

**Optimierter Energieeinsatz durch
induktive Erwärmung von Spritzgiesswerkzeugen**

**FEM-unterstützte Auslegung von
induktiven Heizungssystemen**

**Optimized use of energy during
inductive heating of injection moulding**

FEM supported design of induction heating systems

M. Zülch, E. Burkard, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zum

**20. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

**14. - 15. März 2007
Stuttgart**

© 2007 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

OPTIMIERTER ENERGIEEINSATZ DURCH INDUKTIVE ERWÄRMUNG VON SPRITZGIESSWERKZEUGEN - FEM UNTERSTÜTZTE AUSLEGUNG VON INDUKTIVEN HEIZUNGSSYSTEMEN

OPTIMIZED USE OF ENERGY DURING INDUCTIVE HEATING OF INJECTION MOULDING TOOLS – FEM SUPPORTED DESIGN OF INDUCTION HEATING SYSTEMS

M. Zülch¹, E. Burkard² und W. Schinköthe³

¹ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9; 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66421, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, email: zuelch@ikff.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 66403, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, email: burkard@ikff.uni-stuttgart.de

³ IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9; 70569 Stuttgart
Tel.: + 49 (0) 711 685 66411, Fax: + 49 (0) 711 685 56402, email: schinkoethe@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Die variotherme Führung des Spritzgießprozesses ermöglicht es, lange Fließwege und hohe Aspektverhältnisse insbesondere bei hochpräzisen, wie zum Beispiel bei mikrosystemtechnischen oder optischen Formteilen konturtreu abzuformen. Auch die Abformung großformatiger Formteile, wie sie zum Beispiel im Automotive-Bereich anzutreffen sind, lässt sich durch eine variotherme Prozessführung gezielt optimieren oder auch erst ermöglichen.

Eine Möglichkeit, den benötigten zusätzlichen Temperaturhub zu realisieren, stellt die induktive Werkzeugtemperierung dar. Sie ermöglicht eine außerordentlich hohe Energieeinbringung in das Werkzeug und somit eine starke Reduktion der benötigten Aufheiz-Zeiten.

Die Auslegung dieser Prozessvariante stellt hohe und fachübergreifende Anforderungen an die Werkzeug-Entwicklung. Der Einsatz numerischer Simulationen kann jedoch helfen, die Entwicklung zielgerichtet und zeitnah zu unterstützen und Fehlinvestitionen wie einen überdimensionierten Induktionsgenerator oder Fehler bei der Induktor-Auslegung zu vermeiden.

Abstract: Variothermal temperature control during the injection moulding process offers high geometrical accuracy while forming long flow paths or high aspect ratios often used for high-precision part such as micromechanical or optical components. Also the production of large scale moulding parts as manufactured in the automotive industry can be optimized or even be realized by the application of variothermal temperature control.

The temperature control itself can be obtained by different means such as inductive heating of the moulding tool. This option offers an excellent transfer of energy towards the moulding tool and therefore a high reduction of the required heating time.

The design of an inductive heating system requires a high level of competence and multidisciplinary knowledge especially during the design and planning stage. Numerical simulations can help to support the designer for a purposeful construction process and to avoid false investments by choosing the wrong induction generator or wrong dimensions for the inductor.

Schlagwörter: Spritzguss, Temperierung, variotherm

Keywords: Injection moulding, temperature control, variothermal

1 Einleitung

Bei den meisten konventionellen Spritzgusswerkzeugen wirkt die Temperierung als Kühlsystem um die beim Einspritzen durch die aufgeschmolzene Formmasse eingebrachte Wärme aus dem Werkzeug abzuführen. Das Temperiermedium wird dabei genutzt, um das Werkzeug auf einer im Mittel konstanten Temperatur zu halten. Zunehmend werden aber an Spritzgusswerkzeuge Anforderungen gestellt, die eine variotherme Temperierung erforderlich machen.

Variotherm bedeutet hierbei, dass das Werkzeug nicht mehr annähernd konstant auf einer Temperatur gehalten wird, sondern vor dem Einspritzprozess auf eine höhere Temperatur, bis hin zur Temperatur der Formmasse, gebracht und nach dem Einspritzen heruntergekühlt wird, um eine schnelle Erstarrung des Teils zu ermöglichen. Durch diese Art der Temperierung wird ein zu schnelles Erstarren der Formmasse während des Einspritzens verhindert und dadurch die Abbildung von feinsten Strukturen, langen Fließwegen usw. ermöglicht.

Die üblichen Verfahren zur variothermen Temperierung verwenden zwei Flüssigkeitskreisläufe mit Medien auf unterschiedlichen Temperaturniveaus oder widerstandselektrische Heizelemente, gepaart mit Flüssigkeitskühlung. Hierbei wird immer ein sehr großer Bereich des Werkzeugs aufgeheizt, der nach dem Einspritzen dann wieder heruntergekühlt werden muss.

Durch den Einsatz der induktiven Werkzeugtemperierung wird ein deutlich kleinerer Teil des Werkzeugs erwärmt. Dies resultiert, in Kombination mit der sehr schnellen Energieeinbringung der induktiven Erwärmung, in deutlich kürzeren Heizzeiten und führt durch die geringere Energiemenge auch zu deutlich kürzeren Kühlzeiten. Sowohl die dadurch möglichen kürzeren Zykluszeiten als auch der geringere Energieeinsatz führen zu einer wirtschaftlichen Produktion der Spritzgussteile.

2 Grundlagen der induktiven Temperierung

Am häufigsten wird die induktive Erwärmung in den Bereichen der Wärmebehandlung von Metallen und in der Gießereitechnik eingesetzt. Aber auch im Bereich der Gastronomie und zunehmend in privaten Haushalten wird sie inzwischen genutzt. Am IKFF wird seit einigen Jahren daran geforscht die Vorteile der induktiven Erwärmung bei der variothermen Temperierung von Spritzgusswerkzeugen zu nutzen [1, 2, 3].

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.

Vorteilhaft gegenüber den anderen Methoden, die zur variothermen Temperierung genutzt werden sind vor allem die sehr hohe Geschwindigkeit bei der Erwärmung des Metalls und die Möglichkeit gezielt nur den Bereich zu erwärmen, der für ein präzise abformendes Einspritzen der Formmasse notwendig ist.

Je nach Geometrie des Formteils kann dabei der Induktor der induktiven Heizung sowohl vollständig in das Spritzgusswerkzeug integriert oder auch als externe Spule eingesetzt werden (Bild 1).

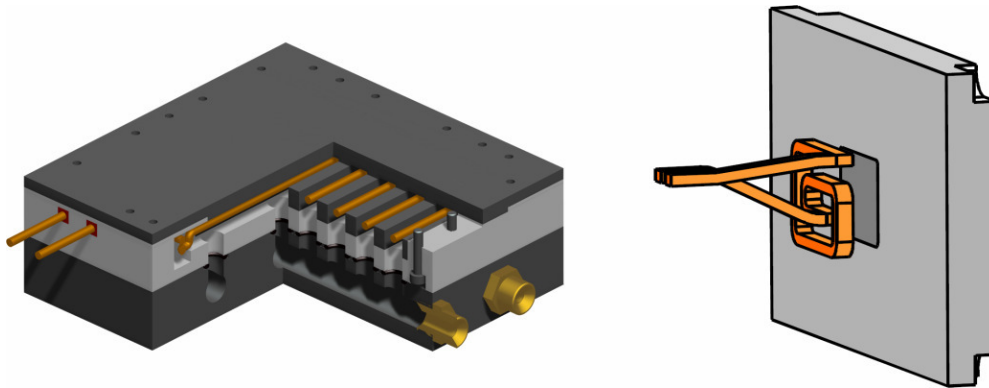


Bild 1: Vollintegrierter und externen Induktor [4, 3]

3 Auslegung des induktiven Temperiersystems

Diese noch relativ neue Art der varithermen Temperierung erfordert ein fachübergreifendes Wissen bei der Konstruktion des Temperiersystems. Simulationsverfahren wie die „Finite-Elemente-Methode“ (FEM) können hierbei als Hilfsmittel eingesetzt werden, um sowohl die notwendige Generatorleistung als auch die Temperaturverteilung im Werkzeug bei unterschiedlichen Induktor- und Werkzeuggeometrien in Form von Planspielen zu bestimmen.

3.1 Simulation mit Hilfe der eingepprägten Energie

Die Bestimmung von Generatorleistung und Temperaturverteilung erfolgt durch eine gekoppelte Simulationsrechnung, bei der die Ergebnisse einer harmonischen elektromagnetischen Simulation als Eingangsgrößen einer transienten thermischen Rechnung genutzt werden (Bild 2).

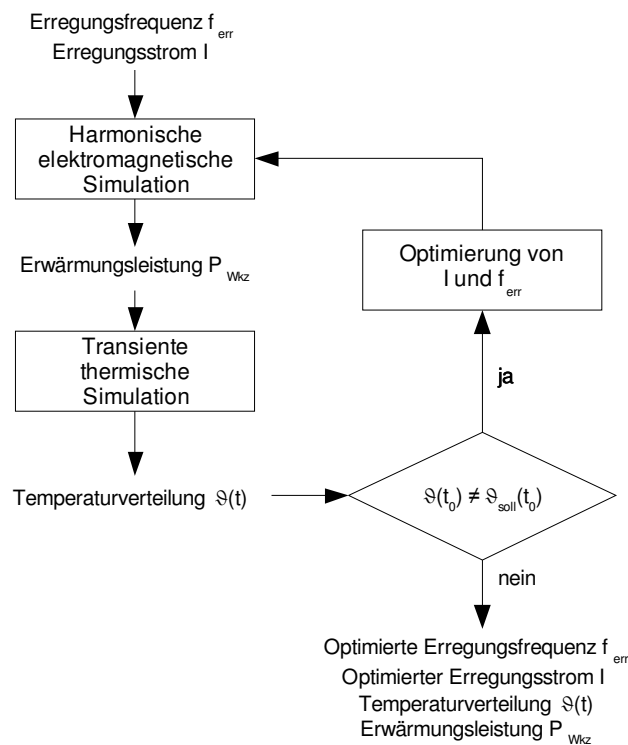


Bild 2: Simulationsverfahren

Ziel dieses Verfahrens ist es, zu einer als Simulationsmodell gegebenen Werkzeug- und Induktorgeometrie und einer gewünschten Temperaturverteilung im Werkzeug die Parameter Erregungsfrequenz

f_{err} und Erregungsstrom I zu optimieren. Zusammen mit der ebenfalls bestimmten Erwärmungsleistung P im Werkzeug dienen diese beiden Parameter zur Bestimmung der erforderlichen Generatorleistung.

Betrachtet man das Gesamtsystem, wird an zwei Körpern im System durch die von außen aufgebraachte Generatorleistung Arbeit verrichtet. So wird das Werkzeug durch die Induktion von Wirbelströmen und den elektrischen Widerstand des Werkzeugs, der diesen entgegensteht, erwärmt. Dieser Anteil der erzeugten Wärmeenergie wurde mit dem oben dargelegten Simulationsverfahren als Wärmeleistung P bestimmt. Zum anderen erfolgt eine Erwärmung des Induktors selbst, da auch dieser von einem starken Strom durchflossen wird und diesem einen nicht vernachlässigbaren Widerstand entgegenbringt. Diese Erwärmung wird durch die Verlustleistung P_{Ind} repräsentiert. Das im Sinne der Energieerhaltung beide Leistungsanteile durch die von außen aufgebraachte Generatorleistung ausgeglichen werden müssen, kann man die erforderliche Generatorleistung als Summe beider Leistungsanteile darstellen (Formel 3.1).

$$P_{Generator} = P_{Wkz} + P_{Ind} \quad (\text{Formel 3.1})$$

Der bisher unbekannt Summand, die Verlustleistung im Induktor, kann über den elektrischen Widerstand des Induktors R_{Ind} und Erregungsstrom I aus der Simulation bestimmt werden (Formel 3.2).

$$P_{Ind} = I^2 R_{Ind} \quad (\text{Formel 3.2})$$

Da der Induktor von einem hochfrequenten Strom durchflossen wird, tritt die elektrische Verlustleistung durch den Skineneffekt nur im Randbereich des Querschnitts auf. Vereinfachend kann angenommen werden, dass sich die gesamte Leitfähigkeit des Induktors auf die Skintiefe δ_s konzentriert und der gesamte übrige Leiter feldfrei ist. Die Skintiefe ist dabei gemäß Formel 3.3 definiert.

$$\delta_s = \sqrt{\pi \kappa \mu f_{err}} \quad (\text{Formel 3.3})$$

Bezieht man den durch den Skineneffekt reduzierten Querschnitt des Induktors A_{red} und seine Gesamtlänge l_{Ind} in die weitere Rechnung mit ein, so ergibt sich für die erforderliche Generatorleistung ein nur noch von Materialkennwerten, geometrischen Parametern und den Simulationsergebnissen abhängiger Zusammenhang (Formel 3.4).

$$P_{Generator} = P_{Wkz} + \frac{I^2}{\kappa} \frac{l_{Ind}}{A_{red}(f_{err})} \quad (\text{Formel 3.4})$$

Dieses Simulationsverfahren erlaubt somit die Bestimmung sowohl der Temperaturverteilung als auch der erforderlichen Generatorleistung bei einer vorgegebenen Induktorgeometrie und einer Prozessvariante. Zur zielgerichteten Optimierung ist es jedoch nötig, eine Vielzahl unterschiedlicher Geometrien und Varianten zu untersuchen und zu bewerten. Um die erforderliche Rechenzeit zur Bestimmung von Generatorleistung und Temperaturverteilung zu begrenzen, kann in diesem Auslegungsabschnitt vereinfachend auf ein zweidimensionales Modell zurückgegriffen werden (Bild 3).

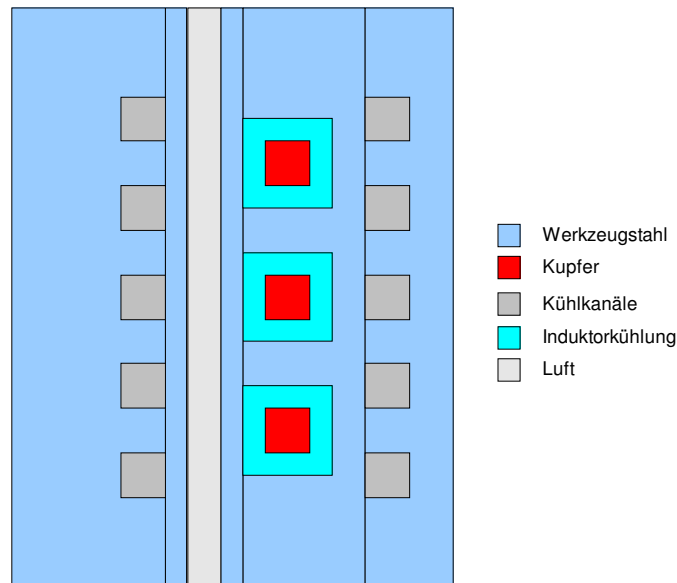


Bild 3: Simulationsmodell eines internen Induktionssystems

Zur weitergehenden Optimierung einzelner Varianten des Induktionssystems ist es erforderlich, auch dreidimensionale Effekte der induktiven Erwärmung simulativ offen zu legen. Als wichtiges Optimierungsziel ist hierbei die Vermeidung einer lokalen Überhitzung der Kavität oder des internen Induktionssystems zu nennen, was im Extremfall zu einer Beschädigung des Werkzeugs oder des Induktionssystems führen kann. Durch die außerordentlich feine Vernetzung des Modells, die insbesondere für die elektromagnetische Simulation des Systems erforderlich ist, und die daraus folgende hohe Elementzahl kann das Modell in der Regel nicht mehr mit Hilfe von Arbeitsplatzrechnern simuliert werden. Die zeit- und kostenintensive Simulation auf Großrechenanlagen kann jedoch in vielen Fällen vermieden werden, wenn aufgrund von Erfahrungswerten die kritischen Bereiche des Werkzeugs bereits im Vorfeld eingegrenzt werden können.

3.2 Dreidimensionale Modellierung mit Hilfe der Submodelltechnik

Die Submodelltechnik erlaubt es, einzelne Bereiche eines ansonsten grob vernetzten Simulationsmodells aus dem Modell zu schneiden, feiner zu vernetzen und somit gezielt zu untersuchen. Im vorliegenden Fall kann diese Variante der Simulation insbesondere für den elektromagnetischen Teil der Simulation eingesetzt werden. Hierzu wird das dreidimensionale Modell zunächst grob vernetzt und berechnet. Die Knotenlösungen im relevanten Bereich des Modells werden daraufhin extrahiert und als Lasten und Randbedingungen in dem Modell des Ausschnitts eingelastet. Die Ergebnisse der zweiten Simulation können in einem letzten Schritt auf ein wiederum grob vernetztes Modell für die thermische Simulation interpoliert werden.

Mit Hilfe dieser Simulationsvariante ist es möglich, auch komplexe dreidimensionale Modelle mit noch vertretbarem Aufwand auf Arbeitsplatzrechnern zu untersuchen. Voraussetzung hierfür ist allerdings wie bereits erwähnt die Kenntnis von möglichen kritischen Bereichen des Werkzeugs aus Versuchen oder Erfahrungswerten.

4 Beispielhafter Vergleich von Simulation und Versuchsaufbauten

Am IKFF wurden verschiedene Versuchswerkzeuge aufgebaut, die mit Hilfe von FEM-Rechnungen ausgelegt wurden. Anhand von Thermografieaufnahmen wurde dann kontrolliert, inwieweit die Simulationsergebnisse mit den realen Erwärmungskurven übereinstimmen. Anhand eines einfachen Werkzeugs mit externer Induktorspule sind im Folgenden beispielhaft ein paar Ergebnisse der Feinauslegung anhand eines dreidimensionalen Modells aufgeführt (Bilder 4 und 5).

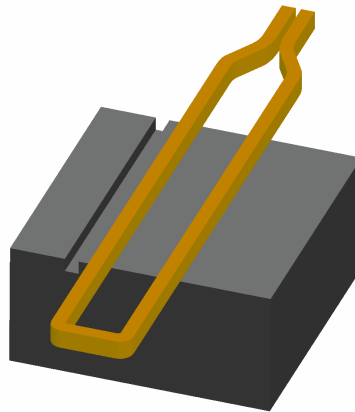


Bild 4: Versuchswerkzeug mit externem Induktor [5]

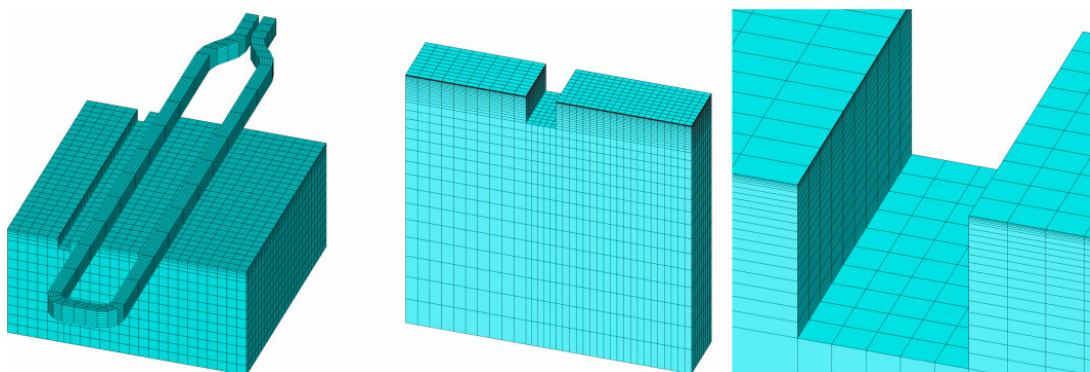


Bild 5: Grobe Vernetzung (links) und Submodellvernetzung (mitte und rechts) [5]

4.1 Simulation der Wärmeverteilung mit einer groben FEM-Vernetzung

Die Simulation erfolgte zunächst mit Hilfe eines grobvernetzten Modells in der Simulationsumgebung ANSYS®. Wie aus dem Vergleich zwischen dem Simulationsergebnis und der Thermographieaufnahme in Abbildung 6 ersichtlich ist, weicht die reale Temperaturverteilung außerordentlich stark von der Simulation ab. Insbesondere in den Randbereichen des Versuchswerkzeugs kommt es entgegen der Simulation zu einer starken Überhöhung der Temperatur und somit zu einer möglichen Schädigung der Struktur. Darüber hinaus liegt die im Experiment erreichte Temperatur weit unterhalb der simulierten Temperaturverteilung.

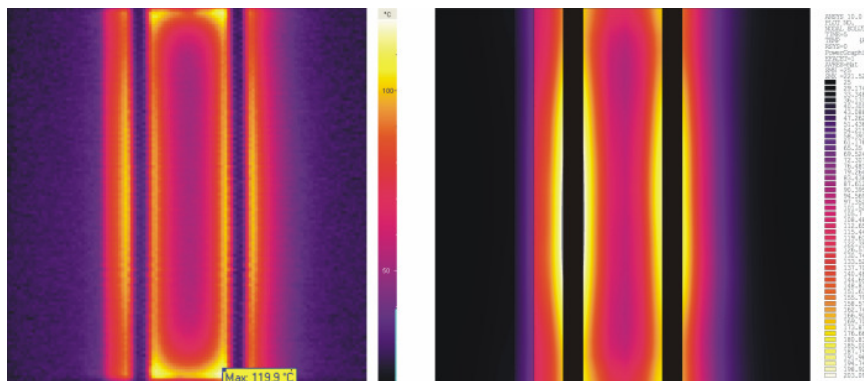


Bild 6: Vergleich von Simulation mit grobvernetztem Modell (rechts) mit Thermografieaufnahme [5]

In Bezug auf die Qualität der Temperaturverteilung lässt sich jedoch eine weitgehende Übereinstimmung der empirisch ermittelten Verteilung mit der simulierten Verteilung feststellen.

4.2 Einsatz der Submodelltechnik für den Bereich der Skintiefe

Als weitergehende Untersuchung wurden einzelne Bereiche des Werkzeugs mit der Submodelltechnik aus dem grobvernetzten Modell geschnitten und separat betrachtet. Durch die nun erfolgte feinere Vernetzung des Modells wurde die Vorhersagegenauigkeit des Simulationsmodells stark verbessert (Bild 7); die ermittelte Temperaturdifferenz zwischen Modell und Messung liegt bei diesem Modell bei etwa 5-10 °C gegenüber einer Differenz bei dem grobvernetzten Modell von bis zu 50 °C.

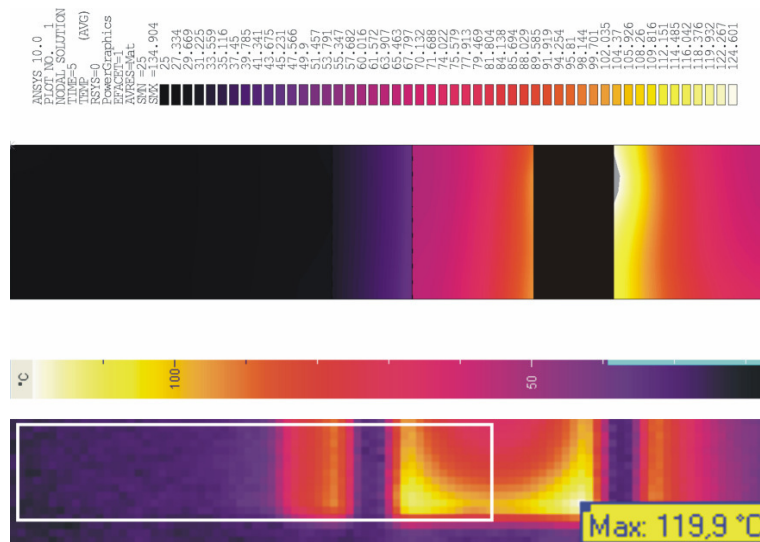


Bild 7: Vergleich von Submodell-Simulation (oben) mit Thermografieaufnahme [5]

Somit kann durch den Einsatz der Submodelltechnik nicht nur qualitativ die Wärmeverteilung ermittelt, sondern auch die Höhe der Temperatur bestimmt werden. Der Einfluss der Werkstückkante wird bei dem dargestellten Submodell nicht korrekt erfasst, da die Lage des Submodells (in der Abbildung weiß umrahmt) diesen Bereich nicht vollständig berücksichtigt.

5 Zusammenfassung

Das angewandte zweistufige Simulationsverfahren aus einer Grobauslegung anhand eines zweidimensionalen Modells sowie einer Feinauslegung unter Einsatz der Submodelltechnik erlaubt es, bereits in der Planungs- und Entwurfsphase eines induktiv temperierten Werkzeugs recht genaue Vorhersagen über das Erwärmungsverhalten zu treffen. Die Möglichkeit eines korrigierenden Eingriffs in diesen Phasen erlaubt es dem Konstrukteur, bereits im Vorfeld einer Realisierung Fehlinvestitionen wie zu hohe Generatorleistungen oder falsche Induktorgeometrien zu erkennen und korrigierend einzugreifen.

Ziel weiterführender Untersuchungen muss es daher sein, die Genauigkeit der Simulation weiter voran zu treiben sowie mit Hilfe weiterführender Simulationstechniken die erforderliche Rechenleistung weiter zu optimieren, so dass dem Entwickler ein Werkzeug in die Hand gegeben werden kann, das auch industriellen Ansprüchen stand hält und somit den Einsatz der induktiven Temperierung im Spritzgießwerkzeugbau vereinfacht und weiter etabliert. Hierzu werden am IKFF derzeit weitere Untersuchungen im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes durchgeführt.

Literatur

- [1] Tewald, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997.
- [2] Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [3] Walther, T.: Geräte und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002.

- [4] Weber, A.: Vollständige integrierte induktive Beheizung und Impulskühlung von Spritzgießwerkzeugen. Tagungsband zum 19. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Universität Stuttgart, 2005.
- [5] Hamed, A.: Einsatz der Submodelltechnik in der FEM-Simulation mit ANSYS® bei der induktiven Erwärmung eines Werkstücks. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2006.