

**Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung
im Bereich der Kunststoffverarbeitung**

**Application range of inductive heating
in plastics processing**

M. Zülch, T. Zimmermann, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zum

**21. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

**18. - 19. März 2009
Stuttgart**

© 2009 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

ANWENDUNGSGEBIETE DER INDUKTIVEN ERWÄRMUNG IM BEREICH DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

APPLICATION RANGE OF INDUCTIVE HEATING IN PLASTICS PROCESSING

M. Zülch¹, T. Zimmermann¹ und W. Schinköthe¹

¹ 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 56402, email: spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: In Untersuchungen am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) konnte das Potential einer variothermen Werkzeugtemperierung im Spritzguss nachgewiesen werden. Durch die induktiv variotherme Werkzeugtemperierung ist die Herstellung von Kunststoffformteilen, welche mit den Standardverfahren nicht oder nur mit erheblichen Qualitätsverlusten herstellbar sind, mit der für die Massenfertigung erforderlichen Zykluszeit und Qualität möglich.

Darüber hinaus eröffnet die große Variabilität dieses Verfahrens eine Vielzahl möglicher neuer Anwendungsgebiete im Bereich des Kunststoffspritzguss bei der Verarbeitung neuer, hochgefüllter Kunststoffe wie z.B. CIM, MIM oder grafitgefüllte Polymere.

Ebenfalls denkbar ist ein Einsatz dieses Verfahren bei der Herstellung geschäumter Kunststoffteile. Darüber hinaus ist ein möglicher Einsatz der induktiven Erwärmung als ein Mittel zur Verkürzung der Rüstzeiten bei Großwerkzeugen zu untersuchen.

Weitere Anwendungsgebiete der induktiven Temperierung für andere, urformende Verfahren der Kunststoffverarbeitung sind im Bereich der Duroplast- bzw. Elastomerverarbeitung, dem Spritzprägen, dem Folienprägen, dem Heißpressen und dem Laminieren von Faserverbundbauteilen zu suchen.

Abstract: Research at the Institute of Design and Production in Precision Engineering (IKFF) has proven the potential of variothermal processing in plastics injection moulding. By means of an inductive-variothermal mould temperature control, plastic parts, which were unprocessable in standard injection moulding or produced poor quality, could be produced in proper quality within cycle times suitable for mass production.

Furthermore the flexibility of this technology opens new areas of application for inductive heating in injection moulding, especially for the processing of newly developed, highly filled compounds as in ceramics, metal or graphite injection moulding.

This technology could be adopted for the processing of foam processing in using injection moulding. Further use in pre-production heating of large scale tools to reduce setup time is possible.

Other areas for the application of inductive heating could be alternative processing technologies for primary shaping of plastics such as the processing of thermosetting materials or elastomers and the injection or hot embossing and even lamination of fibre composites.

Schlagwörter: Induktive Erwärmung, Variothermprozess, Spritzgießen, Kunststoffverarbeitung

Keywords: Inductive Heating, variothermal processing, injection moulding, plastics processing

1 Einleitung

Die induktive Zusatztemperierung zur Realisierung einer variothermen Prozessführung im Kunststoff-spritzguss ist zentrales Thema der Forschung am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart. Bereits seit Mitte der 90er-Jahre wird ihr Einsatz gezielt untersucht und weiterentwickelt [1].

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass diese Form der Zusatztemperierung entscheidend zu einer drastischen Verkürzung der Zykluszeiten gegenüber anderer Verfahren wie der Öltemperierung beitragen kann und somit die kostenbewusste Fertigung auch hochkomplexer und anspruchsvoller Formteile, wie zum Beispiel Mikrobauteile und mikrostrukturierter Oberflächen im industriellen Umfeld, überhaupt erst ermöglicht. Zentrale Fragestellungen, wie die Integration eines induktiven Temperiersystems sowohl in einen bestehenden Prozess als auch in die Neukonstruktion eines Werkzeugs, konnten durch die zum Teil öffentlich geförderten Projekte zu diesem Thema aufgeklärt werden [2]. Auch die elektromagnetische und thermische Auslegung des Gesamtsystems konnte durch Einsatz rechnergestützter Simulationsverfahren optimiert werden [3].

Auf Grund der so gebildeten Wissensbasis wurden vielfältige weitere Anfragen an das IKFF gestellt und konnten im Rahmen akademischer bzw. industriell geförderter Forschung bearbeitet werden. Diese Projekte und weitere Voruntersuchungen konnten vielfältige Anwendungsbereiche dieses hochdynamischen Temperierungsverfahrens für die Kunststoffverarbeitung im Allgemeinen eröffnen.

2 Grundlagen der induktiven Erwärmung

Der Vorteil der induktiven Temperierung im Vergleich zu alternativen Verfahren ergibt sich im Wesentlichen durch die hohe Energiedichte, die mit ihrer Hilfe erzeugt werden kann (Tabelle 1).

Tabelle 1: Leistungübertragung im Vergleich [4]

Erwärmungsart	Wärmestromdichte in W/m ²
Konvektion	0,5
Strahlung (Elektroofen)	8
Wärmeleitung	20
Infrarot-Punktstrahler	200
Flamme (Brenner)	1.000
Dielektrische Erwärmung	ca. 25.000
Mikrowelle	ca. 35.000
Induktionserwärmung	ca. 30.000
Laser (CO ₂)	10 ⁸
Elektronenstrahl	10 ¹⁰

Realisiert wird diese hohe übertragbare Energiedichte durch das Transformatorprinzip, bei dem in ein Werkstück ein elektromagnetisches Feld mit der Erregungsfrequenz f_{err} eingebracht wird. Ist das Werkstück elektrisch leitfähig (κ), werden in diesem hierdurch Wirbelströme I_w erzeugt, die auf Grund des Skin效ektes in die Randschichten verdrängt werden (Bild 1).

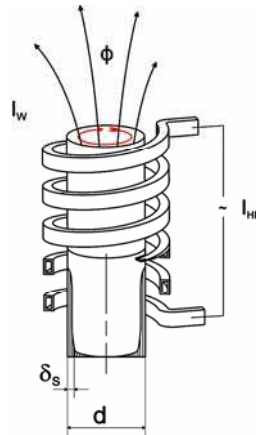


Bild 1: Prinzip der induktiven Erwärmung

Die gesamte Stromtragfähigkeit des Werkstücks kann hierbei in die Skintiefe δ_s konzentriert aufgefasst werden.

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi \kappa \mu_0 \mu_r f_{err}}} \quad (1)$$

Diese Wirbelströme leisten am Ohm'schen Widerstand R_Ω des Werkstücks eine Leistung, die in Form von Wärme P_J frei wird.

$$P_J = I_W^2 R_\Omega \quad (2)$$

Eine weitere Verstärkung der Wärmestromdichte ist durch die Verwendung ferromagnetischer Werkstoffe ($\mu_r \gg 1$) möglich. Der Ferromagnetismus führt gemäß Formel 1 dazu, dass ein durchdringendes elektromagnetisches Feld noch weiter in die Oberfläche des Werkstücks verdrängt und dort konzentriert wird, was nach Formel 2 eine Erhöhung der erzeugten Wärmeleistung zur Folge hat.

Die Wärme wird also direkt in den Volumina erzeugt, die von dem elektromagnetischen Feld durchdrungen werden. Dies hat zur Folge, dass im Gegensatz zu anderen bereits etablierten Heizverfahren nicht das gesamte Werkzeug auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden muss, um einen Temperaturhub auf der Oberfläche zu realisieren, sondern nur eine Randschicht von wenigen Millimetern. Dies hat eine starke Reduktion der Zykluszeiten zur Folge. Auch kann die einzubringende Energiemenge hierdurch reduziert werden, was neben wirtschaftlichen Aspekten auch zur Folge hat, dass die insbesondere in variothermen Prozessen notwendige Kühlzeit auf Ausgangstemperatur reduziert werden kann.

3 Induktive Zusatztemperierung im Kunststoffspritzguss

Bezogen auf die variotherme Prozessführung im Kunststoffspritzguss konnte im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben das Potential induktiver Zusatztemperierung weitgehend aufgeklärt werden.

Bei dieser Verfahrensvariante des Standardspritzgussprozesses wird durch eine Zusatztemperierung die Kavität eines Spritzgusswerkzeugs vor dem Einspritzen des Kunststoffs auf ein erhöhtes Temperaturniveau zumeist weit oberhalb der Entformungstemperatur gebracht, der Kunststoff eingespritzt und im Anschluss daran das Werkzeug mit dem Formteil wieder auf die Entformungstemperatur abgekühlt. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, auch feinstrukturierte Formteile mit höchsten Fließweg-Schichtdickenverhältnissen, wie sie insbesondere im Mikrospritzguss vorkommen, geometrienerhaltend abzuformen, was durch eine vorzeitige Erstarrung der Randschicht der Schmelze im Standardprozess nicht möglich ist (Bild 2).

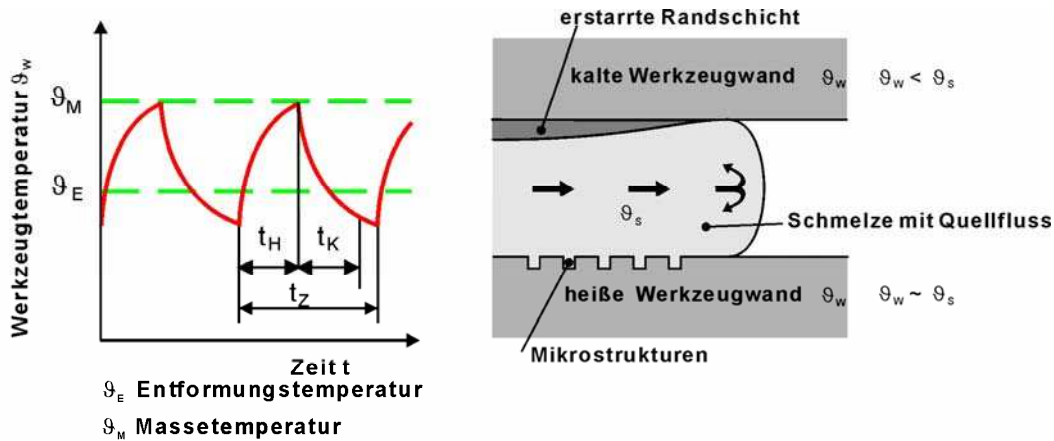


Bild 2: Einfluss der variothermen Prozessführung auf die Abformung

Auch konnte nachgewiesen werden, dass der gezielte Einsatz einer variothermen Prozessführung Bindekräfte im Bereich von Ausbrüchen im Formteil reduzieren kann.

Grundsätzlich lassen sich bei der Umsetzung induktiver Systeme zwei Vorgehensweisen unterscheiden, die zum einen abhängig sind von der zu erwärmenden Geometrie oder Kavität, zum anderen jedoch auch von dem Zeitpunkt der Werkzeugentwicklung, bei dem die Entscheidung für eine induktive Zusatztemperierung gefallen ist.

3.1 Externe Zusatztemperierung

Bei der extern realisierten Zusatztemperierung wird ein der Kavitätsgeometrie angepasster Induktor durch ein mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch ausgeführtes Handlingsystem in die Trennebene eines geöffneten Spritzgusswerkzeugs eingefahren. Der Induktor kann so gezielt die Oberfläche der Kavität erwärmen (Bild 3).

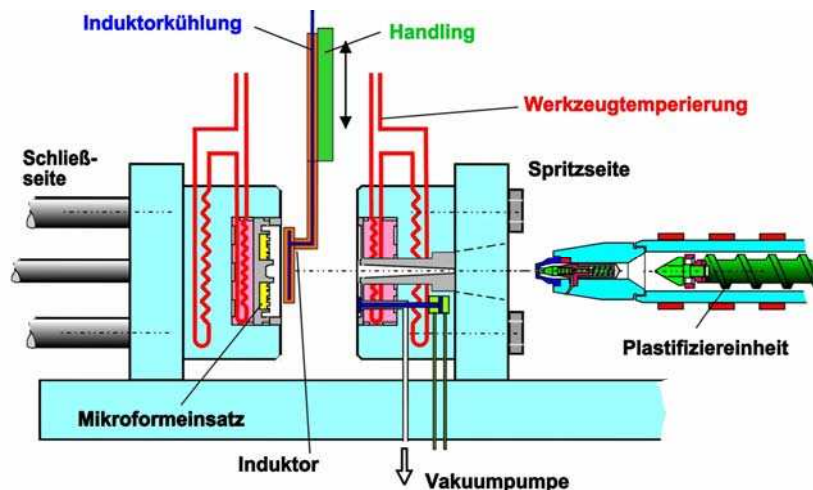


Bild 3: Externe Zusatztemperierung

Dieses Verfahren bietet sich in erster Linie bei einer Implementierung des induktiven Systems nach Inbetriebnahme eines Werkzeugs sowie zu Voruntersuchungen zum Effekt der variothermen Prozessführung an, da keine Eingriffe in das Werkzeug notwendig sind und die erforderlichen Komponenten Induktor, Handling und Generator auch nachträglich hinzugefügt werden können.

Auch bietet sich das externe System grundsätzlich für großflächige Formteile mit nur schwach ausgeprägter Topologie an, wie sie zum Beispiel im Automobil-Bereich, aber auch bei mikrostrukturierten

Formteilen zu finden sind. Dabei lassen sich mit dem System die höchsten Temperaturgradienten aller untersuchten induktiven Systeme erreichen, was sich positiv auf die erreichbare Zykluszeit auswirkt.

Bei der Erwärmung komplex strukturierter Kavitäten mit ausgeprägter Topologie lassen sich diese Systeme nur beschränkt anwenden, da durch den Aufbau des Induktors aus Rohrmaterial zur Realisierung der Innenkühlung der Induktor nicht ausreichend nah an die Kavität geführt werden kann. Auch muss die Temperatur, auf die das Werkzeug erwärmt wird, sehr hoch gewählt werden, da bereits während des Schließens des Werkzeugs Wärme in den hinteren Bereich des Werkzeugs abfließt und nicht mehr für den zu erzielenden Temperaturhub zur Verfügung steht. Hierdurch kann es, gegebenenfalls verstärkt durch die thermische Trennung einzelner Erwärmungszonen durch eine ausgeprägte Topologie, zu einer starken Überhitzung des Werkzeugs bis über die Belastungsgrenze des Materials kommen.

3.2 Vollständig integrierte Zusatztemperierung

Für Abhilfe kann hier die vollständig integriert realisierte Bauform sorgen. Hierbei wird der Induktor in das Werkzeug selbst integriert und erwärmt die Kavität von hinten (Bild 4).

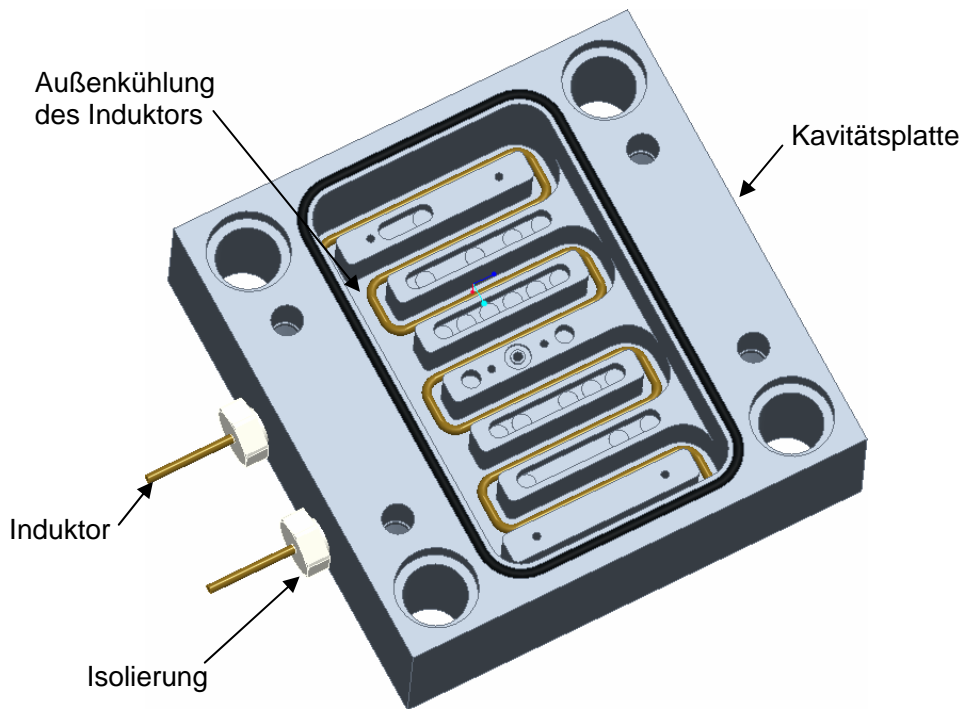


Bild 4: Vollständig integrierte Zusatztemperierung (Rückseitige Ansicht)

Als Vorteil dieser Erwärmungsmethode ist die weitgehend freie Gestaltbarkeit der zu erwärmenden Kavität zu sehen. Durch den Wegfall der Innenkühlung des Induktors ist der Induktordurchmesser nur noch von der Stromtragfähigkeit des Induktormaterials eingeschränkt und kann somit gezielter an die Geometrie angepasst werden. Da die Erwärmung der Kavität durch Wärmeleitung über eine kurze Strecke erfolgt, können die bei der externen Erwärmung von Überhitzung gefährdeten Bereiche schonender erwärmt werden.

Als weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit anzusehen, die Erwärmung bereits bei noch geschlossenem Werkzeug zu starten und bis in die Nachdruckzeit aufrecht zu erhalten. Somit ist es denkbar, Angüsse und Fließwege in der Kavität gezielt länger offen zu halten, was beispielsweise zur Bekämpfung von Einfallstellen in dickwandigen Formteilen wie optischen Linsen herangezogen werden kann.

Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens konnten jedoch auch die Nachteile des vollständig integrierten Systems aufgezeigt werden. So lässt sich eine Integration des Systems in ein bestehendes Werkzeug nur selten durchführen und muss daher bereits in der Entwurfsphase berücksichtigt werden. Auch steigt die zur Erwärmung der Kavität notwendige Zeit durch die verzögernde Wärmeleitung stark an, was nur beschränkt durch den frühen Beginn der Erwärmung ausgeglichen werden kann und somit zu einer Verlängerung der Zykluszeit führt. Die Integration der vielfältigen Funktions-träger, wie Auswerfer, Temperierkanäle, Induktor und Induktoraußenkühlung bzw. Blitzkühlung, stellt den Werkzeugbau außerdem vor große Herausforderungen.

4 Verfahrenserweiterung im Bereich des Kunststoffspritzguss durch den Einsatz der induktiven Temperierung

Die induktive Erwärmung bietet vielfältige Möglichkeiten die bereits etablierten Spritzgussverfahren in vielerlei Bereichen zu erweitern.

4.1 Erweiterung der Materialpalette

Neben der Verfahrenserweiterung ermöglicht die induktive Werkzeugtemperierung auch die Verarbeitung neuartiger Polymere mit speziellen Materialeigenschaften.

4.1.1 Glasfaserverstärkte Polymere

Durch die induktiv-variotherme Prozessführung wird beispielsweise die Verarbeitung sowohl von lang- als auch von kurz-glasfaserverstärkten Kunststoffen zu Bauteilen mit ungünstigen Bauteildicke/Fließweglängen-Verhältnissen oder Bauteilen mit mikrostrukturierten Oberflächen ermöglicht. Einerseits kann durch den Einsatz der induktiven Erwärmung die Schmelze in der Kavität länger flüssig gehalten werden, was wesentlich längere Fließwege erlaubt. Andererseits ermöglicht dieses Verfahren bei Anwendung der integrierten induktiven Werkzeugtemperierung ein Heizen der Kavität bis hinein in die Nachdruckphase, so dass eine kontrolliertes Abkühlen des Bauteiles realisierbar wird. Durch eine erhöhte Werkzeugwandtemperatur kann ein Verarmen der Randschichten an Füllstoff verhindert werden, was bei faserverstärkten Bauteilen zu homogeneren Materialeigenschaften führt.

4.1.2 Innovative Polymere mit neuartigen Materialeigenschaften

Am Institut wird derzeit das Potential der induktiven Werkzeugtemperierung bei der Verarbeitung neuartiger, elektrisch leitfähiger Polymere mit einem Füllstoffanteil von mehr als 80% Graphit untersucht. Hauptproblem bei der Verarbeitung solch hochgefüllter Kunststoffe ist die hohe Viskosität der Schmelze und die in diesem Fall durch den hohen Graphitanteil hervorgerufene sehr gute Wärmeleitfähigkeit des Materials, welche zu einer schnellen Wärmeabfuhr aus dem Bauteil in das Werkzeug und damit zum Einfrieren des Anguss führt. Hier bietet die induktive Werkzeugtemperierung die Möglichkeit des gezielten Aufheizens der Kavitätswand, wodurch eine vollständige Formfüllung und eine zuverlässige Abformung mikrostrukturierter Bereiche des Bauteils sichergestellt werden kann.

4.1.3 MIM/CIM

Die Problematik der Verarbeitung einer hochviskosen Kunststoffschmelze mit extrem hohem Füllstoffanteil stellt sich auch beim CIM-(Ceramic Injection Moulding) bzw. MIM-Verfahren (Metal Injection Moulding). Beim MIM kommt zudem die Problematik der hohen Wärmeabfuhr aus der Schmelze in das Werkzeug zum tragen.

Mit diesen beiden Sonderverfahren des Kunststoffspritzguss werden Sinter-Grünlinge aus Keramik bzw. Metall hergestellt. Dabei dient das Polymer lediglich als Bindemittel und wird vor dem Sinterprozess chemisch oder physikalisch aus dem Grünling entfernt.

Auch hier lässt sich die induktiv-variotherme Werkzeugtemperierung zur Verbesserung des Formfüllverhaltens der Polymerschmelze einsetzen. Damit sind längere Fließwege und eine genauere Abfor-

mung von mikrostrukturierten Bauteiloberflächen möglich, was die Produktpalette für dieses Verfahren deutlich erweitern dürfte.

4.1.4 Variothermprozesse bei Hochtemperaturpolymeren

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Verarbeitung von Hochtemperaturpolymeren, wie z.B. PEEK, PPS, LCP. Diese Polymere benötigen aufgrund ihres hohen Schmelzpunktes für die zuverlässige Verarbeitung im Großserienprozess eine sehr hohe Werkzeuggrundtemperatur. Im Variothermprozess besteht die Gefahr der Schädigung des Werkzeugs durch Überhitzung. Hier bietet die induktive Werkzeugtemperierung durch die Möglichkeit, der gezielten Aufheizung nur des Kavitätsbereichs und nicht des kompletten Werkzeuges eine Möglichkeit diese Schädigung zu vermeiden. Darüber hinaus ist durch eine Absenkung der Werkzeuggrundtemperatur eine energetische Optimierung bei der Verarbeitung derartiger Kunststoffe möglich. Dieses Potential ist bei allen hier angesprochenen Beispielen vorhanden.

4.2 Verfahrensalternativen

Neben der Anwendung im Kunststoffspritzguss ist auch ein Einsatz der induktiven Erwärmung in alternativen urformenden Verfahren vorstellbar.

4.2.1 Spritzprägen

Eine Alternative bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen mit mikrostrukturierten Oberflächen zum klassischen Spritzguss stellt das Spritzprägen dar. Dieses Verfahren kommt beispielsweise bei Herstellung von CDs zur Anwendung.

Dabei wird die Kunststoffschmelze in das nicht vollständig geschlossene Werkzeug eingespritzt und dieses während des Einspritzvorgangs geschlossen. Die bewegliche Werkzeugplatte dient dabei als Prägestempel, welcher das Schmelzekissen gleichmäßig in der Kavität verteilt und die Mikrostruktur in die Bauteiloberfläche einprägt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung eines beheizten Prägestempels die Abformung der Mikrostrukturen verbessert und den Weg für die Anwendung neuer Polymere für das Spritzprägen ebnet.

4.2.2 Chemisches bzw. physikalisches Schäumen von Kunststoffen

Ein mögliches Einsatzgebiet der induktiven Werkzeugtemperierung im Kunststoffspritzguss neben dem klassischen Spritzguss im Bereich der Sonderverfahren des chemischen bzw. physikalischen Schäumens von Kunststoffen.

Beim chemischen Schäumen wird dem Granulat ein Treibmittel zugesetzt, welches sich bei der Plastifizierung unter Abgabe von Gas (meist CO₂ oder N₂) zersetzt. Beim physikalischen Schäumen wird das Treibgas in der Plastifiziereinheit direkt in die Polymerschmelze injiziert und dort gelöst (Mucell). Während des Einspritzvorgangs perlt das Gas aufgrund des Druckabfalls aus und die Polymerschmelze wird aufgeschäumt. Das Resultat ist ein Bauteil mit einer schaumartigen Kernstruktur und einer kompakten Randschicht. Diese kommt aufgrund der schnellen Abkühlung der Schmelze an der Werkzeugwand zustande.

Durch eine gezielte Erwärmung der Werkzeugwand lässt sich die Bildung dieser Randschicht beeinflussen. Die induktive Werkzeugtemperierung bietet den Vorteil einer definierten Steuerung des Abkühlvorgangs und somit einer direkten Beeinflussung der Struktur der Randschicht bei geschäumten Bauteilen. Denkbar ist auch die Erwärmung lediglich einzelner Kavitätsbereiche und somit die Herstellung von Bauteilen mit unterschiedlich kompakten Randschichten.

5 Anwendungen in anderen Bereichen der Kunststoffverarbeitung

Über diese durchaus vielversprechenden Anwendungen des induktiven Zusatztemperierens im Kunststoffspritzguss hinaus lassen sich auch Anwendungen in anderen Verfahren der Kunststoffverarbeitung denken.

So ist durch einen Einsatz der Technik im Bereich der Elastomer- und Duroplastverarbeitung eine mit dem Kunststoffspritzguss vergleichbare Verfahrenserweiterung zu erwarten, da zum Beispiel durch gezielte verstärkte Vernetzung im Werkzeug Formteile mit unterschiedlichen mechanischen Verhalten aus einem Material hergestellt werden könnten. Auch sind verschiedene Anwendungen im Bereich Heiß- und Folienprägen sowie beim Laminieren großformatiger Formteile denkbar.

Eine weitere denkbare Anwendung der induktiven Erwärmung in der Kunststoffverarbeitung liegt im Bereich des Vorwärmens von Großwerkzeugen auf Betriebstemperatur als Alternative zu den bisher eingesetzten Heizpatronen. Die schnelle und großflächige Erwärmung des kompletten Werkzeuges mit Hilfe eines geeigneten Induktors erlaubt eine Verkürzung der Rüstzeiten und damit eine Steigerung der Produktivität.

6 Implementierung der induktiven Beheizung in Prozesse der Kunststoffverarbeitung

Die Implementierung der induktiven Beheizung stellt auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeit von Geometrie, elektromagnetischen Feldern und thermischen Phänomenen hohe Anforderungen an den Auslegungsprozess. Im Rahmen der am Institut durchgeführten Forschungsvorhaben konnten Auslegungsalgorithmen entwickelt werden, die sich in weiten Teilen auch auf alternative Anwendungen der induktiven Beheizung übertragen lassen. So konnten die zur Auslegung notwendigen Entwicklungsschritte durch rechnergestützte Simulation stark reduziert werden. Durch diese Simulationen ist es möglich, neben der Optimierung der thermischen Parameter auch Aussagen über die erforderlichen Generatorleistungen und Anpassbereiche zu treffen, ohne diese durch langwierige Versuche ermitteln zu müssen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die induktive Beheizung stellt über die Grenzen des Sonderverfahrens Mikro- und Ultrapräzisions-spritzguss hinaus eine vielversprechende Möglichkeit dar, schwer oder nicht zu fertigende Formteile in Massenfertigungsverfahren beziehungsweise Formteile mit neuen Materialeigenschaften herzustellen.

Im Vorfeld der eingehenden Untersuchung dieser neuen Potentiale konnten bereits mehrere Projekte erfolgreich durchgeführt werden, die eine weitergehende wissenschaftliche Beschäftigung mit diesen Themen rechtfertigen. Das Grundlagenwissen, dass im Bereich Spritzguss aufgebaut wurde, muss hierfür auf seine Übertragbarkeit auf die neuen Verfahren untersucht werden und gegebenenfalls neu gebildet werden. Eine Weiterführung des Themas konnte bereits mit einem AIF-geförderten Projekt zur induktiven Erwärmung bei der Abformung hoch graphitgefüllter Polymere erreicht werden.

Literatur

- [1] TEWALD, A.: *Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung*. Universität Stuttgart, IKFF, Dissertation, 1996.
- [2] WALTHER, T.: *Geräte- und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen*. Universität Stuttgart, IKFF, Dissertation, 2003.
- [3] ZÜLCH, M., BURKARD, E., SCHINKÖTHE, W.: Optimierter Energieeinsatz durch induktive Erwärmung von Spritzgießwerkzeugen – FEM unterstützte Auslegung von induktiven Heizungssystemen. In: *Beiträge zum 20. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium*, 14.-15. März 2007. Stuttgart, 2007.
- [4] BENKOWSKY, G.: *Induktionserwärmung*. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990.