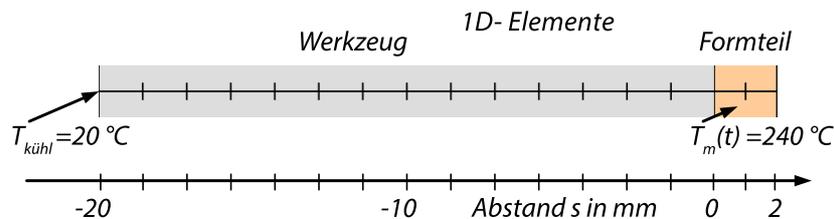


Abbildung 2: Aufbau des Modelles in COMSOL

Die Kühlzeit wird in den Simulationen parametrisch so lange variiert, bis die mittlere Schmelztemperatur im eingeschwungenen stationären Zustand kurz vor dem nächsten Einspritzvorgang 60 °C (= Entformungstemperatur) gerade so unterschreitet (s. Abbildung 3). Hierbei wird anders als bei der konventionellen Kühlzeitberechnung die Werkzeugtemperatur nicht als konstant angenommen, im eingeschwungenen Zustand ergibt sich bei Stahlwerkzeugen wegen der für Wärmeleitung erforderlichen Temperaturdiffenz ein Temperaturgradient zwischen Kavitättoberfläche und Kühlkanal von ca. 1 °C/mm.

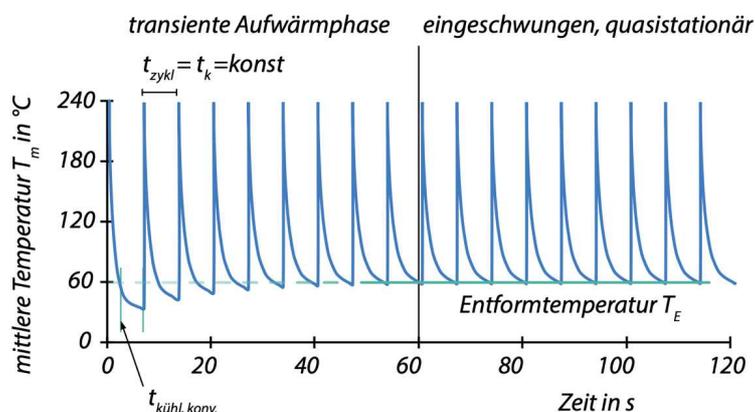


Abbildung 3: Bestimmung der Kühlzeit mit der Vorgabe einer von der Werkzeugtemperatur unabhängigen Entformungstemperatur

Diese Abkühlzeiten werden für bestimmte Wanddicken und thermische Eigenschaften des Werkzeuges simuliert und zur Herleitung einer neuen Kühlzeitformel verwendet.

### 3 Herleitung einer neuen Kühlzeitformel

Die in Kapitel 1 genannte Kühlzeitformel ist mathematisch mit  $t_k = a * s^2$  beschrieben, wobei a eine Konstante ist, die sich aus den Randbedingungen ergibt. Zur Herleitung einer neuen Formel wird daher folgender Aufbau für die Gleichung verwendet:

$$t_k = a * s^b \quad (3)$$

Simulationen mit bestimmten Werkzeugmaterialien zeigen zusätzlich, dass dieser Gleichungsaufbau für die Darstellung von Kühlzeiten geeignet ist (s. Abbildung 4).

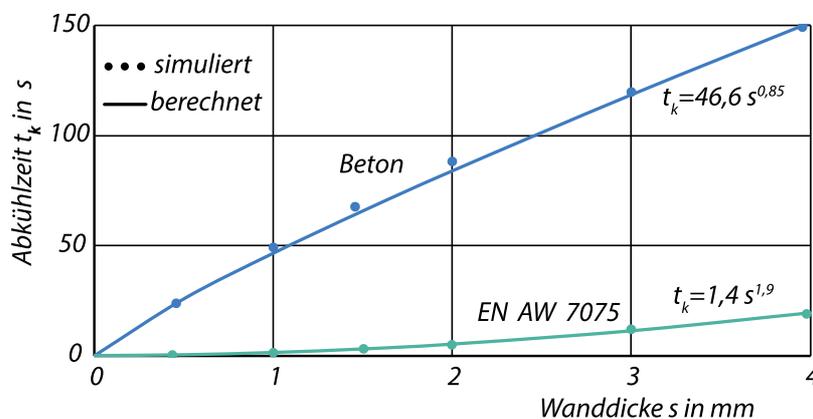


Abbildung 4: Bestimmung der Kühlzeit

Bei einer Wanddicke von 1 mm gilt für die Gleichung (3):  $t_k(1 \text{ mm}) = a * (1 \text{ mm})^b = a$ . In Abbildung 5 sind die simulierten Kühlzeiten mit variierten Wärmeleitfähigkeiten und Wärmespeicherszahlen bei einer Wanddicke von 1 mm dargestellt. Diese entsprechen gleichzeitig dem Faktor a.

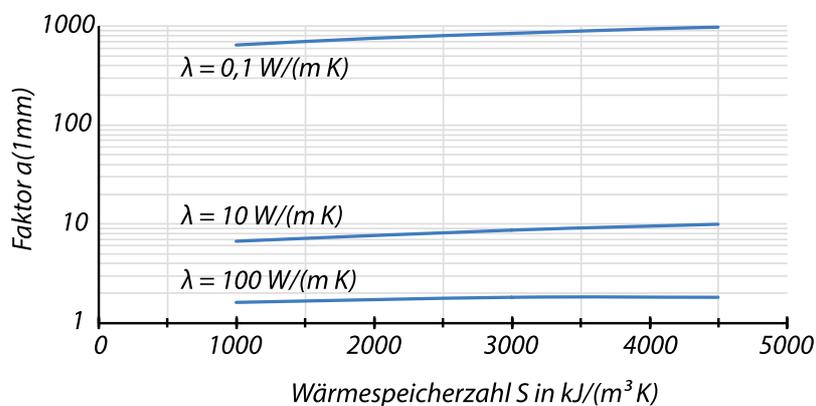


Abbildung 5: simulierter Faktor a

Die Werte können näherungsweise mithilfe von Geraden beschrieben werden. Die allgemeine Geradengleichung lautet angepasst an diesen Fall:

$$a(S) = m * S + a_0 \quad (4)$$

Die Steigung m wird allgemein mit  $m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$  bestimmt. Daher gilt für diesen Fall:

$$m = \frac{a \left( 4500 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \right) - a \left( 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \right)}{4500 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} - 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}} \quad (5)$$

Durch Einsetzen der Werte, ergeben sich folgende Steigungen  $m$  (s. Tabelle 1):

**Tabelle 1: Geradensteigung  $m$**

$\lambda$ in $\frac{\text{W}}{\text{m K}}$	$a \left( 4500 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \right)$	$a \left( 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \right)$	Steigung $m$
0,1	974	639	$9,57 * 10^{-2}$
1	97,8	64,1	$9,63 * 10^{-3}$
10	10,0	6,7	$9,43 * 10^{-4}$
100	1,9	1,6	$8,57 * 10^{-5}$

Der Vorfaktor der Steigung beträgt näherungsweise 9,4 und wird der Einfachheit halber auf 10 aufgerundet. Bei Verzehnfachung der Wärmeleitfähigkeit sinkt die Geradensteigung  $m$  um den Faktor 10. Dadurch lässt sich die Steigung näherungsweise mit Gleichung (6) bestimmen.

$$m = \frac{0,01}{\lambda} \quad (6)$$

Der y-Achsenabschnitt  $a_0$  lässt sich dann, ausgehend von Gleichung (4), wie folgt ermitteln:

$$a_0 = a(S) - m * S \quad (7)$$

$$a_0 = a \left( 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} \right) - \frac{0,01}{\lambda} * 1000 \quad (8)$$

Daraus ergeben sich folgende y-Achsenabschnitte (s. Tabelle 2):

**Tabelle 2: y-Achsenabschnitte  $a_0$**

$\lambda$	0,1	0,5	1	5	10	50	100	150
$a_0$	539	108	54,1	11,2	5,7	2,0	1,5	1,4

Bei Verzehnfachung der Wärmeleitfähigkeit sinkt der y-Achsenabschnitt  $a_0$  näherungsweise um Faktor 10. Dieser beträgt bei einer Wärmeleitfähigkeit von 1 W/(m K) ca. 54. Dadurch können die Werte der y-Achsenabschnitte näherungsweise mit folgender Gleichung abgebildet werden:

$$a_0 = 1 + \frac{54}{\lambda} \quad (9)$$

Die mit dieser Gleichung berechneten y-Achsenabschnitte sind in Tabelle 3 aufgelistet:

**Tabelle 3: berechnete y-Achsenabschnitte  $a_0$**

$\lambda$	0,1	0,5	1	5	10	50	100	150
$a_0$	541	109	55	11,8	6,4	2,1	1,5	1,4

Die berechneten Werte weichen kaum von denen aus Tabelle 2 ab, weshalb die Gleichung (9) als valide angenommen wird. Durch Einsetzen der Gleichungen (6) und (9) in die Gleichung (4) ergibt sich dann folgende Geradengleichung:

$$\underbrace{a(\lambda, c_p, \rho)}_{a(S)} = \underbrace{1 + \frac{54}{\lambda}}_{a_0} + \underbrace{\frac{0,01}{\lambda}}_m * \underbrace{c_p * \rho}_S \quad (10)$$

Durch Vereinfachen lautet die Gleichung zur Bestimmung des Faktors a:

$$a(\lambda, c_p, \rho) = 1 + \frac{0,01 * c_p * \rho + 54}{\lambda} \quad (11)$$

Der Exponent b kann mit den simulierten Kühlzeiten bei einer Wanddicke von 4 mm wie folgt ermittelt werden:

$$b = \log_{\frac{4 \text{ mm}}{1 \text{ mm}}} \left( \frac{t_{k,S=4 \text{ mm}}}{t_{k,S=1 \text{ mm}}} \right) \quad (12)$$

Die Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die berechneten Exponenten b in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit für zwei unterschiedliche Wärmespeicherzahlen. Der Exponent b bei einer Wärmespeicherzahl von 1000 kJ/(m<sup>3</sup> K) hat einen ähnlichen Verlauf, wie bei 4500 kJ/(m<sup>3</sup> K). Der Exponent b hängt also stärker von der Wärmeleitfähigkeit als von der Wärmespeicherzahl ab. Zur Vereinfachung wird daher nur noch die Wärmeleitfähigkeit zur Bestimmung des Exponenten betrachtet. Ferner gibt eine durch Testen ermittelte Gleichung mit  $b(\lambda) = 1,85 - 2,4^{-\lambda*0,03}$ , deren Verlauf zum größten Teil zwischen den der beiden zuvor gezeigten Kurven liegt.

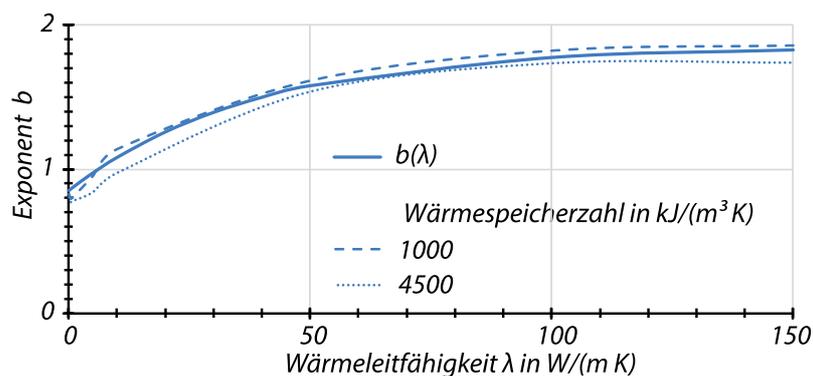


Abbildung 6: simulierter Exponent b

Da die neue Gleichung lediglich zu groben Abschätzungen dienen soll, wird dieser Verlauf für alle Wärmespeicherzahlen, die zwischen 1000 kJ/(m<sup>3</sup> K) und 4500 kJ/(m<sup>3</sup> K) liegen, angenommen.

Die neue Gleichung zur Abschätzung der Kühlzeit in Abhängigkeit von den thermischen Eigenschaften des Werkzeuges lautet daher nun wie folgt:

Hauptgleichung	mit dem Faktor a	mit dem Exponenten b
$t_k = a * s^b$	$a = 1 + \frac{0,01 * c_p * \rho + 54}{\lambda}$	$b = 1,85 - 2,4^{-\lambda * 0,03}$

mit

$t_k$  Kühlzeit in s

$s$  Wanddicke des Formteils in mm

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit des Werkzeuges in  $\frac{W}{m K}$

$c_p * \rho$  Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und der Dichte  $\rho$  des Werkzeuges in  $\frac{kJ}{m^3 K}$  (= Wärmespeicherzahl  $S$ )

### 3 Fazit und Ausblick

Die maximal ermittelte Abweichung zwischen simulierten und mit der neuen Gleichung berechneten Kühlzeiten liegt bei ca. 24 %. Diese Abweichung ist im Hinblick darauf, dass die Gleichung lediglich als Abschätzungsgleichung verwendet werden soll, akzeptabel. Denn auch die konventionelle Kühlzeitformel weist aufgrund ihrer Annahme der konstanten Werkzeugtemperatur bei z.B. Stahlwerkzeugen Abweichungen zum Teil bis über 50 % auf (s. Abbildung 3). Dort wird die zum Teil erhebliche Verlängerung der Kühlzeit durch die zeitliche Erwärmung des Werkzeuges vernachlässigt. Die neu hergeleitete Gleichung kann deshalb für eine grobe Abschätzung der Kühlzeit bei Werkzeugen mit einer Wärmespeicherzahl zwischen 1000 ... 4500 kJ/(m<sup>3</sup> K), einer Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,1 ... 150 W/(m K) und Bauteilwanddicken zwischen 0,5 ... 4 mm verwendet werden und ist daher - im Gegensatz zur konventionellen Kühlzeitformel - auch für Rapid Tooling-Werkzeuge gültig.

Weitere Untersuchungen könnten die Gleichung um den Einfluss der thermischen Eigenschaften des Kunststoffes, der Schmelz- und Entformtemperatur sowie des Abstandes zwischen Kavität und Kühlkanal ergänzen. Dadurch werden die angenommenen Vereinfachungen weiter reduziert und die Gleichung würde noch genauere prozessspezifische Ergebnisse liefern.

### Dank

Ein besonderer Dank gilt Prof. Jaroschek für die Motivation zur Hypothese dieser Arbeit, sowie für die Unterstützung und die vielen hilfreichen Hinweise bei der Bearbeitung und Ausgestaltung.

## Literatur

- [1] Seyfrath, P., Zur Bestimmung der Zykluszeit beim Spritzgießen, Plaste und Kautschuk , 9. Jahrgang, Heft 11/1962, S. 535-556
- [2] Wübken G., Thermisches Verhalten und thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen, TH Aachen, 1976
- [3] Jaroschek C., Spritzgießen für Praktiker, Hanser, 2019,  
<https://doi.org/10.3139/9783446458673>