



---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 7272

**Micro-P-PIM**  
**Pulverspritzgießen**  
**nachbearbeitungsarmer**  
**Mikropräzisionsbauteile**  
**aus Keramik und Metall**  
**Abschlussbericht des**  
**BMBF-Projekts Micro-P-PIM**

**R. Ruprecht, V. Piotter**  
Institut für Materialforschung

**Juni 2006**



**Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7272

**Micro-P-PIM**

**Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer  
Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall**

Abschlussbericht des BMBF-Projekts Micro-P-PIM

zusammengestellt von

Robert Ruprecht und Volker Piotter

Institut für Materialforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2006

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-072723

## Vorwort

### Zum Projekt Micro-P-PIM

Das Projekt **Micro-P-PIM** mit dem Titel „Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Themenfeld „Hochleistungsfertigungsverfahren“ des Rahmenkonzepts „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert. Es wurde von der Projektträgerschaft Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) des BMBF in Bereich Produktionstechnik betreut.

Die Kurzbezeichnung Micro-P-PIM entstand aus dem englischen Titel des Projektes „**Micro Precision Parts made by Powder Injection Molding**“ in Anlehnung an die weltweit - auch in Deutschland - etablierte Bezeichnung „PIM“ für das Pulverspritzgießen.

Das Projekt wurde von folgenden Partnern bearbeitet (alphabetische Reihenfolge):

- Arburg GmbH + Co KG, Lossburg
- Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe
- FRIATEC Aktiengesellschaft, Division FRIALIT.DEGUSSIT, Mannheim
- Junghans Feinwerktechnik GmbH & Co. KG, Schramberg (Federführung)
- Schunk Sintermetalltechnik GmbH, Gießen
- ZMU Zentrum für Material- und Umwelttechnik GmbH, Freiberg

sowie

- ADC Krone GmbH, Berlin (assoziiertes Partner)
- Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, Schönaich (Unterauftragnehmer)

### Zum FZKA-Bericht

Bei diesem Bericht handelt es sich um den wissenschaftlich-technischen Teil des Abschlussberichts des Projekts Micro-P-PIM, das vom BMBF unter Förderkennzeichen 02PD213 ab Projektstart 01.10.2002 gefördert wurde. Der Bericht erscheint als FZKA-Bericht des Forschungszentrum Karlsruhe, damit er mit einer ISSN-Nummer versehen als Veröffentlichung zitierbar ist und verbreitet wird. Er wurde aus Beiträgen aller Projektpartner vom Institut für Materialforschung III zusammengestellt und enthält die Präsentationen, die die Vortragenden (unterstrichen) anlässlich des Abschlusskolloquiums am 11.10.2005 eingebettet in den Mikrosystemtechnik-Kongress in Freiburg gegeben haben, sowie Textbeiträge aus den Arbeitskreisen zu den Ergebnissen bis zum Projektende am 31.12.2005.

### Danksagung

Die Projektpartner bedanken sich gerne auch an dieser Stelle

- beim BMBF für die Förderung über drei Jahre zu integral 50% Förderrate,
- beim Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) für effiziente Begutachtung und angenehme Betreuung,
- bei unseren Geschäftsleitungen für die Förderung der Arbeiten und Investitionen,
- bei unseren Kollegen für die tatkräftige Unterstützung,
- bei den jeweils anderen Projektpartnern für effiziente und erfolgreiche Projektarbeit.



## INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort .....	I
Programm des Abschlusskolloquiums des BMBF-Projekts Micro-P-PIM .....	V
Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall: Projektübersicht zu Micro-P-PIM .....	3
Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik für das Pulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen.....	17
Simulation des Pulverspritzgießprozesses für Probekörper .....	39
Toleranzen von pulverspritzgegossenen Präzisionsteilen aus ZrO <sub>2</sub> -Keramik am Beispiel von Ferrulen .....	57
Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Keramik für die Medizintechnik .....	79
Metallpulver-Spritzgießen von Präzisionsbauteilen für Kleingetriebe .....	103
Verwertung der Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM .....	137





## Statusseminar Pulverspritzguss 1



Dienstag, 11.10.05, 13:00 – 15:00 Uhr

### Micro-P-PIM

**Grußwort zum Abschluss des BMBF-Projekts Micro-P-PIM**  
J. Fuchs, G. Rache



**Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall: Projektübersicht zu Micro-P-PIM**

R. Ruprecht, J. Pannhorst

**Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik für das Pulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen**

M. Maetzig, H. Walcher, J. Pannhorst, W. Grieb

**Simulation des Pulverspritzgießprozesses für Probekörper**

R. Heldele, V. Piotter, K. Müller, M. Rohde, R. Ruprecht, M. Schulz, J. Haußelt, J. Pannhorst

## Statusseminar Pulverspritzguss 2



Dienstag, 11.10.05, 15:30 – 17:40 Uhr

### Micro-P-PIM

**Keramikpulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen am Beispiel von Ferrulen**

M. Beck; K. Müller, V. Piotter, R. Ruprecht, J. Haußelt

**Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik für die Medizintechnik**

H. Mayer, G. Bitz, S. Yanarsönmez, R. Ruprecht, G. Örlygsson, R. Heldele

**Metallpulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen für Kleingetriebe**

F. Baumgärtner, M. Endres, J. Pannhorst, R. Ruprecht, C. Thürigen, A. Paul

**Verwertung der Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM**

J. Pannhorst, F. Baumgärtner, M. Maetzig, H. Mayer, R. Ruprecht, C. Thürigen



## Micro-P-PIM



## Grußwort

### zum Abschluss des BMBF-Projekts Micro-P-PIM

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

In Vertretung für Dr. G. Rache, BMBF  
von Dr. J. Fuchs, Projektträger PTKA

Mikrosystemtechnik-Kongress, Freiburg, 11. Oktober 2005

**Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile  
aus Keramik und Metall: Projektübersicht zu Micro-P-PIM**



# Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall: Projektübersicht zu Micro-P-PIM

Robert Ruprecht<sup>1)</sup>, Johann Pannhorst<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe, IMF-III, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

<sup>2)</sup> JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH Co. KG, Geißhaldenstr. 49, D-78713 Schramberg

## Kurzfassung

Im BMBF-Projekt Micro-P-PIM wurde das „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ als ein Hochleistungs-Produktionsverfahren entwickelt. Mit diesem Massenfertigungsverfahren werden künftig Produktkomponenten dem aktuellen Trend zunehmender Präzision und Miniaturisierung folgend wirtschaftlich hergestellt. Potentielle Märkte für Präzisionsbauteile zeichnen sich in vielen Bereichen der Feinwerk- und Mikrotechnik ab, besonders in der Medizin, Chemie und Aktuatorik.

Für nachbearbeitungsarme Bauteile wurden erfolgreich Maschinen- und Werkzeugtechnik sowie Formmassen und die Prozesstechnik zum Pulverspritzgießen realisiert. Der Erfolg wird durch die Realisierung von 4 Bauteilen aus Oxidkeramik oder Stahl mit Präzision bis nahe dem Mikrometerbereich demonstriert. Die technischen Voraussetzungen für die geplante industrielle Nutzung der Entwicklungen sind geschaffen.

## 1 Einleitung

Stückkosten und Qualität pulvertechnologisch gefertigter Bauteile werden durch den Bedarf und Aufwand an Nachbearbeitung entscheidend beeinflusst. Letztere gilt es, insbesondere für das Massenfertigungsverfahren Pulverspritzgießen von komplex geformten Präzisionsbauteilen deutlich zu reduzieren. Ziel des Projekts Micro-P-PIM war deshalb die Entwicklung des Pulverspritzgießprozesses (Powder Injection Molding=PIM) zur nachbearbeitungsarmen Produktionstechnik komplex geformter Mikropräzisionsbauteile aus Metall und Keramik. Die Bauteile weisen feinerwerktechnischen Abmessungen mit Toleranzen im Bereich unter einigen zehn Mikrometern auf. Diese Toleranz von deutlich unter 0,5 % der Bauteilabmessungen war weltweit nicht mit der herkömmlichen Pulverspritzgießtechnologie zu beherrschen, sondern nur realisierbar durch sehr aufwendige mechanische Nachbearbeitung der gesinterten Bauteile.

Das Pulverspritzgießen ist eine relativ junge Fertigungstechnologie mit sehr guten Wachstumsprognosen [KIR98]. Das Verfahren eignet sich besonders für komplexe dünnwandige oder feinerwerktechnische Bauteile aus Keramik und Metall [WHI98]. Die Maschinen- und Werkzeugtechnik baut auf dem Spritzgießen von Kunststoffen auf. Unter Verwendung eines Pulver-Binder-Gemischs als Formmasse (=Feedstock) erfolgt die Formgebung des Grünlings. Anschließend erfolgt das Entbindern der Grünlinge zum Braunling, Dieser sintert zu einem kompakten Bauteil mit üblicherweise mehr als 95 % der theoretischen Dichte. Das damit verbundene starke Schrumpfen der Bauteile wird durch Maßvorhalt in

der Form kompensiert und kann heute nur auf ca. 1 % der Bauteilabmessungen von Präzisionsbauteilen genau eingehalten werden [SCHU99].

Micro-P-PIM ist das Akronym für Micro Precision Powder Injection Molding, das Pulverspritzgießen für Mikropräzisionsbauteile. Im Falle von Metall spricht man vom Metallpulverspritzgießen, MIM oder Metal Injection Molding, für Keramikbauteile setzt man das Ceramic Injection Molding = CIM ein, beides ist als Powder Injection Molding = PIM benannt.

## 2 Arbeitsprogramm

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt Micro-P-PIM umfassten zum einen die Hard- und Software von Spritzgießmaschinen und die Werkzeugtechnik.

Für das Mikropulverspritzgießen wurden durch ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg, Spritzaggregate mit 12 mm Schneckendurchmesser entwickelt. Damit wird die Verweilzeit der Feedstocks in der Spritzeinheit reduziert und eine Polymerdegradation der Binder verhindert. Die Steuerung für das Mikrospritzgießen erlaubt eine präzise Einstellung des Schneckwegs und des Drucks in der Spritzeinheit.

Die Entwicklung der Werkzeuge (JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG, Schramberg) war eine weitere Voraussetzung für die Präzision von Außen- und Innenkonturen der feinerwerktechnischen Teilen mit Toleranzen bis in den Mikrometerbereich. Im Werkzeugbau wurden entsprechend den Anforderungen der Demonstratoren (ADC-KRONE AG Berlin, FRIATEC Aktiengesellschaft Mannheim, Schunk Sintermetalltechnik Gießen, JUNGHANS Feinwerktechnik) und Probekörper (Forschungszentrum Karlsruhe, Schunk,

FRIATEC) die Besonderheiten des Mikrospritzgießens bei sehr engen Toleranzen integriert.

Parallel erfolgten die Forschungsarbeiten zu Formmassen und Werkstoffen. Die geforderte Einengung der Toleranzen von PIM-Bauteilen wurde erfolgreich durch die Verwendung besonders feiner, reiner Ausgangspulver realisiert. Für den Stahl 17-4PH wurde durch Sichten der Anteil an Feinstpulver erhöht (ZMU = FNE Freiberg). Kommerziell erhältliche Keramikpulver auf Basis von  $Al_2O_3$  wurden in wässriger Suspension nachgemahlen, sinteraktiv konditioniert und sprühgetrocknet (FRIATEC) bzw. verschiedene Feedstocks auch mit  $Y_2O_3$ -stabilisiertem  $ZrO_2$ -Pulver compounding (FZ Karlsruhe, ARBURG).

Die Charakterisierung der Pulver und Formmassen erfolgte (ZMU, Schunk, FRIATEC, FZ Karlsruhe), um u.a. ein kommerzielles Simulationstool für das Kunststoffspritzgießen auf Anwendbarkeit für das Micro-P-PIM zu testen (JUNGHANS, FZ Karlsruhe). Für eine vollständige Formfüllung und eine deformationsfreie Entformung wurden für Mikropräzisionsbauteile geeignete Bindersysteme gefunden (FRIATEC, FZ Karlsruhe, Schunk).

Die Werkstoff-, Werkzeug- und Maschinentchnik wurde zur Erforschung und Entwicklung des eigentlichen Pulverspritzgießens zusammengeführt (FRIATEC, Schunk, JUNGHANS, FZ Karlsruhe). Durch die thermomechanische und chemische Analyse der Feedstocks wurden für die verschiedenen Feedstocks die geeigneten Entbinderungsverfahren entwickelt. Nachfolgend wurde das möglichst verzugsfreie Sintern realisiert (FRIATEC, FZ Karlsruhe, Schunk).

Der Reifegrad der prozesstechnischen Entwicklung wurde anhand der Demonstratoren Ferrule (FZ Karlsruhe, ADC-KRONE), Zahnblende (FRIATEC), Planetenträger (Schunk, Dr. Fritz FAULHABER GmbH & Co. KG, Junghans), und Getriebeschnecke (JUNGHANS) charakterisiert. Mit der Herstellung von Probekörpern werden Materialdaten sowie Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion von spritzgegossenen Mikropräzisionsbauteilen aus Keramik und Metall abgeleitet (FRIATEC, FZ Karlsruhe, JUNGHANS, Schunk).

Zur Charakterisierung von Ferrulen erfolgte eine hochgenaue geometrische Vermessung (FZ Karlsruhe, ADC KRONE). Neben der geometrischen Qualitätskontrolle für die Zahnblende (FRIATEC) erfolgten Fügeversuche mit einem Kiefernölbohrer bzw. -stift. Die Demonstratoren aus dem Stahl, nämlich Planetenträger (Schunk Sintermetalltechnik) und Getriebeschnecke (JUNGHANS), wurden in passenden Getrieben mit Metall- und/oder Kunststoffkomponenten gepaart, um das dynamische Verhalten und die Lebensdauer abzuschätzen (FAULHABER).

### 3 Gewinn

Mit der Umsetzung der Ergebnisse in die industrielle Produktion werden die Grenzen des heutigen Pulverspritzgießens hinsichtlich Genauigkeit, Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit signifikant erweitert. Die damit gewonnene Produktionstechnik - das „Micro-P-PIM“ für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall - kann auch dazu beitragen, die ehemals führende Position Deutschlands im Bereich der Präzisions- und Feinwerktechnik wieder zu erlangen. Mit dem „Hochleistungsfertigungsverfahren“ Pulverspritzgießen wird eine weltweit bedeutende Position erreicht, die auch auf dem europäischen Markt mittel- und langfristig Marktanteile sichert. Neue Märkte für Spritzgießmaschinen und -Werkzeuge, sowie Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall bilden die Basis für den Erhalt und die Schaffung von Arbeitsplätzen.

Die Innovation für neue Anwendungen der Pulverspritzgießtechnologie ist verbunden mit einer Reduzierung von Nachbearbeitung, Prozessschritten und Zykluszeiten und bringt somit mittel- und langfristig ökonomischen und ökologischen Gewinn. Beispiele für künftige Mikropräzisionsbauteile sind keramische Implantate für die Dentaltechnik, neue Komponenten für Mikrogetriebe und Zählwerke aus Metall.

Die Ergebnisse des BMBF-Projekts Micro-P-PIM sind in den folgenden Beiträgen detailliert dargestellt.

### 4 Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger PFKA für die zügige Begutachtung und Betreuung des Projekts (Förderkennzeichen 02PD213-0, bis -6), sowie unseren Geschäftsführungen für die konstruktive Unterstützung und strategische Entscheidung für das Projekt Micro-P-PIM.

### 5 Literatur

- [KIR98] C. Kirkland, R.M. German: „A look at the Market for Powder Injection Molding“; Injection Molding International; Chatham NJ, 3 (1998), pp. 10-12.
- [SCHU99] I. Langer, E. Förster, M. Enders: „Fortschritte beim pulvermetallurgischen Spritzgießen – Reproduzierbarkeit geometrischer und mechanischer Eigenschaften“; Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 15, Hrsg. H. Kolaska, VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Düsseldorf (1999).
- [WHI98] D. G. White: „State-of-the-North-American P/M Industry“; Proceeding of 1998 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Las Vegas, pp. XVII-XXII



## Micro-P-PIM



# Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikro-Präzisions-Bauteile aus Keramik und Metall

Projektübersicht zu

## Micro-P-PIM

R. Ruprecht <sup>1)</sup>, J. Pannhorst <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
<sup>2)</sup> JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG

Mikrosystemtechnik-Kongress, Freiburg, 11. Oktober 2005

Micro-P-PIM =



## Micro-P-PIM



Micro Precision Parts by Powder Injection Molding

### Inhalt

- Definition und Stand
- Motivation und Ziele
- Prozessbeschreibung
- Aufgaben und Synergien
- Demonstratoren, Ergebnisse
- Gewinn aus Micro-P-PIM

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

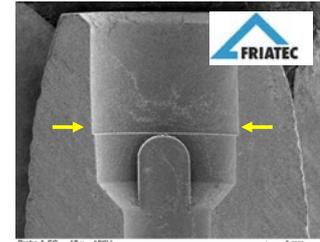
**ADC**  
 KRONE

**schunk**

**LMU**

- **Komplex geformte Mikro-Präzisionsbauteile:**

**Außenabmessungen**  
 analog **Feinwerktechnik,**  
 aber **Toleranzen im Mikrometerbereich**



Schnitt durch Zahnblende  
 Toleranz: **10 µm** auf Ø 3mm

## Lösung

- **Pulverspritzgießen** als ein Hochleistungsfertigungsverfahren

für **hochbelastbare** Bauteile  
 aus **Metall und Keramik**

für **dreidimensionale** Formgebung mit Freiformflächen  
 für **wirtschaftliche** Massenfertigung



FC-Stecker mit  
 Keramik-Ferrule  
 Toleranz: **1 µm** auf Ø 2 mm

# Was ist Pulverspritzgießen = PIM ?

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

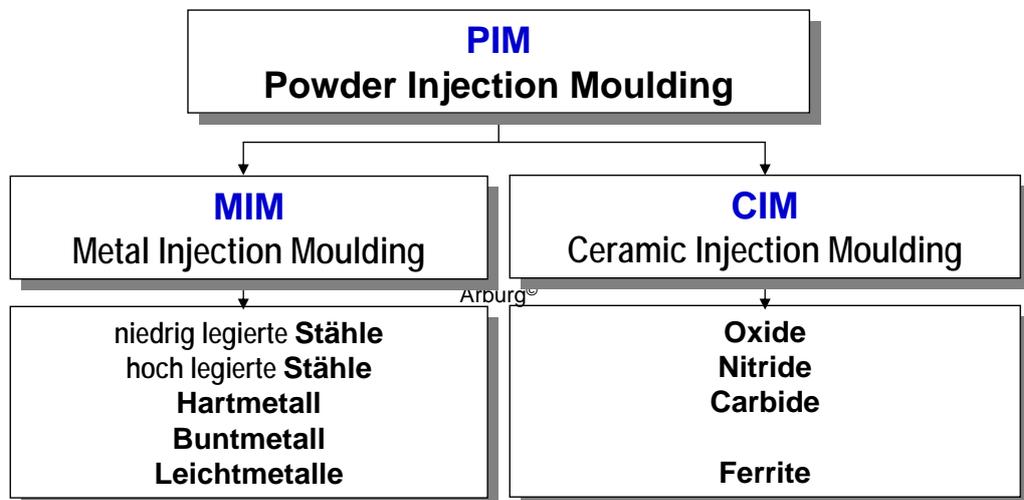
**FRIATEC**

**ADC**  
 KRONE

**schunk**

**LMU**

**Spritzgießen** mit Formmasse aus Pulver und Binder  
**Entbindern** des spritzgegossenen Grünlings zum Braunling  
**Sintern** des Braunlings im Ofen zu einem dichten Bauteil



**Stärken:** 3D, endkonturnah, automatisierbar, Stückzahlen  
**PIM-Markt weltweit:** EU, USA, J

### Micro-P-PIM

### Pulverspritzgießen:

Einfache Formgebung  
 durch polymere Binder

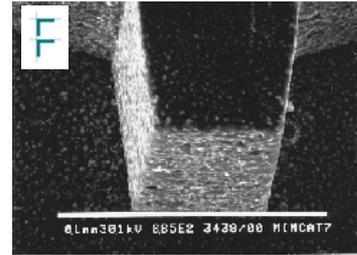
### Sintern:

Verdichtung des Pulvers  
 zu dichtem Bauteil

→ Formgebung und Sinterschrumpf unterliegen **Toleranz**

### Stand vor Projektbeginn

- Präzisionsbauteile durch Pulverspritzgießen:  
**ca. 1 % Toleranz im Endmaß**,  
 deshalb
- Aufwendige mechanische Hartbearbeitung:  
**teilweise über 50 % der Herstellungskosten**



Pulver bestimmt Rauheit:  
 MIM: Breite 50 µm, AR = 4:1

## Motivation und Aufgaben

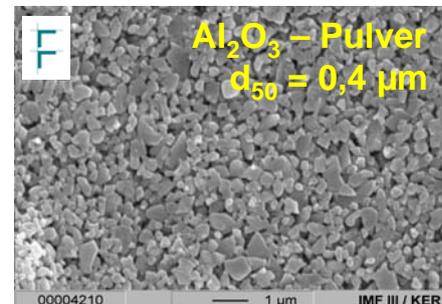
### Micro-P-PIM nachbearbeitungsarmer Bauteile

### Lösung

- feine Pulver in Formmassen = Feedstocks

### Herausforderung

- feine Pulver erhöhen die Viskosität der Feedstocks  
 → Parameter Spritzgießen  
 → ggf. neue Binder
- feines Pulver, enger Pulververbund, neue Binder  
 → Entwicklung Entbinderung
- feine Pulver haben  
 eine höhere Sinteraktivität → Anpassung Sintern



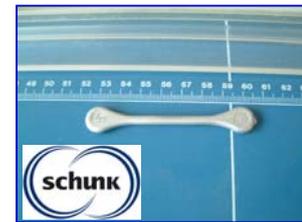
### Micro-P-PIM

## Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Bauteile

### Micro-P-PIM



- **Wirtschaftliche Produktion von Mikro-Präzisionsbauteilen aus Keramik und Metall**
- **für nachbearbeitungsarme Bauteile: Reduzierung der Sintertoleranz deutlich < 1%**
- **mit neuer Prozesstechnik, kürzere Zykluszeiten**
- **Gestaltungsrichtlinien  
 Simulationstool  
 Werkstoffdaten  
 Prüftechnik**



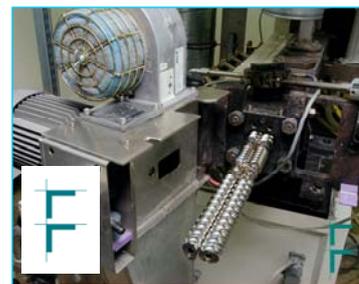
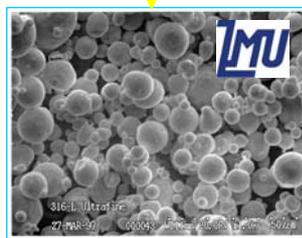
Zugstab (ISO 2740)  
 aus Stahl 17-4PH

## Pulver → Formmasse = Feedstock

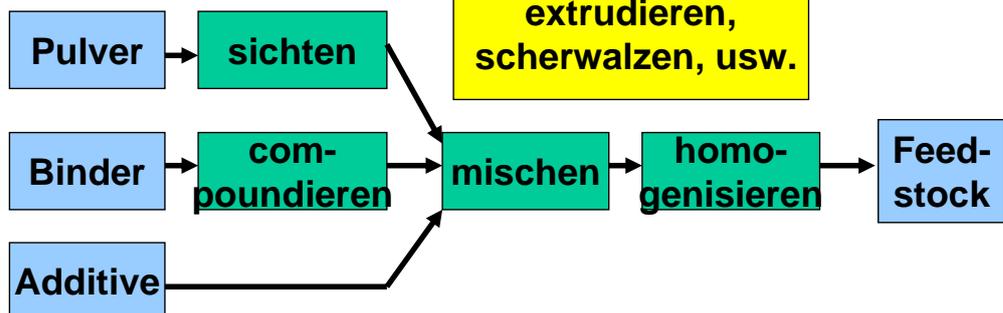
### Micro-P-PIM



**Pulver  
 charakterisieren**

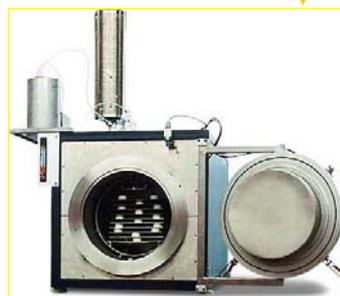
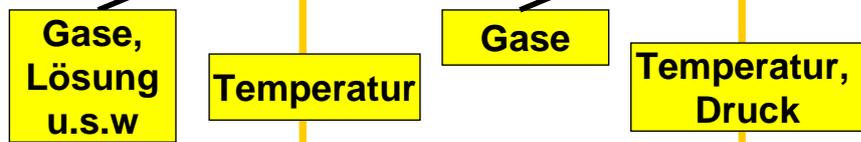


**Feedstock kneten,  
 extrudieren,  
 scherwalzen, usw.**





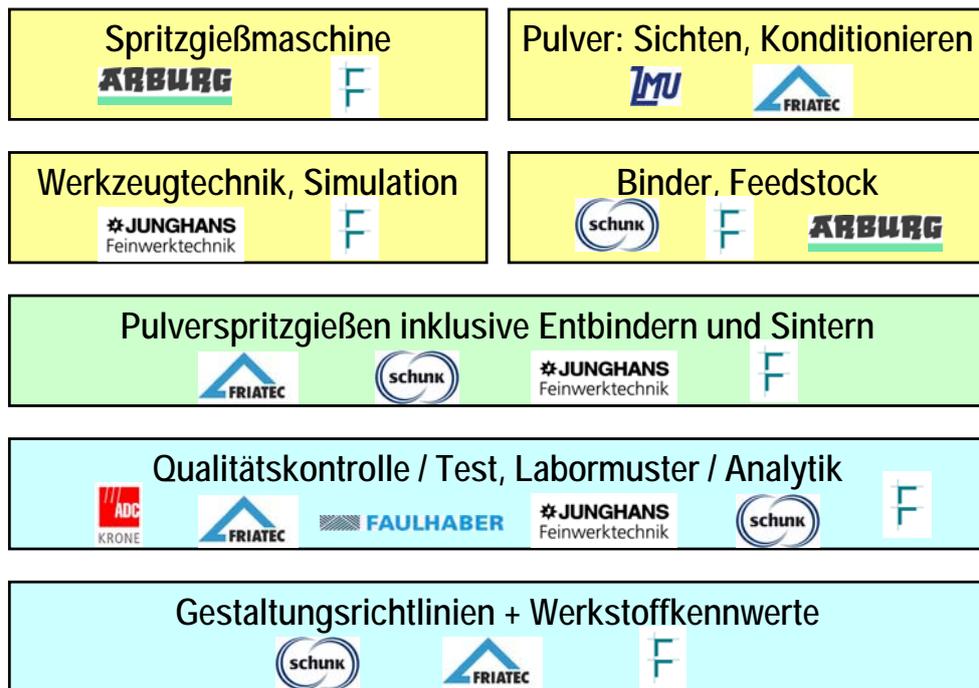
## Micro-P-PIM



## Micro-P-PIM



## Micro-P-PIM



# Ergebnisse in Micro-P-PIM



## Micro-P-PIM

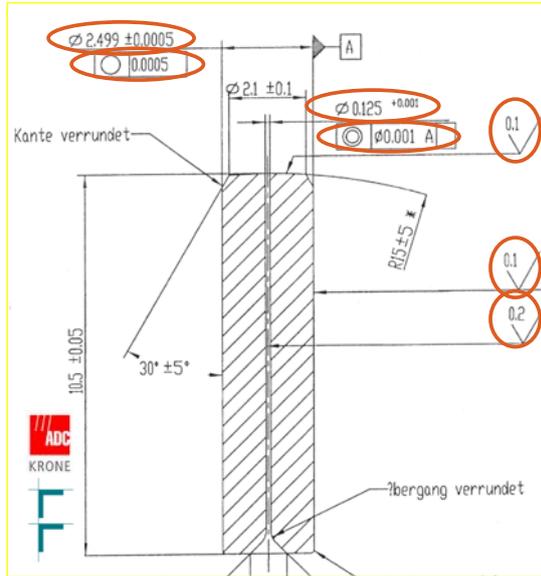


- **Maschinentechnik:** Steuerung, Spritzaggregat,
- **Werkzeugtechnik:** Präzision, Kernzüge,... ; Magazin
- **Sichten: feinste Pulver, Charakterisierung**
- **Feedstocks für Keramik  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$  und Stahl 17-4PH**
- **Prozessentwicklung zum Pulverspritzgießen, Entbindern und Sintern: kurze Prozesszeiten Einsparung der Nachbearbeitung**
- **4 Demonstratoren: Ferrule, Zahnblende, Planetenträger, Getriebeschnecke**
- **Qualitätskontrolle, Prüfmethodik: Einflussgrößen Simulation der Formfüllung, Vergleich mit Spritzgießen von Probekörpern**

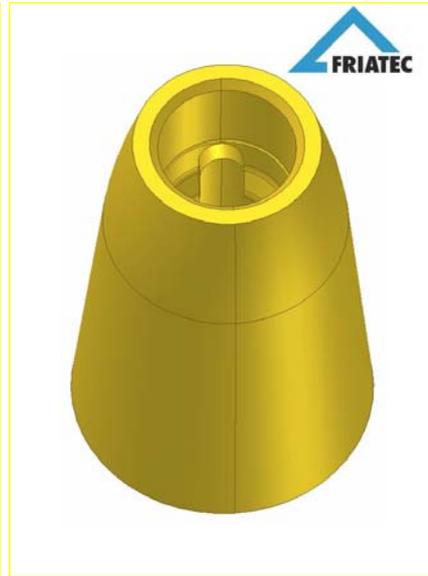


## Marktpotential: Informations- und Dental-Technik

### Micro-P-PIM



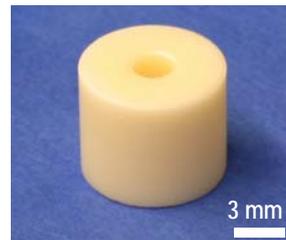
Ferrule: Zeichnung



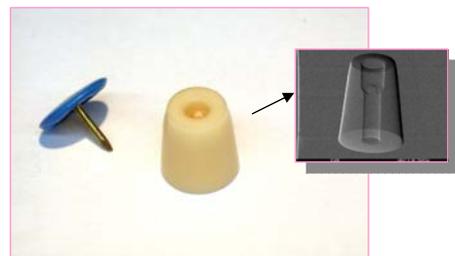
Zahnblende: 3D - CAD

## Stand vor Projektskizze: Extrusion, Schleifen, Polieren

### Micro-P-PIM



## Ergebnis: CIM-Teile → Einsparung an Nachbearbeitung

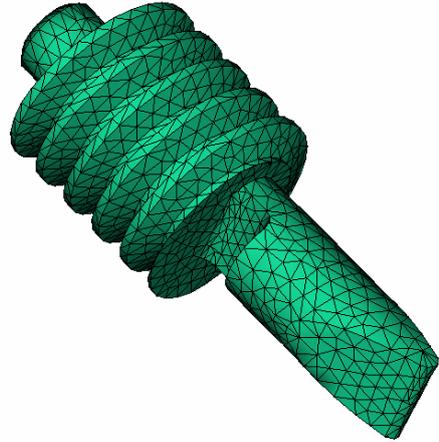
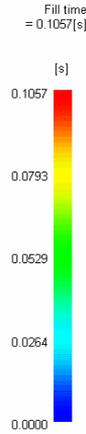
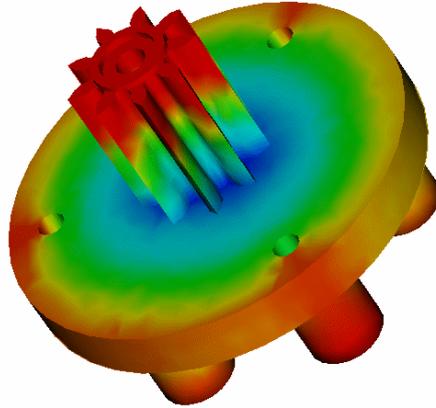


Ferrule: Grün-,Braunling, Teil

Zahnblende: Teil und CT-Bild

## Marktpotential: Kleinantriebe und Zählwerke

### Micro-P-PIM

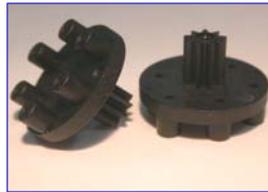


Planetenträger: Simulation

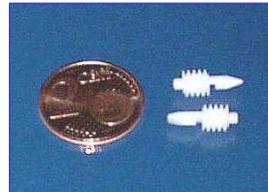
Getriebeschnecke: FEM-Netz

### Micro-P-PIM

## Kunststoffteile begrenzen Lebensdauer + Drehmoment

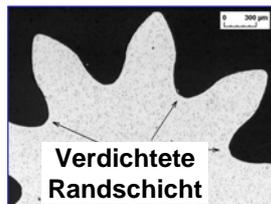


Planetenträger



Getriebeschnecke

## Ergebnis: MIM-Teile aus Stahl 17-4PH (korr.-best., härtb.)



Querschliff durch  
 Stirnverzahnung



Getriebeschnecke  
 mit Sinterhilfe (oben)

### Micro-P-PIM



- **Wirtschaftliches Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikro-Präzisionsbauteile**
- feinskalige Pulver z.B. Sichten von Stahlpulver
- präzise Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik
- schnelles Entbindern und Sintern
- **Toleranz im Sinterschrumpf reproduzierbar reduziert**
- **Micro-P-PIM für  
 Keramik: Ferrule aus  $ZrO_2$ , Zahnblende aus  $Al_2O_3$ ,  
 Stahl: Planetenträger und Getriebeschnecke aus 17-4PH**
- **Gestaltungsrichtlinien, Werkstoffdaten, Eignung von Simulationstools untersucht**

## Gewinn aus Micro-P-PIM

### Micro-P-PIM



- **Alle vier Demonstratoren durch Pulverspritzgießen erfolgreich realisiert**
- Einflussfaktoren auf Qualität der **Ferrule** ermittelt
- **Zahnblende** aus  $Al_2O_3$  : **nur** noch Schleifen der oberen Innenfläche und **Politur der Oberfläche**
- **Planetenträger und Getriebeschnecke** aus Stahl 17-4PH **ohne Nacharbeit** hergestellt
- **Aktuell:**  
 Einsatz von Know-How und Prozesstechnik für die **Markteinführung weiterer Produkte**



Feines Stahlpulver M 86:  $T_s = 1140\text{ °C}$

→ s. Vortrag „Verwertung“

**Planetenträger,  
 Getriebeschnecke**



Dank der Partner Micro-P-PIM an:



## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
Feinwerktechnik

ARBURG

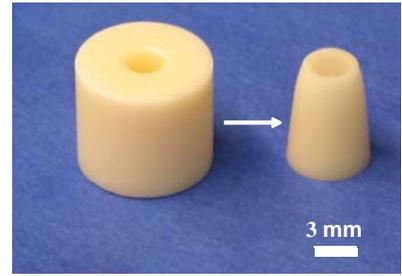


ADC  
KRONE



LMU

- **BMBF** für Förderung 02PD213 im Rahmen der Ausschreibung „Forschung für die Produktion von Morgen“,
- **Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe PTKA** für effiziente Begutachtung und Betreuung
- **unseren Geschäftsleitungen** für die Förderung der Arbeiten und Investitionen
- **unseren Kollegen** für die tatkräftige Unterstützung
- **Ihnen** für Ihr Interesse an Micro-P-PIM



Zahnblende: früher → heute

## **Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik für das Pulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen**



# Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik für das Pulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen

Marko Maetzig<sup>1)</sup>, Hartmut Walcher<sup>1)</sup>, Johann Pannhorst<sup>2)</sup>, Walter Grieb<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ARBURG GmbH + Co KG, Arthur-Hehl-Straße, D-72290 Lossburg

<sup>2)</sup> JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG, Geißhaldenstr. 49, D-78713 Schramberg

## Kurzfassung

Im Projekt Micro-P-PIM wurde das „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ als ein Hochleistungs-Fertigungsverfahren ausgebaut und weiter entwickelt. Mit diesem Massenfertigungsverfahren sollen Produktkomponenten auch unter dem aktuellen Trend zunehmender Präzision und Miniaturisierung wirtschaftlich gefertigt werden. Potentielle Märkte zeichnen sich in vielen Bereichen der Feinwerk- und Mikrotechnik ab, insbesondere in der Informations- und Medizintechnik, Chemie und Mikroaktuatorik. Stückkosten und Qualität pulvertechnologisch gefertigter Bauteile werden durch den Bedarf und Aufwand an Nachbearbeitung entscheidend beeinflusst. Die Reduzierung der Nachbearbeitung wurde durch optimierte Maschinen- und Werkzeugtechnik sowie die Weiterentwicklung der Formmassen und der Prozesstechnik zum Pulverspritzgießen erreicht. Die geforderten enge Toleranzvorgaben für das Fertigteil verlangen enge Toleranzen im System Werkzeug – Maschine sowie kontrollierte und geführte Prozessschritte, die während des Spritzgießens von der Maschinensteuerung gewährleistet werden. Bei der Maschinenteknik galt das besondere Augenmerk einer Spritzeinheit für kleine Schußvolumina, einem Auswerfer in elektromechanischer Ausführung sowie einer an die Erfordernisse des Mikrospritzgießens angepassten Maschinensteuerung. Im Bereich der Werkzeugtechnik wurde auf die Genauigkeit der Werkzeug, die Lager der Anspritzpunkte sowie die konstruktive Gestaltung der Trennflächen besonderen Wert gelegt, wobei Lagetoleranzen von Bohrungen von  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  mit 0,05% vom Gesamtdurchmesser und Ra-Werte von  $0,24 \mu\text{m}$  erreicht wurden.

## 1 Einleitung

Das System Maschine-Werkzeug muß bezüglich der kleinen Einspritzmassen und der kontrollierten Prozessführung aufeinander abgestimmt sein. Das Werkzeug ist in seiner Geometrie den Schrumpfverhalten des Werkstücks während der Entbinderungs- und Sinterungsphase anzupassen. Werkzeugherstellverfahren nach der Try- und Error-Methode führen zwar letztendlich zum Ziel, sind aber aufgrund der mehrfachen Versuchsabspritzungen und der Werkzeugnachbearbeitungen sowohl im zeitlichen Aufwand als auch bezüglich der Kosten sehr aufwändig. Der Einsatz von Simulationsrechnungen zur Ermittlung des Schwundes bezüglich der Lage der Einspritzpunkte ermöglicht eine optimale Werkzeugkonstruktion.

## 2 Arbeitsprogramm und Methoden

Die Arbeiten der ARBURG GmbH + Co KG konzentrieren sich auf die Themen Weiterentwicklung von Spritzgießmaschinen für den

Mikrospritzguß, Feedstockentwicklung sowie Spritzgießprozessentwicklung für mikrostrukturierte Teile.

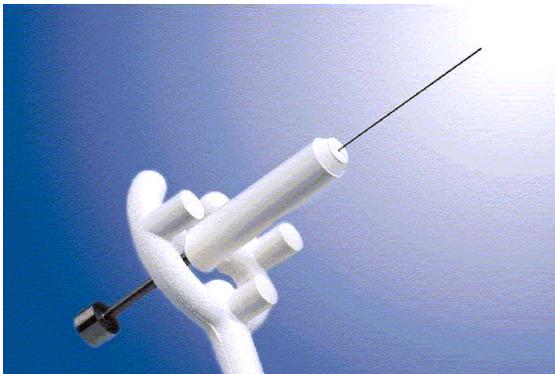
Eine exakt regelbare Hydraulik ist aus maschinentechnischer Sicht für die Fertigung von Präzisionskleinteilen unabdingbar. Daher ist eine voll geregelte Maschine Voraussetzung für eine reibungslose Produktion. Die Maschinensteuerung sollte alle Abläufe und qualitätsrelevante Merkmale erfassen und auswerten, um ein gleichbleibend hohes Qualitätsniveau über die gesamte Produktionsdauer hinweg sicherstellen zu können. Bei ARBURG sind sowohl die Maschinenbaureihen „ALLROUNDER C“ als auch die „ALLROUNDER U“ gleichermaßen zur Herstellung von Mikroteilen geeignet. Die Spritzeinheit muss dafür nur sehr geringe Schmelzemengen zur Verfügung stellen und muss dennoch ein hochgenaues Dosieren und Einspritzen gewährleisten. Zur Vermeidung längerer Verweilzeiten des Feedstocks in der Plastifiziereinheit sollte ein möglichst kleines Aggregat gewählt werden. Prinzipiell geeignet sind die Spritzeinheiten 30, 70 und 100 (nach EUROMAP) mit den Schneckendurchmessern von 15, 18 und 20 mm. Um die Schussvolumina darüber

hinaus weiter verringern zu können sollte im Rahmen des Projektes ein Zylindermodul mit Schneckendurchmesser 12mm entwickelt werden.

Im Arbeitspaket von JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG werden durch intensive Simulation vor Auslegung des Werkzeuges die Schwundmaße bezüglich ihres Einwirkens auf die Geometrie des Werkstückes bestimmt. Besondere Berücksichtigung wird in dem Umstand verarbeitet, dass die Schrumpfungsfaktoren längs und quer zur Fließrichtung des Materials unterschiedliche Werte aufweisen.

Durch die Versuche mit realen Werkstücken wurden Materialparameter ermittelt und in den Simulationsprogrammen für zukünftige Werkzeugauslegungen aufgenommen.

Andere Materialparameter wie z.B. Festigkeit und Dehnbarkeit werden wesentlich durch die Werkzeuggeometrie und die Spritzparameter beeinflusst. In der Werkzeuggeometrie sind Entmischungseffekte nach Stufen, an Kanten oder nach Hindernissen zu beobachten, die es gilt durch die optimale Auswahl der Einspritzpunkte so gering wie möglich zu halten. Als Beispiel mag hier das Ferrulenwerkzeug dienen, bei dem die Anspritzpunkte gegenüberliegend an den hinteren Rand des Werkstückes gelegt wurden.



**Bild 1:** Ferrule mit Anguß und Werkzeugkern

Es ist zu beobachten, dass selbst sehr gut homogenisierte Feedstocks durch eine nicht optimierte Wahl der Anspritzpunkte zum Entmischen neigen und so Materialeigenschaften deutlich negativ beeinflusst werden.

Auch zeigten sich bei der Werkzeugherstellung Limitierungen durch die benutzten Prozesse wie Fräsen, Erodieren, Schleifen und Läppen, die im Werkzeug Oberflächenrauigkeiten von  $R_a = 0,24\mu\text{m}$  ( $R_z=1,9\mu\text{m}$  und  $R_{\text{max}}=2,4\mu\text{m}$ ) ergaben, so dass über weitere Möglichkeiten wie honen oder Laserbearbeitung nachzudenken ist.

Bei Werkstücken mit Einsatzgewichten unter 1 g und Feedstockmaterialien aus teuren fein-körnigen Pulvern ist darauf zu achten, dass das Volumen der

Angußstrecken nicht übermäßig groß ausfällt und somit der größte Teil des Materials wiederaufbereitet werden muß.

Auch die richtige Abstimmung im Schußvolumen zwischen Werkzeug und Maschine ist zu berücksichtigen.

Die Simulation und Berechnung des Werkzeuges sowie der Material-Zuführungskanäle ermöglichen die optimale Ausführung und Gestaltung des Werkzeuges.

### 3 Ergebnisse

Da die Spritzgießmaschine neben dem Mikrospritzgießen auch für Werkzeuge eingesetzt werden sollte welche mit umfangreicher Messtechnik ausgerüstet sind (Probekörper) und diese dadurch oftmals mehr Aufspannfläche benötigen wurde für das Projekt ein ALLROUNDER 420 C 600 - 100 ausgewählt. Diese Maschine verfügt über ein liches Säulenmaß von 420mm x 420mm und eine Schließkraft von 600 kN. Zu Beginn des Projektes wurde die Maschine mit einem Zylindermodul mit 15mm Schnecke ausgerüstet. Zur Bauteilentnahme aus dem Werkzeug ist die Maschine mit einem MULTILIFT H Robotersystem ausgerüstet.



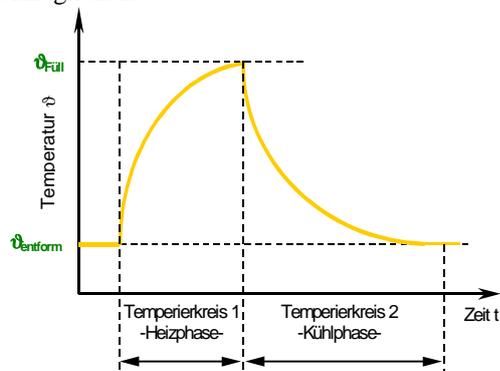
**Bild 2:** Spritzgießmaschine

Eine hohe Positioniergenauigkeit der Schnecke beim Einspritzen wird durch den Einsatz der lagegeregelten Schnecke (LGS) erreicht. Beide Seiten des Einspritzkolbens können dabei aktiv mit Druck beaufschlagt werden, so dass die Schnecke sowohl schnell beschleunigt als auch wieder abgebremst werden kann (eingespanntes System). Exakt positioniert wird indem bei Erreichen einer bestimmten Wegmarke oder „Lage“ das Ventil Druck auf die jeweils andere Seite des Kolbens gibt, wodurch die Bewegung punktgenau gestoppt wird. Regelparameter sind die Schneckenposition (Wegmessung) und der Differenzdruck zwischen Einspritz- und Rückzugsseite des Kolbens, wodurch positions-, geschwindigkeits- und druckgenau gefahren werden kann.

Zur exakten Abformung von Präzisionskleinteilen oder Mikrostrukturen ist in vielen Fällen die

Einhaltung einer speziellen Werkzeugtemperierung notwendig. Eine von mehreren Möglichkeiten ist die Angleichung der Temperatur im Werkzeug an die der einströmenden Schmelze durch eine variotherme Werkzeugtemperierung.

Das Ziel der variothermen Werkzeugtemperierung ist ein zyklisches Aufheizen und Abkühlen der Kavität. Vor dem Einspritzvorgang wird die Kavität auf eine maximale Temperatur  $T_{max}$  aufgeheizt, zum Teil bis auf das Niveau Schmelzetemperatur. Bei gleichzeitiger Evakuierung der Werkzeugkavität, hierzu ist die Maschine mit einer entsprechenden Vakuumanlage ausgerüstet, kann hierdurch eine optimale Formfüllung und Abformung der Formkonturen durch den Feedstock gewährleistet werden. Nach Ende des Füllvorgangs wird die Temperatur möglichst schnell auf einen vorgegebenen Sollwert abgesenkt, um eine problemlose Entformung des Grünteiles zu ermöglichen.



**Bild 3:** Prinzipdarstellung Variotherm- Verfahren

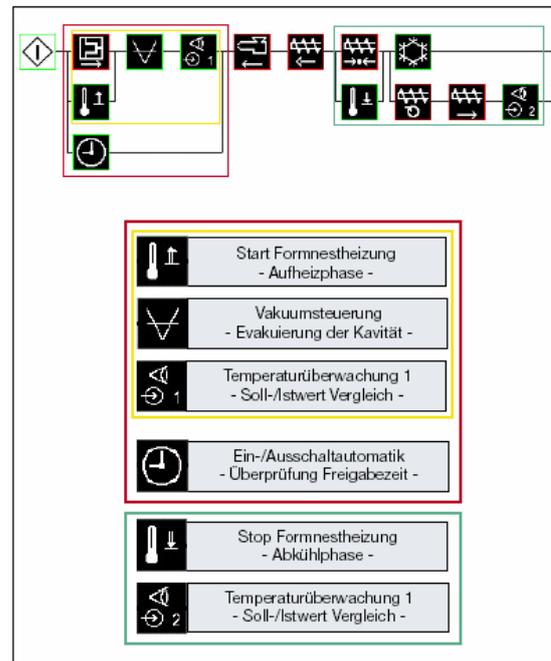
Alle Abläufe und Einzelphasen der Werkzeugtemperierung sind durch grafische Symbole in den Programmablauf in der SELOGICA Maschinensteuerung eingebunden und werden durch die Steuerung überwacht.

Die Entformung von Mikrospritzgießteilen aus dem Werkzeug kann je nach Gestalt der Teile und auch abhängig vom eingesetzten Feedstock problematisch sein. Um seitens der Spritzgießmaschine eine möglichst schonende Entformung zu gewährleisten wurde diese mit einem elektro-mechanischem Auswerfer ausgerüstet. Dieser gewährleistet eine exakte Positionierung des Auswerfers während der Bauteilentformung mit sehr geringen Entformgeschwindigkeiten.

Um das Ziel der Verringerung der Schußvolumina zu erreichen wurde auf Basis der Spritzeinheit 30 ein Zylindermodul mit 12mm Schnecken-durchmesser entwickelt. Die Schneckengeometrie wurde an die Belange der Verarbeitung von Metall- und Keramikfeedstocks angepasst. Um die

- Untersuchung des Füllgrades und der Bindahtproblematik Biegeprobe:

Torsionsbelastung der Schnecke möglichst gering zu halten war es jedoch erforderlich die Gangtiefe



**Bild 4:** Symbole und Funktionen des Variotherm-Verfahrens im Maschinenablauf

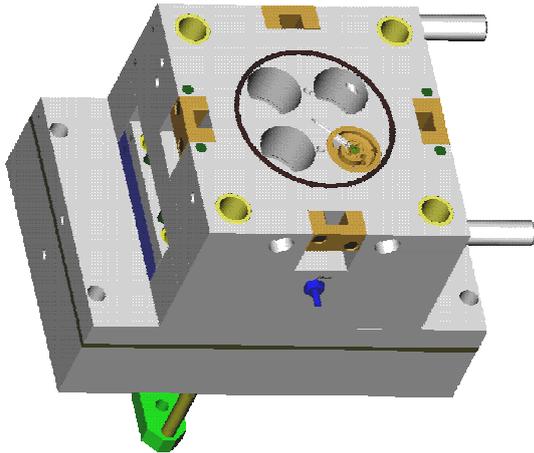
der Schnecke zu reduzieren. Um die Feedstocks plastifizieren zu können wird der Einsatz eines speziellen Mikrogranulates erforderlich. Dazu liegen zwischenzeitlich positive Erfahrungen im Hause ARBURG vor [1].

Aus werkzeugtechnischer Sicht ist folgender Stand der Arbeiten erreicht. Neue Feedstocks sind erstellt und werden charakterisiert. Das Probewerkzeug für die Materialuntersuchung ist im Einsatz und Versuche und Test werden durchgeführt. Die verschiedenen Einsätze dienen zur Beurteilung des Materialverhaltens sind:

- Doppelschnecke: Zur Untersuchung des Füllfaktors in langen Kavitäten
- Stufe: Stufenwerkstück zur Beurteilung des Temperatur- und Druckverhalten im Werkzeug an und nach Stufen
- Umlenkung: 90° Winkel im Werkzeug zur Untersuchung des Temperatur- und Druckverhaltens nach Umlenkung des Materialflusses
- Düse: Werkstück mit einem Hindernis nach dem Einspritzpunkt, zur Untersuchung der Materialvermischung bzw. Anbindung nach dem Hindernis
- Diffusor: Werkstück mit einem Hindernis am Ende des Materialflusses, zur

- Das Werkstück kann als Biegeprobe unmittelbar für Materialeigenschaftsuntersuchungen benutzt werden.

Des Weiteren sind Werkzeuge für die CIM Werkstücke Ferrule und Zahnblende fertig gestellt, und die Untersuchungen bezüglich Optimierung und Festlegung der Spritzgießparameter abgeschlossen.



**Bild 5:** Vierfach CIM-Werkzeug

Die Werkzeuge für die MIM Werkstücke Planetenträger und Getriebschnecke sind ebenfalls fertig gestellt und Untersuchungsergebnisse bezüglich Feedstock und Prozessoptimierung liegen vor. Die ersten angenommenen Schwundfaktoren mussten teilweise korrigiert werden, so dass die hergestellten Werkstücke in ihrer Dimensionierung nicht ganz den Fertigteilmäßen entsprachen, aber die Toleranzen innerhalb des Spritzprozesses entsprachen den Erwartungen.

## 4 Ausblick

Im Bereich der Maschinentchnik soll die Spritzeinheit der bestehenden Maschine umgebaut

werden, so dass in Zukunft Zylindermodule mit einem Schneckendurchmesser von 12mm eingesetzt werden können. Parallel dazu werden weitere Tests mit einer solchen Spritzeinheit im Hause ARBURG fortgeführt.

Nach abgeschlossenem Projekt liegen Eigenschaftsparameter und Prozessdaten für die benutzten MIM und CIM Feedstöcke vor, die es gestatten von der Simulation zur Werkzeugauslegung über die Prozessschritte bis zum Fertigteil schnell ohne großen Versuchsaufwand Fertigteile mit engen Toleranzen zu erstellen. Außerdem sollen Werkzeugherstellverfahren in Zukunft eingesetzt werden, die die Oberflächenrauigkeiten von  $R_a \sim 0,24\mu\text{m}$  weiterhin einhalten aber die Extremwerte  $R_z \sim 1,9\mu\text{m}$  und  $R_{\text{max}} \sim 2,4\mu\text{m}$  verringern können.

## 5 Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger PFKA für die zügige Begutachtung und Betreuung des Projekts 02PD2130 und 02PD2132, sowie unseren Kollegen für die konstruktive Unterstützung im Projekt Micro-P-PIM.

## 6 Literatur

- [1] Klausmann, P.: Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit des Dosier- und Einspritzverhaltens einer Mikrospritzgießeinheit, Diplomarbeit BA Horb, 2004



## Micro-P-PIM

\*JUNGHANS  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

F

FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU

# Spritzgießmaschine- und Werkzeugtechnik

für PIM von Mikropräzisionsbauteilen

M. Maetzig \*, H. Walcher \*, J. Pannhorst \*\*, W. Grieb\*\*

\*ARBURG GmbH + Co KG

\*\* JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG

Mikrosystemtechnik-Kongress, Freiburg, 11. Oktober 2005

## Micro-P-PIM

\*JUNGHANS  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

F

FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU

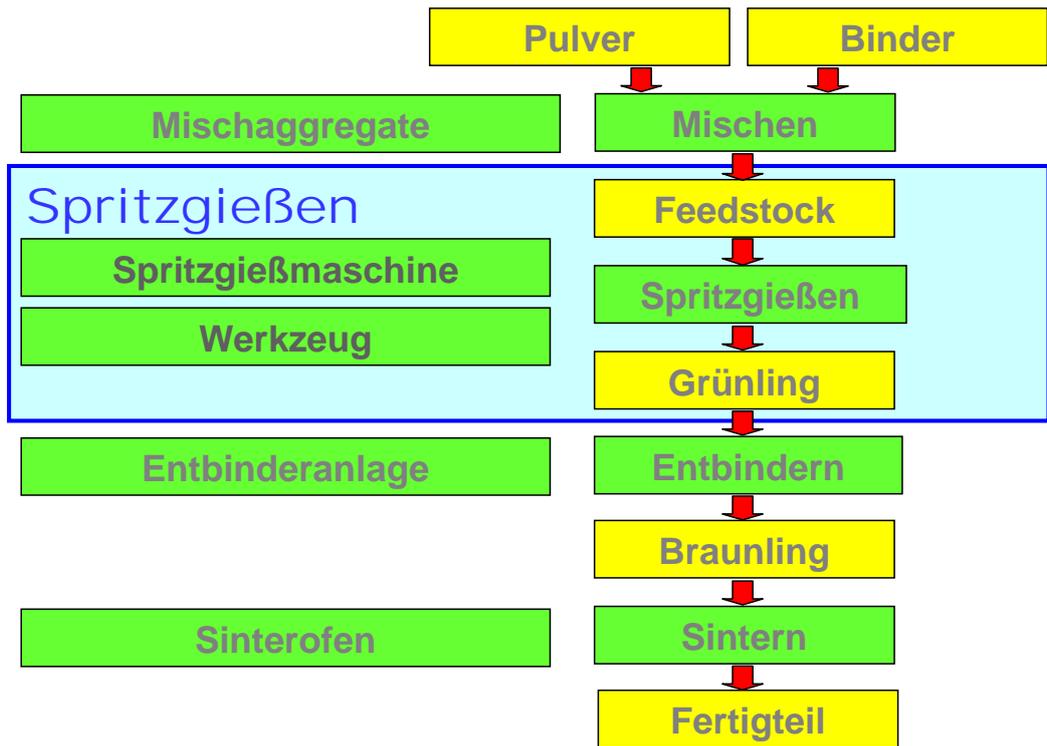
## ARBURG GmbH + Co KG

**ARBURG**

- Firmensitz in Loßburg / nördlicher Schwarzwald
- Seit Gründung im Jahr 1923 im Eigentum der Familien Hehl
- International tätiger Produzent von High Tech Spritzgießmaschinen und Anlagen
- Pulverspritzgießlabor seit 1991



# Verfahrensablauf PIM



## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

F

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**

GEFÖRDERT VOM  
  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

F

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**

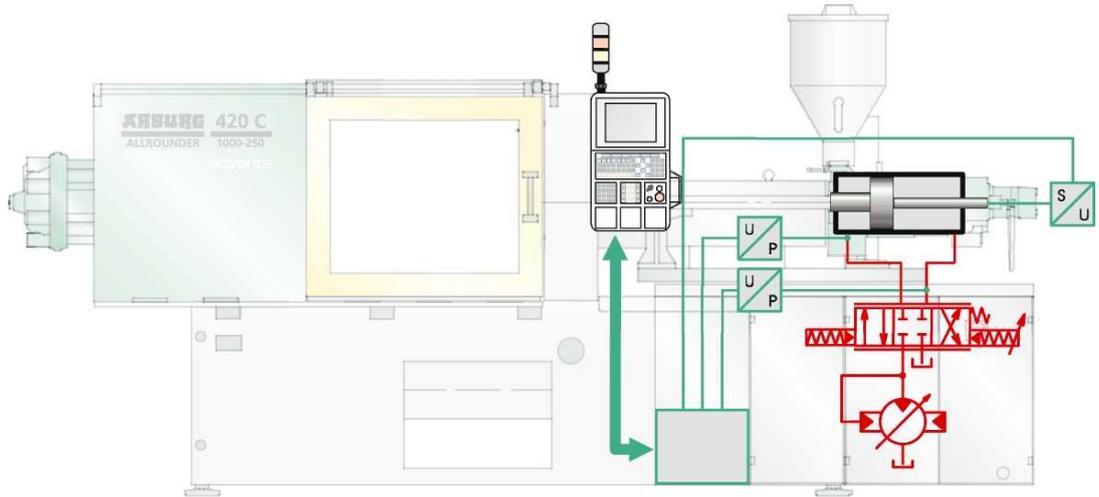
# Maschinentechnik

## Technische Spezifikation

- ALLROUNDER 420 C 600 - 100
- PIM - Zylinder 15mm (12mm)
- lagegeregelte Schnecke
- elektromechanischer Auswerfer
- Variothermprozess
- MULTILIFT H



Lageregelung



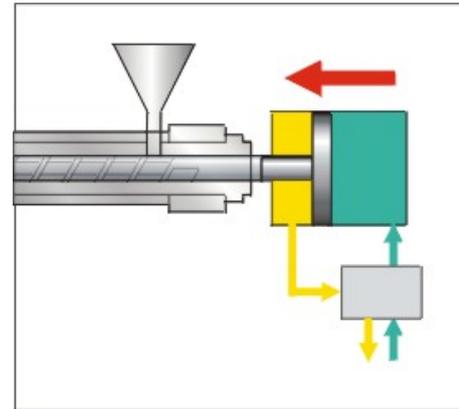
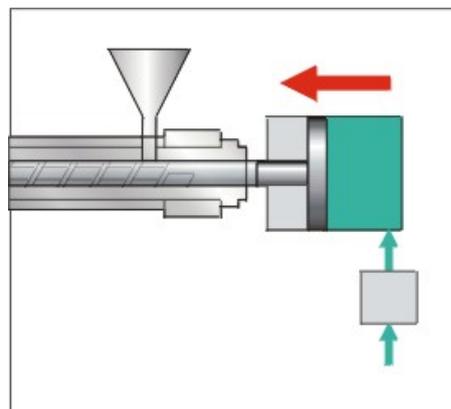
**Micro-P-PIM**



Hydraulische Konzepte im Vergleich

Einspritzregelung

Lageregelung



**Micro-P-PIM**

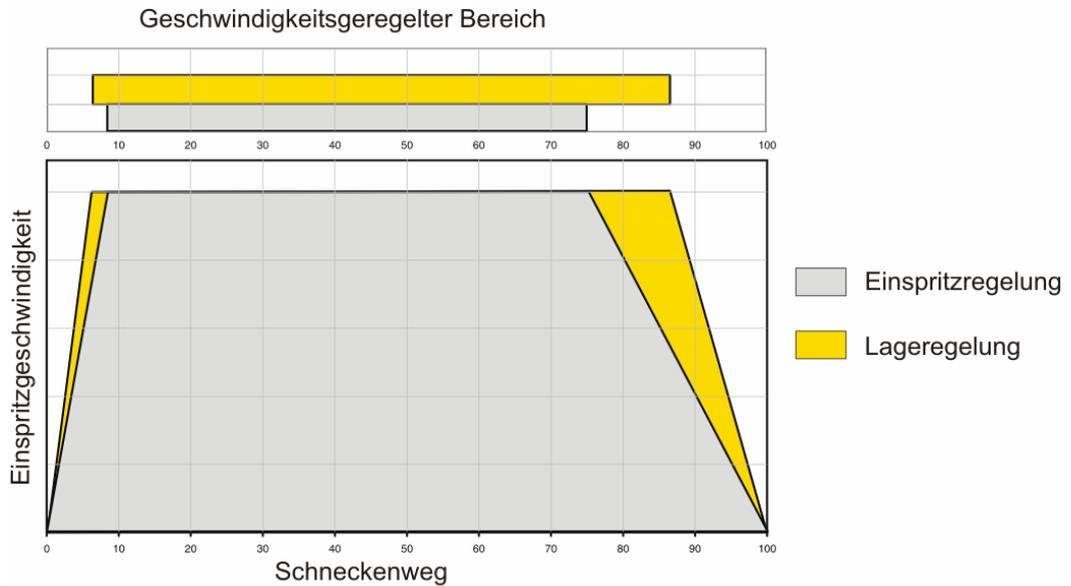




**Micro-P-PIM**



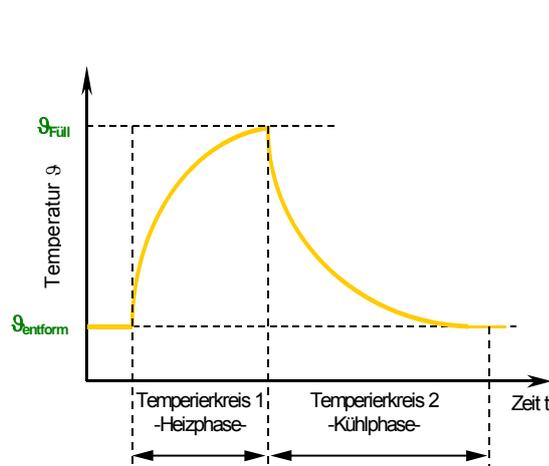
**Einspritzdynamik im Vergleich**



**Micro-P-PIM**



**Variotherme Prozessführung**

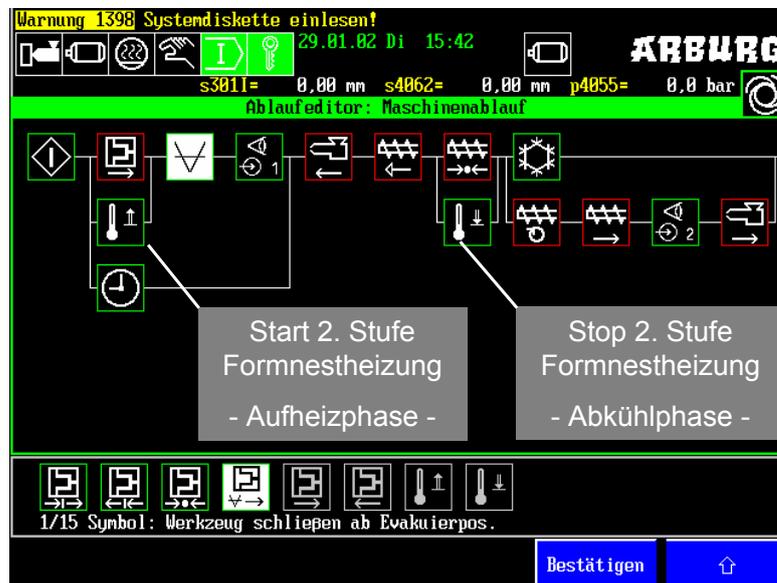


- zyklisches Aufheizen und Abkühlen der Kavität
- vor dem Einspritzvorgang wird die Kavität auf eine maximale Temperatur  $\vartheta_{Füll}$  aufgeheizt
- nach Ende des Füllvorgangs erfolgt eine schnelle Absenkung der Temperatur auf den vorgegebenen Sollwert  $\vartheta_{Entform}$

Variotherme Prozessführung



**Micro-P-PIM**



Spritzeinheit für Mikrospritzguss



**Micro-P-PIM**



- Anpassung des Schussgewichts an Bauteilvolumen
- Verringerung der Verweilzeit der Feedstocks
- keine thermische Schädigung der Formmasse
- Zylindermodul mit Schnecke Ø12 mm
- Umsetzung in Labormaschine bei ARBURG mit umfassender andauernder Testphase



## JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG



JUNGHANS Feinwerktechnik hat zwei Standorte im Schwarzwald und zwar in Schramberg und in Seedorf

**Schramberg:** Teilefertigung, Vertrieb und Administration

**Seedorf:** Montage, Entwicklung und Musterwerkstatt



**Zahlen aus 2004**

**Mitarbeiter: 380**  
**Umsatz: 38 MioEUR**



**Micro-P-PIM**



## Vorstellung der JUNGHANS Spritztechnik

**Mitarbeiter:**

- Werkzeugbau: 25
- Konstruktion: 3
- Maschinenbediener: 11

**Ausrüstung:**

- CAD: 2 - 3 D-Systeme, Pro-Engineer
- Spritzguß: 24 Maschinen, davon 21 von Fa. Arburg  
Schließkräfte 35 t bis 100 t

**Fähigkeiten:**

Insert-Technik mit automatischer Ein- und Ausgabe und Pallettierung  
Teilegrößen 0,05 g bis 120 g



**Micro-P-PIM**





## Der Bereich Spritztechnik bei JUNGHANS Feinwerktechnik

### Micro-P-PIM



## Werkzeuge für das Projekt Mikro-P-PIM

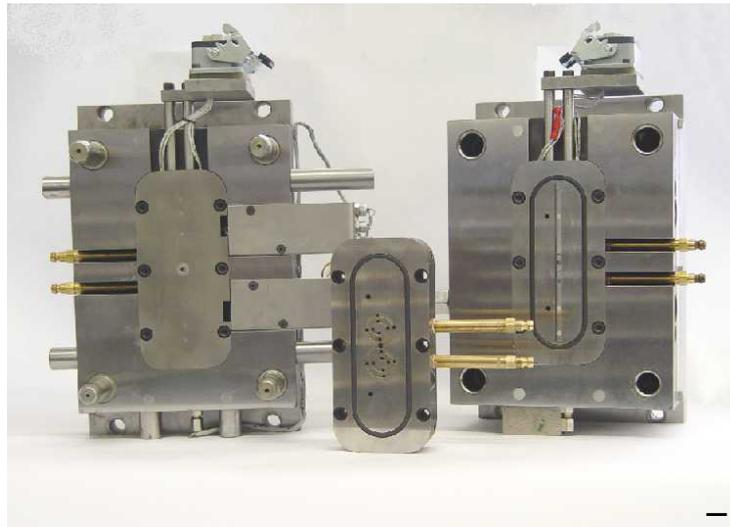
### Micro-P-PIM



Für das Verbundprojekt Micro-P-PIM werden 5 Werkzeuge benötigt:

- Probekörper mit sechs Formeinsätzen
  - Spirale, Umlenkung, Düse, Diffusor, Stufe und Biegeprobe
- Demonstrator für Ferrule
  - (CIM ZrO<sub>2</sub> Werkstoff, Genauigkeit 0,05%)
- Demonstrator für Zahnblende
  - (CIM Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Werkstoff, Genauigkeit 0,3 % und Oberfläche)
- Demonstrator für Planetenträger
  - (MIM 17-4PH Werkstoff, Genauigkeit 0,1%)
- Demonstrator für Getriebeschnecke
  - (MIM 17-4PH Werkstoff, Zahnflanke und Oberfläche)

## Werkzeug für Probekörper



Temperierbares  
Werkzeug mit  
Formteileinsatz  
Doppelspirale,  
eingebaut sind:

- Heizung
- Wasserkühlung
- Temperatur-Sensoren
- Drucksensoren



**Micro-P-PIM**

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

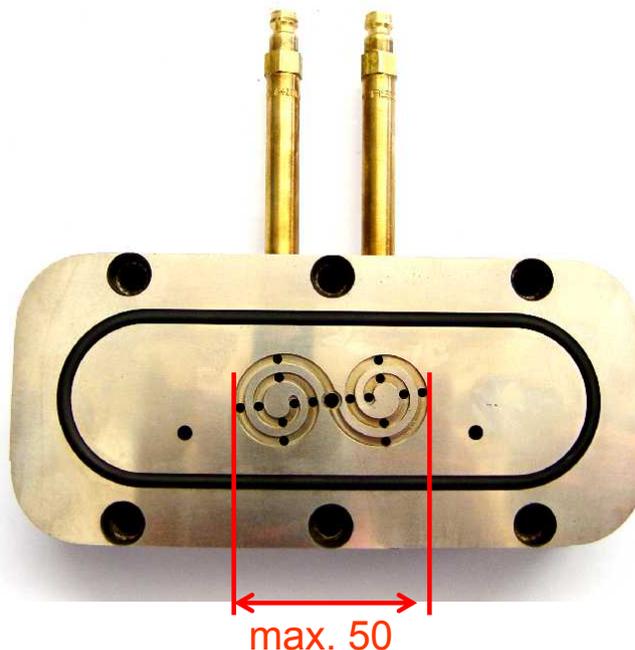
**ADC**

KRONE

**schunk**

**LMU**

## Formeinsatz „Doppelspirale“



An der Spirale ist  
zu sehen

- ◆ Anspritzpunkt
- ◆ Öffnungen für  
Sensoren



**Micro-P-PIM**

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**

KRONE

**schunk**

**LMU**

# Formeinsätze „Biegeprobe“ und „Stufe“



## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

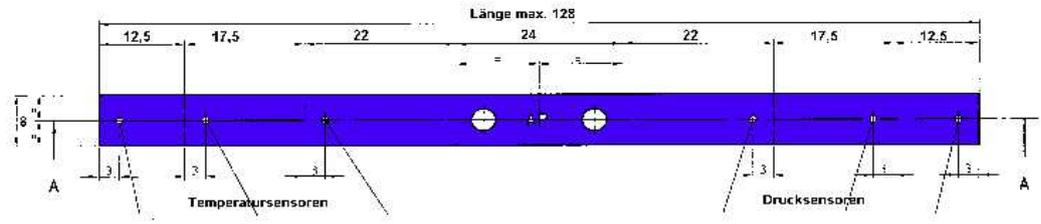
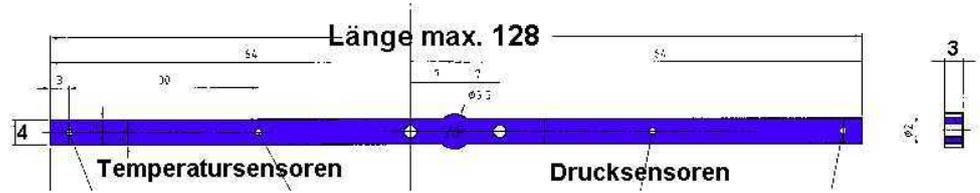
**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**



# Formeinsatz „Umlenkung“



## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

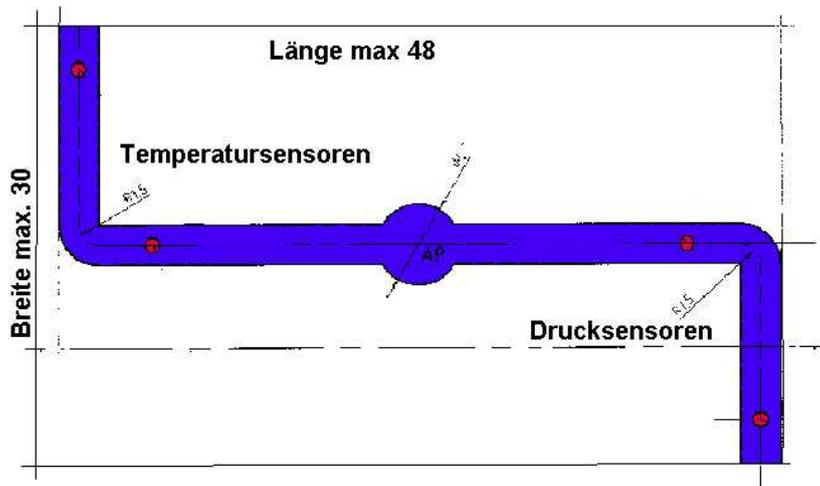
**F**

**FRIATEC**

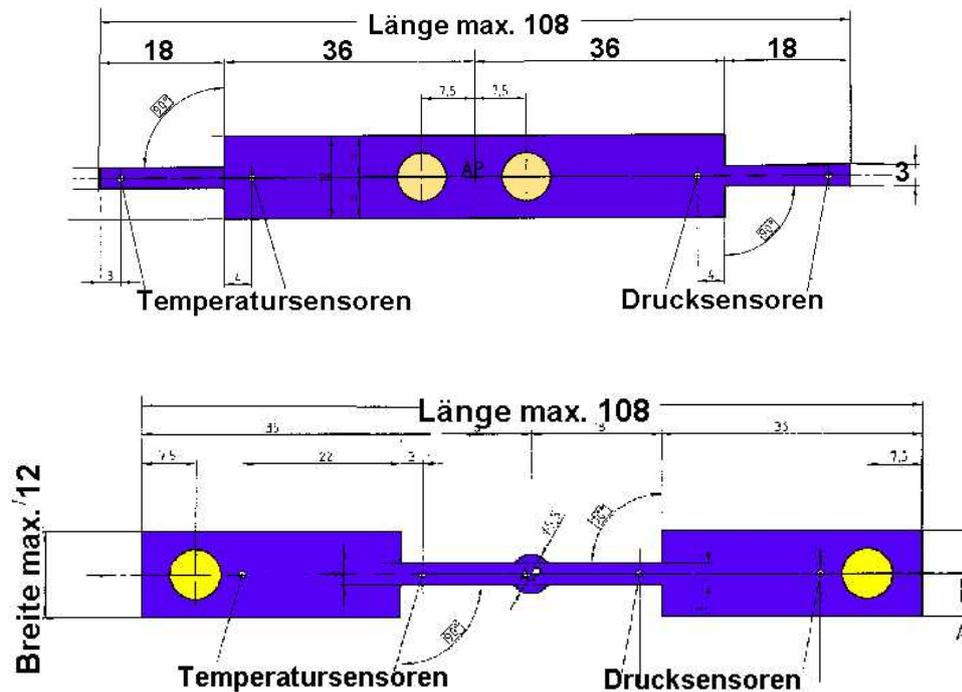
**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**



## Formeinsätze „Düse“ und „Diffusor“



Micro-P-PIM



## Optimierung der Feedstocks

- Mit den Probewerkzeugen wurden einerseits die Feedstockeigenschaften optimiert andererseits die Simulationsparameter abgeglichen
  - Biegeprobe zur Bestimmung der Materialeigenschaften
  - Umlenkung, Düse, Diffusor zur Verifizierung von Entmischungseffekten nach Kanten, Stufen und Umlenkungen
  - Doppelspirale zur Verifikation der Füll- und Fliesseigenschaften in langen Kavitäten



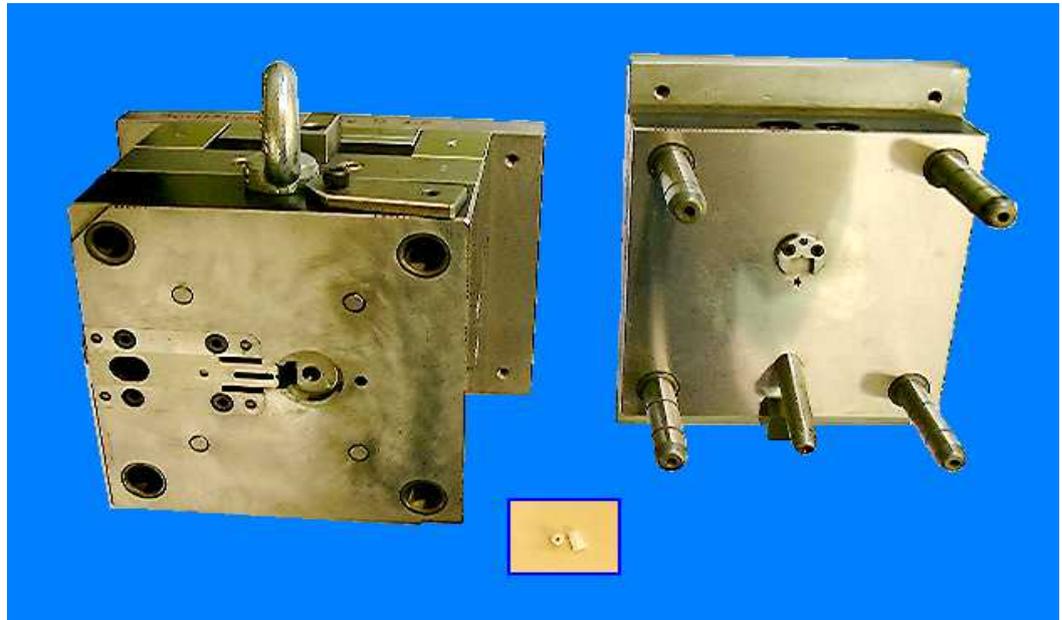
Micro-P-PIM





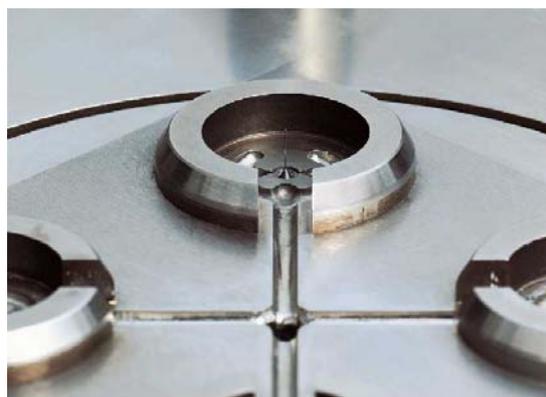
## Werkzeug für Zahnblende (CIM)

### Micro-P-PIM



## Werkzeug für Ferrule (CIM)

### Micro-P-PIM



Vier-Fach-Werkzeug für die Ferrule

Spritzteil mit Anguss und Kernzug aus dem Werkzeug „Ferrule“  
Kerndurchmesser:  
0,16mm





## Werkzeug für Schnecke (MIM)



### Micro-P-PIM



## Weitere Arbeiten

- Bezüglich der Ferrule wurden die Werkzeugeigenschaften mit denen des Fertigteils verglichen
- Die Werkzeuge wurden herkömmlich mit Erodier-, Schleif- und Polierverfahren hergestellt
- Es wurden Oberflächenrauigkeiten von  $R_a \sim 0,24\mu\text{m}$ ,  $R_z \sim 1,9\mu\text{m}$  und  $R_{\text{max}} \sim 2,4\mu\text{m}$  erreicht, die sich im Werkstück widerspiegeln
- Eine Verringerung der Extremwerte ist anzustreben

### Micro-P-PIM

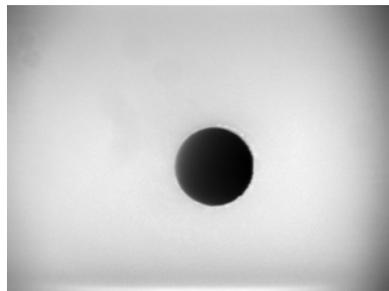
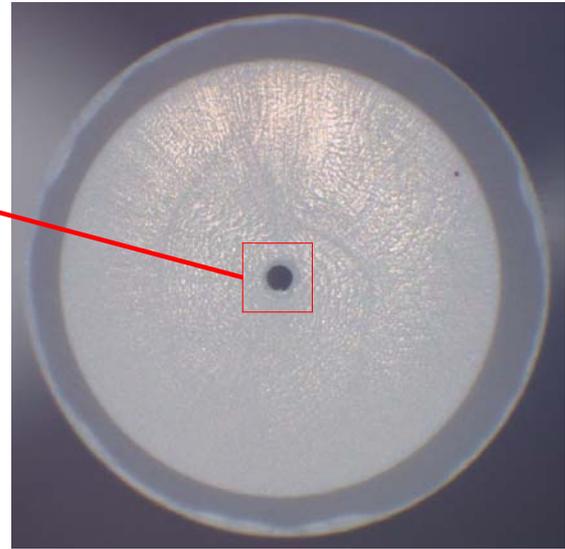
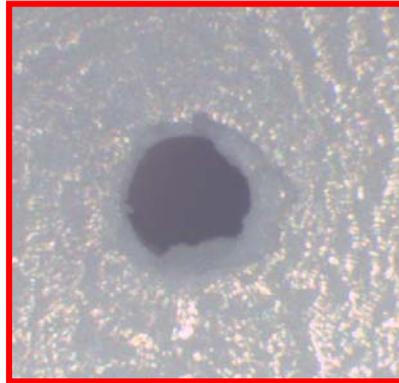




## Abformung der Bohrung

### Kopplungsseite

### Micro-P-PIM

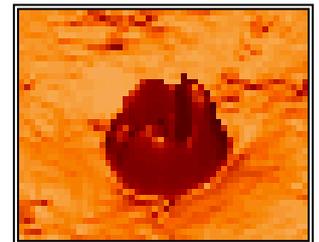


Einführseite  
zum Vergleich

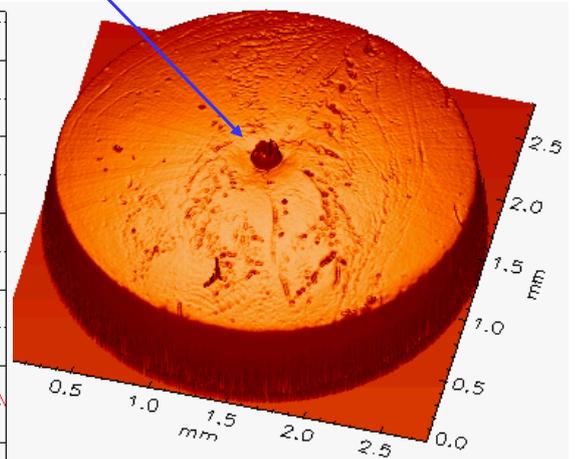
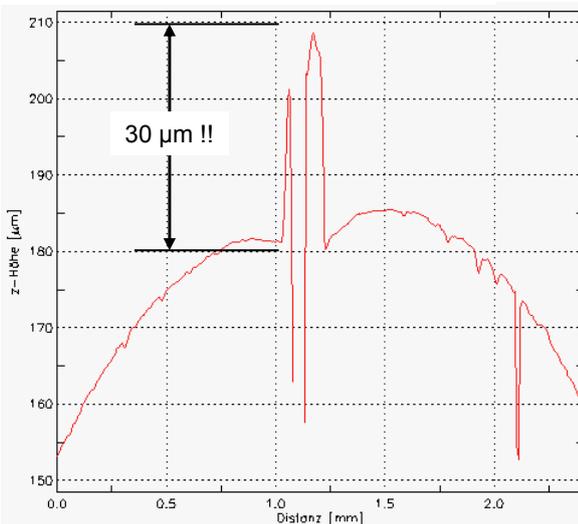
## Abformung der Bohrung

### ● Kopplungsseite

### Micro-P-PIM



Grat am  
Bohrungsumfang



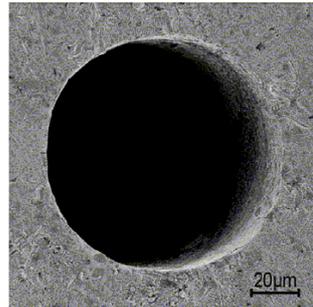
FRT 3D-Topographiescan  
Probe 17B03-Gr, Auflösung 3 $\mu\text{m}$



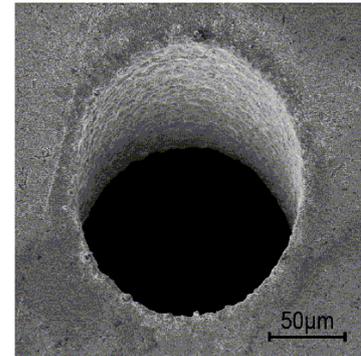
## Aussicht auf andere Werkzeugherstellungsverfahren

- Reduzierung der Oberflächenrauigkeiten durch Laserbohren

- Laserbohrungen in Edelstahl
- EDM – Bohrung in Edelstahl
  - Minimale Ablagerungen



Bilder:

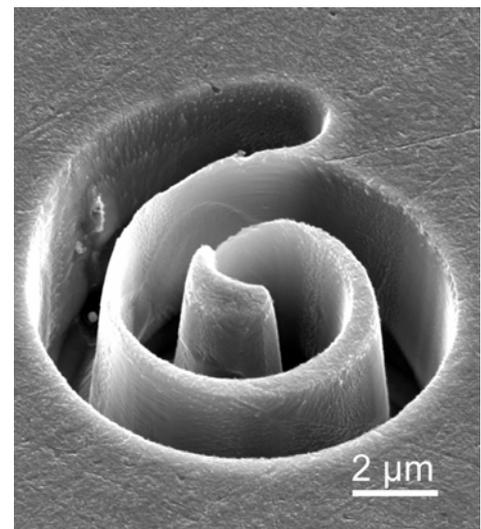


### Micro-P-PIM



## Aussicht auf andere Werkzeugherstellungsverfahren

- Reduzierung der Oberflächenrauigkeiten durch elektrochemisches Mikrofräsen ( $\mu$ ECF)
    - Schneckenstruktur
- Bild: HSG-IMAT Prof. Kück



### Micro-P-PIM





## Micro-P-PIM



# Spritzgießmaschinen- und Werkzeugtechnik für PIM von Mikropräzisionsbauteilen

M. Maetzig \*, H. Walcher \*, J. Pannhorst \*\*, W. Grieb\*\*

\* ARBURG GmbH + Co KG

\*\* Junghans Feinwerktechnik GmbH & Co KG

Wir danken dem BMBF für die Förderung  
02PD2130 und 02PD2132  
und dem Projektträger PTKA für die Betreuung



## **Simulation des Pulverspritzgießprozesses für Probekörper**



# Simulation des Pulverspritzgießprozesses für Probekörper

R. Heldele<sup>1)</sup>, K. Müller<sup>1)</sup>, V. Piotter<sup>1)</sup>, M. Rohde<sup>2)</sup>, J. Pannhorst<sup>3)</sup>, R. Ruprecht<sup>1)</sup>, M. Schulz<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung III  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

<sup>2)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung I  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

<sup>3)</sup> JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG

## Kurzfassung

Für das Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Metall und Keramik ist der Einsatz eines geeigneten Simulationstools vorteilhaft, um Bauteile mit Toleranzen im Mikrometerbereich produzieren zu können. Dazu wurde das Simulationstool Moldflow<sup>®</sup> getestet, welches für das Kunststoffspritzgießen weltweit etabliert ist. Nur bei sehr einfachen Bauteilgeometrien nähern sich die Simulationsergebnisse qualitativ der realen Kavitätsfüllung mit hochgefüllten Formmassen an. Die Simulationsergebnisse unterscheiden sich deutlich von den Experimenten z. B. hinsichtlich des Druckbedarfs für eine vollständige Formfüllung. Aus den auftretenden Abweichungen kann darauf geschlossen werden, dass der Fehler in der für hochgefüllte Formmassen unzureichenden Modellierung des Fließverhaltens zu suchen ist.

## 1 Einleitung

Ziel des Projektes Micro-P-PIM ist die Optimierung des Pulverspritzgießprozesses (Powder Injection Molding = PIM) zur nachbearbeitungsarmen Produktionstechnik komplex geformter Mikropräzisionsbauteile aus Metall und Keramik. Die Bauteile weisen feinerwerktechnische Abmessungen mit Toleranzen unter einem Mikrometer auf. Die folgenden Voraussetzungen sind zu erfüllen, um das Ziel der endkonturnahen Produktion sowie der Reduktion der Nachbearbeitung zu erreichen:

- fertigungsgerechtes Bauteildesign,
- entsprechendes Werkzeugkonzept und
- geeignetes Prozessfenster.

Um dies wirtschaftlich zu realisieren, ist der Einsatz von Simulationstools vorteilhaft.

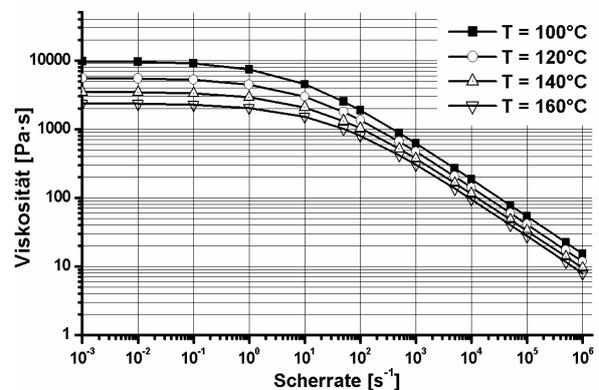
Da am Markt kein Simulationswerkzeug speziell für (Micro-)PIM verfügbar ist, wurde untersucht, inwieweit die Moldflow<sup>®</sup>-Software, welche für die Simulation des Kunststoffspritzgießprozesses entwickelt wurde, für die Betrachtung der Formfüllung verwendet werden kann. Die Materialdatenbank dieses Tools enthält zwar auch Daten von Formmassen für PIM, aus früheren Arbeiten [1] ist jedoch bekannt, dass ohne weitere detaillierte Kenntnis der Materialdaten zu den eingesetzten Feedstocks signifikante Abweichungen zwischen Spritzgießversuch und Simulation auftreten. Beispielsweise ergibt sich für den minimalen Druckbedarf zur vollständigen Formfüllung ein Unterschied von über 100% zwischen Simulation und Experiment. Aus diesem Grund wurden die Fließeigenschaften und die thermischen Materialdaten der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten

Feedstock-Systeme am Institut für Materialforschung I und III des Forschungszentrums Karlsruhe ausführlich untersucht.

## 2 Experimentelles

### 2.1 Fließverhalten

Aus den rheologischen Eigenschaften der Feedstock-Systeme ergeben sich Parameter für die detaillierte Modellierung des PIM während der Formfüllung. Die Messung der Viskosität wurde an einem Hochdruckkapillarrheometer der Firma Göttfert (Rheograph 2003) durchgeführt.



**Bild 1** Modellierung der Viskosität des Inmafeed<sup>®</sup> K1011 Feedstocks in Abhängigkeit der Temperatur nach dem Cross-WLF-Modell.

In Bild 1 ist die modellierte Änderung der Scherviskosität des Feedstocks Inmafeed<sup>®</sup> K1011 der Fa. INMA-TEK Technologies GmbH bei verschiedenen Tempe-

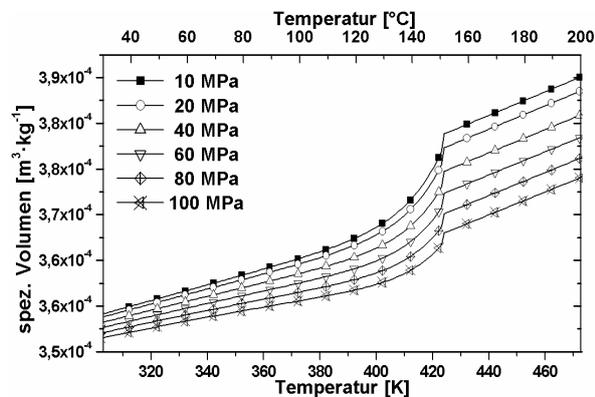
aturen dargestellt. Die Stützpunkte wurden durch die mathematische Annäherung nach dem Cross-WLF-Modell (Gleichung 1) ermittelt, um die Daten in Moldflow<sup>®</sup> zu implementieren.

$$\eta(T, \dot{\gamma}_a, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}_a}{\tilde{\tau}}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

Das Cross-WLF-Modell beschreibt die Viskosität  $\eta$  als Funktion der Temperatur  $T$ , der Scherrate  $\dot{\gamma}_a$  und des Drucks  $p$ .  $\tilde{\tau}$  entspricht der Grenzschubspannung zwischen dem Übergang zwischen newtonschem und strukturviskosen Bereich, wobei die Steigung im strukturviskosen Bereich über den Exponenten  $(1-n)$  beschrieben wird. Im newtonschen Abschnitt bestimmt  $\eta_0$  die temperaturabhängige Viskosität [2].

## 2.2 Zustandsdiagramm

Für die Simulation des Abkühlverhaltens ist die Kenntnis des Phasenzustandes von grundlegender Bedeutung. Das Zustandsdiagramm wird in einem so genannten  $p\nu T$ -Diagramm dargestellt in welchem das spezifische Volumen  $\nu$  über der Temperatur  $T$  im isobaren Zustand (konstanter Druck  $p$ ) aufgetragen wird.



**Bild 2**  $p\nu T$ -Diagramm des POM basierten Feedstocks B der Firma FRIATEC AG nach dem Tait-Modell.

Die Volumenänderung des Feedstocks wird im Wesentlichen von der thermischen Ausdehnung und der Kompressibilität der Binderkomponenten bestimmt. Der Einfluss der Füllstoffpartikel, ob aus Metall oder Keramik, ist im Vergleich zu den polymeren Komponenten vernachlässigbar.

Standard Simulationswerkzeuge nach dem CFD-Modell (continuous fluid dynamics) implementieren die Informationen über den Phasenübergang entweder in sog. 'look-up-tables', bzw. wie bei Moldflow<sup>®</sup>, mit Hilfe von mathematischen Modellen, wie dem Zwei-Phasen-Tait Modell [3,4,5].

$$V(T, p) = V_0(T) \cdot [1 - C \cdot \ln(1 + \frac{p}{B(T)})] + V_i(T, p) \quad (2)$$

Das Tait-Modell (Gleichung 2) linearisiert einen zweiphasigen Zustand oberhalb und unterhalb der Phasenübergangstemperatur  $T_{trans}$ , beschrieben durch die Funktion  $V_0(T)$ , und bindet die Druckabhängigkeit über einen logarithmischen Korrekturterm und die Temperaturabhängigkeit über die Exponentialfunktion  $B(T)$  ein. Für nicht-amorphe (teilkristalline) Materialien wird unterhalb der Übergangstemperatur  $T_{trans}$  die Funktion um eine weitere Exponentialfunktion  $V_i(T)$  erweitert. Bild 2 zeigt die angepassten Daten des POM basierten Feedstocks B der Firma FRIATEC AG an das Tait-Modell [6].

Das größte Problem bei der Anwendung des Tait Modells auf beliebige Feedstocksysteme ist, dass mit der Funktion nur zweiphasige Zustandsdiagramme hinreichend genau dargestellt werden können. Die eingesetzten Feedstocksysteme bestehen in der Regel jedoch aus mehreren Binderkomponenten und besitzen folglich mehrere Phasenübergänge [7].

## 2.3 Thermische Daten

Die thermischen Eigenschaften des Feedstocks bestimmen das Abkühlverhalten während und nach der Füllphase. Zur Beschreibung des transienten Temperaturverhaltens müssen somit grundlegende Materialdaten, wie die Temperaturleitfähigkeit und die Wärmekapazität bestimmt werden

Die Temperaturleitfähigkeit  $\alpha(T)$  wurde mit dem Gerät LFA 427 der Firma Netzsch, basierend auf der Laser-Flash-Methode, vermessen. Hierbei wird die Probe in einem separat temperierbaren Ofenraum ohne direkten mechanischen Kontakt mit einer Heizquelle erwärmt, so dass eine aufwändige Probenpräparation entfällt. Als Heizquelle dient ein Laser, der die Vorderseite einer zylindrischen Probe durch einen kurzen Impuls erwärmt. Anschließend wird der Temperaturanstieg auf der Rückseite der Probe mit einem Infrarotsensor gemessen. Es ergibt sich im Zeitverlauf eine verschmierte Stufenfunktion, die im Plateaubereich schwach abfällt. Aus der Lösung der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung erhält man unter Annahme adiabatischer Messbedingungen, eindimensionaler Wärmeausbreitung in der Probe und infinitesimaler Erwärmungszeit die Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$ . Die Messung wurde im relevanten Temperaturbereich von 25°C bis 160°C durchgeführt.

Zur Bestimmung der Wärmekapazität  $c_p$  wurde ein Differential Scanning Calorimeter (DSC) der Firma Netzsch (DSC 204) eingesetzt. Als Referenzmaterial diente ein Saphir-Einkristall. Die Probenmasse lag zwischen 15 und 25 mg. Die Bestimmung der Wärmekapazität wurde an einer Aufheizkurve mit einer

Heizrate von  $10 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$  durchgeführt. Als Spülgas wurde Argon verwendet.

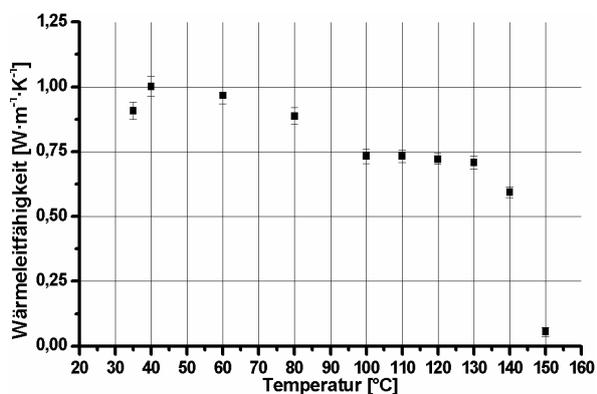
Die Dichte kann über die Extrapolation des spezifischen Volumens aus den  $pVT$ -Messdaten auf Normaldruck ermittelt werden.

Aus den bestimmten Materialdaten der Feedstocks lässt sich deren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  aus Gleichung 3 berechnen.

$$\lambda(T) = c_p(T) \cdot \rho(T) \cdot \alpha(T) \quad (3)$$

Die resultierende Wärmeleitfähigkeit ist in Bild 3 dargestellt.

Über ein look-up-table können die Daten der Wärmeleitfähigkeit in das Simulationsprogramm eingefügt werden.



**Bild 3** Messung der Wärmeleitfähigkeit des Feedstocks Inmafeed® K1011 berechnet nach Gleichung 3.

## 2.4 Probekörper und Sensorik

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurde ein Spritzgießwerkzeug mit verschiedenen Formeinsatzgeometrien von den Projektpartnern entworfen und von Fa. JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG gefertigt. Die verschiedenen Geometrien sind in Bild 4 dargestellt. Alle Versuchsgeometrien sind punktsymmetrisch zum Anguss ausgelegt, um eine symmetrische Befüllung der Kavität zu gewährleisten. Somit konnten in den Seitenarmen jeweils bis zu drei Temperatur- bzw. Drucksensoren in die Kavität eingebaut werden, um während des Spritzgießvorgangs Aussagen über das thermische Verhalten zu erhalten bzw. den Druckverlauf in der Formmasse in Abhängigkeit der Position zeitlich zu verfolgen. Die Abmessungen der Formeinsätze wurden so gewählt, dass kleinstmögliche kommerziell erhältliche Sensoren eingesetzt werden können.

Gewählt wurden Sensoren der Firma Priamus, die speziell für die Anforderungen im Spritzgießbereich entworfen wurden. Es wurden Drucksensoren (Typ 6003B) auf Basis des piezoelektrischen Messprinzips

mit einem Sensordurchmesser von 2,5 mm und thermoelektrische (Typ-N) Temperatursensoren (Typ 4001A) mit einem Durchmesser von 1 mm eingesetzt. Die Genauigkeit der Sensoren liegt bei  $\pm 1\%$  für die Druckmessung bzw. bei  $\pm 1,5 \text{ K}$  für die Temperatur.

Die Geometrien wurden ausgelegt um verschiedene Effekte während des Spritzgießzyklus näher zu untersuchen:



**Bild 4** 3D-Modelle der verwirklichten Formeinsatzgeometrien.

**Spirale:** Die Spirale ist besonders dafür geeignet, druckabhängige Füllstudien (Embryospritzgießen) durchzuführen

**Umlenkung:** Diese Geometrie lässt die Untersuchung des Druckverhaltens nach einer Umlenkung zu. Weiterhin können mögliche Entmischungseffekte zwischen Pulver und Binder bzw. zwischen Pulverpartikeln unterschiedlicher Größenfraktionen an dieser Geometrie näher untersucht werden.

**Düse:** An der Trichtergeometrie können Kompressionseffekte am Ende der Fließgeometrie beobachtet werden. Ebenso ermöglicht sie die Untersuchung des Fließfrontverhaltens vor und nach dem Hindernis.

**Diffusor:** Die plötzliche Weitung der Kavität ermöglicht eine genauere Untersuchung des Freistrahilverhaltens und der Bindahtformation während und nach dem Füllvorgang.

**Stufe:** Untersuchung des Druck- bzw. Temperaturverhaltens vor und nach einer Kavitätsverengung.

**Biegeprobe:** Diese Geometrie kann neben der Untersuchung des Füllverhaltens zur Bestimmung mechanischer Materialdaten im Grün- bzw. gesinteren Zustand verwendet werden..

Für die Füllstudien wurde ein konstanter Einspritzdruck über 30 s gehalten und der Fortschritt der Fließ-

front in Abhängigkeit der Werkzeugwandtemperatur und des angelegten Einspritzdrucks untersucht. Die Einspritztemperatur des Feedstocks wurde am Plastifizieraggregat auf 160°C festgelegt. Die Entformungstemperatur betrug in allen Versuchen 60°C.

### 3 Diskussion

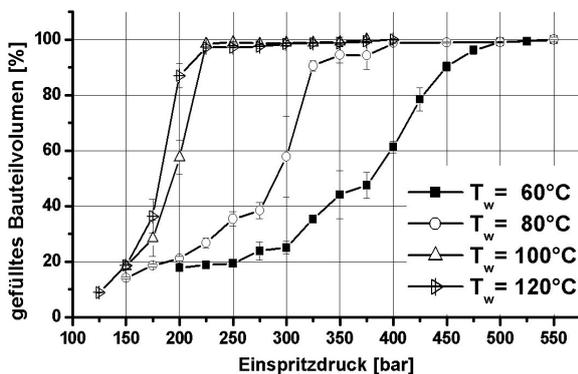
Am Beispiel der Biegeprobengeometrie und des Feedstock-Systems K1011 der Firma Inmatek soll hier ein Vergleich zwischen den ermittelten experimentellen Daten und den Simulationsergebnissen aus dem Programm Moldflow® basierend auf den dargestellten Materialparametern gezogen werden.

Die Versuchsbedingungen wurden mit Moldflow® nachgestellt. Interessant ist ein quantitativer Vergleich der Ergebnisse hinsichtlich Füllzeit, Fülldruck für eine vollständige Formfüllung und insbesondere des Verhaltens der Fließfront.

T [°C]	p <sub>exp</sub> [bar]	p <sub>sim</sub> [bar]	Abweichung [%]
60	525	275	+ 90
80	400	225	+78
120	200	45	+344

**Tabelle 1** Vergleich der benötigten Fülldrucke aus dem Experiment und der Simulation bei unterschiedlicher Werkzeugtemperatur.

Bild 5 zeigt das eingespritzte Bauteilvolumen in Abhängigkeit des beaufschlagten Einspritzdrucks und der Werkzeugwandtemperatur. Man erkennt, dass eine Erhöhung der Werkzeugwandtemperatur von üblichen Herstellerangaben von 60°C auf 80°C eine signifikante Erniedrigung des minimalen Einspritzdrucks bewirkt. Bei höheren Temperaturen verursacht die deutliche Erniedrigung der Feedstockviskosität eine signifikant vereinfachte Kavitätsfüllung.



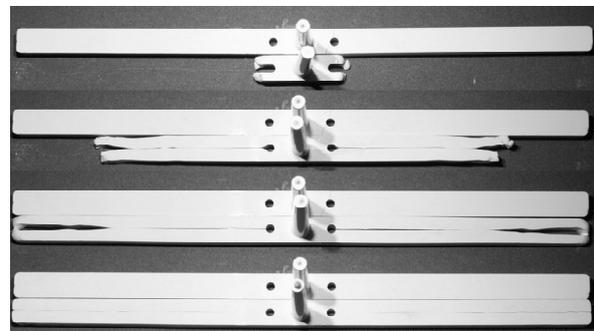
**Bild 5** Experimentell ermitteltes Bauteilvolumen der Biegeprobengeometrie in Abhängigkeit des Einspritzdrucks und der Werkzeugwandtemperatur.

Vergleicht man die Simulationsergebnisse von Moldflow® mit den experimentellen Ergebnissen hinsichtlich des Druckbedarfs für eine vollständige Kavi-

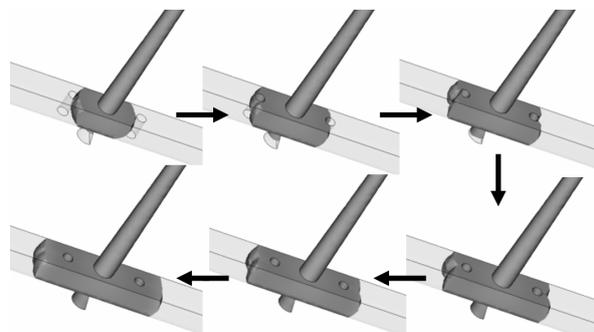
tätsfüllung auf Basis der gewählten Versuchsbedingungen erkennt man deutliche Unterschiede. Tabelle 1 zeigt die gewonnenen Daten in Abhängigkeit der Werkzeugwandtemperatur. Die berechneten Einspritzdrücke liegen deutlich unter den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen. Selbst bei einer Werkzeugwandtemperatur von 120°C, bei der der Glaspunkt aller Binderkomponenten überschritten ist, kann keine zuverlässige Aussage über den benötigten Druckaufwand getroffen werden. Die Abweichungen liegen hier sogar relativ gesehen deutlich höher, was vermuten lässt, dass der bestimmende Faktor nicht eine ungenügende Beschreibung des Erstarrungsverhaltens ist, sondern eher in der Modellierung des Fließverhaltens zu suchen ist.

Dies zeigt, dass das Simulationstool Moldflow® für eine zuverlässige Vorhersage im Pulverspritzgießen nicht herangezogen werden kann. Um das Verhalten der Fließfront während der Kavitätsfüllung zu untersuchen wurden Füllstudien an der Biegeprobengeometrie durchgeführt. In Bild 7 erkennt man deutlich, dass die Schmelzfront sich an den Stifteinschüben trennt und sich nicht wie in der Fließsimulation (Bild 8) direkt nach dem Hindernis wieder vereint.

Diese Beobachtung zeigt, dass das bestehende Fließmodell nicht geeignet ist, um komplexe Feedstocksysteme bestehend aus mehreren polymeren Bestandteilen und anorganischen Pulverpartikeln zu beschreiben.



**Bild 6** Füllstudie am Biegeprobengeometrie. Schmelztemperatur 160°C. Werkzeugwandtemperatur 120°C.



**Bild 7** Simulation der Biegeprobengeometrie mit

Moldflow® bei einer Schmelztemperatur von 160°C und einer Werkzeugwandtemperatur von 120°C.

## 4 Ausblick

Aus den hier dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass ein grundlegender Bedarf besteht die Forschungsarbeiten zur Entwicklung neuer Simulationswerkzeuge zu verstärken, um die Formfüllung von Feedstocksystemen besser beschreiben zu können.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauerteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ [8] wird derzeit ein neuartiges Simulationstool basierend auf der Dissipativen Teilchendynamik (DPD) entwickelt. Dieser neue Ansatz ermöglicht eine natürlichere Beschreibung von Fließfronten und ermöglicht die Implementierung von Benetzungseffekten, die speziell in Mikrodimensionen aufgrund des stark erhöhten Oberflächen- zu Volumenverhältnisses an Bedeutung gewinnen. Ein weiterer herausragender Vorteil der DPD ist, dass auch mehrphasige Feedstocksysteme mit diesem Modell einfach beschrieben werden können.

Erste Ergebnisse (Bild 8) zeigen, dass mit Hilfe dieses neuen Simulationstools eine hohe qualitative Übereinstimmung des Fließverhaltens an der Biegeprobengeometrie erzielt werden kann.



**Bild 8** Qualitativ hohe Übereinstimmung der DPD-Simulation mit experimentellen Ergebnissen.

Einhergehend mit der Entwicklung des Simulationswerkzeugs müssen neue Methoden zur Verifikation entwickelt werden. Hierzu zählen beispielsweise die Bestimmung der Pulverpartikelverteilung in Grünlingen und die Beschreibung der Benetzungseigenschaften von Binderkomponenten auf den Partikeloberflächen [9,10].

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung des Vorhabens (02 PD 2136) im BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Für die wissenschaftliche und experimentelle Unterstützung bei der Bestimmung der Materialeigenschaften sei Herrn Dr. Steffen Rath und für die Begleitung der Spritz-

gießversuche Herrn Heinz Walter gedankt. Weiterer Dank geht an Herrn David Kauzlaric vom Institut für Mikrosystemtechnik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Lehrstuhl für Simulation) für die Bereitstellung erster Ergebnisse der Spritzgießsimulation auf Basis der Dissipativen Teilchendynamik.

## 5 Literatur

- [1] J. Eck; Simulation und experimentelle Versuche beim Pulverspritzgießen von Mikrostrukturen; Diplomarbeit an der FH Darmstadt in Kooperation mit dem Forschungszentrum Karlsruhe, Nov. 1999.
- [2] M.M. Cross; Relation between viscoelasticity and shearthinning behaviour in liquids; Rheol. Acta 18 (1979), 609-614.
- [3] J.E. McKinney, R. Simha; Configurational Thermodynamic Properties of Polymer Liquids and Glasses. I. Poly(vinyl acetate); Macromolecules; Vol. 7, No. 6, 1974, 894-901.
- [4] J. Cho, I.C. Sanchez; PVT Relationships and Equations of State of Polymers; in J. Brandrup, E.H. Immergut, E.A. Grulke (eds): Polymer Handbook; John Wiley and Sons, New York; 1999; VI/591 f.
- [5] S. Beret and J.M. Prausnitz; Densities of Liquid Polymers at High Pressure. Pressure Volume Temperature Measurements for Polyethylene, Polyisobutylene, Poly(vinyl acetate), and Poly(dimethylsiloxane) to 1 kbar; Macromolecules, Vol. 8, No. 4, 1975, 536-538.
- [6] H. Mayer; Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramiken für die Medizintechnik; Tagungsband Mikrosystemtechnik Kongress 2005.
- [7] D. Kauzlaric, A. Greiner, J.G. Korvink, M. Schulz, R. Heldele; Modelling Micro-PIM in Baltes, Henry; Brand, Oliver; Fedder, Gary K.; Hierold, Christofer; Korvink, Jan G.; Tabata, Osamu; Löhe, Detlef; Haußelt, Jürgen (Eds.): Microengineering of Metals and Ceramics; ISBN 3-527-31208-0, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, 2005.
- [8] <http://www.sfb499.de>.
- [9] R. Heldele, S. Rath, L. Merz, R. Butzbach, M. Hagelstein, J. Haußelt: X-ray Tomography of Powder Injection Molded Micro Parts using Synchrotron Radiation, E-MRS Spring Meeting 2005, to be pub. in Nuclear Instruments and Methods B.
- [10] R. Heldele, J. Haußelt, D. Kauzlaric, J.G. Korvink, M. Schulz: Micro Powder Injection Molding – Process Characterization and Modeling, Proc. DTIP 2005, Montreux (CH) 1.-3. 06. 2005. To be pub. in J. Microsystem Tech. 2005.





## Micro-P-PIM



# Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikro-Präzisions-Bauteile aus Keramik und Metall

## Simulation des PIM-Prozesses für Probekörper

Richard Heldele et al.  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Mikrosystemtechnik-Kongress, Freiburg 11. Oktober 2005

## Inhalt

## Micro-P-PIM



- Motivation & Zielsetzung
- Bestimmung der Materialparameter
- Probekörpergeometrien und Sensorik
- Vergleich Simulation und Experiment
- Zusammenfassung
- Ausblick

## Motivation & Zielsetzung



### Micro-P-PIM



### Anforderungen an ein Simulationsprogramm:

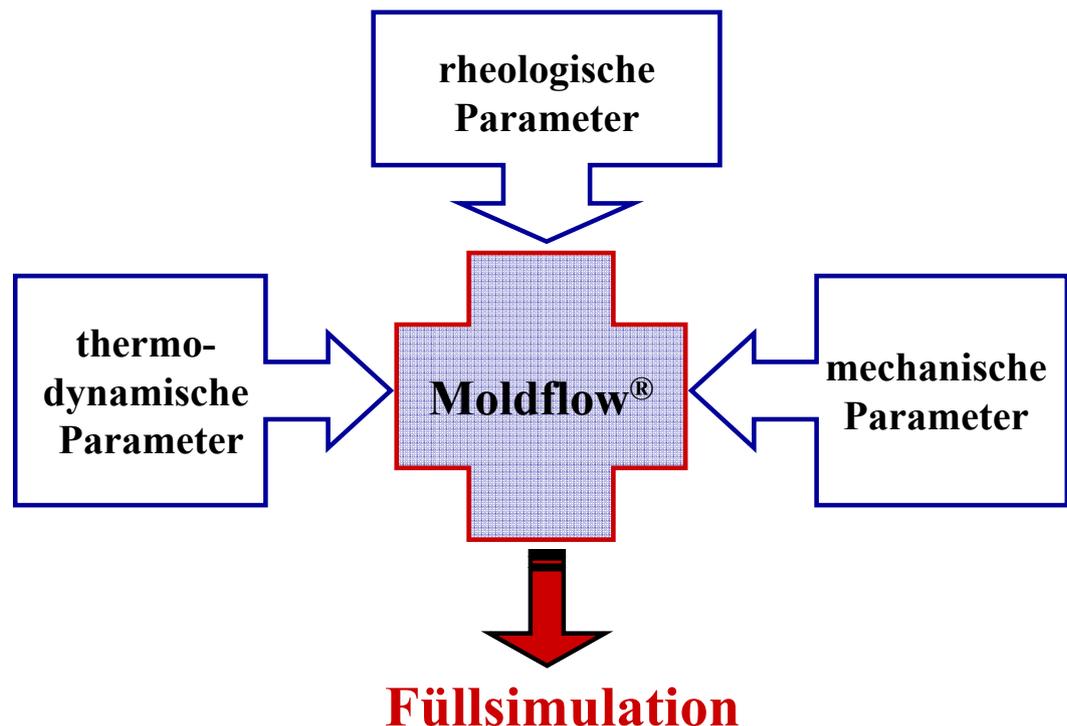
- Zuverlässige Beschreibung des Fließverhaltens
  - Auslegung von Angussgeometrien
  - Scherbeanspruchung des Feedstocks (Rezyklierfähigkeit)
- Optimierung des Prozeßzyklus
  - Füllgeschwindigkeit/Nachdruck
  - Minimierung von inneren Spannungen
- Entmischungseffekte
- Oberflächeneffekte in Mikrodimensionen

➔ **Eignet sich Moldflow® für PIM ?**

## Bestimmung der Materialparameter



### Micro-P-PIM



# Rheologische Feedstockcharakterisierung

GEFÖRDELT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

### Scherviskosität

### Dehnviskosität

### Frequenzverhalten/ Fließgrenze



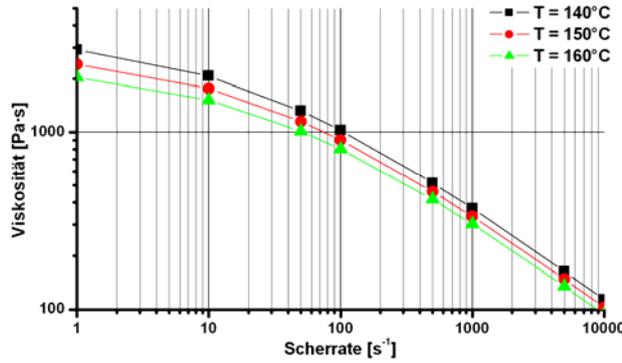
Quelle: Goettfert



Quelle: Malvern



Quelle: Malvern



### Cross-WLF-Modell

$$\eta(T, \dot{\gamma}_a) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}_a}{\tilde{\tau}}\right)^{1-n}}$$

# Zustandsdiagramm (pvT) I

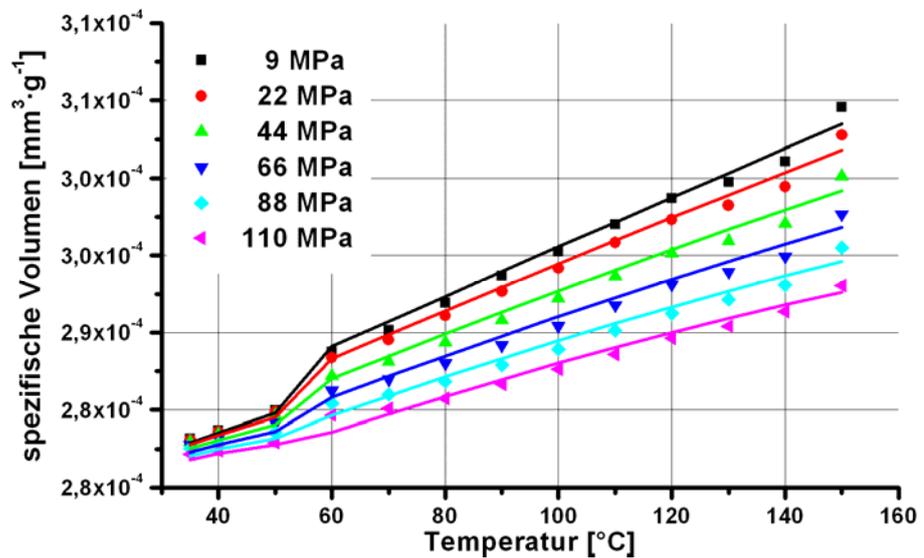
GEFÖRDELT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

### 2-Phasen-Tait-Modell:

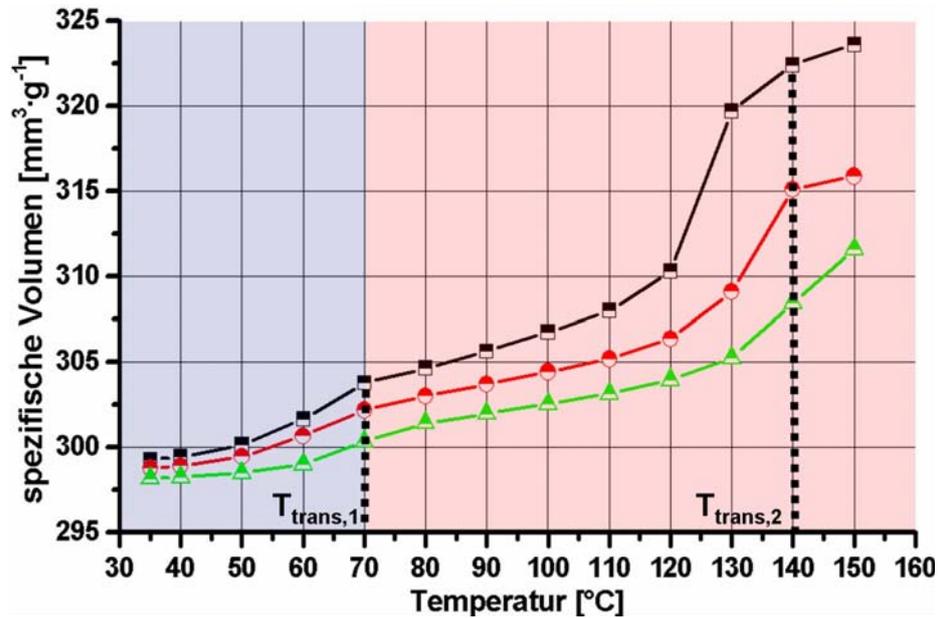
$$V(T, p) = V_t(T, p) + V_0(T) \cdot \left[1 - C \cdot \ln\left(1 + \frac{p}{B(T)}\right)\right]$$



## Zustandsdiagramm (pvT) II

- Binder bestehen aus mehreren polymeren Komponenten

➔ mehrere überlagerte Phasenübergänge



### Micro-P-PIM

★ JUNGHANS  
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Projekträger  
Forschungszentrum  
Karlsruhe (PTKA)

## Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit I

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \alpha(T)$$

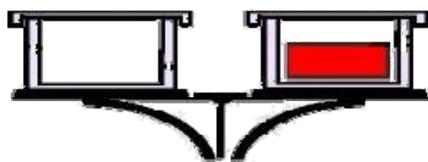
c<sub>p</sub>: Wärmekapazität

ρ : Dichte

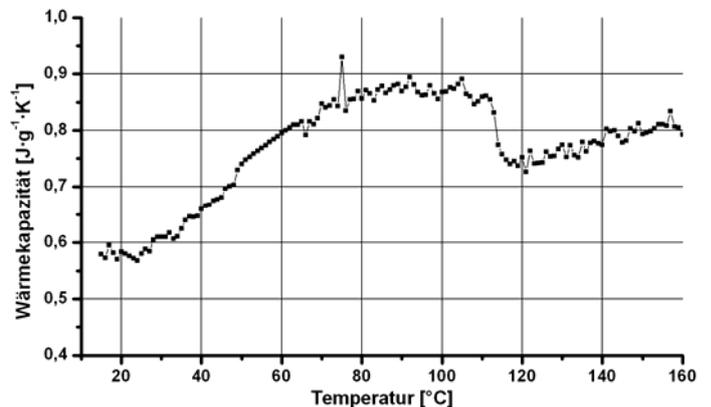
α : Temperaturleitfähigkeit

a) Dichte ρ

b) Wärmekapazität c<sub>p</sub>



Differential-  
Scanning-  
Calorimetry



### Micro-P-PIM

★ JUNGHANS  
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Projekträger  
Forschungszentrum  
Karlsruhe (PTKA)

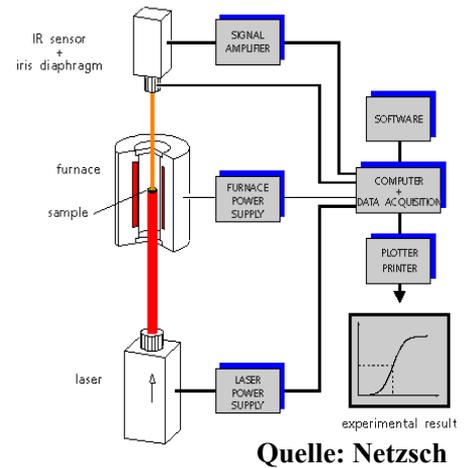
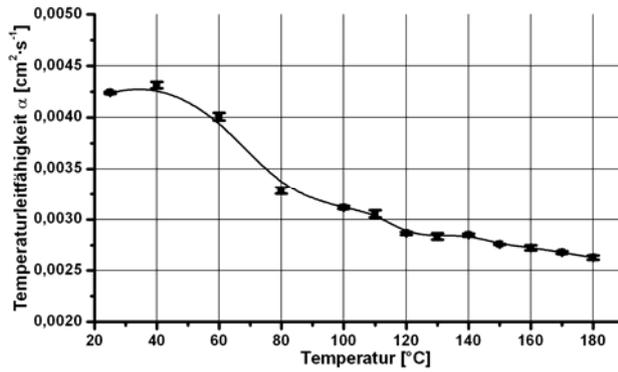
# Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit II

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

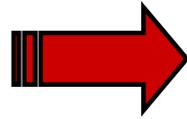
Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**

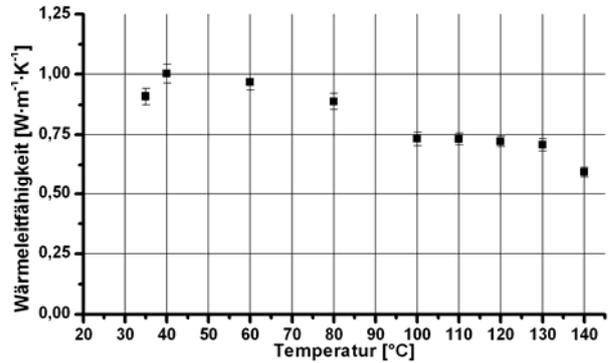
## c) Temperaturleitfähigkeit $\alpha$



Wärmeleitfähigkeit



Implementierung als „look-up“-Tabelle



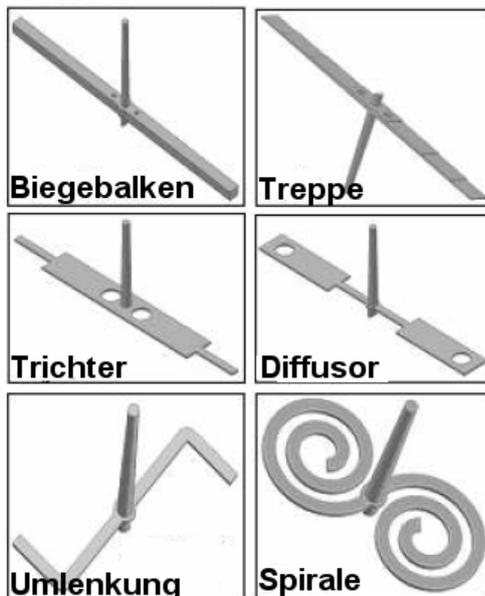
# Probekörper und Sensorik

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**

## Probekörper:



## Spritzgießmaschine:



## Sensorik:



## Sensordaten

GEFÖRDEBT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projekträger  
Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

### Micro-P-PIM

JUNGHANS  
Feinwerktechnik

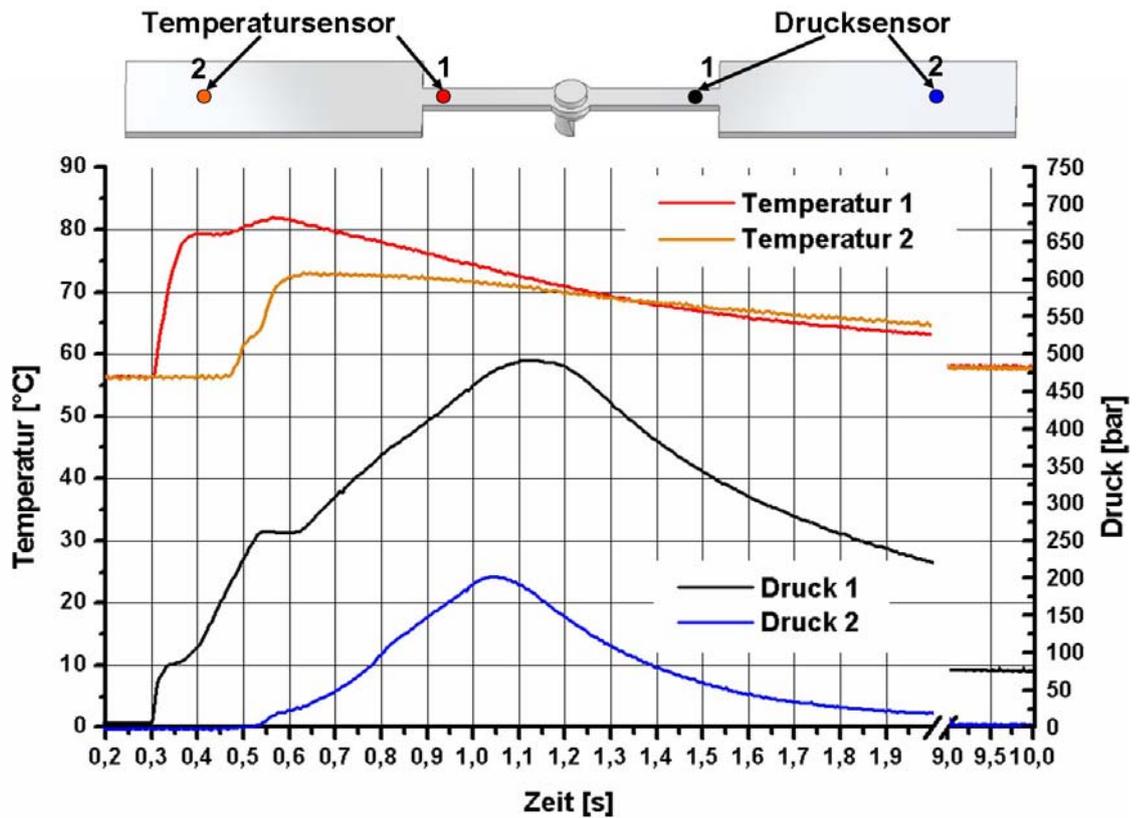
ARBURG

FRIATEC

ADC  
KRONE

schunk

LMU



## Simulation am Beispiel Biegeprobe

GEFÖRDEBT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Projekträger  
Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

### Micro-P-PIM

JUNGHANS  
Feinwerktechnik

ARBURG

FRIATEC

ADC  
KRONE

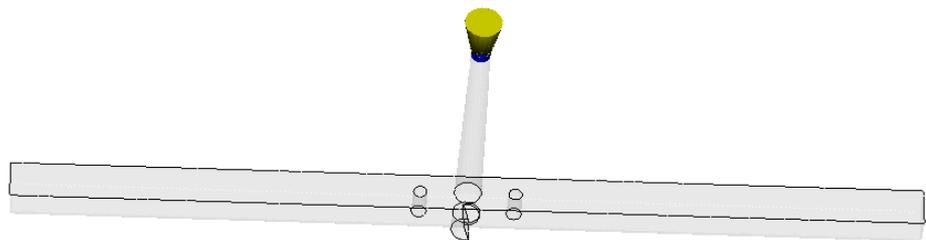
schunk

LMU

### Versuchsparameter für Simulation und Experiment:

- konstanter Einspritzdruck Betrag variabel
- Dauer 30 s
- Schmelztemperatur 160°C
- Werkzeugwandtemperatur 60°C – 120°C

### Simuliertes Füllverhalten bei 60°C Werkzeugtemperatur:



## Experimentelle Verifikation

GEFÖRDEBT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

### Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik

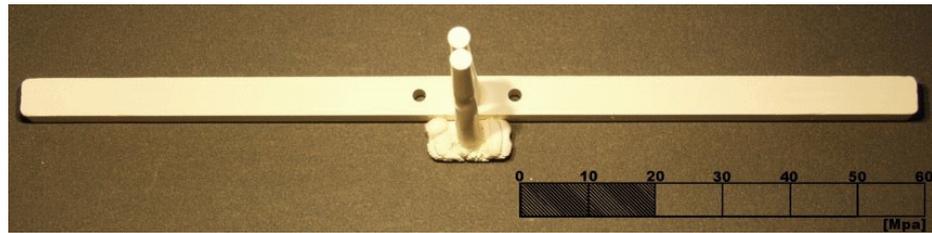
**ARBURG**

**FRIATEC**

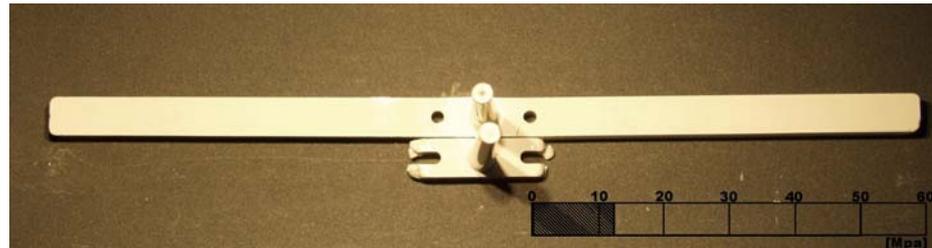
**ADC**

KRONE

**schunk**



Füllstudie bei 60°C Werkzeugtemperatur



Füllstudie bei 120°C Werkzeugtemperatur

## Minimaler Fülldruck: Experiment / Simulation

GEFÖRDEBT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

### Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik

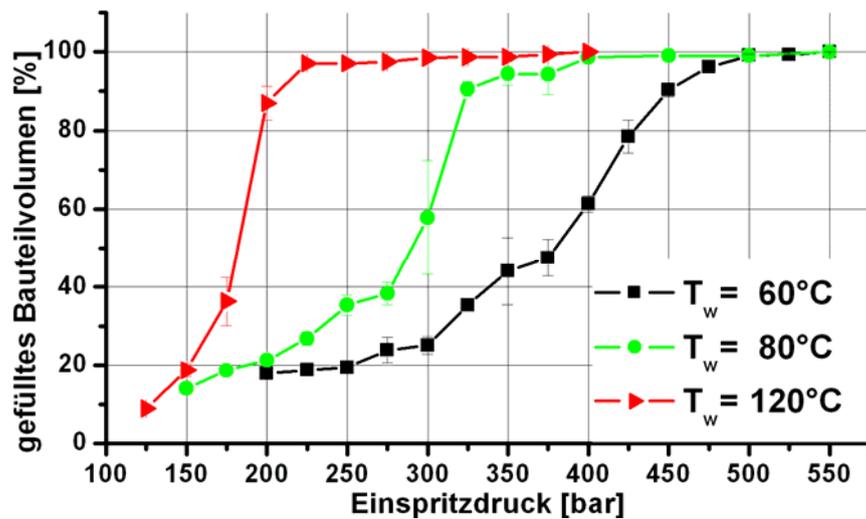
**ARBURG**

**FRIATEC**

**ADC**

KRONE

**schunk**

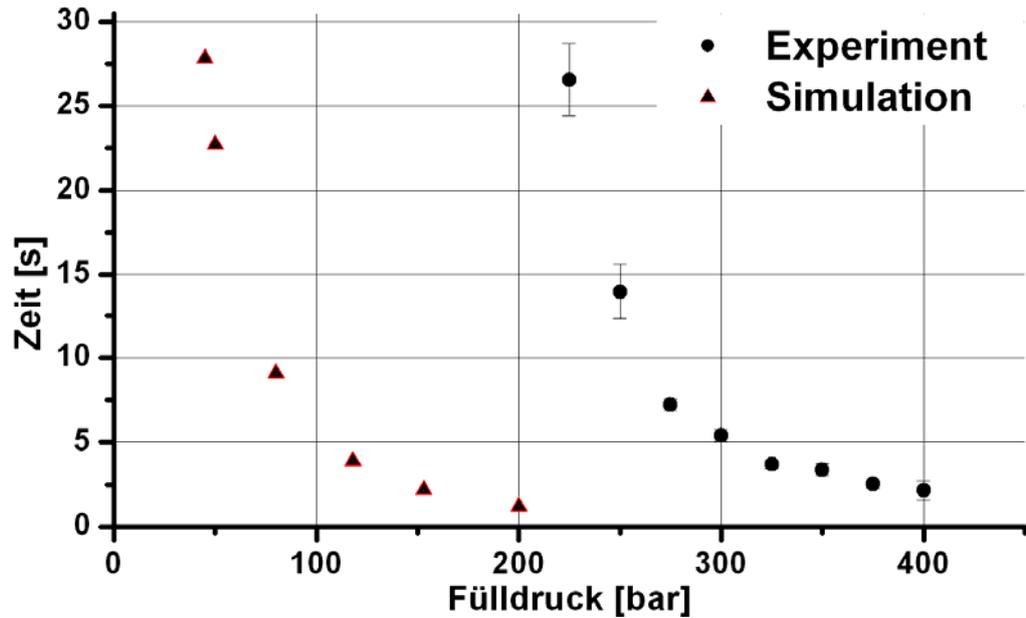


T [°C]	p <sub>exp</sub> [bar]	p <sub>sim</sub> [bar]	Abweichung [%]
60	525	275	+ 90
80	400	225	+78
120	200	45	+344



## Füllzeit: Experiment / Simulation

### Micro-P-PIM



➔ **Deutliche Unterschiede zwischen Simulation und Experiment!**



## Zusammenfassung

### Micro-P-PIM



### Implementierung von Materialeigenschaften:

- 2-Phasen-Tait-Modell für Feedstocks nur bedingt geeignet
- rheologisches Modell berücksichtigt keine Fließgrenzen

➔ **Fließverhalten wird nicht korrekt abgebildet**

### Quantitativer Vergleich zwischen Experiment und Simulation:

- Faktor 4 Unterschied im Fülldruck
- deutlicher Unterschied in der Füllzeit

**Keine Aussage über Benetzungsverhalten in  $\mu$ -Dimensionen**

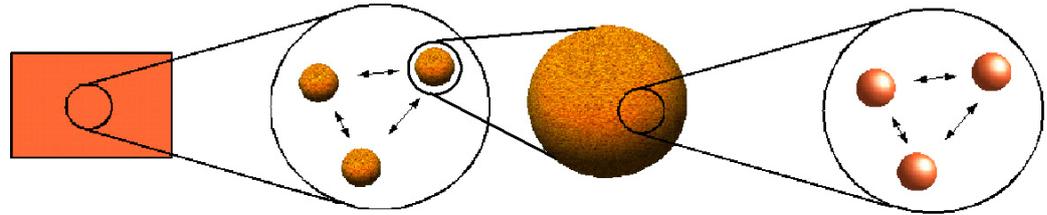
**Keine Aussage über mögliche Entmischungseffekte**

➔ **Gibt es Alternativen ?**

## Ausblick I: Die Dissipative Partikeldynamik



### Micro-P-PIM



Kontinuum

Dissipative Partikel-  
dynamik (DPD)

Molekulardynamik

DPD ist ein mesoskopisches Modell:

- mittelt über atomare Eigenschaften
- DPD-Teilchen entsprechen Atom- o. Molekülclustern

Wechselwirkung zwischen DPD-Teilchen:

- konservativ  $F_{ij}^C(\mathbf{r}_{ij})$
- dissipativ  $F_{ij}^D(\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{v}_{ij}),$
- stochastisch  $F_{ij}^R(\mathbf{r}_{ij})$

## Ausblick II: Vorteile der DPD



### Micro-P-PIM



natürliche Darstellung von Fließfronten:

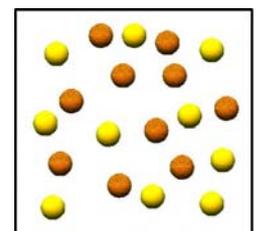
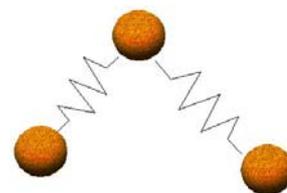


Benetzung:



mehrphasige Systeme:

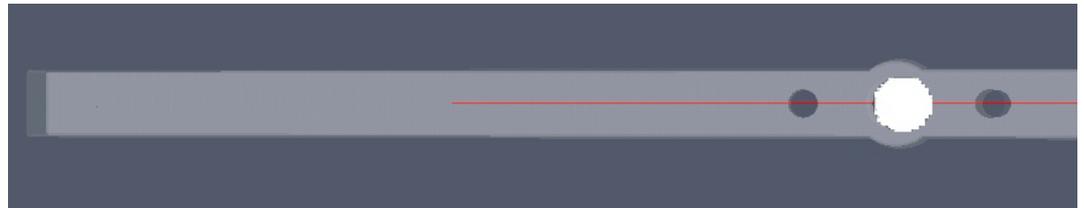
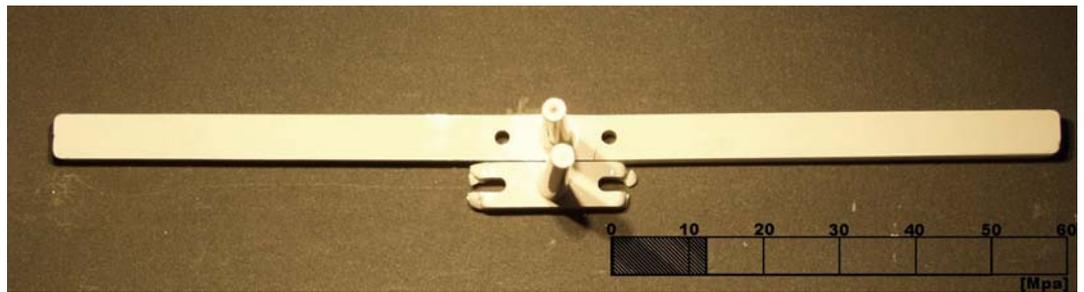
- zusätzliche Freiheitsgrade (Partikeldichteverteilung, Polymerkettenorientierung)
- oder explizit mesoskopisch



## Ausblick III: Erste Ergebnisse



### Micro-P-PIM



- ➔
- hohe qualitative Übereinstimmung
  - berücksichtigt Effekte in Mikrodimensionen
  - berücksichtigt Mehrphasigkeit von Feedstocks

## Danksagung



### Micro-P-PIM



## Vielen Dank:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Institut für Mikrosystemtechnik

Lehrstuhl für Simulation

Dipl.-Ing. David Kauzlaric

Allen Projektpartnern

Allen Mitarbeitern des

Instituts für Materialforschung III

## **Toleranzen von pulverspritzgegossenen Präzisionsteilen aus $\text{ZrO}_2$ - Keramik am Beispiel von Ferrulen**



# Toleranzen von pulverspritzgegossenen Präzisionsteilen aus ZrO<sub>2</sub>-Keramik am Beispiel von Ferrulen

Martin Beck <sup>1)</sup>, Dietrich Rund <sup>2)</sup>, Klaus Müller <sup>1)</sup>, Robert Ruprecht <sup>1)</sup>, Volker Piotter <sup>1)</sup>, Jürgen Haußelt <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung III,  
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe

<sup>2)</sup> ADC GmbH, Beeskowdamm 3-11, D-14167 Berlin

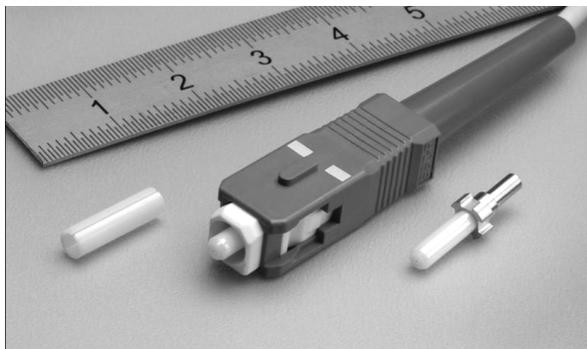
## Kurzfassung

Das keramische Pulverspritzgießen (CIM) ermöglicht die endkonturnahe wirtschaftliche Produktion von komplex geformten Bauteilen in großen Stückzahlen. Bei besonders hohen Anforderungen an die Bauteilpräzision ist jedoch eine aufwändige Hartbearbeitung der gesinterten Keramikteile notwendig, die bis zu 50 % der Herstellkosten ausmachen kann. Eine Verbesserung der erzielbaren Bauteilqualität ist somit ein effektiver Schritt zur Kostenreduzierung. Das Ziel der Arbeiten war die Untersuchung des Keramikpulverspritzgießprozesses hinsichtlich der erreichbaren Bauteiltoleranzen. Hierzu wurde der Außendurchmesser von spritzgegossenen Singlemode-Ferrulen aus ZrO<sub>2</sub>-Keramik jeweils am Grünling und am gesinterten Teil mit hoher Genauigkeit vermessen. Durch Variation der Prozessparameter beim Spritzgießen wurden deren Einfluss auf die Qualität der Bauteile ermittelt und Schritte zur Prozessverbesserung durchgeführt. Bei der Bauteilherstellung im Labormaßstab konnten Toleranzen von  $2,5 \text{ mm} \pm 6 \text{ } \mu\text{m}$  ( $\pm 0,24 \text{ } \%$ ) am Außendurchmesser gesintertter Ferrulenrohlinge erzielt werden.

## 1 Motivation und Zielsetzung

### 1.1 Demonstrator Singlemode-Ferrule

Aufgrund der steigenden Übertragungsraten werden für die Datenübertragung vermehrt Lichtwellenleiter eingesetzt. Die zur Verbindung der Glasfaserkabel benötigten Steckverbinder sind hochpräzise Bauteile, die jährlich in Millionenstückzahlen produziert werden. Das Kernstück bilden hochgenaue Führungsröhrchen, so genannte Ferrulen (s. **Bild 1**), in deren konzentrische Bohrungen die Glasfasern eingeklebt werden.



**Bild 1** Glasfaserstecker Typ SC (Mitte), Sleeve (li) und Ferrule mit Metallflansch (re).

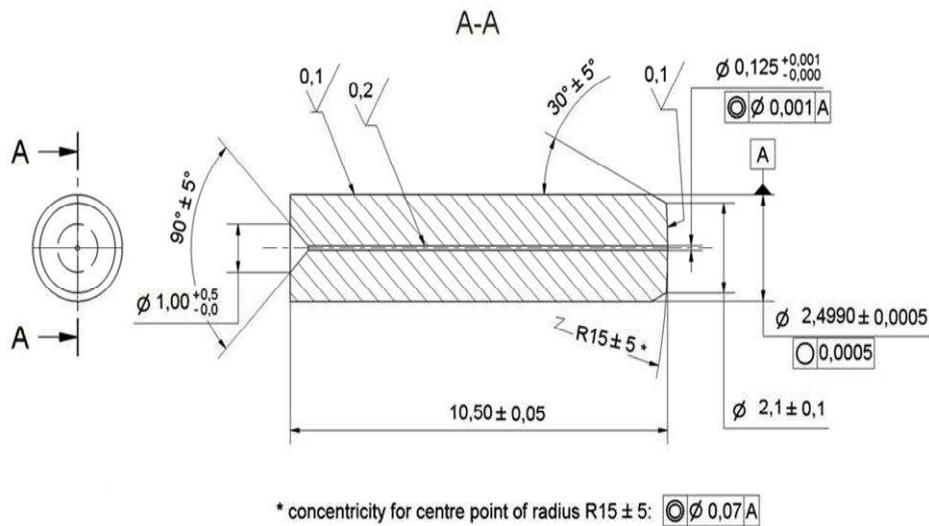
In einer Steckverbindung werden zwei Ferrulen in eine hochpräzise dünnwandige geschlitzte Hülse (Sleeve) gesteckt, so dass sich ihre Stirnflächen berühren. So wird nach dem Stift-Hülse-Prinzip die lösbare

zentrische Fixierung der beiden zu koppelnden Glasfasern sichergestellt. Damit die Datenübertragung auch bei wiederholten Steckvorgängen und wechselnden Temperaturen gewährleistet ist, werden die Ferrulen aus Zirkondioxid-Keramik hergestellt. Bei Singlemode-Fasern mit  $9 \text{ } \mu\text{m}$  Kerndurchmesser hat bereits ein seitlicher Versatz zweier Fasern von wenigen Mikrometern eine erhebliche Einfügedämpfung zur Folge. Daher liegen die Toleranzen für Außendurchmesser, Bohrungsdurchmesser und Konzentrität der Bohrung sowie die Oberflächengüte im Submikrometerbereich (vgl. **Bild 2**).

### 1.2 Zielsetzung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ (Micro-P-PIM) am Institut für Materialforschung III des Forschungszentrums Karlsruhe in Kooperation mit den Projektpartnern ADC GmbH (Berlin) und der JUNGHANS FEINWERKTECHNIK GmbH & Co. KG (Schramberg) durchgeführt [12, 14].

Zum Zeitpunkt der Antragstellung und Begutachtung des Projektes wurden Ferrulen durch Extrusion und umfangreiche Nacharbeit hergestellt. Während der Startphase des Projekts wurden Ergebnisse zum Pulverspritzgießen von Ferrulen veröffentlicht [16]. Das Pulverspritzgießen (PIM; Powder Injection Moulding) ist ein Urformverfahren, das die endkonturnahe Her-



**Bild 2** Geometrische Produktspezifikation für Singlemode-Ferrule (Angaben in mm).

stellung von Bauteilen aus Metall und Keramik in großen Stückzahlen ermöglicht. Allerdings ist auch das keramische Pulverspritzgießen (CIM) bis heute nicht in der Lage, die für Singlemode-Ferrulen geforderten Toleranzen zu erreichen. Daher ist eine kostenintensive Hartbearbeitung (Schleifen und Polieren) der gesinterten Ferrulen derzeit unumgänglich. Das Ziel der Arbeiten im Rahmen des Micro-P-PIM-Projekts ist daher die Untersuchung des Pulverspritzgießprozesses am Beispiel von Keramik-Ferrulen im Hinblick auf eine möglichst nachbearbeitungsarme und damit kostengünstigere Fertigung von zylindrischen Präzisionsteilen.

## 2 Stand der Technik

Die Maßtoleranzen von pulverspritzgegossenen Bauteilen werden von vielen Faktoren beeinflusst, so dass die Abmessungen des gesinterten Teils alle vorangegangenen Prozessschritte, beginnend beim Compoundieren des Feedstocks, über die Formgebung durch Spritzgießen bis zum Entbindern und Sintern widerspiegeln. Ein Großteil der Maßtoleranzen wird durch die Sinterschwindung verursacht, wobei die Ursachen bereits in der Formgebung begründet sein können, z. B. durch Dichteschwankungen im Grünteil oder Eigenspannungen, die in der Füll- und Nachdruckphase entstehen. Außerdem können auch Unterschiede zwischen verschiedenen Feedstockchargen einen großen Einfluss auf die Bauteilgeometrie haben. Der Expertenkreis der deutschen MIM-Industrie nennt für komplex geformte PIM-Produkte aus Metall mit Abmessungen im Bereich von 3 mm eine Maßtoleranz von 50 µm. GERMAN gibt als Richtwert für typische Maßtoleranzen im Pulverspritzguss  $\pm 0,3\%$  an und nennt  $\pm 0,1\%$  als bestmögliche Sintertoleranz [6]. Dass ebendort für Absolutmaße  $\pm 0,04$  mm angegeben wird, zeigt, dass sich diese allgemeinen Angaben nicht für Ultrapräzisionsbauteile mit Toleranzen im Mikro-

meterbereich wie die Singlemode-Ferrulen ermittelt wurden, sondern sich eher auf großvolumige PIM-Bauteile beziehen. TSENG gelang es, die Variation der Dicke von durch CIM hergestellten Teilen sowohl im grünen als auch im gesinterten Zustand zu reduzieren, indem er beim Spritzgießen eine niedrige Werkzeugtemperatur und einen hohen Nachdruck verwendete; außerdem zeigte er, dass die Streuung der Abmessungen vom Grünteil zum Sinterteil merklich zunimmt [15]. Die Innendurchmesser von dünnwandigen Hülisen für Glasfaserstecker (Sleeves) aus  $ZrO_2$  lassen sich laut LIN [11] auf  $2,48 \pm 0,005$  mm präzise durch CIM fertigen, wobei die Durchmesser an einer angussnahen und einer angussfernen Position gemessen wurden. Es werden jedoch keine detaillierten Angaben zur tatsächlichen Messgenauigkeit der verwendeten Mikrometerschrauben gemacht. Kato [10] legt den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Konzentrität von Singlemode-Ferrulen im CIM-Prozess dar, wobei sogar mit einem 16-fach Werkzeug eine Konzentrität von ca. 12 µm erreicht werden konnte. Weitere Veröffentlichungen aus dem Bereich Metallpulverspritzguss zeigen den Einfluss der Formmasse auf die geometrische Bauteilqualität: HEANEY [7] erläutert, dass bereits die Art der Pulverherstellung (gasverdüst oder wasserverdüst) die Streuung der Abmessungen von MIM-Bauteilen beeinflusst. ZAUNER [17] zeigt eine Korrelation zwischen der Streuung der Feedstock-Viskosität und der Variation der Bauteilabmessungen.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass alle Schritte in der Prozesskette des keramischen Pulverspritzgusses einen großen Einfluss auf die geometrische Bauteilqualität haben können, woraus sich ein hoher Aufwand für die Qualitätssicherung im CIM-Prozess ergibt.

### 3 Arbeitsprogramm und -methoden

#### 3.1 Arbeitsprogramm

Durch die Analyse des Keramikpulverspritzgießprozesses sollten die Faktoren ermittelt werden, die den größten Einfluss auf die geometrische Bauteilqualität haben. Dazu wurden die Prozessparameter beim Spritzgießen variiert und ihr Effekt auf die Bauteilqualität untersucht. Für die Abformung der Bauteile wurde ein kommerzieller  $ZrO_2$ -Feedstock verwendet. Zur Beurteilung der Bauteilqualität wurde an Grün- und Sinterteilen der Außendurchmesser der Ferrulen in mehreren Messebenen und Winkelpositionen untersucht. Außerdem wurde die Oberflächenqualität der Ferrulen an Stirn- und Mantelfläche gemessen. Geometrie und Oberflächenqualität der Kavität des Spritzgießwerkzeugs wurden ebenfalls vermessen, so dass Geometrie und Oberfläche der Bauteile mit dem Formwerkzeug verglichen werden konnten. Formfüllung und Abkühlvorgang wurden mit der kommerziellen Software MOLDFLOW<sup>®</sup> simuliert. Die für die Füllsimulation nötigen Werkstoffdaten des Feedstocks wurden ermittelt und in [8] veröffentlicht.

#### 3.2 Ausrüstung und Methoden

##### 3.2.1 Probenherstellung durch CIM

###### Spritzgießmaschine und -werkzeug

Für die Probenherstellung wurde von der ARBURG GmbH & Co. KG (Loßburg) im Rahmen des Projekts Micro-P-PIM eine Spritzgießmaschine ALLROUNDER 420 C 600-100 zur Verfügung gestellt. Die Maschine verfügt über eine lagegeregelte Spritzeinheit mit Schneckendurchmesser 15 mm in verschleißfester Ausführung sowie weitere Sonderausrüstung wie zum Beispiel variotherme Prozessführung und Vakuumanlage für das Mikrospritzgießen [12].

Das verwendete Spritzgießwerkzeug wurde bei JUNG-HANS FEINWERKTECHNIK GmbH (Schramberg) gefertigt. Der Aufbau entspricht industriellen Vierfach-Ferrulenwerkzeugen, für den Laborbetrieb ist jedoch nur eine Kavität ausgearbeitet. Der Bauteilspezifikation (vgl. **Bild 2**) entsprechend liegen auch die Fertigungstoleranzen der Kavität im Submikrometerbereich und damit an der Grenze des heutigen Präzisionswerkzeugbaus [12].

###### Formmasse (Feedstock)

Für die Herstellung der Ferrulen wurde der kommerzielle Zirkondioxid-Feedstock INMAFEED<sup>®</sup> K1011 (Hersteller: INMATEC TECHNOLOGIES GmbH, Rhein-

bach) verwendet. Er basiert auf dem Zirkondioxidpulver TZ-3YS-E (Herst.: TOSOH Corp.) mit einer mittleren Partikelgröße  $d_{50}$  von ca.  $0,5 \mu\text{m}$  und einer spezifischen Oberfläche BET  $5,81 \text{ m}^2/\text{g}$ .

###### Ofentechnik

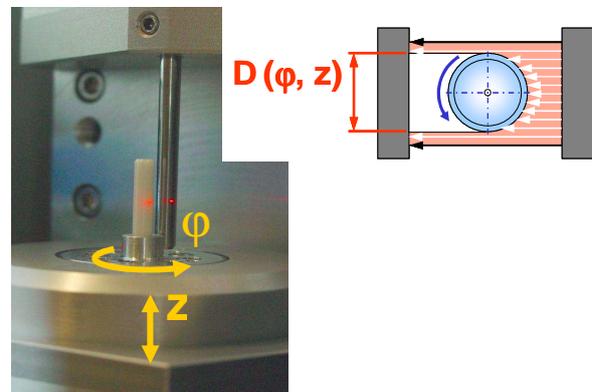
Die thermische Entbinderung der Bauteile erfolgte wie auch das Sintern in einem Hochtemperaturkammerofen CARBOLITE RHF 17/3 E (Herst.: CARBOLITE GmbH, Ubstadt-Weiher).

##### 3.2.2 Qualitätssicherung

Masse, Abmessungen und Oberflächenqualität der im keramischen Pulverspritzguss hergestellten Bauteile wurden im grünen und gesinterten Zustand bestimmt.

###### Bauteilabmessungen

Außendurchmesser, Rundheit und Zylinderformtoleranz der Ferrulen wurden mit einem Laserscanner 1210 GOLD LX (Herst.: Z-MIKE GmbH, Groß-Umstadt, vgl. [9]) gemessen. Der Laserscanner wurde mit hochgenauen Luftlagerachsen ausgerüstet, damit die Proben exakt im Messfeld positioniert und um eine definierte Achse rotiert werden können (vgl. **Bild 3**), was für Bestimmung der Zylinderformtoleranz unabdingbar ist. Die ermittelte Wiederholgenauigkeit der Messungen liegt unter  $\pm 0,15 \mu\text{m}$ .



**Bild 3** Berührungslose Durchmesserbestimmung mit Submikrometergenauigkeit nach dem Schattenwurfprinzip mit Laserscanner Z-Mike 1210 Gold LX [2].

Die Länge der Ferrulen wurde mit einem Taster CT 60-M (Herst.: DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, Traunreut) bestimmt.

Die Vermessung der Werkzeugkavität erfolgte mit einem Koordinatenmessgerät WERTH VIDEO CHECK<sup>®</sup> (Herst.: WERTH MESSTECHNIK GmbH, Gießen) mit einem messenden taktil-optischen Sensor (Fasertaster, vgl. [4]).

## Oberflächenqualität

Die Rauheit und Topographie der Bauteile wurde mit einem FRT MICROGLIDER® (FRIES RESEARCH TECHNOLOGY GmbH, Bergisch Gladbach [5]) mit einem konfokalen Punktsensor mit chromatischer Codierung (Typ CHR 150N) vermessen. Für die Messung der Rauheit der Werkzeugkavität kam außerdem auch ein Tastschnittgerät PERTHOMETER® S6P (Herst.: MAHR GmbH, Göttingen; Spitzenradius 10 µm) zum Einsatz.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Genauigkeit der Kavität des Spritzgießwerkzeugs

Die bestmöglich erzielbare Bauteilqualität ist durch die Qualität der Werkzeugkavität begrenzt. Daher wurden Geometrie und Oberflächenqualität der Kavität des Spritzgießwerkzeugs vermessen.

#### 4.1.1 Geometrie der Kavität

Die Geometrie des Formeinsatzes, der den zylindrischen Außendurchmesser der Ferrule formt, wurde mit dem WERTH VIDEO CHECK® Koordinatenmessgerät vermessen. Als Sensor wurde ein Fasertaster mit Kugeldurchmesser 257 µm verwendet. In fünf Messebenen bis in eine Tiefe von 13 mm (entspricht der Länge der zylindrischen Mantelfläche der Ferrule) wurden jeweils 8 Punkte angetastet. Diese wurden ebenenweise zu einem Kreis gefittet und für alle Kreise wurde ein Zylinderfit berechnet (vgl. **Tabelle 1**).

Beim Zylinderfit ergab sich ein Innendurchmesser der Kavität von 3,200 mm bei einer Formtoleranz (Abstand zwischen Hüll- und Pufferkreis der Messpunkte) von 4,2 µm. Der Durchmesser der Kavität variiert demnach um 1,6 µm über die Tiefe von 13 mm; es

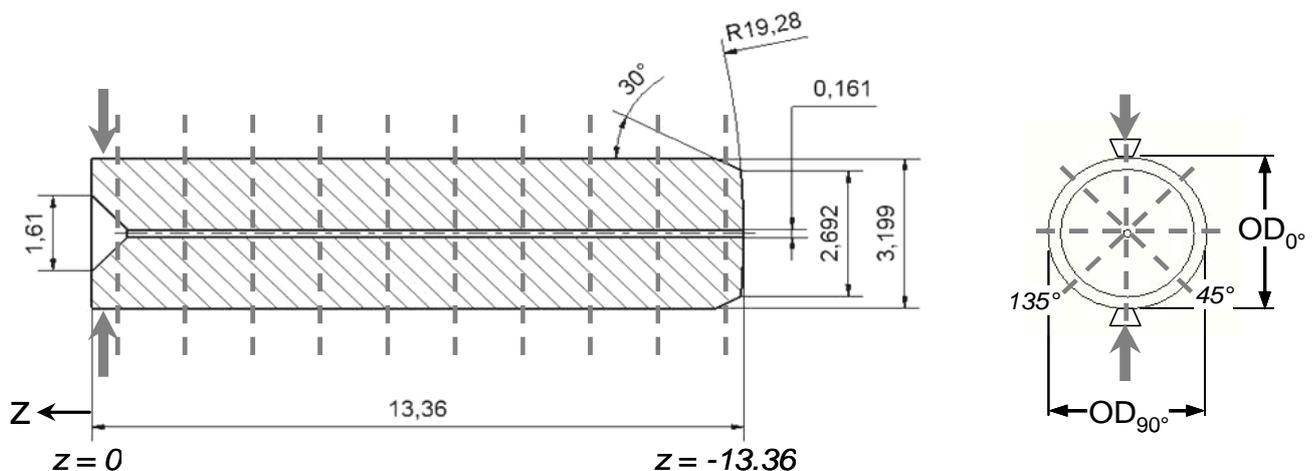
kann bei der Größenordnung der Abweichungen allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass aufgrund optischer Effekte ein Messfehler auftritt, der mit der z-Position variiert.

z [mm]	ID [mm]	FT [µm]
-1	3,2009	1,4
-4	3,2003	1,3
-7	3,1995	2,7
-10	3,2005	1,4
-13	3,2012	1,1
<i>Zylinder</i>	<i>3,2004</i>	<i>4,2</i>

**Tabelle 1** Innendurchmesser ID und Formtoleranz FT der Kavität in fünf Messebenen (Tiefe z) und Ergebnis des Zylinderfits (alle Ebenen).

#### 4.1.2 Oberflächenqualität der Kavität

Um Bauteiltoleranzen im Mikrometerbereich zu erreichen, ist eine gute Oberflächenqualität bereits im Spritzgießwerkzeug von entscheidender Bedeutung. Die Rauheit des Formeinsatzes wurde mit dem PERTHOMETER® S6P bestimmt, Werkzeugkern und Formauswerfer wurden mit dem MICROGLIDER® vermessen. Die maximale Profiltiefe  $R_{max}$  bei Formauswerfer (formt Stirnfläche der Ferrule) und Kern (formt Bohrung in Ferrule) liegt bei 1,2 bzw. 2,0 µm. Am größten ist die Rauheit am Formeinsatz (zylindrische Mantelfläche) mit einem  $R_a$ -Wert von bis zu 0,3 µm und  $R_{max}$ -Wert von bis zu 3 µm. Die Rauheit ist somit wesentlich größer als die für das fertige Bauteil spezifizierte Maß- und Formtoleranz ( $\pm 0,5$  µm). Bisher konnte allerdings kein Fertigungsverfahren gefunden werden, mit dem bei gleich bleibender Maß- und Formtoleranz eine bessere Oberflächenqualität im Formeinsatz erzielt werden könnte.



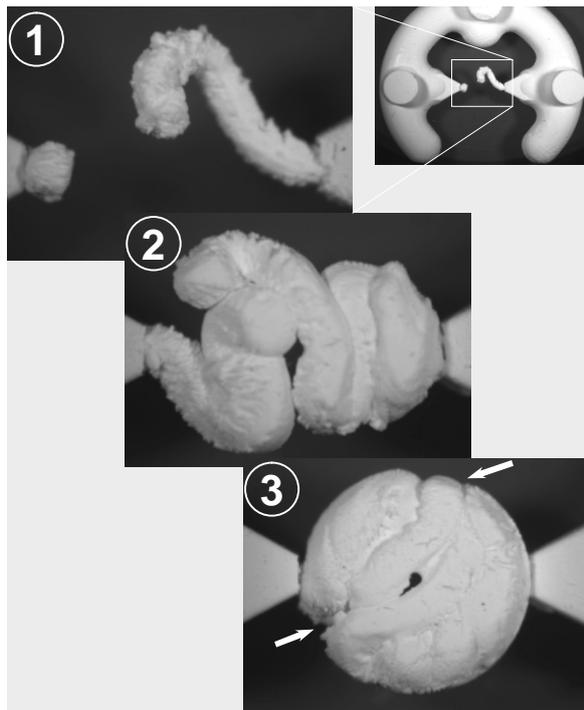
**Bild 4** Nennmaße der Grünteile [mm] und Lage der Messebenen (---) im Verhältnis zu den beiden Anspritzpunkten (→).

## 4.2 Analyse des CIM-Prozesses

### 4.2.1 Probenherstellung

#### Spritzgießen

Aus dem kommerziellen  $ZrO_2$ -Feedstock INMAFEED® K1011 wurden Ferrulen-Grünlinge spritzgegossen. Als Ausgangspunkt für den Versuchsplan wurden die vom Feedstockhersteller empfohlenen Werte [16] gewählt. Die zentralen Parameter wie Einspritzstrom, Werkzeugtemperatur, Nachdruck, Kühlzeit wurden in verschiedenen Faktorstufenkombinationen variiert. Zur Überwachung des Prozesses wurden Maschinendaten (z. B. Umschaltspritzdruck, Zykluszeit und Einspritzzeit) für jeden Schuss protokolliert. Zur Beurteilung der Stabilität des Prozesses wurde das Bauteilgewicht von 214 Ferrulen-Grünlingen (ohne Anguss- und Verteilersystem) mit einer Feinwaage SARTORIUS BP211D bestimmt. Der Mittelwert lag bei 358 mg, die Spannweite aller Messwerte bei 4 mg. Aufgrund der resultierenden Streuung von ca.  $\pm 0,55\%$  kann der Prozessablauf somit als stabil betrachtet werden.



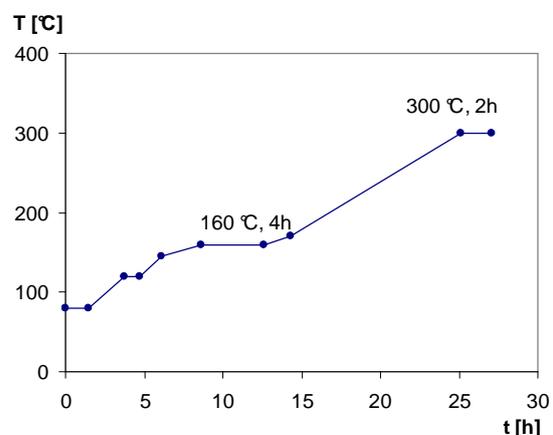
**Bild 5** Füllbildanalyse mit INMAFEED® K1011: Freistrahlfüllung (1) und Bindenaht (3).

Die Ferrulenkavität wird über zwei Anschnitte am hinteren Bauteilende befüllt. In **Bild 5** sind die Vorgänge beim Eintritt des  $ZrO_2$ -Feedstocks durch die zwei engen Anschnitte in die Kavität dargestellt. Es bildet sich an beiden Anschnitten ein Freistrahlfeld, das die Kavität mäanderartig füllt. Die Formmasse am rechten

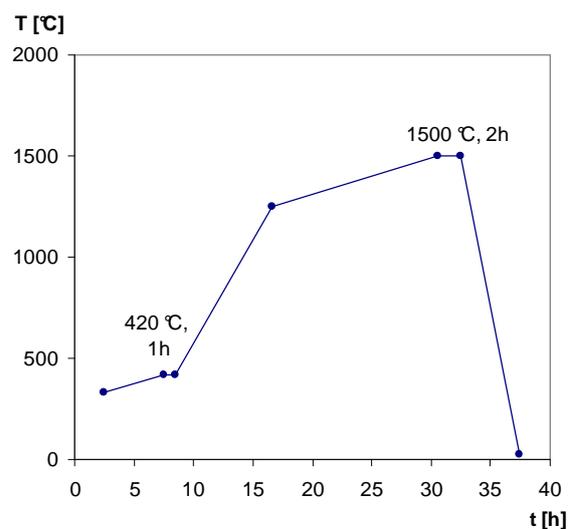
Anschnitt eilt voraus, daher ist die entstehende Bindenaht asymmetrisch.

#### Entbindern und Sintern

Die Entbinderung der Ferrulen erfolgte nach den Empfehlungen des Feedstockherstellers in zwei Stufen: zunächst wurden die Bauteile im Lösungsmittel (dest. Wasser) bei Raumtemperatur für 40 Stunden entbündert. Die anschließende thermische Entbinderung erfolgte wie auch das Sintern im Hochtemperaturkammerofen CARBOLITE RHF 17/3 E mit der vom Feedstockhersteller empfohlenen Temperaturführung [13]. Die thermische Entbinderung der Ferrulen erfolgte bei einer Maximaltemperatur von  $420\text{ }^\circ\text{C}$ , anschließend wurden die Bauteile bei  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  für zwei Stunden an Luft gesintert (vgl. **Bild 6**, **Bild 7**).



**Bild 6** Temperaturprogramm beim thermischen Entbindern: Temperatur T [°C] über die Zeit t [h] mit Haltezeiten bei  $160\text{ }^\circ\text{C}$  (4 Stunden) und  $300\text{ }^\circ\text{C}$  (2 Stunden).



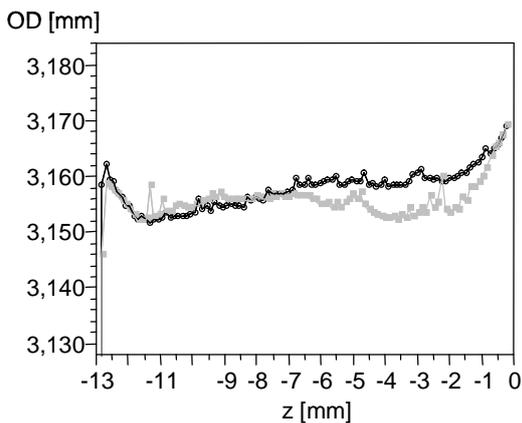
**Bild 7** Temperaturprogramm beim Sintern: Temperatur T [°C] über die Zeit t [h] mit Haltezeiten bei  $420\text{ }^\circ\text{C}$  (1 h) und  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  (2 h).

#### 4.2.2 Geometrische Bauteilcharakterisierung

Von jeder Faktorstufenkombination wurden drei nacheinander abgeformte Ferrulen vermessen. Der Außendurchmesser der gesinterten Ferrulen wurde in 10 Messebenen im Abstand von 0,5 mm in je 16 Winkelpositionen im Abstand von 11,25° mit dem Laserscanner 1210 GOLD LX vermessen. Außerdem wurden in vier Mantellinien (Winkelposition 0°, 45°, 90°, 135°) über die komplette Länge der Ferrulen im Abstand von 0,1 mm Durchmesserwerte gemessen. Die Positionen der Messpunkte am Grünteil wurden unter Berücksichtigung der mittleren Sinterschwindung analog zu den Ebenen am Sinterteil positioniert (vgl. **Bild 4**). Für jedes Bauteil steht somit ein Datensatz von ca. 600 Durchmesserwerten im grünen und ebenso vielen im gesinterten Zustand zur Verfügung.

#### 4.2.3 Formabweichungen der pulverspritzgegossenen Bauteile

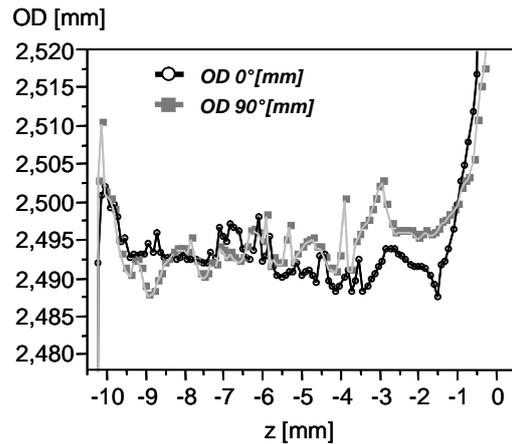
Zunächst soll die Streuung der Bauteilabmessungen an einzelnen Ferrulen betrachtet werden. Unabhängig von den Einspritzparametern zeigt sich in den letzten drei Messebenen hinter der 30°-Fase an der Stirnseite der Ferrule sowohl an den Grünteilen als auch an den Sinterteilen ein charakteristischer Anstieg des Außendurchmessers. Außerdem weisen alle Ferrulen im Bereich der Anschnitte einen deutlich größeren Durchmesser auf als über die restliche Bauteillänge. Diese Durchmesservariation ist in **Bild 8** und **Bild 9** exemplarisch für eine Ferrule im grünen und gesinterten Zustand dargestellt.



**Bild 8** Variation des Außendurchmessers (OD) einer Ferrule im Grünzustand (Winkelpositionen 0° und 90°) über Bauteillänge z (Anschnitte rechts;  $T_m$  55°C,  $v_i$  2.7 cm<sup>3</sup>/s).

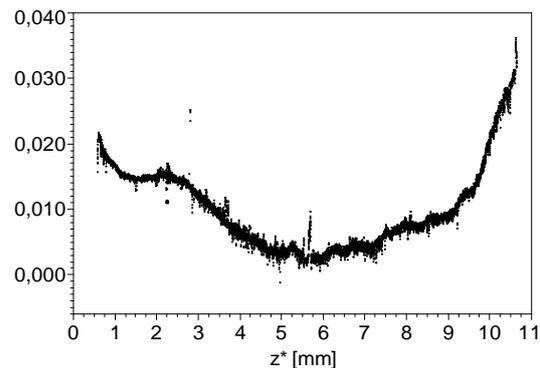
Der Durchmesserunterschied zum restlichen Bauteil liegt je nach Spritzgießparameter bei über 10 µm. Bei der Vermessung der Kavität wurde in dem betroffenen Bereich keine Änderung des Durchmessers festge-

stellt, die Ursache dafür muss demnach in der Formfüllung liegen. Da sich der betroffene Bauteilbereich im Spritzgießwerkzeug am Fließwegende befindet, wäre eigentlich eine Reduzierung des Durchmessers zu erwarten. Eine mögliche Ursache für den Durchmesseranstieg ist der Widerstand des Formauswerfers, der beim Füllen der Kavität durch den Spritzdruck aufgeschoben werden muss und somit zu einer stärkeren Verdichtung der Formmasse im vorderen Bauteilbereich führen könnte. Eine andere mögliche Ursache ist eine Stauchung der Grünteile bei der Entformung.



**Bild 9** Variation des Außendurchmessers (OD) der Ferrule aus **Bild 8** nach dem Sintern (Winkelpos. 0° und 90°) über Bauteillänge z (Anschnitte rechts;  $T_m$  55°C,  $v_i$  2.7 cm<sup>3</sup>/s).

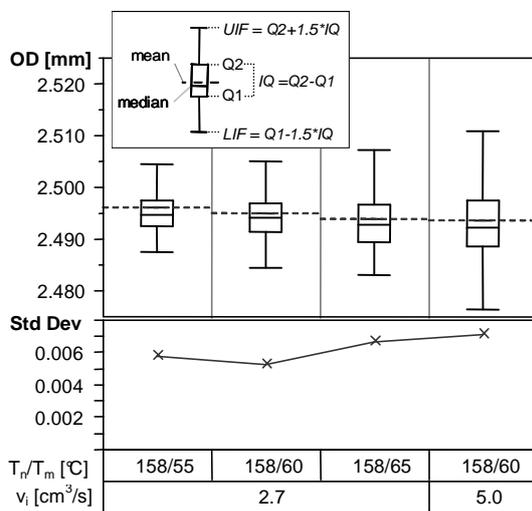
Die beschriebenen Durchmesserunterschiede über die Bauteillänge zeigen sich auch bei Topographiemessungen mit dem FRT MicroGlider®. In **Bild 10** ist das Profil an der Mantelfläche des oben genannten Sinterteils dargestellt, und die gemessenen Höhenunterschiede haben einen ähnlichen Verlauf wie die Durchmesser in **Bild 9**.



**Bild 10** Höhenprofil einer Mantellinie des gesinterten Teils aus **Bild 9** am Außendurchmesser: Höhenposition h [mm] über Bauteillänge z\* [mm], gemessen mit FRT MicroGlider® (11000 Messpunkte im Abstand von 1 µm) (Anschnitte rechts;  $T_m$  55°C,  $v_i$  2.7 cm<sup>3</sup>/s).

#### 4.2.4 Einfluss der Spritzgießparameter auf die Bauteilgeometrie

Um die Streuung von Bauteil zu Bauteil und den Einfluss der Spritzgießparameter zu analysieren, wurden die Durchmesserdaten der Ferrulen mit statistischen Methoden ausgewertet. In **Bild 11** ist die Variation der Durchmesser der gesinterten Ferrulen in Abhängigkeit von den Parametern Einspritzvolumenstrom  $v_i$ , Formmassestemperatur  $T_n$  und Werkzeugtemperatur  $T_m$  dargestellt. Die Box-Plots beschreiben die statistische Verteilung der gemessenen Werte für jede Faktorstufenkombination: die Höhe des Kastens stellt den Interquartilsabstand IQ dar (Differenz von 25%-Perzentil Q1 und 75%-Perzentil Q2), die vertikalen Balken sind ein Maß für die Spannweite der Daten, wobei Werte außerhalb der Grenzen LIF und UIF als Ausreißer betrachtet werden.



**Bild 11** Variation der Außendurchmesser OD der Sinterteile in Abhängigkeit von Einspritzvolumenstrom  $v_i$ , Formmassestemperatur  $T_n$  und Werkzeugtemperatur  $T_m$  [3].

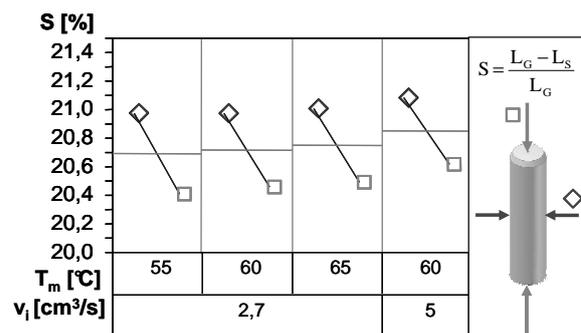
Die Ferrulen mit dem kleinsten Variationskoeffizienten (0,21%, berechnet durch Division der Standardabweichung  $\sigma = 5 \mu\text{m}$  durch den arithmetischen Mittelwert) waren mit einer Werkzeugtemperatur  $T_m$  von 60 °C und einem Einspritzvolumenstrom  $v_i$  von 2,7 cm<sup>3</sup>/s hergestellt worden. Die Spannweite der Messwerte lag bei 12  $\mu\text{m}$  (Toleranz von  $\pm 0,24$  %, bezogen auf das Nennmaß).

Eine Steigerung von  $T_m$  oder  $v_i$  hatte eine größere Streuung von bis zu 18  $\mu\text{m}$  (60 °C, 5 cm<sup>3</sup>/s) zur Folge, was einem Variationskoeffizienten von 0,29% entspricht (Toleranz  $\pm 0,36$  %). Die Änderung der Werkzeugtemperatur hat einen geringen, aber signifikanten Effekt auf den mittleren Bauteildurchmesser: bei höhe-

ren Werkzeugtemperaturen ist die Entformungstemperatur des Grünteils und damit auch die thermische Schwindung beim Abkühlen größer (Signifikanzniveau 0,01). Die Anhebung des Einspritzvolumenstroms auf 5 cm<sup>3</sup>/s bewirkte eine signifikante Abnahme der mittleren Bauteildurchmesser von ca. 1,5  $\mu\text{m}$ , verglichen mit der Faktorstufenkombination  $T_m$  60 °C,  $v_i$  2,7 cm<sup>3</sup>/s (Signifikanzniveau 0,001).

#### 4.2.5 Einfluss der Spritzgießparameter auf die Sinterschwindung

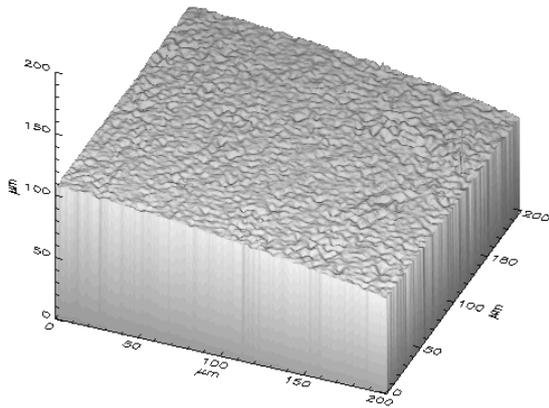
Da die Formmasse ca. 50 Vol.-% Binder enthält, ist eine lineare Sinterschwindung ca. 20,6 % zu erwarten. Die Schwindung der Bauteile beim Sintern erfolgt jedoch nicht isotrop, sondern unterschiedlich stark in radialer Richtung und in Längsrichtung der Bauteile: während die Bauteillänge nur um ca. 20,4 % schwindet, beträgt die Sinterschwindung in Durchmesserichtung ca. 21,0 %. Sie ist außerdem abhängig von den Spritzgießparametern und steigt mit zunehmender Werkzeugtemperatur  $T_m$  und zunehmendem Einspritzvolumenstrom  $v_i$  (siehe **Bild 12**).



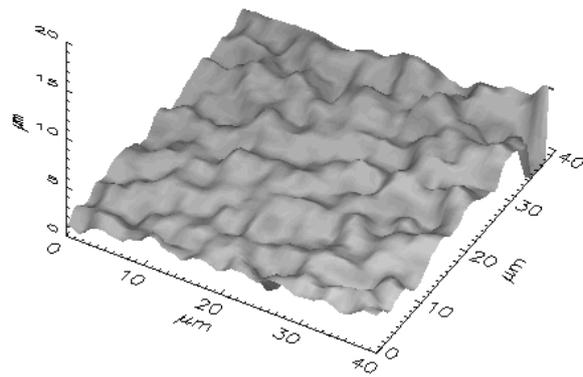
**Bild 12** Radiale ( $\diamond$ ) und axiale ( $\square$ ) Sinterschwindung  $S$  in Abhängigkeit von Einspritzvolumenstrom  $v_i$ , Formmassestemperatur  $T_n$  und Werkzeugtemperatur  $T_m$ .

#### 4.2.6 Oberflächenqualität der Bauteile

Die Oberflächenqualität der Grünteile auf der zylindrischen Mantelfläche liegt mit einem  $R_a$ -Wert von 0,2 bis 0,3  $\mu\text{m}$  sehr nahe an der des Spritzgießwerkzeugs. Die Rauheit der Sinterteile ist mit bis zu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  deutlich größer. In **Bild 13** ist die Topographie der zylindrischen Mantelfläche einer gesinterten Ferrule dargestellt, die mit einem Einspritzvolumenstrom von 2,7 cm<sup>3</sup>/s und einer Werkzeugtemperatur von 55 °C spritzgegossen wurde. **Bild 14** zeigt die Oberfläche des gleichen Bauteils bei höherer Vergrößerung: die Struktur auf der Oberfläche hat eine Tiefe von 0,5 bis 2  $\mu\text{m}$ .



**Bild 13** Topographie der zylindrischen Oberfläche eines Sinterteils ( $T_m$  55 °C,  $v_i$  2,7 cm<sup>3</sup>/s), 200 × 200 μm, FRT MicroGlider®.



**Bild 14** Topographie der zylindrischen Oberfläche eines Sinterteils ( $T_m$  55 °C,  $v_i$  2,7 cm<sup>3</sup>/s), 40 × 40 × 20 μm, FRT MicroGlider®.

## 5 Zusammenfassung

Bei der Herstellung von Präzisionsteilen aus Keramik – speziell bei Singlemode-Ferrulen – ist die Qualität des Spritzgießwerkzeugs ein entscheidender Faktor, da die am Bauteil geforderten Maß-, Form- und Lagetoleranzen auch bei der Herstellung der Kavität realisiert werden müssen. Durch einen relativ geringen Einspritzvolumenstrom bei einer mittleren Werkzeugtemperatur konnte bei der Herstellung von Keramik-Ferrulen am Außendurchmesser eine Maßhaltigkeit von ± 0,24 % bezogen auf das Nennmaß erzielt werden. Damit wurde erfolgreich gezeigt, dass die in der Technik derzeit genannte Maßtoleranz von ± 0,3% [6] mit optimierten Prozessparametern reduziert werden kann. Wenn Toleranzen im Mikrometerbereich gefordert sind, können jedoch selbst bei einer präzise zylindrischen Kavität Variationen des Bauteildurchmessers auftreten, die vermutlich durch den Füllvorgang bedingt sind.

## 6 Danksagung

Wir danken dem BMBF und der Projektträgerschaft Forschungszentrum Karlsruhe für die finanzielle Förderung des Vorhabens (02 PD 2136) im BMBF-Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“. Weiterhin möchten wir der ARBURG GmbH für das zur Verfügung stellen der im Projekt realisierten Spritzgießmaschine mit Sonderausrüstung für das Mikropulverspritzgießen und die Messwerterfassung im laufenden Prozess danken. Für die wissenschaftliche und experimentelle Unterstützung sei den Kollegen am IMF III gedankt, insbesondere den Herren H. Walter, O. Jacobi, J. Zum Gahr, G. Py, Dr. M.

Schulz, R. Heldele, J. Moch, R. Vouriot, K. Plewa, Dr. S. Rath und Dr. G. Finnah. Weiterer Dank geht an Herrn R. Thelen (IMT) für die Vermessung des Form-einsatzes und an Herrn Dr. T. Suzuki (IKET) für die freundliche Hilfe bei der Übersetzung der japanischen Literatur [10].

## 7 Literatur

- [1] Beck, M. et al.: Pulverspritzgießen von Keramik-Ferrulen für Glasfaserverbindungen im Mono-mode-Bereich. In: [14], S. 19-34.
- [2] Beck, M. et al.: Maßhaltigkeit von Präzisionsteilen beim Keramikpulverspritzgießen am Beispiel von Singlemode-Ferrulen. Symposium Hochleistungskeramik, 05.-06.04.2006, Stuttgart.
- [3] Beck, M. et al.: Dimensional Quality of Micro Precision Parts Made by Ceramic Injection Moulding. In: Juster, N.; Rosochowski, A. (Hrsg.): The 9<sup>th</sup> international Conference on Material Forming ESAFORM 2006, 26.-28.04.2006, Glasgow, Großbritannien.
- [4] Christoph, R.; Neumann, H. J.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik. Produktnahe optisch-taktile Maß-, Form- und Lagebestimmung. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2003.
- [5] Fries Research & Technology GmbH (Hrsg.): MicroGlider® Sensoren. Der optische Sensor CWL. [http://www.frt-gmbh.com/produkte/f\\_1\\_1\\_3\\_1.php3?sprache=de](http://www.frt-gmbh.com/produkte/f_1_1_3_1.php3?sprache=de) – Online Ressource, Abruf: 25.05.2006.
- [6] German, R. M.: Powder injection molding. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1990, S. 465-466, 486-487.

- [7] Heaney, D. F. et al.: Variability of powder characteristics and their effect on dimensional variability of powder injection moulded components. *Powder Metallurgy* 47 (2004), S. 145-150.
- [8] Heldele, R. et. al.: Simulation des Pulverspritzgießprozesses für Probekörper. In diesem Bericht.
- [9] Hippler, H.: Optische Durchmesserbestimmung. Erfahrungen aus der Praxis bei PKD-Schneidwerkzeugen. *Quality Engineering* 6 (2003), S. 36-39.
- [10] Kato, T.: Molding systems for ferrule of optical connector. *Purasuchikkusu* 53 (2002), S. 36-41. (Übersetzung Dr. T. Suzuki, IKET)
- [11] Lin, S. I.: Near-net-shape forming of zirconia optical sleeves by ceramics injection molding. *Ceramics International* 27 (2001), S. 205-214.
- [12] Maetzig, M.; Walcher, H.; Pannhorst, J.: Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik für das Pulverspritzgießen von Präzisionsbauteilen. In diesem Bericht.
- [13] N. N.: INMAFEED K1011. Technisches Datenblatt Ferrul-Feedstock, Mai 2002.
- [14] Ruprecht, Robert (Hrsg.): *Micro-P-PIM : Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall*. Kolloquium zum BMBF-Projekt Micro-P-PIM. Forschungszentrum Karlsruhe, Jan 2004. (Wissenschaftliche Berichte FZKA-7000)  
URL: <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7000.pdf>
- [15] Tseng, W. J.: Statistical analysis of process parameters influencing dimensional control in ceramic injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 79 (1998), S. 242-250.
- [16] von Witzleben, M.; Kollenberg, W.: *Keramik-Spritzgießen in der Praxis*. *Kunststoffe* 92, Heft 6 (2002), S. 52-56.
- [17] Zauner, R. et al.: Variability of feedstock viscosity its correlation with dimensional variability of green powder injection moulded components. *Powder Metallurgy* 47 (2004), S. 151-156.



## Micro-P-PIM



# Keramikpulverspritzgießen von Präzisionsteilen am Beispiel von Ferrulen

Martin Beck <sup>1), 2)</sup>, K. Müller <sup>1)</sup>, R. Ruprecht <sup>1)</sup>,  
 V. Piotter <sup>1)</sup>, J. Haußelt <sup>1), 2)</sup>, D. Rund <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, IMF-III

<sup>2)</sup> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, IMTEK

<sup>3)</sup> ADC GmbH, Berlin



Mikrosystemtechnik-Kongress 2005

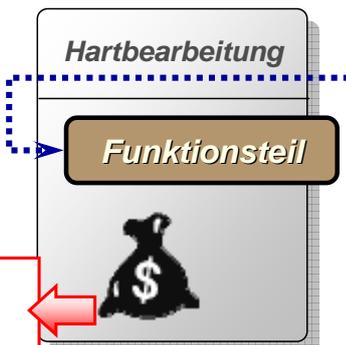
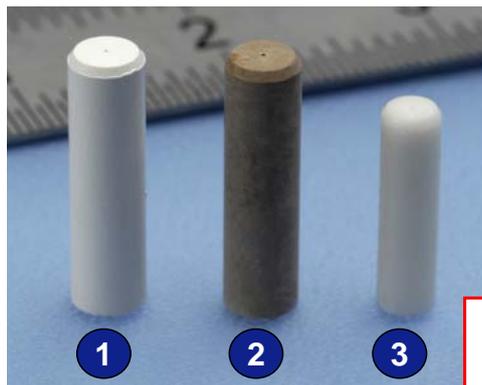
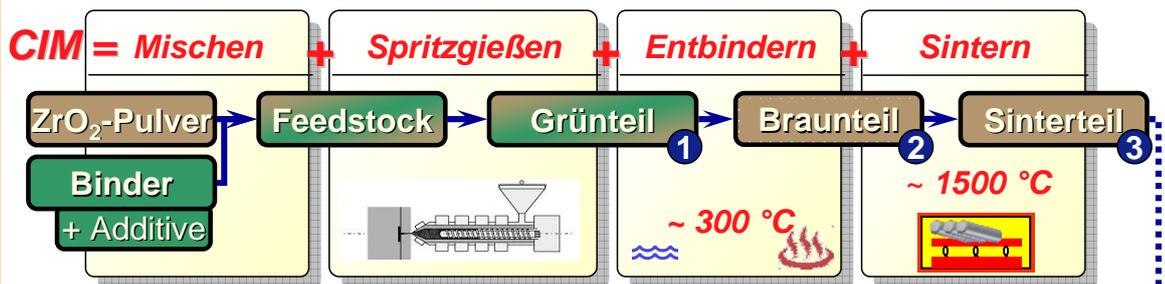
10.-12.10.2005, Freiburg Konzerthaus

Martin Beck, 11.10.2005

## Micro-P-PIM

## Einleitung

# CIM-Prozess



**Motivation für  
 Präzisions-CIM!**

# Motivation und Zielsetzung im Teilprojekt Ferrule

## Micro-P-PIM

### Motivation:

- Reduzierung der Hartbearbeitung bei  
Ultrapräzisionsteilen (Bsp. Ferrule)  
⇒ Sintertoleranz < 1%

### Ziele:

- Untersuchung der Einflussgrößen auf die  
Bauteilqualität im CIM-Prozess
- Ermittlung der erzielbaren Bauteilpräzision

Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

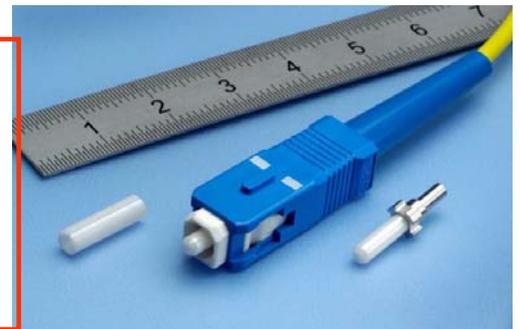
## Micro-P-PIM

# Inhalt

## Einleitung

### Spritzgieß-Experimente

- Maschine, Werkzeug  
und Feedstock
- Demonstrator
- Versuchsprogramm



## Ergebnisse

- Vermessung der Werkzeugkavität
- Füllstudie
- Vermessung der Spritzgießeile

## Zusammenfassung

Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005



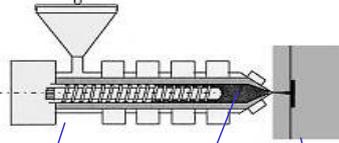
Micro-P-PIM



Maschine, Werkzeug und Feedstock



**Spritzgießmaschine**  
Allrounder 420 C 600-100  
• PIM-Schnecke (Ø 15 mm)



**Spritzgießwerkzeug**  
• 3-Platten-Werkzeug  
• 1 Kavität  
• Hohe Präzision

**Kommerzieller ZrO<sub>2</sub>-Feedstock**



Inmafeed K1011  
(Inmatec Technologies GmbH)  
• ZrO<sub>2</sub> Pulver TZ 3YS-E  
• Gründichte 3.53 g/cm<sup>3</sup>

BET-Oberfläche: 5.81 m<sup>2</sup>/g  
d<sub>50</sub> = 0.51 µm  
d<sub>90</sub> = 0.84 µm

Foto: Inmatec Technologies GmbH

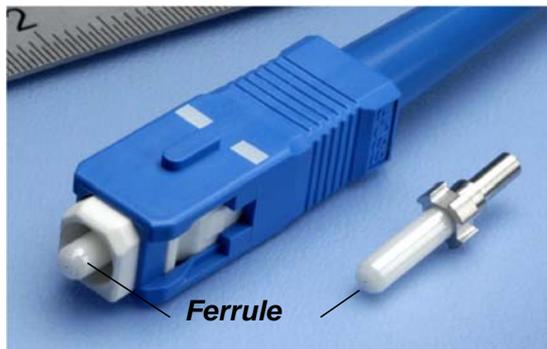
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005



Micro-P-PIM



Demonstrator



**Singlemode Ferrule**  
- Ultrapräzisionsteil -  
Anwendung in  
Glasfasersteckverbindern zur  
präzisen Faserpositionierung

**Maßtoleranzen**

Außendurchmesser (D<sub>a</sub>):  
Ø 2.499 mm ± 0.5 µm  
Innendurchmesser (D<sub>i</sub>):  
Ø 0.125 mm + 1 µm

**Form- und Lagetol.**

⊙ Ø 1 µm (D<sub>a</sub>)  
○ 0.5 µm

**Oberflächenqualität**

D<sub>a</sub> R<sub>a</sub> = 0.1 µm  
D<sub>i</sub> R<sub>a</sub> = 0.2 µm

Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

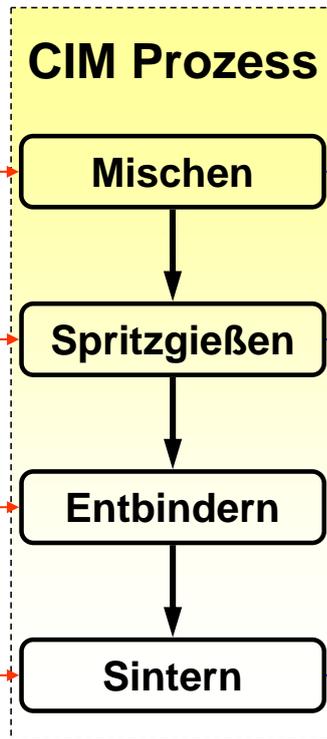
## Versuchsprogramm

### Micro-P-PIM



#### Variierte Parameter:

- Pulver und Binder\*
- Einspritzstrom  
• Werkzeugtemperatur  
• ...
- Lösungsmittel\*  
• Temperaturprogramm\*
- Temperaturprogramm\*



#### Qualitätskontrolle:

- Feedstock-eigenschaften (Rheologie, PVT-Daten, ...)
- Außendurchmesser  
• Rauheit  
• Länge  
• ...

\* in Arbeit

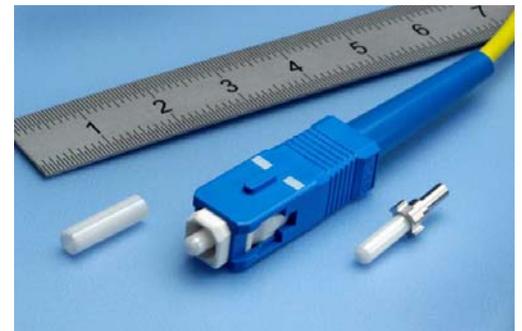
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

## Inhalt

### Einleitung

### Spritzgieß-Experimente

- Maschine, Werkzeug und Feedstock
- Demonstrator
- Versuchsprogramm



### Ergebnisse

- Vermessung der Werkzeugkavitat
- Fullstudie
- Vermessung der Spritzgießeile

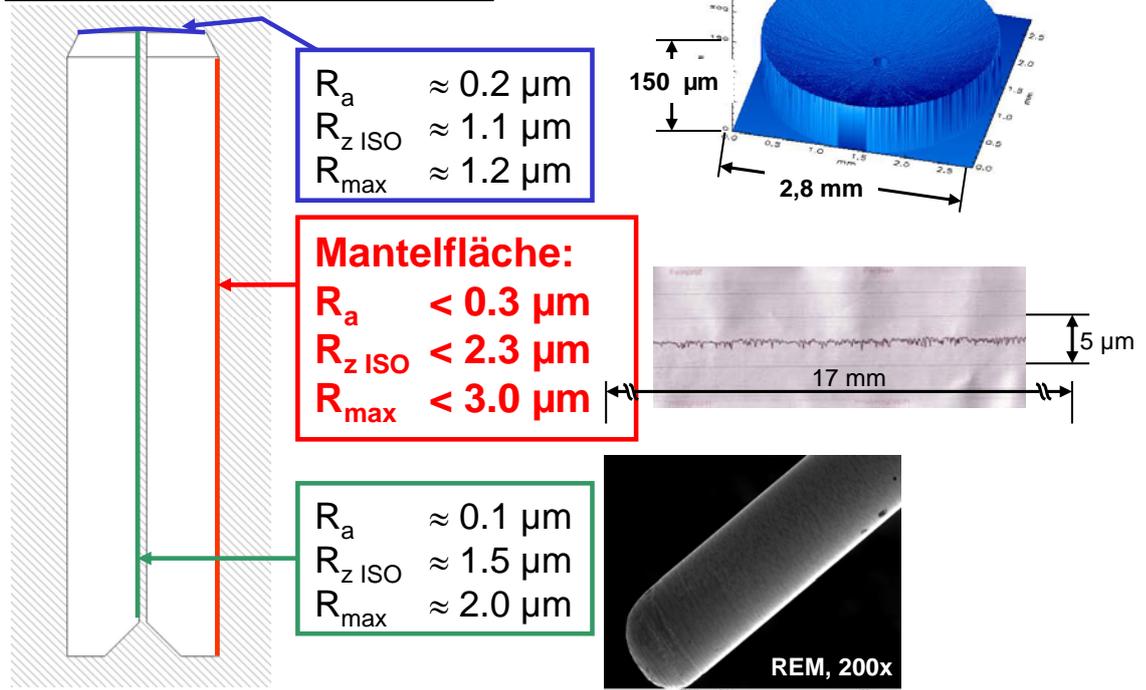
### Zusammenfassung

### Micro-P-PIM



# Vermessung der Werkzeugkavität

## Oberflächenqualität

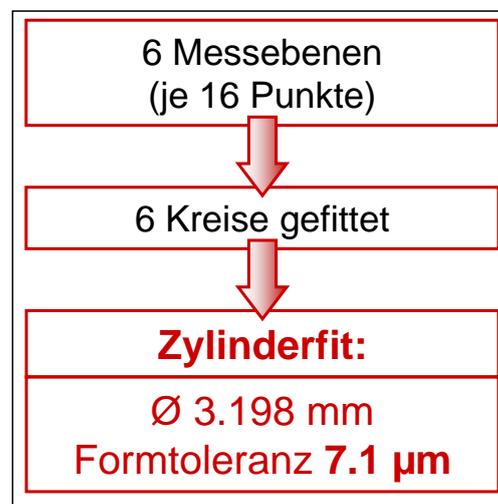


Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

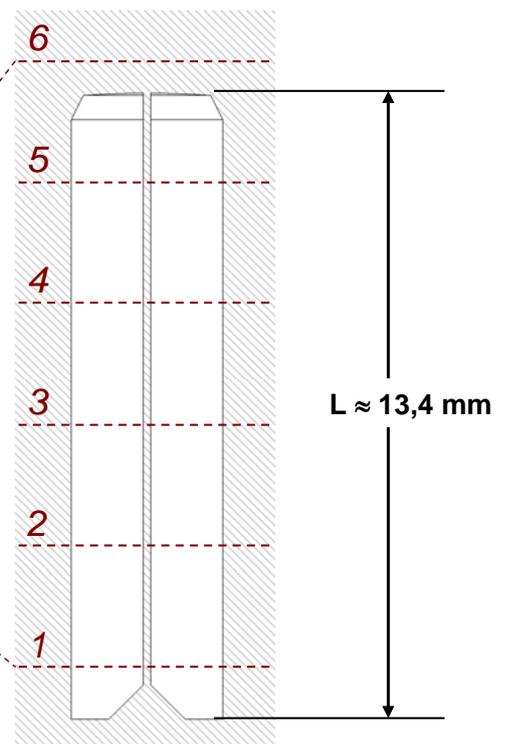
Micro-P-PIM

# Vermessung der Werkzeugkavität

## Geometrie



- WERTH Koordinatenmessgerät + Fasertaster ( $\varnothing_{\text{Kugel}} 136 \mu\text{m}$ )



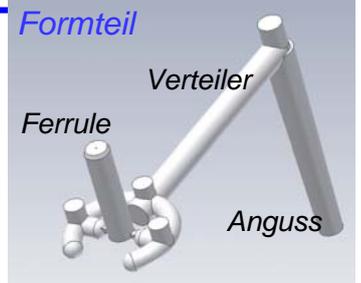
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

Micro-P-PIM

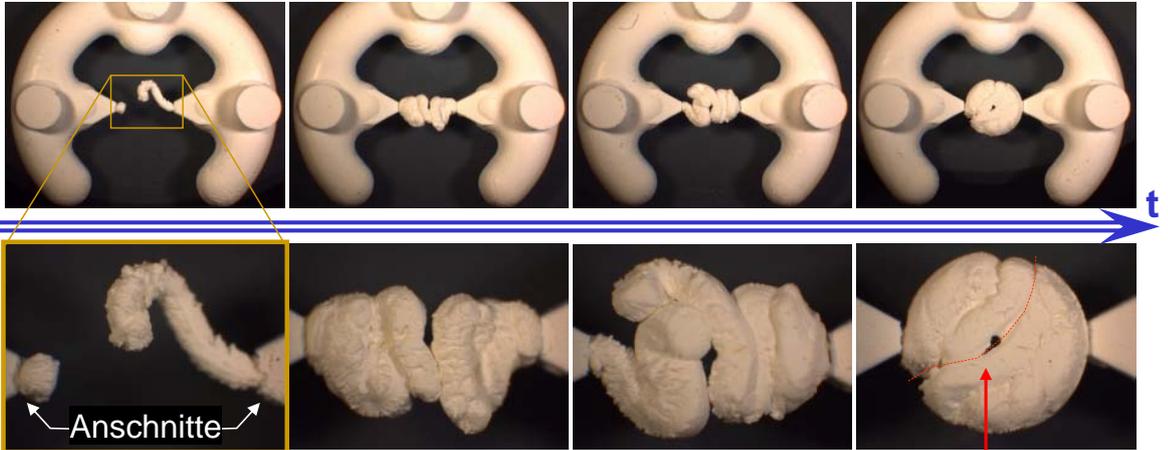
Micro-P-PIM



Füllstudie



Formfüllung:



Freistrahlbildung,  
 asymmetrische Formfüllung

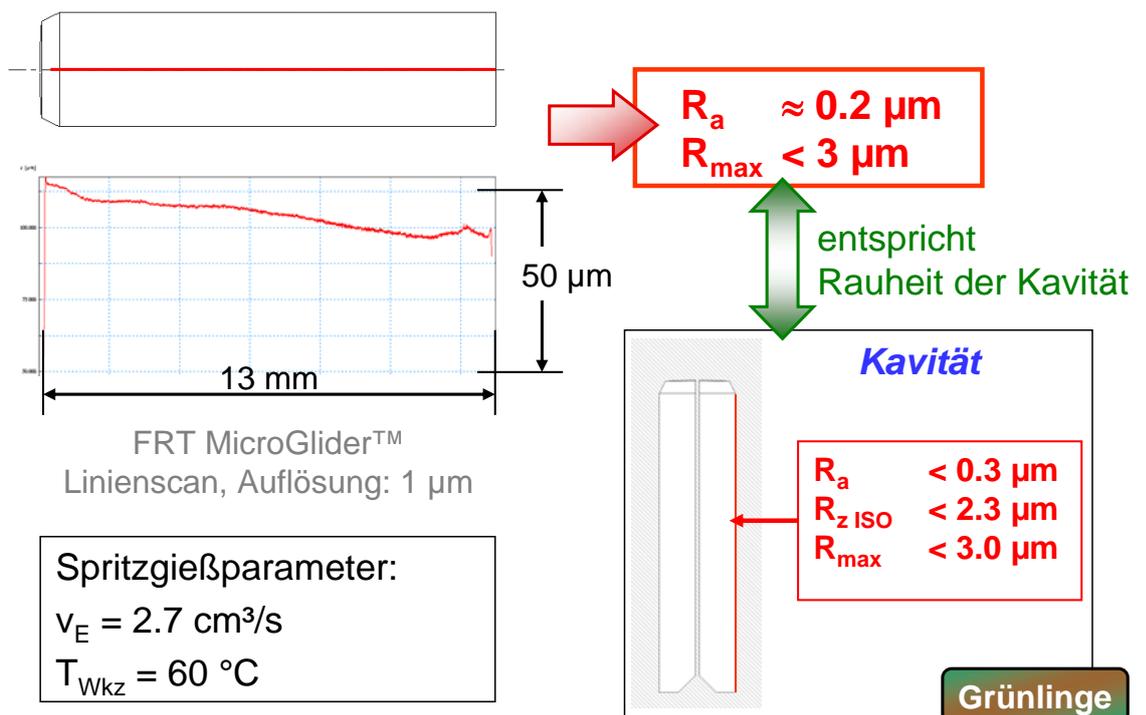
Bindenaht

Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
 Martin Beck, 11.10.2005

Micro-P-PIM



Oberflächenqualität der Grünteile



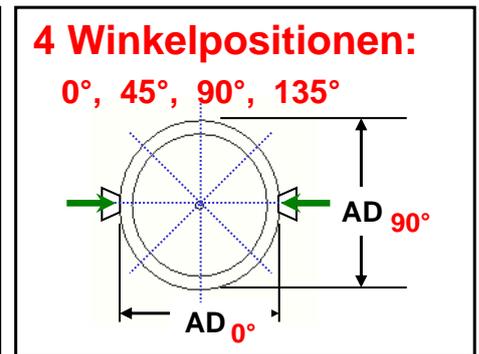
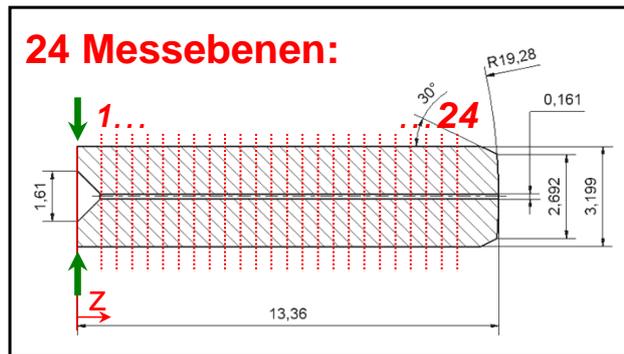
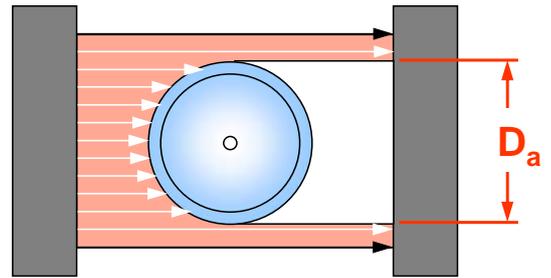
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
 Martin Beck, 11.10.2005

# Ergebnisse

## Vermessung der Spritzgießteile

**Berührungslose Messung  
des Außendurchmessers  
mit Laser Scanner  
Z-Mike 1210 Gold LX**

**Wiederholbarkeit:**  $\pm 0.05 \mu\text{m}$   
**Linearität:**  $\pm 0.4 \mu\text{m}$



↗ Lage der Anschnitte

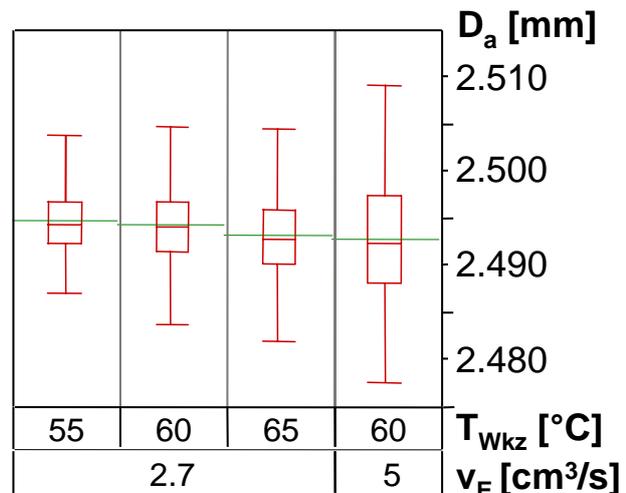
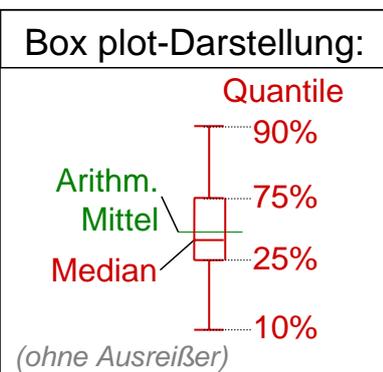
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

Micro-P-PIM



# Ergebnisse

## Variation des Außendurchmessers



**+** 2.7 cm<sup>3</sup>/s  
55 °C → R ≈ 16 μm

**± 0.31 %**

**-** 5 cm<sup>3</sup>/s  
60 °C → R ≈ 26 μm

**± 0.50 %**

**Sinterteile**

R = Spannweite

Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

Micro-P-PIM



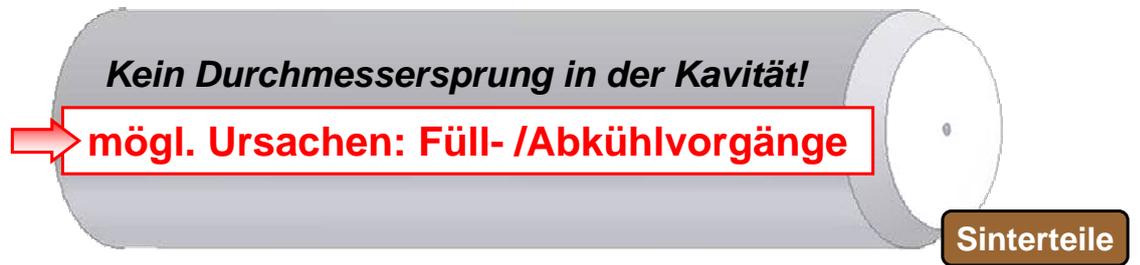
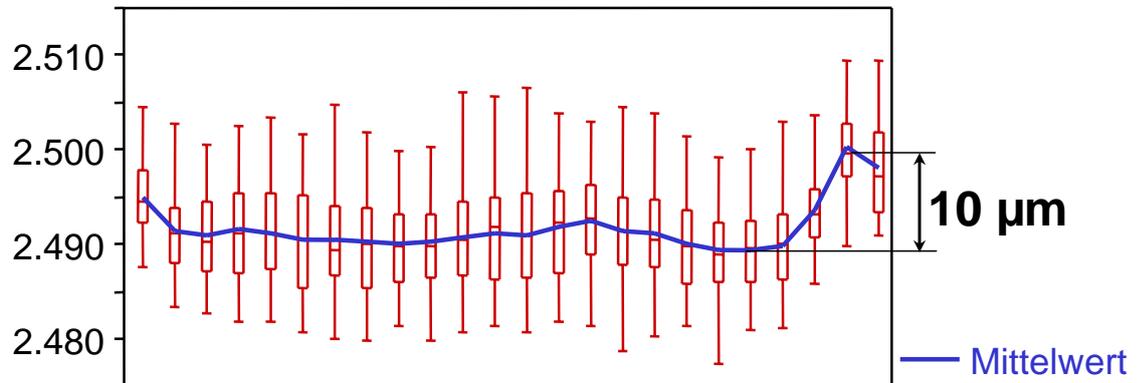


Micro-P-PIM



# Variation des Außendurchmessers

$D_a$  [mm]



Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

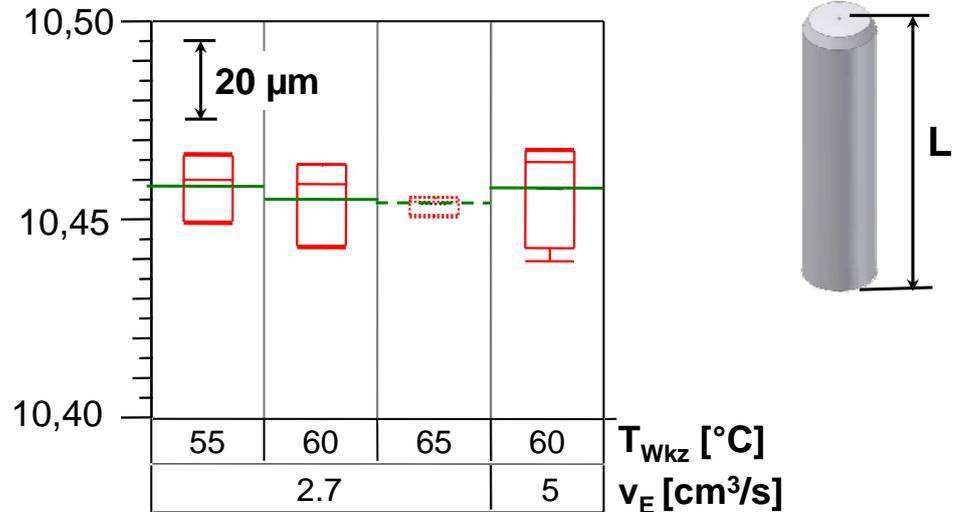


Micro-P-PIM



# Variation der Länge

$L$  [mm]



+	2.7 cm <sup>3</sup> /s 55 °C	➔	$R \approx 18 \mu\text{m}$	$\pm 0.09 \%$
-	5 cm <sup>3</sup> /s 60 °C	➔	$R \approx 28 \mu\text{m}$	$\pm 0.13 \%$

**Sinterteile**

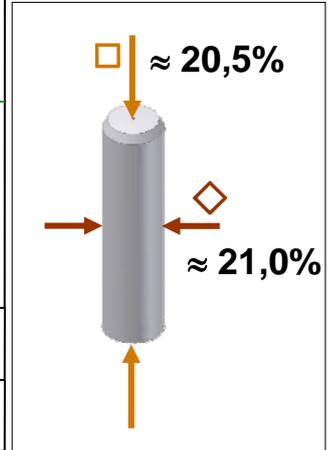
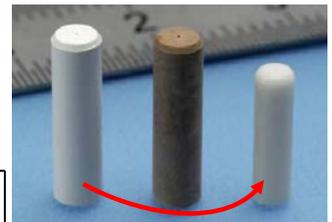
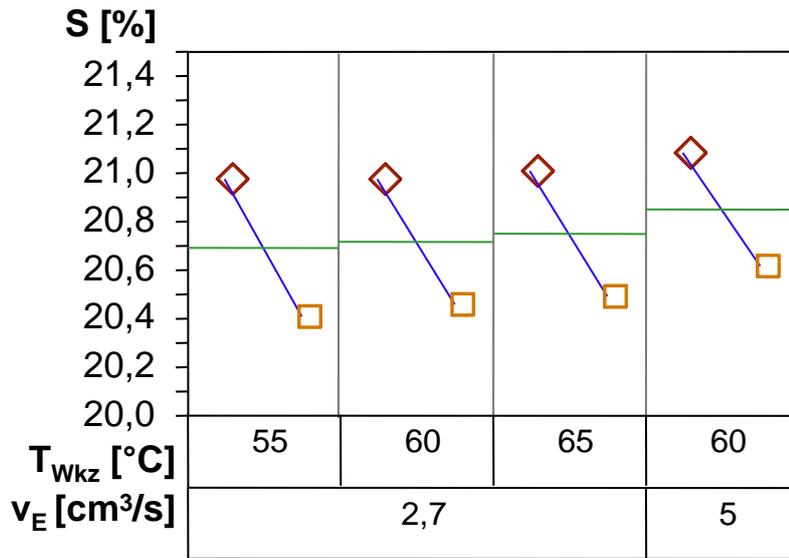
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005



Micro-P-PIM



# Sinterschwindung



➔ **Schwindung anisotrop:  $S_{radial} > S_{axial}$**   $\left( S = \frac{L_G - L_S}{L_G} \right)$

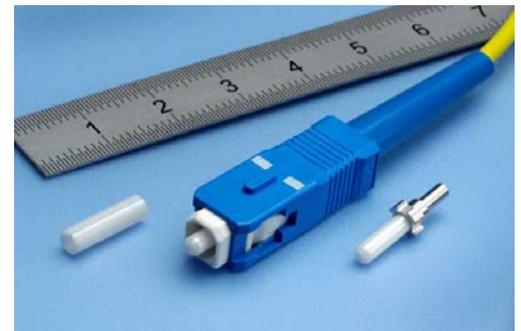
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

# Inhalt

## Einleitung

## Spritzgieß-Experimente

- Maschine, Werkzeug und Feedstock
- Demonstrator
- Versuchsprogramm



## Ergebnisse

- Vermessung der Werkzeugkavität
- Füllstudie
- Vermessung der Spritzgießeile

## Zusammenfassung

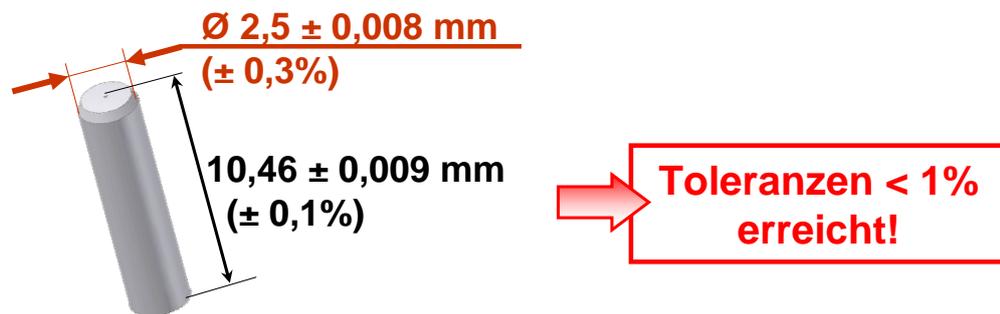
Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

## Zusammenfassung

### Einflüsse auf Bauteilqualität bei Mikropräzisions-CIM:

- Grenzen des Präzisionswerkzeugbaus
- Vorgänge bei Formfüllung, Abkühlen und Entformung
- Prozessparameter  $v_E$ ,  $T_{Wkz}$
- Anisotrope Sinterschwundung

### Mit CIM erreichte Präzision (Feedstock Inmafeed K1011)



Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, Freiburg  
Martin Beck, 11.10.2005

### Micro-P-PIM



## Abschlusskolloquium Micro-P-PIM



### Keramikpulverspritzgießen von Präzisionsteilen am Beispiel von Ferrulen

Martin Beck<sup>1), 2)</sup>, K. Müller<sup>1)</sup>, R. Ruprecht<sup>1)</sup>,  
V. Piotter<sup>1)</sup>, J. Haußelt<sup>1), 2)</sup>, D. Rund<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, IMF-III

<sup>2)</sup> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, IMTEK

<sup>3)</sup> ADC GmbH, Berlin

Wir danken dem BMBF für die Förderung 02PD2136,  
dem Projekträger PTKA für die Betreuung  
und allen Kollegen und Partnerunternehmen  
für die gute Zusammenarbeit.

### Micro-P-PIM



# **Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus $\text{Al}_2\text{O}_3$ – Keramik für die Medizintechnik**



# Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus $\text{Al}_2\text{O}_3$ – Keramik für die Medizintechnik

H. Mayer, G. Bitz, J. Doll, S. Yanarsönmez  
R. Heldele\*, G. Örlgsson\*, V. Piotter \*, R. Ruprecht\*

FRIATEC AG, Mannheim  
\* Forschungszentrum Karlsruhe

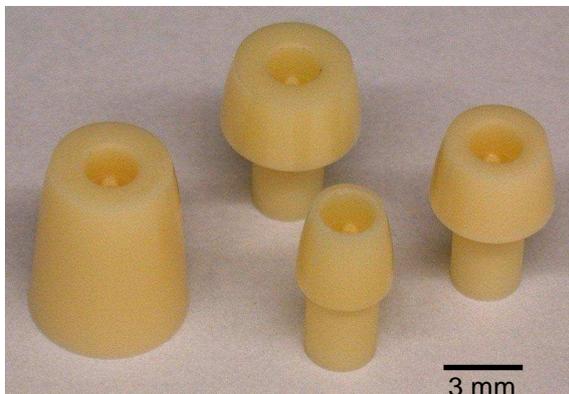
## Kurzfassung

Die Pulverspritzgießtechnik bietet als Formgebungsverfahren für oxidkeramische Produkte die Möglichkeit, endkonturnah zu produzieren. Das Ziel des Projektes bestand darin, an Hand eines geeigneten Demonstrators aus dichtgesinterter  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Keramik das Potenzial dieser Verfahrenstechnik für eine minimale Hartbearbeitung der Keramik auszuloten. Auf der Basis zweier Rohstoffpulver mit verschiedener Partikelgrößenverteilung wurden die benötigten Formmassen entwickelt und charakterisiert, das Spritzgießwerkzeug für den Demonstrator hergestellt, die gesinterten Teile in statistisch relevanter Menge hartbearbeitet und schließlich dieser Aufwand mit demjenigen für die bisherige Fertigungstechnik verglichen. An Hand von Normprüfkörpern wurde die Biegefestigkeit der Keramik bestimmt. Mit diesem Projekt wurde der Nachweis erbracht, dass das keramische Pulverspritzgießen nicht nur eine endkonturnahe Formgebung ermöglicht sondern für nachbearbeitungsarme Präzisionsbauteile auch ein wirtschaftliches Produktionsverfahren ist. Insbesondere bietet die Verwendung von Feinstpulver Vorteile im Hinblick auf die Formtreue von Konstruktionsdetails, Toleranzen bis in den Mikrometerbereich, Sinterparameter und Oberflächenqualität.

## 1 Anlass und Ziel

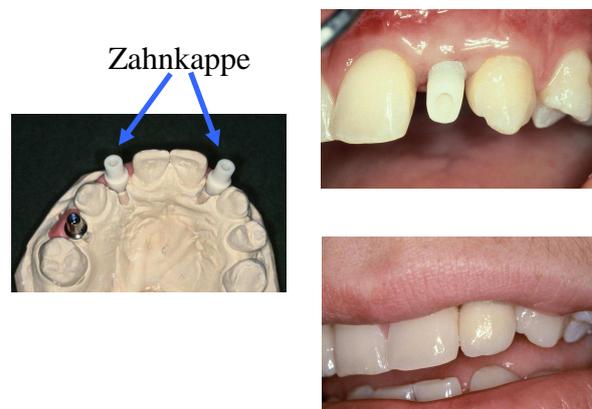
Das Pulverspritzgießen (PIM) als Formgebungsverfahren für oxidkeramische Produkte ist in FRIATEC seit Jahrzehnten etabliert. Die bestehende Technik ermöglicht die Herstellung oxidkeramischer Produkte, deren Toleranzen minimal 1 % der Abmessungen betragen. Engere Toleranzforderungen bis in den Mikrometerbereich lassen sich bisher nur durch die Hartbearbeitung der Keramik realisieren.

Ein typisches Produkt, für das sich die PIM - Technologie anbietet, ist auf Bild 1 in mehreren Varianten dargestellt.



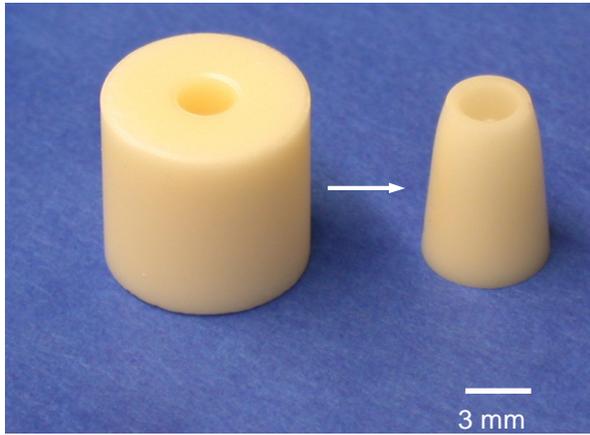
**Bild 1** Beispiele von Zahnkappen aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - Keramik, Typ CeraBase.

Bild 2 zeigt seine Anwendung in der Dentaltechnik.



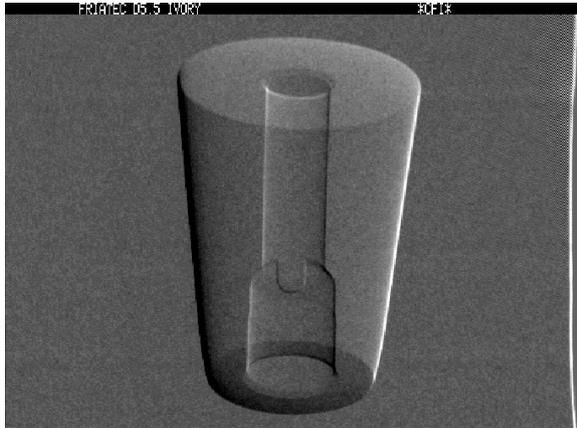
**Bild 2** FRIADENT CeraBase: Indirekte Version.

Eine solche Zahnkappe wird auf das Titanimplantat gesteckt und erfüllt damit den kosmetischen Anspruch einer Verblendung des Metalls [1]. Bisher werden diese Teile über die Prozesskette der Pulverpress-technik nach dem Sintern in mehreren Hartbearbeitungsstufen erzeugt. Bild 3 zeigt Anfangs- und Endstadium einer solchen Zahnkappe.



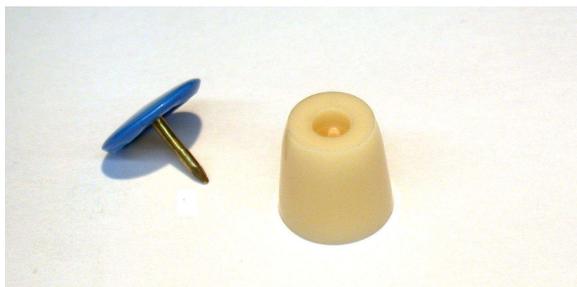
**Bild 3** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Zahnkappe vor und nach der Hartbearbeitung, hergestellt aus Pulverpresslingen.

Das Teil besitzt eine zentrale Bohrung mit gestuften Durchmessern, in der sich eine nasenförmige Struktur befindet. Sie ist im Bereich von wenigen hundertstel Millimetern toleriert und dient der sicheren Fixierung der Zahnkappe gegen Verdrehen. Bild 4 zeigt in einer Aufnahme mit Mikrofokusröntgenstrahlung (MFR) die Position dieser Struktur in der Bohrung.



**Bild 4** CeraBase - MFR - Aufnahme.

Das Entwicklungsziel des Projektes war ein Verfahren, das die Herstellung von eng tolerierten Keramiktteilen mit deutlich reduziertem Aufwand für die Hartbearbeitung ermöglicht. Da diese endkonturnahe Fertigung für FRIATEC eine grundsätzliche Technologie darstellt, wurde einer der Zahnkappentypen (Bild 5) ausgewählt, um an dessen Beispiel die PIM-Technik für hochreine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Keramik zu entwickeln und deren Leistungsfähigkeit für nachbearbeitungsarme Präzisionsbauteile zu demonstrieren.

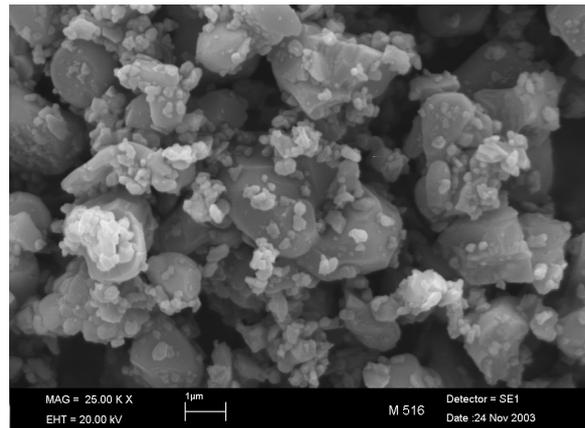


**Bild 5** Demonstrator.

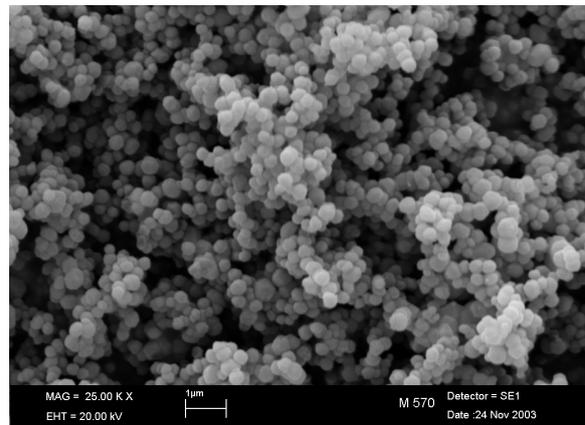
## 2 Arbeitsprogramm und Methoden

Im Teilprojekt „Pulverspritzgießen von nachbearbeitungsarmen Präzisionsbauteilen aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Keramik“ waren als Partner von FRIATEC das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) für die Herstellung und Charakterisierung der Formmassen (Feedstocks) sowie für die Simulation der Formfüllung beim Pulverspritzgießen [2] und die Fa. JUNGHANS Feinwerktechnik (JUNGHANS - FWT) für die Konstruktion und Herstellung des Spritzgießwerkzeugs eingebunden. Spezielle Feedstocks auf der Basis wasserlöslicher Bindersysteme sowie die Spritzlinge der Prüfkörper für die Werkstoffcharakterisierung wurden von Fa. ARBURG erzeugt.

Das Projekt umfasste zwei Entwicklungsphasen. Der Arbeitsschwerpunkt der ersten Phase bestand in der Entwicklung spritzgießfähiger Feedstocks aus zwei unterschiedlichen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Rohstoffen. Die beiden Typen unterscheiden sich in ihren Korngrößen und ihrer Kornmorphologie (Bilder 6 und 7) sowie in ihrer chemischen Reinheit mit 99,7 % bei Typ A und 99,9 % bei Typ B.



**Bild 6** Rohstofftyp A.



**Bild 7** Rohstofftyp B.

Die Verwendung dieser beiden Pulvertypen ermöglichte die direkte Betrachtung ihres Einflusses auf die erreichbaren Toleranzen und die Genauigkeit der Strukturabbildung [3].

Im zweiten Schritt dieser Projektphase wurden die Basisparameter für das Spritzgießen, Entbindern und Sintern der Teile sowie der Moldflow – Simulation für die Entwicklung einer möglichst fertigungsgerechten Werkzeuggeometrie erarbeitet.

In der zweiten Phase war die Herstellung der Demonstratoren aus den jeweils spritzgießfähigen Feedstocks A und B in mindestens mehreren hundert Stück unter produktionsähnlichen Bedingungen geplant, um eine statistisch relevante Anzahl von Teilen für die Prozess- und Bauteilcharakterisierung zu erreichen. Für die Ofenprozesse waren Brennunterlagen aus artgleichem Material geplant, um eine Kontamination der Demonstratorerteile während ihrer Sinterung zu verhindern.

Zum Abschluss dieser Phase sollte der entstandene Aufwand für die Hartbearbeitung der Demonstratoren der bisherigen Verfahrenstechnik gegenübergestellt sowie die Qualität der Teile hinsichtlich ihrer geometrischen, topographischen, mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften dargestellt und beurteilt werden [4].

### 3 Spritzgießwerkzeug

Die beiden Feedstocktypen verursachen als Folge unterschiedlicher Pulverpartikelgrößen und Füllstoffanteile eine verschieden hohe geometrische Schwindung der Teile während ihrer Sinterung. Da die absoluten Abmessungen der Teile für die Fragestellung nach der Einhaltbarkeit enger Toleranzwerte eher eine untergeordnete Bedeutung besitzen, wurde das auf Bild 8 dargestellte Spritzgießwerkzeug nicht für eine spezielle Zahnkappe, sondern für einen Demonstrator mit einem linearen Schwindungswert von 17 % konzipiert.



**Bild 8** Spritzgießwerkzeug für den Demonstrator „Zahnkappe“.

Dieser Wert liegt zwischen der ermittelten Schwindung der Keramik aus A und B. Zur Beurteilung der Formqualität wurden von JUNGHANS - FWT nach der Herstellung des Werkzeugs 50 Spritzgussteile aus POM 13021 (Polyoxymethylen) erzeugt. Das Ergebnis dieser Beurteilung bestätigte, dass das Werkzeug gut abformbar war und Änderungen daher nicht erforderlich wurden.

## 4 Projektphase 1

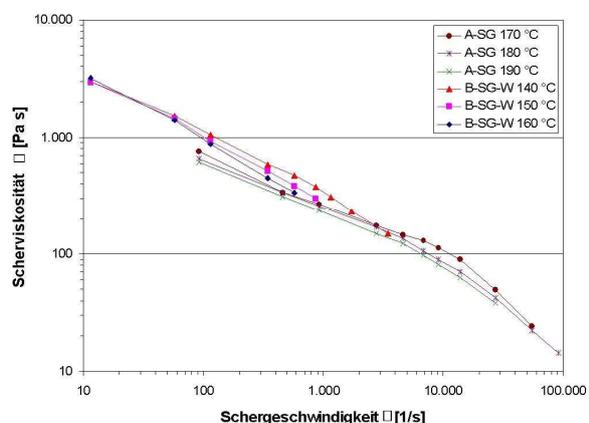
### 4.1 Herstellung von Versuchsteilen

In Anlehnung an bestehende Rezepturen wurde zunächst aus Rohstoff A in Zusammenarbeit mit dem FZK nach erfolgreichen Vorversuchen mit einem Messkneten eine erste Charge von 20 kg Feedstock (Typ A-SG) erzeugt. Damit wurde in FRIATEC eine PIM - Versuchsserie zum Test seiner prinzipiellen Verarbeitbarkeit durchgeführt. Da zum damaligen Zeitpunkt das geplante Werkzeug für den Demonstrator termingemäß noch in Fertigung war, wurde zur Prüfung ein in FRIATEC vorhandenes Spritzgießwerkzeug verwendet, das für Produkte ähnlicher Größe wie dasjenige des Demonstrators ausgelegt ist. Die erste Versuchsserie führte nach zwei Anpassungsschritten der Rezeptur zu einem Feedstock, der zur Herstellung des Demonstrators geeignet schien.

Analog zur Vorgehensweise mit Pulvertyp A wurde mit dem feiner kristallinen Typ B zunächst ein Feedstock (Typ B-SG) mit dem thermoplastischen Binder des Feedstocks A hergestellt. Wegen zu hoher Viskosität unter Einspritzbedingungen war er jedoch nicht verarbeitungsfähig. Auch zwei weitere Rezepturen auf der Basis des für A verwendeten Bindersystems führten nicht zu den gewünschten rheologischen Eigenschaften des Feedstocks. Als mögliche Alternative wurde daher ein Feedstock mit einem wasserlöslichen Bindersystem (Typ B-SG-W) von ARBURG erzeugt und damit erste Spritzgießversuche durchgeführt. Für diese Versuche wurde das zwischenzeitlich verfügbare Demonstratorwerkzeug verwendet. Nach mehreren Anpassungen der Maschinenparameter ließen sich aus B-SG-W erste Demonstratorerteile erzeugen.

### 4.2 Rheologische Untersuchungen

Bild 9 zeigt in einer Gesamtdarstellung das rheologische Verhalten der beiden Feedstocktypen A-SG und B-SG-W als Funktion der Temperatur.



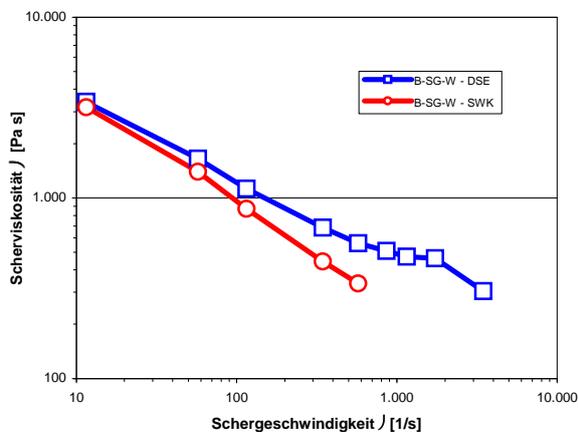
### Bild 9 Rheologische Eigenschaften von A-SG und B-SG-W.

Die Kurvenverläufe bestätigen das problemlose Spritzverhalten der beiden Feedstocktypen. Ein direkter Vergleich der beiden Kurvenscharen aus A-SG und B-SG-W ist jedoch insofern nicht sinnvoll, als für A-SG ein anderes Bindersystem und ein anderes Compoundierungsverfahren als für B-SG-W eingesetzt wurde.

### 4.3 Compoundierungsmethoden

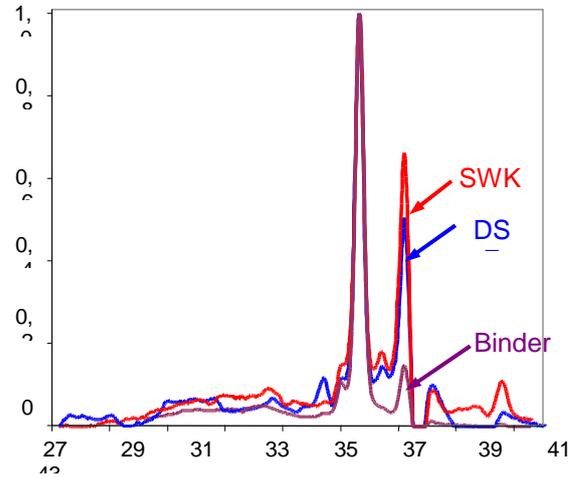
Zur Herstellung von Feedstocks verwendet das FZK einen Doppelschneckenextruder (DSE) und ARBURG einen Scherwalzenkompaktor (SWK). Das Projekt bot daher die Gelegenheit, diese beiden Compoundierungsaggregate in ihrer Wirkung auf die Feedstockeigenschaften zu untersuchen. Wegen der Begrenzung des SWK auf maximal 160 °C Verarbeitungstemperatur war der für A-SG verwendete thermoplastische Binder für diese Untersuchung nicht geeignet. Es wurde daher der Typ B-SG-W verwendet. Vor seiner Granulation wurde dieser Ansatz nach optisch homogener Vormischung in 2 gleiche Teilmengen aufgeteilt und diese so oft durch den SWK bzw. den DSE gefahren, bis Spritzfähigkeit erreicht war. Anschließend wurden beide Compoundierungstypen im FZK rheologisch charakterisiert.

Das folgende Bild 10 zeigt das Ergebnis dieser Messungen bei 160 °C.



**Bild 10** Viskositätsvergleich der Feedstocks B-SG-W aus DSE und SWK.

Das Bild zeigt, dass sich der DSE-Feedstock viskoser verhält als derjenige aus dem SWK. Da bei gleichem Bindersystem zu erwarten ist, dass auch nahezu identische Viskositätsverläufe gemessen werden, entstand der Verdacht, dass der Binder in den beiden Aggregaten während der Bearbeitung verschieden stark beansprucht werde. Zur Analyse der thermischen Belastung und des Zustands der Binder nach der Compoundierung wurden daher beide Feedstocks und zum Vergleich das reine Bindersystem durch Gelpermeationschromatographie (GPC) im FZK untersucht. Das Ergebnis dieser Messungen zeigt Bild 11.



**Bild 11** GPC-Vergleich DSE / SWK.

Das Messergebnis zeigt in beiden Feedstocks einen signifikant höheren Anteil an niedrigmolekularen Bestandteilen als im reinen Binder. Im SWK-Feedstock ist dieser Anteil nochmals erhöht. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass das Bindersystem während der Compoundierung im SWK offenbar stärker als im DSE beansprucht wurde. In praktischem Sinn könnte dieses Ergebnis bedeuten, dass die DSE-Compoundierung mehr Spielraum für das Recycling von Angüssen bietet als der SWK. Die Durchführung weiterer Untersuchungen, insbesondere des Einflusses verschiedener Maschinenparameter auf den Abbau des Bindersystems konnte im Rahmen des Projektes jedoch nicht mehr durchgeführt werden.

### 4.4 Prozesssimulation der Formfüllung

Um ein fertigungsgerechtes Design für Zahnblenden und das entsprechende Spritzgießwerkzeug wirtschaftlich zu entwickeln, ist die Simulation der Produktionstechnik vorteilhaft. Für die Simulation der Formfüllung beim Spritzgießen wurde Moldflow®, ein für das Kunststoffspritzgießen weltweit eingesetztes Softwarepaket, getestet. Die Kenntnis der oben erwähnten rheologischen und thermischen Daten der Feedstocks ist dazu erforderlich.

Bei den Spritzgießversuchen mit einer Maschine des Typs ARBURG Allrounder 220 S mit einem Spritzaggregat mit 22 mm Schnecke wurde der Feedstock in 0,21 s Einspritzzeit mit einem Volumen von 2,5 cm<sup>3</sup> und einer Geschwindigkeit von 40 cm<sup>3</sup>/s bei 175 °C Formmasstemperatur in das auf 80 °C temperierte Werkzeug eingespritzt. Der resultierenden maximale Einspritzdruck betrug bei den Versuchen 1845 +/- 50 bar. Die Simulation berechnete mit den gleichen Parametern dagegen einen maximalen Einspritzdruck von nur 674 bar. Dieses um ca. 63 % abweichende Ergebnis verdeutlicht, dass das für thermoplastische Materialien entwickelte Simulationsprogramm Moldflow® für das Pulverspritzgießen nur mit Einschränkung verwendbar ist.

## 5 Projektphase 2

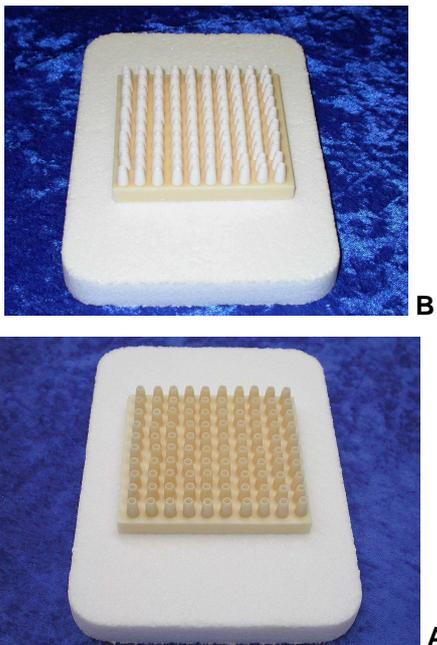
### 5.1 Herstellung und optische Inspektion der Demonstratoren

Nachdem beide Feedstocks in spritzgießfähigem Zustand vorlagen, wurden aus A-SG mehrere tausend und aus B-SG-W mehrere hundert Teile mit dem Demonstratorwerkzeug gespritzt und auf plattenförmige mitschwindende Brennunterlagen gesetzt.

Die Entbinderung der Spritzlinge aus A-SG erfolgte in einem über 59 h hinweg bis auf 190 °C laufenden Programm. Anschließend wurden die Teile unter produktionsähnlichen Bedingungen im elektrisch beheizten Ofen mit 1750 °C gesintert.

Die Spritzlinge aus B-SG-W wurden nach eintägiger Lagerung in Wasser mit anschließender Trocknung in einem 30- stündigen Programm mit maximal 310 °C entbindert. Die Sinterung der Teile erfolgte in dem oben genannten Ofen. Wegen des feiner kristallinen Rohstoffs waren jedoch Maximaltemperaturen von 1600 °C hinreichend.

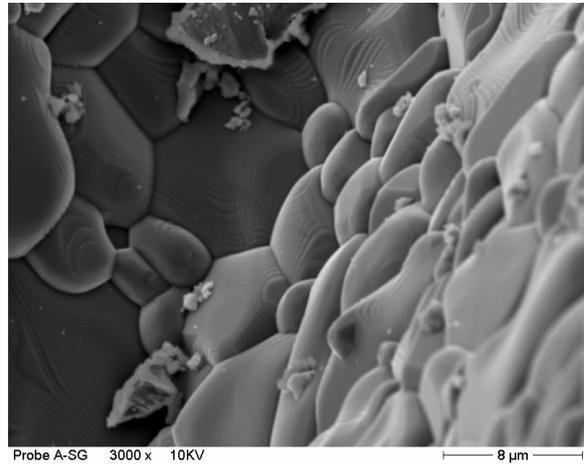
Bild 12 zeigt einige gesinterte Demonstratoren aus den beiden Typen A und B.



**Bild 12** Gesinterte Demonstratoren aus A und B.

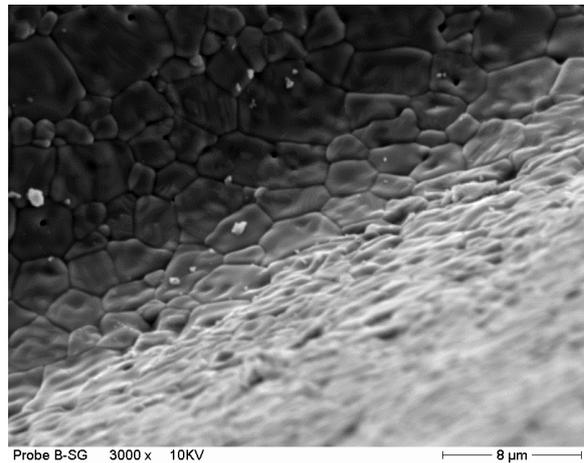
Die Ursache der gelblichen Farbtonung des Typs A ist eine Dotierung mit MgO, das dazu dient, das Kristallitwachstum im Gefüge der Keramik während ihrer Sinterung zu kontrollieren [4]. Dieser Zusatz war im Pressgranulat aus B für die Brennunterlagen enthalten, jedoch nicht im Rohstoff B für die Demonstratoren. Diese Demonstratoren haben daher eine weiße Farbe.

Das Gefüge der beiden Keramikvarianten aus A-SG und B-SG-W ist auf den Bildern 13 und 14 dargestellt.



**Bild 13** Gefüge der Keramik aus A-SG.

Die sichtbaren Unterschiede der Kristallitgrößen im Gefüge sind das Ergebnis der unterschiedlichen Teilchengrößen der Rohstoffe, die ihrerseits verschiedene Sinteraktivitäten mit sich bringen und damit verschiedene hohe Sintertemperaturen erfordern. In der Rissprüfung mittels einer UV – sensitiven Anfärbemethode wurden auf der Keramikoberfläche keine Risse identifiziert.



**Bild 14** Gefüge der Keramik aus B-SG-W.

Zur Bestimmung des geometrischen Toleranzbandes diente die Breite des Fixiersteges. Dazu wurden jeweils 20 Demonstrator Teile aus dem pulvergepressten Typ A (A-PP) und den spritzgegossenen Typen A-SG und B-SG-W zunächst längs so halbiert, dass der Fixiersteg einer direkten Messung mittels eines Messmikroskops in 30- facher Vergrößerung zugänglich war.

Die folgenden Toleranzbänder (Grenze = 25 µm) wurden bestimmt: A-PP = 27 µm, A-SG = 20 µm und B-SG-W = 17 µm. Die Standardabweichungen der Meßwerte betragen für A-PP = 8 µm, für A-SG = 7 µm und für B-SG-W = 4 µm. Gerade im Bereich der Fixiernase führen die beim Pulverpressen immer wieder auftretenden Toleranzüberschreitungen zu unbrauchbaren Teilen. Insofern ist nach diesen Ergebnissen bereits das PIM mit A-SG deutlich zuverlässiger als A-PP, während die Variante B-SG-W ein noch engeres Toleranzband ermöglicht.

Die Vorteile des PIM und der Verwendung feinskali- ger Pulver werden auch in den erreichbaren Oberflä- chenqualitäten sichtbar: Tabelle 1 zeigt das Ergebnis einer Rauheitsmessung auf der Frontfläche des Fixiersteges und darunter in der Bohrung längs der Zahnblendenachse.

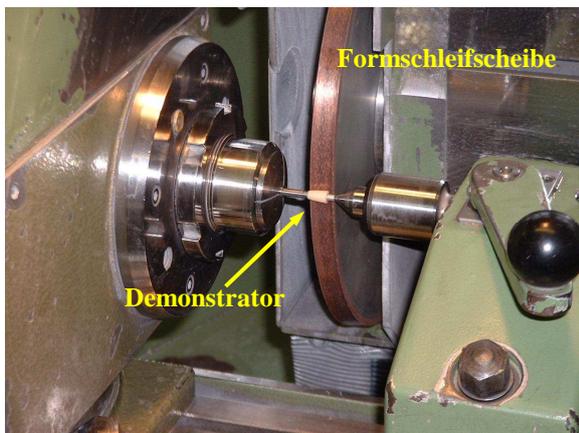
**Tabelle 1** Rauheitsvergleich zwischen A-PP, A-SG und B-SG-W.

Typ und Position	Ra (µm)	Rz (µm)
A-PP (Steg / Boh- rung)	1,20 / 1,11	8,93 / 6,55
A-SG (Steg/ Boh- rung)	0,81 / 0,78	4,39 / 4,42
B-SG-W (Steg / Bohrung)	0,40 / 0,30	2,39 / 2,04

## 5.2 Hartbearbeitungsversuche

Ursprünglich war geplant, die Keramik in FRIATEC zu bearbeiten. Es erwies sich jedoch als zweckmäßig, diese Hartbearbeitung bei einem externen Bearbeiter durchzuführen, der auf eine langjährige Erfahrung mit der Bearbeitung von demonstratorähnlichen Teilen zurückblicken kann.

Vor der Bearbeitung wurden die ausgewählten Teile auf einen metallischen Träger geklebt, um ihre sichere Einspannung in die Aufnahmevorrichtung der Bearbeitungsmaschine zu ermöglichen. Die endgültige Außenkontur und die Oberflächentopographie wurden mit Hilfe einer Formschleifscheibe im Polierschliff in einem Schritt erzeugt Bild 15 zeigt einen montierten Demonstrator vor seiner Hartbearbeitung.



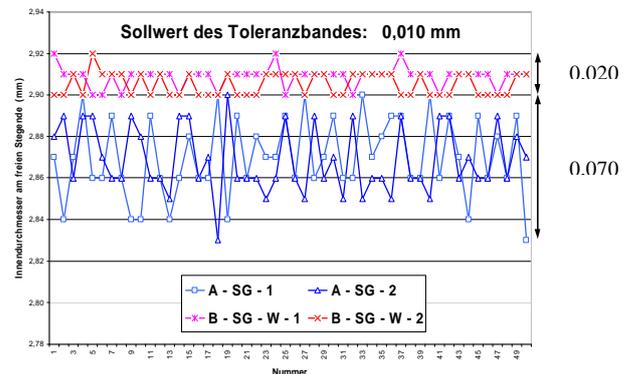
**Bild 15** Hartbearbeitung eines Demonstrators.

In der geschilderten Weise wurden jeweils hundert Demonstratoren aus A-SG und B-SG-W bearbeitet.

Um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurden aus A und B jeweils

mehrere Feedstocks hergestellt und anschließend einige tausend (A) bzw. hundert (B) Demonstratoren gespritzt, entbindert und gesintert. Um den Präparationsaufwand gering zu halten, wurde zur geometrischen Messung nicht der Fixiersteg, sondern der größte Innendurchmesser von jeweils 50 Teilen pro Charge verwendet. Als Messinstrument dienen Normstifte in einer Abstufung von 10 µm. Das Ergebnis dieser Messungen ist auf Bild 16 dargestellt.

Absolut betrachtet liegen 12 % der Teile aus A und 56 % der Teile aus B innerhalb des Toleranzbandes. Das Bild zeigt, dass die Teile aus A zu 69 % und die Teile aus B zu 100 % innerhalb < 1 % der Abmessungen liegen. Diese generelle Zielsetzung des Projektes wurde mit A daher annähernd und mit B vollständig erreicht.



**Bild 16** Reproduzierbarkeit

## 5.2 Herstellungskosten

Der Vergleich der beiden Prozessketten „Pulverpressen (PP)“ und „Spritzgießen (SG)“ zeigt, dass die angewandte Spritzgießtechnik wegen der damit möglichen Präzision und Nähe zur Endkontur vor allem in der Hartbearbeitung deutliche Vorteile gegenüber pulvergepressten Teilen hat: während die PP - Prozesskette für den Demonstrator sechs Hartbearbeitungsschritte benötigt, kann dieser Aufwand in der SG - Prozesskette auf zwei Schritte reduziert werden. Diese Kürzung der Prozesskette bewirkt im Fall des Demonstrators eine Reduzierung der Hartbearbeitungskosten um ca. 60 % und der gesamten Herstellungskosten um ca. 25 %. Die Ergebnisse der Bearbeitungsversuche belegen damit, dass die SG - Technik für solche Teile im Vergleich mit der PP - Technik eine deutliche Senkung der Herstellungskosten bei gleichzeitig gesteigerter Maßhaltigkeit ermöglicht.

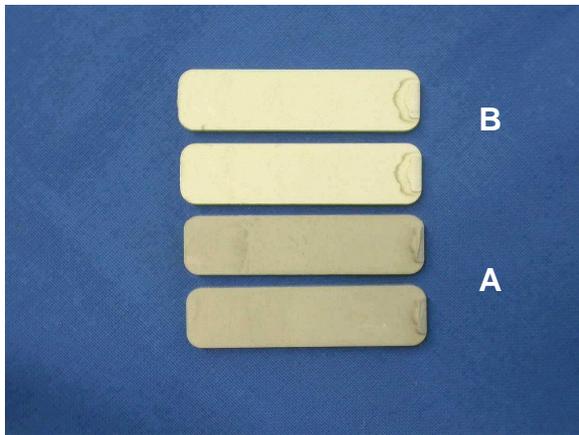
## 6 Mechanische Charakterisierung der Keramik

Die Prüfkörper zur mechanischen Charakterisierung der Keramik aus A und B wurden auf der Basis des wasserentbinderbaren Systems hergestellt.

Die Herstellung der Feedstocks aus den Rohstoffen A und B erfolgte bei Arburg mittels des SWK. Dort wurden auch die Teile mit der vorhandenen Ausrüstung gespritzt. Dazu wurde ein Werkzeug mit mitlaufender Auswerferplatte verwendet, das es ermöglichte, plattenförmige Teile zu spritzen, aus denen plangemäß jeweils zwei Biegeprüfkörper gemäß [5] herausgearbeitet werden sollten.

Der erste Spritzversuch von jeweils 50 Teilen aus den beiden Feedstocks A und B zeigte, dass die Braunlinge von zahlreichen vorwiegend lateral orientierten Rissen durchzogen waren. Im darauffolgenden zweiten Versuch mit geänderten Spritzparametern waren in den Braunlingen bei äußerer Betrachtung solche Risse nicht mehr erkennbar, traten jedoch in den gesinterten Teilen verarbeitet auf.

Bild 17 zeigt als Beispiel jeweils zwei Spitzlinge aus A und B. Bild 18 verdeutlicht die beobachtete Defektstruktur in den gesinterten Teilen, die durch Anfärben sichtbar gemacht ist.



**Bild 17** Spritzlinge für Biegeprüfkörper aus den Rohstoffen A und B.



**Bild 18**  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - Keramik mit Rissen, hergestellt aus Rohstoff B.

Das Ergebnis aus den beiden Versuchen gab den deutlichen Hinweis, dass ohne weitergehende Optimierungsschritte bei den Spritzparametern und der Werkzeugkonstruktion mit defektfreien für Biegeprüfkörper geeigneten Teilen kaum zu rechnen war. Da diese Optimierungsschritte den Zeitrahmen des Projektes weit überschritten hätten, wurden in diesem Teilgebiet keine weiteren Arbeiten durchgeführt.

## 7 Verwertung der Ergebnisse

Die grundlegenden Arbeiten im Rahmen dieses Projektes haben weitere nicht projektbezogene Entwicklungsarbeiten auch mit anderen oxidkeramischen Werkstoffen initiiert. Nach heutigem Stand ist FRIATEC durch diese weiterführenden Arbeiten in der Lage, Produkte in PIM - Technik aus vier verschiedenen Werkstoffen herzustellen. Beispiele solcher Teile aus den Werkstoffen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (F99,7), ZTA (FZT), Mg - PSZ (FZM) und Y - PSZ (FZY) sind auf Bild 19 dargestellt.



**Bild 19** Produkte aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{ZrO}_2$ - Werkstoffen von FRIATEC, hergestellt in PIM- Technik.

Die Einführung der keramischen Spritzgießtechnik für diese vier Werkstoffe bietet nicht nur Perspektiven für neue Produkte: bei bestehenden komplex geformten Produkten wurde durch die Umstellung von der Pulverpress- auf die Spritzgießroute bereits heute eine teilweise drastische Reduzierung der Herstellungskosten erreicht.

## 8 Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung und dem Projektträger PFT für die Betreuung des Projektes 02PD2136, sowie den im Teilprojekt Zahnblende eingebundenen Partnern im BMBF-Projekt Micro-P-PIM für die konstruktive Zusammenarbeit.

## 9 Literatur

- [1] Pape, F.-W., Khoury, F. „Die ästhetische Versorgung mit dem Frialit – 2 – System unter Verwendung vollkeramischer Aufbauten und Kronen (CeraBase)“, *Implantologie 1 / 2001*, S. 71 – 81.
- [2] Piotter, V., Plewa, K.; Ruprecht, R.; Hausselt, J.: „Micro Injection Moulding – Current Status and Perspectives“, *Proc. Conf. Injection - Moulding 2001*, Copenhagen, March 2001, pp 182 – 189.
- [3] Piotter, V.; Hanemann T.; Ruprecht, R.; Hausselt, J.: „Replication of Micro Components by Different Variants of Injection Moulding“, *5<sup>th</sup> Biennial High Aspect Ratio Micro – Structure Workshop (HARMST 2003)*, Monterey, Calif., June 15 – 17, 2003, to be published in *J. Microsystem Techn.* in 2004.
- [4] Bennison, S.J., Harmer, M.P.: „Effect of MgO Solute on the Kinetics of Grain Growth in Alumina“. *J. Am. Ceram. Soc.*, 66 (5) C-90 - C-92 (1983).
- [5] DIN EN 843-1, „Monolithische Keramik – Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur. Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit“, 1995, 10 S.



## Micro-P-PIM



# Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall:

## „Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus $\text{Al}_2\text{O}_3$ - Keramik für die Medizintechnik“

G. Bitz, H. Mayer, S. Yanarsönmez,  
FRIATEC Aktiengesellschaft Mannheim

R. Heldele, G. Örlygsson, R. Ruprecht,  
Forschungszentrum Karlsruhe



## Micro-P-PIM



## Inhalt

1. Ausgangssituation und Zielsetzung
2. Entwicklungsplan
3. Entwicklungsergebnisse
4. Zusammenfassung

## Micro-P-PIM

★JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

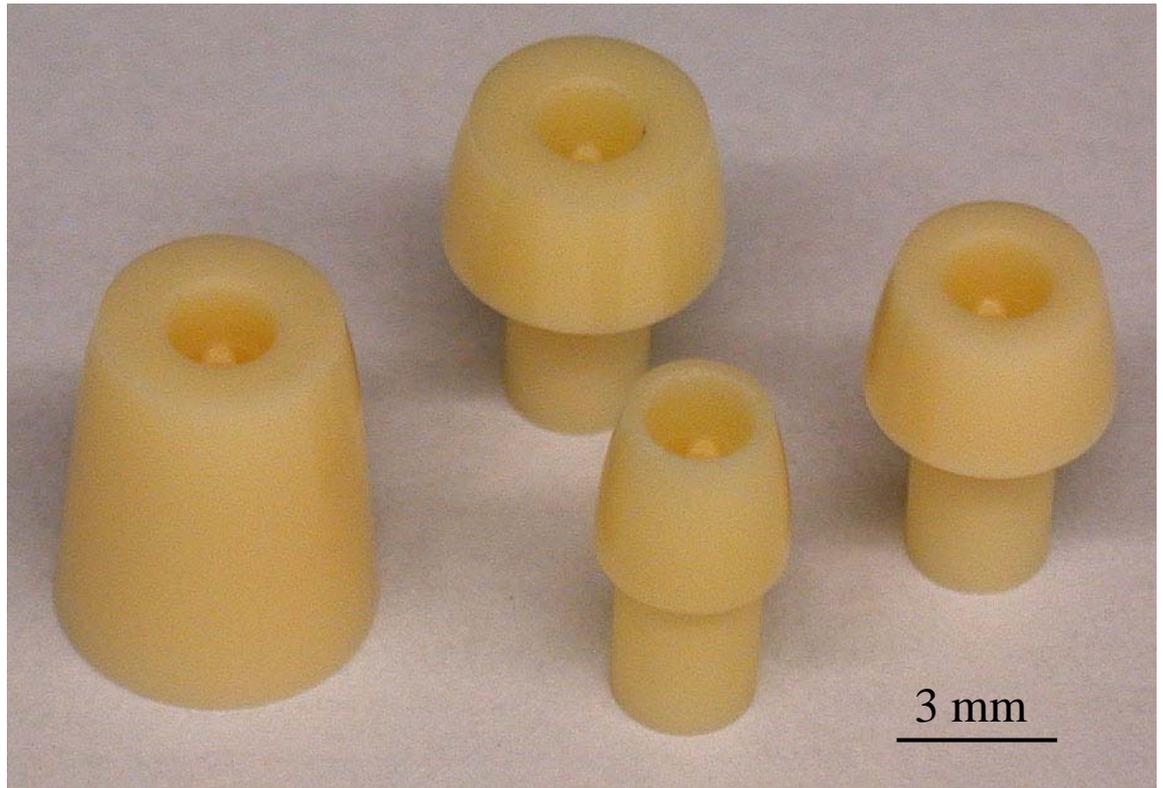
FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU



Beispiele von Zahnkappen: CeraBase (FRIADENT)

## Micro-P-PIM

★JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

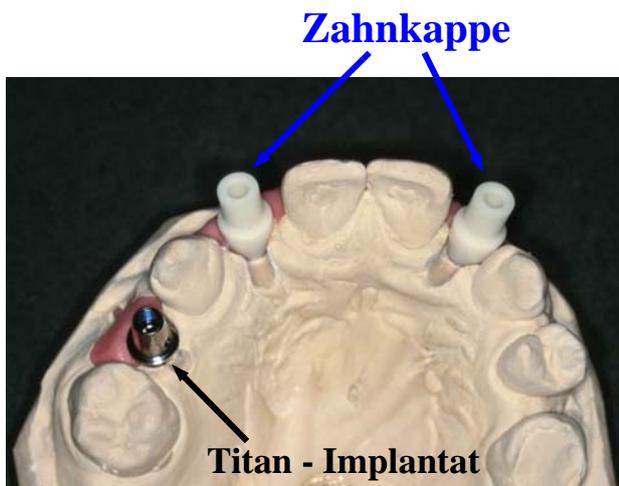
FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU



Zahnkappe: Montagesituation und Funktion

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium  
 für Bildung  
 und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

★JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

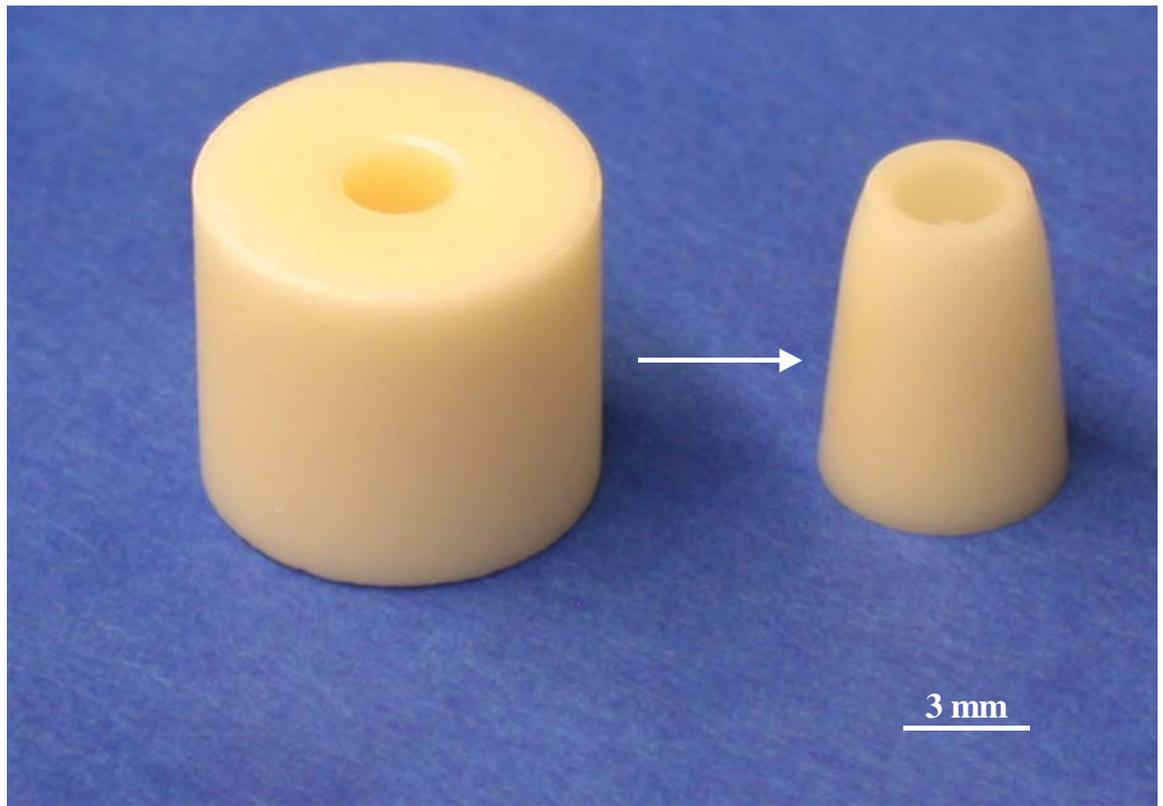
FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU



## Bestehende Herstellungstechnik

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium  
 für Bildung  
 und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

★JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

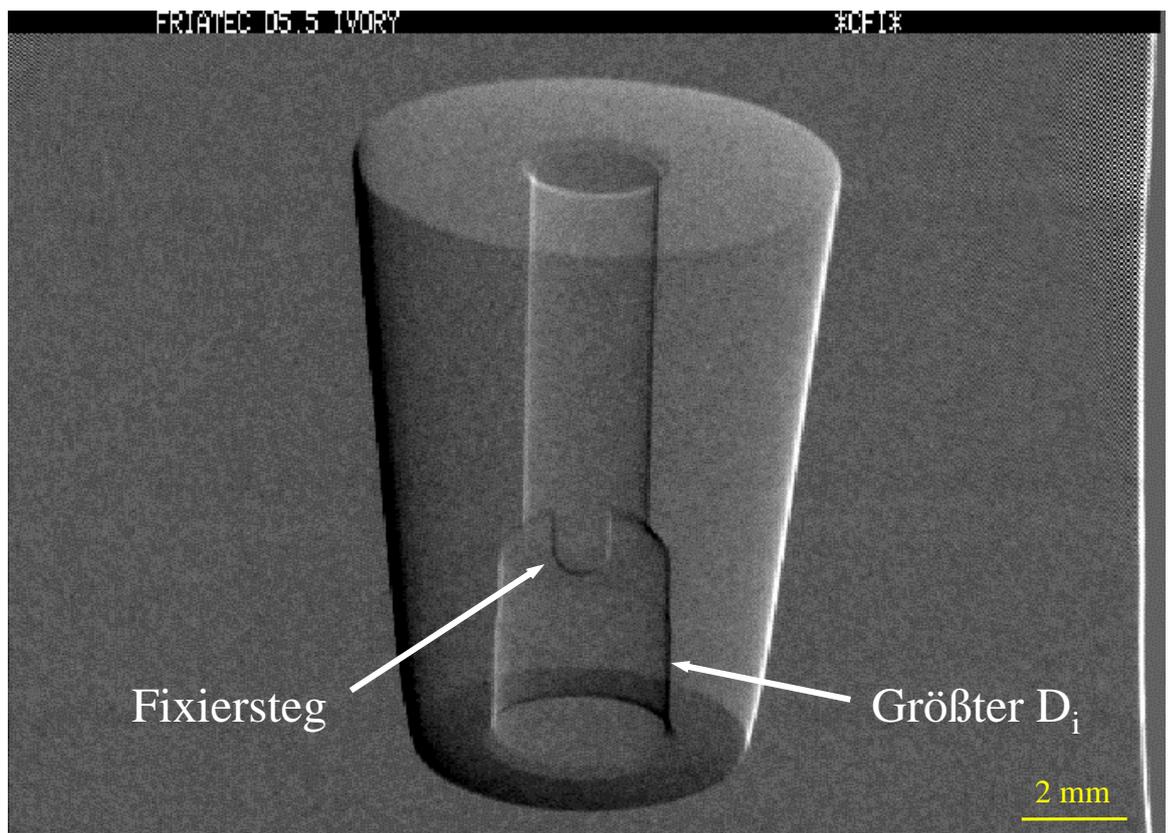
FRIATEC

ADC

KRONE

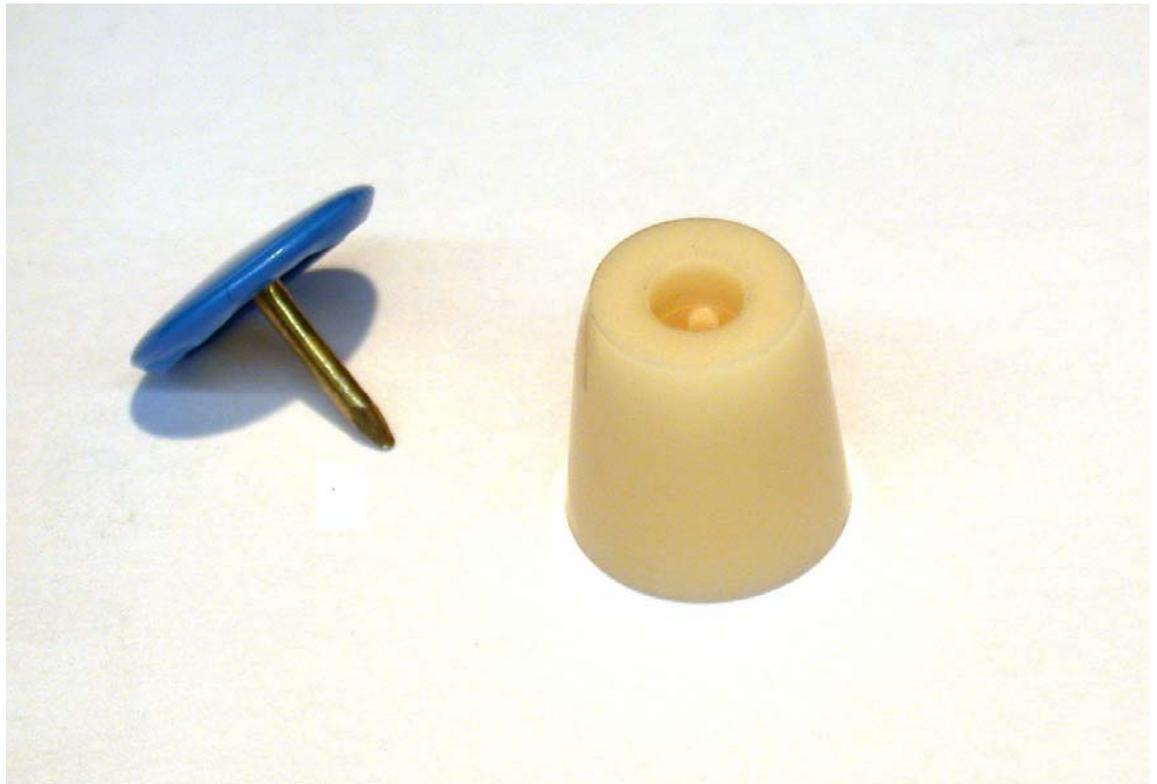
schunk

LMU



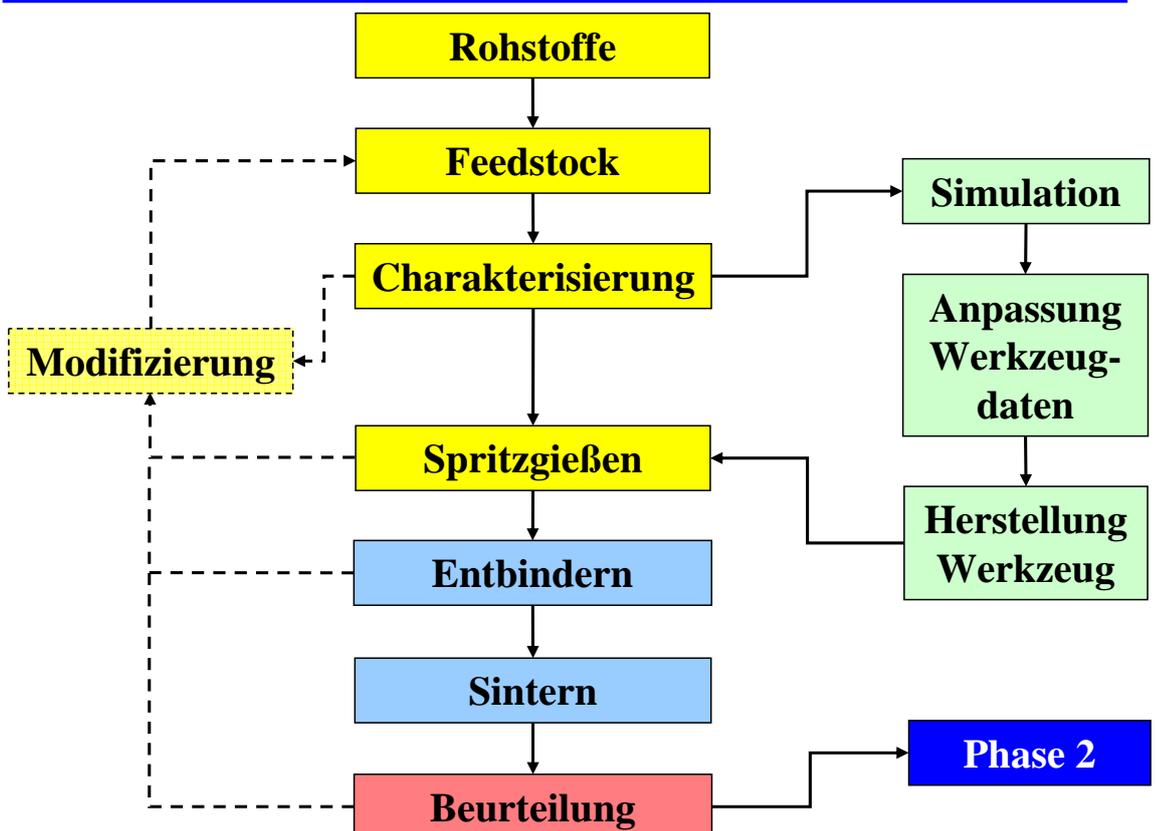
## Zahnkappe: Mikrofokus - Röntgenaufnahme

## Micro-P-PIM



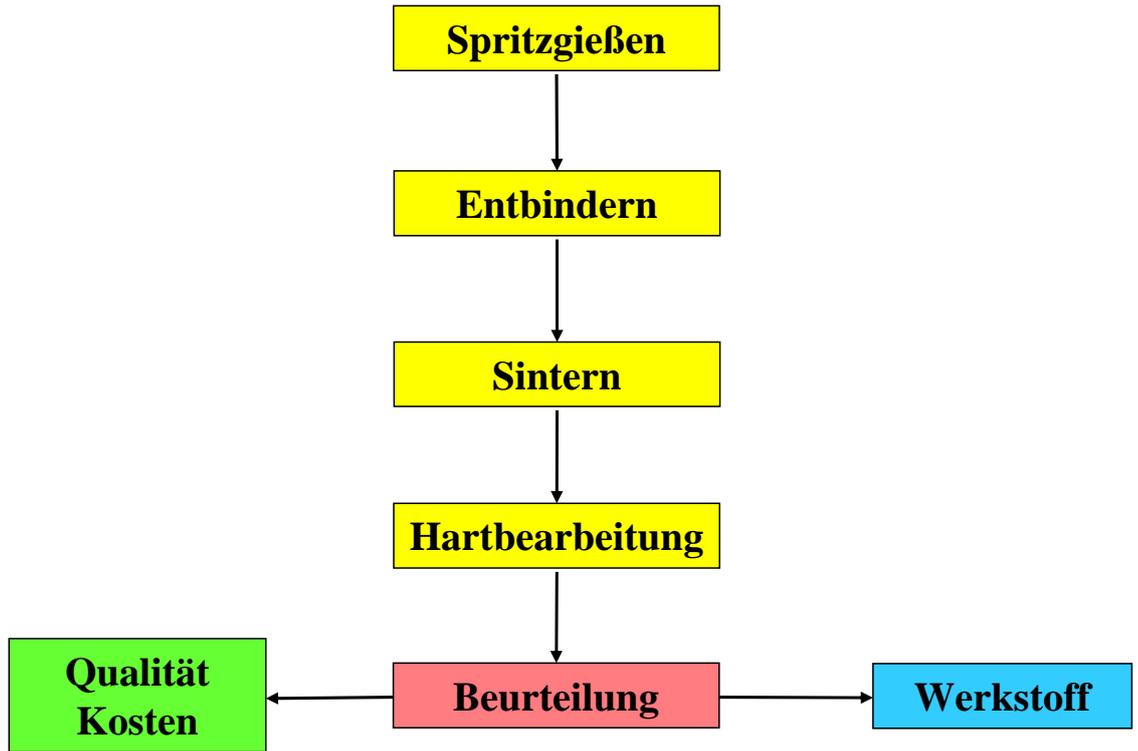
**Demonstrator aus dichtgesinterter Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Keramik**

## Micro-P-PIM



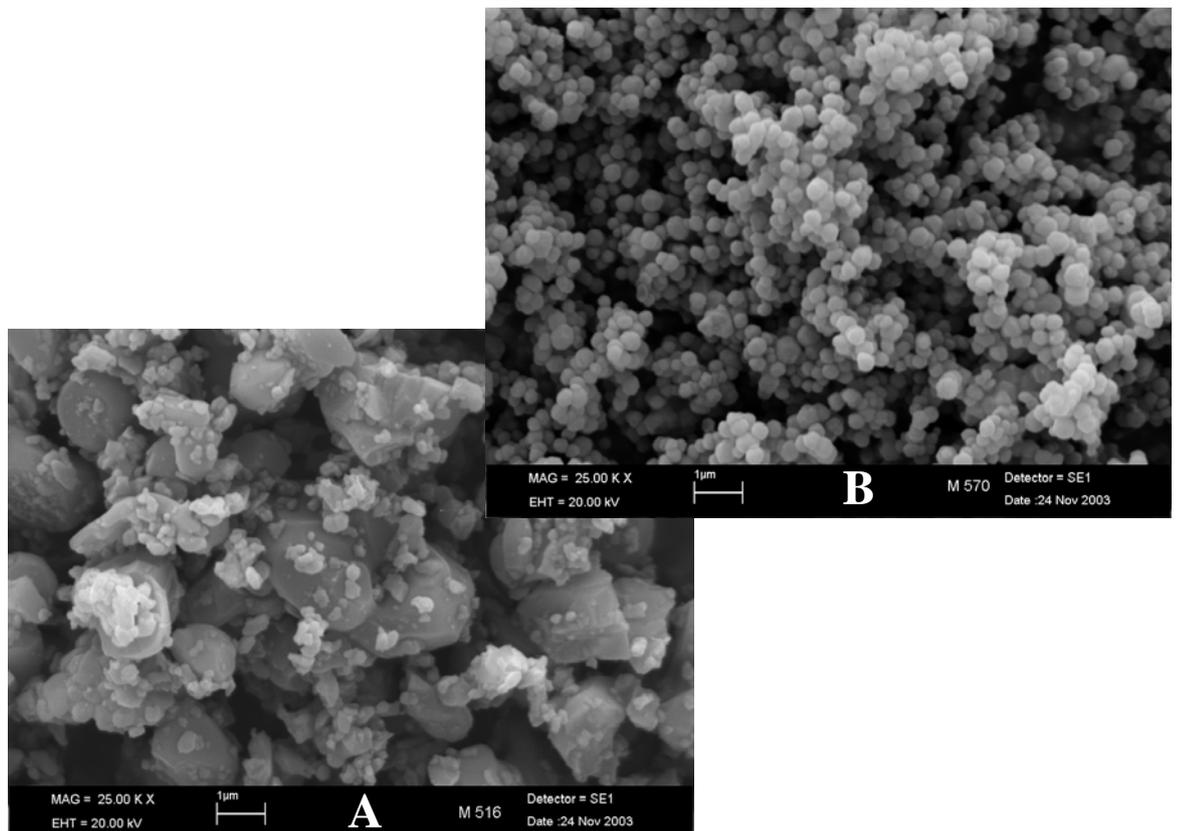
**Entwicklungsplan: Phase 1**

## Micro-P-PIM



## Entwicklungsplan: Phase 2

## Micro-P-PIM

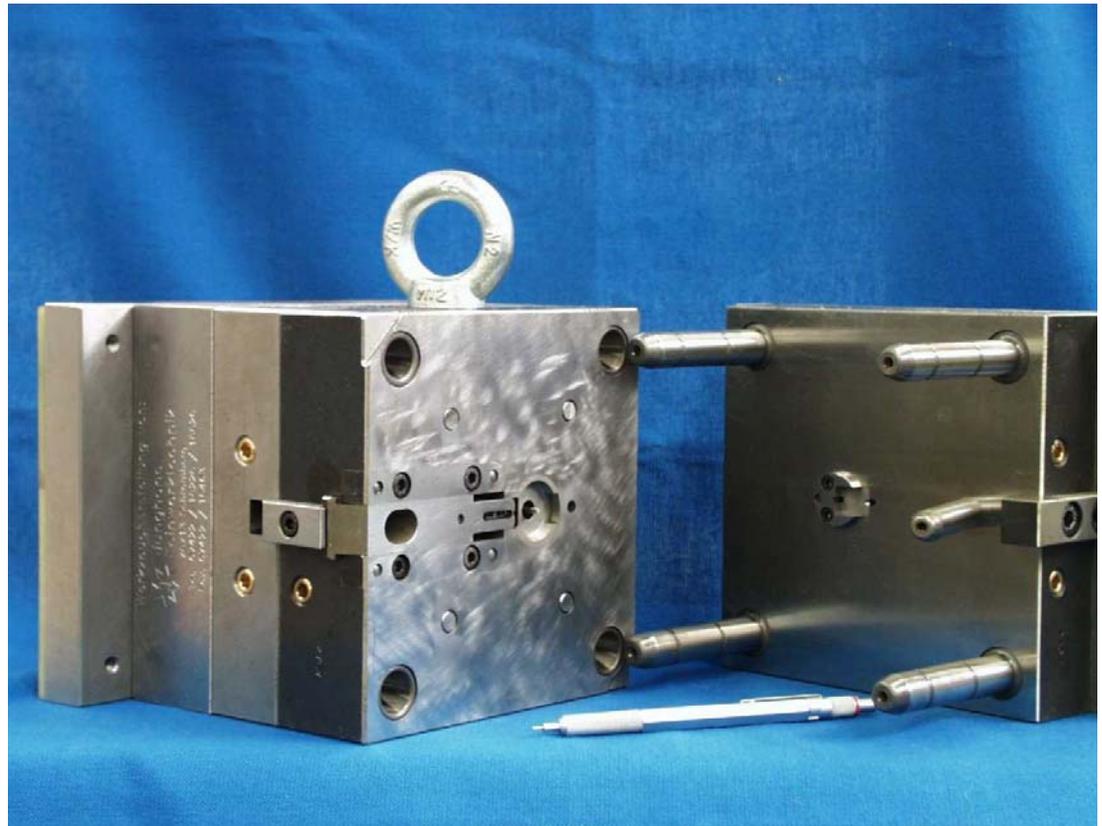


## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Rohstoffe A und B

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

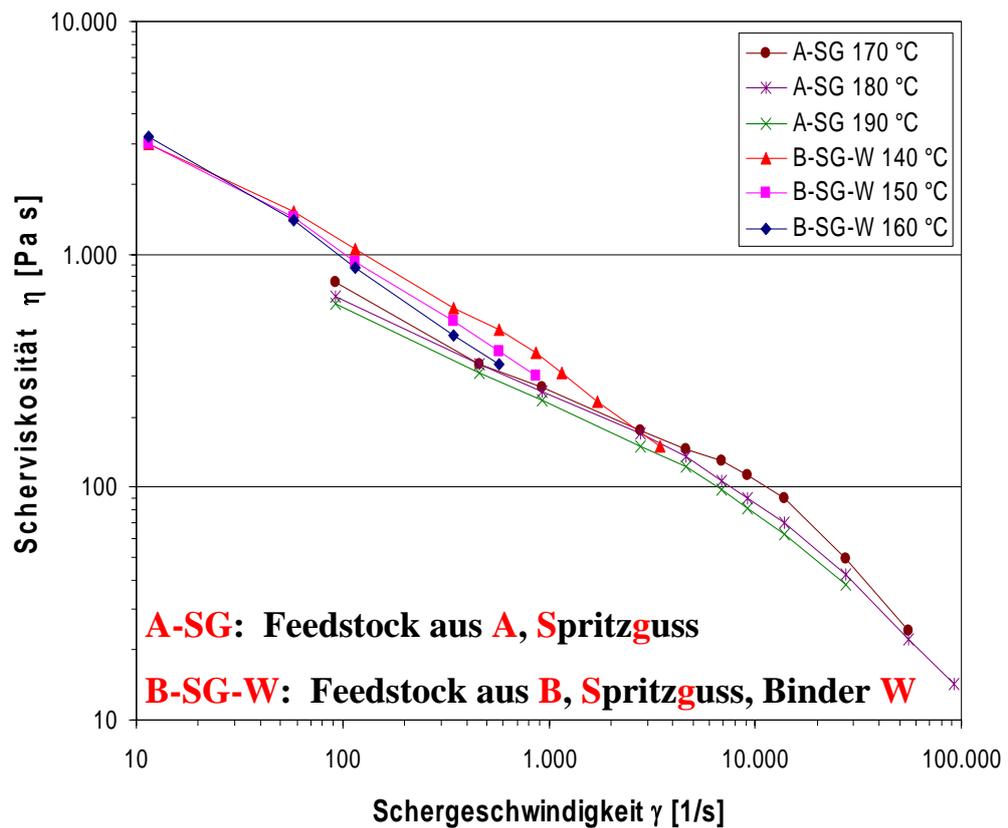


**Spritzgießwerkzeug für den Demonstrator**

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

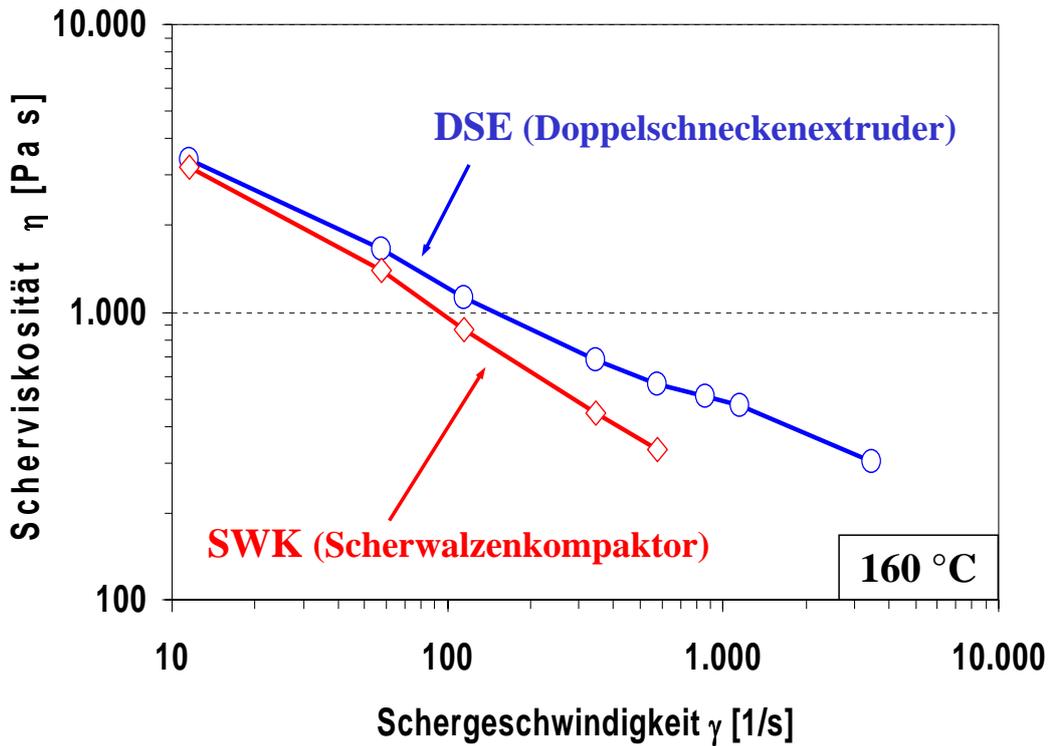
## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU



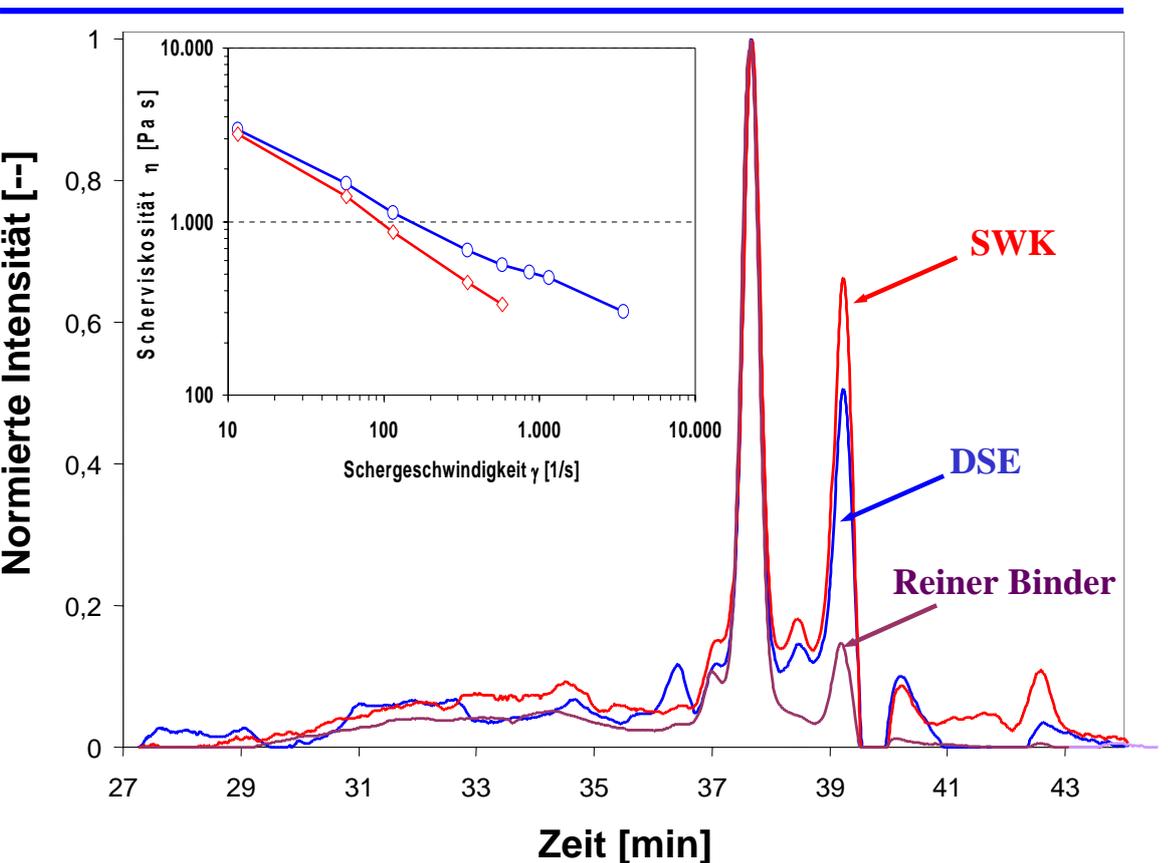
**Rheologische Eigenschaften: A - SG und B - SG - W**

**B - SG - W (Feedstock aus B, Spritzgießen, Binder W)**



**Vergleich der rheologischen Daten: DSE / SWK**

**Micro-P-PIM**



**Gelpermeations- Chromatographie: DSE / SWK**

**Micro-P-PIM**



GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

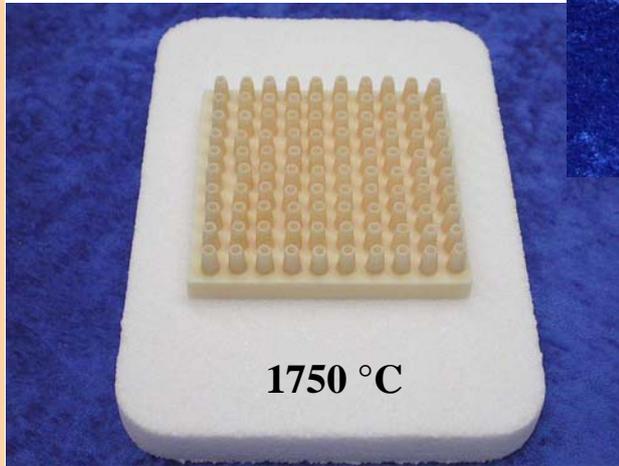
F

FRIATEC

ADC  
 KRONE

schunk

LMU



**B - SG - W** (Feedstock aus B, Spritzgießen, Binder W)

**A - SG** (Feedstock aus A, Spritzgießen)

## Gesinterte Demonstratoren

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

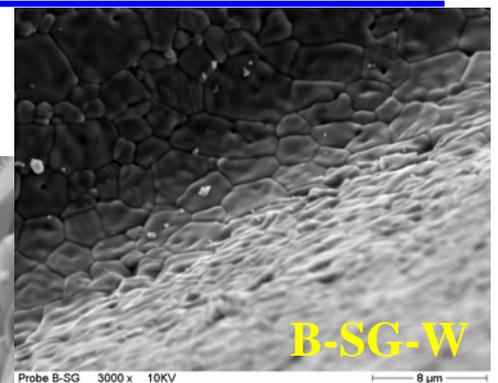
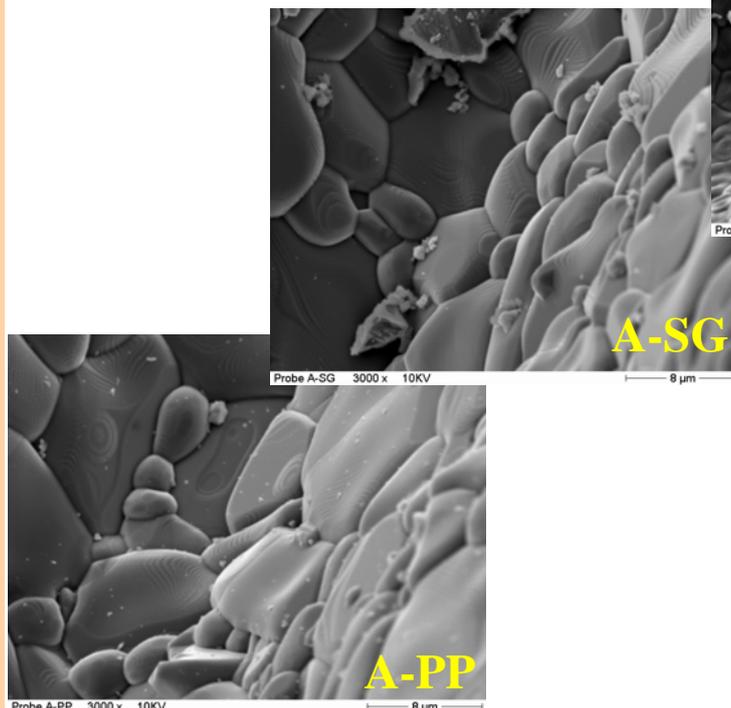
F

FRIATEC

ADC  
 KRONE

schunk

LMU



A, B : Rohstoffe  
 SG : Spritzgießen  
 W : Bindertyp  
 PP : Pulverpressen

## Gefüge

## Micro-P-PIM

 **JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik

**ARBURG**

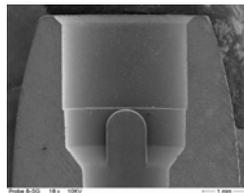
**F**

 **FRIATEC**

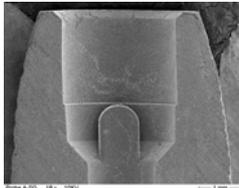
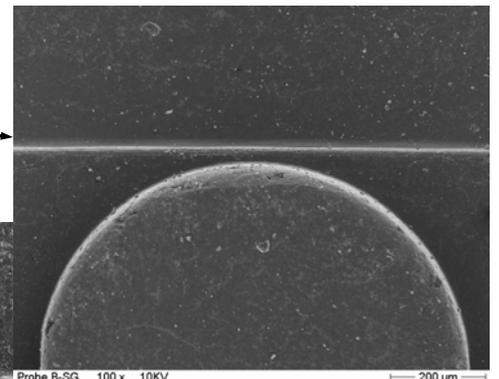
**ADC**  
 KRONE

 **schunk**

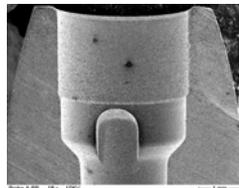
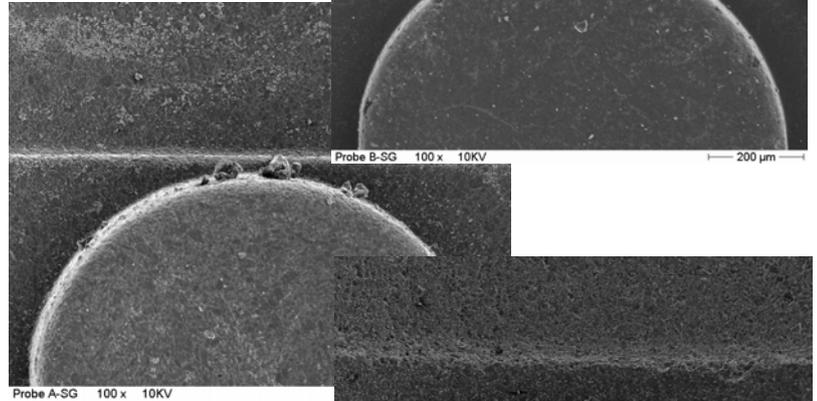
**LMU**



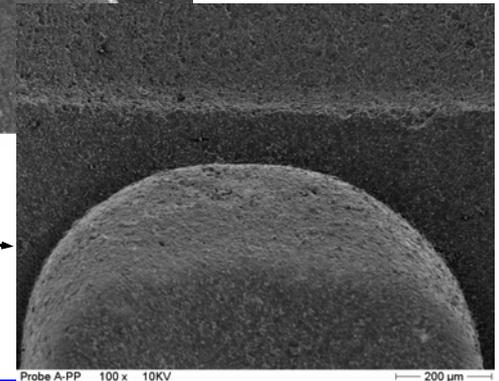
**B-SG-W**



**A-SG**



**A-PP**



**Konturschärfe**

## Micro-P-PIM

 **JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

 **FRIATEC**

**ADC**  
 KRONE

 **schunk**

**LMU**

Typ	R <sub>a</sub> (µm)		R <sub>z</sub> (µm)	
	Steg	Bohrung	Steg	Bohrung
A - PP	1,20	1,11	8,93	6,55
A - SG	0,81	0,78	4,39	4,42
B - SG - W	0,40	0,30	2,39	2,04

**Rauhigkeitsvergleich**

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

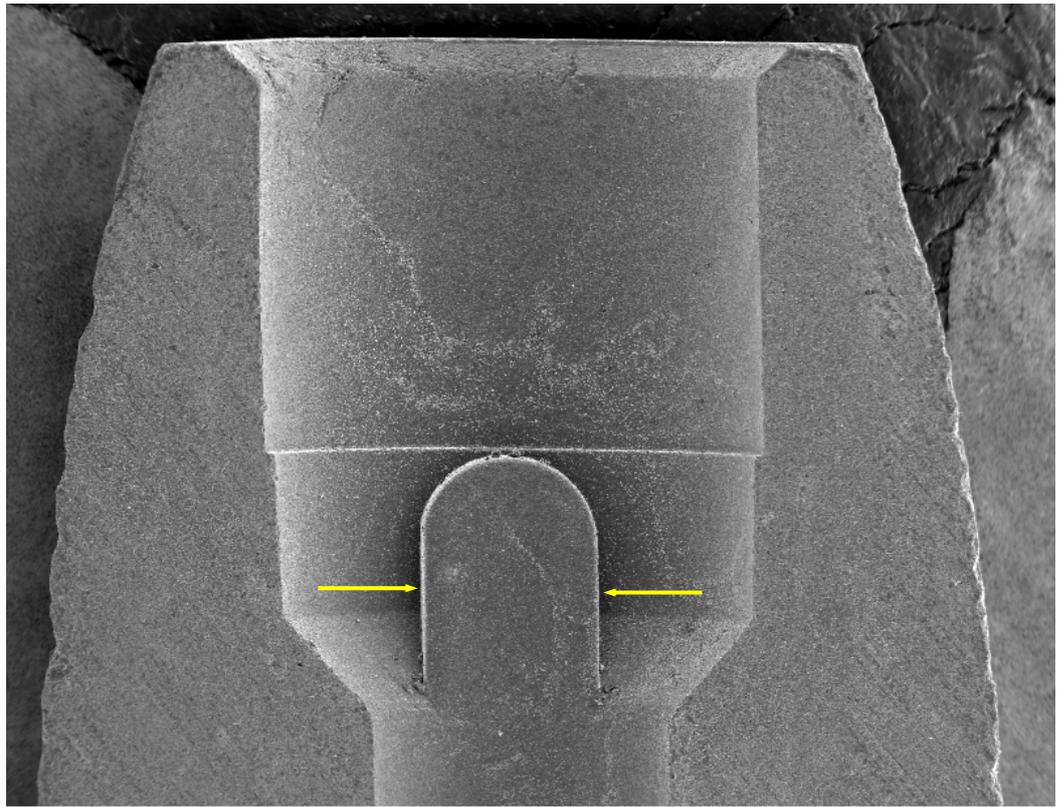
F

FRIATEC

ADC  
 KRONE

schunk

LMU



Probe A-SG 18 x 10KV

1 mm

## Toleranzband: Messposition Fixiersteg

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

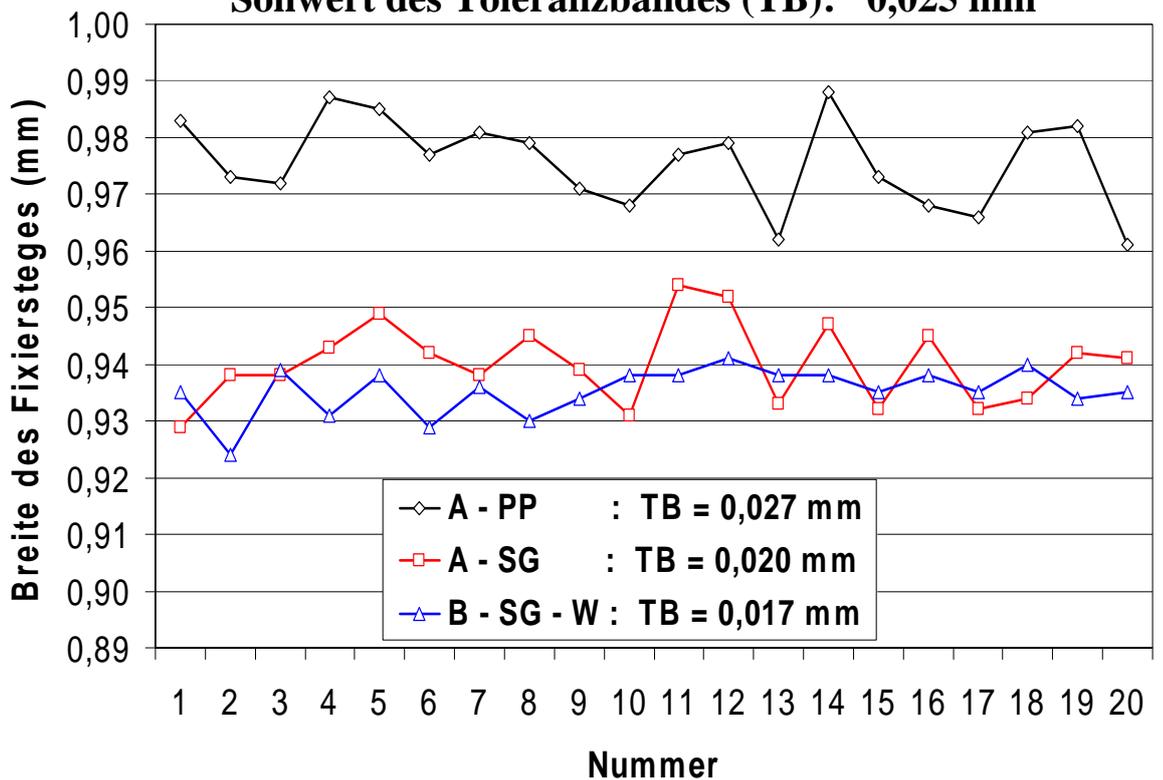
FRIATEC

ADC  
 KRONE

schunk

LMU

## Sollwert des Toleranzbandes (TB): 0,025 mm

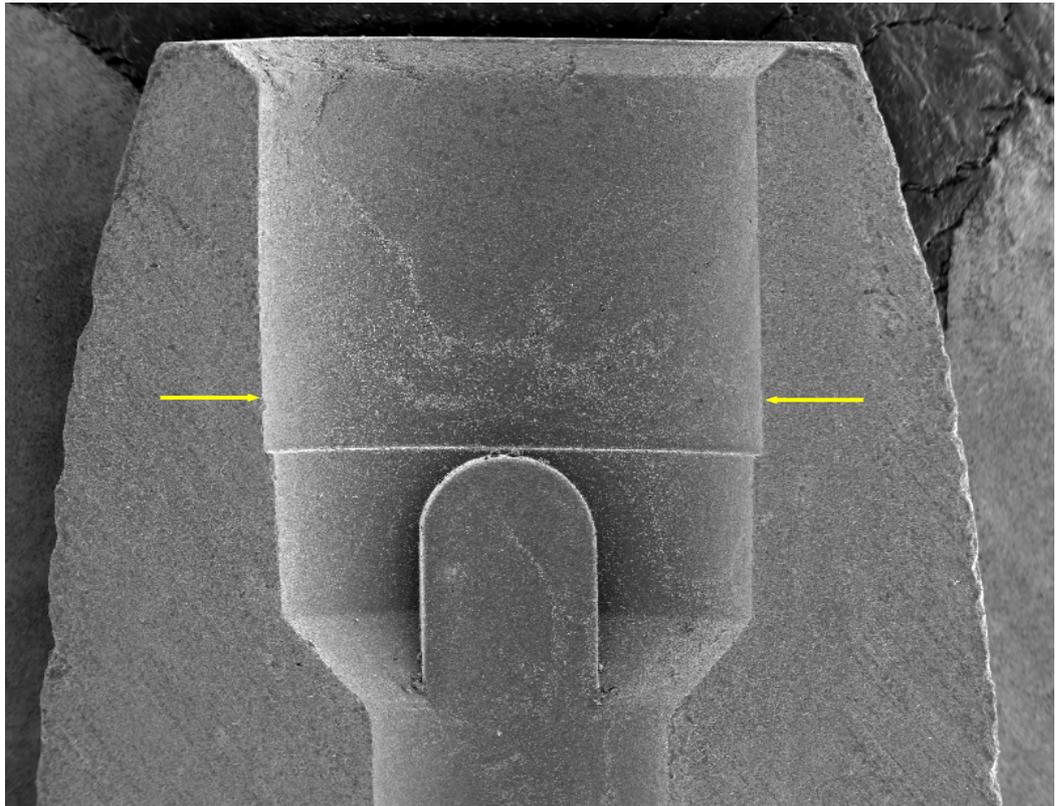


## Toleranzband des Fixiersteges

# Reproduzierbarkeit



GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)



Probe A-SG 18 x 10KV

1 mm

## Toleranzband: Messposition größter $D_i$

### Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F



ADC  
 KRONE

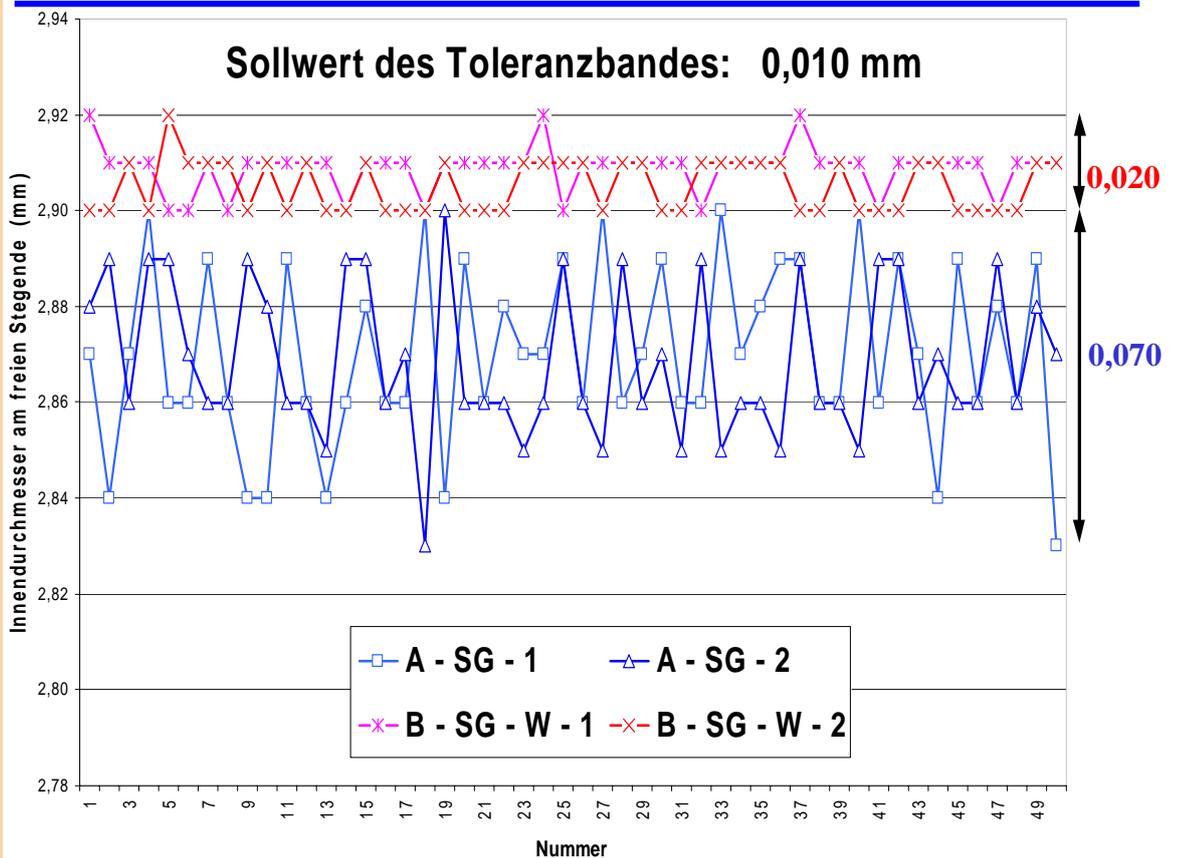


LMU

# Reproduzierbarkeit



GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projekträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)



## Toleranzband: Messergebnisse

### Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F



ADC  
 KRONE

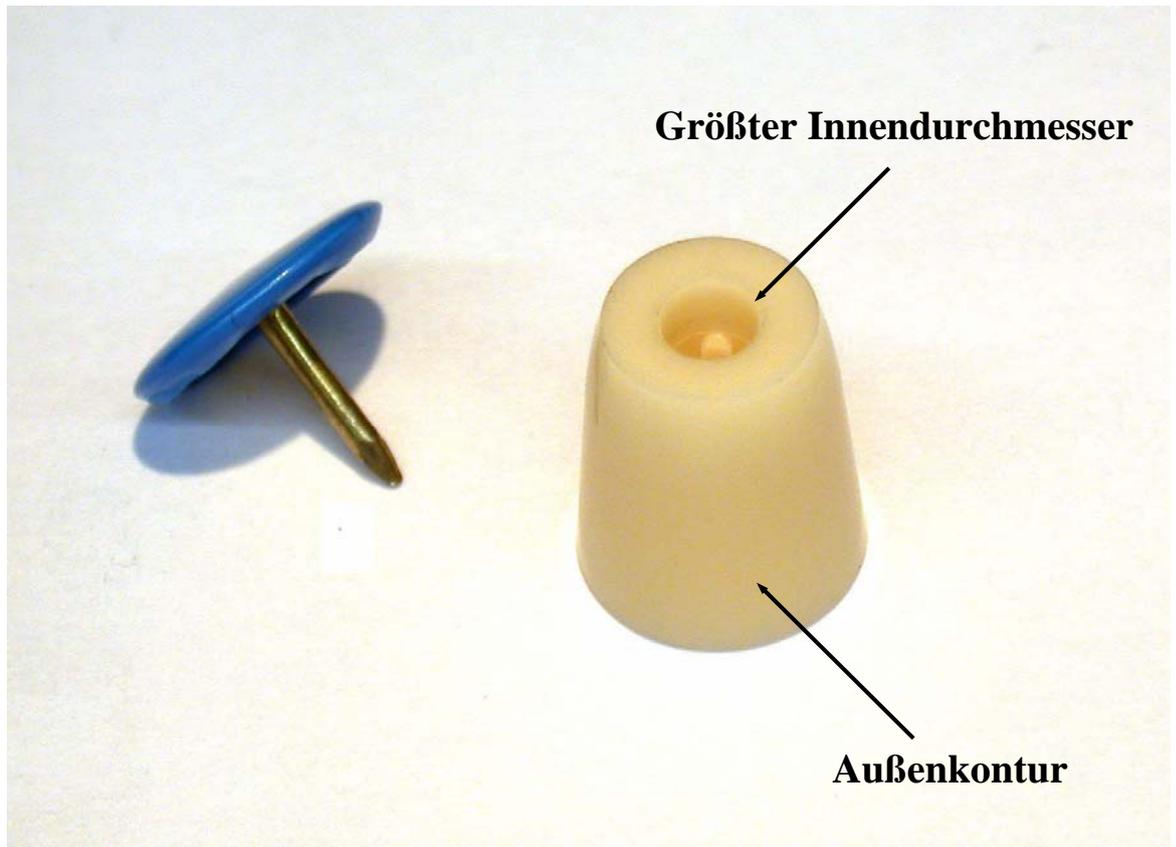


LMU

# Hartbearbeitung



## Micro-P-PIM

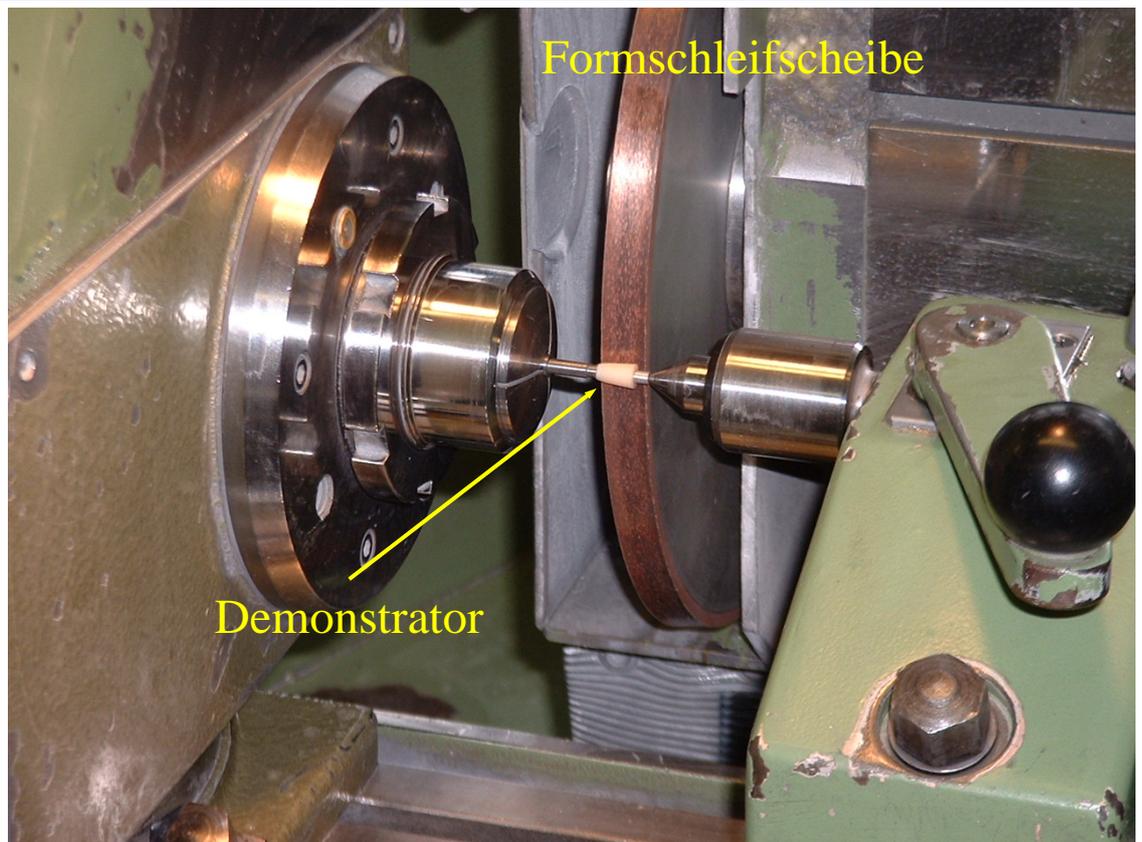


**Bearbeitungspositionen auf dem Demonstrator**

# Hartbearbeitung



## Micro-P-PIM



**Letzter Bearbeitungsschritt: Polierschliff**

Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

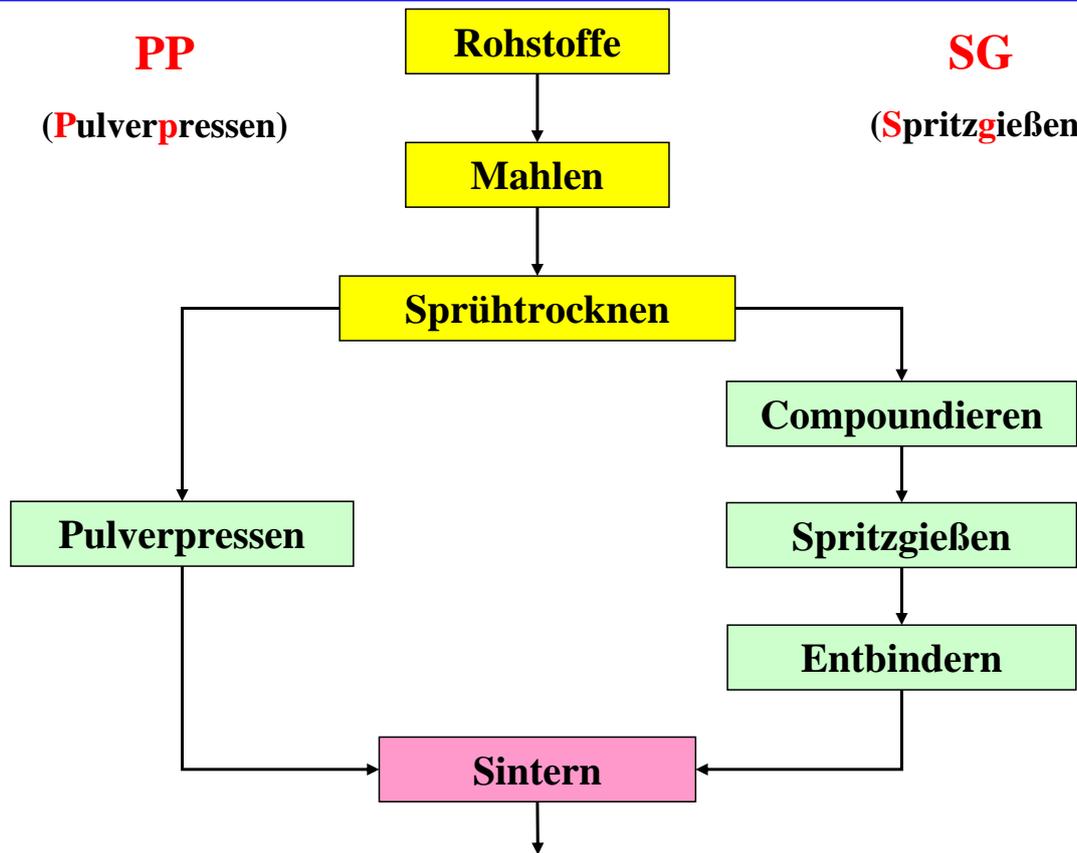
ADC  
 KRONE

schunk

LMU

**PP**  
 (Pulverpressen)

**SG**  
 (Spritzgießen)



**Herstellung der Rohkeramik aus Rohstoff A**

Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

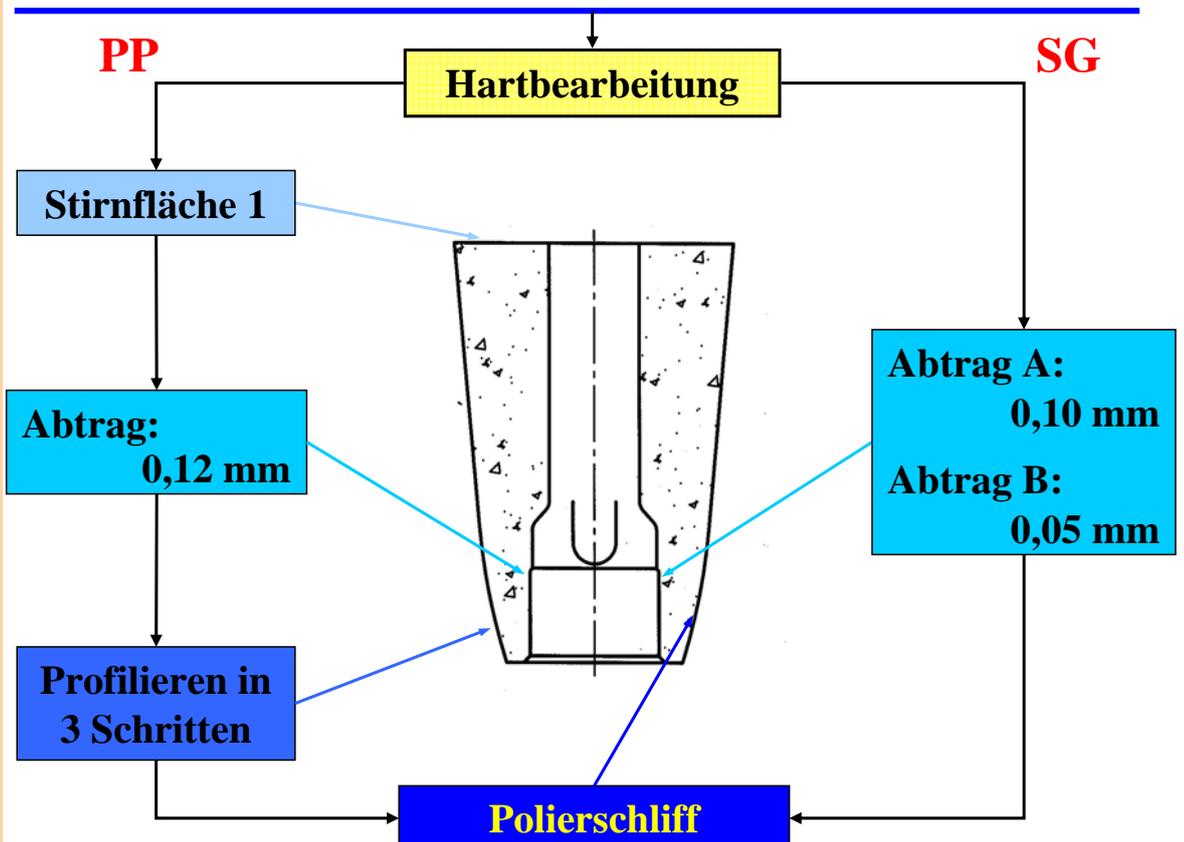
ADC  
 KRONE

schunk

LMU

**PP**

**SG**



**Nachbearbeitungsarme Keramik**



## Micro-P-PIM



**Grundlagen:** Die Rezepturen für verarbeitungsfähige Feedstocks wurden entwickelt, charakterisiert und die prinzipielle Methodik der Entbinderung und Sinterung ausgearbeitet.

Ein Spritzgießwerkzeug für die Demonstratoren wurde erzeugt.

Eine kommerzielle Simulationssoftware wurde auf ihre Eignung für keramische Feedstocks untersucht.

**DSE / SWK:** Der Vergleich zeigt eine verschieden starke Beanspruchung des verwendeten Bindersystems. Weitergehende Untersuchung mit optimierten Maschinenparametern ?

**Fixiersteg:** PP - Teile liegen mit 90 %, die SG - Demonstratoren mit 100 % innerhalb des Toleranzbandes.

**Nachbearbeitungsarm:** Im Vergleich mit PP ist der Aufwand bei der Hartbearbeitung durch SG um 60 % reduziert, in der gesamten Prozesskette um 25 %.

**Abschließende Arbeiten:** Mechanische Charakterisierung der Werkstoffe aus A und B.

**Verwertung:** Übertragung der Entwicklungsergebnisse auf Produkte aus  $Al_2O_3$  - und  $ZrO_2$ - Keramik.

## Abschlusskolloquium Micro - P - PIM



## Micro-P-PIM



Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall:

**„Spritzgießen von Präzisionsbauteilen aus  $Al_2O_3$ -Keramik für die Medizintechnik“**

G. Bitz, H. Mayer, S. Yanarsönmez,  
FRIATEC Aktiengesellschaft Mannheim

R. Heldele, G. Örlygsson, R. Ruprecht,  
Forschungszentrum Karlsruhe

**Wir danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung, dem Projekträger PTKA für die Betreuung und den Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit.**

# **Metallpulver-Spritzgießen von Präzisionsbauteilen für Kleingetriebe**



# Metallpulver-Spritzgießen von Präzisionsbauteilen für Kleingetriebe

Frank Baumgärtner, Martin Enders, Schunk Sintermetalltechnik GmbH, D-35452 Heuchelheim  
Johann Pannhorst, Walter Grieb, Junghans Feinwerktechnik GmbH & Co. KG, D-78713 Schramberg  
Robert Ruprecht, Richard Heldele, Forschungszentrum Karlsruhe, IMF III, D-76021 Karlsruhe  
Christian Thürigen, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, D-71101 Schönaich  
Alexander Paul, Frank Haupt, Zentrum. für Material- und Umwelttechnik GmbH, D-09599 Freiberg

## Kurzfassung

Zur Entwicklung der Produktionstechnik zum Pulverspritzgießen von nachbearbeitungsarmen Präzisionsbauteilen wurden zwei Demonstratoren ausgewählt: ein Planetenträger für Mikroantriebe und eine Getriebeschnecke für Zeitwerke, beide aus dem ferritisch-martensitischen Edelstahl (17-4 PH). Verschiedene Pulver mit unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen des Edelstahls wurden in Vorversuchen auf Eignung getestet. Ein durchlegiertes Feinstpulver eignete sich am besten für die Realisierung nachbearbeitungsarmer Demonstratorbauteile. Nach der Entwicklung der Verarbeitungsbedingungen wurden Bauteile und Prüfkörper hergestellt, um gezielte Untersuchungen zum Gefüge und den mechanischen Eigenschaften durchführen zu können. Hinsichtlich des Maßverhaltens bleibt festzustellen, dass es möglich ist, mit den Ergebnissen des Projekts engere Toleranzen im Vergleich zu makroskopisch typischen Werten einzuhalten. Weitere Bauteiltests werden bis zum Projektende Dezember 2005 durchgeführt.

## 1 Motivation und Ziel

In Zeiten des aktuellen Trends zur Nanoskala erscheint es nahezu als "traditioneller Maschinenbau", sich einer Produktionstechnologie zur Herstellung von Bauteilen im Millimeter- bzw. Submillimeterbereich mit Toleranzen im Bereich einiger zehn bis wenigen Mikrometer anzunehmen. Betrachtet man die etablierten Fertigungstechnologien wie das Metallpulverspritzgießen, das prinzipiell für die Produktion kleinerer Bauteile geeignet ist, so waren vormals die Zielstellungen überwiegend umgekehrt, nämlich in Richtung größere Bauteilgewichte. Bedingt ist dies vornehmlich in der Optimierung der Prozesseffizienz und der Herstellkosten.

Neuerdings ist auch für dreidimensional geformte Metallteile erkennbar, dass nicht nur größere Einzelteile von Interesse sind, sondern vielmehr die Miniaturisierung von Produkten einen Mehrwert bieten kann. Durch die Etablierung von mehr und mehr Mikrosystemen in Bereichen, die im täglichen Umgang wahrgenommen werden, ist mittlerweile eine hohe Akzeptanz und auch eine starke Nachfrage nach solchen Systemen, deren Schnittstellen zur Feinwerktechnik und der Erweiterung der Materialpalette über Silizium und Kunststoff hinaus entstanden. Innerhalb der Konzeptionierung und Konstruktion von neuen Systemen wird demnach der Bedarf an komplexen Mikrobauteilen aus Stahl noch stärker steigen. Für komplex geformte Bauteile in mittleren bis großen Stückzahlen bietet sich hierzu das Pulverspritzgießen als Produktionsverfahren an.

Die Qualität von Metallteilen, die durch das pulvermetallurgische Spritzgießen (engl.: Metal Injection Moulding - MIM) produziert werden, wird maßgeb-

lich durch den Sinterprozess beeinflusst, der einer Toleranz unterliegt. Um die Nachbearbeitung der MIM-Bauteile zu reduzieren, muss es deshalb ein Ziel sein, vor allem die Sintertoleranz zu reduzieren. Ausgehend von feinskaligen Pulvern hat das MIM-Verfahren klassisch gute Voraussetzungen Kleinbauteile im Rahmen der gewünschten Qualitätskriterien herzustellen. Reineisenpulver mit Pulverpartikelgrößen von kleiner 10 µm sind handelsüblich verfügbar. Jedoch sind durchlegierte, höher legierte Stähle bislang infolge der aufwendigeren Herstellungsbedingungen in akzeptablen Kostensegmenten lediglich in Partikelgrößenbereichen kleiner 30 µm zu beziehen.

Hinsichtlich der Toleranzen, die durch MIM erzielbar sind, wird in der makroskopischen Skala üblicherweise von ca. 1 % Toleranzbandbreite in Bezug zum Nennmaß ausgegangen. Für Mikropräzisionsbauteile, d.h. feinwerktechnische Bauteile mit Toleranzen, die in Abmessungen der Pulverkorngrößen dimensioniert sind, ist eine Entwicklung zwingend notwendig. Mit den Einflussgrößen der Pulverpartikelgröße, der Werkzeug-Oberflächengüte, den Spritz- und Wärmebehandlungsbedingungen etc. sind vielfältige Abhängigkeiten mit Bezug auf die Qualität des Endprodukts zu beherrschen. Weiterhin spielt die Handhabung der Spritzgegossenen, fragilen Grünlinge und entbindernten Braunlinge eine wichtige Rolle hinsichtlich der Bauteilqualität und Prozesssicherheit.

Anhand von zwei Mikrobauteilen, die bisher als Kunststoffbauteile produziert werden (Getriebeschnecke und Planetenträger), wird über die Werkstoffauswahl Stahl möglich, künftig höheren Bauteilanforderungen Rechnung getragen. Ziel des Werkstoffwechsels von Kunststoff nach Stahl ist es, in erster Linie die übertragbaren mechanischen und tribologi-

schen Lasten und die Eigenschaften hinsichtlich der chemischen Beständigkeit zu optimieren. Mittels einer Auswahl unterschiedlicher Partikelfraktionen des definierten Stahlpulvers ist die davon abhängige Toleranzbandbreite der Bauteile zu ermitteln und in Bezug zu setzen. Schließlich sind Eigenschaftspotentiale der gesinterten Stähle und Bauteile zu bestimmen und den entwickelten Herstellungsbedingungen gegenüberzustellen.

## 2 Stand der Technik

Wie eingangs beschrieben waren die Entwicklungsrichtungen der MIM-Industrie, vornehmlich der Feedstockhersteller, zunächst dadurch geprägt, großvolumige Bauteile herstellen zu können. Stückgewichte über 500 g bzw. über 1 kg Bauteilgewicht erschienen sehr lukrativ. Eine Beschränkung ist in der Kostenschiene gegeben: Hochpreisige Basiswerkstoffe, die durch MIM zu einbaufertigen Bauteilen verarbeitet werden können, sind hier von großem Interesse. Die Zielrichtung der Miniaturisierung beschränkt sich nicht nur auf die Verwendung kleinerer Formeinsätze und die Verwendung feinerer Pulver, sondern ebenso auf die Anpassung der Feedstocks und Prozessparameter. Das Fließverhalten von Feedstocks für massive, große Bauteile mit Bezug auf Prozessfähigkeiten sind keinesfalls mit den Anforderungen, wie sie durch Kleinbauteile gestellt werden, zu vergleichen. Ansätze für Bindersysteme, die sich für Klein- und Mikrobauerteile eignen, sind beispielsweise am Forschungszentrum Karlsruhe [1, 2] aufgezeigt oder durch MIT [German?] beschrieben. Besondere Herausforderungen stellen hierbei die Herstell-, Dosier- und Verarbeitbarkeit der Kleinmengen bei gleich bleibenden rheologischen Eigenschaften.

Spritzguss-Maschinenhersteller sind durch die Polymerverarbeitung, mit der schon großserienfähig Mikrobauerteile hergestellt werden, auch für das Pulverspritzgießen bis in Mikrodimensionen vorbereitet [3]. Jedoch müssen hinsichtlich der Homogenität der Feedstocks und bezüglich der Prozessparameter beim Formgeben bis zum Sintern selbst Anpassungen vorgenommen werden.

(Die Handhabung der Mikrobauerteile unterscheidet sich massiv von der Handhabung, die bei Polymerbauteilen bekannt ist. Greifersysteme müssen in ihrer Sensibilität angepasst bzw. neu entwickelt werden. Schließlich ist die Grünfestigkeit der MIM-Spritzlinge im direkten Vergleich relativ gering.)

Entgegenkommend für die Entwicklung einer nachbearbeitungsarmen MIM-Fertigung von Präzisionsbauteilen ist der Ansatz der Feedstockoptimierung. Dazu sind Feedstocks gefüllt mit feinskaligen Pulvern erwünscht, die während der Formfüllung leicht fließen und während der Entformung eine ausreichend hohe Festigkeit aufweisen.

Prinzipiell sind manche kommerziellen Bindersysteme durch gute Grünfestigkeiten gekennzeichnet, doch die Anwendbarkeit auf Kleinbauteile ist nicht prozesssicher gegeben. Hingegen sind gut formfüllende Bindersysteme oftmals von schlechter Grünfestigkeit.

Kommerzielle MIM-Feedstocksysteme für legierte Stähle beinhalten im allgemeinen Pulver mit Partikelgrößen über 25  $\mu\text{m}$ .

Um Details und Toleranzen bis in den Mikrometerbereich zu erhalten, ist die Verwendung von Feinstpulver angebracht. Jedoch steigt mit zunehmendem Anteil an Feinstpulver die Viskosität der Feedstocks, was deren Verarbeitung während der Formgebung erschwert.

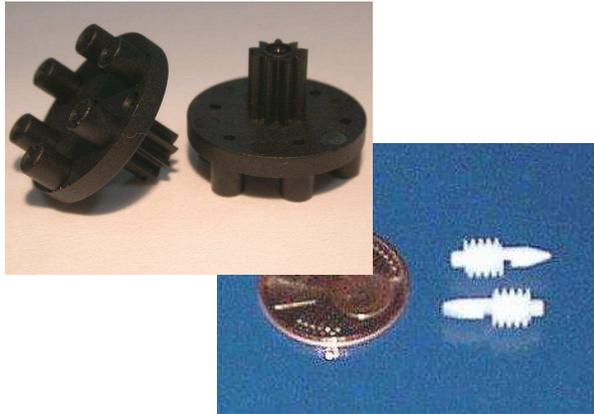
Die Verwendung von Feinstpulvern im Submikrometerbereich ist in der Keramikbranche Stand der Technik. Bei den metallischen Pulvern sind einfache Reineisen (Carbonyleisenpulver), die über die Gasphase gewonnen werden, im Bereich  $< 10 \mu\text{m}$  Standard. Für hoch legierte, korrosionsbeständige Werkstoffe sind Pulver dieser Größenordnung zwar auch bekannt, doch hinsichtlich der Kosten kaum wirtschaftlich umsetzbar.

Ein Ansatz über die Master Alloy-Technik, d.h. die Verwendung von hochkonzentrierten Legierungspulvern, die mit feinem Carbonyleisenpulver auf Sollzusammensetzung "verdünnt" werden, sind ein möglicher Weg, der für größere Bauteile hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte gegangen wird. Für Kleinteile stellt sich aber die Frage nach mikroskopischen Entmischungen und isotropen Werkstoffeigenschaften bis in die Mikrodimensionen, die bei Kleinbauteilen kritische zu bewerten sind. Weiterhin sind Diffusionseffekte zu berücksichtigen, Grobkornbildung, die zwangsläufig einhergehen wird, wird eine reduzierte Festigkeit zur Folge haben. Deshalb kamen im Projekt verschiedene, ausschließlich fertig legierter Pulver zum Einsatz.

## 3 Arbeitsprogramm, Methoden

### 3.1 Arbeitsprogramm

Zur Verifizierung der Entwicklungserfolge wurden zwei Bauteile ausgewählt, die bisher aus Kunststoff gefertigt werden. Beide Demonstratoren sind in Stahl zu applizieren, wobei zunächst der Fe-Basiswerkstoff den Bauteilanforderungen entsprechend festzulegen ist. Die Getriebeschnecke und der Planetenträger (siehe Abbildung 1) sollen künftig zwei unterschiedliche Anwendungen im Bereich Kleingetriebe bedienen (Junghans Feinwerktechnik bzw. Faulhaber). Der Werkzeugbau erfolgte zentral bei Junghans Feinwerktechnik, wobei die Formgebung der Demonstratoren sowohl bei Junghans als auch bei Schunk Sintermetalltechnik stattfand. Die Entbinderung, die Wärmebehandlung und die Herstellung der Prüfkörper erfolgten bei der Schunk Sintermetalltechnik.



**Abbildung 1:** Demonstratorbauteile Planetenträger (links) und Getriebeschnecke (rechts), beide aus Kunststoff: Stand Projektbeginn

Für Vorversuche mit Prüfkörpern wurden Feedstocks mit drei unterschiedliche Pulverfraktionen bzw. Pulverpartikelgrößenverteilungen des definierten Stahls getestet. Das größte Pulver war eine kommerziell erhältlicher Ware an feinem Inertgas verdüster Pulver, die mittlere Qualität entspricht einer Sondercharge eines Pulverherstellers, die feinste Pulverfraktion wurde am ZMU in Freiberg durch Sichten des Grobpulvers hergestellt.

Anhand zweier Feedstocksysteme wurden die MIM-Prozessparameter für Demonstratorbauteile entwickelt und angepasst. Die Feedstocks unterscheiden sich neben den Pulvern des Stahls 17-4PH mit drei verschiedenen Pulverpartikelgrößenverteilungen - im Binder. Neben dem Standardbindersystem, das Schunk Sintermetalltechnik in der Produktion feinerwerktechnischer Bauteile einsetzt, kam ein Binder des Forschungszentrum Karlsruhe zum Einsatz, der aus dem Gemisch von Licomont® der Fa. Clariant mit einem Thermoplasten besteht. Für Mikropräzisionsbauteile aus MIM ist ein entscheidender Punkt, dass die Homogenität des Feedstocks über die gesamte Fertigungscharge konstant gut eingestellt und während der Verarbeitung erhalten werden kann. Dies ist durch statistische Prozesskontrolle oder in der Betrachtung der erzielbaren geometrischen Toleranzbandbreiten der Bauteile erfassbar.

Die Handhabung der Bauteile, sowie die Lagerung während der Entbinderung und der Sinterung ist von großem Qualitätseinfluss. Unterschiedliche Bauteillagerungen, Hilfssegmente am Bauteil zur optimierten Formfüllung und Entbinderungsbedingungen wurden getestet.

Schließlich wurden zunächst anhand von Mustergeometrien die Formfüllung der Feedstocks in Abhängigkeit der Spritzbedingungen erfasst. Mittels rheologische Untersuchungen wurden die Eigenschaften der Feedstocks erarbeitet, in FEM-Modelle implementiert, damit Prozessfenster abgeschätzt und den Versuchsdaten gegenüberzustellen. Schließlich sollte der Test der Anwendbarkeit der Demonstratoren die Eig-

nung der Produktionstechnologie für Mikropräzisionsbauteile bestätigen.

## 3.2 Methoden

Die Methoden, die im Verlauf des Projekts Verwendung fanden, sind prinzipielle Standardmethoden. An dieser Stelle werden lediglich die wichtigsten aufgeführt, aber nicht erläutert:

- Messknetter: Feedstockentwicklung
- Doppelschneckenextruder: Feedstockherstellung
- Hochdruck-Kapillar-Rheometer: Viskosität,  $p, T$
- instrumentierte Versuchswerkzeuge:  $p, T$
- Software Moldflow: Füllsimulation Spritzgießen
- Sympatec Helos: Partikelanalyse (Laserbeugung)
- Pyknometer: Dichtebestimmung gesinteter Teile
- Schliffpräparation: Gefügeuntersuchung am LM
- 3-D-Meßmaschine: geometrische Vermessung
- Pertometer: Oberflächenrauheit

## 4 Ergebnisse

Die Anforderungen an die Bauteile zeigen eine Gewichtung auf Festigkeitsanforderungen, so dass der bedingt korrosionsbeständige, härtbare Edelstahl 17-4PH als Werkstoff für die Untersuchungen ausgewählt wurde (Abbildung 2).

Element	C	Cr	Ni	Cu	Nb	Mn	Si	Fe
Massen-%	0,04	16,00	4,25	3,30	0,27	0,28	0,60	Rest

**Abbildung 2:** Chemische Zusammensetzung des ferritische-martensitischen Stahls 17-4 PH

Typische Korngrößen, in denen der Werkstoff angeboten wird, sind ca.  $D_{95} < 35 \mu\text{m}$  oder  $D_{95} < 20 \mu\text{m}$ . Für Mikropräzisionsbauteile mit Toleranzen bis nahe dem Mikrometerbereich sind deutlich feinere Pulverpartikelgrößen wünschenswert.

Durch den Projektpartner FNE Freiberg (ZMU) konnten kommerziell erhältliche Pulver gesichtet werden, um zu feineren Fraktionen zu gelangen. Der Trennschnitt bei  $10 \mu\text{m}$  konnten sehr gut eingehalten werden. Die befürchtete Aufmagnetisierung des ferritischen Pulvers war bisher unkritisch. Weiterhin fanden Standardpulver in konventionellen Pulverskalengrößen Verwendung (mittel / grob). Abbildung 3 zeigt die Partikelgrößenverteilungen der drei verwendeten Pulver.

Im Rahmen der Untersuchungen waren die Abbildungsgenauigkeit, die erzielbaren Dichten, die Korngrößen in den gesinterten Gefügen sowie die Festigkeitsdaten der Bauteile aus den Pulvern mit unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen von Interesse.

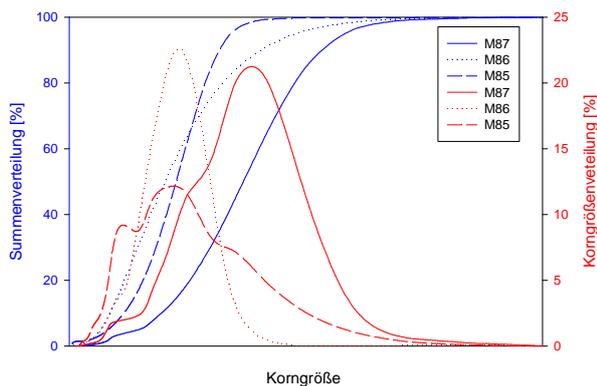


Abbildung 3: Korngrößenverteilung der untersuchten Pulver

Vor Fertigstellung der Formgebungswerkzeuge für die Demonstratoren erfolgten diese Untersuchungen an Zugstäben nach ISO 2740 bzw. an Prüfkörpern (Abbildung 4). Die Prüfkörper dienen als makroskopische Vorlage zur Ermittlung des Maßänderungsverhaltens, primär des Sinterschrumpfs der Bauteile, das die Grundlage zur Auslegung der Spritzgießwerkzeuge bildete, in dem ein entsprechender Maßvorhalt realisiert wurde.

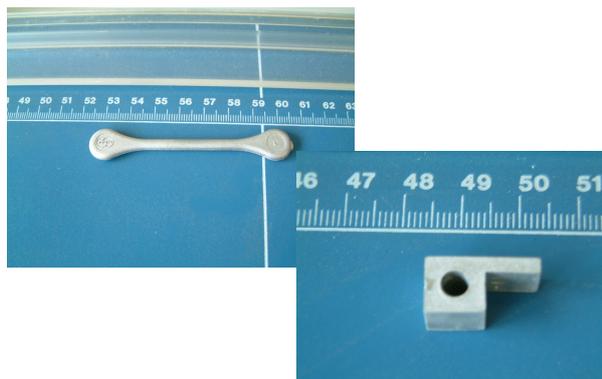


Abbildung 4: MIM-Prüfkörper, gesintert aus 17-4PH

Die in den Vorversuchen erzielten Dichten der drei Pulver ist beim feinsten Pulver, das die größte Sinteraktivität aufweist, etwas geringer als beim Pulver mit der mittleren Korngrößenverteilung. Nähere Untersuchungen zeigen, dass dies auf ungenügende Homogenität im eingesetzten Feedstock beim Feinstpulver zurückzuführen ist. Eine Optimierung im Bindergehalt bzw. der Feedstockaufbereitung hat den erwarteten Erfolg erbracht. Erzielbare Dichten liegen bei  $7,6 \text{ g/cm}^3$ , was einer Dichte größer 97 % der theoretischen Dichte des Werkstoffs entspricht.

Oberflächengüten, die an den makroskopischen Proben ermittelt wurden, zeigen für das feinste Pulver (M86) die besten Werte. REM-Aufnahmen der Bauteilkanten zeigen für dieses Pulver geringere Grobkornbildung und die Kantenverrundung durch die Versinterung ist unkritisch. Auffallend für das Standardpulver (M87  $D_{95} < 35 \mu\text{m}$ ) ist eine relativ rau erscheinende Oberfläche - einzelne grobe Pulverpartikel sind im REM noch auflösbar. Der Rauheitsmes-

sung über Pertometer sind diese Mikrorauheiten nicht mehr zugänglich. Dies muss bei der Bewertung von Laufversuchen mit berücksichtigt werden.

Ergebnisse aus den Zugversuchen an makroskopischen Proben (s. Abb. 4 links) zeigt Abbildung 5.

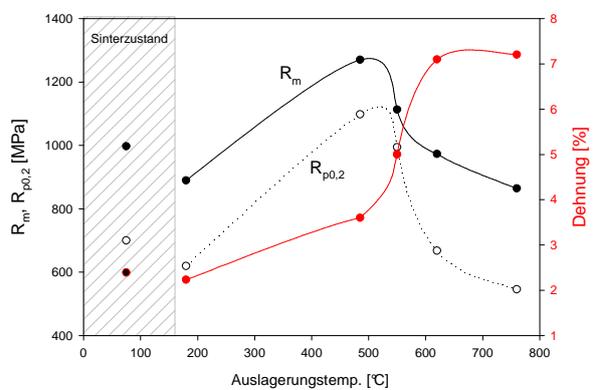
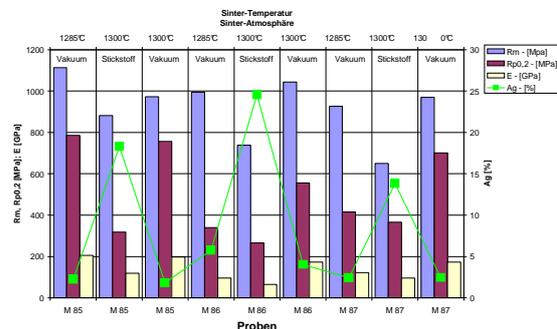
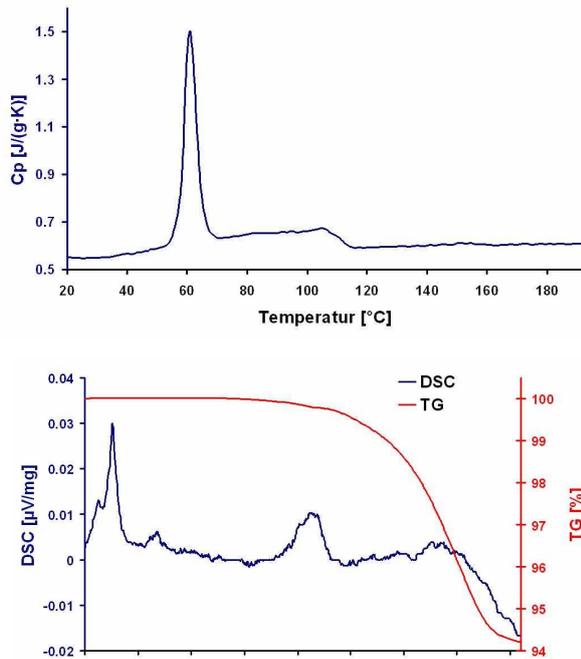


Abbildung 5: Ergebnisse der Zugversuche an makroskopischen Bauteilen: Zugfestigkeit  $R_m$ , Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , Elastizitätsmodul  $E$  und Bruchdehnung  $A$ : oben: Daten für gesinterte MIM-Zugproben aus den drei verschiedenen Stahlpulvern M85 bis M87; unten: Daten für Zugproben aus Pulver M 86 nach der Auslagerungshärtung

Aufbauend auf den ersten Ergebnissen mit den Prüfkörpern erfolgte die Festlegung auf M86 - also auf das feinste Pulver mit  $D_{95} < 10 \mu\text{m}$ . Nach Anpassung der Feedstockzusammensetzung hinsichtlich Pulverfüllgrad erfolgte eine zweite Regelschleife zur Absicherung des Schrumpfverhaltens für die Werkzeugauslegung der Getriebschnecke und des Planetenträgers.

Die Charakterisierung von zwei Feedstocks mit gleichem Pulver M86 und unterschiedlicher Binderzusammensetzung erfolgte am Forschungszentrum Karlsruhe mittels Wärmekapazitätsmessungen, Thermogravimetrie, Differentielle Kalorimetrie und Hochdruck- Kapillarviskosimeter. Beispielhaft sind die Ergebnisse einer  $c_p$ -Messung und einer kombinierten TG-DSC-Messung für je einen Feedstock in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Bestimmung der Wärmekapazität  $c_p$  des Binders des Forschungszentrums Karlsruhe (oben), und TG-DSC-Messergebnisse Schunk-Binder (unten)

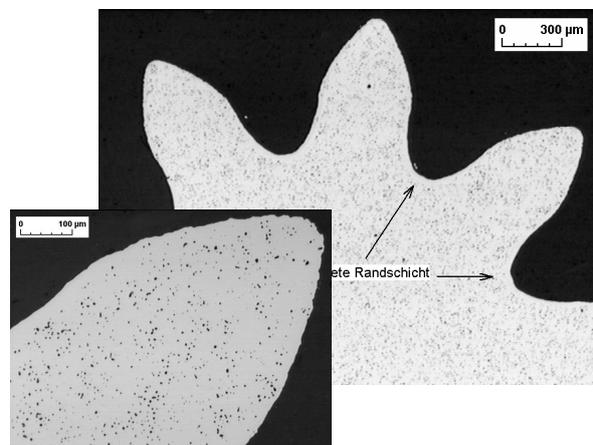
Mit diesen Daten sind Rechnungen zum Vergleich der Formfüllung von Prüfkörpern zwischen Experiment und Simulation mit dem Finite-Elemente-Methoden-Tool MOLDFLOW<sup>®</sup> durchgeführt worden. Die berechnete Formfüllung stimmt nur für einfache Geometrien und nur qualitativ mit dem Experiment überein. Bei komplexeren Geometrien wie Teilung der Fließfront oder Aufweitung des Bauteilquerschnittes entlang des Fließwegs ergeben sich nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ deutliche Unterschiede. Deshalb wurde auf die Simulation der Formfüllung für die dreidimensional geformten Demonstratorbauteile verzichtet.

Versuche zum Metallpulverspritzgießen der Demonstratorbauteile orientierten sich zunächst am Standardfertigungsablauf für feinwerktechnische Bauteile. Hinsichtlich der Formgebung für Mikropräzisionsbauteile sind beide verwendeten Binder- bzw. Feedstocksysteme geeignet. Durch den Aufbau und die Qualität der komplexen Werkzeuge ist die Abformung begünstigt, viel stärkerer Einfluss des Feedstocksystems wird auf die Entformbarkeit der Kleinbauteile ausgeübt. Die mechanische Feedstockfestigkeit, die die Entformbarkeit bestimmt, ist bei den Grünlingen aus dem Binder des Forschungszentrums Karlsruhe im Vergleich etwas höher. Die Entbinderung ist werkstofftechnisch unkritisch, hingegen zeigen sich Einbußen in den Bauteilfestigkeiten nach der Entbinderung. Die entbindernden Braunlinge sind sehr fragil, bei der Getriebeschnecke, dem Bauteil ohne sichere Standfläche, als sehr kritisch zu bezeichnen. Geeignete und zulässige Änderungen im Design der Getriebe-

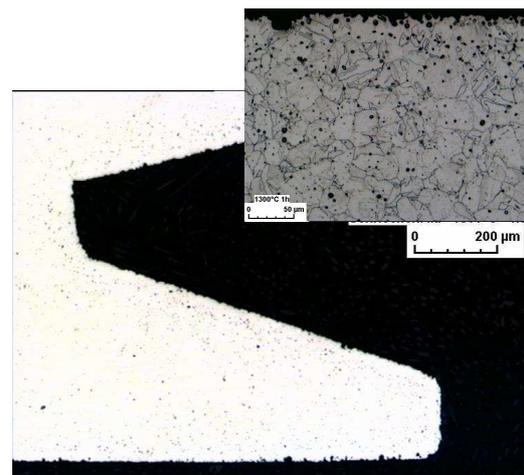
schnecke führten zu optimierter Handlingsfähigkeit. Für den Planetenträger sind sowohl die Bedingungen zum und für den Grünling als auch die Braunlingsfestigkeiten als problemlos zu bezeichnen.

Die Sinterbedingungen für die Demonstratorbauteile sind analog den Vorversuchen an den Prüfkörpern gewählt worden, um das Maßverhalten einzuhalten. Die Sinterungen erfolgten in einem Chargenofen unter Vakuumatmosphäre.

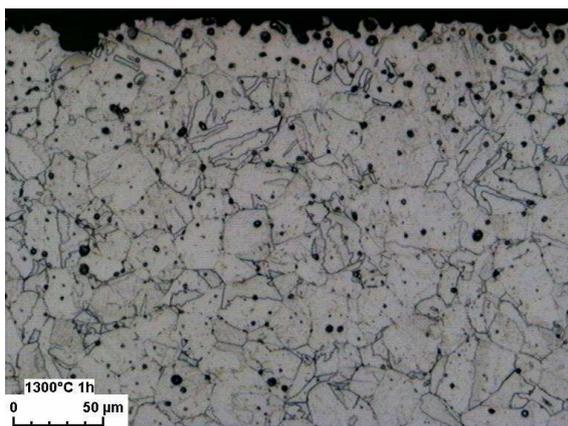
Die Abbildungsgenauigkeit der gesinterten Bauteile ist zunächst innerhalb der Verzahnungen von speziellem Interesse. Sie bestimmt im Zusammenwirken mit der Oberflächentopographie die Laufeigenschaften der Bauteile maßgeblich. Härtemessungen und Gefügeuntersuchungen sind zusätzliche weitere Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen (Abbildung 7 bis Abbildung 9)



**Abbildung 7:** Querschliff durch die Stirnverzahnung des Planetenträgers aus Stahl 17-4PH, gesintert aus Pulver M86



**Abbildung 8:** Querschliff durch die Getriebeschnecke aus Stahl 17-4PH, gesintert aus Pulver M86



**Abbildung 9:** Randzonengefüge der Getriebeschnecke nach Standardsinterung aus dem Pulver M86

Messungen der Toleranzbandbreiten, die mittels dem beschriebenen Metallpulverspritzgießen und den entwickelten Feedstocks erzielt wurden, sind äußerst viel versprechend. Die Verwendung von feineren Pulvern führte zu sehr engen Toleranzbandbreiten, die in Bereichen von 0,5 % der linearen Bauteilabmessungen liegen. Das Ziel der Optimierung der Maßstabilität ist dementsprechend erfüllt, wenn auch mit höheren Rohstoffkosten. Die Demonstratoren konnten ohne Nacharbeit der Bauteilflächen zum Funktionstest gegeben werden (Abbildung ).



**Abbildung 10:** Gesinterte Demonstrator-Bauteile aus korrosionsbeständigem und härtbarem Stahl 17-4PH: vorn Getriebeschnecke, dahinter Planetenträger.

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Die Pulverauswahl kann nach der Bewertung von Verarbeitbarkeit, Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Abbildungsgenauigkeit etc. als richtig bezeichnet werden. Parallele Untersuchungen an den Demonstratorbauteilen mit gröberen Pulvern zeigen eindeutig beim Einsatz von Feedstocks mit feinskaligen Pulvern eine optimierte Oberflächenrauigkeit, bessere Formtreue und spezifikationsgerechte Toleranzbandbreiten. Die Erarbeitung der Materialdaten ist an einem der zwei Feedstocksysteme abgeschlossen. Das zweite Feedstocksystem ist wegen der geringen Viskosität bei Verarbeitungstemperatur einer Messung der rheologischen Eigenschaften im Bereich von Scherraten, die für das Pulverspritzgießen relevant sind (über

1000 1/s) und damit einer Implementierung in FEM-Modelle schwer zugänglich.

Die Anpassung des Maßvorhalts des Grünlings an das Bauteilmaß des Fertigteils muss zwingend an identischen Pulvern (die selbe Partikelgrößenverteilungen) erfolgen. Lediglich denselben Werkstoff, ggf. in anderer Partikelgrößenverteilung zu nutzen, führt erwartungsgemäß zu falscher Werkzeugauslegung. Denn teilweise ist ein Anpassen der Bindermenge an die feineren Pulver notwendig, um das Fließverhalten des Feedstocks prozesssicher zu gewährleisten. Damit einhergehend sind Schrumpfmaßänderungen gegeben. Die Abbildungsgenauigkeit des Feedstocks mit dem feineren Pulver ist hinsichtlich der geometrischen Vorgaben besser als erwartet. Jedoch sind kleinere Lunker im Gefüge offensichtlich. Um diese zu vermeiden ist eine gesonderte Feedstockaufarbeitung oder -nachbehandlung erforderlich.

Kritisch bis heute ist die Handhabung der Grünlinge und Braunlinge für den Anspruch nachbearbeitungsarmer Präzisionsbauteile. Vornehmlich die Getriebeschnecke erfordert ein sensibles Handling. Stellflächen sind dort nicht ausgebildet, eine Lagerung im Pulverbett ist infolge der Qualitätsanforderungen an die Schneckengeometrie und den Oberfläche nicht möglich. Als Lösung dient ein Hilfssegment am Bauteilschaft, welches aus Feedstock mit dem Grünling spritzgegossen wird und zu einer sicheren Standfläche verhilft (Abbildung 11). Eine Lagerung am Hilfssegment kann stehend oder hängend erfolgen. Das Hilfssegment kann nach der Sinterung infolge der Verjüngung (Sollbruchstelle zu Getriebeschnecke) leicht entfernt werden. Somit ist auch hier das Ziel einer nachbearbeitungsarmen Fertigung durch MIM erreicht.



**Abbildung 11:** Grünteile der Getriebeschnecke mit Hilfssegment (oben) für optimierte Handhabung der Mikroteile insbesondere vor und während dem Entbindern und Sintern.

Erste Anwendungstests sind bisher sowohl am Planetenträger als auch an der Getriebeschnecke erfolgt. Der Planetenträger wurde ohne Nacharbeit direkt nach dem Sintern in Testgetriebe verbaut. Die Ergebnisse sind hinsichtlich der übertragbaren Lasten viel versprechend. Bei der Getriebeschnecke ist ein erhöhter Verschleiß am Partnerbauteil aus Kunststoff auffällig. Hier muss gesondert die Oberflächenbeschaffenheit beider paarender Bauteile verbessert werden.

## 6 Zusammenfassung

Das Metallpulverspritzgießen von nachbearbeitungsarmen Präzisionsbauteilen aus dem Stahl 17-4PH mit Toleranzen bis nahe an den Mikrometerbereich erfordert aus der Sicht konventioneller Bauteilgrößen eine gesonderte Pulverauswahl hinsichtlich der Pulverpartikelgröße, daran angepasste Feedstockzusammensetzung und Prozessparameter. Die Abbildungsgenauigkeit wird verbessert, je feiner die zu verarbeitenden Pulver sind. Der Pulvergehalt und die Zusammensetzung des Feedstocks muss in den rheologischen und mechanischen Eigenschaften an die spritzzugießende Geometrie angepasst werden. Der Feedstockansatz muss noch mehr, als dies bei konventionellen Feedstocks der Fall ist, eine sehr gute Basishomogenität aufweisen. Nur dadurch können primäre Lunken, die in Mikrodimensionen deutlicher in ihren Auswirkungen auffallen, infolge von Inhomogenitäten im Bauteil vermieden werden.

Die Toleranzbandbreite von Mikropräzisionsbauteilen kann durch geeignete Rohstoffauswahl und angepasste Fertigungsbedingungen auf ca. 0,5 % des Nennmaßes eingestellt werden. Bisher liegen die bei konventionellen Bauteilen üblichen Werte bei ca. 1 %.

Die Oberflächenqualitäten sind bei der Verwendung von Feinpulvern auch in der Praxis (Theorie entspricht dem allgemein bekannten Kugelmodell) besser als bei Standardpulvern. Jedoch erscheint für spezielle Anwendungen die Oberfläche immer noch zu rau bzw. die erzielte Oberflächenhärte zu hoch. Bezug wird hierbei auf den Kontakt Stahl-Kunststoff genommen, weshalb besser beide Partner einer Verzahnungspaarung in der Diskussion um einen geeigneten Werkstoff berücksichtigt werden sollten.

Mittels angepassten Hilfselementen sind auch komplexe Präzisionsbauteile ohne eine bauteilspezifische Standfläche ausreichend gut handhabbar.

Schließlich bleibt auch am Ende dieses Projekts festzustellen, dass die MIM-Technologie immer noch Forschungsbedarf hinsichtlich brauchbarer Ansätze hat, die Qualität der Feedstocks zu beschreiben bzw. deren Verarbeitbarkeit und die erreichbare Bauteilqualität anhand von Feedstockeigenschaften vorherzusagen. Schließlich sind Simulationstools zur Auslegung von Spritzwerkzeugen und Bestimmung von Prozessfenstern immer noch nicht ausreichend für das Pulverspritzgießen entwickelt.

## 7 Danksagung

Die Ergebnisse resultieren aus dem geförderten Projekt „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall: Micro-P-PIM“, Förderkennzeichen 02PD2136, wofür wir dem BMBF und dem Projektträger PTKA für die Unterstützung im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ danken.

## 8 Literatur

- [1] Bauer, W.; Hausselt, J.; Merz, L.; Müller, M.; Örlýgsson, G.; Rath, S.: Microceramic injection molding. Microengineering; *in*: Metals and Ceramics Part I: Design, Tooling and Injection Molding Weinheim [u.a.] : Wiley-VCH, **2005** S.325-356 (Advanced Micro and Nanosystems ; Vol.3) ISBN 3-527-31208-0
- [2] Ruprecht, R.; Merz, L.; Örlýgsson, G.; Piotter, V.; Rath, S.; Hausselt, J.: Powder injection molding for production of micro parts; *in*: Weck, M. [Hrsg.] Euspen Internat.Topical Conf. on Precision Engineering, Micro Technology and Measurement Techniques and Equipment, Aachen, May 19-20, **2003** Voerde : Rhiem, 2003 S.371-374, ISBN 3-926832-30-4
- [3] Maetzig, M.; Walcher, H.; Pannhorst, J.; Grieb, W.: Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik für das Pulverspritzgießen von Präzisionsbauteile; (dieser Bericht).





**Micro-P-PIM**



**Metallpulver-Spritzgießen  
von Präzisionsbauteilen für Getriebe**

**Frank Baumgärtner, Schunk Sintermetalltechnik GmbH,  
J. Pannhorst, JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG,  
R. Ruprecht, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,  
Christian Thürigen, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG,  
Alexander Paul, ZMU, FNE Freiberg**



**Micro-P-PIM**



**Motivation**

1990



- Dreidimensionale Formgebung unter wirtschaftlichem Materialeinsatz
- Massenfertigungsverfahren

## Micro-P-PIM



## Status zum Projektstart

- Getriebebauteile aus Kunststoff
- Standardpulverkörnungen für typische Serienteile:
  - < 10 µm für einfache Legierungssysteme
  - < 22...35 µm für hochlegierte Werkstoffe
- wenige Anbieter für hochlegierte Stahlpulver < 10µm - jedoch mit extreme Kostensteigerung für Bauteilfertiger
- Suche nach Pulver mit geringer mittlerer Pulverpartikelverteilung zu angemessenen Kosten
- vorhandene Binder/Feedstocks prozessfähig? -> ggf. Anpassung vornehmen (Toleranz / Präzision / Oberflächenqualität / Nacharbeit)
- Werkzeugbau: Toleranzen

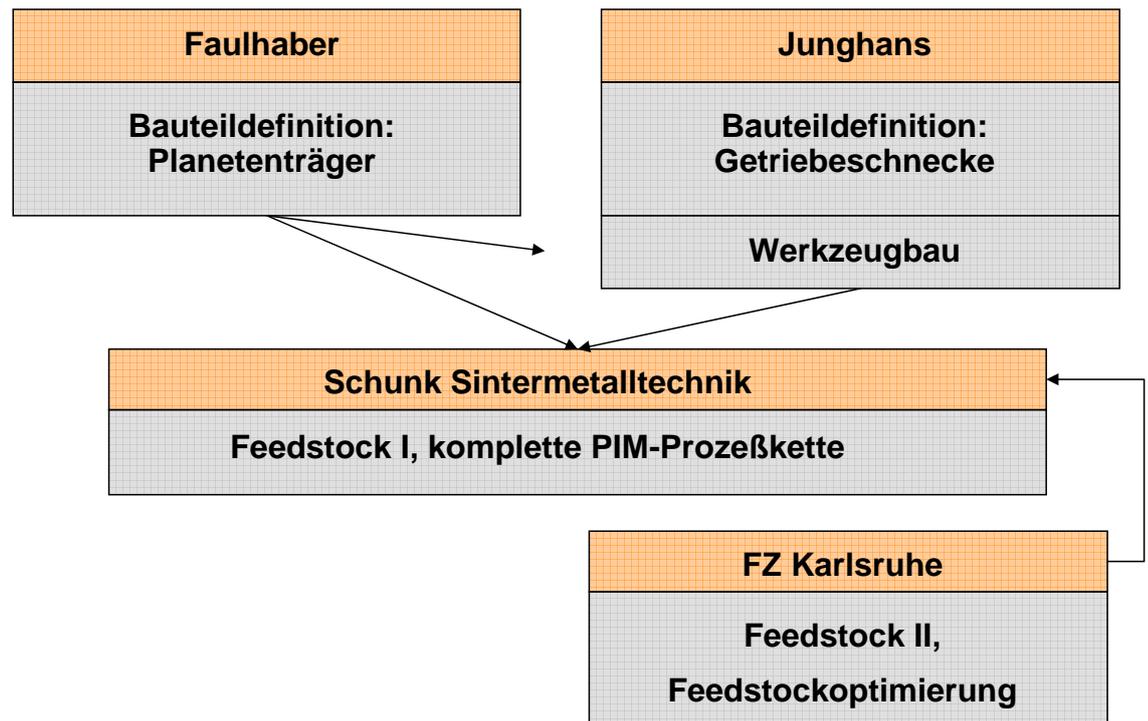
## Micro-P-PIM



## Projektziele

- PIM für hochbeanspruchte Getriebeteile aus
- hochlegierten Stählen (korrosionsbeständig, härtbar) für Mikropräzisionsbauteile.
- Toleranzen im Sinterschrumpf kleiner 1%
- nachbearbeitungsarme PIM-Prozeßtechnik

## Struktur der Arbeitsgruppe



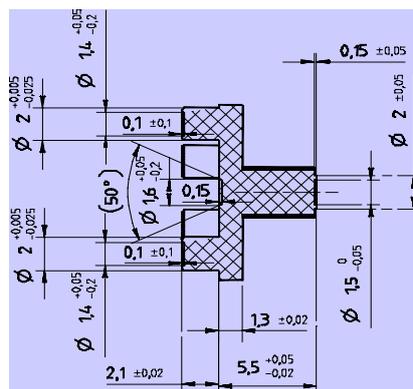
### Micro-P-PIM



### Micro-P-PIM



## Getriebekomponente - Planetenträger



Anforderungen an den Planetenträger für Mikromotoren:

Temperaturbereich: - 30°C bis + 85°C

Drehzahlbereich: bis 2500 Upm

Momentübertragung: max. 150 mNm

minimale Toleranz: +/- 15µm

# Getriebekomponente - Getriebeschnecke

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Projekträger  
Forschungszentrum  
Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

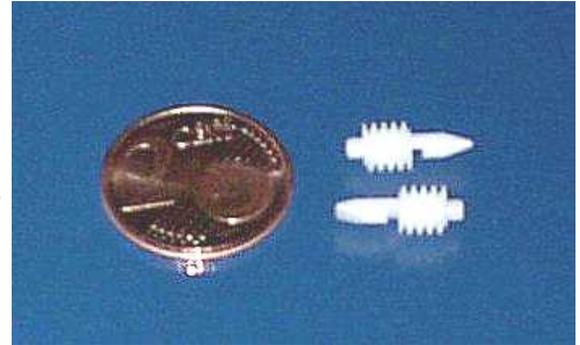
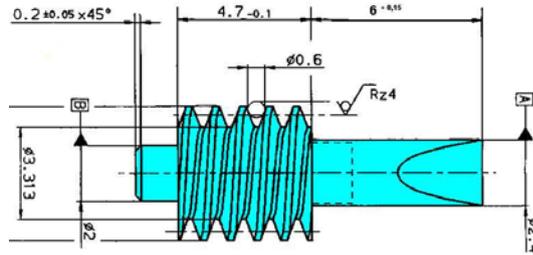
**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**



Anforderungen an die Getriebeschnecke für einen Flügelradgenerator:

Funktionsbereich: - 46°C bis + 71°C

Drehzahlbereich: 10.000 bis 25.000 Upm

dyn. Auslegung: bis MACH 1.1

minimale Toleranz: +/- 10 µm

# Werkstoff- (Pulver-) auswahl

Anwendungsgerechte Werkstoffauswahl:

- Festigkeitsanforderung, Härte
- bedingte Korrosionsbeständigkeit
- kostengünstiger Rohstoff



**AISI 17-4PH / X5 CrNiCuNb 16 4 (~ 1.4542)**

Element	C	Cr	Ni	Cu	Nb	Mn	Si	Fe
Massen-%	0,04	16,00	4,25	3,30	0,27	0,28	0,60	Rest

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**

# Makroskopische Werkstoffeigenschaften

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

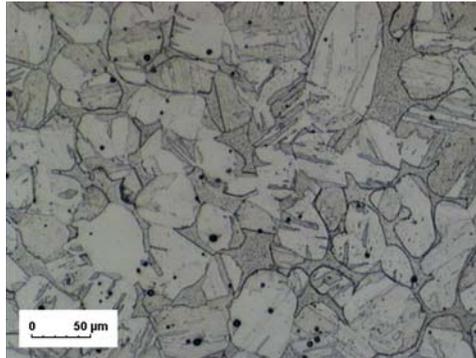
## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

**Werkstoff:** 17-4PH (MECO-20)  
 (X5CrNiCuNb16,4)

**Sinterdichte:** 7,63 g/cm<sup>3</sup>  
**Werkstoffzustand:** gesintert

**Gefüge:**



MECO-20

**Typische Eigenschaften:**

**Oberflächenhärte:** 300 HV30

**Zugfestigkeit ( $R_m$ ):** 1000 MPa

**Dehngrenze ( $R_{p0,2}$ ):** 640 MPa

**Elastizitätsmodul (E):** 195 GPa

**Bruchdehnung ( $A_g$ ):** 2 %

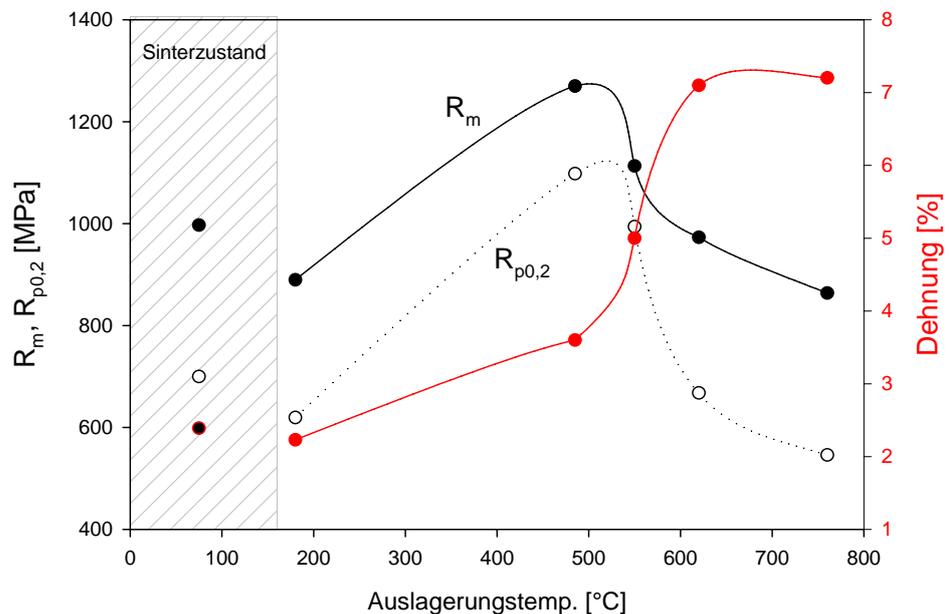
**Gefügekorngröße:** 50-150µm

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

# Makroskopische Werkstoffeigenschaften

Festigkeit durch Auslagerung nach dem Sintern



Werte wurden an MIM-Normzugproben nach MPIF Standard 50 ermittelt

## Kriterien für die Pulverauswahl

### Ziel Pulvervorauswahl:

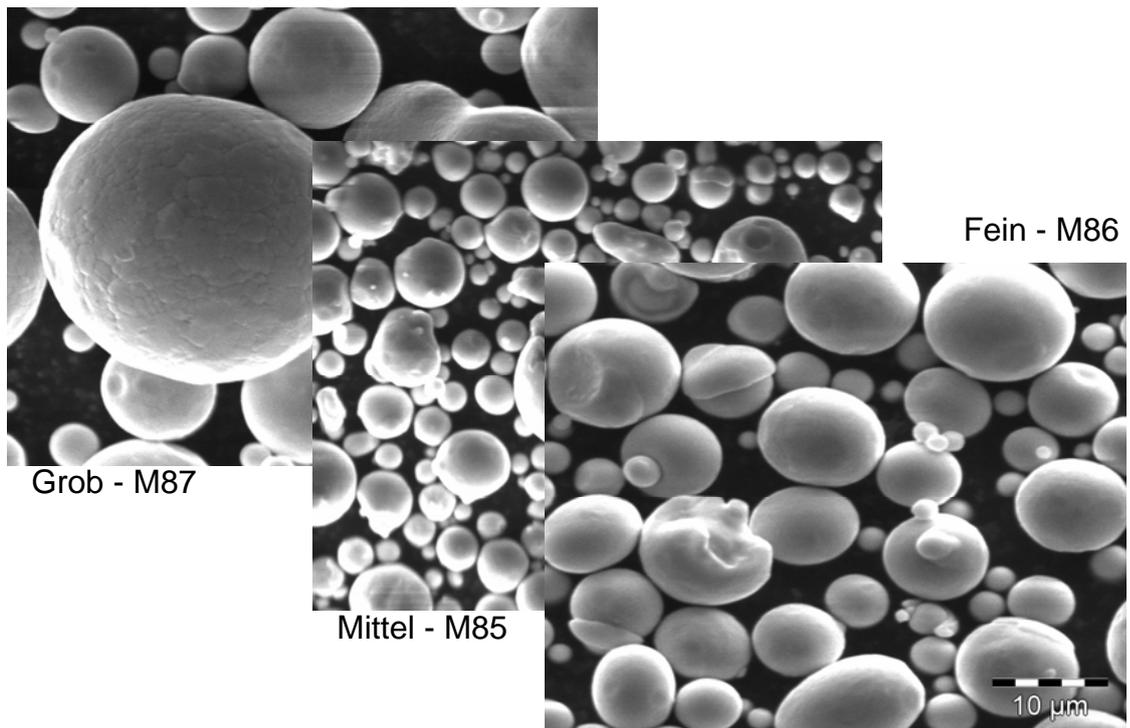
- Bewertung der Verarbeitbarkeit
- Verfügbarkeit
- Kosten
- Gefügeausbildung
- Toleranzen / Kantenschärfe
- Oberflächenausbildung



Pulvervariante 1: grob (Standard-Meco20)	M87
Pulvervariante 2: mittel	M85
Pulvervariante 3: fein	M86

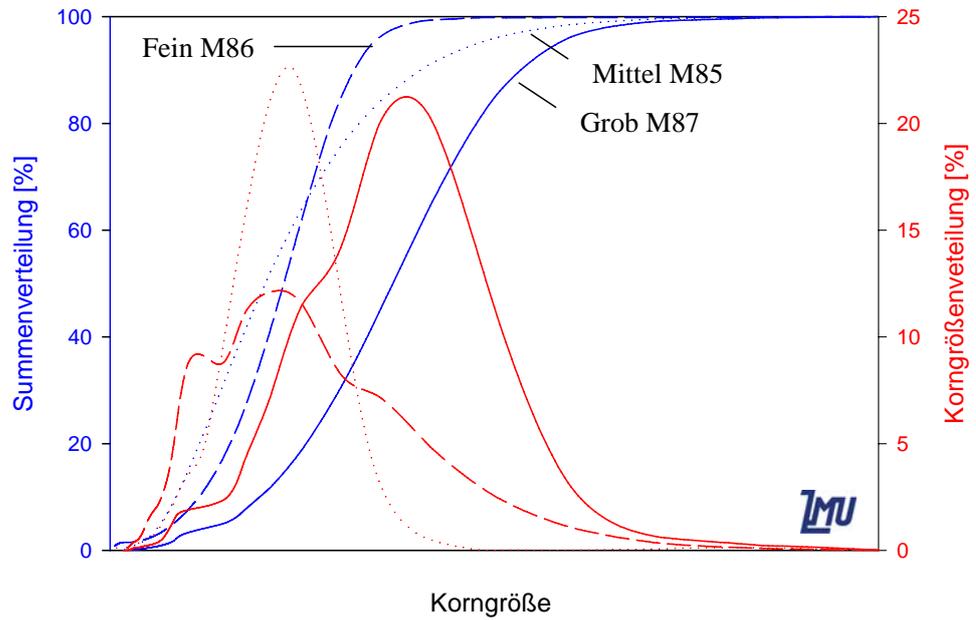
### Micro-P-PIM

## Pulvervarianten 17-4 PH



### Micro-P-PIM

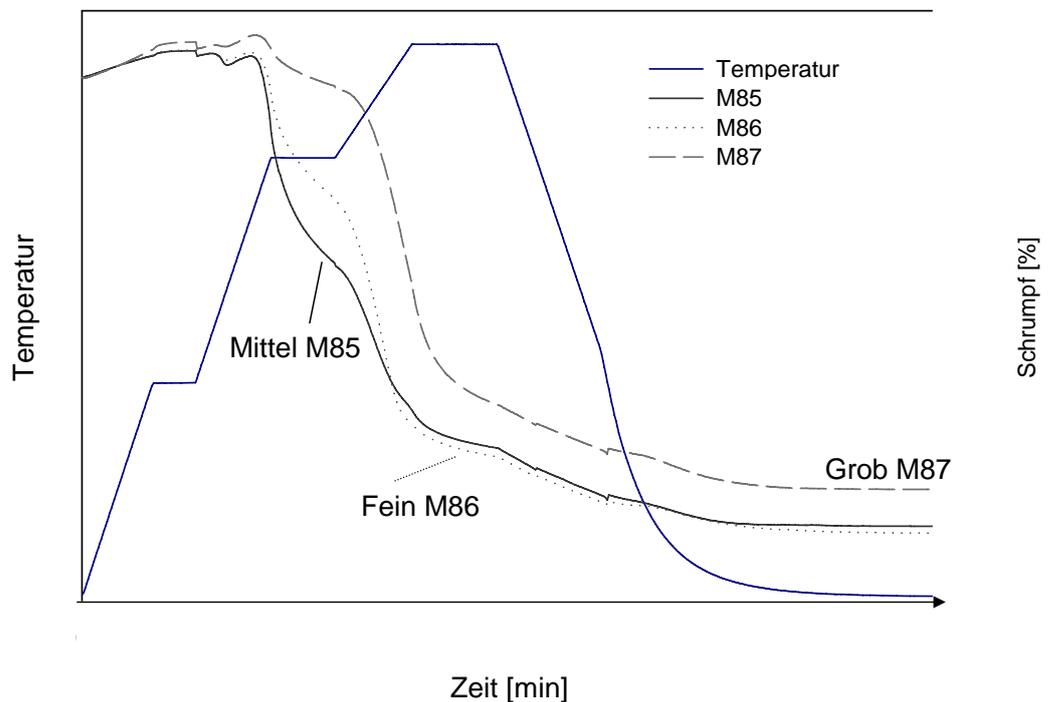
# Partikelgrößenverteilung



## Micro-P-PIM

\*JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

# Ermittlung des Sinterschrumpfes Dilatometermessungen



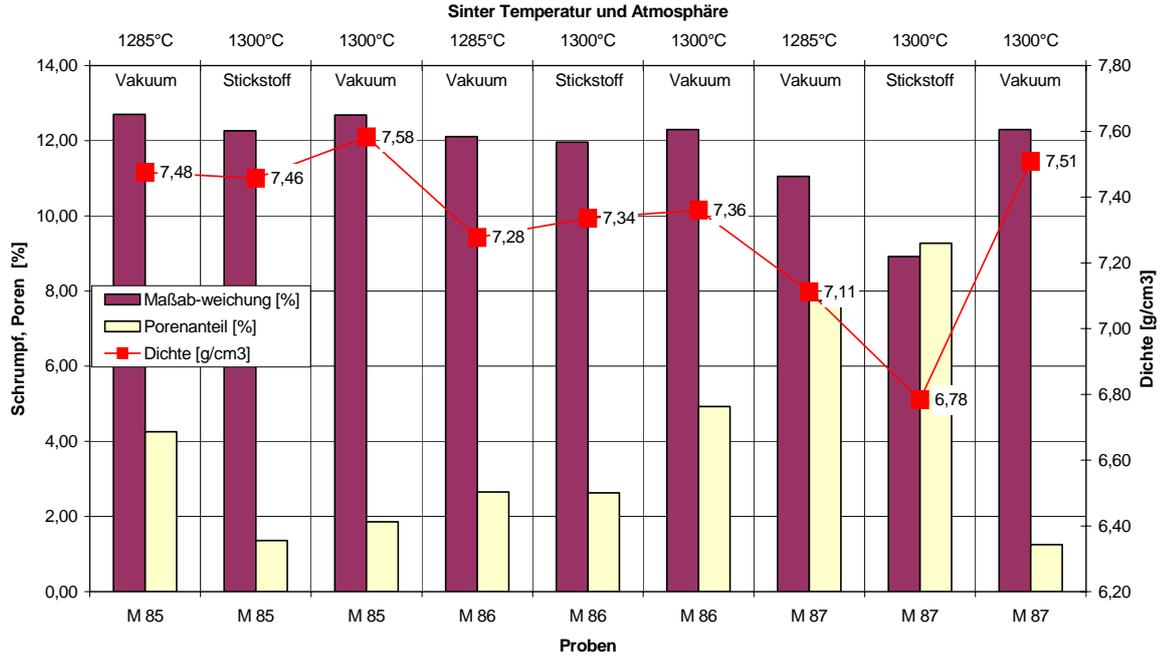
## Micro-P-PIM

\*JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

# Dichte, Maßverhalten

## Micro-P-PIM

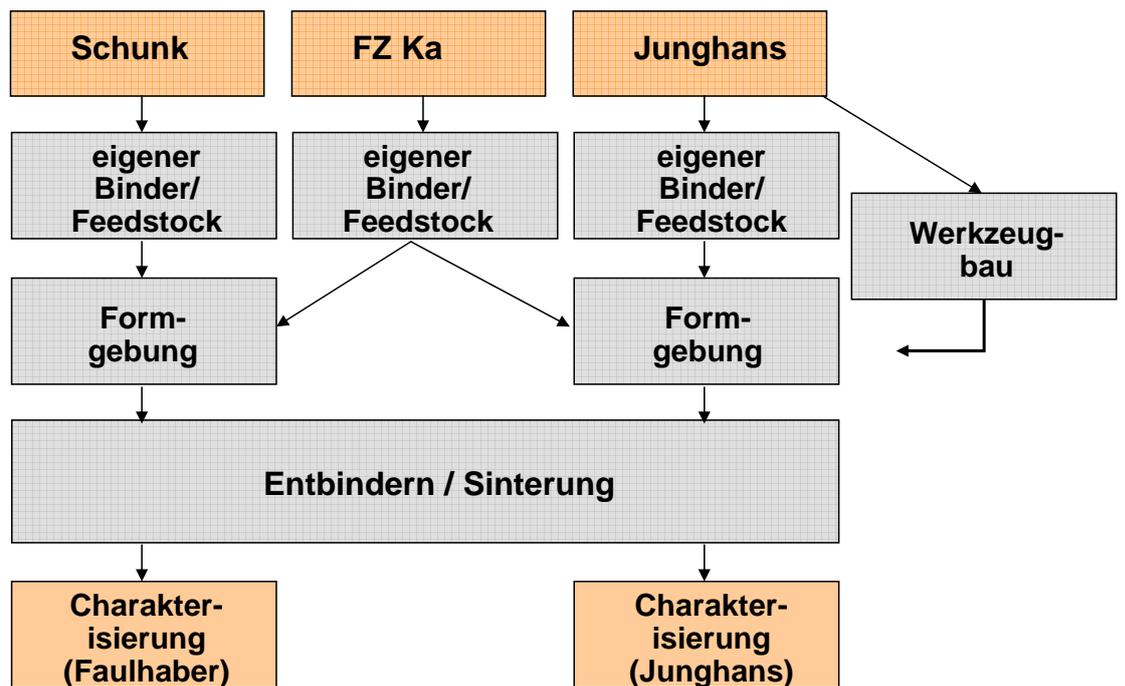
**JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
**F**  
**FRIATEC**  
**ADC**  
 KRONE



## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
**F**  
**FRIATEC**  
**ADC**  
 KRONE

# Bauteilfertigung



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Projektträger  
Forschungszentrum  
Karlsruhe (PTKA)

## Spritzgießwerkzeug Getriebeschnecke

### Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Projektträger  
Forschungszentrum  
Karlsruhe (PTKA)

## Spritzgießwerkzeug Planetenträger

### Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**



Auswerferseite

Düsenseite

# Füllverhalten beim Pulverspritzgießen von Planetenträgern

## Micro-P-PIM



# Grünteile Planetenträger

## Micro-P-PIM



M86  
(fein)



M87  
(grob)



## Teilentbinderte Bauteile

### Micro-P-PIM

JUNGHANS  
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

ADC

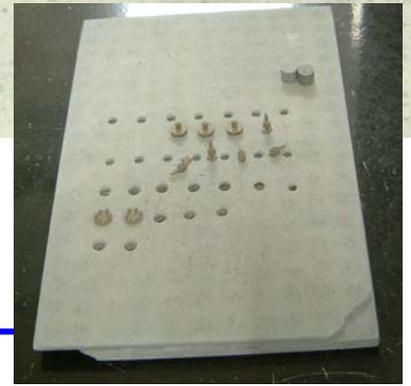
KRONE

schunk

LMU



M86 Q48 Pr2 teilentbindert



## Entbinderung Grünteile Planetenträger

### Micro-P-PIM

JUNGHANS  
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

ADC

KRONE

schunk

LMU



Feedstock M92 (fein)  
bei Standardentbinderung



Blasen

## Effekte beim Sintern

### Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**



Teilentbindert: Q82 Pr2  
vollständig entbindert: Q60 Pr1  
M86 Q41 Pr12 1300°C

## Gesintere Bauteile

### Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**  
KRONE

**schunk**

**LMU**

Vorentwachst: Q82 Pr2  
Fertigentwachst: Q60 Pr1  
M86 Q41 Pr12 1140°C



PIM mit feinem Stahlpulver ermöglicht das Sintern bei geringerer Temperatur

## Gesinterte Bauteile

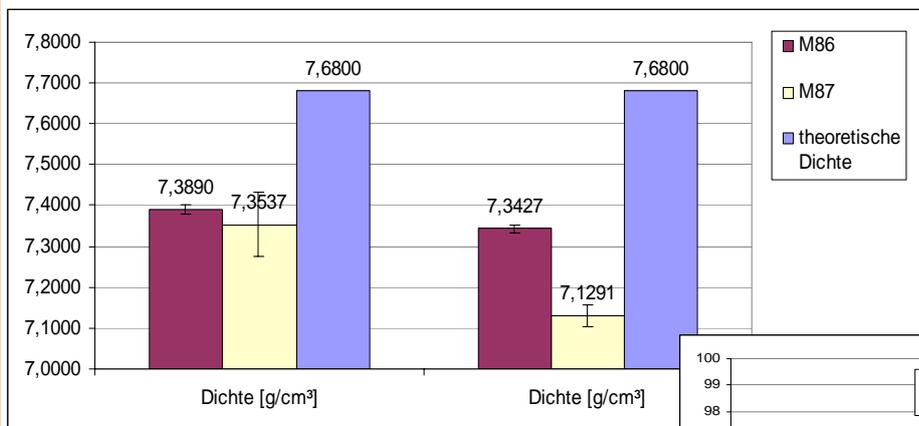
Zur Handhabung während des Entbinderungs- und Sinterprozesses besitzt die Getriebeschnecke einen „Standfuß“, der nach dem Sintern abgetrennt wird



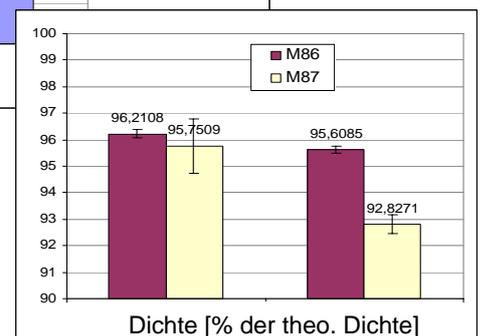
- Schliff
- Grünling
- Sinterteil
- Fertigteil

### Micro-P-PIM

## Planetenträger Dichte



=> theoretische Dichte: 7,68 g/cm<sup>3</sup>



PIM mit feinem Stahlpulver ergibt hohe Bauteildichte

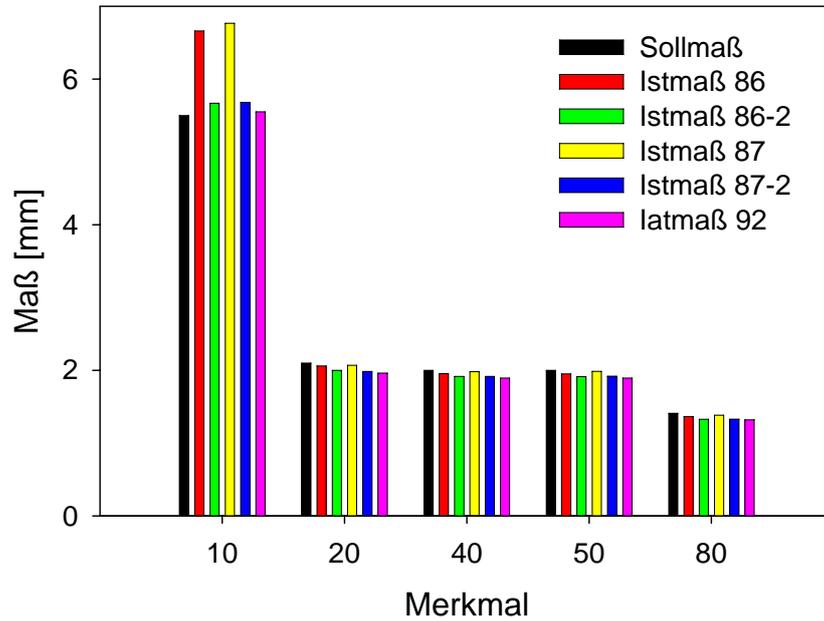
### Micro-P-PIM

# Planetenträger Maße, Toleranzen

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

Mittelwertdarstellung

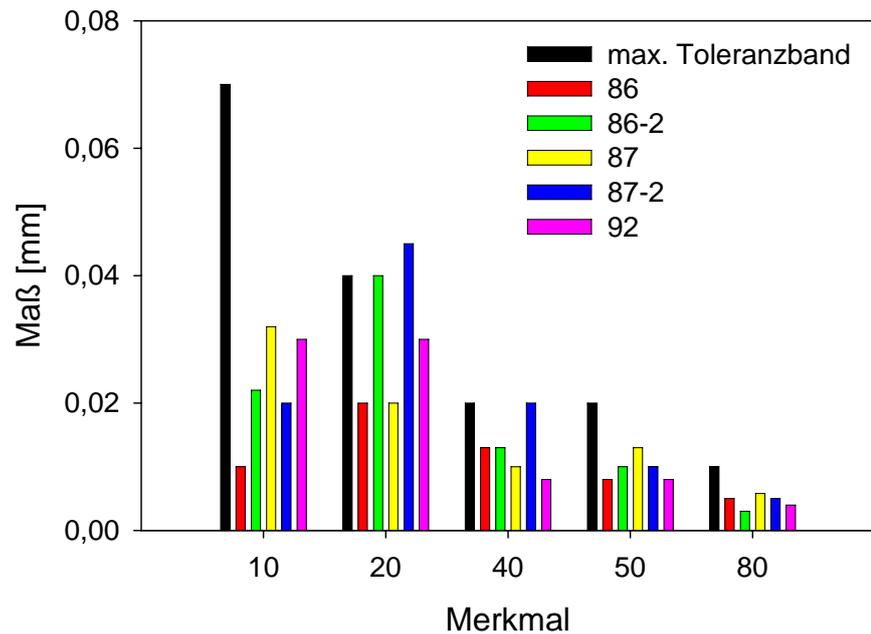


# Planetenträger Maße, Toleranzen

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

Darstellung Toleranzbandbreite



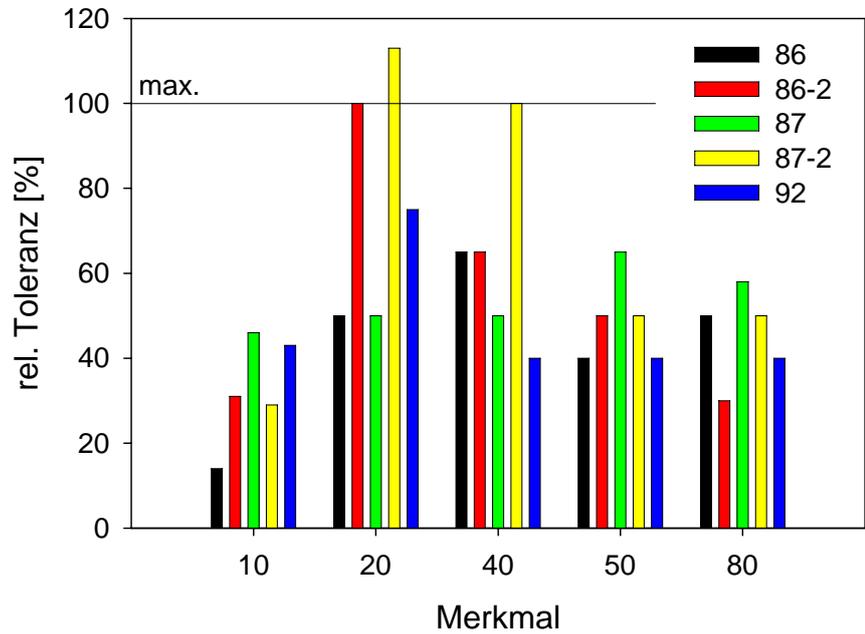
PIM mit feinem Pulver ermöglicht kleine Toleranzbandbreiten

# Planetenträger Maße, Toleranzen

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

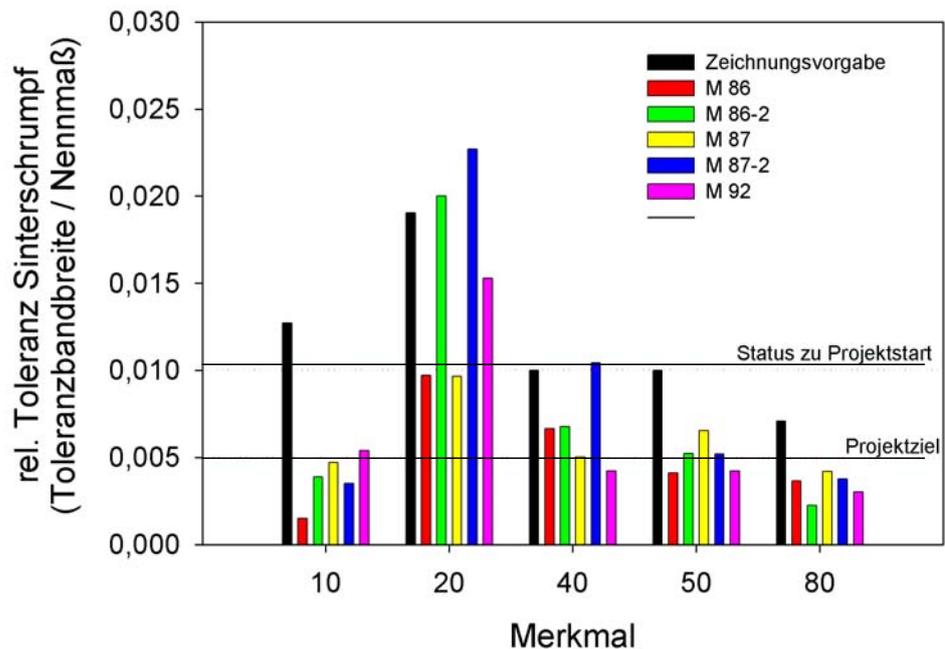
Darstellung Toleranzbandbreite



## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

# Planetenträger Maße, Toleranzen



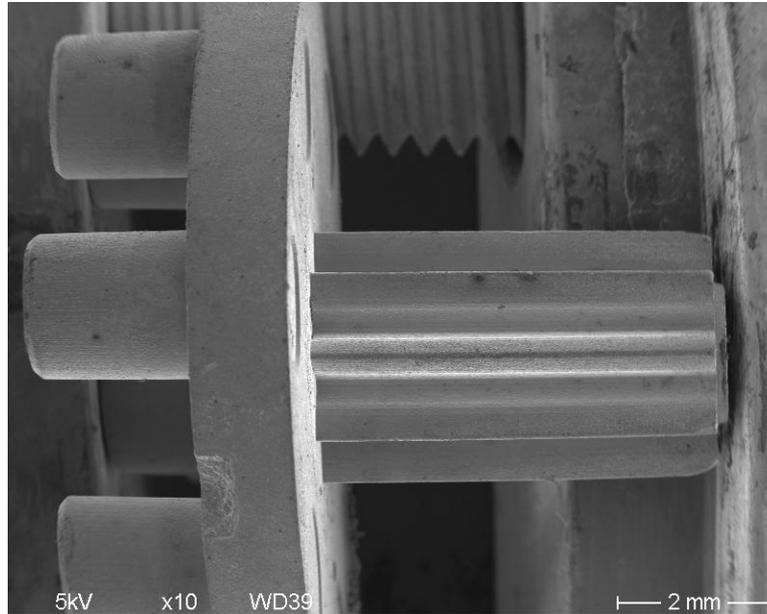
PIM mit feinem Pulver ermöglicht kleine Toleranzbandbreiten

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium  
 für Bildung  
 und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

# Bauteil Planetenträger

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

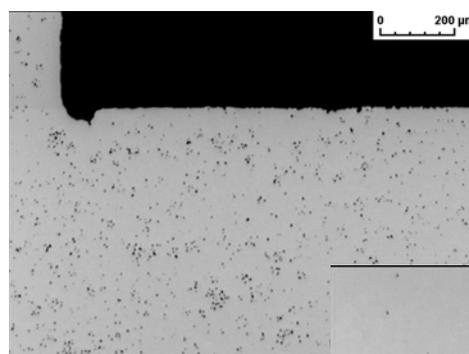


# Planetenträger Porosität, Rauheit, Abbildungstreue

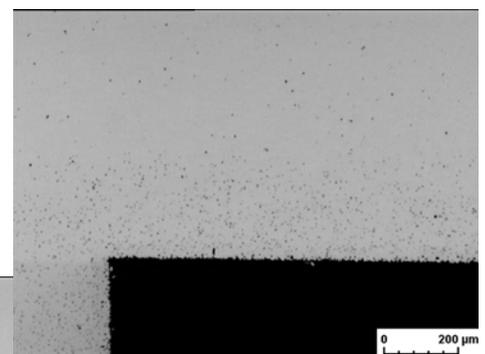
GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium  
 für Bildung  
 und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

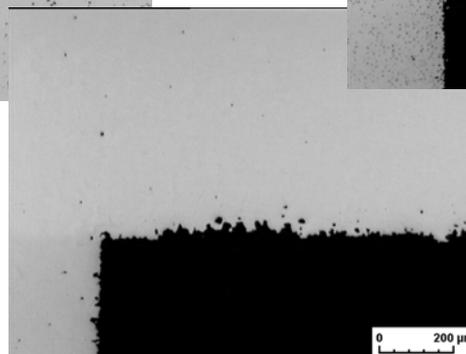
JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU



M86  
 7,63 g/cm<sup>3</sup>



M92-Feedstock  
 7,66 g/cm<sup>3</sup>



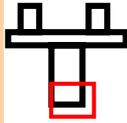
M87  
 7,70 g/cm<sup>3</sup>

# Porosität, Rauheit, Abbildungstreue

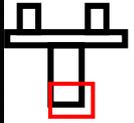
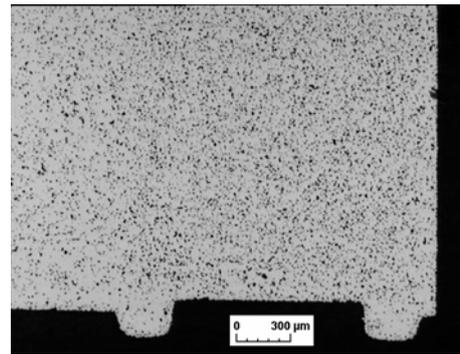
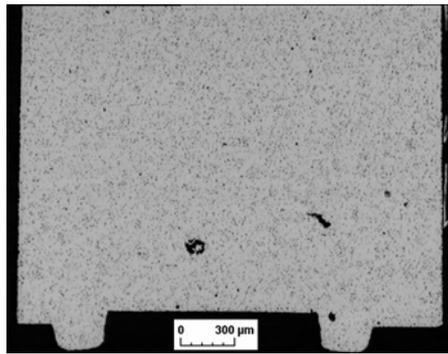
GEFÖRDERT VOM  
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung  
Projektträger  
Forschungszentrum  
Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

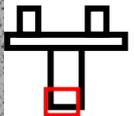
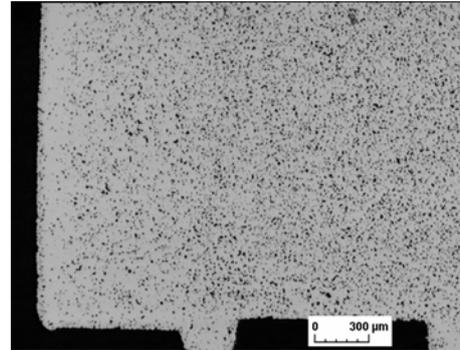
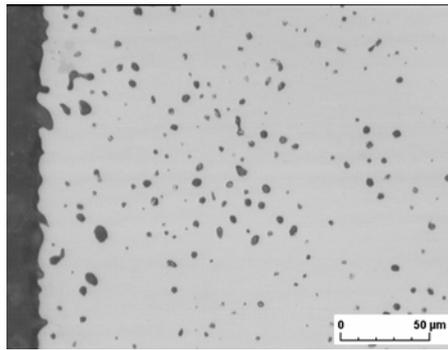
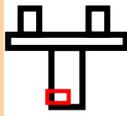
JUNGHANS  
Feinwerktechnik  
ARBURG  
F  
FRIATEC  
ADC  
KRONE  
schunk  
LMU



M86  
fein

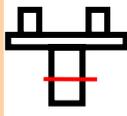


M87  
grob

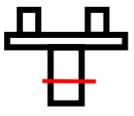
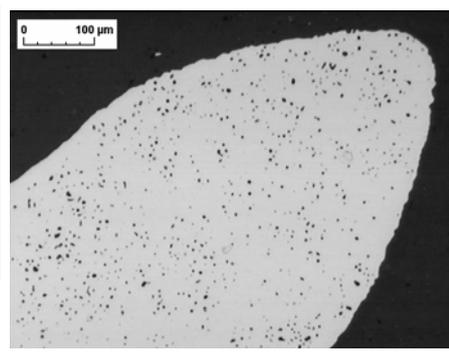
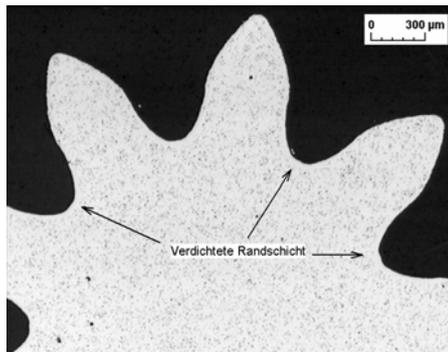


## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
Feinwerktechnik  
ARBURG  
F  
FRIATEC  
ADC  
KRONE  
schunk  
LMU



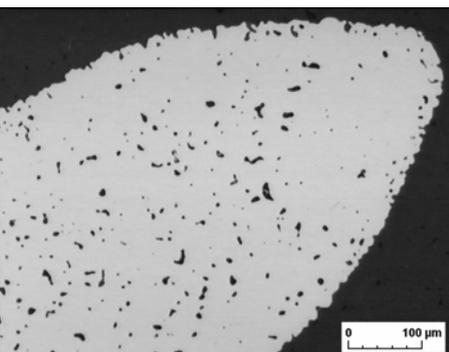
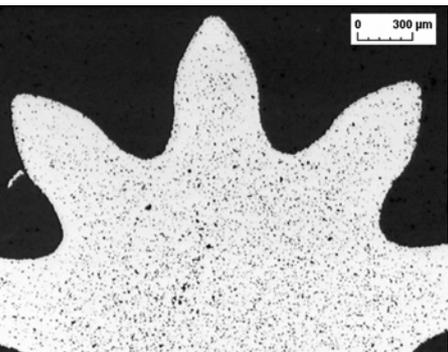
M86



M86



M87



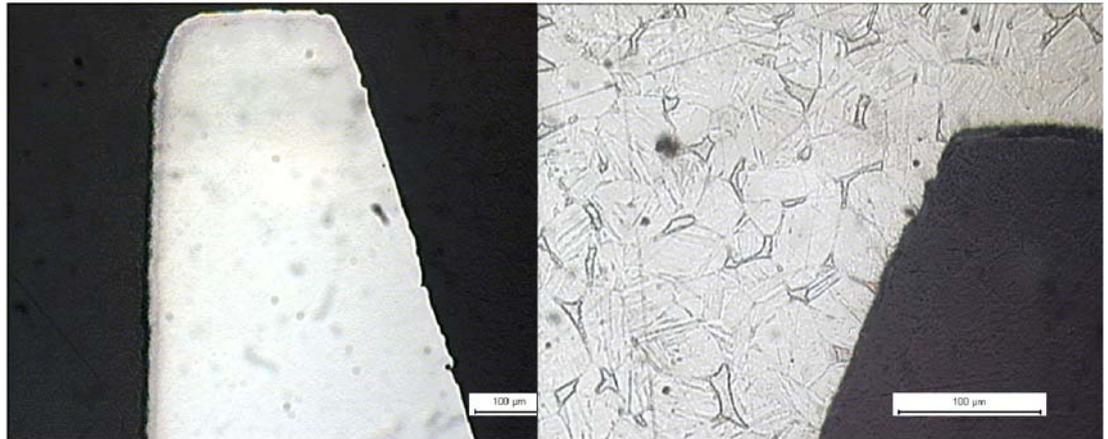
M87

# Porosität, Rauheit, Abbildungstreue

GEFÖRDELT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
  
  
  
 KRONE



17-4 PH Rand 100x

17-4 PH Rand, geätzt 200x

### Getriebeschnecke

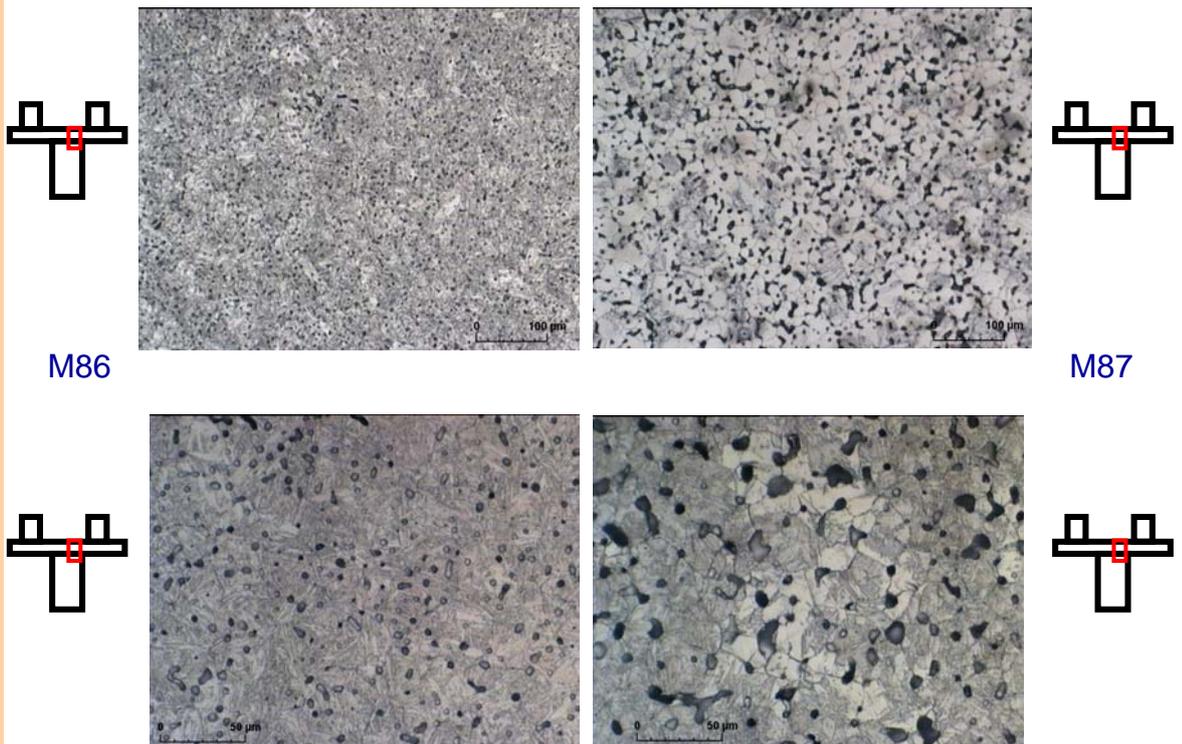
Schiffe aller Werkstücke aus 17-4 PH zeigen eine ausreichende Dichte und glatte Oberflächen im Flanken- bzw. Verzahnungsbereich

# Martensitisches Gefüge

GEFÖRDELT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik  
**ARBURG**  
  
  
  
 KRONE



M86

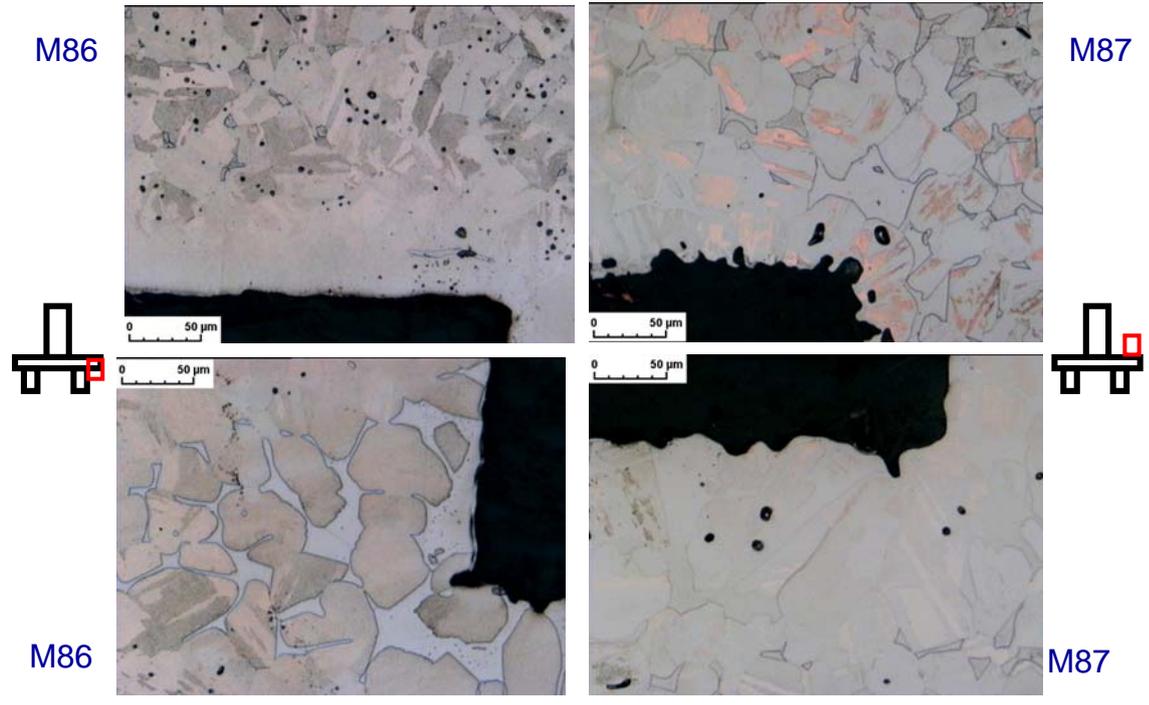
M87

# Effekte im Randbereich

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

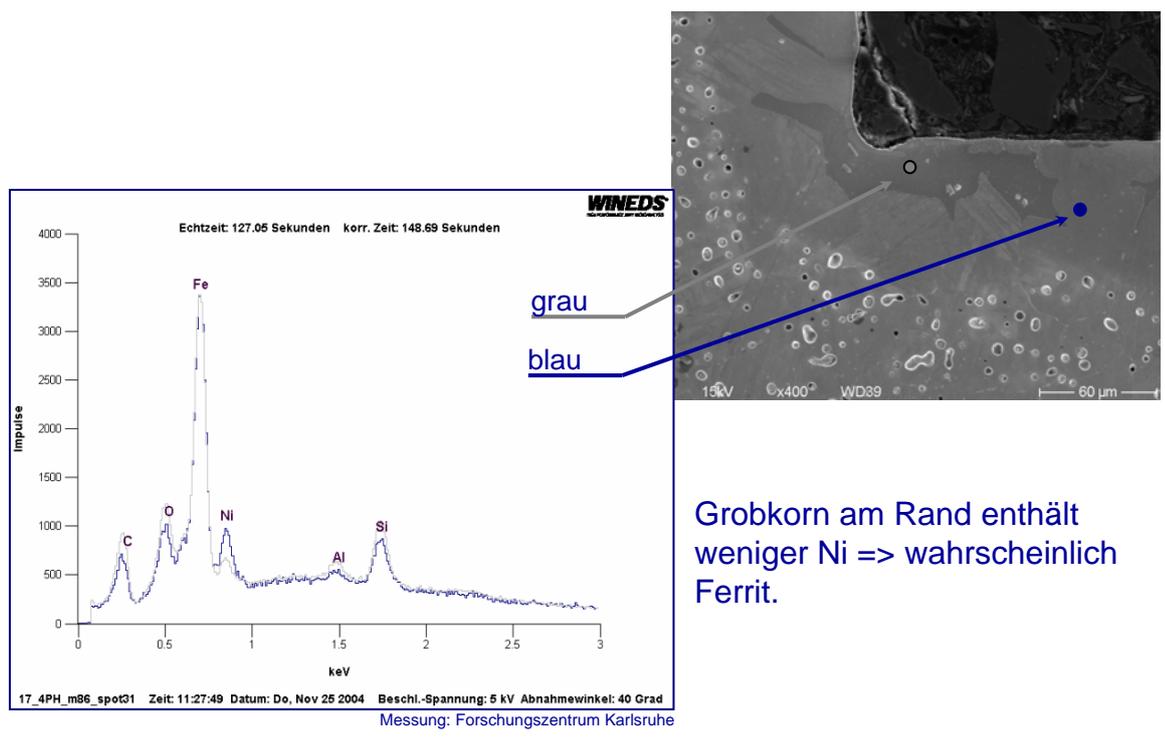


## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik  
 ARBURG  
 F  
 FRIATEC  
 ADC  
 KRONE  
 schunk  
 LMU

# Analyse der Bauteiloberfläche

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger  
 Forschungszentrum  
 Karlsruhe (PTKA)



# Rauheit von PIM-Oberflächen aus 17-4PH

GEFÖRDEBT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung  
 Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

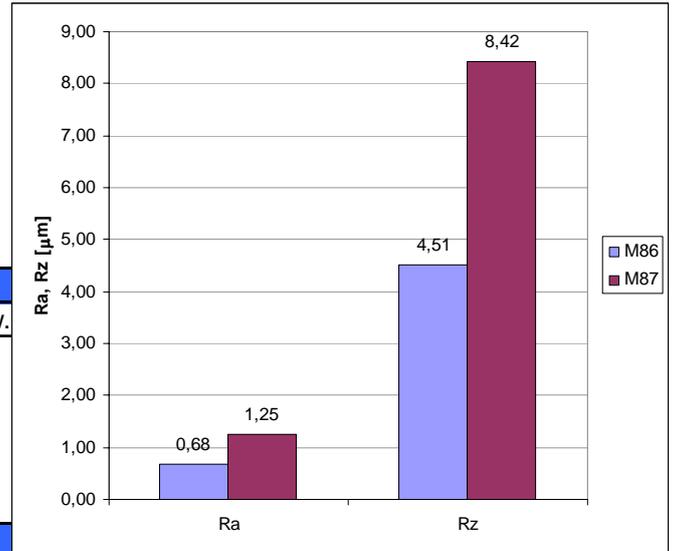
ADC

KRONE

schunk

LMU

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	
M86	0,66	4,11	
	0,68	4,46	
	0,66	4,50	
	0,70	4,95	
	<b>0,68</b>	<b>4,51</b>	Mittelwert
	0,02	0,34	Standardabw.
M87	1,17	6,69	
	1,03	7,91	
	1,50	10,28	
	1,30	8,79	
	<b>1,25</b>	<b>8,42</b>	Mittelwert
	0,20	1,51	Standardabw.



Gemessen auf Scheibenoberseite.

PIM mit feinem Pulver halbiert die Oberflächenrauheit

## Micro-P-PIM

JUNGHANS  
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

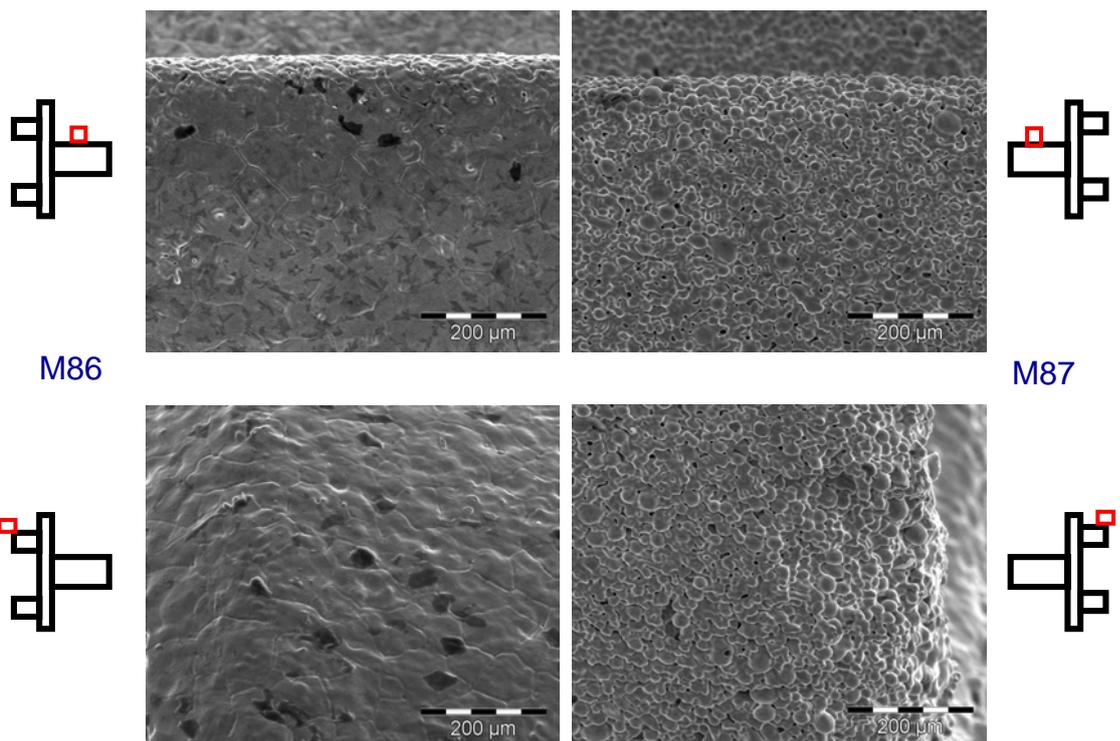
ADC

KRONE

schunk

LMU

# Konturtreue und Oberflächenqualität



## Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### Micro-P-PIM

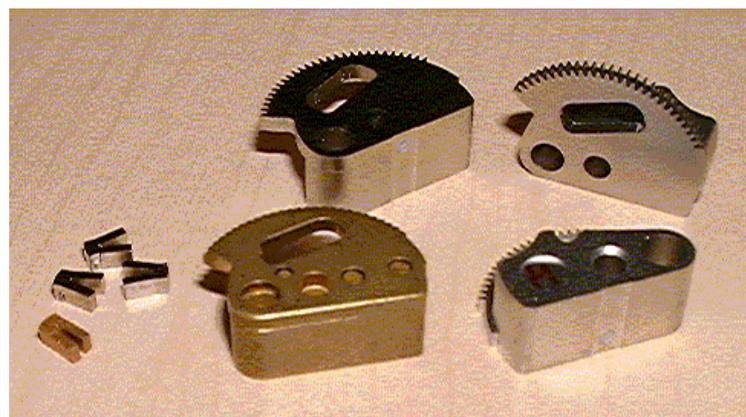
- MIM Teile besitzen gegenüber glasfaser-gefüllten PPE Werkstücken bei hohen Temperaturen eine wesentlich höhere Festigkeit und können in Mikrogetrieben höhere Kräfte übertragen
- Dieser Vorteil hat seinen Preis
  - höhere Materialkosten
  - etwa gleiche Spritzgußkosten und
  - zusätzliche Entbinderungs- und Sinterkosten
  - bei Losgrößen von 10.000 ergibt sich etwa ein 2,5 - bis 3,0 – facher Endpreis

### Micro-P-PIM

## Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Es konnte JUNGHANS zwei Werkstücke zu einem MIM-Werkstück zusammenfassen:

- Zahnradsegment (Feinschneidteil)
- Gewicht (Messing-Sinterteil)



Ergebnis:

Einsparung  
durch  
Nutzung des  
MIM-  
Prozesses  
30%

## Weitere Spin-offs

### Micro-P-PIM



## Zusammenfassung

### Micro-P-PIM

- Feedstock und PIM-Prozeßtechnik für Mikropräzisionsbauteile wurde entwickelt und ist etabliert,
- Optimierung in der Abbildungsgenauigkeit ist durch M92 möglich.
- Über MIM einstellbare Toleranzen sind in ersten Kleinserien sehr eng. Die Erfahrung läßt die Aussage einer Prozeßfähigkeit zu.
- Erste Testergebnisse an Planetenträgern zeigen die erwünschte Laststeigerung bzw. Lebensdauererhöhung.

## Zusammenfassung

### Micro-P-PIM



- Prozeßtechnik für nachbearbeitungsarmes PIM von Präzisionsgetriebeteilen aus Stahl ist erfolgreich entwickelt.
- Feedstocks mit feinen Legierungspulvern und deren Verarbeitung ist realisiert.
- Vorteile der Entwicklungen in Mikro-P-PIM:
  - reduzierte Sintertemperatur, kürzere Prozeßzeit
  - höhere Bauteildichte
  - signifikant reduzierte Oberflächenrauheit
  - bessere Konturtreue / Abbildungsgenauigkeit
  - Bauteiltests waren ohne Nachbearbeitung der PIM-Teile möglich

### Micro-P-PIM



## Metallpulver-Spritzgießen von Präzisionsbauteilen für Getriebe

Frank Baumgärtner, Schunk Sintermetalltechnik GmbH,  
J. Pannhorst, JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG,  
R. Ruprecht, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,  
Christian Thürigen, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG,  
Alexander Paul, ZMU, FNE Freiberg

Wir danken dem BMBF für die Förderung 02PD2136  
und dem Projekträger PFT für die Betreuung



## **Verwertung der Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM**



# Verwertung der Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM

J. Pannhorst<sup>1)</sup>, F. Baumgärtner<sup>2)</sup>, M. Maetzig<sup>3)</sup>, H. Mayer<sup>4)</sup>, D. Rund<sup>5)</sup>, R. Ruprecht<sup>6)</sup>, Ch. Thürigen<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup> JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH Co. KG, Geißhaldenstraße 49, D-78713 Schramberg

<sup>2)</sup> Schunk Sintermetalltechnik GmbH, Rodheimer Straße 59, D-35452 Heuchelheim

<sup>3)</sup> ARBURG GmbH + Co KG, Arthur-Hehl-Straße, D-72290 Loßburg

<sup>4)</sup> FRIATEC Aktiengesellschaft, Steinzeugstrasse, D68229 Mannheim

<sup>5)</sup> ADC Krone GmbH, Beeskowdamm 3-11, D-14167 Berlin-Zehlendorf

<sup>6)</sup> Forschungszentrum Karlsruhe, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen

<sup>7)</sup> DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO.KG, Daimlerstraße 23, D-71101 Schönaich

## Kurzfassung

Im BMBF-Projekt Micro-P-PIM wurde das „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ als ein Hochleistungs-Produktionsverfahren entwickelt. Diese Präzisionsbauteile weisen feinwerktechnische Abmessungen auf mit Toleranzen bis in den Mikrometerbereich. Neben Spritzgießmaschinen (ARBURG GmbH + Co KG) und Werkzeugen (JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG) für Präzisionsbauteile wurden im Projekt als Demonstratoren keramische Zahnblenden (FRIATEC Aktiengesellschaft) und Ferrulen (ADC Krone GmbH, Forschungszentrum Karlsruhe) sowie Planetenträger (Schunk Sintermetalltechnik GmbH, DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG) und Getriebeschnecke (JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG), beide aus dem Stahl 17-4PH erfolgreich entwickelt und getestet.

## 1 Einleitung

Mit der im Projekt Micro-P-PIM entwickelten Hochleistungsfertigungsverfahren, dem Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall, können unter drastischer Einsparung von Bauteilendbearbeitung signifikant preisgünstiger Bauteile in mittleren bis großen Stückzahlen produziert werden. Insbesondere KMUs können nun die im Projekt erarbeiteten Innovationen für die Entwicklung neuer konkurrenzfähiger Produkte aufgreifen und damit einen wichtigen Beitrag zur Sicherung des Standorts Deutschland leisten. Die Projektergebnisse tragen daher zum Ausbau einer führenden Technologieposition in Deutschland auf dem Gebiet neuer Produktionstechnologie insbesondere für die Fein- und Mikrotechnik bei.

## 2 Wissenschaftliche Verbreitung

Neben den Veröffentlichungen der Partner wurde im Rahmen einer eigens für das Projekt eingerichteten Internetseite [www.micro-p-pim.de](http://www.micro-p-pim.de), eines Statuskolloquiums nach ca. 1,5 Jahren Projektlaufzeit (über 120 Teilnehmer, davon ca. 75 % Industrie), einer Ausstellung und des aktuellen Abschlusskolloquiums gemeinschaftlich und aus dem Blickwinkel der Teilprojekt übergreifenden Arbeitskreise die Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM einer breiten Fachwelt präsentiert. Daneben flossen Ergebnisse auch in Inhalte von Fortbildungsveranstaltungen mit ein, wie beispielsweise der Kurs „Pulverspritzgießen“ an der TAE Esslingen,

den ARBURG und Forschungszentrum Karlsruhe in 2003 und 2005 mit gestalteten.

Da drei der Projektpartner, nämlich ARBURG GmbH + Co KG, Schunk Sintermetalltechnik GmbH und Forschungszentrum Karlsruhe, aktive Mitglieder im MIM-Expertenkreis der Deutschen MIM-Industrie unter dem Fachausschuss Pulvermetallurgie sind und dort aktiv sich um die Erarbeitung des Entwicklungsbedarfs engagieren, finden die Ergebnisse auch Eingang in diesem Kreis von überwiegend Unternehmensvertretern.

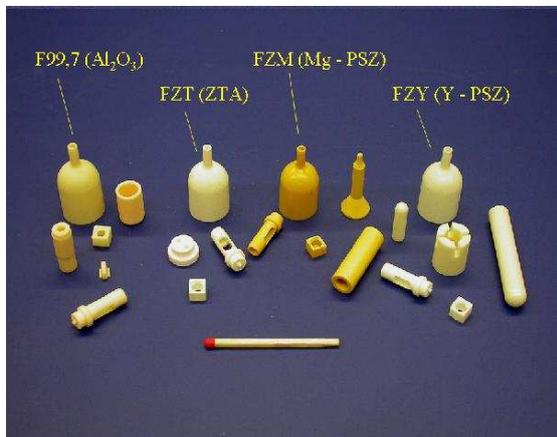
## 3 Technischer Nutzen am Markt

Das Projekt Micro-P-PIM hat die vorhandenen Kenntnisse bei JUNGHANS in der Spritzgieß-Verarbeitung von Keramik- und Metallpulvern vertieft, so dass nun außer der Werkzeugherstellung auch die Teileherstellung für die Region angeboten werden kann. Die Simulationsmöglichkeiten des Plastic-Advisors von ProEngineer wurden erweitert, so dass MIM und CIM Bauteile simuliert werden können. MIM-Bauteile werden in den eigenen Produkten eingesetzt. Es ist beabsichtigt die MIM-Verfahren weiter in MID-Verfahren auszubauen, um dann hausintern benötigte MEMS-Baugruppen herstellen zu können. Damit können Vorteile vor allem gegenüber ausländischen Wettbewerbern genutzt werden.

Im Hause ARBURG konnten durch das Projekt Micro-P-PIM die Kenntnisse und Erfahrungen zum Mikrospritzgießen von Metallen und Keramiken weiter abgerundet und dadurch die weltweite Vorreiterpositi-

on im Bereich des Pulverspritzgießens weiter ausgebaut werden. Die Ergebnisse des Projektes sind sozesstechnik bereits in eine Reihe von aktuellen Projekten mit bestehenden und potentiellen Kunden zum Thema Mikrospritzgießen eingeflossen und haben damit bereits jetzt zur gewünschten Erschließung neuer Kundenpotentiale geführt.

Die grundlegenden Arbeiten im Rahmen dieses Projektes haben bei FRIATEC weitere nicht projektbezogene Entwicklungsarbeiten auch mit anderen oxidkeramischen Werkstoffen initiiert. Nach heutigem Stand ist FRIATEC durch diese weiterführenden Arbeiten in der Lage, Produkte in PIM – Technik aus vier verschiedenen Werkstoffen herzustellen. Beispiele solcher Teile aus Werkstoffen  $Al_2O_3$  (F99,7), ZTA (FZT), Mg – PSZ (FZM) und Y – PSZ (FZY) sind auf Bild 1 dargestellt.



**Bild1:** Produkte verschiedener Werkstoffe

Die Einführung der Keramischen Spritzgießtechnik für diese vier Werkstoffe bietet nicht nur Perspektiven für neue Produkte, sondern bei bestehenden komplex geformten Produkten wurde durch die Umstellung von Pulverpress- auf die Pulverspritzgießroute bereits heute eine teilweise drastische Reduzierung der Herstellkosten erreicht.

Für Schunk Sintermetalltechnik GmbH sind die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich der Stellgrößen für die Toleranzeinengung von sehr hohem Nutzen. Nicht nur für Standardbauteile, sondern auch für Mikrokomponenten, können die anhand des ferritisch-martensitischen Stahls 17-4PH gewonnenen Re-

sultate angewendet werden und auch auf andere Werkstoffe ausgeweitet werden. Schließlich bildet die mechanisch-physikalische Charakterisierung des Werkstoffs und der Bauteile eine ideale Grundlage zur Dimensionierung weiterer Mikrokomponenten.

FAULHABER stellt Getriebe für Kleinmotoren in vielen Fällen aus spritzgegossenen Kunststoffteilen her. Mit dieser Fertigungstechnik können die benötigten komplexen Teile kostengünstig produziert und ohne Nacharbeit montiert werden. Die Abgabeleistung solcher Kleinantriebe wird jedoch durch die Festigkeit der Kunststoffteile begrenzt.

Der Ersatz durch Metallteile würde die gewünschte Erhöhung der Leistungsfähigkeit ermöglichen.

Es hat sich gezeigt, dass der im Projekt Micro-P-PIM als Beispielteil gefertigte Planetenträger ohne Nacharbeit in dem Kunststoffgetriebe einsetzbar ist. Bei Nennbelastung des Getriebes wurde eine Laufzeit von mehr als 2000 Stunden erreicht.

Mit der in dem Projekt gewählten Prozesskette für MIM-Teile wurde nachgewiesen, dass die gefertigten Teile ohne Nacharbeit in Kleinmotoren eingesetzt werden können. Das Beispielteil Planetenträger kann direkt übernommen werden.

Das Projekt Micro-P-PIM hat dazu beigetragen, dass das Forschungszentrum Karlsruhe seine führende Stellung in der Entwicklung von Fertigungsverfahren der Mikrotechnik für Kunststoffe, Keramiken und Metalle weiter ausbauen konnte. Dies gilt insbesondere für die Bereiche Mikroformgebung, Mikrospritzgießen sowie Formmassen und Verfahrensvarianten für das Pulverspritzgießen. Nach Aussagen aktueller Kunden ist das Forschungszentrum eine weltweit gefragte Anlaufstelle für mikrofertigungstechnisches Know-How insbesondere im Bereich Pulverspritzgießen.

## 4 Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger PFKA für die zügige Begutachtung und Betreuung des Projekts, sowie unseren Kollegen für die konstruktive Unterstützung im Projekt Micro-P-PIM.



## Micro-P-PIM



## Verwertung der Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM

J. Pannhorst et al.\*

ARBURG GmbH + Co KG  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
FRIATEC Aktiengesellschaft  
JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG (\*)  
Schunk Sintermetalltechnik GmbH

Mikrosystemtechnik-Kongress, Freiburg, 11. Oktober 2005

## Motivation



## Micro-P-PIM



## Pulverspritzgießen von Mikropräzisionsteilen

- Das Projekt Micro-P-PIM hat gezeigt, dass Teile, die durch Metall- oder Keramikpulverspritzgießen herzustellen sind und die
  - feinwerktechnische Abmessungen mit geringen Toleranzen haben,
  - in mittleren und großen Serien produziert und
  - nicht oder nur wenig nachgearbeitet werden müssen,
- einen Beitrag zu wettbewerbsfähigeren Produkten leisten



## Micro-P-PIM



## Pulverspritzgießen von Mikropräzisionsteilen

- Allein die Anzahl der Projektpartner selbst



- und der Endanwender für Bauteile, wie Ferrulen, Zahnblenden und Planetenträger



- sichern den breiten Einsatz der Ergebnisse
- ebenso die Ausbildung zum Kunststoffformgeber



## Micro-P-PIM



- Die Verbreitung der Entwicklungsergebnisse wurde über verschiedene Foren gewährleistet:
  - **Veröffentlichungen** und **Kundenkontakte** der Projektpartner
  - **Internetseite:** [www.Micro-P-PIM.de](http://www.Micro-P-PIM.de) mit
    - Allgemeinen Information und
    - Download-Möglichkeiten
  - **Statuskolloquium** Micro-P-PIM mit Vortagsreihe
    - Musterausstellung
    - Bericht: Micro-P-PIM als FZKA 7000 zum Download
  - Messestand zu den **Karlsruher Arbeitsgespräche 2004**
  - Expertenkreis der **Deutschen MIM-Industrie** im Fachausschuss Pulvermetallurgie
  - Weitergabe durch **Lehre und Forschung** im Forschungszentrum Karlsruhe
    - Ausbildung von Studenten und AZUBI (Mikrotechnologie)
    - nahestehende Dissertationen
  - Aktueller **Mikrosystemtechnik Kongress**, Freiburg 2005



**Micro-P-PIM**



**ARBURG GMBH + CO. KG**

- Das Projekt hat die Kenntnissen über die Spritzgieß-Verarbeitung von CIM- und MIM-Materialien erweitert, so dass
  - neue Projekte mit potentiellen Kunden angestoßen wurden
  - neue Kundenpotentiale erschlossen werden konnte
- eine Weiterentwicklung der Serie ALLROUNDER 420 C 600 - 100 mit PIM - Zylinder 15mm (12mm), lage geregelter Schnecke, elektromechanischem Auswerfer, Variothermprozess und MULTILIFT H durchgeführt wurde

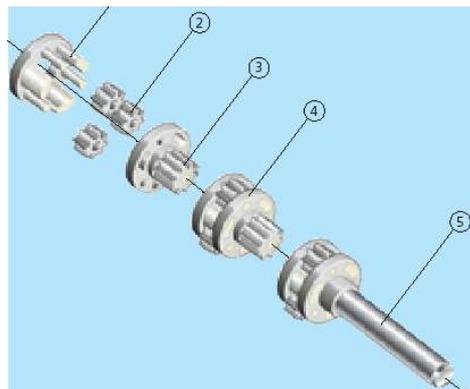


**Micro-P-PIM**



**DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO**

- Der Ersatz von Kunststoffteilen durch Metallteilen in Getrieben für Kleinstmotoren ermöglicht die Erhöhung der Abgabeleistung
- Die gefertigten Planetenträger konnten ohne Nacharbeit mit Laufzeiten von mehr als 2.000 Stunden in dem Kunststoffgetriebe eingesetzt werden





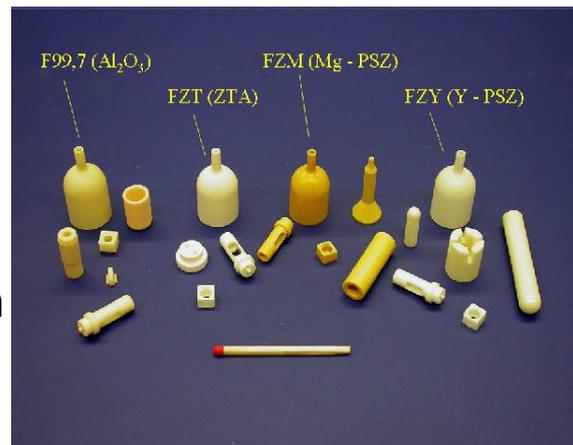
## Micro-P-PIM



## FRIATEC Aktiengesellschaft

- Die grundlegenden Arbeiten im Projekt haben weitere nicht projektbezogene Arbeiten initiiert. So werden heute Produkte aus oxidkeramischen Werkstoffen wie
  - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (F99,7), ZTA (FZT), Mg-PSZ (FZM) und Y-PSZ (FZY)

hergestellt, wodurch teilweise drastische Reduzierungen der Herstellkosten erreicht werden



## Micro-P-PIM



## Forschungszentrum Karlsruhe, IMF-III

- Das Projekt hat dazu beigetragen, dass das Forschungszentrum KA seine führende Stellung in der mikrotechnischen Fertigung ausbauen konnte und zwar für
  - Kunststoffe,
  - Keramiken und
  - Metalle
- insbesondere für die Bereiche
  - Mikrospritzgießen,
  - Pulverspritzgießen,
  - Formmassen für das Pulverspritzgießen
- damit hat das Forschungszentrum Karlsruhe seine Position als weltweit gefragter Entwicklungspartner gestärkt



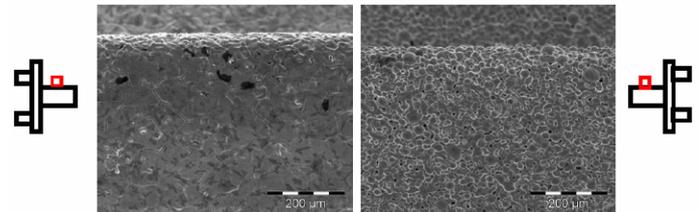
**Micro-P-PIM**



**Schunk Sintermetalltechnik GmbH**

- Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse über die Stellgrößen zur Reduzierung der Toleranzen für den ferritisch-martensitischen Stahl 17-4 PH fließen nicht nur in Standardbauteile, sondern auch in das Pulverspritzgießen anderer Werkstoffe ein
- Die mechanisch-physikalische Charakterisierung des Werkstoffs und der Bauteile ist eine ideale Grundlage zur Dimensionierung weiterer Mikrokomponenten

**Kanten und Oberflächenqualität**



**Micro-P-PIM**



**JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG**

- Das Projekt hat die Kenntnisse über die Verarbeitung von CIM- und MIM-Materialien durch Pulverspritzgießen vertieft, so dass
  - die begrenzten Simulationsmöglichkeiten des CAD-Plastic-Advisors (ProEngineer) für MIM und CIM erweitert wurden
  - außer PIM-Werkzeugen nun auch die PIM-Teile-Herstellung in der Region angeboten wird
  - durch Technologieübertragung ganze Teilefamilien entstehen





## Micro-P-PIM

**JUNGHANS**  
Feinwerktechnik

**ARBURG**

**F**

**FRIATEC**

**ADC**

KRONE

**schunk**

**LMU**

# Verwertung der Ergebnisse des Projekts Micro-P-PIM

J. Pannhorst \*

ARBURG GmbH + Co KG  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
FRIATEC Aktiengesellschaft  
JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG )  
Schunk Sintermetalltechnik GmbH

Wir danken dem BMBF für die Förderung  
und dem Projektträger PTKA für die Betreuung