

**Vollständig integrierte induktive Beheizung und
Impulskühlung von Spritzgiesswerkzeugen**

**Completely integrated induction heating and
pulsed cooling for injection molding**

A. Weber, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zum

**19. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

9. - 10. März 2005

Symposium 3 Kunststoffaufbereitung und -verarbeitung

© 2005 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

VOLLSTÄNDIG INTEGRIERTE INDUKTIVE BEHEIZUNG UND IMPULSKÜHLUNG VON SPRITZGIESSWERKZEUGEN

COMPLETELY INTEGRATED INDUCTION HEATING AND PULSED COOLING FOR INJECTION MOLDING

A. Weber¹ und W. Schinköthe²

¹ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 9; 70550 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 6409, Fax: + 49 (0) 711 685 6356, email: spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

² IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 9; 70550 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 6402, Fax: + 49 (0) 711 685 6356, email: schinkoethe@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Beim Spritzgießen, aber auch bei einigen anderen technischen Verfahren zur Formgebung von Thermoplasten werden zunehmend Ansprüche an die Temperatur der Werkzeuge gestellt, die sich wirtschaftlich nur mit einer sehr schnellen Aufheizung, kombiniert mit einer ebenso schnellen Kühlung erfüllen lassen. Sehr hohe Aufheizgeschwindigkeiten lassen sich bei metallischen Formen durch Wärmeerzeugung nach dem induktiven Prinzip erreichen. Wird eine induktive Beheizung gemeinsam mit einer wasserbasierten Impulskühlung vollständig in eine Werkzeug-Formplatte integriert, ist ein zyklischer Wechsel der Oberflächentemperatur zwischen 60°C und 240°C innerhalb von nur 60 Sekunden möglich.

Abstract: In injection moulding as well as in some other processes for the shaping of thermoplastics increasingly requirements concerning the temperature of the tools arise which can only be met economically when rapid heating is combined with equally rapid cooling.

Very fast heating of metallic moulds is possible by inductive means. If an inductive heating is completely integrated into a mould together with a water-based pulsed cooling it is possible to cycle between 60°C and 240°C in only 60 seconds.

Schlagwörter: Spritzguss, Temperierung, Feinwerktechnik, Mikrostrukturen

Keywords: injection moulding, temperature regulation, precision engineering, microstructures

1 Motivation

Wenn im Zusammenhang mit Spritzgusswerkzeugen von Temperierung die Rede ist, so ist damit in erster Linie die Kühlung gemeint, die von ganz seltenen Ausnahmen abgesehen bei allen Spritzgusswerkzeugen notwendig ist. Die aufgeschmolzene Kunststoffmasse, die im Werkzeug ihre Wärme abgibt und erstarrt, bewirkt bei jedem Zyklus einen Wärmeeintrag, der abgeführt werden muss, um die Werkzeugtemperatur im Mittel konstant zu halten. Zunehmend werden aber an Spritzgusswerkzeuge Anforderungen gestellt, die eine variotherme Temperierung notwendig machen. Variotherm bedeutet, dass die Werkzeugtemperatur nicht mehr annähernd konstant gehalten, sondern gezielt ein Temperaturprofil gefahren wird, um die einzelnen Abschnitte der Teilebildung optimal zu unterstützen. In der Regel wird dabei zur Zeit des Einspritzens und der Formfüllung eine höhere Temperatur der Form angestrebt (bis hin zur Massetemperatur), während nach Abschluss der Formfüllung die Temperatur des Werkzeugs wieder rapide gesenkt wird, um eine schnelle Erstarrung der Masse zu gewährleisten.

Eine nahezu konstant gehaltene Werkzeugtemperatur ist immer ein Kompromiss zwischen den Ansprüchen einer fehlerfreien Füllung der Form und optimaler Oberflächenqualität des abgeformten Teils einerseits und wirtschaftlichen Überlegungen mit der Bedingung einer möglichst kurzen Kühlzeit andererseits. Variotherme Temperierung bietet sich immer dann an, wenn zur fehlerfreien Formfüllung eine deutlich höhere Formtemperatur notwendig oder wünschenswert wäre, als im Interesse einer kurzen Zykluszeit während der Erstarrung des Formteils annehmbar.

Typische Problemteile sind zum Beispiel:

- dünnwandige Teile mit langen Fließwegen (hohe Aspektverhältnisse) und Teile mit mikrostrukturierten Oberflächen
In beiden Fällen besteht das Problem darin, dass die Masse beim Kontakt mit der kalten Kavitätswand schnell über den gesamten Querschnitt erstarrt und keine plastische Seele verbleibt, durch die weitere Masse in weiter entfernte Bereiche gelangen könnte. Unterhalb einer gewissen Querschnittsfläche dringt der Kunststoff bei konventioneller Temperierung, also vergleichsweise „kaltem“ Werkzeug nicht mehr ein. Üblicherweise wird zum Beispiel angenommen, dass Spalte von weniger als 0,02 mm Breite an Auswerfern und Kavitätsfugen nicht gefüllt werden.
- dickwandige Teile mit hohen Anforderungen an die Oberflächenqualität
Hier sind die widersprüchlichen Anforderungen während der Formfüllung und der Kühlzeit am deutlichsten ausgeprägt. Um den beträchtlichen Wärmehalt des Teils zügig abführen zu können, muss die Kavitätswand nach Abschluss des Einspritzvorgangs möglichst niedrige Temperatur haben und halten. Dickwandige Teile können zwar auch bei sehr niedriger Formtemperatur abgeformt werden, die Oberflächenqualität leidet aber dabei. Daher kommt ein dauerhaft extrem niedriges Temperaturniveau nicht für Teile in Betracht, deren Funktion von der Oberflächenqualität bestimmt wird (zum Beispiel optische Systeme) oder bei denen ein hoher Wertigkeitseindruck angestrebt wird (hochwertige Verbrauchsgüter). Interessanterweise kann dieser Aspekt gerade auch bei sehr billigen Artikeln zum Tragen kommen.

Schnelles Aufheizen und Abkühlen ist aber nicht nur für den Spritzguss von Interesse, auch andere Verfahren zur Verarbeitung von Thermoplasten haben Bedarf an schnellen Temperaturwechseln, zum Beispiel das Heißprägen von Mikrostrukturen [1].

Gängige Verfahren zur variothermen Temperierung verwenden zwei Flüssigkeitskreisläufe mit Medien auf unterschiedlichen Temperaturniveaus oder widerstandselektrische Heizelemente, gepaart mit Flüssigkeitskühlung.

2 Grundlagen

2.1 Induktive Erwärmung

Im technischen Bereich kennt man die Wärmeerzeugung nach induktivem Prinzip hauptsächlich aus den Bereichen der Wärmebehandlung von Metallen und der Gießerei, sie wird aber auch noch für zahlreiche andere Anwendungen eingesetzt. Auch in Küchenherden wird das Verfahren schon länger genutzt. Am IKFF wird nun bereits seit geraumer Zeit daran gearbeitet, die beträchtlichen Vorteile, die der Einsatz der induktiven Beheizung zur variothermen Temperierung von Spritzgusswerkzeugen eröffnet, nutzbar zu machen [2, 3, 4].

Die induktive Wärmeerzeugung beruht auf dem Transformatorprinzip. Ein von hochfrequentem (ca. 10 kHz bis 500 kHz) Wechselstrom hoher Stromstärke durchflossener Leiter, der Induktor, ist von einem elektromagnetischen Wechselfeld gleicher Frequenz umgeben. Wird ein leitfähiges Material in dieses Wechselfeld eingebracht, so werden in einer dünnen Oberflächenschicht wiederum kurzgeschlossene elektrische Ströme induziert. Durch die Verlustleistung dieser Ströme am ohmschen Widerstand des Materials entsteht Wärme. Um die Erwärmung des Induktors selbst beherrschbar zu halten, wird dieser meistens als Hohlleiter ausgeführt und mit Wasser durchströmt.

Vorteilhaft gegenüber anderen Methoden, Metalle zu erhitzen, ist vor allem die sehr hohe erzielbare Erwärmungsgeschwindigkeit. Dies beruht einerseits darauf, dass die Wärme direkt im Material des zu erwärmenden Gegenstands entsteht, andererseits aber insbesondere auch auf der sehr hohen Leistung, die durch eine gegebene Oberfläche eingebracht werden kann.

2.2 Impulskühlung

Die Wärmeabfuhr erfolgt bei Spritzgusswerkzeugen am häufigsten durch eine Flüssigkeitskühlung in Form einer konstanten Durchströmung der Werkzeuggrundplatten mit einem Medium, das dann

außerhalb des Werkzeugs wieder zurückgekühlt wird. Teilweise werden zusätzlich, selten auch ersatzweise Verfahren mit noch höherem abführbarem Wärmestrom eingesetzt, wie zum Beispiel elektrothermische Verfahren (Peltier-Elemente), Wärmerohre oder die Expansion von flüssigem Kohlendioxid.

Da der Wärmeeintrag ins Werkzeug nicht kontinuierlich erfolgt, sondern zyklisch zwischen Null und einem Maximalwert pendelt, ist eine Kühlung mit nahezu konstanter Wärmeabfuhr zwar normalerweise ausreichend, aber für problematische Teile nicht optimal [5]. Impulskühlung heisst, dass die Wärmeabfuhr nur während der Zeiten erfolgt, in denen das durch den Wärmeeintrag erforderlich ist. Dies verhindert insbesondere bei hohen Kühlleistungen die Abkühlung des Werkzeugs auf zu niedrige Temperatur in Phasen geringen Wärmeeintrags und die damit verbundene schlechtere Teilequalität. Bei vollständig variothermem Betrieb – also mit Heizung und Kühlung im Wechsel – entsteht zwangsläufig eine Impulskühlung.

3 Varianten der induktiven Beheizung

3.1 Externer Induktor

Bei annähernd planen Kavitäten und Teilen, die eine hohe Temperatur nur kurzzeitig beim Einspritzen benötigen, kann der Induktor ins geöffnete Werkzeug eingefahren werden und direkt die Trennebene aufheizen. Die Abkühlung erfolgt ins Material hinein, wie zum Beispiel auch vom induktiven Härten bekannt. Der Werkzeuggrundkörper wird dazu konventionell temperiert. Da die Abkühlung der Formoberfläche bereits einsetzt, während das Werkzeug geschlossen wird, muss auf eine höhere Temperatur erwärmt werden, als eigentlich zum Einspritzzeitpunkt notwendig.

Mit diesem Verfahren konnten mikrostrukturierte Teile mit Stegstrukturen von 150 µm Höhe bei nur 5 µm Breite abgeformt werden [3,4].

Kennzeichnend sind:

- konstruktiv einfacher Aufbau
- bei geeigneter Kavitätsgeometrie oft ohne Neukonstruktion des Werkzeugs nachrüstbar
- schnellste Aufheizung, weil direkt die Kavitätsoberfläche erwärmt wird
- schnellste Abkühlung durch geringste eingebrachte Wärmemenge.

3.2 Integrierter Induktor

Da der Induktor nicht mehr entfernt wird, kann während der Schließbewegung und bei geschlossenem Werkzeug weiter geheizt werden. In der Regel muss allerdings die Werkzeugkonstruktion bereits den Einsatz des Induktors vorsehen, ein nachträglicher Einbau ist kaum denkbar. Das den Induktor umgebende elektromagnetische Wechselfeld induziert Wirbelströme in allen leitfähigen Materialien in Induktornähe, so dass diese gegebenenfalls ebenfalls erwärmt werden. Um dies zu vermeiden, sind entweder ausreichende Luftspalte, Bereiche aus anderen Nichtleitern oder Abschirmungen vorzusehen. Als Abschirmung eignen sich nicht-ferromagnetische Metalle hoher Leitfähigkeit, da in diesen zwar Wirbelströme entstehen, aber aufgrund des geringen Widerstands die ohmsche Verlustleistung sehr viel geringer ist als in Eisenwerkstoffen. Damit erwärmen sich diese Materialien erheblich langsamer.

Kennzeichnend sind hier:

- Keine Bewegungen im Werkzeugraum nötig, vorteilhaft bei Einsatz eines Entnahmehandlings
- Temperaturmessung vergleichsweise einfach
- Temperatur kann geregelt und gehalten werden.

3.2.1 Semiintegrierter Induktor

Für stabförmige Kavitätsbereiche kann ein Aufbau gewählt werden, bei dem ein haarnadelförmiger Induktor einen langgestreckten Kavitätsbereich parallel zur Trennebene umschließt, während eine konventionelle oder auch Impulskühlung unterhalb der Kavität verläuft.

In der Regel ist einer Impulskühlung der Vorzug zu geben, da die Kühlkanäle noch im Erwärmungsbereich der Heizung liegen, was bei kontinuierlicher Kühlung die Heizleistung reduzieren und das Kühlmittel unnötig erwärmen würde. Die Erwärmung kann gegebenenfalls auch zur Verdampfung des Kühlmediums führen. Um die Leistung der Heizung zu optimieren, sollte das Kühlmedium vor der Heizphase aus den Kühlkanälen ausgeblasen werden.

- Werkzeugaufbau weitgehend konventionell, induktive Erwärmung in einzelnen Fällen nachrüstbar

3.2.2 Vollintegrierter Induktor

Weitgehend universell einsetzbar wird die induktive Beheizung, wenn es gelingt, sie vollständig unterhalb der Kavität in einer Formplatte einzubauen. Der Induktor wird dabei in einem Bereich verlegt, in dem auch eine konventionelle Temperierung, sei es mit flüssigen Medien oder widerstandselektrisch, angeordnet würde. Da die gleichen Kanäle sowohl den Induktor als auch das Kühlmedium führen, kann auf eine Innenkühlung des Induktors im Allgemeinen verzichtet werden.

Bei dieser Bauform wird der Impulsbetrieb der Kühlung obligatorisch, da die Kühlung auf die gleichen Oberflächen wirkt wie die Heizung und weil an den direkt induktiv beheizten Oberflächen regelmäßig Temperaturen erreicht werden, die alle gängigen Temperiermedien zum Sieden oder gar zur Zersetzung bringen. Auch das Ausblasen des Kühlmediums vor Heizungsstart wird damit zwangsläufig erforderlich, da die Energie um die Kanäle „freizukochen“ schnell die zur eigentlichen Erwärmung der Form notwendige übersteigt. Ein Verzicht auf das Ausblasen wäre nicht nur Energieverschwendung, sondern würde natürlich auch die Heizzeit entsprechend in die Höhe treiben.

- Da der Induktor in der Regel ungekühlt betrieben werden kann, wird eine einfache Herstellung aus gebogenem Vollmaterial möglich.
- Vielfältige Kavitätsgeometrien beheizbar

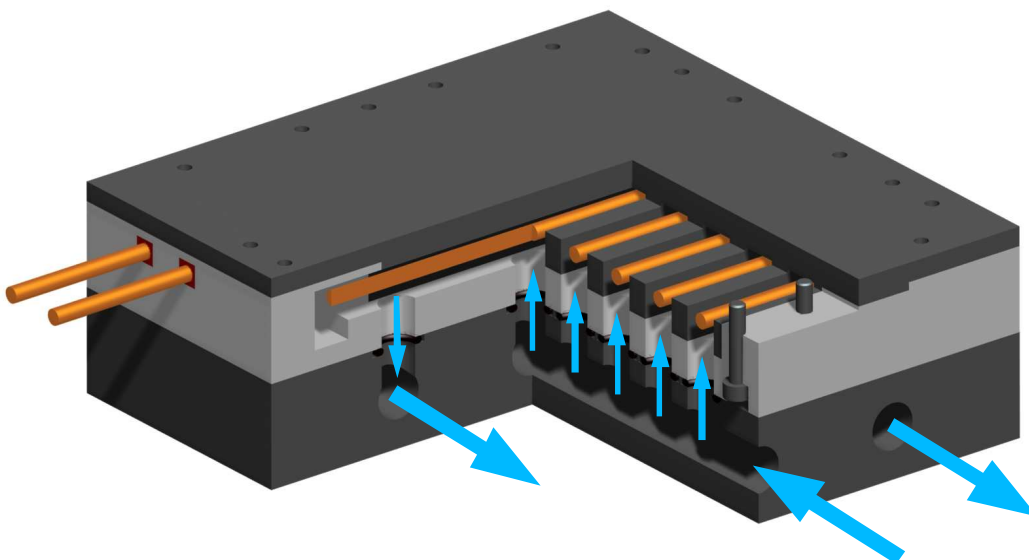


Abb 1: Versuchsformplatte 156 mm × 156 mm mit vollständig integriertem Induktor, für Messzwecke ohne eigentliche Kavität ausgeführt; die Pfeile kennzeichnen den Kühlwasserfluss in der Kühlphase

Der Induktor ist in gefrästen Nuten auf der Unterseite der eigentlichen Kavitätsplatte verlegt, die zusammen mit einer abschliessenden Unterplatte aus Aluminium auch die Kühlkanäle bilden. Das Kühlwasser wird durch eine dritte, noch tiefer liegende Platte zugeführt, fließt durch senkrechte Bohrungen zur Mitte der Kühlkanäle, von dort nach außen und wieder von der Kavitätsplatte weg. Damit wird ein Bereich um die Mitte der Kavitätsplatte nicht nur schnell aufgeheizt, sondern auch überaus schnell wieder abgekühlt.

3.3 Versuchsergebnisse mit vollintegriertem Induktor

Für die mit der beschriebenen Formplatte durchgeführten Versuche wurde ein Prozess angenommen, der eine Temperaturführung zwischen den Grenztemperaturen 240°C (als typischer Massetemperatur eines technischen Thermoplasts) und 60°C (als Entformungstemperatur) erfordert. Aufheizung und Abkühlung wurden unmittelbar aufeinander folgend zyklisch gefahren, um einen quasistationären, eingeschwungenen Zustand der äußeren Plattenbereiche zu erzielen.

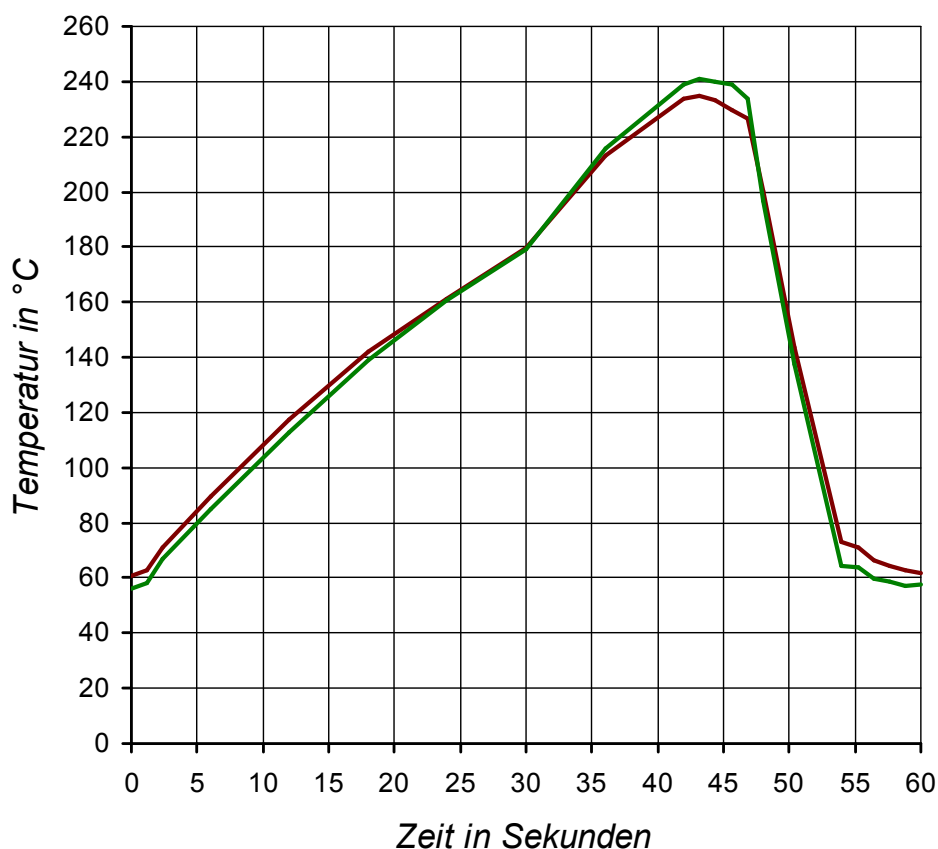


Abb 2: Temperaturverlauf an zwei Punkten der fiktiven Kavität (siehe auch die Markierungen in den weiteren Abbildungen); die Welle im Bereich 30 s/180°C ist vermutlich ein Artefakt der Messbereichsumschaltung des eingesetzten Thermografiesystems

Bei diesen Versuchen betrug die Leistungsaufnahme des Induktionsgenerators während der Heizphase konstant ca. 3,5 kW. Mit dieser Heizleistung wurde die obere Zieltemperatur von 240°C innerhalb von ca. 43 Sekunden erreicht. Daraufhin wurde die Heizung abgeschaltet und eine Sekunde später mit der Kühlung begonnen. Als Kühlmedium diente Leitungswasser mit ca. 15°C Temperatur im Zulauf. Kurz vor Erreichen der unteren Grenztemperatur von 60°C wurde die Wasserzufuhr wieder unterbrochen, und die Kühlkanäle wurden 5 Sekunden lang mit Druckluft ausgeblasen. Mit dieser Kühlung wurde die Ausgangstemperatur von 60°C in 17 Sekunden wieder erreicht, 60 Sekunden nach Beginn der Heizphase.

3.4 Thermografie-Aufnahmen des Versuchsaufbaus

Die Thermografie ist ein bildgebendes Messverfahren, das es erlaubt, die Oberflächentemperaturverteilung eines Körpers aufzuzeichnen. Für die Temperaturbestimmung wird dabei die von einem warmen Gegenstand abgestrahlte Infrarotstrahlung genutzt. Vorteilhaft ist dabei die berührungslose Erfassung der Temperatur nahezu zeitgleich an der gesamten gemessenen Oberfläche.

Um optimale, artefaktfreie Messergebnisse zu erzielen, ist darauf zu achten, dass das Messobjekt möglichst matt und idealerweise auch möglichst dunkel sein sollte. Da die für die Messung genutzte nahe Infrarotstrahlung von glänzenden Oberflächen genauso reflektiert wird wie sichtbares Licht, entstehen sonst „Spiegelbilder“ ferner Wärmequellen in der zu messenden Oberfläche. Für die hier dargestellten Messungen wurde der Versuchsaufbau mit einer dünnen Schicht hochtemperaturbeständigen mattschwarzen Lacks überzogen.

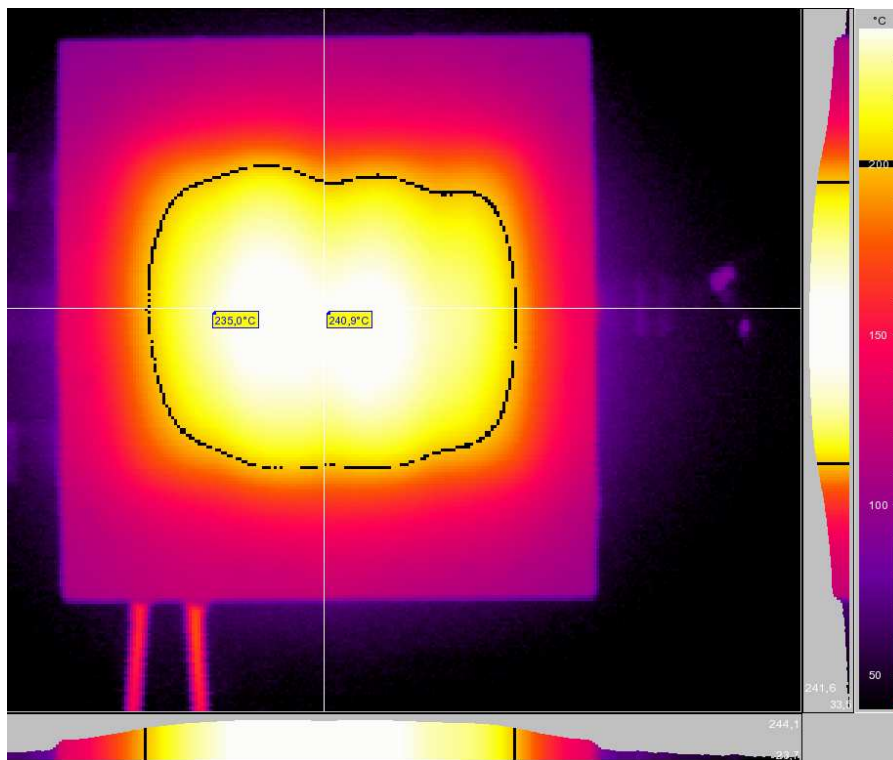


Abb. 3: Thermografie-Aufnahme nach ca. 43 s Erwärmungszeit mit Isotherme bei 200°C

Wie die Thermografie zeigt, ergibt sich bei Erreichen der Zieltemperatur von 240°C an der heißesten Stelle der Oberfläche eine weitgehend gleichmäßige Temperaturverteilung in einem mittleren Bereich der Kavitätsplatte. Der Rand der Platte konnte der schnellen Erwärmung nicht folgen, dort stellt sich über mehrere gefahrene Zyklen eine nahezu konstante Temperatur von ca. 100–120°C ein (Siehe auch die Thermografie der Platte nach Ende der Kühlphase, Abb. 4, nächste Seite.). Der Temperaturwechsel und damit auch die Energiezu- und -abfuhr beschränken sich also auf den Bereich einer späteren Kavität, während der Werkzeugrahmen kaum beteiligt ist.

Unten links sind in den Thermografien Abb. 3 und 4 die Induktorzuleitungen zu sehen. Deren Temperatur bewegt sich zwischen ca. 80°C am Ende der Kühlphase und ca. 150°C am Ende der Heizphase. Die Impulskühlung der Induktorstränge im Inneren der Versuchsplatte reicht also aus, um durch Wärmeleitung auch den ungekühlten Zuleitungsbereich zwischen den (gekühlten) Anschlussklemmen des Generators und dem geheizten Bereich in einem sicheren Temperaturbereich zu halten.

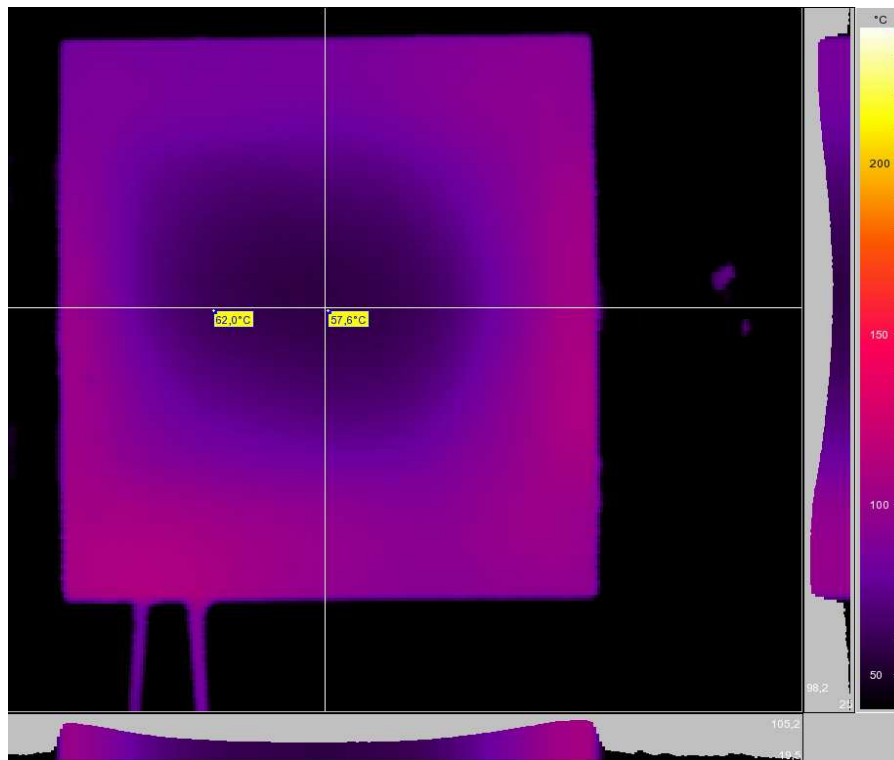


Abb. 4: Thermografie-Aufnahme nach ca. 17 s Kühlzeit, gesamte Dauer für Aufheizen und Kühlen 60 s

Literatur

- [1] Herzinger, S.: Hochpräzises Heißprägen, *Kunststoffe*, 10/2004, 151–154
- [2] Tewald, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung, Dissertation, Universität Stuttgart, 1997
- [3] Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung, Dissertation, Universität Stuttgart, 2001
- [4] Walther, T.: Geräte und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen, Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [5] Radke, R.; Dzuban, R.: Weniger ist mehr – Dynamische Temperiersysteme im Spritzgießprozess, *Plastverarbeiter* 55. Jahrg., 4/2004

Neue Telefon- und Telefaxnummer:

Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402

Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356

Neue E-Mail-Adressen:

ikff@ikff.uni-stuttgart.de

linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de