

## **Mikropulverspritzgießen (MicroPIM) - vom Feedstock bis zum Sinterteil**

V. Piotter, W. Bauer, T. Hanemann, M. Müller, T. Müller, K. Plewa

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Materialforschung -  
Werkstoffprozesstechnik

Mit dem Mikro-Pulverspritzgießen steht eine Prozesstechnik zur wirtschaftlichen Herstellung von metallischen und keramischen Mikrokomponenten zur Verfügung. Das Verfahren besteht aus den vier Teilschritten Formmassenherstellung, Mikrospritzgießen, Entbindern und Sintern. Es wird zwischen Niederdruck-Pulverspritzgießen (Prototypen und Kleinserien) und Hochdruck-Pulverspritzgießen (Mittel- und Großserien) unterschieden.

Die Partikelgröße der verwendeten Pulver hat einen entscheidenden Einfluss auf die Abformqualität. So werden beim H-PIM mit feinen Keramikpulvern kleinste Strukturgrößen von  $\leq 10 \mu\text{m}$  erreicht während gröbere (Stahl-) Pulver nur größere Dimensionen und vergleichsweise raue Oberflächen zulassen.

Eine Untervariante, das Zwei-Komponenten-Pulverspritzgießen, erlaubt die Fertigung mehrkomponentiger Mikrobauteile unter Einsparung aufwendiger Montageschritte.

### **1 Einleitung**

Parallel zum weltweiten Trend zur Miniaturisierung von Formteilen und ganzen Baugruppen erfolgt die Entwicklung adäquater Fertigungsverfahren [1]. Hierunter fallen neben den bekannten Prozessen der Silizium- und Kunststofftechnik auch neuartige Methoden beispielsweise zur Herstellung von singulären Mikroteilen oder flächig-mikrostrukturierten Produkten aus hochbelastbaren Werkstoffen.

In häufig schon ausreichender Qualität aber meist nur in geringen Stückzahlen lassen sich Formteile aus Metall und Keramik z.B. über Mikrozerspanung oder Laserablation gewinnen. Jedoch sind beide Verfahren hinsichtlich Miniaturisierbarkeit, Oberflächenqualität und für den Einsatz in der Serienfertigung beschränkt. Deutlich bessere Strukturierungserfolge lassen sich mit lithographischen Verfahren erreichen, allerdings zu ebenfalls deutlich höheren Kosten. Eine wirtschaftliche Serienfertigung wird in der Regel erst möglich, wenn die nach den genannten Verfahren gefertigten Primärstrukturen durch Abformprozesse in großen Stückzahlen repliziert werden. Mit dem Mikro-Spritzgießen steht ein solches Verfahren für polymere Werkstoffe bereits zur Verfügung. Werden jedoch anwendungsbedingt höher beanspruchbare Materialien benötigt, so bietet sich eine Variante für Metalle und Keramiken an, das Pulverspritzgießen [2, 3]. Es besteht im Wesentlichen aus den Teilschritten Formmassenaufbereitung, (Mikro-)Spritzgießen, Entbindern und Sintern [4]. Häufig

wird es auch mit seiner englischen Abkürzung PIM (= powder injection moulding) bezeichnet. Für die Mikrofertigung kommen zwei Varianten, nämlich das Niederdruck- (L-PIM) und das Hochdruck- (H-PIM) Pulverspritzgießen, in Frage. Beide werden in den folgenden Kapiteln intensiver vorgestellt.

## **2 Niederdruck-Pulverspritzgießen (L-PIM)**

Ein wesentliches Charakteristikum des Niederdruck-Spritzgießens, auch Heißgießen genannt, besteht darin, dass zur Plastifizierung der Pulver keine Polymere, sondern niedrigschmelzende Paraffine und Wachse eingesetzt werden. Dadurch ist eine Formfüllung bereits bei niedrigen Drücken und Temperaturen durchführbar. Übliche Parameter liegen bei Massetemperaturen von 70 - 100°C und Spritzdrücken von weniger als 5 MPa [5]. Daraus ergeben sich wichtige Vorteile:

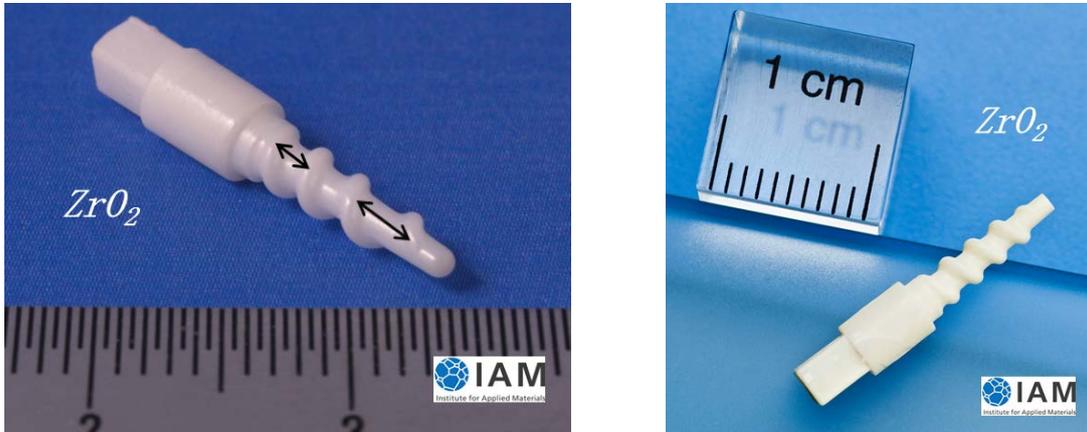
- Aufgrund der geringen mechanischen und thermischen Belastung können die Spritzgießformen aus weichen, einfach zu bearbeitenden Werkstoffen bestehen. Das L-PIM kann deshalb bereits für kleine Serien, ggf. einzelne Prototypen, wirtschaftlich sein.
- Die Werkzeuge unterliegen einem geringeren Verschleiß, zudem reduziert die niedrige Viskosität des Feedstocks die Gefahr, dass filigrane Strukturen im Formnest beim Einschießen der Masse beschädigt werden.
- Geringe Einspritzgeschwindigkeiten reduzieren die Wahrscheinlichkeit von Entmischungen in den komplexen Designs und engen Fließwegen von Mikrobauteilen.

Trotz dieser Vorzüge ist das Niederdruck-Spritzgießen derzeit in der Fertigung von keramischen Mikrobauteilen noch wenig verbreitet. Verantwortlich sind u.a. zwei Probleme, die bereits aus der Abformung von makroskopischen Bauteilen bekannt sind, die sich bei Mikrobauteilen aber noch drastischer auswirken können:

- Paraffinbasierte Massen besitzen eine deutlich geringere Festigkeit als thermoplastische Feedstocks. Nicht zuletzt bei komplex geformten Mikrobauteilen, brechen filigrane Strukturen beim Entformen daher leicht ab.
- Das Niederdruck-Spritzgießen ist für die automatisierte Massenfertigung, nicht zuletzt aus o.g. Gründen, nur bedingt geeignet.

Trotz dieser Schwierigkeiten lassen sich auch mittels L-PIM sehr filigrane Mikrobauteile mit hohen Aspektverhältnissen abformen. Ein interessanter Ansatz beruht auf der relativ einfachen Herstellung von Formeinsätzen durch Eingießen eines vergrößerten Modells in Silikonkautschuk. Die Silikonform kann aufgrund ihrer Nachgiebigkeit auch von empfindlichen Strukturen abgezogen werden und selbst Hinterschnitte stellen kein prinzipielles Entformungshindernis dar. Allerdings erfordert die Nachgiebigkeit der Form eine besondere Anpassung der Spritzgießparameter, um eine ausreichende Maßhaltigkeit sicherstellen zu können.

Die Eigenschaften von keramischen Mikrobauteilen, die durch Niederdruck-Spritzgießen gefertigt werden, stimmen gut mit denen überein, die dem Hochdruck-Spritzguss entstammen. Die Teile können daher als Funktionsmuster für Einsatztests verwendet werden, da sie aus dem gleichen Werkstoff bestehen und das gleiche Einsatzverhalten wie das spätere Serienprodukt aus Keramik besitzen (Bild 1).

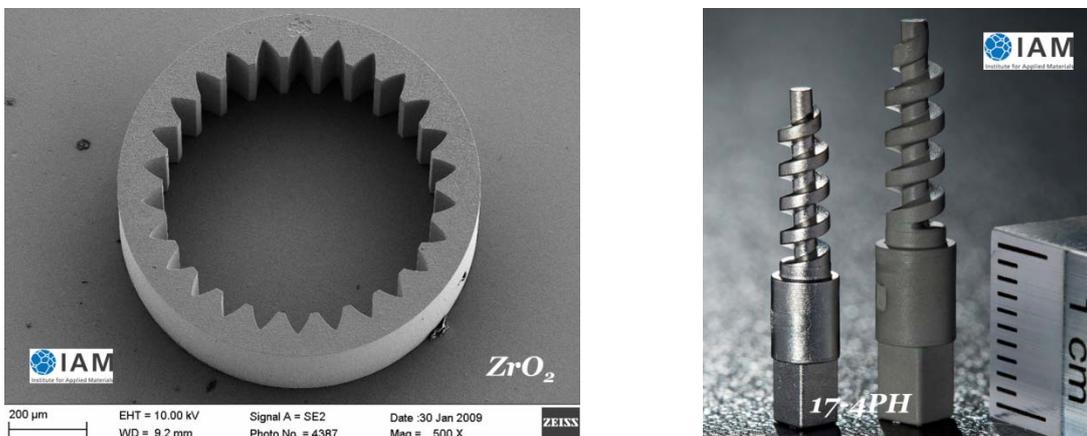


**Bild 1:** Keramische Dispenser-Schnecken hergestellt durch Nieder- und Hochdruck-Pulverspritzgießen. Während ersteres z.B. die Entformung von Schnecken mit variierender Gewindesteigung zulässt (links) ermöglicht letzteres die vollautomatische Formgebung in einem speziellen Ausdreh-Werkzeug (rechts)

### 3 Hochdruck-Pulverspritzgießen (H-PIM)

#### 3.1 Mikro-Pulverspritzgießen (MicroPIM)

Grundsätzlich stützt sich das MicroPIM auf die gleichen Besonderheiten wie das Mikrospritzgießen von Polymeren, z.B. Werkzeugevakuierung, variotherme Abformung etc. Prinzipiell können auch die gleichen Typen von mikrostrukturierten Formeinsätzen verwendet werden. Typische Werkstoffe sind bei den Metallen Edelstähle wie 17-4PH und 316L oder auch Reineisen und Kupfer. Im Bereich der Keramiken sind Zirkonoxid [6] und Aluminiumoxid als häufig eingesetzte Beispiele zu nennen (Bild 2).



**Bild 2:** MicroPIM-Testbauteile aus Zirkonoxid (innenverzahnter Zahnkranz, links) und aus Stahl 17-4PH (Dispenserschnecke, Sinter- und Grünteil, rechts)

Zu beachten sind beim MicroPIM natürlich die Einflüsse des hohen Pulvergehaltes und die nachfolgenden Verarbeitungsschritte. Beispielsweise führt die Pulverbeladung zu Effekten wie Pulver-Binder-Segregation, Fließgrenzen und/oder Trägheitseinflüssen. Die damit verbundenen Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten sind ausführlich in [7, 8, 9] beschrieben, während der Stand der MicroPIM-Technologie an dieser Stelle nur tabellarisch beschrieben werden kann.

**Tabelle 1:** Wichtige Kenndaten bzgl. des aktuellen Standes des MicroPIM. Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für reine Polymere hinzugefügt

Material-klasse	min. laterale Abmaße [µm]	min. Detailgrößen [µm]	Aspektverhältnis, herausstehende Strukturen	Toleranzen [± %]	Oberfläche* R <sub>max</sub> / R <sub>a</sub> [µm]
Metalle	10	5	10	0,5	7 / 0,8
Keramiken	≤ 10	≤ 3	< 15	≤ 0,3 (0,1**)	<3 / 0,2
Polymere	1	< 0,1	20 (200)	0,05	0,05 / 0,05

\* = abhängig von Formeinsatz-Beschaffenheit \*\* = nach gründlicher Prozessoptimierung

### 3.2 Zwei-Komponenten Mikropulverspritzgießen (2C-MicroPIM)

In der Mikro- wie schon in der Makrotechnik bestehen komplette Systeme und Produkte häufig aus mehr als nur einem Material. Hinzu kommt der Montageaufwand von einzelnen Komponenten zu ganzen Baugruppen, der gerade in Mikrodimensionen aufgrund der geringen Abmessungen aber auch wegen des starken Einflusses von z.B. Adhäsionskräften besonders gravierend zu Buche schlägt. Vor diesem Hintergrund gewinnen neue Verfahrensvarianten, die Formgebungs- und Fügevorgänge in einem Prozessschritt kombinieren, an Attraktivität [10]. Hierzu zählt das sog. 2-Komponenten-Mikrospritzgießen, bei dem gleichzeitig oder zeitlich versetzt mindestens zwei unterschiedliche Formmassen in ein spezielles Werkzeug eingespritzt werden. Die Kombination von 2-Komponenten-Spritzgießen mit MicroPIM führt zum 2K-Mikropulverspritzgießen (2C-MicroPIM). Die auf diesem Wege generierten Verbundteile bestehen häufig aus einer Kombination von Materialien mit unterschiedlichen, nicht selten gegensätzlichen, Eigenschaften, z.B. elektrisch leitend / isolierend, magnetisch / unmagnetisch oder hart / duktil.

Es ist leicht einsichtig, dass das 2C-MicroPIM eine besondere prozesstechnische Herausforderung darstellt, nicht nur ein deformationsfreies Entbindern sondern auch ein verzugsfreies Sintern durch kontrollierten Schrumpf gewährleistet sein müssen.

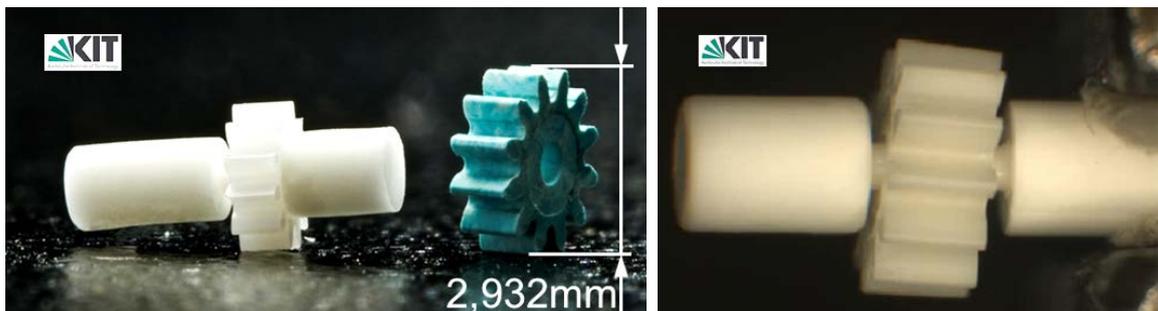
Zur Erforschung des Verfahrens wurde ein Demonstrator in Form einer Welle-Nabe-Verbindung, d.h. einem Zahnrad, bestehend aus Zirkonoxid und einer Welle mit verstärktem Wellenbund aus Aluminiumoxid, herangezogen. Als besondere Herausforderung kam hinzu, dass sowohl bewegliche als auch feste Verbindungen erzeugt werden sollten.

Eine feste Verbindung muss eine dichte Fügefläche zwischen Zahnrad und Welle aufweisen, die eine ausreichende Verbundfestigkeit gewährleisten kann. Gleichzeitig

sind thermische oder mechanische Spannungen in beiden Komponenten zu vermeiden oder auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Um dies zu erreichen, mussten Materialauswahl und Prozessführung so angepasst werden, dass Zahnrad und Welle nahezu zeitgleich sintern, d.h. dass beide Komponenten sowohl hinsichtlich Schrumpfmaß als auch in der Sinterkinetik weitgehend identisch sind.

Für eine bewegliche Verbindung gelten fast umgekehrte Randbedingungen, d.h. die Prozessparameter und die Materialkombination sind so zu wählen, dass die innen liegende Komponente aus Aluminiumoxid früher zu sintern beginnt als das äußere Zahnrad aus Zirkonoxid und dass Erstere auch ein höheres absolutes Schrumpfmaß aufweist. Nur in diesem Falle und bei einem entsprechenden Werkzeugdesign kann sich zwischen Zahnrad und der Achse ein Spalt ausbilden, der Rotationsbewegungen des Zahnrades auf der Welle zulässt.

Die Untersuchungen an zweikomponentigen Welle-Nabe-Verbindungen zeigten bald, dass feste Verbindungen reproduzierbar hergestellt werden können. Im Gegensatz dazu konnten bewegliche Verbindungen anfangs nur statistisch dargestellt werden. Die Prozessentwicklung und gestaltete sich also wesentlich diffiziler, u.a. es mussten umfangreiche Modifikationen sowohl am Werkzeug als auch an der Zusammensetzung der beiden Pulverfraktionen vorgenommen werden. Diese Modifikationen sind in [11] ausführlicher beschrieben. Auf diesem Wege gelang es, auch bewegliche Verbindungen prozesssicher ohne Zwischenschritte zu realisieren (Bild 3).



**Bild 3:** Grünlinge für feste bzw. bewegliche Zahnrad-Welle Kombinationen aus zwei verschiedenen Keramiken. Schaftdurchmesser im Fügebereich 0,65 mm (links). Beweglich auf der Welle ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) gelagertes Zahnrad ( $\text{ZrO}_2$ ) nach dem Sintern (rechts).

#### 4 Ausblick

Selbstverständlich verharrt auch die Technologie des Mikropulverspritzgießens nicht auf ihrem erreichten Stand.

Aktuelle Entwicklungsrichtungen zielen auf die Verbesserung der Oberflächenqualität und der Detailtreue durch Verwendung feinerer Pulver, vor allem im Bereich der Metalle. Häufig werden dabei auch bimodale Mischungen aus je einer feineren und einer eher grobkörnigen Pulvertype eingesetzt.

Eine nach wie vor wichtige Fragestellung ist die der dimensionellen Genauigkeit. Neben der allgemeinen Verbesserung aller Teilschritte steht hier vor allem die Druck- und Temperaturkontrolle während der Einspritz- und Nachdruckphase im Vordergrund.

Aufgrund seiner wirtschaftlichen wie technischen Attraktivität findet das Mehrkomponenten-Pulverspritzgießen breites Interesse und wird in verschiedenen Varianten, z.B. dem sog. Inmould-labelling PIM, weiterentwickelt.

## 5 Literatur

- [1] V. Piotter, W. Bauer, T. Hanemann, M. Hecke, C. Mueller: Replication technologies for HARM devices: status and perspectives. *Microsystem Tech.*, **Vol. 14**, 1599-1605 (2008)
- [2] F. Petzoldt: Micro powder injection Moulding – challenges and opportunities. *Powder Injection Moulding International*, **Vol. 2, No. 1**, 37-42 (2008)
- [3] R.M. German: Materials for Microminiature Powder Injection Moulded Medical and Dental Devices. *Int. Journal of Powder Metallurgy*, **Vol. 46, 2**, 15-18 (2010)
- [4] W. Michaeli, T. Pfefferkorn: Keramikpulverspritzgießen – Einfluss des Spritzgießprozesses auf die Qualität komplexer Bauteile, *Zeitschrift Kunststofftechnik*, **I 06/2005**, Carl Hanser Verlag, 1-18 (2005)
- [5] W. Bauer, M. Müller, R. Knitter, P. Börsting, A. Albers, M. Deuchert, V. Schulze: Design and prototyping of a ceramic micro turbine: a case study. *Microsystem Tech.*, **Vol. 16**, 607-615 (2010)
- [6] T. Hanemann et al: Influence of stearic acid concentration on the processing of ZrO<sub>2</sub>-containing feedstocks suitable for micro powder injection molding; *Int. Journal Applied Ceramic Technology*, **Vol. 8(4)**, 865-872 (2011)
- [7] T. Mueller et al: Ceramic micro parts produced by micro powder injection molding – Latest developments. *Microsystem Tech.*, **Vol. 16**, 1419-1423 (2010)
- [8] V. Piotter: A review of the current status of MicroPIM, Part 1: Powder Injection Moulding, **Vol. 5, No. 3**, 27-36 (2011), Part 2: Powder Injection Moulding, **Vol. 5, No. 4**, 25-30 (2011)
- [9] V. Piotter: Micro metal injection molding (MicroMIM); in: *Handbook of metal injection molding*, Editor D.F. Heaney, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge UK, ISBN 978-0-85709-066-9, 307-337 (2012)
- [10] F. Petzoldt: Multifunctional parts by two-component Powder Injection Moulding (2C-PIM). *Powder Injection Moulding International*, **Vol. 4, No. 1**, 21-27 (2010)
- [11] A. Ruh, T. Hanemann, R. Heldele, V. Piotter, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Hausselt: Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C MicroPIM): Characteristics of Applicable Materials. *Int. Journal Applied Ceramic Technology*, **Vol. 8(1)**, 194-202 (2011)