

Mikroabformung in Kunststoff – von der Machbarkeitsstudie zur Vorserienfertigung

V. Piotter, T. Hanemann, K. Müller, R. Ruprecht, IMF;
H. Dittrich, M. Hecke, M. Worgull, IMT

Einleitung

In immer stärkerem Maße werden in der Mikrosystemtechnik Komponenten aus polymeren Werkstoffen eingesetzt. Die Vielfalt der Materialeigenschaften, der günstige Preis und die Anzahl vergleichsweise einfacher Fertigungsverfahren sind dafür ausschlaggebend. Typische Anwendungsgebiete stellen u.a. die Telekommunikation, Bio- und Medizintechnik, chemische Analytik, Mikroelektronik und die Kfz-Technik dar [1].

Im FZK werden drei verschiedene Verfahren zur Replikation von Primärstrukturen mit Kunststoffen eingesetzt: das Reaktionsgießen, bei dem der Kunststoff in der Form polymerisiert, sowie das Vakuumheißprägen und das Spritzgießen, die thermoplastische Kunststoffe verarbeiten.

Diese drei Verfahren werden im Folgenden vorgestellt und ihre Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede herausgearbeitet. Dabei wird sowohl auf technische wie auch wirtschaftliche Aspekte eingegangen und anhand von Beispielen gezeigt, was heute mit Kunststoffabformung im Mikrobereich möglich ist und welches

Potenzial in diesen Technologien steckt.

Lichtinduziertes (UV) Reaktionsgießen

Das lichtinduzierte Reaktionsgießverfahren (auch UV-RIM oder Photomolding genannt) ist eine Weiterentwicklung des Reaktionsgießverfahrens, wie es Ende der 80er Jahre am Forschungszentrum zur Herstellung der ersten LIGA-Mikrostrukturen verwendet wurde [2]. Das gemeinsame Grundprinzip des Reaktionsgießens ist die Prozesssequenz Werkzeugschließen mit anschließender Evakuierung, Formfüllung durch ein niedrig viskoses Reaktionsharz (Mischung aus Polymer und Monomer), Aushärten im mikrostrukturierten Formeinsatz zum festen Kunststoff und Werkzeugöffnen mit anschließender Formteilentnahme. Typische Verfahrensparameter der thermisch induzierten Polymerisation waren: Reaktionstemperatur bis zu 150 °C, Entformtemperatur bis zu 60 °C, Zykluszeiten bis 120 Minuten. Im Unterschied dazu verlaufen photochemisch induzierte Polymerisationen sehr schnell, so dass sich bei geeigneter Licht-

quelle die Zykluszeit auf typischerweise 5 Minuten senken lässt. In einem Versuchsstand wurden die prozesstypischen Elemente des Mikroreaktionsgießens (Formeinsatzhalteplatte mit 2 Kavitäten, Auswerfersystem, Vakuum- und Temperieranschlüsse, Materialreservoir mit Kolbeneinspritzung) mit den Anforderungen der Photopolymerisation (Werkzeughälfte aus Borosilikatglas, Hochleistungs-UV/Vis-Strahler) kombiniert [3]. Das Verfahren hat derzeit drei Anwendungsfelder: Neben der schnellen Feststellung der Abformbarkeit neuer Formeinsätze ist ein „Rapid Manufacturing“ von mikrostrukturierten Prototypen möglich. Durch den kompakten und modularen Aufbau des Versuchsstandes ist ein kompletter Formeinsatzwechsel innerhalb von 10 Minuten und eine Kompletteinbetriebnahme (Formeinsatzwechsel, Werkzeugzusammenbau, Materialbefüllung) innerhalb von 30 Minuten möglich. Erste Teile sind dann innerhalb von weiteren 15 Minuten erhältlich. Der dritte Anwendungsbereich ist das Austesten neuer Materialsysteme z.B. für Anwendungen in der Mikrooptik.

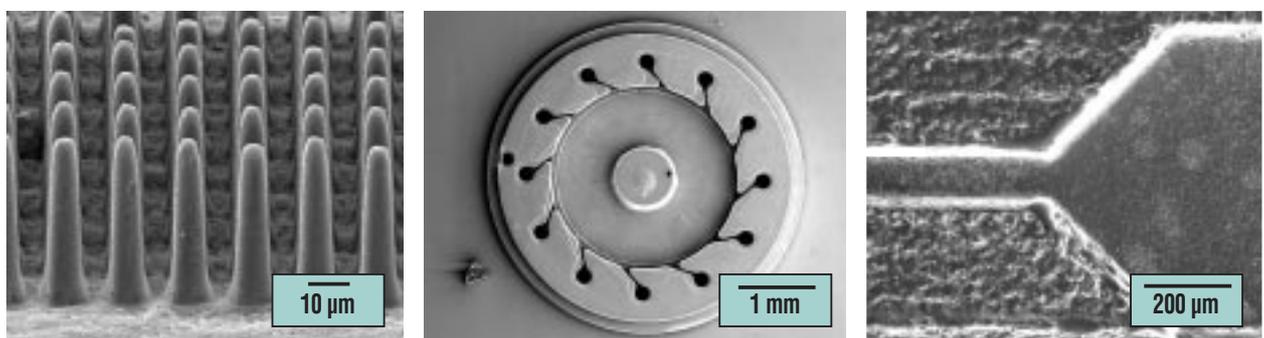


Abb. 1: REM-Aufnahmen eines PMMA-Bauteiles (Säulenarray: Höhe 61 µm, Breite 8 µm), abgeformt mit Formeinsatz aus Polyimid. Düsenplatte aus Polyester (gefräster Formeinsatz) sowie eine Teststruktur aus Polyester-Keramik-Komposit (laserstrukturierter Hartmetallformeinsatz).

Abb. 1 zeigt Mikrostrukturen, welche durch Lasermikrobearbeitung oder Mikrozerspanung hergestellt und durch UV-RIM abgeformt wurden. Die Verwendung von polymerisierbaren Gießharz-Keramik-Formmassen (hier Polyester, gefüllt mit 35 Volumen% Al_2O_3) ermöglicht die Herstellung von Bauteilen mit verbesserten thermomechanischen Eigenschaften. In diesem Fall wurde die Vickers-Kleinlasthärte im Vergleich zum reinen Polyester mehr als verdoppelt.

Heißprägen

Beim Heißprägen wird ein mikrostrukturierter Formeinsatz in einer evakuierten Werkzeugkammer mit hoher Kraft in eine thermoplastische Kunststoffolie hineingedrückt, die über ihre Erweichungstemperatur erhitzt ist [4]. Da sich Prägestempel und Gegenwerkzeug nicht komplett schließen lassen, verbleibt beim Heißprägeprozess im Normalfall immer eine charakteristische Trägerschicht, auf der die Mikrostrukturen angeordnet sind. Durch die Einstellung sehr geringer Umformgeschwindigkeiten können durch den Prägeprozess auch Mikrostrukturen mit sehr hohen Aspektverhältnissen hergestellt werden.

Die Vakuumheißprägetechnik, vor über zehn Jahren für die Replikation von LIGA-Strukturen entwickelt, hat sich inzwischen überall dort bewährt, wo es um Mikro- oder gar Nanostrukturen höchster Güte geht wie z.B. Mikrooptiken [5]. Besonders bei der Strukturierung von ebenen Platten wie Kapillar-Electrophorese (CE)-Chips oder Mikrotiterplatten eignet sich

das Heißprägen. Dass die Heißprägetechnik auch eine wirtschaftliche Fertigung erlaubt, zeigt die in Zusammenarbeit mit der Fa. Greiner Bio-One realisierte Mikrotiterplatte mit 96 kompletten Kapillarelektrophoresechips auf einer Fläche von $86 \times 126 \text{ mm}^2$ [6].

Verschiedene Sonderformen des Heißprägens erlauben die Realisierung komplexer Mikrostrukturen in Kunststoff:

Eine Möglichkeit ist das positionierte Abformen auf vorstrukturierten Substraten, für die eine zusätzliche Mess- und Justiereinheit verwendet wird, um die beiden Werkzeughälften auszurichten. Damit können auch beidseitig mikrostrukturierte Bauteile abgeformt werden, wie z.B. Fluidstrukturen mit zusätzlichen Nutzstrukturen auf der Rückseite. Im Extremfall ragt sogar eine Mikrostruktur in die Ebene der gegenüberliegenden Platte (Abb. 2).

Ein weiteres Sonderverfahren ist das Heißprägen von Verbundschichten. Ersetzt man das einfache Halbzeug durch einen Verbund von mehreren Folien lassen sich interessante Effekte erzielen.

Das klassische Beispiel ist das Mikrospektrometer für den UV-VIS-Bereich. Durch die Kombination von PMMA-Folien mit unterschiedlichen Brechungsindizes erhält man einen Wellenleiter, in dem das Licht geführt wird.

Wählt man als Kombination Polymere, die beim Prägevorgang nicht miteinander verschweißen, aber trotzdem so stark aneinander haften, dass sie sich gemeinsam entformen lassen und erst dann getrennt werden, lassen sich Durchgangslöcher oder 3D-Mikrostrukturen erzeugen [7].

Und schließlich kann als zweites Material im Verbund auch eine metallische Leiterbahn auf der Oberfläche des Kunststoffhalb-

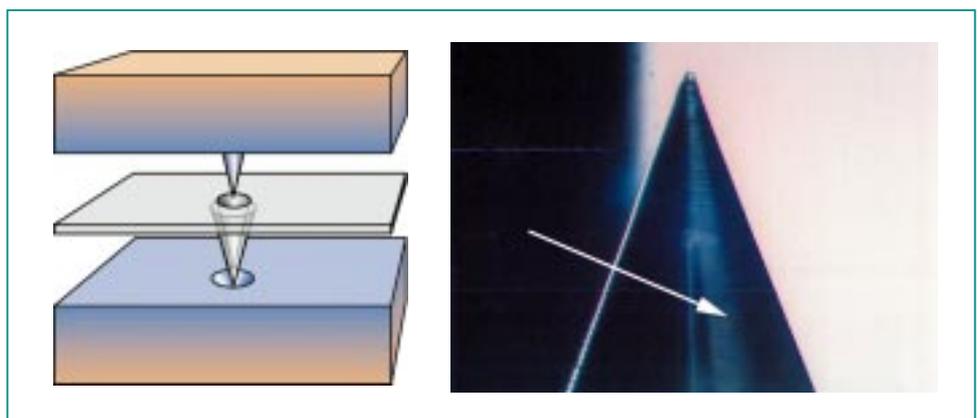


Abb. 2: Beidseitiges Prägen mit sich durchdringenden Konturen erfordert höchste Präzision bei der Justierung. Links das Verfahrensprinzip: Eine nadelartige Mikrostruktur am oberen Prägestempel und die kegelförmige Vertiefung auf der Unterseite werden auf weniger als $10 \mu\text{m}$ zueinander ausgerichtet. Rechts ein Hohlkegel mit über 1mm Höhe. Die verbleibende Restschichtdicke bestimmt die Wandstärke zwischen der äußeren Kegeloberfläche und dem inneren Hohlkegel (Pfeil) mit einem Durchmesser von ca. $10 \mu\text{m}$ an der Spitze.

zeugs aufgebracht sein. Beim Heißprägevorgang folgt diese Leiterbahn dann der Topologie und stellt so eine elektrisch leitende Verbindung von der Oberfläche in den Strukturgrund her (Abb. 3); eine hervorragende Möglichkeit um z.B. fluidische Strukturen mit elektrischen Eigenschaften auszustatten.

Spritzgießen

Beim Spritzgießen von Kunststoffteilen handelt es sich um ein seit mehreren Jahrzehnten in der makroskopischen Abformtechnik anerkanntes Verfahren, mit dem Produkte in großen Stückzahlen kostengünstig hergestellt werden können. Dazu wird Kunststoffmaterial aufgeschmolzen und in eine Form (Werkzeug) eingespritzt.

Es ist vor allem die sehr gute Eignung zur Fertigung mittlerer und großer Stückzahlen, welche die Spritzgießtechnik für die Mikrosystemtechnik interessant macht. Für die Herstellung von Mikro-

komponenten bedurfte es allerdings der Implementierung von Zusatzeinrichtungen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Werkzeugevakuierung und die sog. Variotherm-Temperaturführung zu nennen. Erstere ist notwendig, weil die Kavitäten in einem typischen Mikroabformwerkzeug „Sacklöcher“ darstellen. Würde erwärmte Kunststoffschmelze in eine solche Kavität ohne vorherige Evakuierung eingedrückt werden, so käme es durch die komprimierte und somit erhitzte Luft zu einer Verbrennung des organischen Materials (Dieseleffekt). Variotherme Temperaturführung besagt, dass vor dem Einspritzen der Polymermasse in das Werkzeug dieses auf Temperaturen in der Nähe des Schmelzpunktes aufgewärmt wird. Dadurch behält die Kunststoffschmelze eine ausreichende Fließfähigkeit, um auch Strukturdetails bis in den Submikrometerbereich auszuformen. Bei der Entformung müssen aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Mikro-

strukturen hochpräzise Werkzeugbewegungen gewährleistet sein [8].

Weiterentwicklungen der Mikroreplikation sind im Erprobungsstadium. Beispielsweise lässt das Mikromontagespritzgießen oder Micro Insert Injection Molding, welches durch Einsatz von Einlegeteilen die umfangreiche Aufbau- und Verbindungstechnik vereinfacht, eine deutliche Reduzierung der Gesamtfertigungskosten erwarten. Eine ähnliche Zielsetzung wird mit dem Mikro-2-Komponenten-Spritzgießen verfolgt, wobei diese Prozesstechnik zudem die Herstellung mehrkomponentiger und damit multifunktionaler Mikrokomponenten ermöglicht [8].

Übersicht der Verfahren

Beispiele für die Gerätetechnik der beschriebenen Replikationsverfahren zeigt Abb. 4, einen Überblick gibt Tab. 1.



Abb. 3: Prägen von Leiterbahnen zur elektrischen Kontaktierung. Das Verfahrensprinzip lässt erkennen, dass nach dem Prägen die Leiterbahnen im Polymer vergraben sind. Rechts im Bild ist zu sehen, wie die Leiterbahnen über eine 45°-Kante (im Bild dunkel) einen Höhenunterschied von über 100 µm überwinden.

	UV-RIM	Heißprägen	Spritzgießen
Bevorzugter Anwendungsbereich	Prototypenfertigung	Kleinserien	Massenfertigung
Typische Rüstzeit	15 min	15 min	45 min
Typische Zykluszeit	1 min/mm Bauteildicke	5 – 30 min	55s – 8 min
Temperaturführung	Isotherm bei Raumtemperatur	Variotherm	Variotherm
Getestete Formeinsatzmaterialien	Metall, Keramik, Kunststoff, Silizium	Metall, Keramik, Kunststoff, Silizium	Metall, Kunststoff, Silizium
Formeinsatzgröße	26 x 66 mm ² , Kleinere Formate unter Verwendung von Adaptern möglich	Bis zu Ø 6“, Verschiedene Standards sind vorhanden: LIGA: 26 x 66 mm ² , Ø 4“, 86 x 126 mm ²	Nahezu beliebig, abhängig von Maschinen- und Werkzeuggröße Standard bei LIGA: 26 x 66 mm ²
Kleinstes abgeformtes strukturelles Detail	200 nm	200 nm	200 nm
Bisher realisiertes größtes Aspektverhältnis:			
Frei stehende Struktur (Pin, Steg)	14 (h = 86 µm, b = 6 µm)	50 (h = 200 µm, b = 4 µm)	17 (h = 2000 µm, b = 115 µm)
Vergrabene Struktur (Loch, Kanal)	20 (h = 2 mm, b = 100 µm)	50 (h = 200 µm, b = 4 µm)	25 (h = 250µm, b = 10µm)
Geeignete Materialklassen:	– Reaktive Gießharze – Composite aus Gießharzen mit Keramik- oder Metallpulver sowie organischen Farbstoffen	Nahezu sämtliche Thermoplaste und thermoplastische Elastomere	Nahezu sämtliche Thermoplaste und thermoplastische Elastomere, hochgefüllte Formmassen für das Pulverspritzgießen [10]

Tab. 1: Die wichtigsten Parameter der vorgestellten Mikroabformungsprozesse.



Abb. 4: Die unterschiedlichen Einsatzfelder spiegeln sich auch in der Maschinenausstattung wider. Links die Versuchsanlage für den UV-RIM-Prozess. In der Mitte eine manuell zu bestückende Heißpräganlage Hex03 der Firma Jenoptik für Laborbetrieb und Vorserienfertigung. Rechts die Battenfeld Microsystem 50 mit 5t Schließkraft, ausgelegt zum vollautomatischen Spritzgießen kleinster Bauteile mit integrierter Teileentnahme und Magazinierung.

Komplexe Fertigungsbeispiele

Die drei Replikationsverfahren ergänzen sich bei komplexen Aufgabenstellungen (Abb. 5). Dies soll an zwei Beispielen beschrieben werden:

Glasfaser-Steckverbinder

An der Entwicklung eines Fasersteckers in Zusammenarbeit mit der Spinner GmbH waren drei Institute des Forschungszentrums beteiligt. Der Steckverbinder für Glasfaser-Bändchenkabel ist vorwiegend für den Anschluss von Geräten in lokalen optischen Netzwerken vorgesehen [9].

Der Steckverbinder ist als Zwitterstecker ausgeführt (Abb. 6), d.h. beide Stecker sind identisch aufgebaut und über ein separates Kupplungselement miteinander verbunden. Der Stecker selbst besteht aus zwei spritzgegossenen

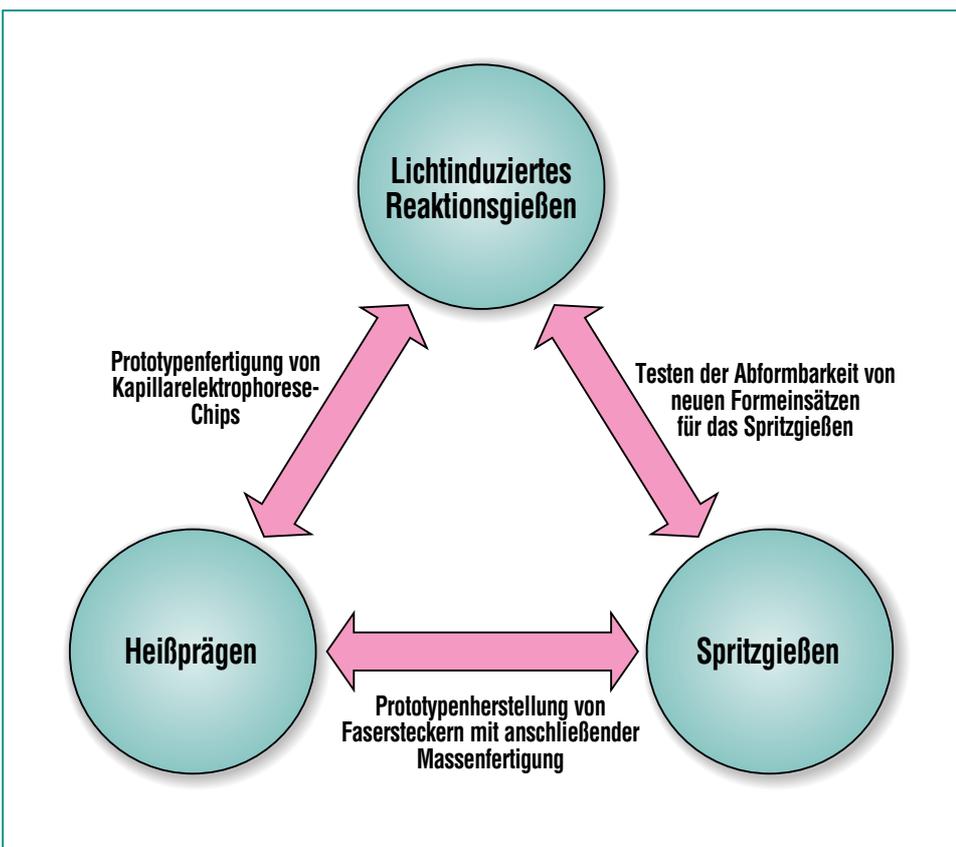


Abb. 5: Ergänzung der einzelnen Abformverfahren.

nen Hälften: von diesen besitzt die Unterhälfte Führungsstrukturen, in die bis zu 16 Glasfasern und zwei Führungsstifte eingelegt und positioniert werden. Die Lagetoleranz der Einzelfasern beträgt weniger als $\pm 1,5 \mu\text{m}$. Mit der zweiten Hälfte werden die Fasern und Führungsstifte fixiert und vor Beschädigung geschützt.

Sehr anspruchsvoll ist die Herstellung der Formeinsätze für das Spritzgieß- bzw. Prägewerkzeug. Sie besitzen mehrere Strukturebenen mit präzisen Höhenstufungen und sehr kleine Strukturdetails unter $10 \mu\text{m}$. Sie werden in einer Verfahrenskombination aus Mikrofräsbearbeitung und LIGA-Technik gefertigt, wobei die spezifischen Vorteile beider Verfahren genutzt werden. Nicht zuletzt müssen die Außenabmessungen der Formeinsätze und deren Ebenheit mit Toleranzen unter $10 \mu\text{m}$ gefertigt werden, um Gratbildung am Formteil zu vermeiden.

Die ersten Formeinsätze wurden zunächst im Heißprägeprozess abgemustert. Die sehr schnell verfügbaren Resultate gaben Auskunft über die zu erwartende Qualität und noch nötige Änderungen. Solange dann die endgültige Version der Formeinsätze gefertigt wurde, konnte der Bau des Spritzgießwerkzeuges beginnen. Mit den neuen Formeinsätzen wurde umgehend die Optimierung des Spritzgießprozesses durchgeführt, während parallel dazu erste Musterteile für Tests heißgeprägt wurden.

Nachdem der Spritzgießprozess stabil lief, wurden Demonstratoren für den Auftraggeber gefertigt

und geometrisch charakterisiert, mit denen dieser seine Kunden bemustern konnte. Gleichzeitig war die Spinner GmbH in der Lage, selbst die Fertigung vorzubereiten und schrittweise die Produktion zu übernehmen.

Kapillar-Elektrophorese-Chip (CE-Chip)

Abformtechniken leiden immer unter der relativ langen Vorlaufzeit für die Strukturierung der Formwerkzeuge. Neben dem LIGA-Verfahren und der mechanischen Mikrofertigung von Formeinsätzen ist die Lasermikrobearbeitung hervorragend geeignet, mikrostrukturierte Formeinsätze herzustellen. Ein besonderes Merkmal dieses Verfahrens ist die Flexibilität, mit der auf Designänderungen der Mikrostruktur reagiert werden kann. Damit ist das in der „Makrowelt“ seit wenigen Jahren etablierte Verfahren des „Rapid Tooling“, d.h. die schnelle Fertigung (i. Allg. innerhalb von ca. 1-2 Arbeitstagen) von Abformwerkzeugen für kleine Stückzahlen, auch in der „Mikrowelt“ möglich. Um die prinzipielle Abformbarkeit der mittels Lasermikrobearbeitung hergestellten Formeinsätze zu bestimmen, wird aufgrund der kurzen Rüstzeiten meist das Reaktionsgießverfahren eingesetzt. Anschließend ist dann der Transfer des Formeinsatzes auf eine Heißpräge- oder Spritzgießmaschine aufgrund der geometrischen Kompatibilität direkt möglich.

Am Beispiel von Kapillarelektrophorese-Chips wird eine derartige Entwicklungskette aufgezeigt.

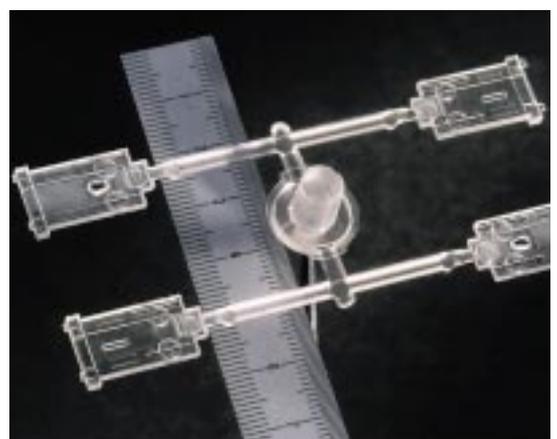
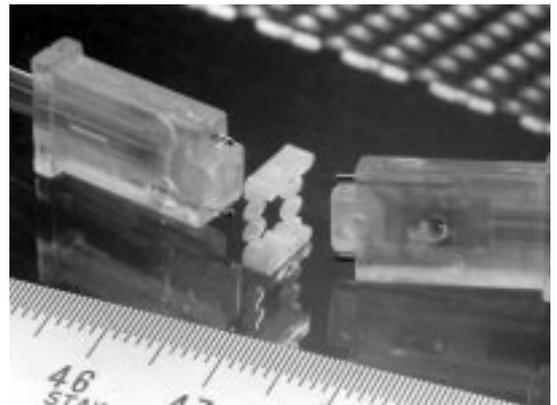


Abb. 6: Spritzgegossener Steckverbinder für Glasfaserbändchen-Kabel; ein Steckerpaar mit Zwischenstück (oben), speziell für Steckverbinder-Gehäusehälften entwickeltes Spritzgießwerkzeug (Mitte), aus dem Werkzeug entnommenes Spritzgussteil (unten).

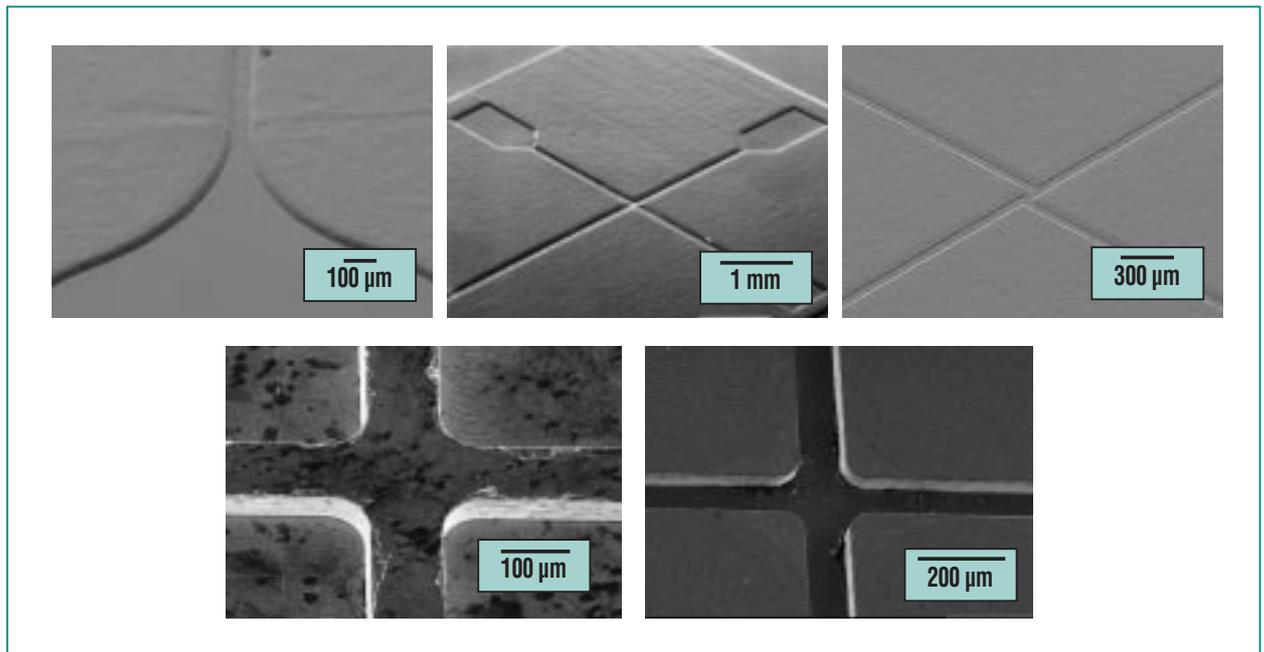


Abb. 7: Von oben: 3 REM-Aufnahmen abgeformter Designstudien sowie Kreuzungsbereich eines CE-Chips (gefertigt durch Lasermikrobearbeitung). Links unten die erhabene Kreuzung im Messingformeinsatz (gefertigt durch mechanische Mikrobearbeitung) und rechts unten die in PMMA abgeformte Kanalstruktur mit 100 µm Tiefe.

Abb. 7 zeigt verschiedene Designstudien von CE-Chips, bei denen die Ein- und Auslass- sowie die Kreuzungsgeometrie der Kapillaren variiert wurden. Die entsprechenden Stahlformeinsätze wurden durch Lasermikrobearbeitung hergestellt und im Reaktionsgießverfahren abgeformt (Prototypenfertigung). Eventuelle Ablagerungen im Formeinsatzgrund (Débris), welche die Entformbarkeit beeinträchtigen können, lassen sich durch einen speziellen Reinigungsabformschritt im Heißprägeverfahren entfernen, um dann durch Reaktionsgießen optimale Abformungen in Polyester durchführen zu können. Anschließend kann über mechanische Mikrobearbeitung ein Werkzeug mit höheren Strukturen gefertigt werden (Abb. 7) und entsprechend den Anforderungen im UV-RIM oder

Heißprägeverfahren in Kunststoff repliziert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Alle drei vorgestellten Abformverfahren haben ihre Tauglichkeit zur Herstellung qualitativ hochwertiger Kunststoff-Mikrokomponenten bereits an verschiedenen Bauteilgeometrien unter Beweis gestellt. Da sich die Prozesse je nach Serienumfang in ihrer Eignung ergänzen, steht am Forschungszentrum Karlsruhe eine Reihe von Replikationstechnologien für einzelne Prototypen bis zum Massenbauteil zur Verfügung (Abb. 8). Durch enge Zusammenarbeit der verschiedenen Arbeitsgruppen ist es möglich, die jeweils beste Lösung für unter-

schiedliche Fragestellungen auszuwählen, oft durch Kombination mehrerer Verfahren. Unterstützt wird diese Zusammenarbeit durch den Zugriff auf unterschiedliche Formeinsatztechniken.

Die Entwicklung der Replikationsverfahren am Forschungszentrum Karlsruhe wird weiter vorangetrieben. Die Prototypenfertigung mittels Reaktionsgießen wird sich neben der weiteren Prozessoptimierung auf die Anwendung neuer Kompositmaterialien mit besonderen optischen und thermomechanischen Eigenschaften konzentrieren.

Nachdem sich die Heißprägetechnik als Mikroabformtechnik in den letzten Jahren etablieren konnte, sind die Anforderungen immer mehr auf größere Stückzahlen und kürzere Zykluszeiten

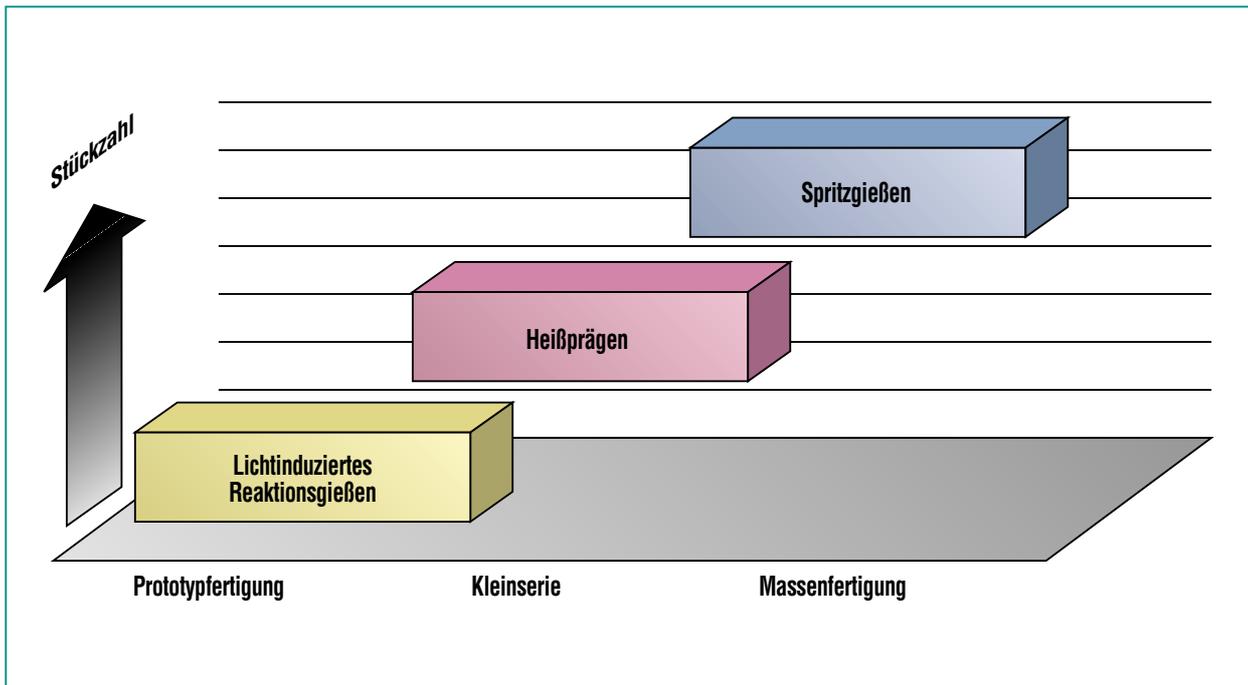


Abb. 8: Die am Forschungszentrum Karlsruhe eingesetzten Abformverfahren decken einen breiten Anwendungsbereich ab. Vom Einzelteil für Tests bis hin zum Massengut kann je nach Anforderung die passende Technik ausgewählt werden.

ausgerichtet. Dies gilt vor allem für die Sonderverfahren, bei denen sich die Heißprägetechnik am deutlichsten von anderen Verfahren abgrenzt. Aus diesem Grund zielen die Entwicklungsarbeiten der näheren Zukunft auf die Entwicklung schnellerer Maschinen und die Integration in automatisierte Fertigungsumgebungen, da für das Heißprägen in diesem Bereich das größte Potenzial zur Zykluszeitverkürzung identifiziert werden konnte.

Beim Spritzgießen liegen die Schwerpunkte in der Entwicklung

von Werkzeugkonzepten für die Herstellung leicht vereinzelbarer Mikroteile sowie der weiteren Verringerung der Zykluszeiten. Dabei sollen verstärkt Simulationstechniken eingesetzt werden. Materialeitig ist von einem vermehrten Einsatz von Hochleistungsthermoplasten und gefüllten Kunststoffen auszugehen. Gänzlich neue Perspektiven eröffnet das Einlege- und Mehrkomponenten-Mikrospritzgießen, mit dem nicht nur der Montageaufwand bei Mikrosystemen reduziert, sondern auch neue funktionale Einheiten hergestellt werden können.

Danksagung

Die Autoren danken ihren Kollegen am FZK für die freundschaftliche und stets hilfreiche Zusammenarbeit. Ferner gilt der Dank den vielen externen Partnern des FZK, insbesondere den Firmen Battenfeld GmbH, Spinner GmbH und Steag microParts GmbH.

Literatur

- [1] W. Menz, J. Mohr, O. Paul,
Wiley-VCH, Weinheim, 2001
- [2] P. Hagemann, W. Ehrfeld,
International Polymer Processing, 4,
188 (1989)
- [3] W. Pfleging, T. Hanemann,
FZK Nachrichten, 31(1), 21 (1999)
- [4] T. Hanemann, M. Hecke, V. Piötter,
Polymer News, Vol. 25, No. 7, 2000,
pp. 224-229
- [5] M. Hecke, W. Bacher,
FZKA- 6080, Forschungszentrum
Karlsruhe (1998), 89-94
- [6] A. Gerlach, G. Knebel, A. Guber,
M. Hecke, D. Herrmann, A. Muslija,
T. Schaller,
Microsystem Technologies 2002,
Vol. 7 No 5-6, 2002, 265-268
- [7] M. Hecke, A. Durand,
Proc. of 2nd euspen International
Conference – Turin,
2001; pp. 196-198
- [8] V. Piötter, T. Hanemann, R. Ruprecht,
J. Hausselt,
Proc. of Injection Molding 2001
Conference; Copenhagen; 2001;
pp. 182-189
- [9] U. Wallrabe, H. Dittrich,
G. Friedsam, T. Hanemann, J. Mohr,
K. Müller, V. Piötter, P. Ruther,
T. Schaller, W. Zißler,
Proc. of Design, Test, Integration
and Packaging of MEMS/MOEMS;
SPIE Vol. 4408; 2001; pp. 478-485
- [10] W. Bauer, R. Knitter, V. Piötter,
R. Ruprecht,
dieses Heft