

Impulskühlung von Spritzgießwerkzeugen – Was kann sie leisten?

H. Schirrmacher, Wilhelmshaven

Inhalt: Eine ebenso elegante wie energetisch günstige Möglichkeit, ein Spritzgießwerkzeug mit einer einheitlichen Eingangstemperatur zu kühlen, bietet die Impulskühlung. Mit Hilfe einer FE-Simulation wird gezeigt, dass sich insbesondere die Homogenität der Temperaturverteilung an der Werkzeugo-berfläche und die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen im Spritzgießzyklus durch die Anwendung der Impulstemperierung deutlich verbessern lassen.

Spritzgießwerkzeugen wird in einem diskontinuierlichen Prozess Wärme über die Formmasse zugeführt und, im Allgemeinen, kontinuierlich durch die Werkzeugtemperierung entzogen. Die Temperatur der Werkzeugo-berfläche wird dabei durch die Temperatur des Kühlmediums bestimmt.

Alternativ dazu kann der Volumenstrom des Temperiermittels als Stellgröße verwandt wer- den, indem mit Hilfe eines Magnetventils Kühlimpulse definierter Länge erzeugt werden.

Die Untersuchung der Vor- und Nachteile beider Strategien kann nur auf der Basis jeweils kühlzeitoptimalen Verfahrensparameter erfolgen. Davon ausgehend soll die Robust- heit der Temperierung und die Homogenität des Temperaturfeldes an der Werkzeugo-berflä- che in den Vergleich einbezogen werden.

Modellierung der Werkzeugkühlung

Die thermodynamischen Zusammenhänge am System Kavität - Werkzeug - Temperierkanal werden durch die Fouriersche Differentialgleichung mit den dazugehörigen Rand- und An- fangsbedingungen beschrieben. Selbst für einfache ebene Probleme ist eine analytische Lö- sung nur schwer abzuleiten.

Die Untersuchungen stützen sich deshalb auf ein ebenes FE - Modell [1,2], welches mit sei- nen wesentlichen Parametern der Abb.1 zu entnehmen ist.

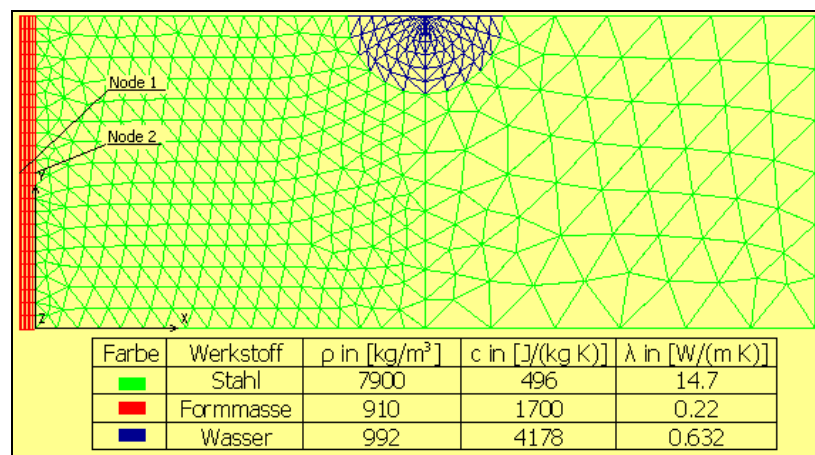


Abb. 1: FE - Modell und Materialkonstanten

Je nach Elementzugehörigkeit werden den Knoten verschiedene Anfangstemperaturwerte zugewiesen. Die Entfernung der "Kunststoffelemente" zu Beginn der Nebenzeit, verbunden mit der Einführung einer Randbedingung 3. Art, ermöglicht die Simulation des Wärmeaustausches über die Oberfläche des geöffneten Werkzeuges.

Weist man den Knoten jeweils zu Zyklusbeginn die Endtemperaturwerte des vorangegangenen Zyklus zu, so lassen sich die thermischen Verhältnisse beliebig lange verfolgen.

Einzig in den Vorgaben für die Temperaturen des Kühlmittels und den Wärmeübergangskoeffizienten an der Kühlbohrungswand unterscheidet sich die Modellierung von kontinuierlicher und intermittierender Temperierung: Strömt das Kühlmedium, so ist seine Temperatur konstant - strömt es nicht, so wird die Temperatur im Kühlkanal freigegeben und der Wärmeübergangskoeffizient deutlich verringert.

In Abb. 2 und Abb. 3 sind die so ermittelten Temperaturverläufe für ausgewählte Knoten des Modells exemplarisch dargestellt.

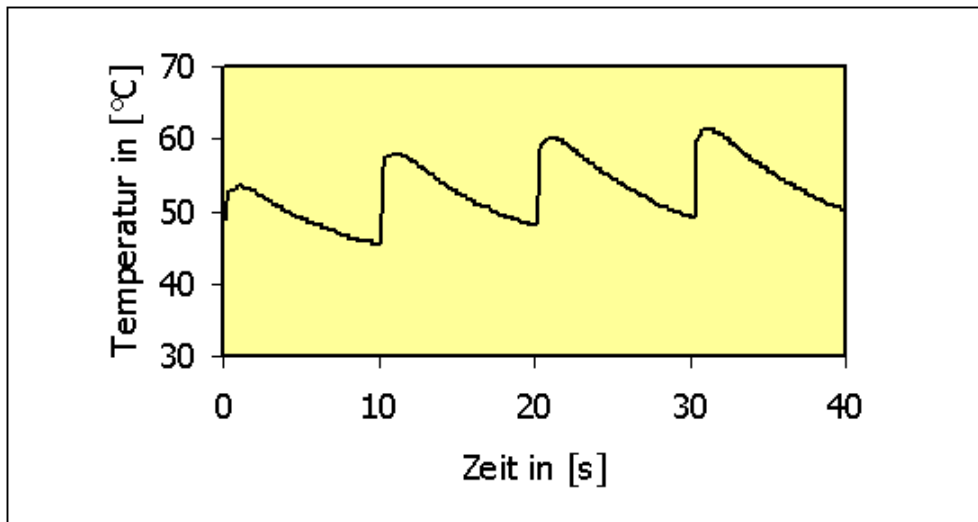


Abb. 2: Verlauf der mittleren Werkzeugoberflächentemperatur $T(\text{NODE } 2)$

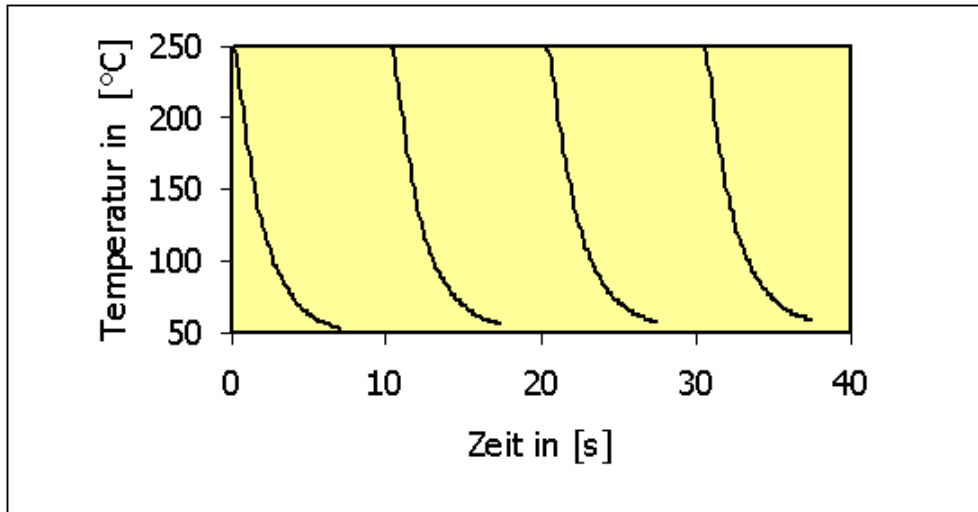


Abb. 3: Verlauf der mittleren Formteilktemperatur $T(\text{NODE } 1)$

Parameteroptimierung

Die Kühlzeit hängt bei vorgegebener Geometrie und Entformtemperatur von der Temperatur des Kühlmediums bzw. von der Dauer des Kühlimpulses ab. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die Werkzeugtemperatur einen konkreten Wert nicht unterschreitet. Dadurch ergibt sich eine untere Schranke für die optimale Kühlmitteltemperatur (T_{TM}^*) bzw. eine obere Schranke für die optimale Kühlimpulslänge (t_1^*).

Die Optimierungsaufgabe lautet damit : Bestimme die niedrigste Kühlmitteltemperatur (größte Kühlimpulslänge), bei der eine vorgegebene Entformtemperatur T_E erreicht und eine Mindestwerkzeugtemperatur T_{WZmin} garantiert wird. Gewissermaßen als Nebenprodukt erhält man die dem jeweiligen Problem zugeordnete kleinstmögliche Zykluszeit.

Auf Grund der einfachen Behandlung beliebiger Nebenbedingungen wurde diese Aufgabe mit einem zweigliedrigen Evolutionsverfahren [3] gelöst.

Zykluszeitvergleich

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht durch Variation bestimmter Modellparameter (Formteildicke, Geometrie der Kühlung) einen Kühlzeitvergleich für jeweils optimal eingestellte Temperiersysteme. Regelungstechnische Probleme können dadurch in der Analyse eliminiert werden.

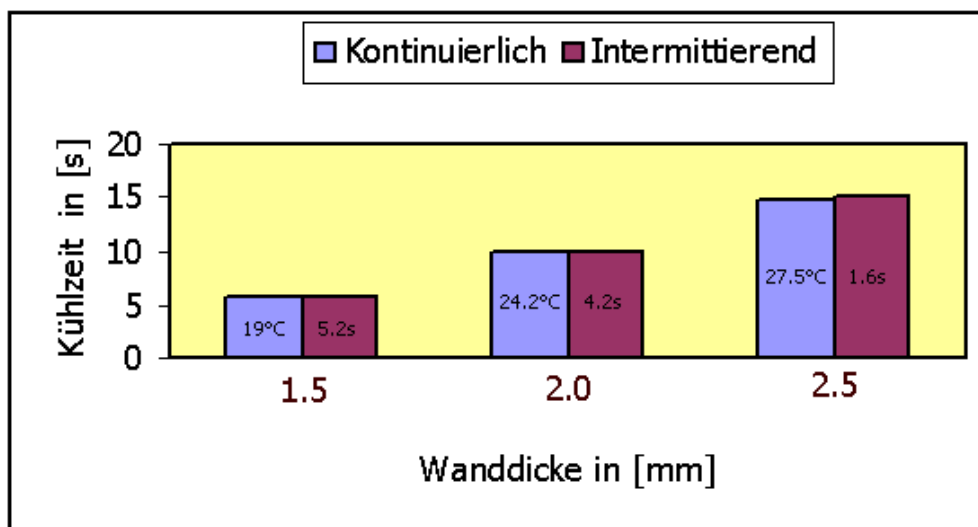


Abb. 4: Kühlzeit als Funktion der Wanddicke (in den Säulen: T_{TM}^* bzw. t_I^*)

Der in Abb. 4 dargestellte Zusammenhang zwischen Wanddicke und Kühlzeit weist in guter Näherung den bekannten quadratischen Verlauf auf [4], d.h. die Kühlzeit wächst proportional zum Quadrat der Wanddicke. Mit steigender Kühlzeit wächst aber auch die Gefahr der örtlichen Unterkühlung der Werkzeugoberfläche. Fordert man die Einhaltung der Werkzeugminimaltemperatur T_{WZmin} , so resultiert daraus eine Erhöhung der Temperatur des Kühlmittels. Entsprechend ergeben sich für die Impulskühlung kürzere Kühlimpulse. Die Werte in den Säulen der Abb. 4 zeigen die jeweiligen Optimalparameter an, wobei gilt: $T_{WZmin} = 55^\circ\text{C}$ und $T_E = 70^\circ\text{C}$. Die Schrittweite für die Zeitintegration beträgt 0.1s – damit lässt sich kein signifikanter Kühlzeitunterschied für die Verfahren erkennen.

Variiert man den Abstand der Kühlung zur Werkzeugkontur, so lässt sich der gleiche Mechanismus beobachten: Wiederum wird der Gefahr der örtlichen Unterkühlung der Werkzeugoberfläche durch eine erhöhte Kühlmitteltemperatur bzw. verkürzte Kühlimpulse begegnet (Abb.5). Auch in dieser Testsituation weisen beide Verfahren ein vergleichbares Potenzial auf. Dabei wird deutlich, dass sich mit zunehmendem Abstand zwischen Kühlung und Fassung der Unterschied zwischen beiden Verfahren verwischt, denn die Kühlimpulse werden immer länger bzw. die Kühlmitteltemperaturen immer kleiner.

Ebenso unentschieden endet der Kühlzeitvergleich bei Variation von T_{WZmin} . Beide Verfahren können in ausreichendem Maße unterschiedliche Werkzeugminimaltemperaturen realisieren.

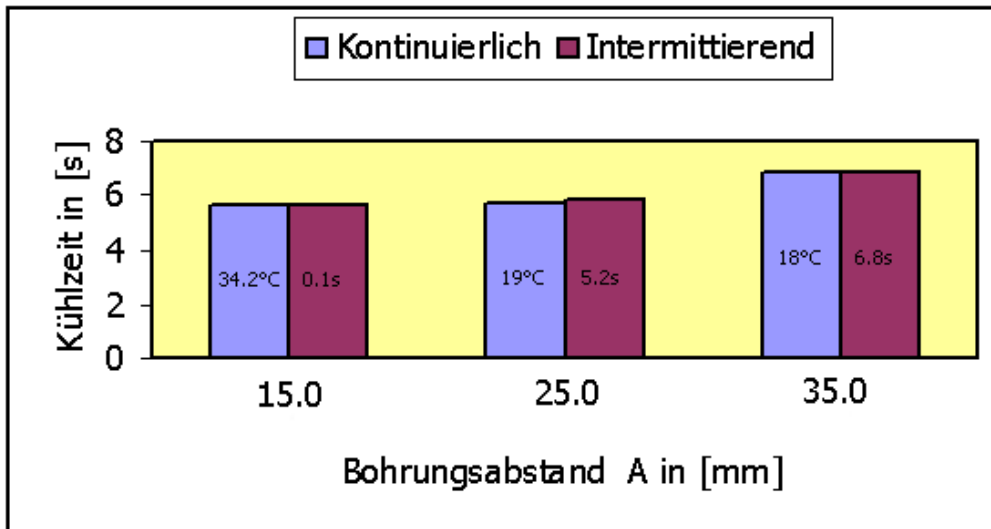


Abb. 5: Kühlzeit als Funktion des Abstandes „Kühlung – Kontur“ (s=1.5mm)

Je heißer man das Werkzeug fahren will, desto wärmer muss das Kühlmedium sein bzw. desto kürzer sind die Kühlimpulse zu wählen (Abb. 6). Wird die Differenz $T_E - T_{WZmin}$ zu klein, so ergeben sich allerdings für die Impulskühlung keine sinnvollen Impulslängen. Diese Aussage ist an die Vorstellung geknüpft, dass jedem Spritzgießzyklus ein definierter Kühlimpuls zugeordnet ist (und nicht nur jedem zweiten oder dritten).

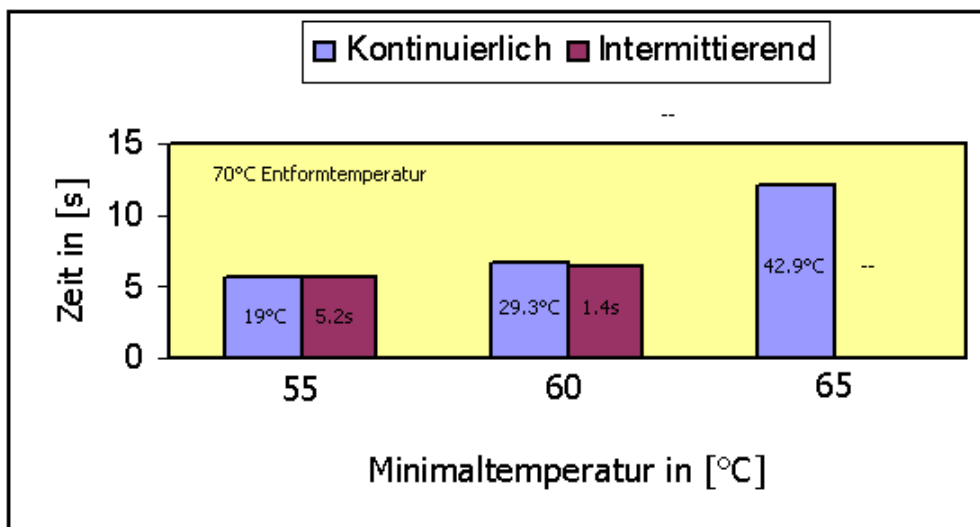


Abb. 6: Kühlzeit bei verschiedenen Werkzeugminimaltemperaturen (s=1.5mm)

Homogenität des Temperaturfeldes

Die Temperaturverteilung auf der Werkzeugoberfläche beeinflusst wesentlich die Formteilqualität. Ziel sind möglichst geringe Temperaturunterschiede und somit eine möglichst gleichmäßige Abkühlung des Formteils.

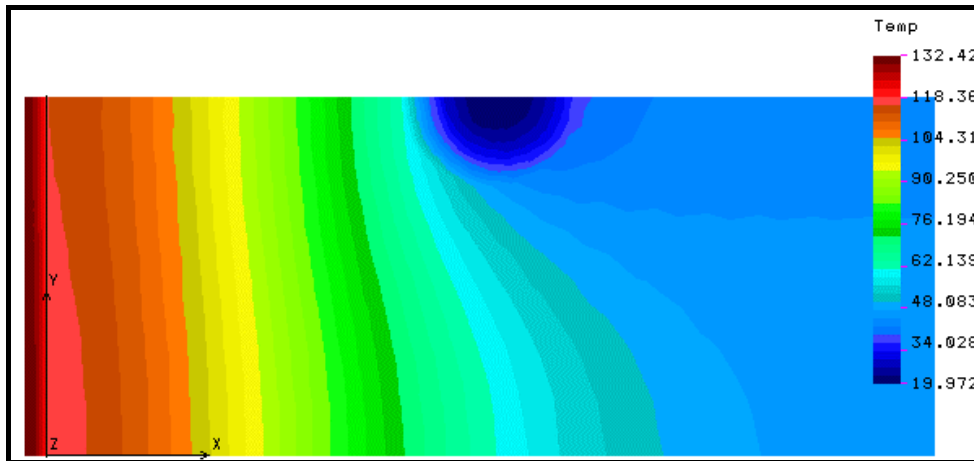


Abb. 7: $T(x,y,t)$ bei $s=2.5\text{mm}$ und Impulskühlung

Das Temperaturfeld am Modell verdeutlicht Abb.7 exemplarisch: Zwischen Formteil und Temperierkanal bildet sich ein in 1. Näherung lineares Temperaturgefälle aus. Auf der Werkzeugoberfläche lassen sich kühlbohrungsnahe (kalte) und kühlbohrungsferne (warme) Bereiche erkennen. Werkzeugbereiche, die nicht zwischen Formteil und Kühlbohrung liegen, sind nahezu thermisch inaktiv.

Die Homogenität des Temperaturfeldes an der Werkzeugoberfläche kann durch den Temperaturfehler $(T_{WZ\max} - T_{WZ\min}) / T_{WZ\text{mittel}}$ beschrieben werden. Zunehmende Wanddicken, d.h. zunehmende Kühlzeiten, führen zu einer Verringerung der Temperaturunterschiede an der Werkzeugoberfläche. Dabei zeigt Abb.8 gleichzeitig, dass der unterbrochene Kühlmittelstrom bei der Impulskühlung die Homogenität am Zyklusende positiv beeinflusst. Der Temperaturfehler ist hier ca. 20% geringer als bei der kontinuierlichen Temperierung.

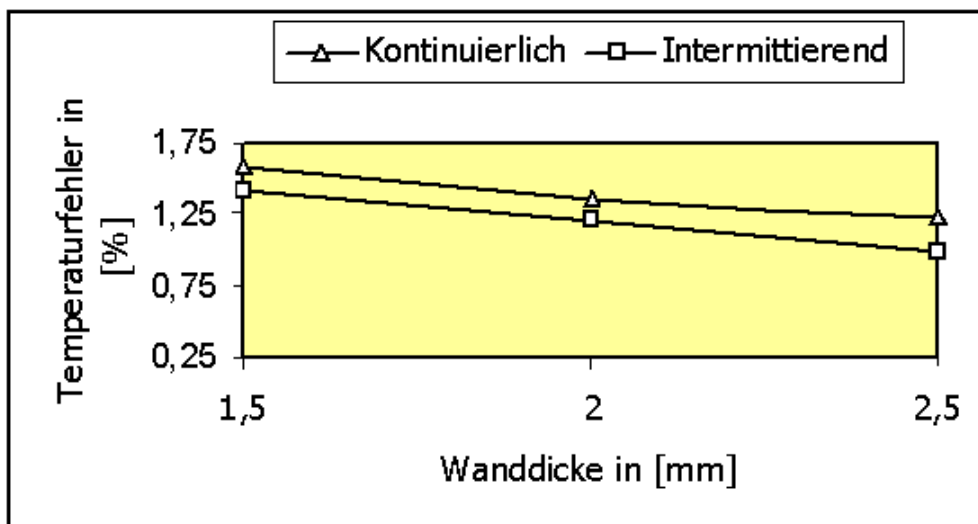


Abb. 8: Temperaturfehler als Funktion der Wanddicke (Bohrungsabstand $A=25\text{mm}$)

Besonders in engen Kernen, Schiebern oder Schrägauswerfern, wo zwischen Kühlung und Kontur u.U. nur kleine Abstände realisiert werden können, kommt dieser Vorteil der Impulskühlung zum Tragen. Gleichzeitig verdeutlicht Abb.9 die bekannte Tatsache, dass der Temperaturfehler mit dem größer werdendem Abstand zwischen Kühlung und Kontur sinkt.

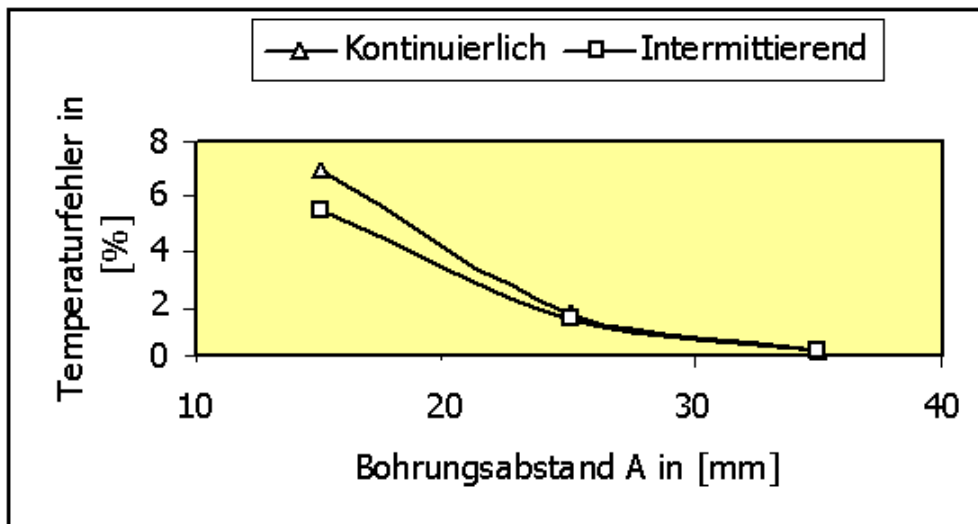


Abb. 9: Temperaturfehler bei Variation des Abstandes „Kühlung – Kontur“ ($s=1.5\text{mm}$)

Robustheit

Im letzten Testszenario soll das Vermögen der Kühlverfahren untersucht werden, Änderungen bezüglich der Dauer der Nebenzeit zu tolerieren. Veränderliche Nebenzeiten entstehen z.B. bei halbautomatischem Betrieb oder kürzeren Maschinenstillständen.

In der Simulation wird zu diesem Zweck die Nebenzeit nach dem Normalverteilungsgesetz variiert (Mittelwert = 5s , Standardabweichung = 1.5s , 50 Realisierungen). Innerhalb dieser 50 Zyklen ergaben sich die folgenden Mittelwerte und Streuungen für die mittleren Werkzeugoberflächentemperaturen:

- Kontinuierliche Kühlung: $48.2^\circ\text{C} \pm 2.46^\circ\text{C}$
- Impulskühlung: $53.2^\circ\text{C} \pm 1.96^\circ\text{C}$

Die Werkzeugoberfläche ist demnach im impulsgekühlten Modell nicht nur deutlich wärmer, die Temperaturschwankungen zwischen den Zyklen sind auch deutlich geringer.

Zusammenfassung

Betrachtet man ausschließlich das Potenzial von kontinuierlicher und intermittierender Kühlung, so lässt sich für keine der beiden Kühlstrategien ein Vorteil erkennen. Beide Verfahren ermöglichen vergleichbare Kühlzeiten. Allerdings müssen sie so betrieben werden, dass sich zum Zyklusende auch vergleichbare Werkzeugoberflächentemperaturen ergeben. Insofern muss dieses Ergebnis nicht im Widerspruch zu den in Anwenderberichten (z.B. [5]) geschilderten deutlichen Produktivitätssteigerungen bei Verwendung der Impulstemprierung stehen.

Erweitert man den Vergleich durch eine Betrachtung der Homogenität des Temperaturfeldes, so ergeben sich jedoch erkennbare Unterschiede: An der Oberfläche ist vor Beginn der Nebenzeit der Temperaturfehler im impulsgekühlten Werkzeug deutlich niedriger. Hier wurden bis zu 20% geringere Temperaturunterschiede ermittelt.

Auch bei der Simulation variabler Nebenzeiten schnitt die Impulskühlung deutlich besser ab als die kontinuierliche Temperierung. Insgesamt ist das impulsgekühlte Werkzeug an seiner Oberfläche im Mittel wärmer und die Temperaturunterschiede zwischen den Zyklen sind geringer. Die Impulskühlung reagiert robuster auf diese Art von Störungen.

Schwierig bei beiden Verfahren ist die Realisierung einer leistungsfähigen und stabilen Regelung, die an die Wahl geeigneter Temperaturmessstellen gebunden ist. Hier bietet sich mit der beschriebenen Vorgehensweise eine günstige Alternative für die Entwicklung neuer oder verbesserter Regelstrategien.

Literatur

- [1] Structural Research and Analysis Corporation: COSMOSM, Version 2.6, Los Angeles 2001 (FE-CODE)
- [2] Hell, Friedrich: Grundlagen der Wärmeübertragung. 3.Auflage, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1982
- [3] Schwefel, H.-P.: Evolutionsstrategie und numerische Optimierung. Dissertation TU Berlin, Berlin 1975
- [4] Menges, Mohren: Spritzgießwerkzeuge. 3.Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 1991
- [5] Kotzab, W.: Der Impuls zum Energie sparen. Kunststoffe 5 (1991), Carl Hanser Verlag, München

Der Autor dieses Beitrags

Prof. Dr.-Ing. Heiko Schirmmacher, geb. 1964, ist Professor für Konstruktion und Technische Mechanik an der FH Wilhelmshaven, Fachbereich Ingenieurwissenschaften. Kontakt: schirmmacher@fbm.fh-wilhelmshaven.de