

Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung
Injection moulding of microstructures with inductive mould heating

Th. Walther (IKFF), W. Schinköthe (IKFF), W. Ehrfeld (IMM Mainz);
C. Schaumburg (IMM Mainz); L. Weber (IMM Mainz)

Beitrag zum

**16. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

10. - 11. März 1999

Symposium 5 Kunststoffverarbeitung

Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung

Injection moulding of microstructures with inductive mould heating

Th. Walther, IKFF; W. Schinköthe, IKFF; W. Ehrfeld, IMM Mainz; C. Schaumburg, IMM Mainz; L. Weber, IMM Mainz

Zusammenfassung

Der Mikrosystemtechnik wird ein ähnliches Wachstum vorausgesagt, wie der Mikroelektronik vor etwa 25 Jahren. Unterschiedlichste Anwendungen und Demonstratoren sind bereits entwickelt worden, jedoch verhindern die kostenintensiven Fertigungsverfahren bisher noch den Einsatz in Großserien. Für die Massenfertigung bietet sich die Kunststoffabformtechnik als wirtschaftliches Verfahren an. Um die erforderlichen Strukturen im Mikrometerbereich abformen zu können, ist neben speziellen Anforderungen an das Spritzgießwerkzeug eine variotherme Prozeßführung erforderlich. Stand der Technik ist ein Variothermverfahren mit unterschiedlich temperierten Ölkreisläufen. Nachteilig bei diesem Verfahren sind jedoch die teilweise im Minutenbereich liegenden Zykluszeiten, die zu einer thermischen Schädigung der Schmelze in der Plastifiziereinheit führen können. Eine Alternative bietet sich durch die induktive Werkzeugtemperierung an.

Abstract

For the microsystem technology a similar growth is predicted as for the microelectronic technology 25 years ago. Different applications and demonstrators have already been developed, but the high costs of the manufacturing processes still prevent the use in large series. For the mass fabrication the plastic moulding process offers an economical technique. In order to cast parts with micron dimensions special tools and process controls for varying the tool temperature - the variotherm process control - are required. State of the art is a variotherm process realised by two oil cycles with different temperature levels. The disadvantage of this method is the long cycle time of several minutes, that can lead to the thermal destruction of the melt in the plasticating unit. An alternative is the inductive heating of the mould insert.

Einleitung

Der Begriff "Mikrosystem" bezeichnet Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren die in miniaturisierter Bauform so zu einem Gesamtsystem verknüpft werden, daß sie "empfinden", "entscheiden" und gegebenenfalls auch "reagieren" können. Anwendungen finden sich in vielen Bereichen der Technik, wie z.B. faseroptische Schalter in der Informations- und Kommunikationstechnik, Mikropumpen oder Mikrodosiereinheiten in der Medizintechnik, verschiedenste Sensoren in der Verkehrs- und Fertigungstechnik und, Mikroreaktoren in der chemischen Verfahrenstechnik /1/. Auch im nichttechnischen Anwendungsbereich sind viele Einsatzfelder denkbar, beispielsweise bei Waschmaschinen, die nach einer Analyse des Wasserhärtegrades Enthärter und Waschpulver dosieren oder einem Haarfön, der die Hitze reguliert, wenn er der Kopfhaut zu nahe kommt /2/. Noch hindern die mit der hohen Bauteilpräzision verbundenen Fertigungskosten solcher Mikrosysteme den Einsatz in Massenprodukten. Neben anderen Fertigungsverfahren wie dem Spritzprägen und dem Reaktionsharzgießen bietet sich die Kunststoffabformung durch Spritzgießen als serientaugliches Produktionsverfahren für Komponenten der Mikrosystemtechnik an.

Anforderungen beim Spritzgießen von Mikrostrukturen

Basierend auf den Anforderungen der Abformung von Strukturen mit kleinsten Dimensionen im Mikrometerbereich in Verbindung mit teilweise hohen Aspektverhältnissen sind die Anforderungen an den Spritzgießprozeß im wesentlichen durch folgende Punkte gekennzeichnet /3/,/1/:

	Anforderungen
Maschine	<ul style="list-style-type: none">• kleine Plastifiziereinheit zur Vermeidung längerer Verweilzeiten des Kunststoffs• lagegeregelte Schnecke, geregelter Spritzprozeß• langsame Verfahrgeschwindigkeiten
Werkzeug	<ul style="list-style-type: none">• evakuierbare Kavität• strukturierter Formeinsatz• versatz- und spielfreie Entformung• eng tolerierte Passungen
Prozeß	<ul style="list-style-type: none">• variotherme Temperierung
Material	<ul style="list-style-type: none">• niedrige Viskositätswerte für eine optimale Formfüllung

Tabelle 1: Anforderungen an den Spritzgießprozeß

Für das Mikrospritzgießen ist eine reproduzierbare und damit vollgeregelter Prozessführung notwendig. Dies gilt insbesondere für die Druckumschaltung, deren Regelung über den Werkzeuginnendruck erfolgt. Das Werkzeug ist mit entsprechenden Sensoren auszurüsten.

Erhöhte Anforderungen sind an den Entformungsvorgang zu stellen. Zum Schutz der Strukturen vor Deformation bzw. Zerstörung muß der Öffnungsvorgang spiel- und versatzfrei ablaufen, die Verfahrensgeschwindigkeit sollte so gering wie möglich sein.

In Abhängigkeit von den Genauigkeitsanforderungen und den Dimensionen der feinen Strukturen sowie den Abmessungen der strukturierten Bereiche werden für die Herstellung der Formeinsätze verschiedene Verfahren eingesetzt /1/. Neben konventionellen mechanischen Verfahren die für die Feinstbearbeitung modifiziert wurden, der sog. Ultrapräzisionstechnik /4/, steht neben weiteren Verfahren die LIGA-Technik im Vordergrund. Die LIGA-Technik besteht aus einer Verknüpfung der drei Verfahrensschritte Lithographie, Galvanoformung und Abformung. Die Form- und Maßgenauigkeit der Strukturen liegt unter $1 \mu\text{m}$, es können Aspektverhältnisse (Verhältnis von Höhe zu Breite) von bis zu 100 erreicht werden /5/.

Die Entlüftung der Kavität über die Trennebene oder über die Auswerfer ist nicht möglich, da die Mikrostrukturen im Prinzip Sacklöcher auf der Oberfläche des Formeinsatzes darstellen. Für eine vollständige Formfüllung bzw. zur Vermeidung des Dieseleffekts muß deshalb die Kavität vor dem Einspritzen evakuiert werden. Die in der Kavität eingeschlossene Luft wird dabei über eine Vakuumpumpe abgeführt.

Die konstante Werkzeugtemperierung beim herkömmlichen Spritzgießprozeß ermöglicht keine vollständige Ab-

formung der Mikrostrukturen. Der Kontakt der heißen Kunststoffschmelze mit der kalten Werkzeugwand führt zu der sofortigen Rand-schichterstarrung des Schmelzestroms, wodurch die feinen Strukturen nicht oder nur unvollständig abgeformt werden. Erforderlich ist

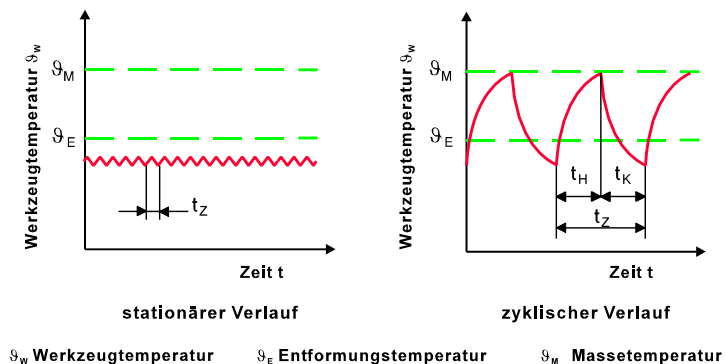


Bild 1: Variothermer Temperaturverlauf

eine variotherme Werkzeugtemperierung. Durch die Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur zum Einspritzzeitpunkt bis auf Höhe der Schmelztemperatur des Kunststoffs wird dessen Viskositätszunahme beim Kontakt mit der Werkzeugwand verhindert und die vollständige Füllung der Kavität ermöglicht. Um eine ausreichende Entformungssteifigkeit

zu erhalten, muß der Formeinsatz nach dem Einspritzen wieder unterhalb der Erstarrungstemperatur der Kunststoffs abgekühlt werden.

Variotherme Prozeßführung

Beim klassischen Variothermverfahren werden die zwei geforderten Werkzeugtemperaturniveaus mittels zweier verschieden temperierter Ölkreisläufe erreicht. Das Stammwerkzeug wird über einen primären Ölkreislauf auf der Entformungstemperatur des verwendeten Kunststoffs gehalten. Der Formeinsatz, der über konstruktive Maßnahmen soweit möglich thermisch isoliert ist, wird vor dem Einspritzvorgang über einen zweiten Ölkreislauf auf das geforderte Temperaturniveau der Schmelze aufgeheizt. Nach erfolgtem Einspritzen des Kunststoffs wird auch der Formeinsatz mit dem primären Ölkreislauf gekoppelt und wieder auf Entformungstemperatur abgekühlt. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Formeinsatzes und dem nur mäßigen Wärmeübergang durch Konvektion ergeben sich lange Zykluszeiten, die im Bereich mehrerer Minuten liegen können.

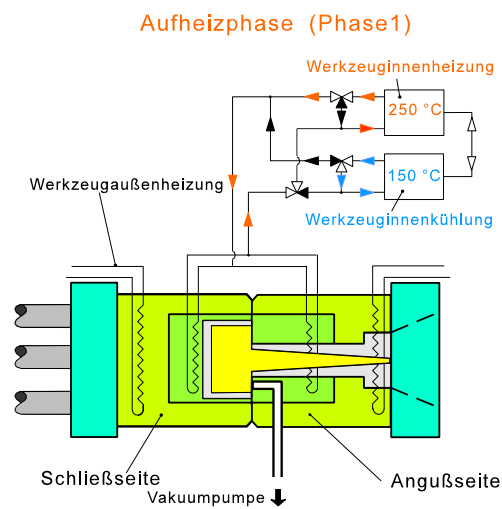


Bild 2: Variothermverfahren mit Ölkreislauf

Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Formeinsatzes und dem nur mäßigen Wärmeübergang durch Konvektion ergeben sich lange Zykluszeiten, die im Bereich mehrerer Minuten liegen können.

Am IKFF wird zur Zeit der Einsatz einer induktiven Werkzeugheizung untersucht. Die bei der Induktionserwärmung erzielbaren kurzen Aufheizzeiten können eine Zykluszeitverkürzung und dadurch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit mit sich bringen.

Induktionserwärmung

Die Möglichkeit der Induktionserwärmung ist aus verschiedenen Bereichen der Technik bekannt. Als klassische Beispiele seien das Randschichthärten, Erwärmungsanlagen für Schmiedestücke sowie Induktionsschmelzöfen erwähnt.

Bei der induktiven Erwärmung wird die Energie transformatorisch auf das Werkstück übertragen. Eine von einem hochfrequentem Strom durchflossene Spule erzeugt ein elektromagnetisches Wechselfeld. Innerhalb des elektrisch leitenden Erwärmungsguts

werden im Oberflächenbereich Wirbelströme erzeugt. Die Wirbelströme verursachen im Leiter aufgrund des spezifischen Widerstands eine Joulesche Erwärmung.

Die wesentlichen Bestandteile einer Anlage zur Induktionserwärmung sind die an die Geometrie des Bauteils angepaßte Induktionsspule (Induktor), die Zuleitungen für die Energiezuführung und der Induktionsgenerator für die Energieversorgung. Die Erwärmung des Formeinsatzes findet bei geöffnetem Werkzeug statt. Der Induktor muß sich hierzu in einem genau definierten Abstand vor dem Formeinsatz befinden. Die eigentliche Induktionsspule besteht aus einem Kupferhohlleiter. Zur Abführung der in der Induktionsspule erzeugten Verlustwärme muß die Spule mit einem Kühlmittel, in der Regel Wasser, durchflossen werden.

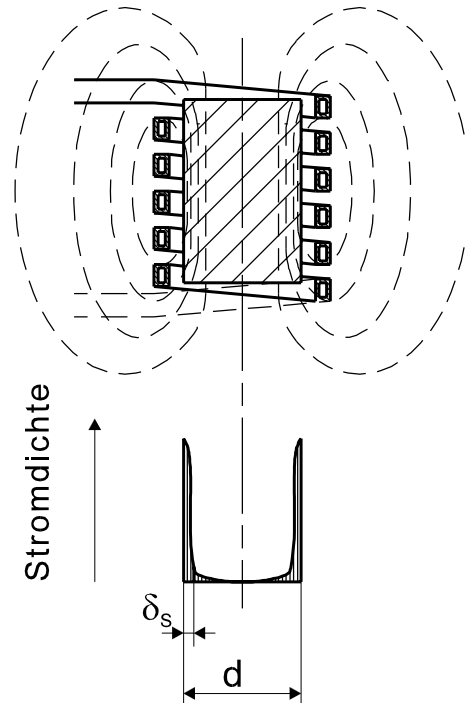


Bild 3: Spule mit Magnetfeld und Kern

Das Eindringverhalten des elektromagnetischen Feldes wird mit der Skintiefe δ_s beschrieben. Sie hängt ab von der elektrischen Leitfähigkeit κ , der Permeabilität μ und der Arbeitsfrequenz f und ergibt sich zu

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \kappa \mu}} \quad . \quad (1)$$

Da sich während des Aufheizvorgangs κ und μ ständig ändern, ist die Skintiefe nicht konstant, sie ändert sich mit zunehmender Temperatur. Bewußt beeinflussen läßt sich die Skintiefe durch die Variation der Arbeitsfrequenz des Wechselfeldes /6/.

Für den Einsatz des induktiven Erwärmungsprinzips für die variotherme Prozeßführung beim Spritzgießen spricht die sehr schnelle Erwärmung des Werkstücks und die direkte Generierung der Wärme im Metall, d.h. im Formeinsatz. Der zeitaufwendige Wärmetransport zur Kavität entfällt. Die Kühlzeit reduziert sich ebenfalls, da deutlich weniger Wärme ins Werkzeug eingebracht werden muß. Auf eine Öltemperierung für die Werkzeuggrundtemperierung kann jedoch nicht verzichtet werden.

Anwendung der induktiven Werkzeugtemperierung

Im Rahmen eines DFG-Projekts soll die induktive Werkzeugtemperierung zusammen mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) zum Abformen von Spritzgießteilen mit Mikrostrukturen angewandt werden. Dazu wurde gemäß den angesprochenen Anforderungen ein Spritzgießwerkzeug für mikrostrukturierte Formteile aufgebaut. Die Formeinsätze wurden im LIGA-Verfahren hergestellt und beinhalten Strukturen mit verschiedenen Strukturbreiten ($20\ \mu\text{m}$ bis $2,5\ \mu\text{m}$) und verschiedenen Aspektverhältnissen (5 bis 40) mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu untersuchen. Die Geometrie des Induktors wurde den äußeren Abmaßen des LIGA-Formeinsatzes angepaßt. Über ein Handlinggerät, welches im Normalfall zur Entnahme von Bauteilen vorgesehen ist, wird die Induktorspule vor der Kavität positioniert. Die Ansteuerung des Induktionsgenerators erfolgt über freiprogrammierbare Ausgänge der Spritzgießmaschine in Kombination mit einem Meß-PC, der Temperatur- und Druckverläufe während des gesamten Prozesses aufnimmt und dem Generator die benötigte Heizzeit bzw. die erforderliche Heizleistung vorgibt.

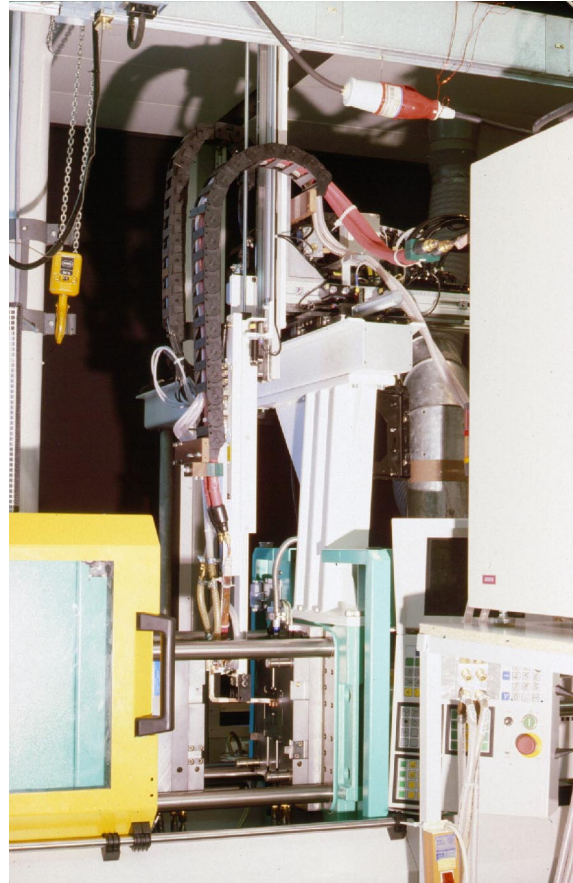


Bild 4: Gesamtanlage

In Bild 4 ist die aufgebaute Gesamtanlage dargestellt. Die Induktorspule ist in Heizstellung vor der Kavität positioniert. Über eine Kabelkette werden Energie- und Kühlwasserleitungen zum HF-Generator geführt, der am rechten Bildrand noch zu erkennen ist. Nach der Erwärmung fährt die Handlingachse in Ausgangsposition, die Form kann geschlossen und evakuiert werden und der Einspritzvorgang beginnt. Über den PC sind Maschinen- und Generatorsteuerung miteinander gekoppelt. Somit wird ein Serienbetrieb erreicht und damit reproduzierbare Prozeßbedingungen ermöglicht.

Erwärmungsergebnisse und Abformversuche

In vorausgegangenen Erwärmungsversuchen an einem Versuchsstand konnte die Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter Beweis gestellt werden. Bild 5 zeigt den zeitlichen Werkzeugtemperaturverlauf eines Aufheiz-Abkühl-Zyklus auf die geforderte Werkzeugtemperatur von 200°C. Die Heizzeit von 5 s beim induktiven Verfahren im Vergleich zu 180 s beim öl-variotherm Verfahren macht die Schnelligkeit der Induktions-

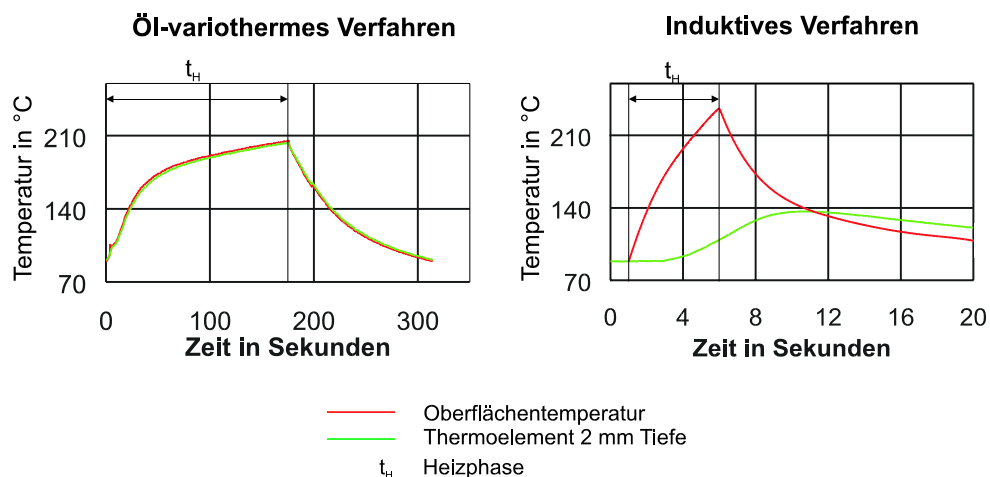


Bild 5: Temperaturverläufe in der Kavität

erwärmung deutlich. Da beim öltemperierten Verfahren bei geschlossenem Werkzeug erwärmt wird, kann unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Temperatur eingespritzt werden. Beim induktiven Verfahren muß dieses Temperaturniveau bewußt überschritten werden, um die Wärmeverluste während des Werkzeugschließvorgangs kompensieren zu können. Gemessen wurde die Temperatur an zwei Stellen im Werkzeug, direkt an der Formoberfläche und 2 mm unter der Oberfläche. Während sich die Kurven im linken Bild fast überdecken ist im rechten Bild die Auswirkung der Induktionserwärmung zu sehen, die Erwärmung findet primär in der Randschicht der Werkzeugs und damit an der Oberfläche statt, der Wärmetransport in die tieferen Schichten über die Wärmeleitung des Materials findet erst verzögert statt.

Ersten Abformversuche wurden erfolgreich mit der leichtfließenden teilkristallinen Formmasse POM durchgeführt. Bei einer Strukturhöhe von 50 μm konnten Strukturen mit Wandstärken bis zu 10 μm abgeformt werden, was einem Aspektverhältnis von 5 entspricht. Die Zykluszeit betrug bei einem Formteil mit einer Gesamtmasse von 4 g etwa 50 s. Ziel der weiteren Versuche ist eine Verbesserung der Abformgenauigkeit sowie eine weitere Reduzierung der Zykluszeit.

Zusammenfassung und Ausblick

Die induktive Werkzeugtemperierung eignet sich als schnelles Temperierverfahren für die Massenproduktion von mikrostrukturierten Kunststoffbauteilen. Neben der kurzen Erwärmungszeit sind variable Einsatzgebiete weitere Vorteile dieses Verfahrens. Die Erwärmung mehrere Kavitäten ist möglich wie auch die Temperierung großflächiger Strukturen (z.B. CD-Größe). Da die Kavität von außen beheizt wird sind keine aufwendigen Werkzeugmodifikationen notwendig.

Literatur

- /1/ Weber, L.; Ehrfeld, W.:
Mikroabformung - Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen,
Kunststoffe 88 (1998) 10.
- /2/ N.N.:
Die Winzlinge kommen, Konstruktionspraxis Nr. 8, 1997.
- /3/ Tewald, A.:
Mikrospritzgießen - eine Übersicht, Festschrift 30 Jahre IKFF, Universität Stuttgart,
1997
- /4/ Weck, M.; Fischer, S.:
Ultrapräzisionstechnik für die Werkzeugbearbeitung, IKV-Seminare zur Kunststoff-
verarbeitung, Aachen, 1997.
- /5/ Ehrfeld, W.:
Mikrotechnische Produktionsmethoden auf der Basis der LIGA-Technik, IKV-
Seminare zur Kunststoffverarbeitung, Aachen, 1997.
- /6/ Tewald, A.:
Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen
Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung, Dissertation am IKFF der
Universität Stuttgart, 1997.

Danksagung

Die Autoren danken der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG) für die Förderung der Forschungsvorhabens "Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung" und der Firma Arburg GmbH für die Bereitstellung der Spritzgießmaschine ALLROUNDER 270 S.

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