

**Spritzgusswerkzeuge mit keramischen Formbereichen zur
prozessintegrierten induktiven Erwärmung von Einlegeteilen**

**Injection Moulding Tools with Ceramic Mould Regions for
Inprocess Heating of Insert Parts by Induction Heating**

R. Landfried, R. Gadow, M. Maier und W. Schinköthe

Beitrag zum

**23. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

6. - 7. März 2013

Session 1

Effizienzsteigerung und Vorhersage von Kunststoffverarbeitungsprozessen

SPRITZGUSSWERKZEUGE MIT KERAMISCHEN FORMBEREICHEN ZUR PROZESSINTEGRIERTEN INDUKTIVEN ERWÄRMUNG VON EINLEGETEILEN

INJECTION MOULDING TOOLS WITH CERAMIC MOULD REGIONS FOR IN-PROCESS HEATING OF INSERT PARTS BY INDUCTION HEATING

R. Landfried¹, R. Gadow¹, M. Maier² und W. Schinköthe²

¹ IFKB, Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 7b, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0)711 685- 68316, Fax: + 49 (0)711 685- 58316, E-Mail: richard.landfried@ifkb.uni-stuttgart.de

² IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0)711 685- 66402 Fax: + 49 (0)711 685- 66356, E-Mail: spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Die Erfüllung von umfangreichen Anforderungen an technische Bauteile wird zunehmend durch die Kombination der Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe realisiert, da einzelne Werkstoffe immer seltener komplexen Lastkollektiven genügen können. Beim Kunststoffspritzguss werden mechanische und gestalterische Funktionen häufig auf metallische Einlege­teile und den umspritzten Kunststoff verteilt. Um eine reproduzierbare Haftung zwischen Kunststoff und Metall zu gewährleisten ist eine regelbare, prozesssichere Temperaturführung der metallischen Einlege­teile erforderlich. Zur schnellen Aufheizung der Einlege­teile stellt die Induktive Erwärmung ein geeignetes Verfahren dar, das sich darüber hinaus einfach in Werkzeugformen integrieren lässt. In einer Kooperation des IKFF mit dem IFKB und der Bernhard Fischer GmbH wurde durch den Einsatz keramischer Werkzeugeinsätze ein Werkzeugsystem aufgebaut, welches eine gezielte Erwärmung des Einlege­teils durch Induktion ermöglicht. Dabei können hohe Energie- und Zeitverluste durch das externe Aufheizen der Einlege­teile oder unnötig hohe Werkzeuggrundtemperaturen vermieden werden. Zur Auslegung des induktiven Heizsystems wurden sowohl das elektromagnetische Einkoppelverhalten durch das keramische Formwerkzeug hindurch als auch der Aufheizvorgang computergestützt simuliert. Die Ergebnisse wurden durch Versuche erfolgreich verifiziert. Das System, welches steuerungstechnisch komplett in die Spritzgießmaschine eingebunden ist, zeichnet sich durch eine sehr hohe Energieeffizienz aus. Die Wärme wird zum richtigen Zeitpunkt ausschließlich dort erzeugt, wo sie benötigt wird, so dass kein Energieverbrauch im Leerlauf, wie beispielsweise bei einem herkömmlichen Durchlaufofen oder Heißluftgebläse, auftritt.

Abstract: Since particular materials are rarely able to satisfy complex functional requirements for technical components combinations of different materials and their properties are increasingly used to fulfill technical specifications. In case of injection moulded parts mechanical and design features are distributed to metal insert parts and the surrounding injection moulded plastics. A stable temperature control of the metal insert parts is required to guarantee reproducible adhesive strength between plastics and metal. Induction heating displays a suitable process for fast heating of the insert parts and can easily be integrated in the moulding tool. In cooperation of IKFF, IFKB and the Bernhard Fischer GmbH a tool system was built by using ceramic mould inserts, which enable a tightly focused induction heating of insert parts. Thereby high energy input and time losses due to external heating of the insert parts or gratuitously high mould temperatures can be avoided. Whilst designing the induction heating system both the electromagnetic coupling through the projected high performance ceramic mould insert and the dynamic thermal behaviour have been analyzed using computer-based simulation tools. The results have successfully been verified by experiment. The system, whose control is completely embedded in the moulding machine's process control unit, shows very high energy efficiency. Heat is punctually generated exactly where it is needed, which leads to a zero energy consumption when idling in contrast to conventional feed ovens or hot-air blowers.

Schlagwörter: Formenbau, Keramik, EDM, Induktionserwärmung, Hybridbauteil, Adhäsion

Keywords: mould making, ceramics, EDM, induction heating, hybrid part, adhesion

Spritzgegossene Hybridstrukturen

Die Anforderungen an spritzgegossene Kunststoffbauteile erstrecken sich sowohl auf technische als auch auf gestalterische Funktionen. Die Kombination aus Design und Funktion kann häufig nur realisiert werden, indem die gestellten Anforderungen durch eine Kombination unterschiedlicher Materialien getrennt erfüllt werden. Hierbei eignen sich Kunststoffe hervorragend zur Umsetzung von Designvorgaben, sind aber in der Aufnahme von mechanischen Belastungen stark begrenzt und auch nur bei geringen Temperaturen einsetzbar. Vor diesem Hintergrund zeichnet sich ein deutlicher Trend hin zum Werkstoffverbund mit metallischen Einlegeteilen ab, welche die mechanischen Lasten aufnehmen und zur Erfüllung der gestalterischen Funktion mit Kunststoff umspritzt werden. Dabei stellt das Umspritzen zur Herstellung dieser Hybridbauteile, im Vergleich zu Fügeprozessen wie Kleben oder Schweißen, ein wirtschaftliches Verfahren dar, da es aus einem einzigen Arbeitsgang mit kurzen Zykluszeiten besteht [1]. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für diese Werkstoffverbunde ist der Einsatz als tragende Leichtbaustrukturen wie sie in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden [2], [3]. Hier können auch fasergefüllte Polymere eingesetzt werden, die ihrerseits ebenfalls zur Bauteilstabilität beitragen. Ein weiteres Anwendungsfeld von Hybridstrukturen stellt die Medizintechnik dar, wo neben klassischen Festigkeitsanforderungen auch besondere Ansprüche an die Mediendichtheit der Verbindungszone gestellt werden [5].



Bild 1: Anwendungsbeispiele für Hybridbauteile

Herausforderung Werkstoffinterface

Das Umspritzen von metallischen Einlegeteilen mit Kunststoff führt häufig zu prozess- und materialbedingten Bauteilfehlern im Werkstoffinterface. Die Ursache für diese Fehler liegt in erster Linie in der Temperaturdifferenz zwischen der erhitzten Spritzgussmasse und dem Einlegeenteil, welche zu thermischen Spannungen im Werkstoffverbund führt und die mechanische Belastbarkeit des Kunststoff-Metall-Hybriden herabsetzt. Beim Umspritzen „kalter“ Einlegeteile treten insbesondere Haftungsprobleme, Lunker und Fehlstellen in der Kontaktzone zwischen Metall und Kunststoff auf. Das Vorheizen von Einlegeteilen kann beim Erreichen einer geeigneten Temperatur

zu einer deutlichen Verringerung dieser Fehler führen. Die Anbindung zwischen Metall und Kunststoff kann signifikant verbessert werden [2, 4, 5].

Vorwärmen der Einlegeteile

Die Temperierung von metallischen Einlegeteilen beim Kunststoffspritzgießen von Hybrid-Bauteilen geschieht bisher, sofern sie praktiziert wird, durch eine externe Wärmequelle (Durchlauföfen, Heizstrahler etc.) [5], die das Einlegeenteil außerhalb der Werkzeugform erhitzt. Dies führt zu einem unkontrollierten Abkühlen des Einlegeteils auf dem Weg von der Wärmequelle hin zum Werkzeug, wodurch die Prozess-temperatur des Einlegeteils nicht genau bestimmt werden kann. Dieser ungewollte Temperaturverlust im Bauteil führt zu einem gesteigerten Energieaufwand, da es notwendig ist, das Einlegeenteil über dessen angestrebte Temperatur im Spritzgießprozess zu erhitzen. Diese erhöhte Temperatur hat häufig eine Deformation des Einlegeteils durch Überhitzung zur Folge und kann ebenfalls zu Gefügeveränderungen des metallischen Materials führen und damit dessen Eigenschaften negativ beeinflussen.

Ein kontrolliertes Erwärmen der metallischen Einlege-teile in der geschlossenen Spritzgussform hingegen erlaubt ein reproduzierbares Einstellen der optimalen Temperatur des Einlegeteils zur Erreichung der maximalen Anbindung zwischen Kunststoff und Metall. Ohne Verlängerung der Zykluszeiten ist es so möglich, die Energieeffizienz und Bauteilqualität gleichermaßen zu steigern.

Werkzeugintegriertes Aufheizsystem

Die Institute IFKB und IKFF der Universität Stuttgart haben im Rahmen eines von der AiF geförderten Projekts ein Verfahren zur prozesssicheren Temperatursteuerung von metallischen Einlegeteilen durch induktive Erwärmung beim Um- bzw. Anspritzen mit Kunststoff zur Verbesserung der Verbundhaftung geschaffen. Durch die Entwicklung von felddurchlässigen struktur- und funktionskeramischen Werkzeugeinsätzen konnte ein System aufgebaut werden, welches eine gezielte Erwärmung des Einlegeteils durch Induktion zulässt, ohne hohe Energie- und Zeitverluste durch eine erhöhte Grundtemperatur des Spritzgusswerkzeugs zu verursachen.

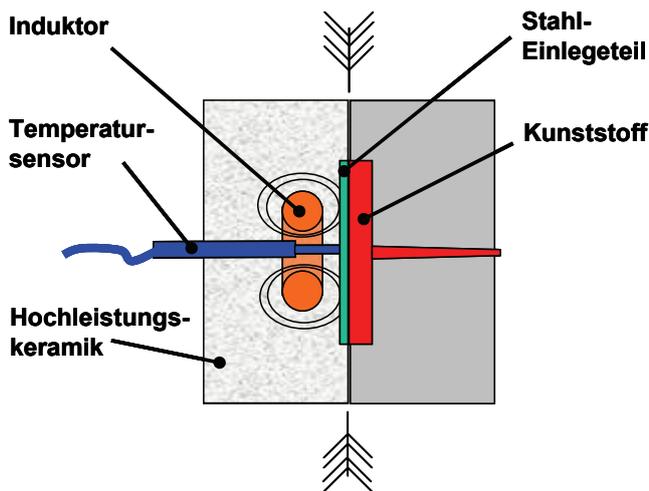


Bild 2: Konzept werkzeugintegriertes Heizsystem

Induktionserwärmung

Grundlage der Induktionserwärmung ist das Transformatorprinzip. Das zu erwärmende Werkstück wird in ein elektromagnetisches Wechselfeld eingebracht. Dieses elektromagnetische Wechselfeld wird von einem Leiter, dem Induktor, erzeugt, der einen hochfrequenten Wechselstrom führt. Sofern das Werkstück eine elektrische Leitfähigkeit besitzt, wird im Werkstück wiederum eine Spannung induziert, welche Wirbelströme antreibt. Diese Wirbelströme führen über den Ohm'schen Widerstand des Werkstücks zu einer Joule'schen Verlustleistung und bewirken damit eine Erwärmung.

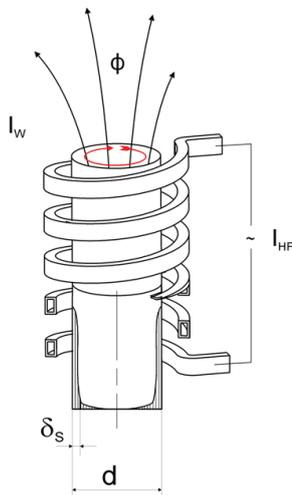


Bild 3: Prinzip induktiver Erwärmung

Die Wärme wird so direkt in jenem Volumen erzeugt, welches vom elektromagnetischen Wechselfeld durchdrungen wird. Dadurch ist es mittels Induktionserwärmung möglich, lokal begrenzte Bauteilbereiche gezielt zu erwärmen – was z.B. beim induktiven Randschichthärten genutzt wird.

Der hochfrequente Wechselstrom wird mittels einer Oszillatorschaltung in einem Induktionsgenerator erzeugt, wobei der Induktor einen Teil dieses Schwingkreises darstellt und damit die Frequenz und den Arbeitspunkt stark mit beeinflusst. Der Induktor als unmittelbar energieabgebendes Element kann sehr kompakt gestaltet werden, sodass eine Erwärmung auch kleiner Geometrien mit sehr hoher Leistungsdichte möglich ist, wobei der Induktionsgenerator als Energiequelle abseits positioniert werden kann. Induktor und Generator werden über hochstromfähige Kabel miteinander verbunden.

Erodierbare Keramiken für Spritzgusswerkzeuge

Moderne Hochleistungskeramiken zeichnen sich durch ihre hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte aus. Durch diese Eigenschaftskombination eignen sie sich insbesondere für Anwendungen, die den Einsatz verschleißfester Bauteile erfordern. Die Bearbeitung keramischer Werkstoffe ist durch deren hohe Abrasionsbeständigkeit im gesinterten Zustand nur mit Diamantwerkzeugen möglich und die Abtragleistung sowie die Vielfalt der herstellbaren Geometrien sind damit stark eingeschränkt. Insbesondere bei kleinen Losgrößen, wie sie im Werkzeug- und Formenbau üblich sind, können die Vorteile der Verfahren zur endkonturnahen Fertigung, wie dem Spritzgießen keramischer Bauteile (CIM – Ceramic Injection Moulding), nicht genutzt werden. Eine Alternative zur zeit- und kostenintensiven spanenden Hartbearbeitung stellt die funkenerosive Bearbeitung (EDM - Electrical Discharge Machining) dar. Bei der funkenerosiven Bearbeitung sind Werkstück und Werkzeug durch eine dielektrische Flüssigkeit getrennt. Das Werkstückmaterial wird durch eine Reihe aufeinanderfolgender elektrischer Entladungen zwischen Werkzeug und Werkstück erhitzt und durch Ausschleudervorgänge abgetragen [7]. Das Prinzip der funkenerosiven Bearbeitung ist in Bild 4 dargestellt.

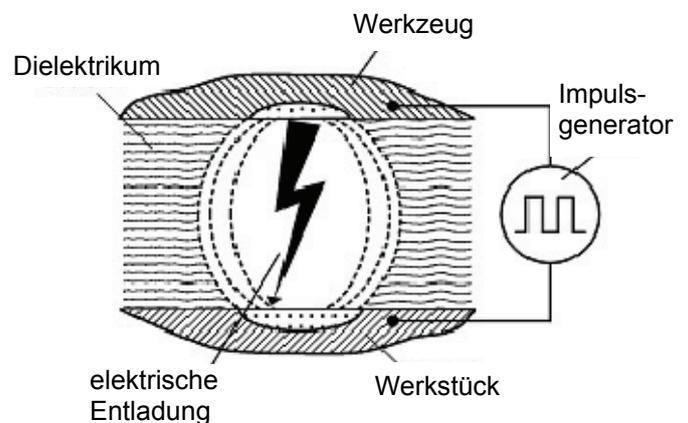


Bild 4: Prinzip des Materialabtrags bei der Funkenerosion [7]

Verfahren dieser Art, wie die funkenerosive Senkbearbeitung oder das Drahtschneiden, sind unabhängig von der Härte und Steifigkeit des Werkstückmaterials

und tragen Material ohne mechanische Belastungen des Werkstücks ab. Durch EDM lassen sich geometrisch komplexe Formen erzeugen, die durch kein anderes Verfahren herstellbar sind, wie z.B. Kavitäten mit hohen Aspektverhältnissen und scharfkantigen innenliegenden Ecken. In vorangegangenen Arbeiten wurden am IFKB Keramiken entwickelt, die sich aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit [6] und einem angepassten Werkstoffdesign im Gegensatz zu konventionellen Keramiken funkenerosiv bearbeiten lassen [8, 9]. Die mechanischen Eigenschaften der in dieser Arbeit eingesetzten Keramik sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: mechanische Eigenschaften der eingesetzten Keramik

Biegefestigkeit ⁽¹⁾ [MPa]	Härte [HV10]	E-Modul [GPa]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1050	1950	400	18,5 ⁽²⁾ - 11,3 ⁽³⁾

⁽¹⁾ermittelt im 3-Punkt-Biegeversuch, ⁽²⁾ 20°C, ⁽³⁾ 400°C

Dabei handelt es sich um eine ZTA (zirconia toughened alumina) basierte Keramik mit Titankarbid als elektrisch leitfähige Phase. Durch die funkenerosive Bearbeitung können Oberflächen mit Rauheitswerten von $R_a \approx 1\mu\text{m}$ erzeugt werden. In den oberflächennahen Regionen entstehen weder Veränderungen der Materialzusammensetzung noch Risse senkrecht zur Oberfläche (siehe Bild 4) [9].

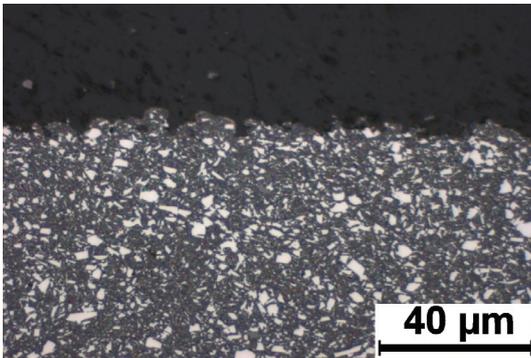


Bild 4: Querschliff einer drahtgeschnittenen ZTA-TiC Probe [8]

In Folge der ausbleibenden Veränderung der Zusammensetzung des Werkstückmaterials durch den Bearbeitungsprozess können diese Keramiken in einem stabilen Funkenerosionsprozess bearbeitet werden.

Versuchswerkzeug

Anhand einer Demonstratorgeometrie soll mittels eines Versuchswerkzeugs die Umsetzung des werkzeugintegrierten Heizsystems für Einlege-teile erreicht werden. Das Forschungswerkzeug dient gleichzeitig der Qualifikation der speziellen Hochleistungskeramik

als Werkstoff für komplette Kavitäts-einsätze sowie der Untersuchung der Adhäsionseigenschaften bei spritzgegossenen Kunststoff-Metall-Hybriden.

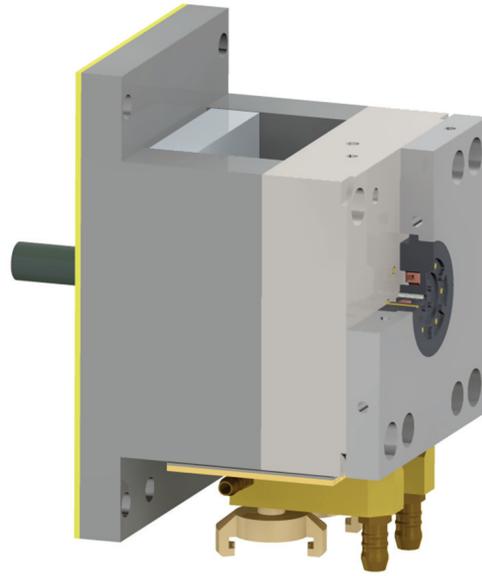


Bild 5: Versuchswerkzeug Auswerferseite

Es wurde ein Versuchswerkzeug mit auswerferseitigem Induktor realisiert, mit welchem Torsionsprüfkörper zur Haftungsuntersuchung von Einlege-teil und Polymer gespritzt werden können. Das Hybridbauteil ist so konzipiert, dass kein Formschluss auftritt, sondern der Verbund lediglich durch reineshaften erzeugt wird.



Bild 6: Spritzling Torsionsprüfkörper

Die Aufnahme des Einlege-teils im Werkzeug ist so ausgelegt, dass verschieden dicke Bleche, auch mit diversen aufgebracht Haftvermittlerschichten, verarbeitet werden können.



Bild 7: Keramischer Formeinsatz

Die formgebende Geometrie liegt vollständig auf der Auswerferseite in einem Formeinsatz, welcher zur Aufnahme der hohen Prozesskräfte aus Hochleistungskeramik mittels Erodieren gefertigt wurde. In diesen Keramikeinsatz sind rückseitig der Induktor und ein taktiler Miniaturtemperatursensor eingelassen, welche gemeinsam ein reproduzierbares Aufheizen des stählernen Einlegeteils während der Werkzeugschließbewegung ermöglichen.

Die Auslegung des induktiven Heizsystems erfolgte vorab vollständig simulationsgestützt, wobei sowohl das elektromagnetische Einkoppelverhalten durch den keramischen Formeinsatz hindurch als auch der Aufheizvorgang erfasst wurde.

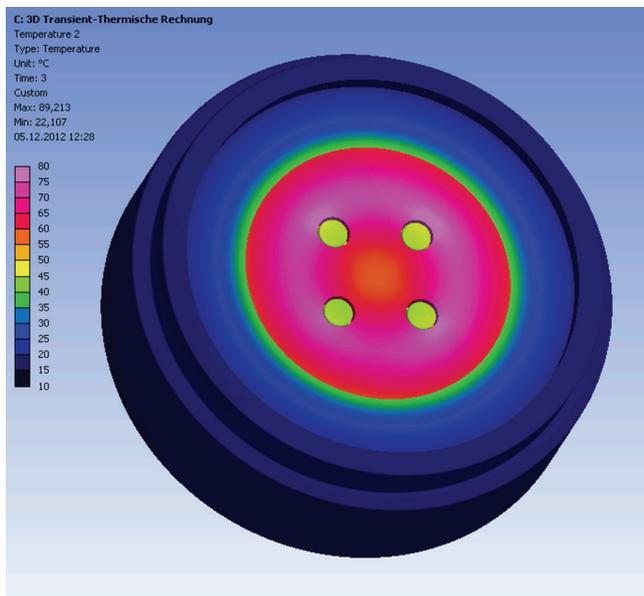


Bild 8: FEM-Simulation Aufheizvorgang

Der Vergleich von Thermografieaufnahme und Simulationsergebnis des keramischen Formeinsatzes mit aufgelegtem Stahl-Einlegeteil zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die Bilder zeigen dies am Beispiel eines drei Sekunden dauernden Heizvorgangs.

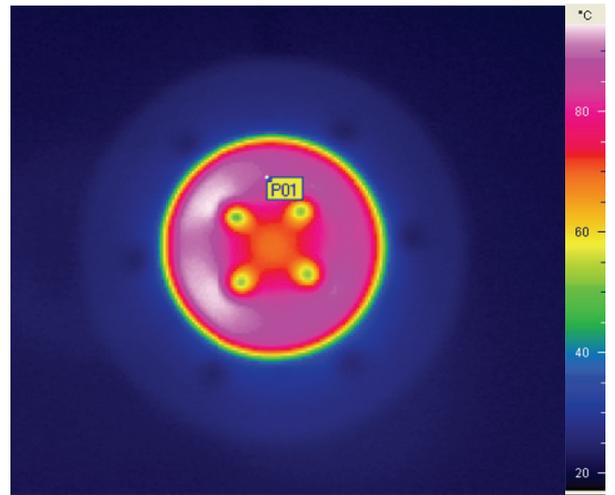


Bild 9: Thermografieaufnahme Aufheizvorgang

Das System zeichnet sich durch eine sehr hohe Energieeffizienz aus – so sind bei der hier dargestellten Anwendung mit lediglich 150W kurzzeitig eingekoppelter Leistung Aufheizraten von 30K/s und mehr erreichbar. Die Leistung des Induktionssystems an sich lässt sich jedoch auch zu enormen Leistungen steigern, sofern eine Anwendung dies erfordert. Die Wärme wird stets zum richtigen Zeitpunkt genau dort erzeugt, wo sie benötigt wird, sodass kein Energieverbrauch im Leerlauf, wie beispielsweise bei einem herkömmlichen Durchlaufofen oder Heißluftgebläse, auftritt.

Prozessintegration

Die gesamte Prozesssteuerung kann vollständig in die ARBURG Selogica Ablaufsteuerung der Spritzgießmaschine integriert werden, sodass automatisch alle Parameter des Einlegeteil-Aufheizens für die Qualitätsüberwachung zur Verfügung stehen. Das Signal des Sensors für die Einlegeteiltemperatur wird über einen externen Thermoelementverstärker als universelles 0-10V-Signal über einen Analogeingang an die Maschine übergeben.

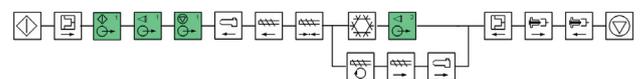


Bild 10: ARBURG Selogica® Ablaufsteuerung

In der Abbildung sind in mintgrün jene Prozessschritte hervorgehoben, welche für das temperaturkontrollierte Aufheizen erforderlich sind: Einschalten des Induktionsgenerators, Abfrage der Einlegeteiltemperatur im Sinne eines Soll-Istwert-Vergleichs, Ausschalten des Generators. Des Weiteren ist hier als Option noch der temperaturkontrollierte Abkühlvorgang dargestellt.

Ausblick

Derzeit ist das Werkzeug fertig gestellt und eine erste Abmusterung bereits erfolgt. Das System zeigte sich dabei funktionstüchtig. Es sind ausgiebige Versuchsreihen mit verschiedenen Polymeren, variierenden Einlegeteiloberflächen und –temperaturen geplant. Begonnen werden die Versuche mit dem gängigen Hybriden PA6GF30-Stahlblech 12.03. Dabei wird jeweils die flächenbezogene Haftung im Sinne einer Abscherfestigkeit mit einem eigens dafür entwickelten Torsionsprüfaufbau ermittelt. Denkbar ist auch eine Ausweitung der Versuche, um die Ergebnisse im Hinblick auf das stark von Adhäsion beeinflusste Entformungsverhalten, welches Gegenstand paralleler Forschungsarbeiten am IKFF ist, interpretieren zu können. Weitere Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Funktionskeramiken unter Einbeziehen von Induktionserwärmung sind darüber hinaus angestrebt.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der Allianz Industrie Forschung (AIF), für die Förderung des Projekts durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) mit dem Förderkennzeichen KF2121007 bedanken. Darüber hinaus sei dem Kooperationspartner, der Bernhard Fischer GmbH für die erfolgreiche Zusammenarbeit und dem Graveurbetrieb Leonhardt für die Unterstützung gedankt.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Ehrenstein, G.W.: „Konstruieren mit Kunststoffen – Eine Einführung“, Carl Hanser Verlag, 1995
- [2] Ehrenstein, G.W.; Amesöder, S.; Fernández Diaz, L.; Niemann, H.; Deventer, R.: „Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile“, Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium 2003 des SFB 396 „Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile“, Meisenbach Bamberg 2003
- [3] Janda, R.: „Kunststoffverbundsysteme“, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990
- [4] Zhao, G.: „Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen, Dissertation, LKT, Universität Erlangen-Nürnberg, 2002
- [5] Bastian, M.; Heidemeyer, P.; Zentgraf, T.; Popp, M.: „Beim Umspritzen dicht gemacht“, Fachbeitrag Plastverarbeiter, Hüthig GmbH, Heidelberg 2012
- [6] König, W., Dauw, F., Levy, G. und Panten, U.: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 37, 2, (1988), 623-631
- [7] Kollenberg, W.: Technische Keramik, Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2007
- [8] Landfried, R., Kern, F., Gadow, R., Burger, W., Leonhardt, W.: Applied Ceramic Technology, (2012)
- [9] Landfried, R., Kern, F., Gadow, R., Burger, W., Leonhardt, W.: Key Engineering Materials, 504-506, (2012), 1165-1170