

Wie sich durch thermische Auslegung die Prozessstabilität und die Stückzahl steigern lässt

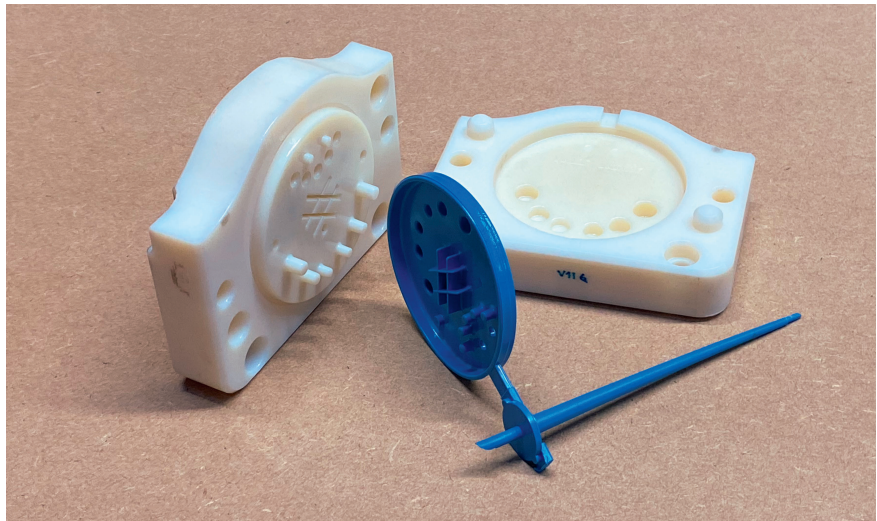
# Temperierung 3D-gedruckter Spritzgießwerkzeuge aus Kunststoff

Der steigende Preisdruck in der Werkzeugbaubranche stellt den konventionellen Werkzeugbau in Bereichen kleiner bis mittlerer Stückzahlen vor Herausforderungen. Additiv gefertigte Formeinsätze aus Kunststoff können für diesen Anwendungsfall eine sinnvolle Alternative sein – wenn die Frage der Temperierung geklärt ist.

Die additive Fertigung von Formeinsätzen ermöglicht es, Herstellzeit und -kosten im Vergleich zur konventionellen Fertigung zu reduzieren. Dies zeigt das Beispiel einer Abdeckkappe mit Logo mit einer Losgröße von 200 Stück, wenn man die Stückkosten pro Bauteil bei Verwendung eines Aluminiumwerkzeugs bzw. eines additiv gefertigten Formeinsatzes aus Kunststoff vergleicht (**Bild 1**). Auch wenn durch die Verwendung von Kunststoff als Werkzeugmaterial die Prozesszeit und damit die Prozesskosten steigen, überwiegen die Einsparungen aus der Herstellphase diesen Effekt in praxisrelevanten Bereichen. Dadurch werden additive Formeinsätze zu einer sinnvollen Option für den Werkzeugbau in der Einzel- und Kleinserienfertigung [1].

Die im Vergleich zu Stahl oder Aluminium wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen erlaubt im Spritzgießprozess keine konventionelle Temperierung bei der Verwendung von Formeinsätzen aus polymeren Materialien. Zudem sind die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen stark abhängig von der Temperatur. Insbesondere der starke Abfall des Schubmoduls über ein schmales Temperaturfeld zeigt, wie wichtig eine effektive Temperierung ist, um das volle Potenzial dieser Formeinsätze ausschöpfen zu können.

Eine unzureichende thermische Auslegung verkürzt die Standzeit unmittelbar, da durch einen zu hohen Wärmeintrag Erweichungseffekte eintreten und der Formeinsatz an Maßhaltigkeit und Stabilität verliert. Um dies zu verhindern, können verschiedene Ansätze für eine bessere Temperierung angewandt werden, sei es durch angepasste Prozesse oder Formeinsätze. Im Folgenden



Die Verwendung von Formeinsätzen aus Kunststoff erlaubt im Spritzgießprozess keine konventionelle Temperierung. © Werkzeugmaschinenlabor WZL

werden drei solche Ansätze und ihre Auswirkungen auf die Wärmeabfuhr aus dem Formeinsatz vorgestellt.

## Konvektive Temperierung mittels Druckluftkühlung

Eine durch Druckluftkühlung erzwungene Konvektion zwischen den einzelnen Spritzgießzyklen ist eine einfach zu integrierende und effektive Methode, um die Wärmebilanz zu verbessern. Eine Druckluftkühlung im ersten Drittel der Werkzeugoffenzeit erzeugte in Versuchen bis zu 3,6-mal höhere Kühlraten auf der Kavitätsoberfläche. Dies ermöglicht eine höhere Standzeit des Formeinsatzes unter gleichen Prozessbedingungen. Als Vergleich dient hierbei der identische Prozess mit ausschließlich natürlicher Konvektion.

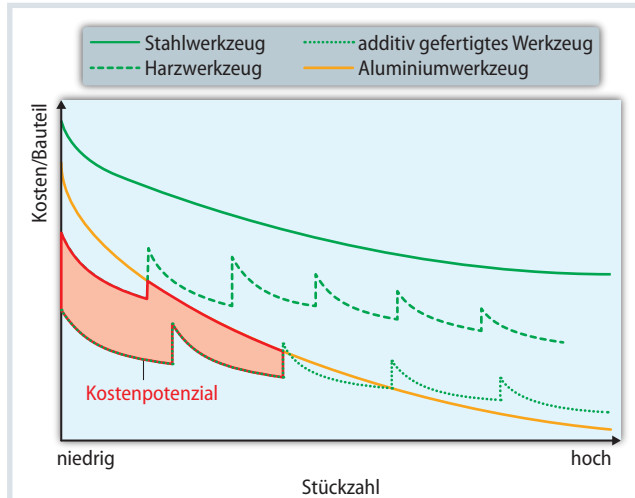
Die Druckluftkühlung wurde über die Pneumatikleitung des Pickers der Spritzgießmaschine realisiert. An diese Leitung

wurden zwei Düsen angeschlossen, die mittig auf die Formeinsätze ausgerichtet wurden. Für die Messung der Kühlrate wurde eine Infrarotkamera verwendet. Im Rahmen eines Teilprojekts mit angepasster Entlüftungs- und Kühlstrategie mittels Konvektion gelang es, die Standzeit von 60 auf über 150 Gutteile zu erhöhen. Wichtig für die Anwendung der Drucklufttemperierung ist eine ausreichende Werkzeugoffenzeit nach dem Abschalten der Druckluft, weil die Druckluft die Formoberfläche, in Abhängigkeit von der Geometrie, ungleichmäßig herunterkühlt (**Bild 2**).

Eine inhomogene Temperatur des Formeinsatzes vor dem Einspritzzyklus gilt es zu vermeiden, da es sonst zu einer ungleichmäßigen Erstarrung der Schmelze und somit zu einer Beeinflussung der Bauteilqualität kommen kann. Für den Temperaturengleich auf der Kavitätsoberfläche und in den oberen Formeinsatzschichten sollte eine »

**Bild 1.** Bei den Stückkosten pro Bauteil zeigt der direkte Vergleich zwischen einem Aluminiumwerkzeug und einem additiv gefertigten Formeinsatz aus Kunststoff das Kostenpotenzial, hier am Beispiel einer Logokappe.

Quelle: [1];  
Grafik: © Hanser



Werkzeugoffenzeit von mindestens 150% der Prozessdauer veranschlagt werden.

### **Konduktive Wärmeleitung im Formeinsatz über Metalleinsätze**

Ein anderer Ansatz, die Temperierung des additiv gefertigten Formeinsatzes zu verbessern, ist die Verwendung von Metalleinsätzen, die in einem zusätzlichen Schritt der Nacharbeit in den Formeinsatz eingebracht werden müssen. Metalleinsätze aus Aluminium verbessern die konduktive Temperierung um bis zu 26,8%. Dieser lokal ermittelte Wert bezieht sich auf thermisch hoch belastete Bereiche eines Formeinsatzes aus Rigur RGD450 (Hersteller: Stratasys), der im PJM-Verfahren (PolyJet Modeling) gedruckt wurde.

Als Referenz dient ein Formeinsatz ohne Metalleinsätze aus identischer Herstellung. Dabei ist der Temperierungseffekt der Variante mit Metalleinsätzen im direkten Wärmebildvergleich

deutlich zu erkennen (**Bild 3**). Die Metalleinsätze sind in direkter Nähe zu thermisch hoch belasteten Bereichen des Formeinsatzes platziert, sodass die zusätzliche konduktive Wärmesenke diese Bereiche mit hohem Wärmeeintrag entlastet. Dies reduziert die Belastung und bietet damit Potenzial, die Standzeit des Formeinsatzes unter gleichen Prozessbedingungen zu erhöhen.

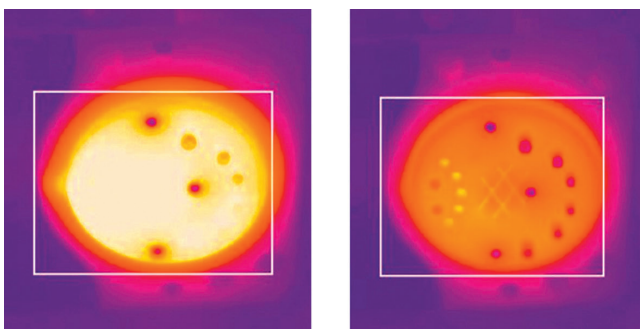
Bei der Platzierung der Metalleinsätze muss die lokale mechanische Belastung beachtet werden, da die zusätzlichen Steifigkeitssprünge im Formeinsatz durch den Übergang vom Grundmaterial aus Kunststoff zum Metalleinsatz im Spritzgießprozess Risse im Formeinsatz induzieren können. Eine Schwächung der mechanischen Integrität des Formeinsatzes kann gleichermaßen Rissbildung im Bereich der Metalleinsätze begünstigen und in der Folge die Standzeit der Formeinsätze verkürzen. Daher sollten die Metalleinsätze konservativ platziert werden, zum Beispiel unterhalb von thermisch hoch belasteten Elementen

ten des Formeinsatzes und außerhalb der Bereiche, auf die im Einspritzprozess hohe mechanische Kräfte einwirken. Dies reduziert die Wirksamkeit der konduktiven Temperierung im Vergleich zum oben genannten Wert, jedoch wird die Standzeit nicht negativ beeinflusst.

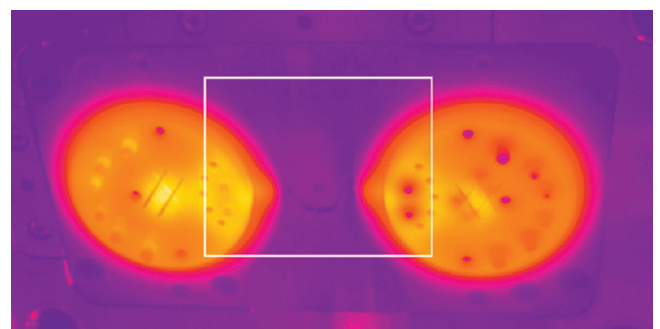
Die Verwendung von Einsätzen aus Stahl ist explizit nicht zu empfehlen, weil die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Aluminium etwa um den Faktor zehn geringer ist und dadurch bedingt nur eine lokale Temperaturreduktion von 12,5% erzielt wird. Außerdem führt die größere Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Stahl und Kunststoff zu höheren Spannungen im Prozess, die ein früheres mechanisches Versagen begünstigen können. Es empfiehlt sich also, einen Werkstoff mit guter Wärmeleitfähigkeit und möglichst ähnlicher Wärmeausdehnung im Vergleich zum Formeinsatzmaterial zu wählen.

### **Konduktive Temperierung durch additiv hergestellte Materialgradienten**

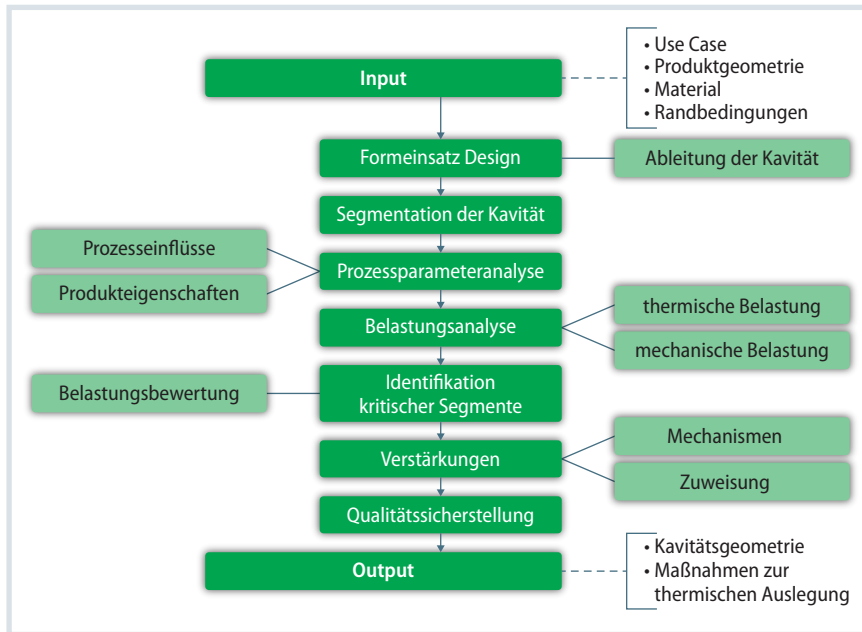
Die additive Fertigung im FFF-Verfahren (Fused Filament Fabrication) ermöglicht es, mehrere Materialien gleichzeitig in einem Bauteil zu verwenden. Dies eröffnet die Möglichkeit, die konduktive Temperierung durch gezielt platzierte Wärmesenken zu verbessern, weil das Grundmaterial an thermisch hoch belasteten Bereichen durch einen Kunststoff mit besseren thermischen Eigenschaften substituiert werden kann. Dieses Verfahren erzielte in Versuchen lokal bis zu 37,4% höhere Abkühlraten und bis zu 13,6% höhere Aufheizraten im Vergleich zu einem Formeinsatz ohne Substitutionsmaterial.



**Bild 2.** Die Aufnahmen einer Infrarot-Kamera zeigen die ungleichmäßige Temperatur direkt vor der Druckluftkühlung (links) und unmittelbar danach (rechts). © Werkzeugmaschinenlabor WZL



**Bild 3.** Temperierung des Formeinsatzes im Bild der Infrarotkamera, links ohne, rechts mit Metalleinsätzen. (Anm.: Der Rahmen ist lediglich der Fokusbereich für das sichtbare Bild der Kamera.) © Werkzeugmaschinenlabor WZL



**Bild 4.** Auswahllogik zur thermischen Auslegung von additiv gefertigten Formeinsätzen aus Kunststoff für das Spritzgießen. Quelle: Werkzeugmaschinenlabor WZL; Grafik: © Hanser

Das Substitutionsmaterial verbessert somit sowohl die Wärmeableitung in tiefere Bereiche des Formeinsatzes im geschlossenen Zustand als auch die Wärmeableitung der gespeicherten Wärme an die Umgebung im offenen Zustand. Als Grundmaterial wurde ein Polyamid und als Substitutionsmaterial ein mit Carbonfasern gefülltes Polyamid verwendet. Außerdem verbessert die lokale Substitution des Grundmaterials die Festigkeit des Formeinsatzes – es entstehen weniger prozessbedingte Deformationen am Werkstück. Dies zeigt das immense Potenzial dieser Temperierungsmethode, die Standzeit der additiv gefertigten Formeinsätze unter gleichbleibenden Prozessbedingungen zu erhöhen.

Dabei ist zu beachten, dass die beiden Materialien eine ähnliche Verarbeitungstemperatur benötigen und auch chemisch anbinden müssen, damit an den Übergängen vom Grund- zum Substitutionsmaterial keine mechanischen Schwachstellen entstehen. Außerdem hängt die Platzierung des Substitutionsmaterials von dessen möglicher Oberflächenqualität ab; zum Beispiel sollte ein fasergefülltes Substitutionsmaterial weiter entfernt von der Oberfläche platziert werden als ein nicht fasergefülltes Material. Das Substitutionsmaterial direkt an der Oberfläche des Formeinsatzes zu platzieren ist nicht empfehlenswert, da

der Wechsel der Materialien auf dem Bauteil erkennbar ist. Grundsätzlich gilt, dass ein Mindestabstand von zweimal dem Düsendurchmesser zwischen der Oberfläche und dem Substitutionsmaterial nicht unterschritten werden sollte.

### Auslegungsmodell für additiv gefertigte Formeinsätze aus Kunststoff

Diese beschriebenen Temperierkonzepte sind Beispiele einer Vielzahl möglicher Ansätze, um Kunststoffformeinsätze beim Spritzgießen besser zu kühlen. Weitere Konzepte sind unter anderem Kühlkanäle oder die Verwendung speziell zugeschnittener Materialien. Die Ansätze bieten verschiedene Vorteile und sind somit für unterschiedliche Anwendungsfälle sinnvoll. Für die Auswahl eines jeweils passenden Ansatzes bedarf es einer Auswahllogik, die die verschiedenen Ansätze gebündelt betrachtet und deren jeweiligen Vor- und Nachteilen Rechnung trägt. Ein klassisches Vorgehen zur Temperierung von Spritzgießwerkzeugen ist für Formeinsätze aus Kunststoff ungeeignet [2]. Aus diesem Grund wurde dafür eine eigene Auswahllogik entwickelt (Bild 4).

Sobald der Formeinsatz von der Geometrie des Bauteils abgeleitet wurde, wird der Formeinsatz im nächsten Schritt anhand der Temperatur- und Druckverläufe in unterschiedliche Elemente seg-

mentiert. Dazu werden die Prozessparameter und die mechanischen und thermischen Belastungen im Spritzgießprozess simuliert. Anhand der Simulationsergebnisse werden aus den zuvor segmentierten Bereichen die Elemente mit versagenskritischen thermischen oder mechanischen Belastungen ausgewählt. Für diese Elemente wird im folgenden Schritt die optimale Temperier- oder Verstärkungsmethode ausgewählt. Dazu wird die genaue Ursache der versagenskritischen Belastung unter Berücksichtigung der Elementgeometrie weiter analysiert.

Anhand von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagens und zugehörigen Prozessparametern wird ausgewählt, welches Konzept die effizienteste Verstärkung für das jeweilige Element liefert. Somit wird eine angepasste Temperierung jedes Formelements ermöglicht, sodass die Standzeit des Formeinsatzes maximiert und die Bauteilqualität sichergestellt werden kann. Insgesamt bietet die thermische Auslegung von Formeinsätzen großes Potenzial und kann bei umfassender Anwendung die Standzeit von additiv gefertigten Formeinsätzen aus Kunststoff mit hoch belasteten Bereichen mehr als verdoppeln. ■

## Info

### Text

**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos, MBA** ist seit 2010 geschäftsführender Oberingenieur am Werkzeugmaschinenlabor WZL und Geschäftsführer der WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH; [info@werkzeugbau-akademie.de](mailto:info@werkzeugbau-akademie.de)

### Dank

Den Autor unterstützten bei der Erstellung dieses Beitrags **Gerret Lukas, Lea Niwar und Matthias Oly**.

Das Forschungsprojekt ITeAM (Integrierte Verfahren der Temperierung von Additive Injection Molds) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)