

Den Einsatz additiv gefertigter Kunststoffformeinsätze neu gedacht

Alexander Heide, Hochschule Bielefeld, alexander.heide@hsbi.de, Elmar Moritzer, Universität Paderborn, elmar.moritzer@ktp.uni-paderborn.de, Christoph Jaroschek, Hochschule Bielefeld, christoph.jaroschek@hsbi.de

Zusammenfassung: Additiv gefertigte Kunststoffwerkzeuge sind flexibel und kostengünstig, weisen jedoch eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, was lange Kühlzeiten und eine eingeschränkte Wirtschaftlichkeit im Spritzgießprozess zur Folge hat. Dieses Problem wird simulativ aufgezeigt. Als Lösungsansatz wird ein Wechselformverfahren mit extern gekühlten, austauschbaren Werkzeugeinsätzen vorgestellt. Eine Machbarkeitsuntersuchung zeigt zudem, dass ein reproduzierbarer Prozess mit komplexen Werkzeugeinsätzen realisiert werden kann.

Stichworte: Rapid Tooling, Wechselformeinsätze, externe Kühlung, gedruckter Kunststoffformeinsatz, DLP-Verfahren, Wechselformverfahren

1 Einleitung

Die Herstellung von Prototypen und Kleinserien stellt Kunststoffverarbeiter vor erhebliche Herausforderungen, da die Konstruktion und der Bau konventioneller Spritzgießwerkzeuge aus Stahl mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden sind. Bereits einfache Werkzeuge mit grundlegenden Funktionen wie Auswerfern und Kühlung verursachen häufig Kosten im fünfstelligen Bereich, die mit zunehmender Bauteilkomplexität nahezu exponentiell ansteigen [1]. Die Wirtschaftlichkeit solcher Werkzeuge hängt wesentlich von der geplanten Stückzahl ab, wobei sich die erforderlichen Ausbringungsmengen je nach Branche stark unterscheiden können. Gleichzeitig führen kürzere Produktlebenszyklen und eine zunehmende Individualisierung branchenübergreifend zu einem steigenden Bedarf an flexiblen und wirtschaftlichen Fertigungslösungen. Insbesondere in der Prototypen- und Kleinserienfertigung stößt das klassische Spritzgießen daher häufig an wirtschaftliche Grenzen.

Als Reaktion darauf haben sich in den vergangenen Jahren verschiedene alternative Fertigungsansätze entwickelt, darunter generative Fertigungsverfahren wie Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und Rapid Tooling [2], Vakuumgießverfahren mit Harzsystemen [3] sowie das Space-Puzzle-Molding mit modularen Aluminiumwerkzeugen [4]. Während generative Verfahren insbesondere in der Prototypen- und Endproduktfertigung stark an Bedeutung gewonnen haben [5], stellen die übrigen Ansätze aufgrund ihres hohen zeitlichen und personellen Aufwands überwiegend Nischenlösungen dar.

Die generative Herstellung von Spritzgießwerkzeugen oder Werkzeugeinsätzen aus Kunststoff ist nicht neu, jedoch weiterhin Gegenstand aktueller Forschung [6–9]. Der größte Vorteil eines solchen Ansatzes liegt in der hohen Gestaltungsfreiheit, die eine schnelle und kostengünstige Realisierung komplexer Strukturen ermöglicht. Dem stehen materialbedingte Nachteile gegenüber, insbesondere die geringe Wärmeleitfähigkeit sowie die im Vergleich zu Metallen ungünstigen mechanischen Eigenschaften, die sich mit zunehmender Temperatur verschlechtern. Um Letzterem entgegenzuwirken, wurden hochfeste und vergleichsweise temperaturbeständige Photopolymerharze entwickelt, die

mittels Digital-Light-Processing-Anlagen verarbeitet werden können. Die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit bleibt jedoch eine zentrale Herausforderung für den Einsatz im konventionellen Spritzgießprozess. Daraus ergibt sich die Frage, ob mit einem alternativen Prozessablauf die bestehenden Nachteile kompensiert werden können.

2 Gegenüberstellung der Kühlzeiten: Stahl- vs. Kunststoffwerkzeug

Zur Untersuchung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit auf den Spritzgießprozess wird eine zweidimensionale, zyklische Wärmesimulation eines vereinfachten Spritzgießwerkzeugs mit der Software COMSOL Multiphysics 6.3 durchgeführt. Das in Abbildung 1 dargestellte Modell bildet die formgebende Kavität, den Werkzeugeinsatz sowie das umgebende Stammwerkzeug ab. Als Bauteilwerkstoff wird Polypropylen verwendet; spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit werden temperaturabhängig modelliert (siehe Tabelle 1 und Abbildung 2) [10]. Die übrigen Materialparameter sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt.

Es werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- Die Entformung des Spritzgießteils wird nicht berücksichtigt.
- Die Abkühlung bei geöffnetem Werkzeug wird nicht berücksichtigt.
- Das Kunststoffbauteil steht dauerhaft in idealisiertem Wärmeübergang mit der Werkzeugkavität.

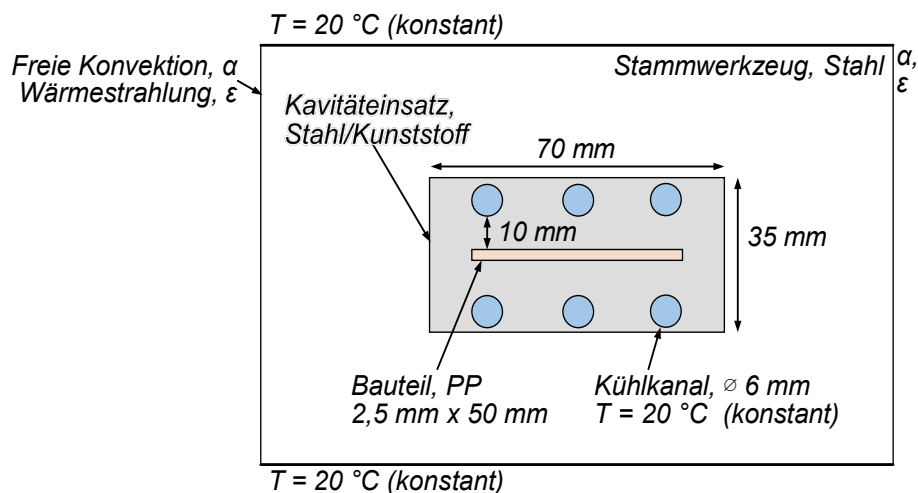


Abbildung 1: Vereinfachtes Simulationsmodell mit Randbedingungen

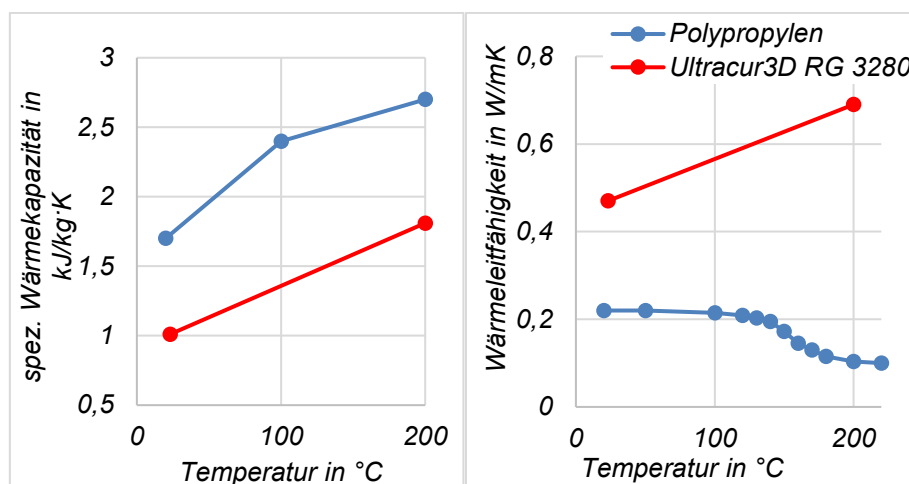


Abbildung 2: Temperaturabhängige Materialparameter für Polypropylen [10] und Ultracur3D RG 3280 [11]: spezifische Wärmekapazität (links), Wärmeleitfähigkeit (rechts)

Die Steuerung des Einspritzvorgangs erfolgt über die Neuinitialisierung des Temperaturfeldes des Bauteils mit der Verarbeitungstemperatur der Schmelze (siehe Tabelle 1), sobald die mittlere Bauteiltemperatur während des Abkühlvorgangs die definierte Entformungstemperatur von 70 °C erreicht. Auf diese Weise kann die Kühlzeit pro Zyklus direkt in Abhängigkeit von der Werkzeugerwärmung bestimmt werden. Da von einem idealen Wärmeübergang ausgegangen wird und weder die Entformung noch Werkzeugbewegungen berücksichtigt werden, bildet das Modell den ungünstigsten Fall zur Bewertung der zyklischen Werkzeugerwärmung ab.

Tabelle 1: Materialparameter des Simulationsmodells

| Bauteil, Polypropylen | |
|--|------------------------|
| Verarbeitungstemperatur der Schmelze | 220 °C |
| Kristallisationsenthalpie | 95 J/gK |
| Kristallisationstemperatur | 133 °C |
| Bereich des Phasenübergangs ΔT | 13 K |
| Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität | Abb. 2 |
| Kavitäteeinsatz, Photopolymer (Ultracur3D RG 3280) | |
| Dichte | 900 kg/m ³ |
| Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität | Abb. 2 |
| Stammwerkzeug, Stahl | |
| Wärmekapazität | 475 J/kgK |
| Wärmeleitfähigkeit | 30 W/mK |
| Dichte | 7850 kg/m ³ |

Abbildung 3 zeigt die Gegenüberstellung des simulativ ermittelten Abkühlverhaltens des Bauteils in einem Kunststoff- im Vergleich zum Stahlwerkzeug. Im ersten Spritzgießzyklus ist die Kühlzeit des Bauteils im Kunststoffeinsatz etwa fünfmal länger als im Stahleinsatz. Im zweiten Zyklus verdoppelt sich die Kühlzeit des Kunststoffeinsatzes, selbst bei vorhandenen Temperierkanälen. Ab dem dritten Zyklus wird ein quasistationärer Zustand erreicht; die Kühlzeit bleibt bei etwa 160 Sekunden konstant. Im Vergleich dazu erreicht

das Stahlwerkzeug bereits nach dem zweiten Abguss den quasistationären Zustand, wobei sich die Zykluszeit bei rund 13 Sekunden einpendelt.

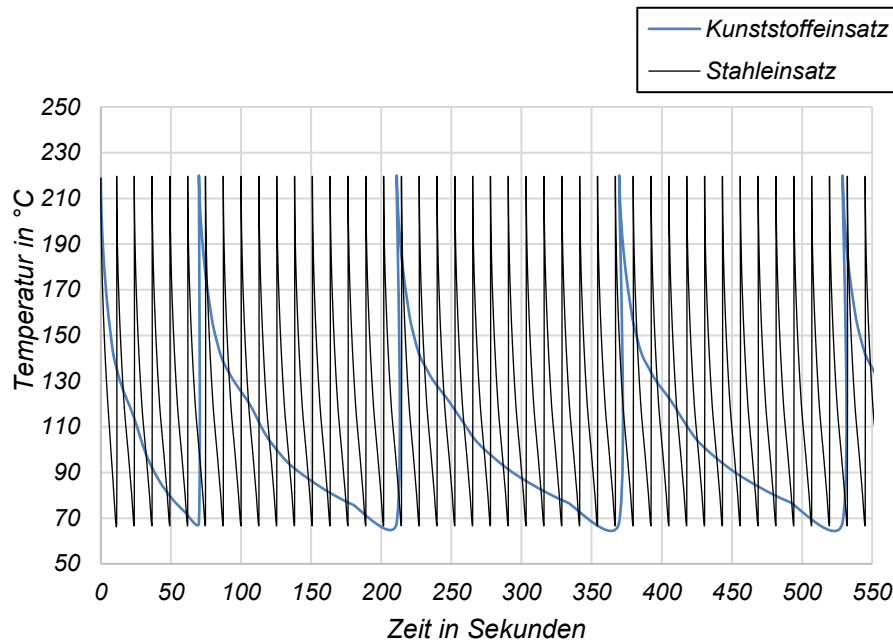


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für die mittlere Bauteiltemperatur für Formeinsätze aus Stahl und Kunststoff

3 Bewertung der Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass additiv gefertigte Kunststoffwerkzeugeinsätze unter konventioneller Prozessführung trotz integrierter Temperierung nur eingeschränkt als wirtschaftliche Alternative zu metallischen Spritzgießwerkzeugen geeignet sind. Die geringe Wärmeleitfähigkeit führt dazu, dass die im Kunststoffwerkzeug eingebrachte Prozesswärme nur langsam von der Kavitätsoberfläche nach außen bzw. zu den Temperierkanälen abgeführt wird. Dies wird besonders im Vergleich zu Stahlwerkzeugen deutlich. Weiterhin zeigt sich, dass nur der erste Spritzgießzyklus mit einem Kunststoffeinsatz eine akzeptable Kühlzeit ermöglicht. Überträgt man diese Erkenntnisse auf reale Bauteilformen, wird deutlich, dass es insbesondere in Bereichen mit Kernen oder Verrippungen zu einer starken lokalen Erwärmung kommen kann und dadurch ein stabiler Prozess nicht mehr gewährleistet ist. Ein weiterer Punkt, der durch die sehr langsame Abkühlung bedingt wird, ist die zusätzliche Verlängerung der Nachdruckzeit sowie mögliche Auswirkungen auf die mechanische Bauteilqualität, die gesondert geprüft werden müssen.

4 Ein alternativer Prozessablauf

Basierend auf den Erkenntnissen der Simulation sowie in Anlehnung an [12] wurde ein alternativer Prozessablauf entwickelt, der einen kühlzeitunabhängigen Spritzgießzyklus ermöglicht. Dieser ist in Abbildung 4 dargestellt. Der erste Schritt beinhaltet wie beim konventionellen Spritzgießen das Einspritzen des Kunststoffs in die Kavität mit anschließender Nachdruckphase und abschließender Dosierung. Im zweiten Schritt öffnet das Werkzeug und gibt den geschlossenen Werkzeugeinsatz mit dem innenliegenden Bauteil

frei, der im dritten Schritt durch einen definiert temperierten Werkzeugeinsatz ersetzt wird.

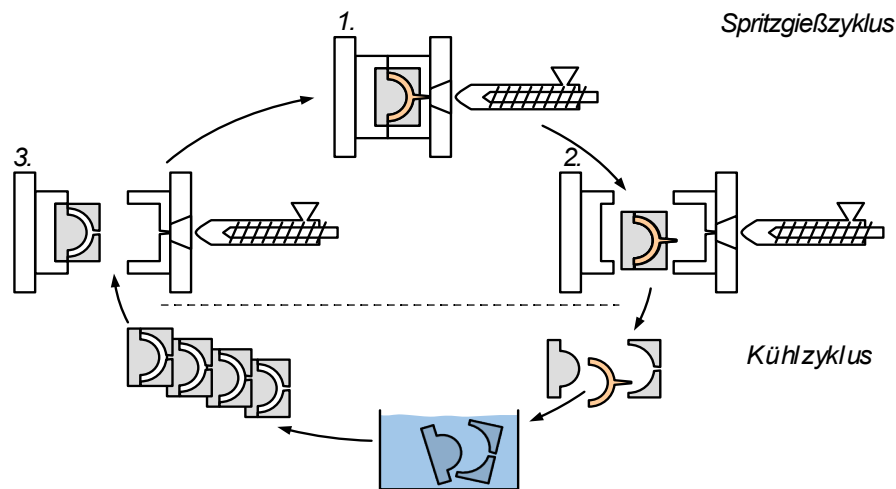


Abbildung 4: Prozessablauf des kühlzeitunabhängigen Spritzgießprozesses mit externer Werkzeugkühlung

Nach der Entnahme des Werkzeugeinsatzes aus dem Stammwerkzeug wird das Bauteil nach Ablauf der Restkühlzeit außerhalb der Maschine entformt. Anschließend erfolgt die Kühlung des Werkzeugeinsatzes mittels Wasserbad oder Druckluft, bis die gewünschte Zieltemperatur erreicht bzw. die eingebrachte Prozesswärme abgeführt wurde. Im letzten Schritt wird der ggf. getrocknete Werkzeugeinsatz zusammengesetzt und erneut der Spritzgießmaschine zugeführt. Auf diese Weise startet der Prozess bereits im auf die Temperatur bezogenen quasistationären Zustand, das bedeutet, die Temperatur des Kavitäteneinsatzes ist mit jedem Zyklus identisch.

5 Machbarkeitsuntersuchung des Wechselformprozesses

Abbildung 5 zeigt die Umsetzung und Erprobung des Wechselformprozesses. Für die Realisierung eines schnellen Werkzeugwechsels wurde ein Schnellwechselsystem konzipiert, welches mit jeder konventionellen Spritzgießmaschine kompatibel ist. Der Wechselformeinsatz wird über zwei Klemmleisten mit dem Auswerfermechanismus der Spritzgießmaschine verbunden und im Stammwerkzeug fixiert. Mit Abschluss der Dosierung öffnet die Maschine und fährt den Auswerfer vor, wodurch der Werkzeugeinsatz freigegeben wird. Dieser kann nach oben oder unten entnommen und durch einen neuen Einsatz ersetzt werden. Der Aufbau bietet zudem den Vorteil, dass eine Automatisierung mittels Handlingsystem leicht umsetzbar ist.

In der ersten Versuchsreihe wurden mit dem in Abbildung 5 dargestellten Werkzeug etwa 100 Spritzgießzyklen mit dem Polypropylen Moplen HP500W erfolgreich durchgeführt, ohne dass es zu einem Werkzeugversagen gekommen ist. Das Werkzeug wurde in Anlehnung an die Simulation (siehe Abbildung 1) konstruktiv umgesetzt, wobei auf die Kühlkanäle verzichtet wurde. Die Herstellung des Werkzeugs erfolgte mit dem DLP-Drucker Rapid Shape I30+ aus dem Photopolymer Ultracur3D RG 3280 mit anschließender

Nachbehandlung gemäß den Herstellerempfehlungen [13]. Die Werkzeugbeschaffungszeit betrug dabei etwa 9,5 Stunden und setzte sich aus rund 1,5 Stunden Druckzeit, etwa 1 Stunde Nachbehandlung (Lösen und Reinigen der Bauteile sowie Nachbehandlung in der UV-Kammer) sowie einem 7 Stunden dauernden Temperprozess zusammen.

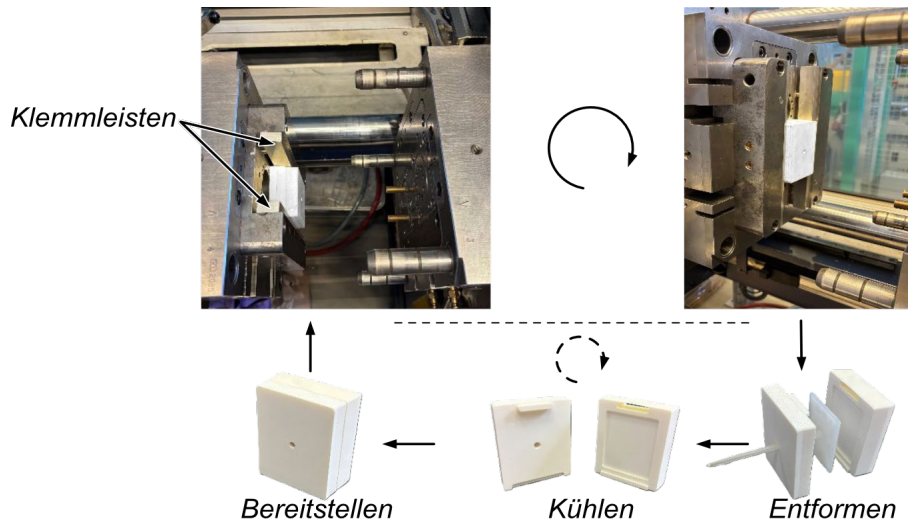


Abbildung 5: Umsetzung des Wechselformprozesses mit Schnellwechselsystem für den Werkzeugeinsatz

Im Rahmen der Füllstudie zeigte sich, dass der Einspritzdruck und die Nachdruckhöhe angepasst werden mussten, um ein Werkzeugversagen zu vermeiden. Daraus resultierte eine Begrenzung beider Parameter auf 100 bar. Es konnte eine Zykluszeit von etwa 40 Sekunden vom Einsetzen des Werkzeugeinsatzes bis zur Entnahme nach Ablauf der 30-sekündigen Nachdruckphase realisiert werden. Nach der Werkzeuggestnahme wurde das Bauteil manuell entformt, der Werkzeugeinsatz in einem Wasserbad gekühlt, anschließend mit Druckluft getrocknet und dem Spritzgießprozess erneut zugeführt (siehe Abbildung 5). Zudem wurde die Temperatur der Kavitätsoberfläche der getrockneten Werkzeughälften vor jeder erneuten Zuführung mittels Infrarotkamera erfasst, um eine konstante Werkzeugtemperatur sicherzustellen.

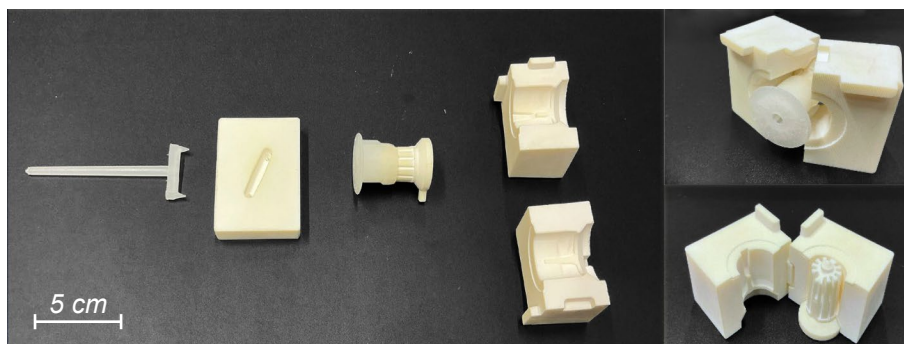


Abbildung 6: Gedrucktes vierteiliges Werkzeug

In der zweiten Versuchsreihe wurde das in Abbildung 6 dargestellte Werkzeug im Wechselformprozess mit zwei Trennebenen und einem Kern erfolgreich getestet. Der Fokus lag dabei auf der konstruktiven Umsetzung komplexerer Werkzeuge sowie deren Handhabung im Prozess. Die Werkzeugbeschaffungszeit lag, wie beim ersten Werkzeug, bei

ca. 9,5 Stunden. Das Bauteil weist eine durchschnittliche Wandstärke von 2 mm, eine Höhe von 24 mm, einen maximalen Durchmesser von 32 mm und einen mittleren Außendurchmesser im Bereich des Kerns von 22 mm auf. Werkstoffe, Prozessparameter und Prozessführung entsprachen denen der ersten Versuchsreihe; lediglich das Einspritzvolumen sowie die Nachdruckzeit (von 30 auf 45 Sekunden) wurden angepasst. Insgesamt konnten 15 Abgüsse durchgeführt werden, bevor es zu einem Riss im Angussbereich kam.

6 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten zyklischen Wärmesimulation zeigen, dass additiv gefertigte Kunststoffwerkzeugeinsätze im konventionellen Spritzgießprozess nur eingeschränkt einsetzbar sind. Die geringe Wärmeleitfähigkeit führt dazu, dass die im Werkzeug eingebrachte Prozesswärme nur unzureichend abgeführt werden kann. Dies äußert sich deutlich in einer verlängerten Kühlzeit. Übertragen auf reale Bauteilformen mit Bereichen wie Kernen oder Verrippungen verschärft sich dieses Problem, da lokale Überhitzungen auftreten können und ein stabiler Prozess nicht mehr realisiert werden kann. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neuer Prozessablauf definiert, der einen kühlzeitunabhängigen Spritzgießzyklus ermöglicht. Im Wechselformverfahren wird der Formeinsatz entnommen und die Restkühlzeit, die Bauteilentformung sowie die thermische Werkzeugkonditionierung ausgelagert.

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung konnte gezeigt werden, dass mit dem DLP-Verfahren komplexe Spritzgießwerkzeuge realisiert werden können, wobei die Werkzeugbeschaffungszeit mit ca. 9,5 Stunden vergleichsweise kurz ausfiel. Darüber hinaus konnte ein stabiler und reproduzierbarer Prozess sowohl mit einfachen als auch mit komplexen Formeinsätzen erfolgreich umgesetzt werden.

In den nächsten Entwicklungsschritten müssen sowohl die Prozessführung beim Spritzgießen als auch die konstruktive Gestaltung der Werkzeuge weiter angepasst und optimiert werden. Dabei sind insbesondere Aspekte der Haltbarkeit der additiv gefertigten Werkzeugeinsätze sowie eine weitere Verbesserung der Abdichtung zu berücksichtigen. Darüber hinaus müssen die Standzeit der Werkzeuge sowie eine bauteilbezogen optimierte Zykluszeit ermittelt werden, um die Wirtschaftlichkeit des Wechselformprozesses bewerten zu können. In einem weiteren Schritt ist die Automatisierung der Bauteilentformung sowie der thermischen Werkzeugkonditionierung vorgesehen, um manuelle Eingriffe zu reduzieren.

Literatur

- [1] Hayes, A. C.; Sethuraman, L.; Fingersh, L. J.; Dykes, K.; Additive Manufacturing: A New Paradigm for the Next Generation of High-Power-Density Direct-Drive Electric Generators, Presented at ASME 2018 Power & Energy Conference & Exhibition Lake Buena Vista, Florida, 2018, DOI: 10.1115/POWER2018-7140
- [2] Gebhardt, A.; Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping – Tooling - Produktion, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 5. Auflage, 2016
- [3] Wortmann, M.; Untersuchung und Prävention der Alterung von Silikon-Gießwerkzeugen beim Polyurethan-Vakuumgießen, Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn 2021
- [4] Trapp, W.: Serienproduktion aus der Prototypen-Form. Kunststoffe 93 (2003) 8, S. 39-41
- [5] N.N.; Additive Fertigung als zukunftsweisendes Fertigungsverfahren, IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
- [6] Mitterlehner, T.: Auslegung und Charakterisierung additiv gefertigter Formeinsätze für Spritzgießwerkzeuge, Dissertation, Johannes Kepler Universität, Linz 2020
- [7] Prigann, D.: Beitrag zur Entwicklung 3D-gedruckter Formeinsätze (FFF) für das Spritzgießen von Kunststoffbauteilen, Dissertation, Technischen Universität Clausthal, Clausthal 2023
- [8] Schumacher, T.; Bay, T. O.; Stricker, M.; Lake, S.: 3D-gedruckte Formeinsätze auf die Probe gestellt. Kunststoffe 113 (2023) 5, S. 76-79
- [9] Rost, A.; Stark, M.: Spritzgießen in kleinen Stückzahlen, Kunststoffe 112 (2022) 3, S. 96-99
- [10] Bonten, C.: Kunststofftechnik Einführung und Grundlagen. 3 Auflage 2022, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [11] N.N.: Ultracur3D® RG 3280 Extended Technical Data Sheet. Mass Additive Manufacturing GmbH, Version 4.4. 2024
- [12] Kartelmeyer, S.; Welling, F.; Jaroschek, C.: Formeinsätze extern gekühlt, Kunststoffe 114 (2024) 7, S. 68-71
- [13] König, C.; König, M.; Richter, A.: White Paper Evaluation of DLP 3D Printing for Injection Molding Inserts: A Case Study on BASF Ultracur3D® RG 3280, DREIGEIST Additive Intelligence oHG, 2023