

Temperierkonzepte für das Mikrospritzgießen im Vergleich

A comparison of temperature regulating concepts for injection moulding of parts with microstructures

W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zum

**18. Stuttgarter
Kunststoff-Kolloquium**

19. - 20. März 2003

Symposium 3 Kunststoffaufbereitung und -verarbeitung

TEMPERIERKONZEPTE FÜR DAS MIKROSPRITZGIEßEN IM VERGLEICH

A COMPARISON OF TEMPERATURE REGULATING CONCEPTS FOR INJECTION MOULDING OF PARTS WITH MICROSTRUCTURES

W. Schinköthe

IKFF, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart
Tel: + 49 (0) 711 685 6411, Fax: + 49 (0) 711 685 6356, email: schinkoethe@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Das Spritzgießen mikrotechnischer Bauteile erfordert häufig spezielle Temperaturgänge in der Kavität, da die Schmelzen in den sehr kleinen Kavitäten sonst vor deren vollständiger Füllung erstarren. Gemeinsame Forschungsarbeiten am IMM und am IKFF haben in den vergangenen Jahren die Einsatzpotenziale verschiedener Verfahren untersucht. Beim klassischen Variothermverfahren sichern zwei verschiedenen temperierte Ölkreisläufe die geforderten Werkzeugtemperaturniveaus. Bei der induktiven Erwärmung wird die Energie transformatorisch auf das Werkstück übertragen. Dabei kann ein externer oder ein integrierter Induktor zum Einsatz kommen. Abschließende Ergebnisse dreier Dissertationen zu diesem Thema sollen vorgestellt werden und die beiden Verfahren vergleichend bewerten. Die Einsatzpotenziale zeigen Abformergebnisse von Teststrukturen.

Abstract: Injection moulding of technical parts with micron dimensions frequently requires special temperature profiles in the cavity, to avoid solidification of the melt in very small cavities before all structures are filled. Common research work at the IMM and at the IKFF together examined the possible fields of application of different methods in the past years. In the classic variotherm process two oil circuits at different temperatures provide the required mold temperatures. In inductive heating, the energy is transferred to the mold in the manner of a transformer. Therefore an internal or external inductor can be used. Final results of three dissertations regarding this topic will be presented and both methods will be compared. Possible fields of applications are shown with samples of moulded test structures.

Schlagwörter: Spritzgießen, Temperierkonzept, Variothermverfahren

Keywords: Injection moulding, temperature regulating concept, variotherm process

1 Einleitung

Mikrotechnische Komponenten finden zunehmend in vielen Bereichen der Technik Anwendung, beispielsweise als faseroptische Schalter oder Steckverbinder in der Informations- und Kommunikationstechnik, als Mikropumpen oder Mikrodosiereinheiten in der Medizintechnik, als Mikroreaktoren in der chemischen Verfahrenstechnik, als Sensoren in der Automobiltechnik und zukünftig sicher auch vermehrt in der Fertigungstechnik. Voraussetzung für den breiten Einsatz sind effektive Fertigungsverfahren, die kostengünstige Mikrokomponenten hervorbringen. An erster Stelle bietet sich hierbei das Abformen in Kunststoff an. Neben anderen Fertigungsverfahren wie dem Spritzprägen und dem Reaktionsharzgießen steht insbesondere das Spritzgießen für die effektive Fertigung großer Stückzahlen als technisch hoch entwickeltes, serientaugliches Fertigungsverfahren zur Verfügung [1-3].

2 Anforderungen beim Spritzgießen von Mikrostrukturen

Unter dem Begriff **Mikrospritzgießen** werden verschiedene Anforderungen und Technologien zusammengefasst. Zunächst wird das Mikrospritzgießen von **Mikroformteilen** hierunter verstanden. Die äußeren Abmessungen von typischen Mikroformteilen liegen im Millimeterbereich mit Strukturelementen im Mikrometerbereich. Das Gewicht einzelner Spritzlinge liegt im Milligrammbereich. Kennzeichnend ist, dass diese sehr kleinen Formteile direkt angespritzt und entformt werden. Typische Bauteile sind Mikrozahnräder oder kleinste Gehäuse für Sensoren. Da die Formteilmolumina hier extrem klein sind, muss die Maschinenteknik gegenüber dem konventionellen Spritzgießen deutlich modifiziert werden (Kolbeneinspritzsysteme mit Plastifizierung durch reine Wärmeleitung und Schussgewichten kleiner 0,01 g).

Mikrostrukturbauteile besitzen dagegen Abmessungen im Zentimeterbereich. Sie sind meist planar bzw. plattenförmig gestaltet und ein- oder beidseitig lokal mit Strukturen im Mikrometerbereich versehen oder bilden Träger einer Vielzahl von Mikrokomponenten zur Batchfertigung. Typisch sind dabei hohe Aspektverhältnisse dieser Strukturen (größer 10 bei Wandstärken ab 5 μm). Typische Bauteile sind hier Stecker- oder Mikropumpenbauteile, Nanotiterplatten, aber auch wieder Zahnräder auf gemeinsamen Trägern. Das Schussgewicht liegt dann im Grammbereich. Somit lassen sich klassische Maschinen einschließlich Handling mit geringen Modifikationen weiter nutzen. Die Mikrostrukturen stehen meist senkrecht zur Grundplatte, stellen im Formeinsatz somit sacklochartige Strukturen dar.

Neben diesen Bauteilen existieren noch diverse **Präzisionsformteile**, die bei größeren Hauptabmessungen ähnlich kleine Strukturen und enge Toleranzen aufweisen, aber vergleichbar niedrige Aspektverhältnisse in ihren Strukturen zeigen, z. B. DVD's mit Pitgeometrien von ca. 0,5 μm x 0,8 μm x 0,12 μm (Länge x Breite x Tiefe).

Abformen von Mikrostrukturbauteilen. In diesem Beitrag soll das Abformen von Mikrostrukturbauteilen mit hohen Aspektverhältnissen im Mittelpunkt stehen. Dabei ergeben sich zum Teil verschärfte oder auch neue Anforderungen an den klassischen Spritzgießprozess, die Maschinenteknik oder auch den Werkzeugaufbau [1- 9]. Die Maschinen müssen für die Verarbeitung kleinster Schmelzemengen ausgelegt sein (kleine Schneckendurchmesser von 14 oder 12 mm bzw. kombinierte Schnecken-Kolben-Plastifiziereinheiten). Eine reproduzierbare, eng tolerierbare und damit voll geregelte Prozessführung ist eine weitere Voraussetzung. Das Werkzeug ist mit entsprechenden Sensoren auszurüsten, allerdings ist eine Anordnung direkt an den Mikrokapazitäten wegen der Dimensionen herkömmlicher Sensoren meist nicht möglich. Für die Herstellung der Formeinsätze [3] kommt neben konventionellen mechanischen Verfahren der sog. Ultrapräzisionstechnik die LIGA-Technik zum Einsatz. Die Form- und Maßgenauigkeit der Strukturen liegt hier unter 1 μm . Die hervorragende Oberflächengüte erleichtert die Entformung, Entformungsschrägen sind dann nicht erforderlich. Es können Aspektverhältnisse bis 100 erreicht werden.

Die Öffnungs- und nachfolgenden Entformungsvorgänge müssen zum Schutz der Strukturen vor Abscheren, Deformation bzw. Zerstörung spiel- und versatzfrei ablaufen. Die Entlüftung der Kavität über die Trennebene oder über die Auswerfer ist nicht mehr 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.

Für einen reproduzierbaren Prozess müssen die Werkzeuge bzw. Kavitäten schließlich auch temperiert werden, wobei die Temperiereinrichtungen die mit der Schmelze eingebrachten Wärmemengen abführen und konstante Prozessbedingungen beim Erstarren der Schmelze gewährleisten sollen. Konstante Wasser- oder Öl-Temperierung bzw. Kühlung wie beim Standard-Spritzgießprozess reicht jedoch für eine vollständige Abformung der Mikrostrukturen oft nicht mehr aus. Erforderlich wird eine variotherme Werkzeugtemperierung. Dies soll nachfolgend vertieft werden.

3 Dynamische Werkzeugtemperierung – variotherme Prozessführung

Beim Standardspritzguss trifft die heiße Schmelze beim Einspritzen auf das relativ kalte Werkzeug. Die Seele der Schmelzefront bleibt fließfähig und der Kunststoff wird durch den Spritzdruck in der Kavität vorangetrieben. Von der Werkzeugwand her findet eine Randschichterstarrung statt, Abb. 1.

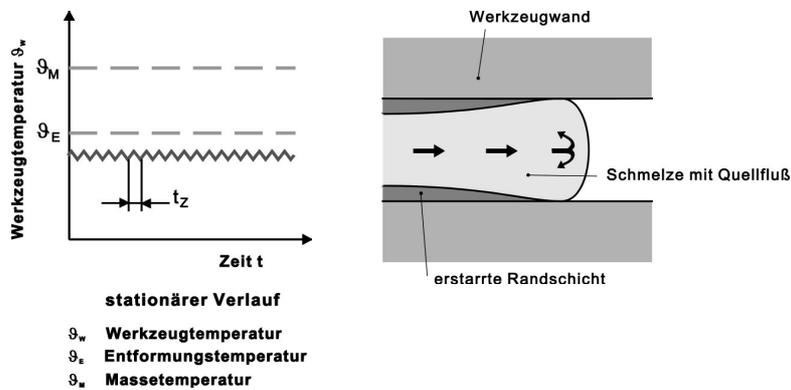


Abb. 1: Randschichterstarrung beim Spritzgießen mit isothermer Temperierung [4]

Bei zu langen Fließwegen und gleichzeitig extrem dünnen Wandstärken kann dies das vollständige Füllen der Kavitäten verhindern. Zur Abhilfe ist eine so genannte variotherme Werkzeugtemperierung erforderlich. Über eine geeignete Zusatzheizung wird der Kavitätsbereich zum Einspritzzeitpunkt bis auf Höhe der Schmelztemperatur des Kunststoffs erwärmt und nach erfolgter Formfüllung auf Temperaturen deutlich unterhalb der Erstarrungstemperatur des Kunststoffs wieder abgekühlt, Abb. 2. Aus Gründen der Produktivität sollten diese Temperaturwechsel möglichst schnell erfolgen.

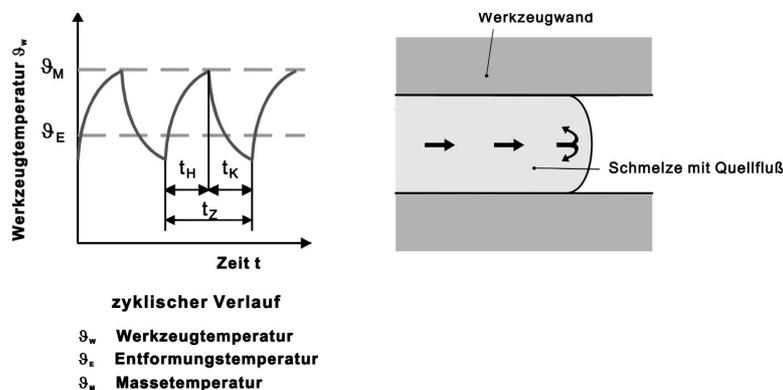


Abb. 2: Spritzgießen mit variothermer Prozessführung [4]

Zur Realisierung dieser Temperierung sind verschiedene Methoden bekannt. Zunächst bietet sich eine **öl-variotherme Prozessführung** mittels zweier unterschiedlich temperierter Ölkreisläufe im Werkzeug an [2, 3, 6, 9]. Der Werkzeugrahmen wird durch einen primären Ölkreislauf mit einem „kalten“ Temperiermedium durchströmt und so auf Entformungstemperatur gehalten. Im thermisch weitgehend isolierten Kavitätsbereich wird je nach Prozessphase zwischen einem heißen und einem kalten Temperiermedium umgeschaltet, was die Erwärmung bzw. die sich an das Einspritzen anschließende Abkühlung der Kavität bewirkt. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Formeinsatzes und des nur mäßigen Wärmeüberganges ergeben sich lange Zykluszeiten im Bereich mehrerer Minuten.

Nahe liegend ist als zweite Methode die Zuhilfenahme von **elektrischen Widerstands-Heizelementen** [2]. Das Werkzeug wird wiederum zunächst mit einem flüssigen Temperiermedium auf konstanter Temperatur gehalten. Vor dem Einspritzen erwärmen gezielt platzierte Heizelemente die komplette Kavität oder nur bestimmte Bereiche der Kavität auf die gewünschte Temperatur.

Beide Methoden haben sich bereits etabliert und werden unter Produktionsbedingungen eingesetzt. Verbesserungsbedarf gibt es jedoch bei den erreichbaren Zykluszeiten, die diejenigen des Standard-spritzgießens bis zum Zehnfachen übersteigen und durch die lange Verweildauer des Kunststoffes in der Schnecke zu thermischen Schädigungen der Formmasse führen können. Andererseits stoßen die Verfahren auch an Grenzen hinsichtlich des Temperaturoffsets für Hochtemperaturkunststoffe.

Am IKFF wird deshalb der Einsatz einer dritten Erwärmungsmethode untersucht, die auf dem **induktiven Erwärmungsprinzip** beruht [4 - 9]. Tabelle 1 zeigt vorab einen zusammenfassenden Vergleich der verschiedenen Temperiermethoden, bevor auf die induktive Temperierung vertieft eingegangen wird.

Tabelle 1: Vergleich der variothermen Temperiersysteme beim Mikrospritzgießen [6, 8]

	Fluidisches System (Öl oder Wasser)	Elektrische Widerstandsheizung	Induktionsheizung
Temperier- prinzip	Konvektion zwischen Fluid und Werkzeug, Wärmeleitung in den Werkzeugplatten.	Wärmeerzeugung in elektrischen Heizkörpern, Wärmeleitung vom Heizkörper zum Formeinsatz.	Direkte Wärmegenerierung durch elektromagnetische Wechselfelder im Formeinsatz.
Geräte	1 Temperiergerät heiß 1 Temperiergerät kalt 1 Temperiergerät für Rahmentemperierung, elektronisch geregelter Ventilblock, Steuerung für Spritzgießvorgang.	1 Temperiergerät für Grundtemperierung, Heizkörper (Heizpatrone, flexibler Leiter, Folie), elektronisches Regelgerät, Steuerung für Spritzgießvorgang.	1 Temperiergerät für Grundtemperierung, Generator, Induktor, Zuleitungen, mechanisches Handling oder Koppelgetriebe, Steuerung mit Maschine möglich.
Anforderungen an den Werk- zeugbau	Aufwendiger Formenbau durch Temperierbohrungen in den Formplatten.	Integration der Heizkörper in die Formplatten, Zusatzkühlung nötig.	i. Allg. keine Integration ins Werkzeug, externer Induktor, Zusatzkühlung.
Flexibilität	Keine Anpassung an verschiedene Geometrien möglich, Austausch der Werkzeugplatten.	Wechsel des gesamten Heizsystems, teilweise Modifikation am Werkzeug notwendig.	Anpassung der Induktorgeometrie, einfacher und schneller Austausch bei externem Induktor.
Zykluszeiten	ca. 180 - 300 s [6]	ca. 60 s [2]	ca. 20-25 s [6, 8]

4 Induktive Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen

Eine an die zu erwärmende Fläche angepasste, meist wassergekühlte Spule wird von einem hochfrequenten Wechselstrom durchflossen und erzeugt ein elektromagnetisches Wechselfeld. Im Werkstück, welches elektrisch leitfähig sein muss, werden im Oberflächenbereich Wirbelströme generiert, die aufgrund des spezifischen elektrischen Widerstandes des Erwärmungsgutes eine Joulesche Erwärmung bewirken. Für den Einsatz der induktiven Erwärmung als Zusatzheizung zur variothermen Prozessführung beim Mikrospritzgießen sprechen die sehr schnelle Erwärmung des Werkstücks und die direkte Generierung der Wärme in der Formeinsatzoberfläche. Der bei anderen Erwärmungsmethoden erforderliche Wärmeübergang und der zeitaufwendige Wärmetransport zur Kavität entfallen.

Die wesentlichen Bestandteile einer Anlage zur Induktionserwärmung sind die an die Geometrie des Bauteils angepasste Induktionsspule (Induktor), die Zuleitungen für die Energiezuführung und der Hochfrequenzgenerator. Die eigentliche Induktionsspule besteht aus einem Kupferhohlleiter. Zur Abführung der in der Induktionsspule erzeugten Verlustwärme durchfließt die Spule ein Kühlmittel (Wasser).

Für die induktive Temperierung von Spritzgießwerkzeugen wurden zwei Varianten untersucht: Die Kavität wird bei geöffnetem Zustand von einem **externen Induktor** erwärmt [4-9] oder das Werkzeug enthält einen **internen, integrierten Induktor** [4, 5, 8].

4.1 Induktive Werkzeugtemperierung mit externem Induktor

Eine der Kavitätsoberfläche angepasste Induktorspule wird mit Hilfe einer Handhabungseinrichtung oder durch ein zwangsläufiges Koppelgetriebe bei geöffnetem Werkzeug vor die Kavität positioniert. Der Formeinsatz wird bei geöffnetem Werkzeug induktiv erwärmt. Der Induktor muss sich hierzu in einem genau definierten Abstand vor dem Formeinsatz befinden. Die Erwärmung findet primär in der Randschicht des Werkzeugs und damit an der Oberfläche statt. Die eingebrachte Wärmemenge ist vergleichsweise gering, der Aufheizvorgang geht extrem schnell. Der Wärmetransport in tiefere Schichten über Wärmeleitung erfolgt verzögert. Die externe Temperierung eignet sich für Anwendungen, bei denen vorzugsweise nur planare Teile der Kavität in oder möglichst nahe der Trennebene erwärmt werden sollen. Die Gestalt einer Induktorspule ist ebenfalls eher planar als dreidimensional. In Abb. 3 (vgl. auch Abb. 6) ist ein typischer Temperaturverlauf dargestellt.

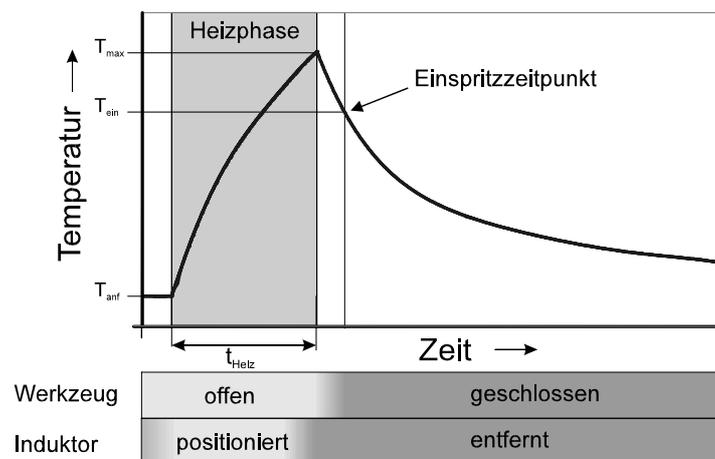


Abb. 3: Typischer Temperaturverlauf an der Kavitätsoberfläche bei externem Induktor [8]

Während die Temperatur an der Oberfläche sehr schnell ansteigt, wird der Bereich unter der Kavitätsoberfläche entsprechend der Wärmeleitfähigkeit des Materials stark zeitverzögert erwärmt. Sofort nach Ende der Heizphase fällt die Temperatur an der Oberfläche wieder. Ein Teil der Wärme fließt an die Umgebung ab, der Rest wird in tiefere Schichten und dann letztlich durch die Flüssigkeitstemperierung nach außen abgeleitet.

Die Erwärmung erfolgt bei geöffnetem Werkzeug, vergleiche [6, 8]. Bevor das Werkzeug geschlossen werden kann und das Einspritzen beginnt, muss der Induktor zunächst aus dem Werkzeugbereich ausfahren. Durch diese Verzögerung fließt ein Teil der eingebrachten Wärmemenge bereits wieder ab, ehe der Einspritzvorgang beginnt. Es muss folglich zunächst auf ein experimentell zu ermittelndes, deutlich höheres Anfangstempernivea T_{\max} erwärmt werden. Diese Temperatur ist u. a. abhängig von der Kühlkreislauftemperatur, dem Schmelzevolumen, dem Wärmeübergang ins Werkzeuginnere und der Zeitverzögerung zwischen Heizende und Einspritzen. Das Einstellen der nötigen Übertemperatur T_{\max} erfolgt über die Heizzeit. Ein Einregeln auf einen vorgegebenen Wert ist über mehrere Zyklen hinweg durch Messen und anschließendes Anpassen der Heizdauer realisierbar.

Bei größeren Bauteildimensionen und evtl. auch schon bei Mehrfachkavitäten können Probleme auftreten. Einerseits sind dann u. U. keine planaren Strukturen mehr vorhanden. Andererseits steigen die erforderlichen Wärmemengen erheblich. Eine Aufheizung über den erforderlichen Pegel hinaus reicht hier nicht mehr aus, um den bis zum Beginn des Einspritzens auftretenden Wärmeverlust zu kompensieren.

4.2 Induktive Werkzeugtemperierung mit integriertem Induktor

Im Gegensatz zum externen Induktor fordert die Integration des Induktors in das Werkzeug ein Umdenken bezüglich der Werkzeugkonstruktion. Die Induktorspule beeinflusst mit dem sie umgebenden Wechselfeld hier nicht nur die zur Erwärmung bestimmte Kavität, sondern wirkt sich auf alle in unmittelbarer Nähe des Induktors befindlichen elektrisch leitfähigen Teile des Werkzeugs aus und erwärmt diese. Die gezielte Erwärmung von Teilbereichen der Kavität bedarf daher entsprechender Maßnahmen in Form von Abschirmmaterialien oder genügend breiten Luftspalten. Da die Wärme die Kavität wie bei konventionellen Erwärmungsmethoden dann indirekt erreicht, ist eine Erwärmung auch bei geschlossenem Werkzeug möglich. Abb.4 zeigt ein Beispiel für die Integration eines Induktors in ein Werkzeug, hier jedoch nicht für Mikrostrukturbauteile.

Hier ist auch ein geschlossener Regelkreis über eine Temperaturmessung mittels kavitätsnaher Temperatursensoren realisierbar. Dies stellt einen erheblichen Vorteil dar und lässt das Einbringen auch deutlich größerer Wärmemengen bei sehr hohen Einspritztemperaturen zu. Bei Versuchen wurden geregelte Kavitätstemperaturen von 200°C bis 400°C angestrebt, erreicht und je nach Bedarf über den gesamten Einspritzvorgang hinweg auch sehr konstant gehalten. Damit öffnen sich neue Anwendungsfelder von Seiten der Werkstoffe als auch des Prozessumfeldes, beispielsweise der Verzicht auf Öl zur Temperierung.

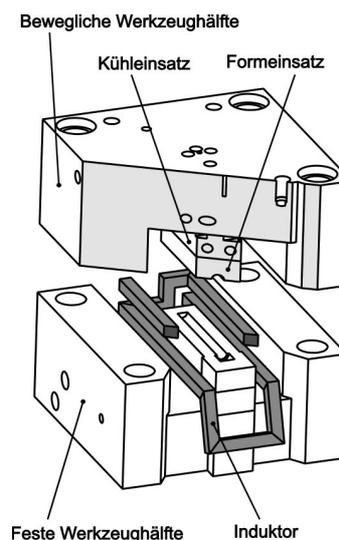


Abb. 4: Werkzeug mit integriertem Induktor [8]

4.3 Ergebnisse beim Abformen von Mikrostrukturen

Zur Untersuchung des Potenzials der induktiven Werkzeugtemperierung wurden zusammen mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH (IMM) Induktionsanlagen mit externem Induktor in den Spritzgießprozess integriert und Abformversuche vorgenommen [6-9]. Die Formeinsätze wurden am IMM im LIGA-Verfahren hergestellt und beinhalten konzentrische Stege mit Wandstärken von 20, 15, 10, 5 und 2,5 μm und Keile verschiedener Spitzenradien mit Aspektverhältnissen von 5 bis 40, Abb. 5. Die Gestaltung des Bauteils erfolgte mit dem Ziel, die Leistungsgrenzen des Verfahrens zu ermitteln. Die Geometrie des Induktors wurde den äußeren Abmaßen des LIGA-Formeinsatzes angepasst. Über ein zwangsläufiges Kniehebelgetriebe wurde die Induktorspule vor der Kavität positioniert.

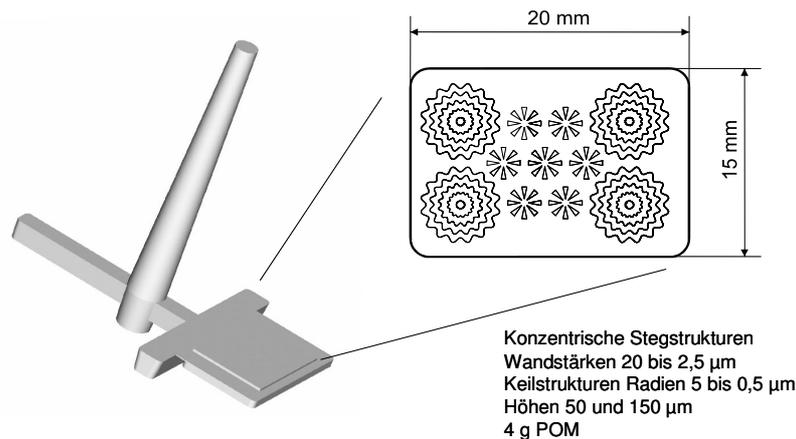


Abb. 5: Formteil mit konzentrischen Steg- und Keil-Mikrostrukturen ([7], vgl. auch Abb. 7)

In vorausgegangenen Erwärmungsversuchen an einem Versuchsstand konnte die Leistungsfähigkeit des Verfahrens im Vergleich zum öl-variothermen Verfahren unter Beweis gestellt werden, Abb. 6. Aufgeheizt wurde auf eine geforderte Werkzeugtemperatur von 200 $^{\circ}\text{C}$. Die Heizzeit von 5 s beim induktiven Verfahren im Vergleich zu 180 s beim öl-variothermen Verfahren macht die Schnelligkeit der Induktionserwärmung deutlich (Gesamtzykluszeiten waren hier 25 s gegenüber 240 s). 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 des Werkzeugs an der Oberfläche statt, der Wärmetransport in die tieferen Schichten erfolgt verzögert.

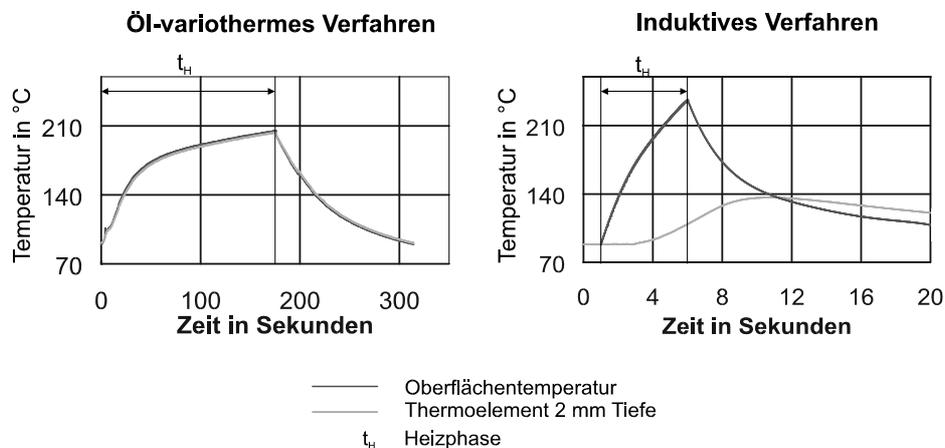
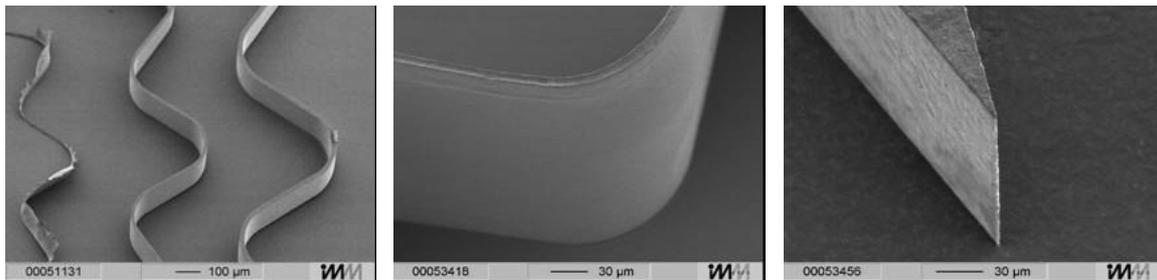


Abb. 6: Öl-variotherme und induktive Temperierung im Vergleich [8]

Das Versuchsbauteil mit den einseitig angeordneten Mikrostrukturen und einer Gesamtmasse von 4 g POM konnte mit einer Zykluszeit von 50 s gefertigt werden, wobei die Kavitätstemperatur zum Einspritzzeitpunkt ca. 190 °C betrug. Die Mikrostrukturen waren bei einer Wandstärke von 5 µm noch bis zu Strukturhöhen von 150 µm abformbar und entformbar, was einem Aspektverhältnis von 30 entspricht. Stege mit einer Wandstärke von 2,5 µm waren zwar abformbar, aber nicht mehr zu entformen. An den Keilstrukturen waren Keilradien bis 0,5 µm bei Strukturhöhen von 150 µm abform- und entformbar, was sogar Aspektverhältnissen von 150 entspricht, Abb. 7. In [6, 8, 9] sind weitere Abformungsbeispiele dargestellt, auf die hier aus Platzgründen nicht eingegangen werden kann.



Abriss 2,5 µm Steg, 150 µm hoch
Vollständige Füllung bei 5 µm Steg

Ausschnitt Stegstruktur 10 µm,
150 µm hoch

Ausschnitt Keilstruktur
Radius 0,5 µm, 150 µm hoch

Abb. 7: Details abgeformter Teststrukturen (DFG-Projekt mit IMM Mainz [6, 7])

5 Zusammenfassung

Die induktive Werkzeugtemperierung eignet sich als schnelles Temperierverfahren für die Massenproduktion von mikrostrukturierten Bauteilen. Kurze Erwärmungszeiten und hohe Temperaturniveaus erlauben eine dynamische Werkzeugtemperierung für verschiedenartigste Anwendungsfälle. Die Erwärmung planarer Strukturen (Mikrotechnik) ist ebenso möglich wie die Temperierung echter dreidimensionaler Strukturen durch eine Integration des Induktors in das Werkzeug. Die Arbeiten hierzu wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung" durch die DFG unterstützt.

Literatur

- [1] Hecke, M.; Bacher, W.; Blum, H.; Müller, L.; Ünal, N.: Heißprägen von Mikrostrukturen als Fertigungsprozess. F&M 105(1997)9, S. 598-602.
- [2] Michaeli, W.; Rogalla, A.; Ziegmann, C.: Mikrostrukturen in Serie fertigen. Kunststoffe 89(1999)9, S. 80-82.
- [3] Weber, L.; Ehrfeld, W.: Mikroabformung – Verfahren, Werkzeuge, Anwendungen. Kunststoffe 88(1998)10, S. 1791-1802.
- [4] Tewald, A.: Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 13, 1997.
- [5] Schinköthe, W.; Walther, T.: Zykluszeiten verringern - Eine alternative Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Kunststoffe 90(2000)5, S. 62-68.
- [6] Schaumburg, C.: Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 17, 2001.
- [7] Ehrfeld, W.; Schinköthe, W.; Weber, L.: Einfließen von Polymerschmelzen in kleine Kavitäten beim Spritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. DFG-Bericht, 1999.
- [8] Walther, T.: Geräte- und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 20, 2003.
- [9] Kemmann, O.: Untersuchungen zum Füllverhalten von mikrostrukturierten Formteilen beim Mikrospritzgießen von Polymerschmelzen. Diss. Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht 19, 2002.

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