

Mikro-Pulverspritzgießen - MicroPIM

V. Piotter

Karlsruher Institut für Technologie; Institute für Angewandte Materialien

Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Tel. : +49 0721 6082 6463; Fax: +49 0721 6082 2095

volker.piotter@kit.edu

1. Einleitung

Das Spritzgießen von singulären Mikrokomponenten oder mikrostrukturierten Bauteilen hat sich in den vergangenen Jahren zu einer eigenständigen Variante innerhalb dieser Abformtechnik entwickelt. Als Beleg seien nur die diversen Ansätze der Maschinenhersteller zur Entwicklung von Spritzeinheiten mit signifikant reduzierten Volumina zu nennen. Parallel zu diesen Aktivitäten lässt sich auch für die Mikrofertigung ein Trend zu weiterer Diversifizierung z.B. im Hinblick auf den Einsatz hochbelastbarer Materialien oder der Integration mehrerer Prozessschritte erkennen. Im Hintergrund steht dabei die außerordentliche Breite von Anwendungsfeldern in denen Produkte der Mikrosystemtechnik wiederzufinden sind [Pio08]. Nicht zuletzt aus dieser Vielfalt ergibt sich ein umfangreiches Anforderungsprofil hinsichtlich der erforderlichen Werkstoffe. Der Schwerpunkt der real einsetzbaren Materialpalette in der Mikrosystemtechnik liegt jedoch noch immer auf Silizium und (meist thermoplastischen) Kunststoffen. Aus dieser Konstellation ergibt sich der Bedarf für Fertigungstechniken, mit denen auch metallische und keramische Materialien in großen Stückzahlen verarbeitet werden können. Eine sehr attraktive Option stellt das aus der makroskopischen Fertigung bekannte Pulverspritzgießen dar [Joh01, Mic05, Pet08, Mor09, Ger10, Ger12, Sli12].

Die vorliegende Abhandlung befasst sich daher mit der Entwicklung des Mikro-Pulverspritzgießens von metallischen und keramischen Werkstoffen sowie spezialisierten Varianten wie dem Mehrkomponenten-Pulverspritzgießen [Wal12].

2. Mikro-Pulverspritzgießen (MicroPIM)

Wie im vorhergehenden Kapitel dargelegt handelt es sich beim Mikro-Pulverspritzgießen um eine Kombination aus zwei Sonderverfahren, dem Mikrospritzgießen mit polymeren Materialien und dem Pulverspritzgießen mit metallischen bzw. keramischen Werkstoffen. Für ersteres sind seit geraumer Zeit Aktivitäten der Maschinenhersteller und Fertiger zu nennen,

weshalb hier schon ein sehr hoher technischer Stand erreicht ist [Smi09, Xie10, Kuh10, Kir12]. Ähnliches gilt prinzipiell für das Pulverspritzgießen, welches in der makroskopischen Fertigung schon weit etabliert ist. Bei der Übertragung auf Mikrodimensionen sind jedoch einige wichtige Punkte zu beachten, die im Folgenden entlang der Prozesskette erläutert werden.

2.1 Formmassen für das Pulverspritzgießen von Mikrobauteilen

2.1.1 Bindersysteme

Es verwundert nicht wenn das Pulverspritzgießen von mikroskaligen Bauteilen (MicroPIM) erhöhte Anforderungen an die Auswahl der Formmassenkomponenten und die Compoundiertechnik stellt: während im makroskopischen Pulverspritzgießprozess für Bauteile aus Keramiken oder Hartmetallen mittlere Pulverpartikelgrößen von typischerweise 0,5 bis 10 Mikrometer und bei Metallen bis 22 μm und mehr zum Einsatz kommen, müssen beim MicroPIM Partikel im Mikro-, besser Submikrometer Bereich verarbeitet werden, um die benötigten Anforderungen an die Oberflächenrauigkeit, Detailtreue und mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteiles erfüllen zu können.

Ferner müssen die Formmassen (engl. = Feedstocks) eine sehr gute Fließfähigkeit aufweisen, damit hohe Fließlängen-zu-Wanddicken-Verhältnisse schnell befüllt werden können, ohne dass aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Formmassen die Schmelze vorzeitig erstarrt. Somit kommt dem Bindersystem eine bedeutende Rolle bei der Compoundierung zu, da mit ihm die Fließfähigkeit des Feedstocks gewährleistet wird.

Es mag zunächst überraschend klingen aber die Fließfähigkeit eines Feedstocks ist nicht allein entscheidend für seine Anwendbarkeit in der Mikroabformung. Ebenso große Bedeutung kommt der Grünlingsfestigkeit zu, da die Mikrokomponenten aufgrund ihres relativ großen Oberfläche/Volumen-Verhältnisses bei der Entformung hohen Kräften ausgesetzt sind, dabei aber nur einen kleinen tragenden Querschnitt aufweisen.

Neben einer niedrigen Feedstockviskosität und hohen Grünfestigkeit spielen wie in der makroskopischen PIM-Technologie auch weitere Faktoren wie die Homogenität der Formmasse, deren Lagerbeständigkeit und Rezyklierbarkeit, eine einfache und umweltschonende Entbinderbarkeit und das kontrollierbare Schwindungsverhalten (letzteres gerade auch in Mikrodimensionen) eine bedeutende Rolle.

Üblicherweise werden den Bindern Additive zugesetzt, um die Verarbeitungseigenschaften der Feedstocks zu verbessern. Dazu gehören neben niedermolekularen Fließverbesserern vor allem auch Dispergatoren mit netzwerkbildenden Eigenschaften. Mit diesen soll eine optimale Verteilung der Partikel im Binder sowie eine mögliche Re-Agglomeration unterbunden werden. Die Auswahl eines Dispergators muss sowohl die Oberflächencharakteristik der Pulver als auch den chemischen Aufbau der Bindersubstanzen (Polarität) berücksichtigen [Han11]. Eine gute Kopplung zwischen Pulver und Binder lässt außerdem höhere Füllgrade zu und reduziert somit Sinterschrumpf und maßliche Ungenauigkeit. Da für das Mikro-Pulverspritzgießen sehr hochwertige Feedstocks

erforderlich sind, wird auch hier von Additiven Gebrauch gemacht. Grundsätzlich gelten aber die gleichen Wirkmechanismen wie bei Formmassen für die makroskopische Fertigung.

2.1.2 Pulver

In Bezug auf die Pulverpalette für MicroPIM sind bei den Metallen insbesondere die „klassischen“ PM-Stähle wie 17-4PH und 316L zu nennen. Daneben kommen auch Nichteisenmetalle wie Kupfer und als Neuentwicklung auch Titan, Wolfram und Wolframlegierungen zum Einsatz. Bei den Keramiken stellen Zirkon- und Aluminiumoxid das Gros der Anwendungen (z. B. Glasfaserferrulen, Drahtbonddüsen), während Nitridkeramiken wie z. B. Siliziumnitrid noch am Anfang der Entwicklung stehen.

Es ist leicht ersichtlich, dass zur Mikroabformung überwiegend Pulver mit geringen mittleren Partikeldurchmessern verwendet werden. So liegen typische D_{50} -Werte bei Stählen zwischen 1,5 μm und 4,5 μm , nicht selten werden aber auch Fraktionen bis zu 10 μm oder sogar darüber eingesetzt. Für die wichtigsten MicroMIM Stähle 316L und 17-4PH sind Feinstfraktionen < 5 μm auf dem Markt erhältlich. Sollten noch feinere Pulver oder andere Stahlsorten benötigt werden bietet sich die Möglichkeit der Abtrennung feinsten Fraktionen - meist durch Windsichtung - an.

Ferner empfiehlt sich die Verwendung von vorlegierten Pulvern, da gerade beim MicroPIM häufig hohe Scherraten auftreten, welche zu einer schnellen Separation der einzelnen Legierungssubstanzen bei nicht-vorlegierten Pulvergemischen führen würden.

Im Falle von keramischen Pulvern liegen typische D_{50} -Werte bei 500 – 800 nm für Aluminiumoxid und 300 – 500 nm für Zirkonoxid. Darüber hinaus sind mehrere Versuche bekannt, bimodale Mischungen aus konventionellen Keramikpulvern und extrem feinen, im Extremfall echten Nanopulvern, herzustellen um auf diese Weise eine höhere Pulverbeladung und bessere Konturabformung zu erreichen. Hinsichtlich der Partikelform werden globulare, also möglichst kugelige Pulvertypen bevorzugt, da sie für die Mikroabformung ausreichend hohe Pulverfüllgrade bei akzeptabler Fließfähigkeit des Feedstocks ermöglichen. Die Präferenz für die Kugelgestalt führt auch dazu, dass überwiegend gasverdünnte Pulvertypen zum Einsatz kommen.

2.2 Mikro-Abformprozess

Aufgrund des hohen Füllstoffgehaltes unterscheiden sich PIM-Formmassen hinsichtlich der rheologischen und thermodynamischen Materialeigenschaften deutlich von ungefüllten Polymeren. Zunächst gilt dies natürlich für die Viskosität aber auch die Wärmeleitfähigkeit kann bis zum Faktor 12 über derjenigen der Matrix-Polymere liegen. Diese Unterschiede haben insbesondere in Mikrodimensionen einen signifikanten Einfluss auf die Verfahrensführung beim Pulverspritzgießen.

Während des Einspritzvorganges kommt es zu einer beschleunigten Ausbildung einer abgekühlten Randschicht und vorzeitigem Einfrieren des Anschnittes. Damit reduziert sich

natürlich die Nachdruckzeit mit entsprechenden Konsequenzen für die Teilqualität. Abhilfe kann durch größere Dimensionierung des Anschnittes geschaffen werden. Da dies bei Mikroteilen oftmals nicht möglich ist, kommt noch der Einsatz von Heißkanälen für das Anguss- und Verteilersystem in Frage, wodurch in gewissem Maße ein vorzeitiges Einfrieren bzw. übermäßige Abkühlung unterbunden werden kann.

Es ist leicht einsichtig, dass die hochgefüllten Feedstocks zu einem verstärkten Verschleiß am Werkzeug führen. Erstaunlicherweise wird hierüber nur wenig in der Literatur berichtet. Die übliche Gegenmaßnahme liegt in der flexiblen Auslegung des Werkzeuges, so dass die verschleissrelevanten Bereiche leicht ausgetauscht werden können. Diese Vorgabe gilt natürlich erst recht für das Mikro-Pulverspritzgießen, da hier eher weiche statt besonders harte Werkzeugmaterialien zum Einsatz kommen.

Als Ergebnis der höheren Wärmeleitfähigkeit sind die Fließwege und minimalen Wanddicken beim Pulverspritzgießen stärker limitiert als bei Verwendung von reinen Kunststoffen. Die relativ geringe Grünfestigkeit erfordert außerdem eine größere Anzahl von Auswerfern bzw. größerer Stirnfläche.

Was die maschinelle Ausrüstung betrifft stützt sich das Pulverspritzgießen im Wesentlichen auf die konventionelle Technologie. Größere Unterschiede gibt es vor allem bei den Spritzeinheiten, welche eines zusätzlichen Verschleisschutzes (Hartverchromung oder sogar vollständig aus Hartmetall) bedürfen sowie modifizierte Schneckengeometrien mit reduzierten Kompressionsverhältnissen und relativ kurzen L/D-Proportionen aufweisen.

Wie schon zuvor erwähnt liegt ein wesentlicher Vorteil des Pulverspritzgießens in der großen Bandbreite von prozessierbaren Materialien. So kann in erster Näherung jeder sinterfähige Pulverwerkstoff verarbeitet werden. Einen Überblick der gegenwärtig beim Mikro-Pulverspritzgießen verwendeten Materialien gibt Tabelle 1. Aber auch hierbei handelt es sich nur um eine Momentaufnahme, da die Werkstoffpalette ständig erweitert wird.

Tabelle 1: Derzeit für das Mikro-Pulverspritzgießen untersuchte Materialien, mittlere Partikeldurchmesser und kritische Geometrieckenngößen.

Werkstoff	mittlerer Partikel-Ø D ₅₀ [µm]	maximales AR*	min. laterale Abmessungen [µm]
Edelstahl 316L (1.4404)	1,5 - 5 (bis zu 12)	1 - 5 (bis zu 10)	50 (bis zu 5 bei AR<1)
Aushärtungsstahl 17-4PH (1.4542)	3 - 5 (bis zu 12)	1 - 5 (bis zu 10)	50 (bis zu 20)
Carbonyl Eisen	1,5 - 5	bis zu 15	bis zu 10
Nickel-Eisen (NiFe)			≤ 60
Titanlegierungen	≥ 20		
Kupfer	0,5 - 2	(bis zu 100)	bis zu 10

Kupfer-Diamant		6	250
Wolfram-Kupfer (WCu)	1,5 - 3		≤ 30
Wolframlegierungen	0,5 - 6		
Hartmetall (WC-xCo)	0,5 - 4	bis zu 10	50 (bis zu 20)
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	0,4 - 1,5	bis zu 10	≤ 30
Zirkoniumoxid (ZrO ₂)	< 0,1 – 0,8	> 10	≤ 10

* AR = Aspect Ratio = Aspektverhältnis = Verhältnis von Strukturhöhe zu -breite

2.3 Entbindern

Mit diesem Schritt wird die nahezu vollständige Eliminierung des organischen Binders vorgenommen ohne dass dabei die Geometrie und Reinheit des verbleibenden Pulvergerüsts negativ beeinflusst werden. Gegenwärtig finden verschiedene Methoden Anwendung, die wohl häufigsten sind das flüssig- und das thermische Entbindern.

Beim Flüssigentbindern wird der Grünling in einem geeigneten Lösungsmittel platziert wo vor allem niedermolekulare Binderbestandteile extrahiert werden. Das thermische Entbindern kann durch Kettendegradation, Verdampfung oder Schmelzextraktion bewerkstelligt werden. Beim MicroPIM werden nicht selten flüssig- und thermische Entbinderung nacheinander durchgeführt, um eine möglichst schonende Binderextraktion zu gewährleisten.

Die Entbinderungszeiten hängen sehr stark vom verwendeten Bindersystem bzw. den maximalen Wanddicken des Grünlings ab und können mehrere Stunden bis Tage betragen. In diesem Punkt profitiert das Mikro-Pulverspritzgießen von den geringen Abmessungen der Bauteile, insbesondere den kurzen Distanzen von der Oberfläche zum Bauteilinnern. Die zeitabhängigen Wärme- und Materialtransportvorgänge können daher schneller ablaufen ohne dass kritische Temperatur- bzw. Konzentrationsgradienten entstehen. Die Entbinderungszeiten sind somit kürzer als beim makroskopischen PIM.

2.4 Sintern

Im vierten Prozessschritt wird der entbinderte Grünling – nun Braunling genannt – zum fertigen Bauteil verdichtet, d.h. gesintert. Abhängig vom Material und der Pulvermorphologie werden nach dem Sintern Dichten von 96 bis fast 100% der theoretisch möglichen Werte gemessen. Das Pulverspritzgießen liegt damit auf gleicher Höhe wie z.B. das Presssintern und nur wenig unter den schmelzmetallurgischen Prozessen.

Abhängig vom Pulvertyp bzw. der Pulvermischung finden Fest- oder Flüssigphasensinterprozesse statt. Dabei liegt die thermodynamisch treibende Kraft in der Verringerung der Oberfläche, weshalb überzogene Sinterläufe auch in der Regel zu deformierten Bauteilen führen.

Der Sintervorgang kann im einfachsten Fall unter Luftatmosphäre (bei Oxidkeramiken), im Vakuum oder unter Inertgas durchgeführt werden. Bei metallischen Werkstoffen muss aufgrund der ausgeprägten Oxidationsneigung nicht selten unter reinem Wasserstoff (reduzierende Atmosphäre) gesintert werden. Diese Maßnahmen sind material- und nicht dimensionsabhängig und gelten damit gleichfalls für das MicroPIM.

Die Verdichtung während des Sinterns bewirkt eine Volumenreduzierung um 35 bis 50%, nämlich genau den Raumanteil, der im Grünling vom Binder eingenommen wurde. Damit ergibt sich ein linearer Schrumpf von ca. 15 bis 23%, welcher vor allem vom Pulver-Binder Verhältnis im Feedstock abhängig ist. Grundsätzlich ist der Fertiger bestrebt, den Sinterschrumpf niedrig zu halten, d.h. einen möglichst hohen Pulverfüllgrad einzustellen. Dem sind allerdings durch die dann steigende Viskosität des Feedstocks natürliche Grenzen gesetzt. Diese Einschränkung gilt insbesondere für das Mikro-Pulverspritzgießen. Da der Sintervorgang ohne Formzwang durchgeführt wird, stellt die exakte Beherrschung des Sinterschrumpfes eine wesentliche Voraussetzung für die Einhaltung der Dimensionstoleranzen dar. Hierin liegt eine essentielle Fragestellung für alle Formgebungsprozesse einschließlich dem MicroPIM, welche einen Sinterschritt beinhalten.

Wie schon im Fall des Entbinderungsschrittes kommen auch beim Sintern die geringen Dimensionen von Mikrobauanteilen positiv zum Tragen, d.h. es ergeben sich im Vergleich zu makroskopischen Produkten deutlich geringere Temperaturgradienten zwischen Oberfläche und Kern. Heiz- und Kühlraten können somit höher gewählt werden, was wiederum zu kürzeren Zykluszeiten führt.

Im Anschluss an das Sintern erfolgen meist weitere (thermische) Nachbearbeitungsschritte (Härten, Anlassen, heissisostatisches Pressen etc.) und ggf. mechanische Nachbearbeitungen (Schleifen, Polieren).

3. Aktueller Stand MicroPIM

Wie die oben angeführten Aktivitäten im öffentlichen Forschungs- wie industriellen Fertigungssektor erkennen lassen, ist die Entwicklung des MicroPIM von großer wissenschaftlicher und technischer Bedeutung [Pio11]. Zur Skizzierung der technischen Leistungsfähigkeit des Verfahrens sind in Tab. 2 einige kritische Dimensionen für verschiedene Werkstoffklassen aufgelistet.

Tabelle 2: Wichtige Kenndaten zum aktuellen Stand des MicroPIM. Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für Mikrospritzgießen mit reinen Polymeren hinzugefügt. Es ist offensichtlich, dass die Partikelgröße die Abbildegenauigkeit und erreichbare Oberflächenqualität wesentlich beeinflusst.

Werkstoff- klasse	min. laterale Abmessungen [μm]	min. Details [μm]	AR, herausstehende Strukturen	Toleranzen [\pm %]	Oberflächenqualität* $R_{\text{max}} / R_{\text{a}}$ [μm]
Metalle	10	5	10	0,5	7 / 0,8
Keramiken	≤ 10	≤ 3	< 15	0,4 (0,1**)	<3 / 0,2
Polymere	1	< 0,1	20 (200*)	0,05	0,05 / 0,05

* = abhängig von Beschaffenheit des Formeinsatzes ** = nach gründlicher Prozessoptimierung

Die folgenden Abbildungen zeigen Aufnahmen von MicroPIM-Bauteilen aus Metall oder Keramik. Neben Beispielen aus der Forschung sind auch reale Produkte, die bereits auf dem Markt erhältlich sind nebst ihren Herstellern, aufgeführt.

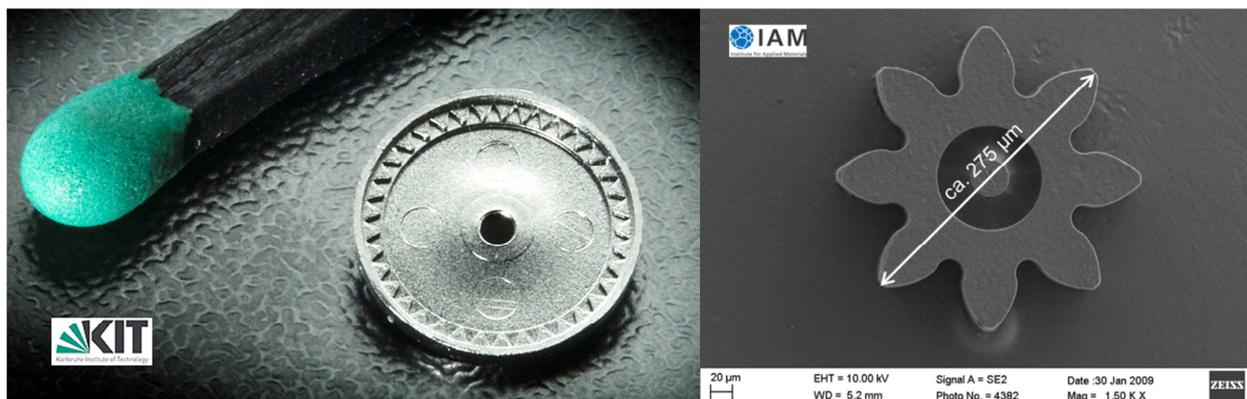


Abb. 1, 2: Zahnringplatte eines Mikro-Planetengetriebes aus 17-4PH Stahl (links). REM-Aufnahme eines Mikrozahnrades für ein Planetengetriebe aus Zirkonoxid (rechts).

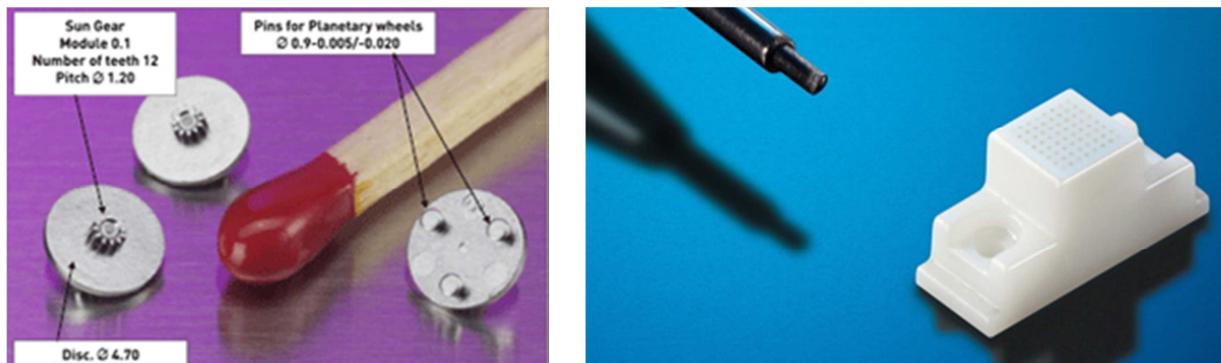


Abb. 3, 4: Bauteile für Uhrengetriebe aus Edelstahl, Parmaco Metal Injection Molding AG, Schweiz (links). Keramischer IT Connector, Durchmesser der 64 achteckigen Durchgangsöffnungen 125 μm , Formatec Technical Ceramics bv, Niederlande (rechts).

3. Mehrkomponenten-Mikrospritzgießen

Es bedarf keiner tiefschürfenden Erklärung dass der Zusammenbau von einzelnen Mikrokomponenten zu kompletten Systemen aufgrund der geringen Abmessungen eine komplizierte und daher kostenträchtige Angelegenheit darstellt. Hinzu kommt der in Mikrodimensionen starke Einfluss von z.B. Adhäsionskräften. Bedenkt man ferner, dass auch in der Mikrosystemtechnik in steigendem Maße multifunktionale Komponenten aus mehreren Werkstoffen benötigt werden so ist die Entwicklung von neuen Verfahrensvarianten erforderlich, beispielsweise das sog. 2-Komponenten-Mikrospritzgießen [Isl12]. Bei dieser Prozessführung werden gleichzeitig oder zeitlich versetzt mindestens zwei unterschiedliche Formmassen in ein temperiertes Werkzeug eingespritzt, um ein Verbundteil bereits während der Formgebung zu erzeugen. Die so erzeugten Mikroteile bestehen meist aus einer Kombination von Materialien mit unterschiedlichen, nicht selten gegensätzlichen, Eigenschaften, z.B. elektrisch leitend / isolierend oder magnetisch / unmagnetisch.

Der „Verschnitt“ des Mehrkomponenten-Spritzgießens mit dem MicroPIM führt zum 2K-Mikro-Pulverspritzgießen, dessen Entwicklung im Folgenden dargestellt wird.

Diese Variante stellt eine besondere prozesstechnische Herausforderung dar, da im Grunde drei Sondervarianten in einer zusammengeführt werden sollen [Fin05]. Dabei werden nahezu gleichzeitig (mindestens) zwei mit unterschiedlichen Pulvern gefüllte Formmassen in ein temperiertes Werkzeug eingespritzt, um einen Grünling des Verbundteiles herzustellen. Damit auch ein maßtreues und stabiles Sinterteil entsteht müssen aber noch weitere Hürden genommen werden. Unter anderem muss eine vollständige Formfüllung der mikrostrukturierten Bereiche, eine deformationsfreie Entformung, ein ebenfalls deformationsfreies Entbindern sowie ein verzugfreies Sintern durch homogenen Schrumpf gewährleistet sein.

Die hergestellten Verbund-Bauteile aus verschiedenartigen Werkstoffen können neben ihrer mechanischen und thermischen Belastbarkeit z.B. aus einer Kombination von elektrisch leitender und isolierender Keramik oder aus einem Verbund von magnetischen und nicht magnetischen Stählen bestehen. Für 2-Komponenten-PIM in Makrodimensionen liegt bereits einschlägige Literatur vor, siehe z.B. [Alc98, Mae06, Mul10, Pet10, Man11]

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten zum 2C-MicroPIM am KIT-IAM sind u.a. keramische Formmassen basierend auf einer Mischung aus isolierendem Aluminiumoxid und elektrisch leitfähigem Titanitrid entwickelt worden. Hierbei dient das Aluminiumoxid als Matrixmaterial; die elektrische Leitfähigkeit der fertigen Keramik kann innerhalb von bestimmten Grenzen über den Anteil an perkoliertem Titanitrid in der Matrix variiert werden. Die Feedstocks wurden im 2C-Spritzgießprozess zu Heizleitern abgeformt. Dabei konnte die Lage der Bindenaht entweder durch den Einsatz eines in das Werkzeug eingebauten Schiebers oder durch die geeignete Wahl der Spritzgießparameter, z.B. der Einspritzgeschwindigkeit, eingestellt werden.

Die weitere Entwicklung des Verfahrens wurde anhand einer Welle-Nabe-Verbindung als Demonstrator erforscht: Ein Zahnrad, bestehend aus Zirkonoxid und eine Welle mit

verstärktem Wellenbund aus Aluminiumoxid (Abb. 5, 6). Die besondere Herausforderung bestand darin, sowohl bewegliche als auch feste Verbindungen herzustellen.

Eine feste Verbindung muss eine definierte Verbundfläche zwischen Zahnrad und Welle aufweisen, die zu einer ausreichenden Verbundfestigkeit führen soll. Gleichzeitig waren Spannungen in beiden Komponenten zu vermeiden oder auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Um dies zu gewährleisten, mussten Materialauswahl und Prozessführung so angepasst werden, dass Zahnrad und Welle nahezu simultan sintern, d.h. dass beide Komponenten im Schrumpfmaß als auch in der Sinterkinetik weitgehend identisch sind.

Für die bewegliche Verbindung gelten fast umgekehrte Paradigmen, d.h. die Prozessparameter und die Materialkombination waren so zu wählen, dass die Welle aus Aluminiumoxid früher zu sintern beginnt als das Zahnrad aus Zirkonoxid und auch absolut ein höheres Schrumpfmaß aufweist. Nur in diesem Falle und bei einem entsprechenden Werkzeugdesign konnte sich zwischen Zahnrad und der Achse ein Spalt ausbilden, der für Rotationsbewegungen des Zahnrades Voraussetzung ist.

Frühe Untersuchungen an zweikomponentigen Welle-Nabe-Verbindungen zeigten, dass feste Verbindungen reproduzierbar hergestellt werden können. Die Realisierung beweglicher Verbindungen konnte anfangs nur prinzipiell dargestellt werden und gestaltete sich wesentlich diffiziler, u.a. mussten umfangreiche Modifikationen sowohl am Werkzeug als auch an der Zusammensetzung der beiden Pulverfraktionen vorgenommen werden [Ruh10, Ruh11]. Letzlich gelang es aber doch, feste und bewegliche Verbindungen prozesssicher ohne Zwischenschritte zu realisieren wie die folgenden Abbildungen belegen.

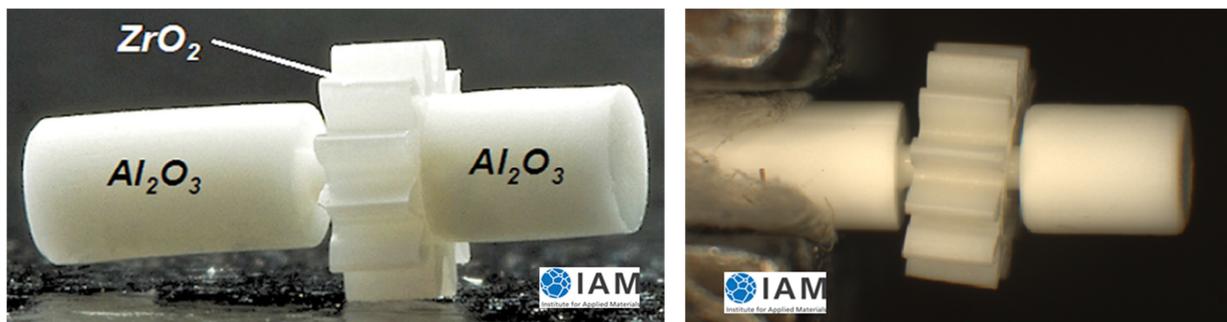


Abb. 5, 6: Feste (links) und bewegliche (rechts) Zahnrad-Welle Kombinationen aus zwei verschiedenen Keramiken, jeweils im gesinterten Zustand. Schaftdurchmesser im Fügebereich 0,65 mm, Aussendurchmesser des Zahnrades jeweils ca. 2,93 mm.

4. Ausblick

Um es kurz zu fassen, MicroPIM offeriert die Möglichkeit, die Materialeigenschaften von metallischen und keramischen Werkstoffen mit der hohen Wirtschaftlichkeit des mehr und mehr etablierten Mikrospritzgießens zu kombinieren.

Die Gründe für die hohe Attraktivität seien hier noch einmal zusammengefasst:

- Sehr hohe Wirtschaftlichkeit bei mittleren und vor allem großen Serien.

- Eine große Bandbreite von metallischen und keramischen Werkstoffen ist bereits jetzt oder wird in Zukunft für die Verarbeitung verfügbar sein.
- Es können auch funktionelle Materialien wie hart/weich magnetisch, leitfähige Keramiken etc. verwendet werden.
- Komponenten mit komplexen Geometrien können mit ohne oder mit nur geringem Nachbearbeitungsaufwand hergestellt werden.
- Die Basisausrüstung ist kommerziell verfügbar.

Als die derzeit wichtigsten Trends in der Fortentwicklung können genannt werden:

Optimierung des Verfahrens in allen Prozessstufen insbesondere zur Verringerung von Entmischungseffekten. Letztere sind als wesentliche Ursache für geometrische Verwerfungen oder Fehlstellen im Gefüge anzusehen. Eine online Detektionsmöglichkeit zur Fehlerfrüherkennung wäre wünschenswert. In eine ähnliche Richtung gehen die Bemühungen, die Maßabweichungen in den Sinterbauteilen unter die $\pm 0,1$ % Schwelle zu drücken. Auch hier spielen wieder Entmischungseffekte eine wichtige Rolle aber auch Fragen der Feedstockaufbereitung und der Parameterkonstanz sind nicht zu vernachlässigen. In diesem Zusammenhang muss auch die Ertüchtigung existierender Software-Programme unter Implementierung MicroPIM spezifischer Effekte Erwähnung finden.

Speziell für das MicroPIM zielt eine wesentliche Entwicklung auf den Einsatz feinerer Pulver, insbesondere bei den metallischen Werkstoffen. An mehreren Forschungseinrichtungen wurde auch schon damit begonnen, keramische Feedstocks mit Zusätzen ultrafeiner oder gar nanodisperser Fraktionen zu entwickeln [Raj12], um noch kleinere Details und höhere Oberflächenqualitäten erreichen zu können.

Last not least dürfen an dieser Stelle auch die diversen Ansätze zur Herstellung mehrkomponentiger Mikrobauteile nicht unerwähnt bleiben.

Darunter fallen nicht nur das oben erläuterte 2C-MicroPIM sondern auch andere Methoden wie das in-mold-labeling mit PIM-Feedstocks (IML-MicroPIM) [Bau08, Vor10] oder das Sinterfügen [Ruh08]. Dabei ist ausdrücklich festzuhalten, dass es nicht nur um eine wirtschaftliche Einsparung von Montageschritten geht sondern auch um die Erzeugung multifunktionaler Bauteile, die auf anderen Wegen nur umständlich zu generieren wären.

Danksagung

Der Autor dankt allen seinen Kollegen am KIT für die freundschaftliche und stets hilfreiche Zusammenarbeit. Ferner gilt der Dank den externen Partnern, insbesondere der DFG, der EU und dem BMBF, sowie den vielen kooperierenden Firmen.

Die dargestellten F+E Aktivitäten wurden teilweise mit Unterstützung der Karlsruhe Nano Micro Facility (KNMF, www.knmf.kit.edu), einem Helmholtz-Forschungsnetzwerk am Karlsruher Institut für Technologie (KIT, www.kit.edu), durchgeführt.

Literatur

- [Alc98] J.R. Alcock, P.M. Logan, D.J. Stephenson: Surface engineering by co-injection moulding. *Surface and Coatings Technology*, 105, Elsevier Science S.A. (1998), pp. 65-71.
- [Bau08] A. Baumann, M. Brieseck, S. Höhn, T. Moritz and R. Lenk: Development in multi-component powder injection moulding of steel-ceramic compounds using green tapes for inmould label process. *Powder Injection Moulding International*, 2, 1 (2008), pp. 55-58.
- [Fin05] G. Finnah, G. Örylgsson, V. Piotter, R. Ruprecht, J. Hausselt: 2K-Mikro-Pulverspritzgießen. Drei Sonderverfahren in einem. *Kunststoffe*, 95, 1 (2005), pp. 58-61.
- [Ger10] R.M. German: Materials for Microminiature Powder Injection Moulded Medical and Dental Devices. *Int. Journal of Powder Metallurgy*, Vol. 46, 2 (2010), pp. 15-18.
- [Ger12] R.M. German: Markets applications, and financial aspects of global metal powder injection moulding (MIM) technologies. *Metal Powder Report January/February 2012*, 0026-0657 (2012), pp. 18-26.
- [Han11] T. Hanemann, R. Heldele, T. Mueller, J. Haußelt: Influence of stearic acid concentration on the processing of ZrO₂-containing feedstocks suitable for micro powder injection molding; *Int. Journal of Applied Ceramic Technology*, 8(4) (2011), pp. 865-872
- [Isl12] A. Islam et al.: Two-component micro injection moulding for hearing aid applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 62 (2012), pp. 605-615.
- [Joh01] F. Johannaber, W. Michaeli: *Handbuch Spritzgießen*, Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-15632-1 (2001), pp. 646-656.
- [Kir12] S. Kirchberg et al.: Replication of precise polymeric microlens arrays combining ultra-precision diamond ball-end milling and micro injection molding. *Microsyst. Technol.* 18 (2012), pp. 459-465.
- [Kuh10] S. Kuhn, A. Burr, M. Kübler, M. Deckert, C. Bleesen: Study on the replication quality of micro-structures in the injection molding process with dynamical tool tempering systems. *Microsyst. Technol.* 16 (2010), pp. 1787-1801.

- [Mae06] M. Maetzig, H. Walcher: Assembly moulding of MIM materials; Proc. Euro PM 2006 - Powder Metallurgy Congress & Exhibition, 23.-25.10.2006; Published by EPMA, ISBN 978-1-899072-33-0; Vol. 2 (2006), pp. 43-48.
- [Man11] A. Mannschatz, T. Moritz, S. Jegust, M. v.Witzleben: Enabling Co-Sintering of ATZ/ZTA Ceramic Compounds by Two-Component Injection Moulding with Green tapes as Interlayers; Proc. Euro PM2011, Vol. 2, European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury, UK, ISBN 978-1-899072-21-7 (2011), pp. 171-176.
- [Mic05] W. Michaeli, T. Pfefferkorn, T.: Keramikpulverspritzgießen – Einfluss des Spritzgießprozesses auf die Qualität komplexer Bauteile, Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology I 06/2005, Carl Hanser Verlag (2005), pp. 1-18.
- [Mor09] T. Moritz, R. Lenk: Ceramic injection moulding: a review of developments in production technology, materials and applications. Powder Injection Moulding International, Vol. 3 (3), Inovar Communications Ltd. (2009), pp. 23-34.
- [Mul10] M. Mulser, G. Benedet Dutra, J. Rager, F. Petzoldt: Influence of a Mismatch in Shrinkage for Two-Component Metal Injection Moulding (2C-MIM); Proc. World PM 2010. 10.-14.10.2010, Florence, Italy: Shrewsbury: EPMA, 2010, Vol.4 (2010), pp. 527-534.
- [Pet08] F. Petzoldt: Micro powder injection Moulding – challenges and opportunities. Powder Injection Moulding International, Vol. 2, No. 1, Inovar Communications Ltd. (2008), pp. 37-42.
- [Pet10] F. Petzoldt: Multifunctional parts by two-component Powder Injection Moulding (2C-PIM). Powder Injection Moulding International, Vol. 4, No. 1 (2010), pp. 21-27.
- [Pio08] V. Piotter, W. Bauer, T. Hanemann, M. Hecke, C. Mueller: Replication technologies for HARM devices: status and perspectives. Microsystem Technologies, Vol. 14 (2008), pp. 1599-1605.
- [Pio11] V. Piotter: A review of the current status of MicroPIM, Part 1: Materials, processing, microspecific considerations and applications, Powder Injection Moulding, Vol. 5, No. 3, Inovar Communications Ltd. (2011), pp. 27-36. Part 2: Screw injection units, simulation and process variants, Powder Injection Moulding, Vol. 5, No. 4, Inovar Communications Ltd. (2011), pp. 25-30.
- [Raj12] J. Rajabi, N. Muhamad, A.B. Sulong: Effect of nano-sized powders on powder injection molding: a review. Microsyst. Technol. 18 (2012), pp. 1941-1961.

- [Ruh08] A. Ruh, A.-M. Dieckmann, R. Heldele, V. Piotter, R. Ruprecht, C. Munzinger, J. Fleischer, J. Haußelt: Production of two-material micro assemblies by two-component powder injection moulding and sinter-joining. *Microsystems Technology*, 14 (2008), pp. 1805-1811.
- [Ruh10] A. Ruh, V. Piotter, K. Plewa, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt: Effects of material improvement and injection moulding tool design on the movability of sintered two-component micro parts. *Microsystem Technologies*, 16 (2010), pp. 1989 – 1994.
- [Ruh11] A. Ruh, T. Hanemann, R. Heldele, V. Piotter, H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haussele: Development of Two-Component Micropowder Injection Molding (2C MicroPIM): Characteristics of Applicable Materials. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8(1) (2011), pp. 194-202.
- [Sli12] G. Schlieper: Innovation helps producer of CIM products for luxury applications expand into new markets. *Powder Injection Moulding International*, Vol 6, No 1 (2012), pp. 47-51.
- [Smi09] H. Schmidt: Entscheidungshilfe in der Praxis. *Kunststoffe* 11 (2009), pp. 54-58.
- [Vor10] E. Vorster, V. Piotter, K. Plewa, A. Kucera: Micro Inmould Labelling Using PIM-Feedstocks. *Proceedings of Powder Metallurgy 2010 World Congress, EPMA*, ISBN: 978 1 899072 13 2, Vol. 4 (2010), pp. 505-510.
- [Wal12] H. Walcher, M. Maetzig: Funktionsbauteile aus unterschiedlichen Metallpulvern. *Kunststoff* 7 (2012), pp. 52-55.
- [Xie10] L. Xie, S. Kirchberg, L. Steuernagel, G. Ziegmann: A mechanism influencing micro injection molded weld lines of hybrid nano filled polypropylene. *Microsyst. Technol.* 16 (2010), pp. 1855-1859.