

Induktionserwärmung und Kunststoffspritzguss

Zimmermann, T.; Maier, M.; Schinköthe, W. (IKFF)

Beitrag zum

**22. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

16. - 17. März 2011

**Symposium 2
Fortschritte in der Kunststoffverarbeitung und deren Simulation**

© 2011 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

INDUKTIONSERWÄRMUNG UND KUNSTSTOFFSPRITZGUSS

INDUCTION HEATING AND INJECTION MOULDING

T. Zimmermann¹, M. Maier¹ und Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe¹

¹ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66402, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, E-Mail: spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Die Verarbeitung hochviskoser Compounds im Kunststoffspritzguss stellt besondere Anforderungen an die Prozessführung. Insbesondere bei Compounds mit einem hohen Anteil thermisch gut leitfähiger Füllstoffe wie Graphit oder Metallpulver, wie sie bei elektrisch leitfähigen Kunststoffen zur Anwendung kommen, hängt die Prozessgestaltung in erheblichem Maße von der Fließfähigkeit der Schmelze ab. Bei der Verarbeitung solcher Compounds sind dem Fließweg-Wandstärkenverhältnis der Bauteile enge Grenzen gesetzt, da die ohnehin zähfließende Schmelze bei Kontakt mit der kalten Kavitätswand rasch erstarrt. Dieser Problematik kann einerseits durch die Verarbeitung auf größeren Maschinen mit höheren Einspritzdrücken Rechnung getragen werden, was allerdings Probleme bei der mechanischen Auslegung des Werkzeuges nach sich ziehen kann. Einen anderen Ansatz bietet hier die variotherme Prozessführung.

In vielfältigen Untersuchungen am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) konnte das Potential insbesondere der induktiv-variothermen Werkzeugtemperierung bei der Verarbeitung hochgefüllter Compounds bzw. von Bauteilen mit ungünstigen Fließweg-Wandstärken-Verhältnissen nachgewiesen werden.

Ebenfalls denkbar ist der Einsatz dieses sehr schnellen Heizverfahrens bei der Herstellung geschäumter Bauteile oder etwa der Duroplastverarbeitung.

Abstract: The processing of compounds with a high melt viscosity by the means of injection moulding demands advanced production techniques.

Especially when using compounds with high rates of materials having a high thermal conductivity – such as graphite or metal powder, which appear in electrically conductive plastics – the process conduct is highly dependent on the compound's melt viscosity. Processing these polymers, the flowpath wall section ratio is strictly limited as the melt-front freezes rapidly due to the cold cavity wall. These problems can either be solved by using larger injection moulding machines offering higher filling pressures – which may result in mechanical problems in the mould design – or they can be tackled by applying a variothermal process.

In manifold researches the IKFF was able to prove the effectiveness especially of the inductive-variothermal mould tempering for processing highly filled compounds to parts with a high flowpath wall section ratio.

The application of this fast heating method for manufacturing foamed parts or processing thermosetting materials is also possible.

Schlagwörter: Induktive Erwärmung, Spritzgusswerkzeuge, Kunststoffverarbeitung

Keywords: induction heating, injection moulds, plastics processing

1 Einleitung

Die induktiv-variotherme Prozessführung im Kunststoffspritzguss ist bereits seit Mitte der 90er-Jahre ein zentrales Forschungsthema am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart [1]. Seit dieser Zeit wird ihr Einsatz im Kunststoffspritzguss gezielt untersucht und konsequent weiterentwickelt. Im Laufe der Jahre wurde so eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeugbauformen und Anwendungsgebiete entwickelt und erforscht.

Im Rahmen zahlreicher öffentlich geförderter Forschungs- und Industrieprojekte konnte nachgewiesen werden, dass die induktiv-variotherme Werkzeugtemperierung gegenüber anderen Variothermverfahren wie beispielsweise Flüssigkeitsvariotherm eine drastische Verkürzung der Heizzeiten und damit eine kosteneffiziente Fertigung auch hochkomplexer Bauteile ermöglicht.

2 Grundlagen

Der entscheidende Vorteil der induktiven Werkzeugtemperierung im Vergleich zu anderen Verfahren ergibt sich über sehr hohe erreichbare Energiedichten.

Tabelle 1: Leistungsübertragung im Vergleich [2]

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

2.1 Prinzip der induktiven Erwärmung

Grundlage der Energieübertragung ist das Transformatorprinzip. Dabei wird das Werkstück in ein elektromagnetisches Wechselfeld der Erregerfrequenz f_{err} eingebracht. Sofern das Werkstück eine elektrische Leitfähigkeit κ besitzt wird im Werkstück eine Spannung U_{ind} induziert, welche Wirbelströme I_{err} antreibt, die aufgrund des Skin效ektes in die Randschichten des Bauteils verdrängt werden.

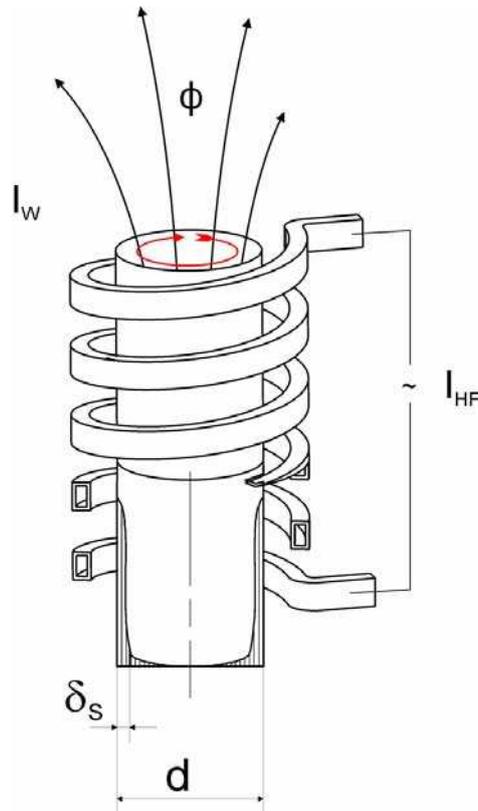


Abbildung 1: Prinzip der induktiven Erwärmung

Die Stromdichte kann dabei im wesentlichen auf die Skintiefe δ_s konzentriert angenommen werden.

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

Die durch die magnetische Induktion erzeugten Wirbelströme werden am ohmschen Widerstand des Werkstücks in eine joulesche Verlustleistung und damit in Wärme umgesetzt.

$$P_j = I_w^2 R_\Omega \quad (2)$$

Der große Vorteil der induktiven Erwärmung besteht darin, dass die Erwärmungstiefe und damit die Leistungsdichte im Werkstück über die Erregerfrequenz sehr gut eingestellt werden kann (Gl. 1). Dies wird beispielsweise beim induktiven Randschichthärten ausgenutzt, um eine definierte Härtetiefe zu erreichen.

Da die Wärme direkt in dem Volumen erzeugt wird, das vom elektromagnetischen Feld durchdrungen wird, muss hier im Gegensatz zu anderen Variothermverfahren, nicht das gesamte Werkzeug aufgeheizt und anschließend wieder abgekühlt werden. Die Temperierung kann auf ein geringes Volumen der Randschicht beschränkt werden, was die einzubringende und bei der Abkühlung wieder abzuführende Energiemenge reduziert und eine wirtschaftliche Fertigung mit kurzen Zykluszeiten erlaubt.

2.2 Variotherme Werkzeugtemperierung

Bei der variothermen Prozessführung wird die Kavitätswand vor dem Einspritzen auf ein Temperaturniveau gebracht, das dem der Kunststoffschmelze entspricht. Nach Beendigung des Einspritzvorgangs wird die Kavitätswand auf die Entformungstemperatur oder sogar darunter abgekühlt.

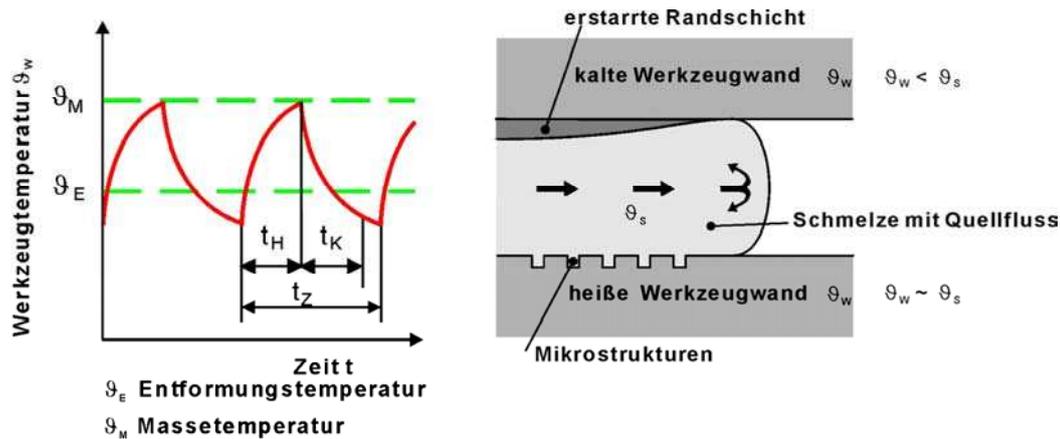


Abbildung 2: Variotherme Prozessführung

Mit diesem Verfahren ist es möglich, selbst feinste Strukturen im Mikrometerbereich geometrieehaltend abzuformen, da die Erstarrung der Randschicht an der kalten Kavitätswand verhindert wird. Auch die Bildung von Bindenähten im Bereich hinter Kernen konnte mit diesem Verfahren reduziert werden.

3 Einteilung induktiv beheizter Spritzgusswerkzeuge

Grundsätzlich lassen sich induktiv beheizte Spritzgusswerkzeuge je nach Lage des Induktors relativ zum Werkzeug unterscheiden. Die Wahl der jeweiligen Bauart ist abhängig von der zu erwärmenden Kavitätsgeometrie oder auch vom Zeitpunkt der Werkzeugentwicklung, zu dem die Entscheidung für eine induktive Zusatztemperierung gefallen ist.

3.1 Externe induktive Zusatztemperierung

Bei der externen induktiven Zusatztemperierung wird ein an die Kavitätsgeometrie angepasster, optimalerweise spiralförmiger Induktor mittels eines geeigneten Handlingsystems vor der Kavität des geöffneten Werkzeugs positioniert.



Abbildung 3: Externer Induktor im Einsatz

Da die Wärme beim externen System direkt in der Kavitätsoberfläche generiert wird, sind mit dieser Art der Temperierung abhängig vom erwärmten Volumen und der Leistung des verwendeten HF-Generators Heizraten von bis zu 60K/sec erreichbar [3]. Der große Vorteil der externen induktiven Zusatztemperierung liegt in der einfachen Nachrüstbarkeit auf bestehende Werkzeuge, da am Werkzeug selbst keinerlei konstruktive Änderungen vorgenommen werden müssen. Durch die Verwendung eines am IKFF entwickelten Koppelgetriebes ist jetzt auch eine beidseitige induktive Zusatztemperierung möglich. Hierdurch wird ein Temperaturgradient über der Kavität vermieden, was den Bauteilverzug und die Abkühlung der Kavitätswand deutlich vermindert.

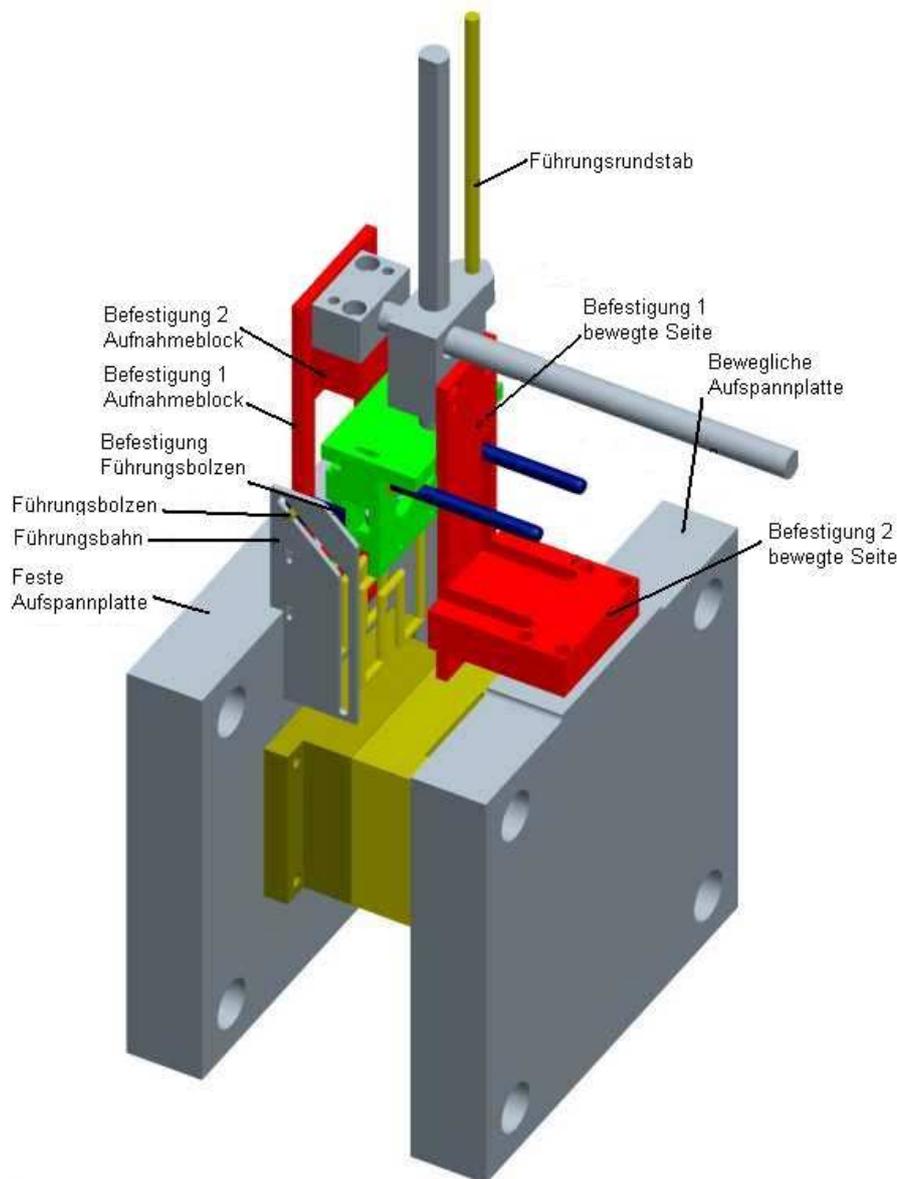


Abbildung 4: Koppelgetriebe für beidseitige externe Temperierung

Allerdings lassen sich derartige Systeme nur bei flächigen Kavitäten mit schwach ausgeprägter Topologie anwenden. Durch das Heizen bei geöffnetem Werkzeug wird zudem ein zusätzlicher Prozessschritt notwendig. Alternativ kann bei der Verwendung mehrerer Kavitätsseinsätze auch zyklusparallel außerhalb des Werkzeuges geheizt werden [4].

3.2 Integrierte induktive Zusatztemperierung

Die aktuellen Entwicklungen am IKFF gehen dahin, den Induktor fest in das Werkzeug zu integrieren. Die induktive Zusatztemperierung muss dabei bereits in der Konstruktionsphase des Werkzeugs berücksichtigt werden. Der Induktor wird von hinten in die Kavitätsplatte eingebracht, dabei müssen die Medienversorgung sowie die Lage der Auswerfer berücksichtigt werden, was einen erheblichen konstruktiven Mehraufwand bedeutet. Durch die indirekte Erwärmung der Kavitätswand von hinten sind die erreichbaren Heizraten deutlich geringer, als bei Verwendung eines externen Induktors.

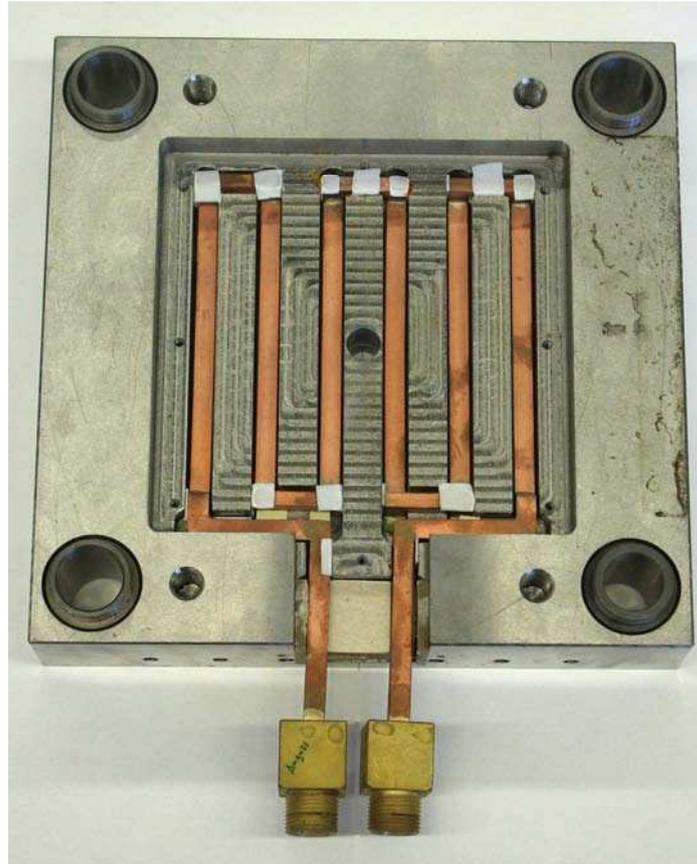


Abbildung 5: Kavitätsplatte mit integriertem Induktor

Trotz dieses Mehraufwandes bietet der Einsatz der integrierten Zusatztemperierung einige Vorteile gegenüber dem externen System. Wegen der Wärmeleitung ist eine wesentlich homogenere Erwärmung auch komplexer Kavitätsgeometrien mit ausgeprägter Topologie möglich. Außerdem erlaubt die integrierte induktive Zusatztemperierung ein gleichmäßiges, beidseitiges Beheizen der Werkzeughälften Zyklusunabhängig bis hinein in die Nachdruckphase. Über Kavitätsnah angebrachte Thermoelemente ist außerdem eine zuverlässige Temperaturregelung bzw. eine temperaturgeregelte Prozesssteuerung möglich.

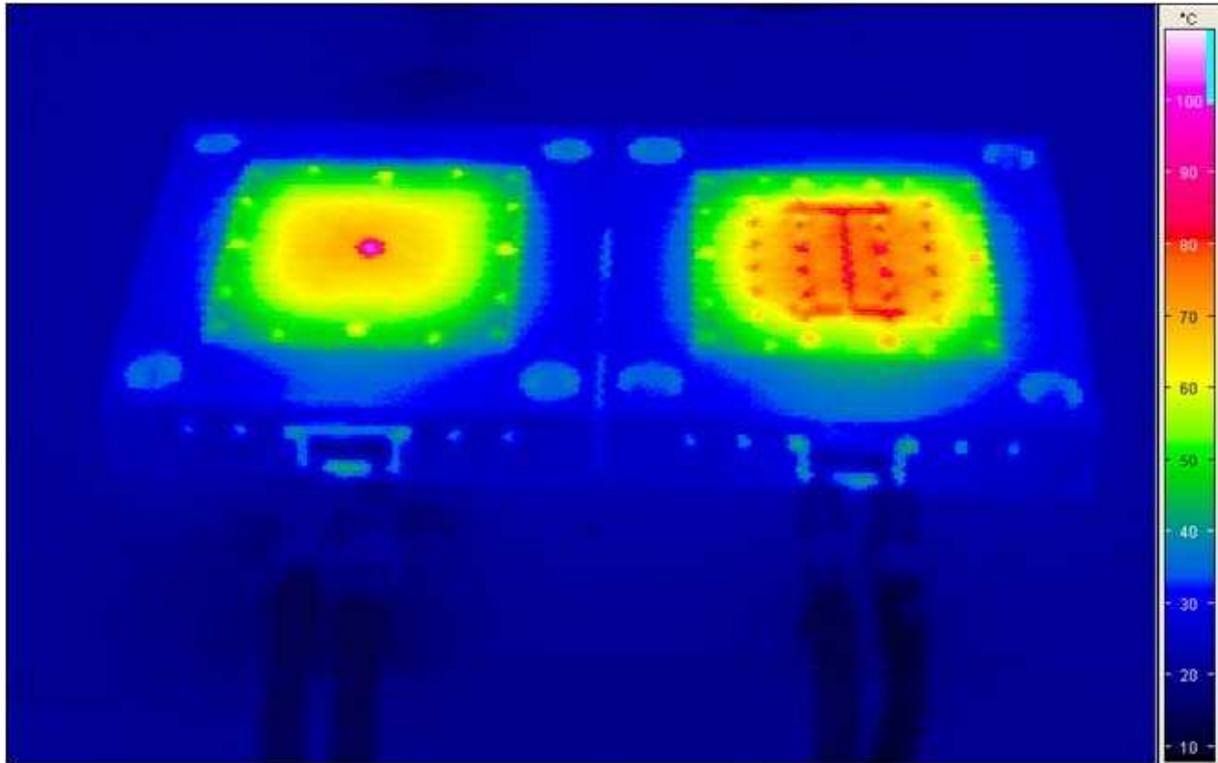


Abbildung 6: Beidseitig induktiv beheiztes Werkzeug

3.3 Halbintegrierte induktive Zusatztemperierung

Die dritte Bauform induktiv beheizter Werkzeuge stellen eine „Mischform“ aus externem und integriertem System dar. Beim halbintegrierten System liegt der Induktor offen im oder um das Werkzeug, ist aber im Gegensatz zum externen Induktor integraler Bestandteil des Werkzeugs [5], [6].

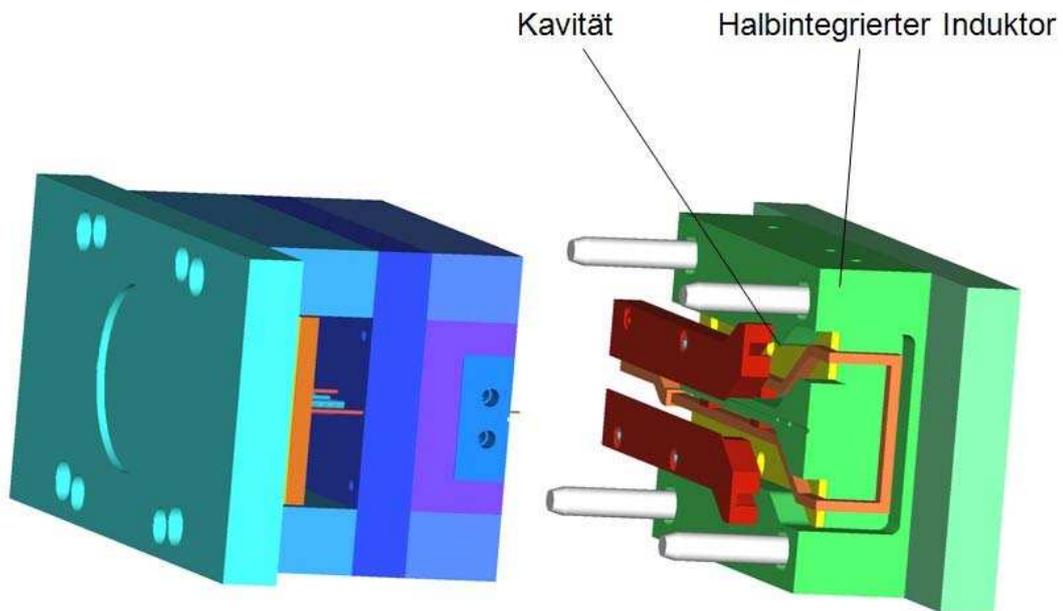


Abbildung 7: Werkzeug mit halbintegriertem Induktor [1]

4 Aktuelle Anwendungen und Verfahrenserweiterungen

Insbesondere für Bauteile bzw. Compounds welche sich mit einer isothermen Prozessführung nicht, oder nur mit erheblichem Aufwand herstellen bzw. verarbeiten lassen bietet, die induktiv-variotherme Werkzeugtemperierung einen vielversprechenden Lösungsansatz. Das Potential dieser Technologie konnte bereits in einer Vielzahl öffentlich geförderter Forschungsprojekte, aber auch in konkreten industriellen Anwendungen erfolgreich nachgewiesen werden. Aktuell läuft derzeit ein vom BMWI gefördertes AIF Projekt, in dem mittels induktiver Zusatztemperierung die Fließfähigkeit hochgefüllter Compounds für die Anwendung in Brennstoffzellen verbessert werden soll. Ziel des Projektes ist auch eine weitere Steigerung der Produktivität durch die Verwendung von Mehrfachkavitäten.

Weitere Forschungsschwerpunkte sind:

- die Vollständige Integration sämtlicher Peripheriegeräte in die Prozesssteuerung der Spritzgussmaschine,
- die Systematische Charakterisierung der Prozessparameter und deren Einflüsse auf die Bauteilqualität,
- das Einbringen des integrierten Induktors in die Kavitätseinsätze mit dem Ziel die benötigten Heizleistungen zu reduzieren und die Temperierung weiter zu beschleunigen.

Neben der Verbesserten Verarbeitung hochgefüllter Compounds mit neuartigen Materialeigenschaften wie z.B. langglasfaserverstärkte Polymere oder elektrisch leitfähige Kunststoffe, eröffnen sich durch die induktiv-variotherme Werkzeugtemperierung auch für bereits etablierte Verfahren wie beispielsweise CIM/MIM neuartige Anwendungen. Diese Art der Prozessführung ermöglicht die Verarbeitung hochgefüllter Compounds zu Bauteilen mit bisher nicht realisierbaren Strukturgrößen oder Fließwegen.

Weitere Anwendungsgebiete in der Kunststoffverarbeitung sind im Bereich des chemischen bzw. physikalischen Schäumens von Kunststoffen denkbar. Durch eine gezielte Erwärmung der Kavitätswand lässt sich die Schaumstruktur an der Bauteiloberfläche gezielt beeinflussen, so dass auch Bauteile mit optisch hochwertigen Oberflächen herstellbar sind.

Zudem ist der Einsatz induktiv beheizter Werkzeuge in der Elastomer- bzw. Duroplastverarbeitung möglich, da hier durch eine gezielte, lokale Temperierung die Vernetzung und damit die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst werden können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die induktiv-variotherme Werkzeugtemperierung eröffnet mittlerweile über die Grenzen des Sonderverfahrens Mikro- bzw. Ultrapräzisionsspritzguss hinaus eine ganze Reihe neuer Anwendungsfelder im Spritzguss bzw. in der Kunststoffverarbeitung allgemein. Darüber hinaus gewinnt die simulative Auslegung induktiv temperierter Werkzeuge zunehmend an Bedeutung. Neben der elektromagnetischen und thermischen Auslegung der Induktoren und Werkzeuge ist zusätzlich eine Kopplung der Simulationen bis hinein in die Füllsimulation für eine präzise Auslegung der Temperierung erforderlich.

Literatur

[1] TEWALD, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Universität Stuttgart, IKFF, Dissertation, 1996.

[2] BENKOWSKI, G.: Induktionserwärmung. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990.

[3] MICHAELI, W.: Prozessinnovationen mit Potential, Kunststoffe 09/2009

[4] ENGEL AUSTRIA GmbH.: Heizvorrichtung für ein Formwerkzeug, Patent No. DE102008060496A1, 2009

[5] HUANG, J.-T., LIN, L.-T.: Method and apparatus for heating mold by high frequency current, US Patent No. 2007/0075463, 2007

[6] FEIGENBLUM, J., LEGEROT, G., GUICHARD, A. Method and device for inductively heating conductive elements in order to shape objects, US Patent No. 7679036, 2010

[7] WALTHER, T.: Geräte- und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen Universität Stuttgart, IKFF, Dissertation, 2003.