



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7000

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

**Kolloquium zum BMBF-Projekt
Micro-P-PIM am 11. Februar 2004
in der Aula des
Forschungszentrums Karlsruhe**

Institut für Materialforschung

Januar 2004

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7000

Micro-P-PIM

**Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer
Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall**

Kolloquium zum BMBF-Projekt Micro-P-PIM

am 11. Februar 2004

in der Aula des Forschungszentrums Karlsruhe

Zusammengestellt vom

Institut für Materialforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2004

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
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

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	iii
Programm	v
Das Projekt Micro-P-PIM	1
<i>J. Pannhorst, R. Ruprecht</i>	
- Motivation und Ziele	
- Partner und Aufgaben	
- Zusammenarbeit und Synergien	
PIM von Keramik-Ferrulen für Glasfaser-verbindungen im Monomode-Bereich ...	17
<i>M. Beck, J. Haußelt, K. Müller, V. Piotter, D. Rund, R. Ruprecht</i>	
- Motivation für PIM von Ferrulen	
- Charakterisierung der Formmassen	
- Prozess-Entwicklung und –Simulation	
Spritzgießtechnik für Präzisionsbauteile aus Al₂O₃-Keramik	35
<i>H. Mayer, J. Doll, G. Örylgsson</i>	
- Zielsetzung: z. B. Dentaltechnik	
- Rohstoffe für Aluminiumoxid-Keramik	
- Entwicklung der CIM-Prozesstechnik	
Maschinen- und Werkzeugtechnik für PIM von Mikropräzisionsbauteilen	51
<i>M. Maetzig, K. Müller, J. Pannhorst, H. Walcher</i>	
- Herausforderungen für Mikropräzision	
- Spritzaggregat und Werkzeugtechnik	
- Umsetzungsbeispiele	
Metallpulver-Spritzgießen für Getriebekomponenten aus Stahl	73
<i>F. Baumgärtner, M. Endres, J. Pannhorst, H. Paul, S. Rath, M. Schulz, Ch. Thüringen</i>	
- Motivation: MIM für Kleinstgetriebe	
- Anforderungen an Pulver und Feedstock	
- aktueller Entwicklungsstand	

VORWORT

Zum Projekt Micro-P-PIM

Das Projekt **Micro-P-PIM** mit dem Titel „Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Themenfeld „Hochleistungsfertigungsverfahren“ des Rahmenkonzepts „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert. Es wird von der Projektträgerschaft Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) des BMBF betreut, die am Forschungszentrum Karlsruhe angesiedelt ist.

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.

Zum Kolloquium und Tagungsband

Zur Mitte des dreijährigen BMBF-Projekts informieren wir Sie im Rahmen von Vorträgen über unseren Stand der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Im Anschluss an die Vortragsreihe stellen wir Ihnen durch eine Poster- und Vitrinenschau unsere Ergebnisse „live“ vor. Weiterhin bieten wir Ihnen die Möglichkeit, sich mit Experten aus den beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen auszutauschen.

Der Tagungsband erscheint in der Reihe der Wissenschaftlichen Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe mit der Nummer FZKA 7000 und kann somit als offizielle Veröffentlichung zitiert und verbreitet werden. Er wurde aus Beiträgen aller Projektpartner von R. Ruprecht, Institut für Materialforschung III, zusammengestellt und enthält die in fünf Vorträgen gegebenen Präsentationen (Vortragende unterstrichen) aus den im Projekt etablierten Arbeitskreisen sowie jeweils davor eine kurze Beschreibung, die Zielsetzung, Zusammenarbeit und Stand der Arbeiten im Projekt erläutert.

Danksagung

Die Projektpartner danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger PFT für die Organisation der zügigen 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.

Ab 12:00 **Anmeldung vor der Aula, Check in bis 13:45 Uhr**

Programmleitung: R. Ruprecht,
Tagungsbüro: R. Kless: kless@imf.fzk.de

12:45 **Mittagspause** (Kantinenbesuch möglich)

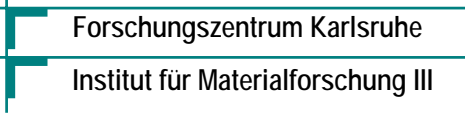
14:00 **Das Projekt Micro-P-PIM**

J. Pannhorst, R. Ruprecht
- Motivation und Ziele
- Partner und Aufgaben
- Zusammenarbeit und Synergien

 **JUNGHANS**
Feinwerktechnik

14:25 **Pulverspritzgießen von Keramik-Ferrulen
für Glasfaserverbindungen im Monomode-Bereich**

M. Beck, J. Haußelt, K. Müller,
V. Piotter, D. Rund, R. Ruprecht
- Motivation für PIM von Ferrulen
- Charakterisierung der Formmassen
- Prozess-Entwicklung und -Simulation

 **Forschungszentrum Karlsruhe**
Institut für Materialforschung III

14:50 **Spritzgießtechnik für
Präzisionsbauteile aus Al₂O₃-Keramik**

H. Mayer, J. Doll, G. Örylgsson
- Zielsetzung: z. B. Dentaltechnik
- Rohstoffe für Aluminiumoxid-Keramik
- Entwicklung der CIM-Prozesstechnik

 **KRONE**

 **FRIATEC**

15:15 **Pause**

15:45 **Maschinen- und Werkzeugtechnik
für PIM von Mikropräzisionsbauteilen**

M. Maetzig, K. Müller, J. Pannhorst, H. Walcher
- Herausforderungen für Mikropräzision
- Spritzaggregat und Werkzeugtechnik
- Umsetzungsbeispiele

 **ARBURG**

16:10 **Metallpulver-Spritzgießen für
Getriebekomponenten aus Stahl**

F. Baumgärtner, M. Endres, C. Thürigen,
A. Paul, J. Pannhorst, S. Rath, M. Schulz
- Motivation: MIM für Kleinstgetriebe
- Anforderungen an Pulver und Feedstock
- aktueller Entwicklungsstand

 **schunk**

 **LMU**

16:30 **Ausstellung in der Aula**

Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall

Micro-P-PIM

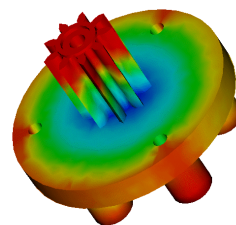
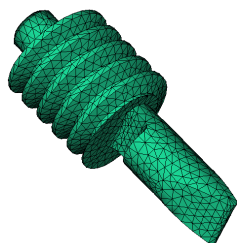
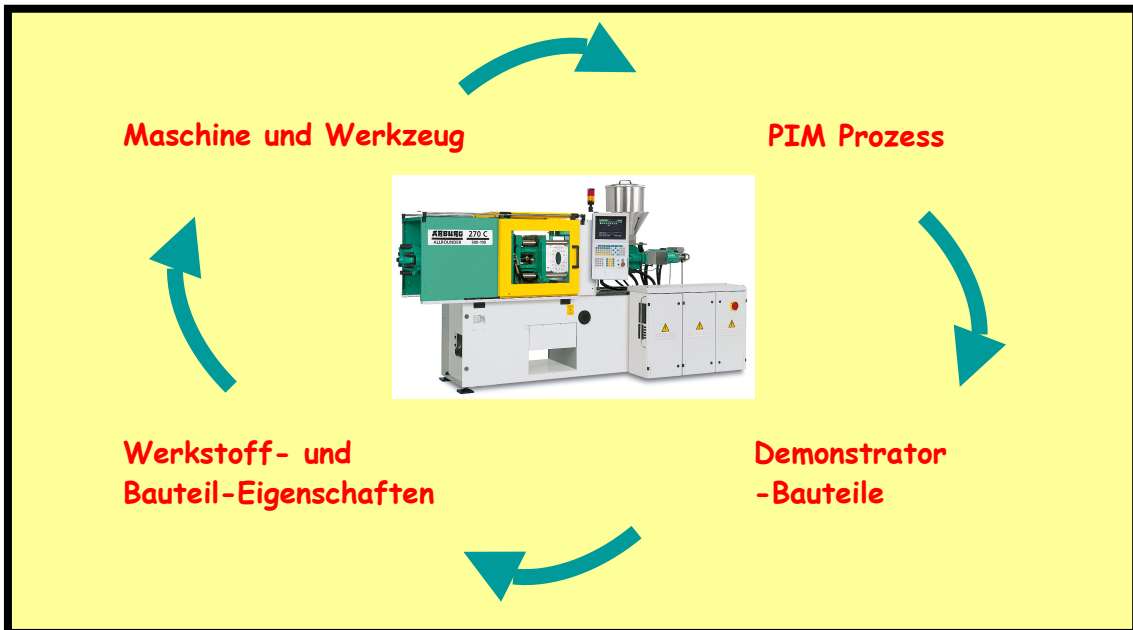
Micro Precision Parts made by Powder Injection Molding



Ferrule aus Zirkonoxid
für die Glasfasertechnologie
 $\text{Øa} = 2,5 \text{ mm}$



Zahnblende aus Aluminiumoxid
als Teil eines Implantats
in der Dentaltechnik
 $\text{Øa} = 6,5 \text{ mm}$



FEM-Netzwerk und Prozesssimulation für PIM von
Präzisionsteilen von Kleinstgetrieben aus härtbarem
und korrosionsbeständigem Stahl 17-4PH

Das BMBF-Projekt Micro-P-PIM

Das BMBF-Projekt Micro-P-PIM

Johannes Pannhorst¹⁾, Robert Ruprecht²⁾

¹⁾ Junghans Feinwerktechnik

²⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Zusammenfassung

Im Projekt Micro-P-PIM wird das „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ als ein Hochleistungs-Fertigungsverfahren 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. Diese gilt es deutlich zu reduzieren. Die Ziele sollen durch optimierte Maschinen- und Werkzeugtechnik sowie die Weiterentwicklung der Formmassen und der Prozesstechnik zum Pulverspritzgießen erreicht werden. Der Entwicklungserfolg wird durch die Realisierung von 4 Bauteilen mit Präzision bis in den Mikrometerbereich jeweils aus Oxidkeramik oder Stahl demonstriert werden. Prozesssimulation und Werkstoffcharakterisierung sind Teil der angestrebten Basis für die geplante industrielle Nutzung der Entwicklungen.

1. Ausgangssituation und Motivation

Parallel zum überall sichtbaren Trend zur Miniaturisierung [STU99, WEC00] steigen die Anforderungen bezüglich der Genauigkeit und Maßtoleranzen von Präzisionsbauteilen. Weiterhin bringt die Erhöhung der Integrationsdichte einen stark wachsenden Bedarf an komplex geformten Mikropräzisionsbauteilen aus Keramik und Metall mit sich. Diese Randbedingungen legen den Einsatz des Pulverspritzgießens als ein mittel- und großserientaugliches Verfahren nahe, um weniger wirtschaftliche Fertigungstechnologien abzulösen und insbesondere neue Produkte realisieren zu können. Mikropräzisionsteile sind typischerweise Bauteile an der Schnittstelle zwischen der Feinwerk- und Mikrotechnik und besitzen i.a. Bauteilabmessungen im Millimeter- bis Zentimeterbereich mit Toleranzen im Bereich weniger Mikrometer. Diese Toleranz von deutlich unter 0,5 % der Bauteilabmessungen ist weltweit nicht mit der herkömmlichen Pulverspritzgießtechnologie zu beherrschen, sondern gegenwärtig 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

feinwerktechnische Bauteile aus Keramik und Metall [WHI98]. Es findet in Japan und vor allem in USA große Verbreitung und in Europa zunehmende Anwendung [GER00]. Die Maschinen- und Werkzeugtechnik bauen auf dem Spritzgießen von Kunststoffen auf. Unter Verwendung eines Pulver-Binder-Gemischs (Feedstock) als Formmasse erfolgt die Formgebung des Grünlings. Das anschließende Entbindern der Grünlinge stellt heute noch einen meist aufwendigen Prozessschritt dar. Der Braunling 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].

Die Nachfrage bereits heute nach möglichst maßgenauen Mikropräzisionsbauteilen aus Keramik und Metall in mittleren und großen Stückzahlen kann nur mit einer Produktionstechnik von morgen befriedigt werden, die durch kurze Prozesszeiten und einer Verminderung der mechanischen Hartbearbeitung eine wirtschaftliche Fertigung erlaubt. Da die Chancen, diese Mikropräzisionsbauteile aus Keramik oder Metall mittels Pulverspritzgießen wirtschaftlich herstellen zu können, gut erscheinen, müssen die Voraussetzungen für eine prozessichere, wirtschaftli-

che Produktion für morgen geschaffen werden. Dies macht intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Bereichen Maschinen-, Werkzeug-, Verfahrens- und Handhabungstechnik notwendig. Darüber hinaus besteht großer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Pulver-, Binder- und Formmassen-(=Feedstock)-Herstellung.

2. Ziele des Verbundprojektes

Gesamtziel des Projektes Micro-P-PIM im Rahmen der "Forschung für die Produktion von morgen" ist konkret die Entwicklung einer für Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall optimierten, nachbearbeitungsarmen Pulverspritzgießtechnologie (Micro-P-PIM) inklusive der Maschinen-, Werkzeug-, Werkstoff- und Prozesstechnik.

Micro-P-PIM ist das Acronym für Micro Precision Powder Injection Molding, das Pulverspritzgießen für Mikro-Präzisionsbauteile. 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.

Konkret beinhaltet dieses folgende Ziele:

- die Entwicklung der notwendigen Voraussetzungen für die eigentliche Produktionstechnik zum nachbearbeitungsarmen Pulverspritzgießen für Mikropräzisionsbauteile. Diese sind einerseits die Entwicklung geeigneter Maschinen- und Werkzeugtechnologien sowie andererseits homogene Feedstocks unter Verwendung neuer, feinskaliger Pulver insbesondere für Metalle. Mit dem zu entwickelnden Technologievorsprung wird in der Maschinen- und Werkzeugtechnik eine herausragende Position erreicht, die sich bis in den Bereich der Kunststoffverarbeitung vermarkten lässt.
- Erforschung und Entwicklung der eigentlichen Prozessschritte eines Pulverspritzgießverfahrens inklusive Entbindern und Sintern. Damit verbunden ist das Ziel, die Maßabweichungen der Mikropräzisionsbauteile nach dem Sintern auf eine Schwundtoleranz deutlich unter 0,5 % der Bauteilabmessungen zu reduzieren, um aufwendige mechanische Nachbearbeitungsschritte wie Zerspanung und vor allem schleifende oder läppende Bearbeitung an Mikropräzisionsbauteilen aus Keramik und Metall weitestgehend oder vollständig zu eliminieren.
- zusätzliche Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Pulverspritzgießens durch signifikante Verkürzung der Zykluszeiten der Formgebung sowie der heute noch teilweise aufwendigen Entbinderung. Mit dieser ressourcensparenden

Entwicklung wird künftig eine wirtschaftlichere und umweltverträgliche Produktionsform ermöglicht.

- Für die Qualitätskontrolle von Mikropräzisionsbauteilen sind exakte Festlegungen und Definitionen für eine möglichst effiziente Prüf- und Messmethodik zu erarbeiten, damit Lieferanten die Bauteile spezifizieren und die Qualitätsmerkmale gegenüber ihren Kunden nachweisen können. Hierzu wird nach wirtschaftlichen Lösungen gesucht, die auch für andere Produkte Anwendung finden können.

- Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien und Ermittlung von Werkstoffkennwerten für eine künftig optimierte Konstruktion spritzgegossener Mikropräzisionsbauteile aus einer Keramik oder einem Metall. Dies soll dazu beitragen, eine effiziente und prozessnahe Simulation von fertigungsgerechten Bauteilen zu ermöglichen, um spätere Nacharbeiten in der eigentlichen Prozessentwicklung für künftige Produkte signifikant zu minimieren.

3. Arbeitsprogramm und Methoden

Um das nachbearbeitungsarme oder gar nachbearbeitungsfreie Pulverspritzgießen von Mikropräzisionsbauteilen aus Keramik und Metall (Micro-P-PIM) in drei Jahren für Anwendungen in den Bereichen optischer Datenübertragung, Medizintechnik, Mikrogetriebe und darüber hinaus (Kraftfahrzeugtechnik, Chemie, Mikroelektronik, Braune und Weiße Waren,...) wirtschaftlich verwerten zu können, sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Maschinen und Werkzeugtechnik, zur Bindertechnologie, zur Pulver- und Feedstockherstellung, zum eigentlichen Pulverspritzgießen sowie zum Entbindern und Sintern vorgesehen. Zur Bearbeitung der neuen Aufgabenstellungen und innovativen Lösungsansätze bringen alle Projektpartner ihr spezielles Know-how sowie vorhandene Einrichtungen ein. Das eigentliche Pulverspritzgießen wird gleichzeitig von vier Partnern für vier unterschiedliche Werkstoffe anhand von vier Demonstratoren mit künftigem Marktpotential in unterschiedlichen Branchen (Glasfaserverbindungs-, Dentaltechnik, Mikroantriebe und Präzisionszählwerke) entwickelt und durch Forschungsarbeiten zum Pulverspritzgießen mikrostrukturierter Probekörper an einem Institut unterstützt.

Für das Mikropulverspritzgießen werden neue Spritzgießmaschinen, ausgestattet mit Spritzeinheiten mit Schneckendurchmessern unter 14 mm entwickelt. Die Maschinensteuerungen werden für hochgenaue Einstellungen von Dosierung, Weg und Geschwindigkeit weiterentwickelt. Die Entwicklungsarbeiten in der Werk-

zeugtechnik sollen ein mikrometergenaues Führen der Werkzeugplatten und ein präzises zentrisches Führen von Werkzeugkernen garantieren. Zur Entwicklung der Werkzeugkonzepte für die Demonstratoren und Probekörper werden Simulationstools eingesetzt. Um feinskalige, reine Metallpulver zu erhalten, sollen Inertgas verdühte Pulver eingesetzt, das Entmagnetisieren und das Sichten weiterentwickelt werden. Die Keramikpulver werden durch Mischen, ggf. Nachmahlen und Sprühtrocknen so konditioniert, dass sich ein reproduzierbarer Sinterschrumpf einstellt. Die Binderauswahl erfolgt hinsichtlich Festigkeit des Grünlings und Zykluszeit beim Entbindern. Für eine druckfreie Entbinderung ist ein Bindersystem vorteilhaft, das aus mehreren Polymeren compoundiert wird. Das Bindersystem und das Entbinderungsverhalten wird hinsichtlich einer Verkürzung der Entbinderungszeiten in industriell eingesetzten Anlagen untersucht. Das Pulverspritzgießen wird mit möglichst großem Prozessfenster entwickelt, um stabile, industrietaugliche Prozesse zu erhalten. Aus den Untersuchungen der Grünlinge sowie der gesinterten Demonstratorbauteile und Probekörper werden Gestaltungsrichtlinien erarbeitet. Diese Gestaltungsrichtlinien sollen künftig zusammen mit den ermittelten mechanischen und physikalischen Werkstoffdaten eine fertigungsgerechte, exakt dimensionierte Werkzeugkonstruktion nachbearbeitungsarmer Produkte ermöglichen. Das Magazin wird direkt an der Spritzgießmaschine mit Grünlingen bestückt.

Es wird erwartet, dass für die gesinterten Mikropräzisionsbauteile, die eine sehr geringe relative Toleranz von unter 0,05 % (0,5 µm Toleranz auf 2 mm) erfordern, noch geringe Nachbearbeitung notwendig sein wird. Bei geringeren Anforderungen (0,1-0,3 %, entspricht einem Zehntel des heutigen Stands der Technik) wird voraussichtlich eine Hartbearbeitung entfallen. Die Qualität der Bauteile wird geometrisch vermessen und in Demonstrator spezifischen Systemen funktional untersucht. Abgeleitete Gestaltungsrichtlinien und ermittelte Werkstoffdaten der vier Demonstratoren und Probekörper bilden die Basis für die künftige Konstruktion von nachbearbeitungsarmen Mikropräzisionsbauteilen.

4. Übersicht über die Projektpartner

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Micro-P-PIM werden entsprechend der Kompetenz der Partner arbeitsteilig und interdisziplinär durchgeführt.

Der deutsche Maschinenbauer ARBURG gehört weltweit zu den führenden Herstellern von Spritzgießmaschinen im Schließkraftbereich

zwischen 125 und 4000 kN. Einsatzgebiete dieser ALLROUNDER sind beispielsweise die Produktion von Kunststoffteilen für Automobile, Kommunikations- und Unterhaltungselektronik, Medizintechnik, Haushaltsgeräte, und Verpackungen. Weiterhin engagiert sich ARBURG mit Spritzgießmaschinen für das Pulverspritzgießen. Vervollständig wird das Produktprogramm durch Robot-Systeme und weitere Peripheriegeräte. Produziert wird ausschließlich im Stammwerk in Loßburg (Baden-Württemberg). Im Rahmen eines integrierten Managementsystems ist ARBURG nach DIN EN ISO 9001 und 14001 zertifiziert. In insgesamt 70 Ländern ist ARBURG mit einem umfassenden Verkaufs- und Servicenetz vor Ort. ARBURG GmbH + Co ist ein Unternehmen der Hehl-Gruppe.

Am Forschungszentrum Karlsruhe GmbH werden im Verbund von 12 Instituten sowohl mittel- und langfristige Grundlagenforschung als auch vorwettbewerbliche Anwendungstechnik und Musterserienserienfertigung von Mikrokomponenten und -systemen durchgeführt. Das Forschungszentrum gehört zu der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft und ist eine Einrichtung des Bundes (90%) und des Landes Baden-Württemberg (10%). Das Institut für Materialforschung III unter der Leitung von Herrn Prof. J. Haußelt befasst sich mit der Entwicklung und Verarbeitung keramischer Pulver sowie mit der Werkstoffprozesstechnik von Polymeren, Metallen und Keramik und beschäftigt über 80 Angestellte. Seit ca. neun Jahren werden verschiedene Varianten der Spritzgießtechnologie von Mikrostrukturen entwickelt [BEN98, MAL01]. Das Institut hat wesentliche Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Werkstoffprozesstechnik in der Mikrotechnik durchgeführt und neue Materialien für die Mikro- und Nanotechnologie erschlossen.

FRIATEC AG Division FRIALIT - DEGUSSIT ist ein Unternehmen der belgischen Aliaxis-Gruppe. Am Standort Mannheim produzieren mehreren Divisionen und Bereiche auf den folgenden Gebieten für FRIATEC: Pumpen aus hochkorrosionsbeständigen Werkstoffen, technische Kunststoffe für Fittings und Rohrleitungen, Sanitärmodule, Installationssysteme für kaltes und warmes Trinkwasser, WC, Armaturen für die chemische Industrie, Umwelttechnik und Hüttenindustrie, Labortechnik aus technischer Keramik und Polypropylen sowie Abluft- und Neutralisationsanlagen. In der Division Frialit-Degussit werden überwiegend kundenspezifische Produkte aus Oxidkeramik auf der Basis Al_2O_3 und ZrO_2 sowie mit speziellen Verfahren hergestellte Metall-Keramik- und Keramik-Keramik-Verbundprodukte für Anwendungen im chemischen, mechanischen, thermischen, elek-

trischen und medizinischen Bereich hergestellt. Die Division Frialit – Degussit ist seit Anfang 2000 nach DIN EN ISO 9001: 2000 zertifiziert. Die Einhaltung der Qualitätsvorgaben wird in jährlichen Überprüfungsaudits und in dreijährigen Rhythmus in Reaudits überprüft.

JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG ist in Europas und weltweit einer der führenden Hersteller von feinwerktechnischen Erzeugnissen. Seit 1997 ist das Unternehmen nach DIN EN ISO 9001 zertifiziert. Ein eigener Sektor Werkzeugbau und Kunststoffspritzgießen ist als Werkzeug- und Spritzguss-Lieferant in der Region tätig. JUNGHANS Feinwerktechnik ist ein Unternehmen der Diehl VA Systeme, welche eine Unternehmung der Diehl Stiftung & Co KG mit dem Hauptsitz in Nürnberg ist. Die Firma Junghans Feinwerktechnik hat die Federführung für das Projekt „Micro-P-PIM“ übernommen.

Das Unternehmen KRONE GmbH bildet mit ihren 24 in- und ausländischen Tochterunternehmen die KRONE-Gruppe. Sie gehört seit dem 1.7.1999 zum amerikanischen Konzern GenTek Inc. mit Sitz in Hampton, New Hampshire (USA). KRONE ist Hersteller und Lieferant von Komponenten und Systemlösungen für Telekommunikations- und Datennetze wie Verbindungs- und Verteilertechnik für Kupfer- und Glasfasernetze, Verkabelungssysteme zur Sprach-, Daten- und Bildübertragung in Gebäuden, Verbindungs- und Verteilertechnik für den Einsatz in industriellen Anwendungen, Dienstleistungen bis zur schlüsselfertigen Erstellung von Telekommunikationsnetzen.

Die Schunk Sintermetalltechnik GmbH zählt zu den führenden Herstellern von pulvermetallurgischen Bauteilen in Europa. Die Produktpalette reicht von axial gepressten Formteilen über selbstschmierende Gleitlager und pulvermetallurgisch spritzgegossene Bauteile bis hin zu Filtern und Kontaktwerkstoffen. Die Schunk Sintermetalltechnik GmbH ist eine von über 60 unabhängigen Firmen innerhalb der Schunk-Gruppe, die in den Kernbereichen Werkstoffe und Systemtechnik tätig ist. Neben der Schunk Sintermetalltechnik GmbH beschäftigen sich vier weitere Firmen innerhalb der Schunk-Gruppe mit der Herstellung von pulvermetallurgischen Bauteilen.

Die Firma Schunk erteilt im Rahmen des Projektes Unteraufträge an Firma Faulhaber. Die Firma Dr. Fritz FAULHABER GmbH & Co. KG fertigt qualitativ hochwertige elektrische Kleinstantriebe bestehend aus Motor, Getriebe, Encoder und Ansteuerung. Diese werden für eine Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen wie Medizintechnik, Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Luft- und Raumfahrttechnik,

Photo- und Videotechnik oder Datenträgertechnik eingesetzt. Neben einem großen Standardprogramm liefert FAULHABER zahlreichen Sonderausführungen für spezielle Anwendungen. So produziert und vertreibt FAULHABER einen Mikroantrieb mit 1,9 mm Außendurchmesser bestehend aus Motor und Getriebe, der gemeinsam mit dem IMM entwickelt wurde [BEC97, BEC98].

Das Zentrum für Material- und Umwelttechnik GmbH (ZMU), ein gemeinnütziges Unternehmen des FNE Forschungsinstituts für Nichteisen-Metalle Freiberg GmbH, wurde mit Zustimmung der Treuhandgesellschaft 01/93 als gemeinnützige F+E-Gesellschaft (GmbH) gegründet, und ist eine Einrichtung des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Das ZMU betreibt industrielle Grundlagenforschung im Rahmen von vorwettbewerblich nachfragenorientierte F+E-Projekte mit technischen und betriebswirtschaftlichen Zielen. Schwerpunkte sind die Bereiche Werkstofftechnik, Oberflächentechnik, Galvanotechnik, Analytik und Diagnostik. Die Kernkompetenzen der 26 Mitarbeiter sind neue Materialquellen, insbesondere modifizierte Pulver (Herstellung, Charakterisierung, Verarbeitung) für Oberflächenschichten auf Bauteilkomponenten, PVD-Beschichtungen und neue Weichlote.

5. Arbeitsschwerpunkte der Partner

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt Micro-P-PIM umfassen zum einen die Hard- und Software von Spritzgießmaschinen und die Werkzeugtechnik. Für das Mikropulverspritzgießen werden durch ARBURG Spritzaggregate mit 12 mm Schneckendurchmesser entwickelt. Ziel ist die Verweilzeit der Feedstocks in der Spritzeinheit zu reduzieren und eine Polymerdegradation der Binder zu verhindern. Die Steuerung muss eine vollautomatische Prozessführung mit einer mikrometergenauen Einstellung der Prozessparameter Weg und Geschwindigkeit für die Werkzeugfahrbewegungen gewährleisten. Beim Einspritzen soll eine präzise Einstellung des Sackwegs und des Druckes der Spritzeinheit realisiert werden. Die neue Maschinenteknik wird durch Mikrospritzgießen verschiedener Bauteile auf reproduzierbare Einhaltung der Parameter wie Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Drücke, Umschaltpunkte, Regelverhalten etc. untersucht. Dabei sollen die Besonderheiten des Mikrospritzgießens und Integration der entsprechenden Peripheriegeräte (Zusammenarbeit ARBURG mit FZK) Berücksichtigung finden.

Um eine schnelle Entwicklung zu realisieren, beginnen die Arbeiten zur Formmassen und Spritz-

gießwerkzeugen gleichzeitig. Die Entwicklung neuer Werkzeugkonzepte (JUNG-HANS) ist die Voraussetzung für die Präzision von Außen- und Innenkonturen an feinwerktechnischen Teilen mit Toleranzen bis in den Mikrometerbereich. Im Werkzeugbau sollen entsprechend den Anforderungen der Demonstratoren (KRONE, FRIATEC, Schunk, JUNGHANS) und Probekörper (FZK, Schunk, FRIATEC) die Besonderheiten des Mikrospritzgießens bei sehr engen Toleranzen integriert werden. Unter Einsatz kommerzieller Simulationstools parallel in Industrie (JUNGHANS) und Forschung (FZK) sind vergleichende Studien zur Formfüllung und zur Vorhersage der Prozessfenster für die Spritzparameter vorgesehen. Die Abläufe bei der Formfüllung, mögliche Entmischungszonen des Feedstocks und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung sollen simuliert und die Ergebnisse im praktischen Experiment überprüft werden (FRIATEC, Schunk, JUNGHANS, FZK).

Parallel mit der Entwicklung der Maschinen- und Werkzeugtechnik erfolgen die notwendigen Forschungsarbeiten zur Werkstoffentwicklung. Die geforderte Einengung der Toleranzen von pulverspritzgegossenen Bauteilen soll durch die Verwendung besonders feiner, reiner Ausgangspulver realisiert werden. Für Metalle (Schunk, Junghans, ZMU) wird angestrebt, den Anteil an Feinstpulver zu erhöhen. Favorisiert wird bei Metallen neben Carbonyleisen der ausscheidungshärtbare Edelstahl 17-4PH (1.4542). Um die Feinpulverausbeute zu erhöhen, wird eine geeignete Sichtung entwickelt (ZMU). Kommerziell erhältliche Keramikpulver auf Basis von Al_2O_3 werden in wässriger Suspension nachgemahlen, sinteraktiv konditioniert und sprühgetrocknet (FRIATEC) bzw. verschiedene Fraktionen an Y_2O_3 -stabilisiertem ZrO_2 -Pulver gemischt (FZK).

Die Charakterisierung der Pulver erfolgt hinsichtlich Pulvermorphologie, Korngröße und spezifische Oberfläche (ZMU, Schunk, FRIATEC, FZK). Für eine vollständige Formfüllung, eine Vermeidung von Entmischungen im Feedstock während der Formfüllung, eine deformationsfreie Entformung und eine schnelle Entbinderung müssen für Mikropräzisionsbauteile geeignete Bindersysteme gefunden werden (FRIATEC, FZK, Schunk). Entsprechende wirtschaftliche Entbinderungsprozesse für Binder müssen weiterentwickelt werden (FZK, Schunk, FRIATEC). Eine homogene Benetzung der Pulver durch den Binder bestimmt die Eigenschaften der Feedstocks, sein Fließverhalten und die Entformbarkeit von Grünlingen. Um die Fließfähigkeit der Feedstocks beim Mikropulverspritzgießen zu untersuchen, werden der kritische Pulverfüllgrad mit einem Messknetzer und die

rheologischen Daten ermittelt (FZK). Daneben stehen zur weiteren Charakterisierung Kegel-Scheibe-Viskosimeter, Zugprüfung, Metallographie und REM in Industrie und Forschung zur Verfügung (FZK, Schunk, FRIATEC).

Die Werkstoff-, Werkzeug- und Maschinenentwicklungen werden zur Erforschung und Entwicklung des eigentlichen Pulverspritzgießens zusammengeführt. Die durch die Simulation erarbeiteten Prozessfenster für die Spritzparameter einschließlich der Werkzeuge sollen die Basis für das Pulverspritzgießen mit einer exakten Abbildung der Werkzeugkavitäten in grat- und gradientenfreie Grünlinge bilden (FRIATEC, Schunk, JUNGHANS, FZK). Durch die thermomechanische und chemische Analyse der Feedstocks soll das geeignete Entbinderungsverfahren gefunden (katalytisch, lösen, thermisch) und die Entbinderungsprozesse für die verschiedenen Feedstocks entwickelt werden [TER90]. Die dazu notwendigen Labor- und Industrieanlagen stehen zur Verfügung (FRIATEC, Schunk, JUNGHANS, FZK). Nachfolgend wird das möglichst verzugsfreie Sintern entwickelt. Dabei soll das Magazin als Sinterunterlage dienen.

Durch Gegenüberstellung der geometrischen Vermessung einiger Demonstratoren (FZK) mit Untersuchungen z.B. unter Verwendung von Präzisionslehren oder anderen wirtschaftlichen Messmitteln (FRIATEC, Schunk, JUNGHANS, KRONE) sollen Ansätze erarbeitet werden, um den Aufwand der Qualitätskontrolle von Mikropräzisionsbauteilen auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren. Mit der Herstellung von Probekörpern werden Materialdaten von Grünlingen und gesinterten Werkstoffen erarbeitet sowie Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion von spritzgegossenen Mikropräzisionsbauteilen aus Keramik und Metall abgeleitet (Schunk, FRIATEC, FZK, Junghans).

Zur Charakterisierung von Ferrulen erfolgt neben REM (FZK) eine hochgenaue geometrische Vermessung bzw. die optische Prüfung von mit ihnen gefertigten Steckverbindern (KRONE). Zur Qualitätskontrolle für die Zahnblende (FRIATEC) erfolgen eine geometrische Vermessung (FRIATEC, FZK) und Fügeversuche mit einem Kieferdübel bzw. -stift (FRIATEC). Die Demonstratoren aus Metall - Planetenträger (FAULHABER) und Getriebeschnecke (JUNGHANS) - werden dreidimensional vermessen (Junghans, Schunk, FZK) und in ein passendes Getriebe gepaart mit zerspannten Metall- und/oder spritzgegossenen Kunststoffkomponenten eingebaut, um das dynamische Verhalten, die Laufruhe und die Lebensdauer zu untersuchen und abzuschätzen (Faulhaber, Junghans).

6. 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 - soll auch dazu beitragen, die ehemals führende Position Deutschlands im Bereich der Präzisions- und Feinwerktechnik wieder zu erlangen. Mit dem „Hochleistungsfertigungsverfahren“ Pulverspritzgießen soll eine weltweit bedeutende Position erreicht, auf dem europäischen und Weltmarkt mittel- und langfristig Marktanteile gesichert werden. Auch neue Märkte für Spritzgießmaschinen und –Werkzeuge, sowie Mikropräzisionsbauteilen bilden die Basis für den Erhalt und die Schaffung von Arbeitsplätzen.

Die Leistungsoptimierung und Innovation für neue Anwendungen der Pulverspritzgießtechnologie ist verbunden mit einer Reduzierung von Prozessschritten und Zykluszeiten und bringt somit mittel- und langfristig ökonomischen und ökologischen Gewinn.

Beispiele für mögliche künftige Mikropräzisionsbauteile sind keramische Implantate für die Dentaltechnik, die hohe Genauigkeitsanforderungen stellen und einem enormen Kostendruck unterliegen. Neue Komponenten für Mikrogetriebe und Zählwerke aus Metall könnten höhere Kräfte und Momente übertragen als Kunststoffteile. Durch ihre geringe Größe und komplexe Gestalt ist bisher keine wirtschaftliche Nachbearbeitung möglich. Bei Glasfasersteckverbindungen bzw. bei den für die Faserstecker erforderlichen Keramik-Ferrulen gab es zu Projektbeginn Lieferengpässe. Die zulässigen Maßtoleranzen dieser Präzisionsteile liegen unter einem Mikrometer. Eine entsprechend weiter entwickelte Verfahrenstechnik eröffnet auch die Möglichkeit Mikrobauteile mit Außenabmessungen im Submillimeter-Bereich zu fertigen.

7. Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger PFT für die zügige Begutachtung und Betreuung des Projekts (Förderkennzeichen 02PD2136), sowie unseren Geschäftsführungen für die konstruktive Unterstützung und strategische Entscheidung für das Projekt Micro-P-PIM.

8. Literatur

[BEC97] U. Beckord, R. Bessey: „Mikromotoren gewinnen Schwung“, F&M (Feinwerktech-

nik, Mikrotechnik, Mikroelektronik), Heft 11-12/97, Carl-Hanser Verlag.

[BEC98] U. Beckord, R. Bessey, C. Thürigen: „Das kleinste Planetengetriebe der Welt“, F&M (Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik), Heft 1-2/98, Carl-Hanser Verlag.

[BEN98] T. Benzler, H. Wöllmer, J. Haußelt: „Mikrotechnik und dünne Schichten: Technologiefelder mit Zukunft“, Ingenieur-Werkstoffe 7 (1998), S. 56-58.

[GER00] R.M. German: „Research Productivity and the Value to the PIM Market“; International Conference on the Powder Injection Molding of Metals, Ceramics and Carbides; Pennsylvania State University; March 20-22.2000.

[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.

[MAL01] Material- und Verfahrenentwicklung für mikrotechnische Hochleistungsbauteile, FZKA-Bericht 6662, Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlusspräsentation des HGF-Strategiefonds-Projekts. 2001

[SCHU99] I. Langer, E. Förster, M. Enders: „Fort-schritte beim pulvermetallurgischen Spritzgießen – Reproduzierbarkeit geometrischer und mechanischer Eigenschaften“; Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 15, Hrsg. H. Kolaska, VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Düsseldorf (1999).

[STU99] Studie Wirtschaftsministerium Ba-Wü: R. Bierhals, K. Cuhls, V. Hüntrup, M. Schünemann; U. Thies, H. Weule: „Wirtschaftliche Potentiale der Miniaturisierung aus industrieller Sicht“; Förderzeichen 4-4332.62-ISI/2 (2/1999).

[TER90] J.H.H. Ter Maat, W. Schuette, H.J. Sterzel: „Verfahren zur Herstellung eines organischen Sinterformteiles“; Europäisches Patent: EP 0 413 231 B1; (07.08.1990).

[WEC00] R. Wechsung: „Wachstumsmarkt Mikrosystemtechnik am Beispiel des LIGA-Mikrospektrometers“, FZKA-Bericht 6423, Forschungszentrum Karlsruhe, März 2000.

[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-Bauteilen aus Keramik und Metall

Das BMBF-Projekt Micro-P-PIM

J. Pannhorst¹⁾, **R. Ruprecht**²⁾

1) JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG

2) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Statuskolloquium Micro-P-PIM am 11. Februar 2004

Micro-P-PIM

Micro Precision Parts by Powder Injection Molding

Micro-P-PIM



Inhalt

- Bedarf und Stand
- Motivation und Ziele
- Lösungswege
- Definitionen PIM, MIM, CIM
- Prozessbeschreibung
- Aufgaben und Synergien
- Partner und Projektstruktur
- Demonstratoren, erwartete Ergebnisse

Micro-P-PIM

JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Bedarf

- Komplex geformte Mikro-Präzisionsbauteile:
Außenabmessungen analog Feinwerktechnik,
aber Toleranzen im Mikrometerbereich



FC-Stecker mit
Keramik-Ferrule
Toleranz: ca. 1µm

Stand

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

Micro-P-PIM

JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

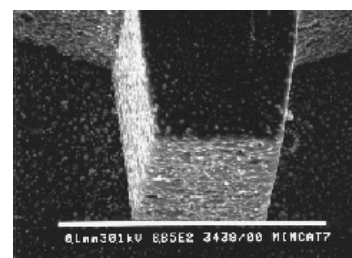
KRONE

schunk

LMU

Motivation und Ziele

- **Wirtschaftlich Produktion für Mikro-Präzisionsbauteile aus Metall und Keramik**
- **nachbearbeitungsarme Bauteile**
- **Reduzierung der Sintertoleranz auf unter 0,5%**
- **Kürzere Entbinderung**
- **Gestaltungsrichtlinien, Werkstoffdaten, Prüftechnik**



Pulver bestimmt Rauheit:
MIM: Zapfen-Breite 50 µm

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Lösungswege

Forschung & Entwicklung:

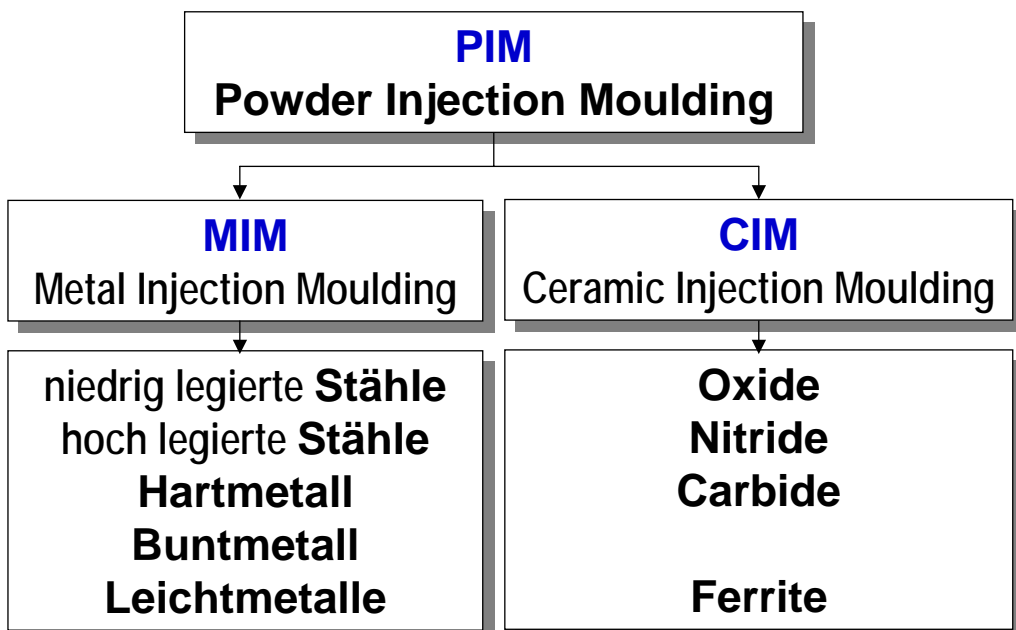
- **Pulver-Spritzgießen für Mikro-Präzisionsbauteile aus Metall und Keramik**
- **Maschinen- und Werkzeugpräzision**
- **feines Pulver, homogene Formmasse = Feedstock**
- **Magazinierung kompatibel zum Entbindern und Sintern**



Formmasse bestimmt Qualität:
 Zugstab: Querschnitt 0,1 x 0,2 mm²

Micro-P-PIM

Begriffe: Pulverspritzgießen



JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

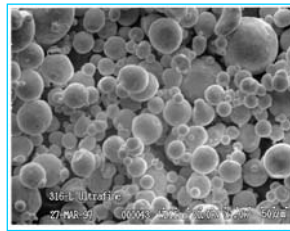
FRIATEC

KRONE

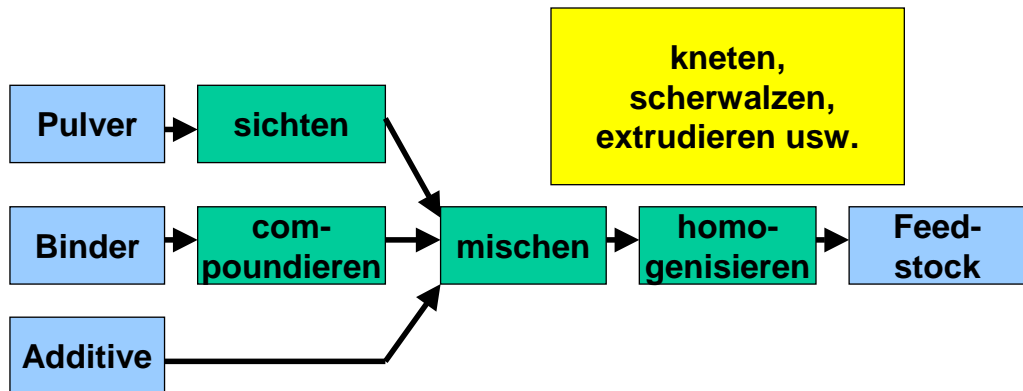
schunk

LMU

Vom Pulver zur Formmasse = Feedstock



Pulver
 charakterisieren



Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

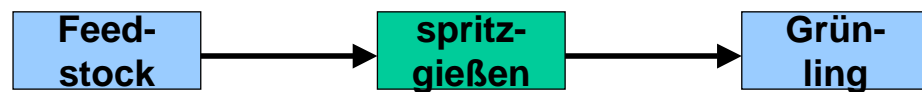
FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

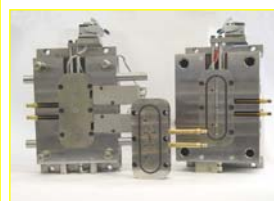
Formgebung mit Feedstock zum Grünling



Maschine

Werkzeug

Magazin



● Prozessparameter

- Temperaturen
- Druck
- Zykluszeiten

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

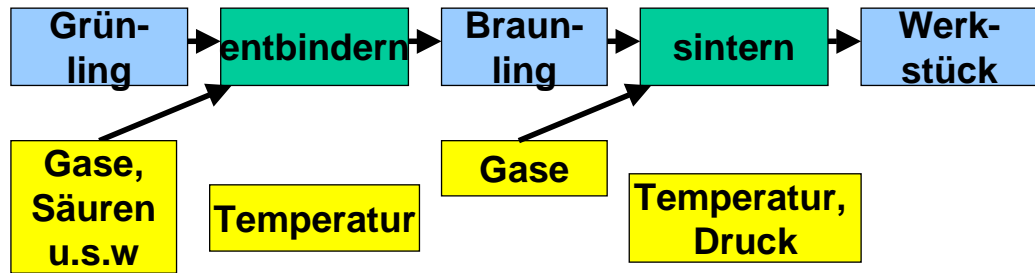
KRONE

schunk

LMU

Vom Grünling zum gesinterten Werkstück

Micro-P-PIM



● Prozessparameter

- Temperaturführung
- Atmosphäre

Micro-P-PIM

Aufgaben in Micro-P-PIM

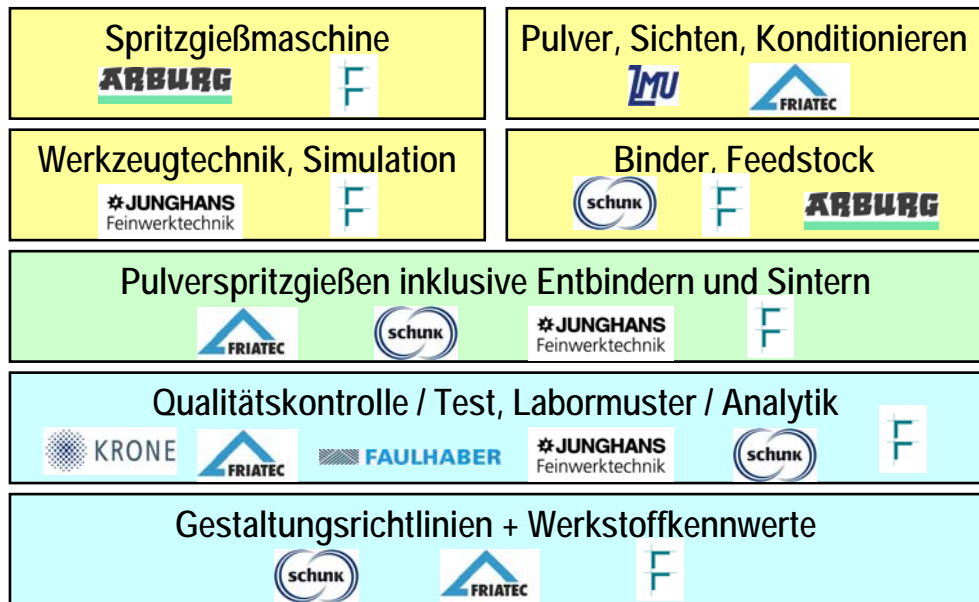


Stand heute:
 Spritzgieß-Werkzeug
 für Uhren-Gehäuse

- **Maschinentechnik:**
 Spritzaggregat, Steuerung
- **Werkzeugtechnik:**
 Präzision, Kernzüge,... ; Magazin
- **Sichten:** feinste Pulver, Charakterisierung
- **Feedstocks** für **Keramik ZrO_2 , Al_2O_3 und Stahl 17-4PH**
- **Prozessentwicklung** zum eigentlichen Pulverspritzgießen, Entbindern und Sintern: kurze Prozesszeiten
- **4 Demonstratoren:**
Ferrule, Zahnblende, Planetenträger, Getriebeschnecke
- **Qualitätskontrolle** , Prüfmethodik, Werkstoffdaten an Probekörpern
- **Gestaltungsrichtlinien, Simulation Formfüllung**

Aufgabenteilung und Projektstruktur

Micro-P-PIM



Micro-P-PIM

Arbeitskreise und Synergien



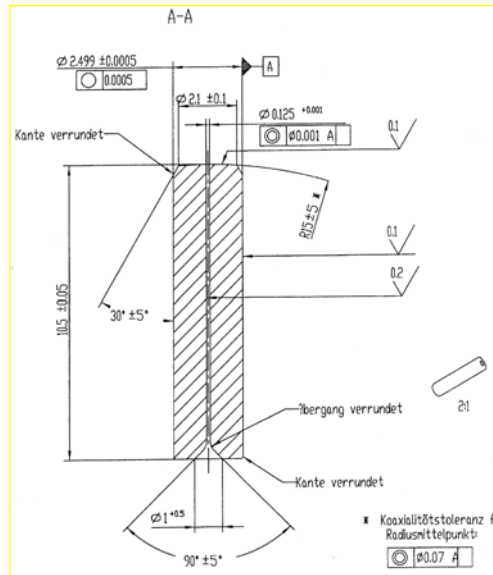
Arbeitskreise	Ferrule	Zahnblende	Planeten-träger	Getriebe-schnecke	Probe-körper	SG-Maschine
ARBURG					M	V
Forschungsz.	V	M	M	M	V	M
FRIATEC		V			M	M
Junghans FT	M	M	M	V	M	M
KRONE	M					
Schunk SST			V	M	M	M
ZMU (= FNE)			M	M	M	

V = verantwortlich

M = Mitarbeit

Demonstratoren Keramik:

Micro-P-PIM



Ferrule: Zeichnung

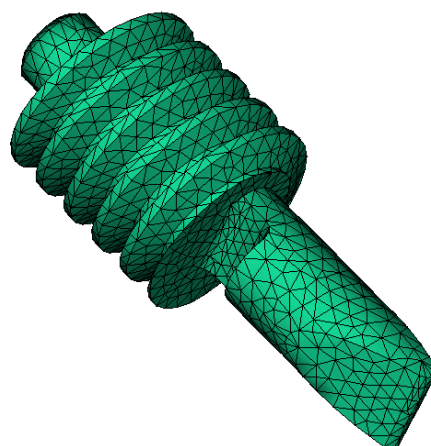


Zahnblende: 3D - CAD

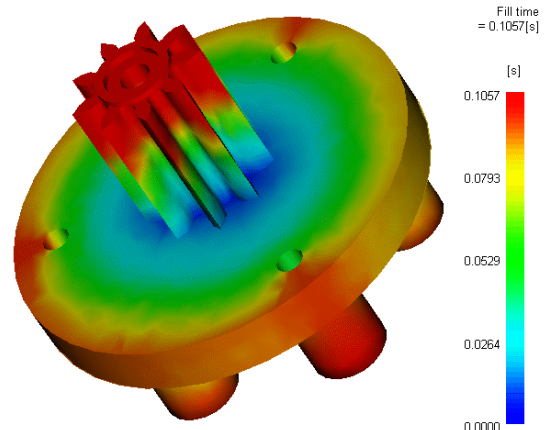
Micro-P-PIM



Demonstratoren Metall:



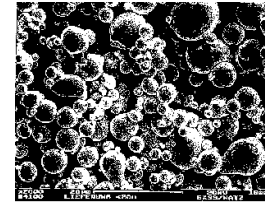
Getriebeschnecke: FEM-Netz



Planetenträger: Simulation

Micro-P-PIM

Erwartete Ergebnisse:



Metall-Pulver
17-4PH, $d_{50} = \text{ca. } 10 \mu\text{m}$

- **Wirtschaftliches Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikro-Präzisionsbauteile**
- **passende Spritzgießmaschine und Werkzeugtechnik**
- **schnelles Entbindern und Sintern**
- **Feinskalige Pulver durch Sichten (insbesondere für Metall)**
- **Micro-P-PIM für 4 Demonstratoren aus verschiedenen Werkstoffen:**
- **Keramik: Ferrule aus ZrO_2 , Zahnblende aus Al_2O_3 , Stahl: Planetenträger und Getriebebeschnecke aus 17-4PH**
- **Gestaltungsrichtlinien, Werkstoffdaten, Eignung von Simulationstools untersucht**

Micro-P-PIM

Pulverspritzgießen nachbearbeitungsarmer Mikro-Präzisions-Bauteilen aus Keramik und Metall

Das BMBF-Projekt Micro-P-PIM

Johann Pannhorst¹⁾, Robert Ruprecht²⁾

1) JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG

2) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Wir danken dem BMBF für die Förderung
02PD2130 bis 02PD21136
und dem Projekträger PFT für die Betreuung

**Pulverspritzgießen von Keramik-Ferrulen
für Glasfaserverbindungen im Monomode-Bereich**

Pulverspritzgießen von Keramik-Ferrulen für Glasfaserverbindungen im Monomode-Bereich

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

¹⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,
Institut für Materialforschung III

²⁾ Krone GmbH

Zusammenfassung

Für Steckverbindungen von Lichtwellenleitern in modernen Datennetzwerken werden zur exakten Positionierung der Glasfasern hochgenaue Führungsröhrchen, so genannte Ferrulen, benötigt. Bei Keramik-Ferrulen für Monomode-Lichtwellenleiter liegen die Bauteiltoleranzen im Submikrometerbereich. Diese Genauigkeit kann bei der Herstellung durch das Extrudieren dieser Keramikteile nicht erreicht werden – es ist eine aufwändige Hartbearbeitung der Sinterteile durch Schleifen erforderlich, die die Herstellkosten drastisch erhöht.

Da eine möglichst endkonturnahe, nachbearbeitungsarme Herstellung der Ferrulen somit von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist, wurde die Ferrule als Demonstrator-Bauteil für das Projekt „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ (Micro-P-PIM) gewählt. Das Ziel des Teilprojekts ist eine Optimierung des Pulverspritzgießprozesses für Zirkonoxid-Keramik im Hinblick auf die größtmögliche geometrische Bauteilpräzision. Die Arbeiten werden am Institut für Materialforschung III des Forschungszentrums Karlsruhe mit Unterstützung der Projektpartner durchgeführt.

1. Das Demonstratorbauteil Ferrule

1.1 Wo werden Ferrulen eingesetzt?

Durch zunehmende globale Vernetzung und Etablierung neuer Technologien sind die Datenübertragungsraten in den letzten Jahren stark gestiegen. Daher kommen für Telekommunikationsnetze, private Datennetze (LAN/ WAN) und Kabelfernsehen vermehrt Lichtwellenleiter (LwL) mit Glas- oder Polymerfasern zum Einsatz.



Abb. 1 Zirkonoxid-Ferrulen:
von links: Grünling, gesintertes Teil und Glasfaserstecker Typ FC/PC

Die zur Verbindung von Glasfaserkabeln benötigten Steckverbinder sind hochpräzise Bauteile, die strengen Anforderungen genügen müssen,

denn die Schwächung des übertragenen Signals durch den Stecker (Einfügedämpfung) soll möglichst gering sein. Das Kernstück dieser Stecker bilden hochgenaue Führungsröhrchen, so genannte Ferrulen (s. Abb. 1), die die zentrische Fixierung der Glasfaser sicherstellen sollen. Monomode-Glasfasern haben einen Kerndurchmesser von ca. 9 µm, so dass bereits ein axialer Versatz zweier Fasern von wenigen Mikrometern eine erhebliche Einfügedämpfung zur Folge hat. Damit die Datenübertragung auch bei wiederholten Steckvorgängen und wechselnden Temperaturen gewährleistet ist, werden die Ferrulen aus Zirkondioxid-Keramik hergestellt. Die für die Funktionssicherheit notwendigen Toleranzen für Außendurchmesser, Bohrungsdurchmesser und Konzentrität der Bohrung sowie die Oberflächengüte liegen im Submikrometerbereich (vgl. Abb. 2). So ist zum Beispiel der Außendurchmesser der Ferrule von 2,499 mm mit $\pm 0,5 \mu\text{m}$ und der Durchmesser der Bohrung von 0,125 mm mit $+1 \mu\text{m}$ toleriert. Die Oberflächenqualität der Ferrule ist am Außendurchmesser auf $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ und in der Bohrung auf $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ festgelegt.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Glasfaserstecker werden jährlich in Millionenstückzahlen produziert – für die Fertigung solcher Losgrößen ist das Spritzgießverfahren prädestiniert. Während der Startphase des Projekts wurden Ergebnisse zum Pulverspritzgießen von Ferrulen veröffentlicht. Da allerdings auch das keramische Pulverspritzgießen (CIM) heute nicht in der Lage ist, die geforderten Toleranzen zu erreichen, ist eine Hartbearbeitung (Schleifen und Polieren) der gesinterten Ferrulen derzeit unumgänglich [WIT02]. Diese Nachbearbeitung steigert die Herstellkosten erheblich.

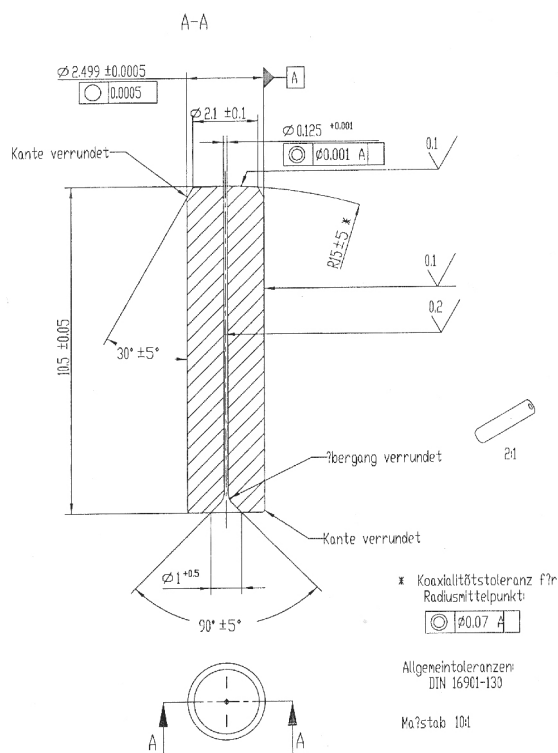


Abb. 1: Maße und Toleranzen von Monomode-Keramik-Ferrulen (Krone GmbH)

Daher soll im Rahmen des Micro-P-PIM-Projekts der Herstellungsprozess von Keramik-Ferrulen untersucht werden. Das Ziel ist eine möglichst endkonturnahe Fertigung der Bauteile durch Pulverspritzgießen und damit eine deutliche Senkung der Herstellkosten.

2. Arbeitsprogramm und Methoden

Die Untersuchung der Faktoren, die die Fertigungsgenauigkeit von Keramik-Ferrulen beeinflussen, soll am Forschungszentrum Karlsruhe erfolgen. Hierbei sind die hier geleisteten Vorarbeiten von Vorteil: Das Institut für Materialforschung III beschäftigt sich seit 1996 mit dem Pulverspritzgießen von mikrostrukturierten Bauteilen aus Metall und Keramik [BEN01, PIO97,

MER02]. Es wird bei der Arbeit am Teilprojekt Ferrule von den Projektpartnern intensiv unterstützt: das Spritzgießwerkzeug (Abb. 3) wurde bei der Junghans GmbH (Schramberg) gefertigt und die verwendete Spritzgießmaschine wird von der ARBURG GmbH (Loßburg) zur Verfügung gestellt. Die Herstellung der Grünlinge erfolgt auf der Spritzgießmaschine ARBURG Allrounder 420 C 600-100 (max. Schließkraft 600 kN). Die Weiterentwicklung des PIM-Prozesses für Ferrulen vom Feedstock, über Formgebung bis zum Sintern wird am Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Die Vermessung und Erprobung der Ferrulen sollen in Zusammenarbeit mit dem Glasfasersteckerhersteller Krone GmbH (Berlin) erfolgen.

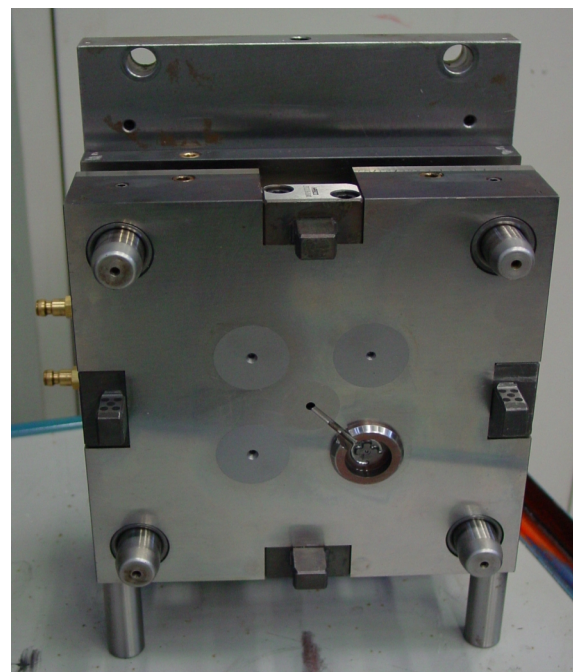


Abb. 2: Spritzgießwerkzeug der Fa. Junghans Feinwerktechnik für Keramik-Ferrulen: Düsen-seite (o.), Kavität Düsen-seite (u. l.), Kavität Auswerferseite (u. r.).

2.1 Analyse des PIM-Prozesses

Zum Spritzgießen der Ferrulen kommt zunächst ein handelsüblicher Zirkonoxid-Ferrulen-Feedstock (INMAFEED K1011, vgl. Tab.1) zum Einsatz. Das verwendete Spritzgießwerkzeug ist

genauso aufgebaut wie ein Werkzeug in für eine spätere industrielle Ferrulenproduktion – in dem 4-fach-Werkzeug ist für die Laboruntersuchungen allerdings nur eine Kavität ausgearbeitet (s. Abb.3).



Abb. 4: Spritzgießmaschine ARBURG Allrounder 270 C (Foto: ARBURG)

Zunächst wird die Geometrie der Grünlinge untersucht werden, damit die Abformgenauigkeit beim eigentlichen Forschungsprozess beurteilt werden kann. Die Maße der Grünlinge werden mit denen des Spritzgießwerkzeugs verglichen. Anschließend können die Bauteile entbindert werden (zunächst im Wasserbad, anschließend thermisch bei bis zu ca. 300 °C). Nach dem Sintern bei ca. 1500 °C soll die Bauteilgeometrie erneut untersucht werden. Schließlich soll die Funktionsfähigkeit der Ferrulen mit montierter Glasfaser durch Krone GmbH getestet werden.

Hersteller	Inmatec GmbH, Rheinbach
Produkt	Zirkonoxid ZrO_2 mit Verarbeitungsadditiven
Keramisches Pulver	ZrO_2 , 94,5% Y_2O_3 -teilstabilisiert TZ-3YS-E (Tosoh Corp.)
Theor. Dichte	6,05 g/cm ³
Schwundmaß	ca. 22% (linear)

Tab. 1: Materialdaten Ferrulen-Feedstock INMAFEED K1011 [INM02]

2.2 Aufgabe: Prozess-Simulation

Parallel zu bisherigen Spritzgießexperimenten wurde bereits die Formfüllung beim Pulverspritzgießprozess am Computer simuliert. Durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Experimenten soll die Verlässlichkeit der Füllsimulation beurteilt werden.

Für die Simulation sind rheologische, thermische und mechanische Materialdaten des Feedstocks

erforderlich (vgl. Abb. 5), die für die verwendeten Formmassen ermittelt wurden. Die Simulation wurde mit der kommerziellen Software Moldflow durchgeführt werden. Für die Berechnung wurden CAD-Daten des Bauteils und des Angussystems zugrunde gelegt (vgl. Abb. 6).

Feedstock	Grünling
<ul style="list-style-type: none"> • Dichte ρ • Rheologische Eigenschaften • Thermische Daten <ul style="list-style-type: none"> ○ Wärmekapazität c_p ○ Temperaturleitfähigkeit α ○ Wärmeleitfähigkeit λ ○ Übergangstemperaturen • p-V-T-Daten 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Daten <ul style="list-style-type: none"> ○ Elastizitätsmodul E ○ Querkontraktion ν ○ Schermodul G • Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Abb. 5: Für die Füllsimulation mit Moldflow notwendige Werkstoffdaten von Feedstock und Grünling

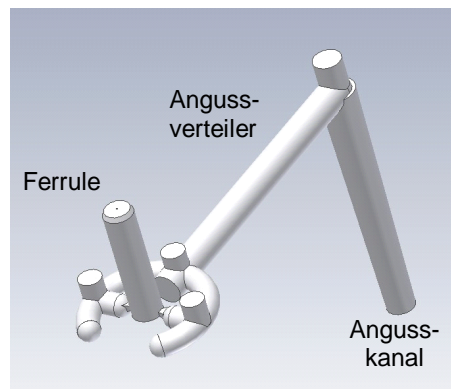


Abb. 6: 3-D CAD-Modell von Ferrule, Anguss- und Verteilersystem für die Simulation der Formfüllung

2.3 Aufgabe: Prozess-Optimierung

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus Analyse und Simulation des Pulverspritzgießprozesses sollen die entscheidenden Einflussgrößen ermittelt und der Herstellungsprozess für Keramik-Ferrulen optimiert werden. Dies schließt auch Verbesserungen von Feedstockrezepturen, Bauteilgeometrie und Werkzeugdesign mit ein. Das Ziel ist hierbei eine Steigerung der Bauteilqualität in Bezug auf Geometrie, Toleranzen und Oberflächengüte und damit eine Senkung der Kosten für die Hartbearbeitung der Sinterteile.

3. Stand der Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Einfahren des Spritzgießprozesses

Das Spritzgießwerkzeug ist fertig gestellt und mit ihm wurden im Rahmen der Bemusterung bei der Junghans GmbH bereits 1200 Grünlinge im Rahmen der Werkzeugabnahme und der Parameterentwicklung gespritzt. Eine Fertigung im kontinuierlichen Betrieb (Zykluszeit ca. 25 Sekunden) ist möglich, die Entnahme der Bauteile erfolgte allerdings zunächst von Hand, da noch kein Entnahmehandling verfügbar war.

Eine neue Spritzgießmaschine wurde bei der ARBURG GmbH hergestellt über die Jahreswende 2003/2004 abgenommen. Anfang 2004 wird sie am Forschungszentrum Karlsruhe in Betrieb genommen. Die weitere Prozessentwicklung erfolgt auf dieser Maschine.

3.2 Simulation des Spritzgießprozesses

Die zur Simulation notwendigen rheologischen, thermischen und mechanischen Materialdaten wurden am Forschungszentrum Karlsruhe ermittelt (vgl. Abb. 5).

Mit dem Softwaretool Moldflow wurde die Formfüllung simuliert und es konnten Drücke und Temperaturen während des Füllvorgangs berechnet werden. Abbildung 7 zeigt den minimalen Druckbedarf für den idealen Fall, dass die Formmasse das Ende des Fließweges drucklos erreicht.

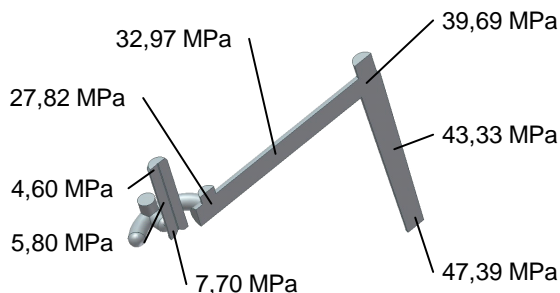


Abb. 7: Verlauf des minimalen Fülldruckes in Ferrule und Angussystem am Ende der Füllphase (nach 0,31 s), berechnet mit dem Softwaretool MOLDFLOW®

3.3 Vermessung der Bauteile

Für die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Bauteilqualität und die Optimierung des Spritzgießprozesses ist eine Vermessung der Ferrulen nach allen entscheidenden Prozessschritten notwendig. Die

engen Toleranzen im Submikrometerbereich stellen hierbei allerdings sehr hohe Anforderungen an die Messtechnik. Die Qualität von Messergebnissen wird grundsätzlich von vielen Faktoren beeinflusst: von der messenden Person, vom Messobjekt und der Messmethode, der Qualität des Messgerätes und nicht zuletzt von den Umgebungsbedingungen während der Messung [PFE98]. Bei mikrostrukturierten Bauteilen kommt erschwerend hinzu, dass mit abnehmender Strukturgröße die Unterscheidung zwischen Oberflächenrauheit und Form- bzw. Geometriefehlern schwerer fällt.

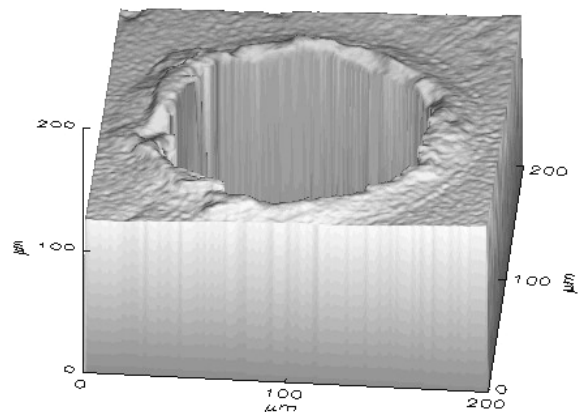


Abb. 8: Topographie der Bohrung (Kopplungsseite) an einem spritzgegossenen Ferrulen-Grünling, Bildausschnitt: 200 µm × 200 µm, vermessen mit FRT MicroGlider

Der Aufbau einer für die Keramik-Ferrulen geeigneten Messtechnik mit vertretbarem Messzeit- und Kostenaufwand ist daher angestrebt, eine Lösung alternativ zu dem für Ferrulen bekannten Verfahren wird noch gesucht. Damit zunächst die am Forschungszentrum Karlsruhe im Programm Mikrosystemtechnik vorhandenen Messgeräte genutzt werden können, soll durch vergleichende Messungen mit mehreren Methoden und bei mehreren Projektpartnern die Unsicherheit der Messergebnisse abgeschätzt und minimiert werden.

An den Grünlingen, die bei der Bemusterung des Spritzgießwerkzeuges abgeformt wurden, wurden erste Geometrie-Vermessungen durchgeführt. Abbildung 8 zeigt den Bereich der Bohrung an der Koppelstelle eines Ferrulen-Grünlings. Die Messung wurde mit einem MicroGlider (Hersteller FRT Fries Research and Technology GmbH, Bergisch Gladbach) durchgeführt.

4. Ausblick

Als nächste Arbeitsschritte sind die Analyse des Pulverspritzgießprozesses auf der neuen Spritzgießmaschine der Fa. ARBURG mit dem Werk-

zeug der Fa. Junghans Feinwerktechnik geplant. Außerdem wird die Messtechnik zur Qualitätskontrolle der Ferrulen erprobt und verbessert – in diesem Zusammenhang ist auch ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Messverfahren in Zusammenarbeit mit der Krone GmbH vorgesehen.

5. Danksagung BMBF und Kollegen

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und bei der Projektträgerschaft PFT für die Betreuung des Projekts Micro-P-PIM: Förderzeichen 02PD2136. Weiterhin möchten wir uns bei den Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit bedanken. Unser Dank gilt auch allen Kollegen am Forschungszentrum Karlsruhe, die zum Fortschritt des Projekts beigetragen haben, insbesondere Frau Marion Merl sowie den Herren Heinz Walter, Klaus Plewa, Gissur Örylgsson, Steffen Rath, Otto Jacobi, Michael Schulz und Markus Rhode.

6. Literatur

- [BEN01] Benzler, T.: „Pulverspritzgießen in der Mikrotechnik“, (2001). *Wissenschaftliche Berichte FZKA-6620, Forschungszentrum Karlsruhe; Diss. Univ. Freiburg (Breisgau)*
- [INM02] N. N.: „INMAFEED K1011. Technisches Datenblatt Ferrul-Feedstock“, Mai 2002. (Bezugsadresse:

INMATEC GmbH, Heerstrassenbenden 10, D-53359 Rheinbach)

- [MER02] Merz, L.; Rath, S.; Piotter, V.; Ruprecht, R.; Ritzhaupt-Kleissl, J., Haußelt: „Feedstock development for micro powder injection molding“, *Microsystem Technologies* 8, (2002). S. 129-132.
- [PFE98] Pfeifer, T.: „Fertigungsmesstechnik“, München: Oldenbourg, 1998. S. 48 ff.
- [PIO97] Piotter, V.; Hanemann, T.; Ruprecht, R.; Haußelt, J.: „Injection molding and related techniques for fabrication of microstructures“, *Microsystem Technologies* 3, München: Springer, (1997). S. 129-133.
- [WIT02] Von Witzleben, M.; Kollenberg, W.: „Keramik-Spritzgießen in der Praxis. Wer das sensible Verfahren beherrscht, dem steht ein enormes Marktpotential offen“, *Kunststoffe* 92, Heft 6, München: Hanser, 2002, S. 52-56.



Micro-P-PIM



PIM von Keramik-Ferrulen für Glasfaserverbindungen im Monomode-Bereich

M. Beck, V. Piotter, R. Ruprecht, K. Müller, J. Haußelt ¹⁾
D. Rund ²⁾

¹⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

²⁾ Krone GmbH

Statuskolloquium Micro-P-PIM am 11. Februar 2004



Micro-P-PIM



Inhalt

- Vorstellung IMF III
- Was ist eine Ferrule?
 - Aufbau einer Glasfaser
 - Anforderungen und Funktionsgestalt von Keramik-Ferrulen
 - Industrielle Produktion von Ferrulen
- Arbeitsprogramm Micro-P-PIM Ferrule
 - PIM-Prozess für Ferrulenfertigung
 - Simulation des Pulverspritzgießprozesses
 - Feedstock-Charakterisierung
 - Vermessung von Ferrulen



Aktivitäten am IMF III in MIKRO und NANO

Institut für Materialforschung III (Werkstoffprozesstechnik)

Prof. Dr. J. Haußelt

Prozessentwicklung
und Versuchstechnik

Dr. R. Ruprecht

Nanomaterialien

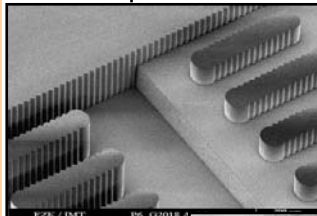
Dr. D. Szabo

Keramik

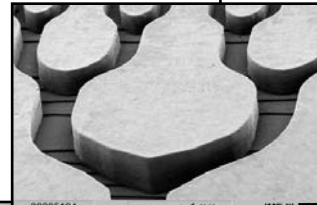
Dr. H.-J. Ritzhaupt-Kleissl

Korrosion

Dr. J. Konys

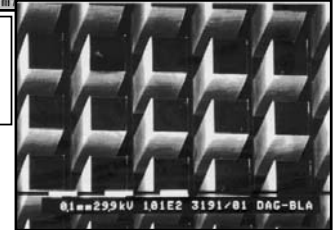
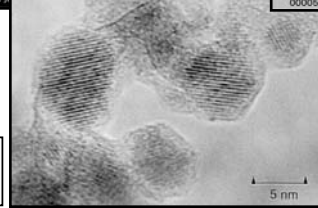


Mikro-
Spritzgießen



Keramische
Mikrostrukturen
Neue Keramiken

Nano-
Composites



Mikro-
Galvanik

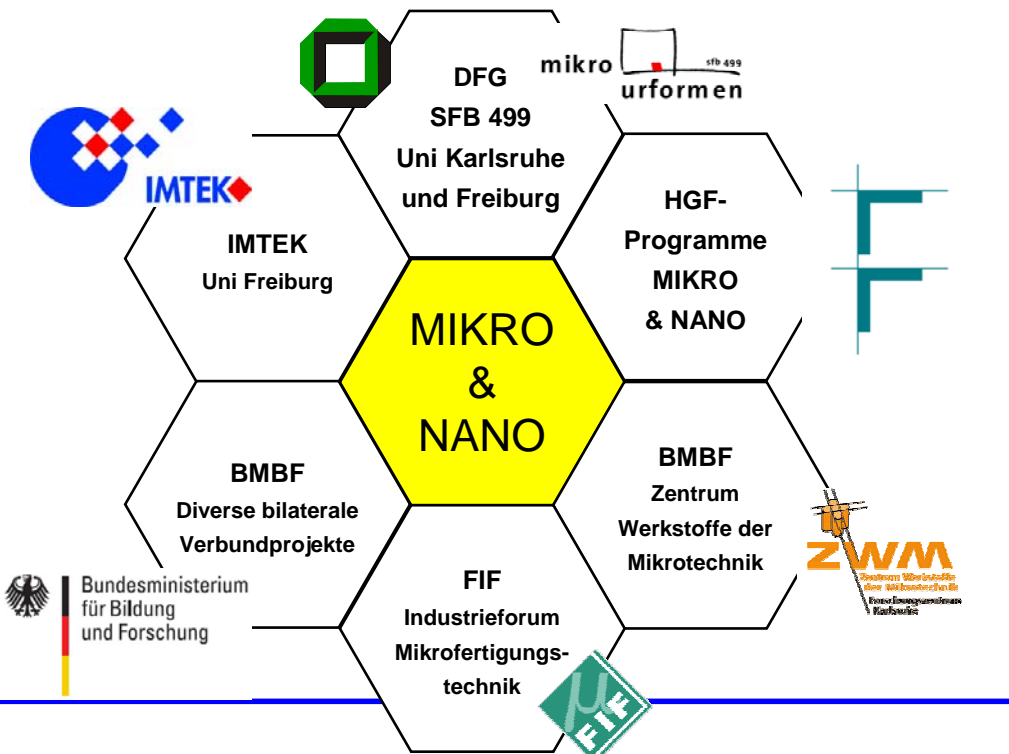
Micro-P-PIM



Werkstoff-Prozesstechnik in MIKRO und NANO



Micro-P-PIM



Was ist eine Ferrule?

GEFÖRDERT VOM
 Bundesministerium
 für Bildung
 und Forschung
 PFT
 Projektträger des BMBWF
 Produktion und
 Fertigungstechnologien
 Forschungszentrum
 Karlsruhe

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

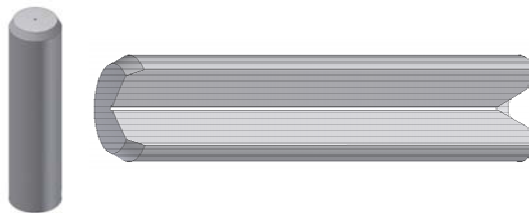
KRONE

schunk

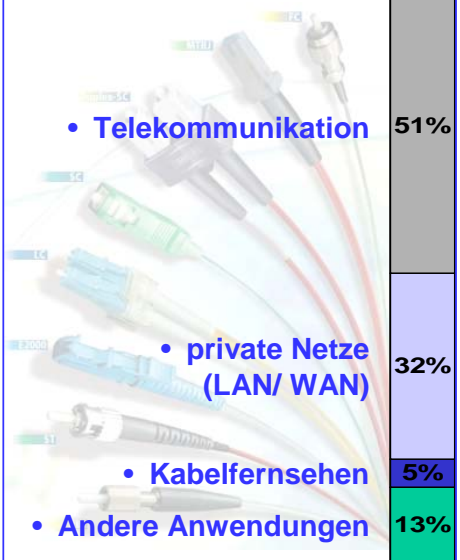
LMU



hochpräzises mechanisches
 Führungsröhrchen für
 LwL-Steckverbinder



Einsatzgebiete:



Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

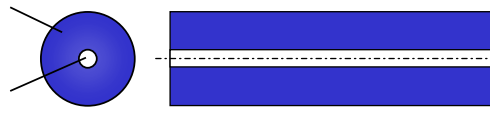
schunk

LMU

Aufbau einer Glasfaser

Mantel (Ø 125 µm)

Kern



$$n_{\text{Kern}} > n_{\text{Mantel}}$$

Werkstoff:
 Quarzglas (SiO₂)

	Lichtausbreitung (Strahlungswege)	d_k [µm]	$B \cdot l$ [GHz·km]
Monomode (Singlemode, SM)		8..10	> 10
Multimode (MM) (Gradientenprofil)		ca. 50	ca. 1

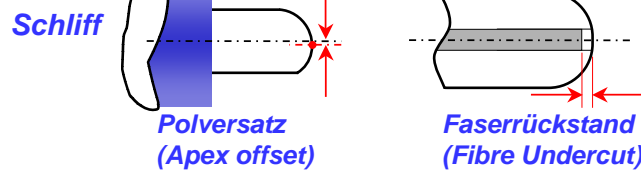
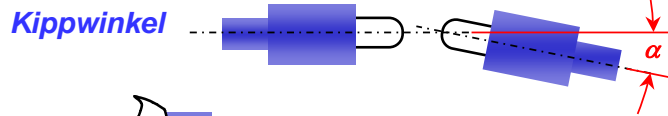
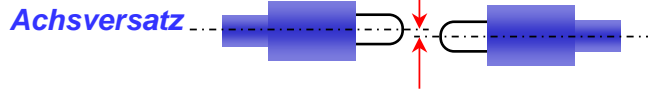
Anforderungen und Funktionsgestalt



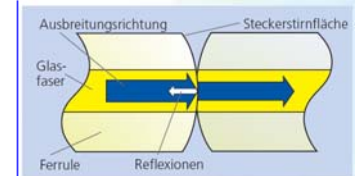
Funktionsprinzip: Stift-Hülse

Ziel: minimale Einfügedämpfung

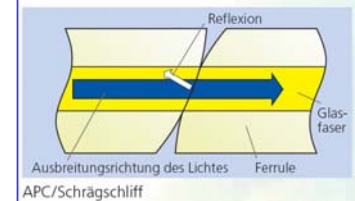
Verbindungsprobleme



Schliffarten



PC/UPC-Schliff



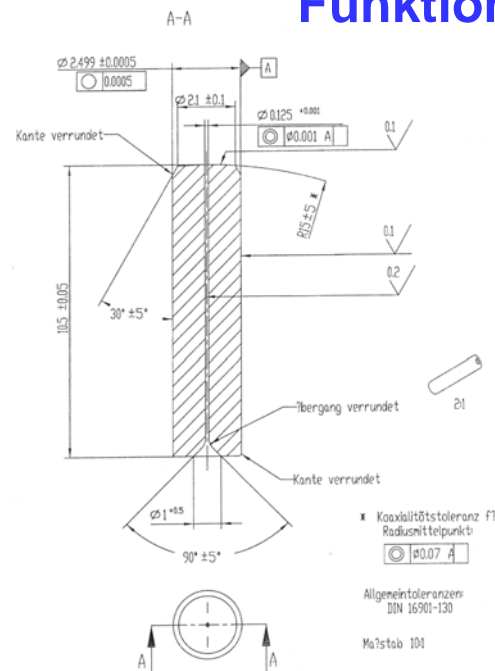
APC/Schrägschliff



Micro-P-PIM



Funktionsgestalt



Monomode-Ferrule

– Maßtoleranzen

$D_a \varnothing 2,499 \pm 0,0005$

$D_i \varnothing 0,125 + 0,001$

– Form- und Lagetoleranzen

○ 0,0005

⊗ $\varnothing 0,001 A$

– Oberflächengüte

$R_a 0,1 (D_a)$

0,2 (D_i)



Micro-P-PIM





Micro-P-PIM



- **Fertigungsverfahren**
 - Extrusion
 - Pulverspritzguss



- **Nachbearbeitungsaufwand hoch**
 - Hartbearbeitung (Schleifen und Polieren)

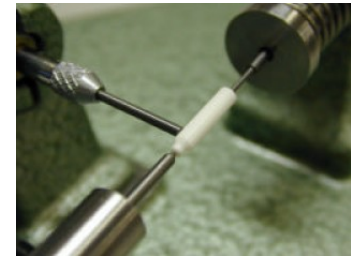


Foto: Tammy Machinery Co. Ltd. (Japan)

- **Herstellung von Ferrulen in Asien (Japan, China ...)**



Micro-P-PIM



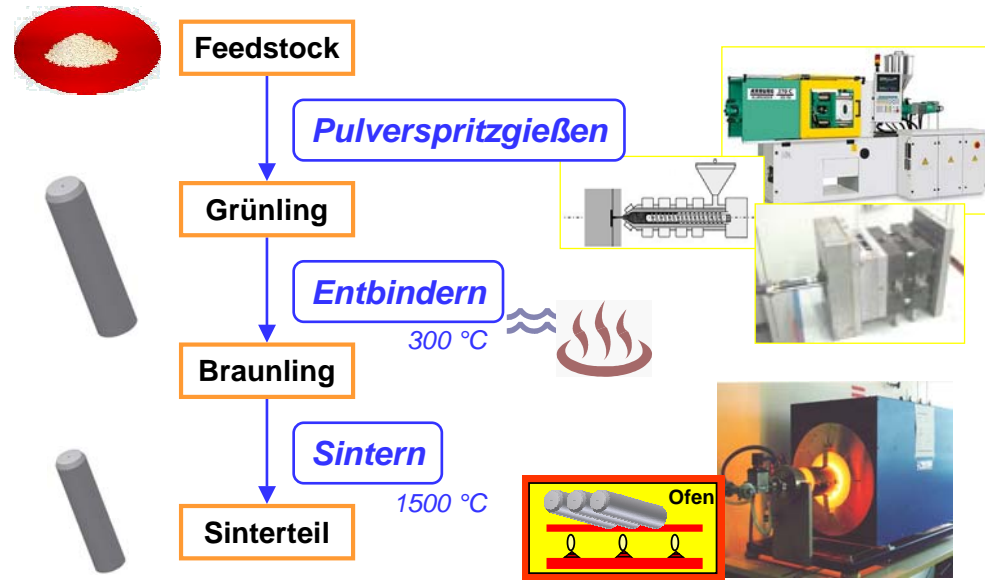
Arbeitsprogramm Micro-P-PIM Ferrule

- **Simulation PIM-Prozess**
- **Feedstock-Charakterisierung**
- **Bemusterung/ Einfahren Spritzgießwerkzeug und -maschine**
- **Untersuchung der Ferrulen-Geometrie**
 - Vermessung Spritzgießwerkzeug
 - Vermessung Geometrie (Grünling u. Bauteil)
 - Bauteilerprobung *in Bearbeitung*
- **Analyse PIM-Prozess**
 - Einfahren des Prozesses (Spritzgießen – Entbindern – Sintern)
 - Untersuchung Einflussfaktoren
- **Weiterentwicklung PIM-Prozess** (Prozessparameter, Bauteil- u. Werkzeugdesign)

Fertigung von Ferrulen durch CIM

Ziel: Nachbearbeitungsarme, endkonturnahe
 Fertigung durch keramisches Pulverspritzgießen

Micro-P-PIM



ZrO₂-Feedstock für CIM-Prozess bis dato

Bezeichnung INMAFEED K1011
 Zirkonoxid ZrO₂ mit Verarbeitungsadditiven

Hersteller Inmatec GmbH, Rheinbach

Keramisches Pulver ZrO₂, 94,5% BET-Oberfläche 5,81 m²/g
 Y₂O₃-teilstabilisiert d₅₀ = 0,51 µm
 TZ-3YS-E (Tosoh Corp.) d₉₀ = 0,84 µm

Theoretische Dichte 6,05 g/cm³

Schwundmaß ca. 22 % (linear)

Entbinderung Zweistufig
 (in Wasser/ thermisch)

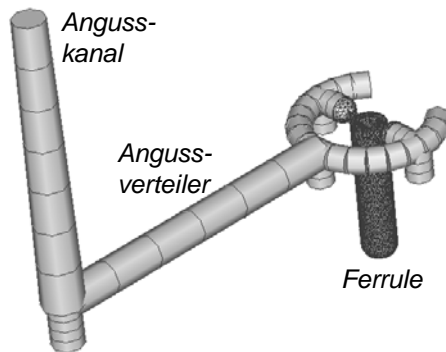
Sintertemperatur ca. 1500 °C (in Luft)

Micro-P-PIM



Simulation des PIM-Prozesses

Micro-P-PIM



Spritzparameter:

- Werkzeugtemperatur: 60 °C
- Formmassentemperatur: 160 °C
- Füllzeit: 0.3 s
- Umschaltzeitpunkt: 94 Vol. %
- Nachdruckzeit: 1.2 s
- Kühlzeit: 1.5 s

Formmasse: Inmatec K1011 (Ferrule)

Formteilvolumen:

- Ferrule: 0.1124 cm³
- Angussystem: 0.7278 cm³

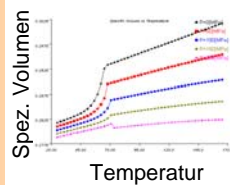
Modellgröße

- 61653 Tetraeder-Elemente
- 50 Anguss-Elemente
- 12071 Knoten

Micro-P-PIM

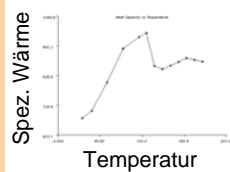
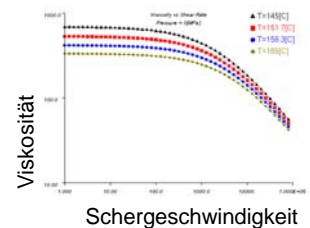


Materialdatensatz für Füllsimulation



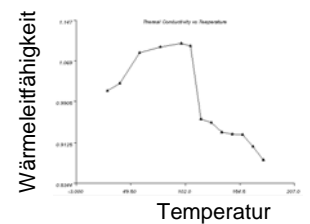
Rheologische Eigenschaften

- Viskosität
- PVT-Daten
- Übergangstemperatur (flüssig/fest)



Thermische Eigenschaften

- Spezifische Wärme
- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmeausdehnungskoeffizient



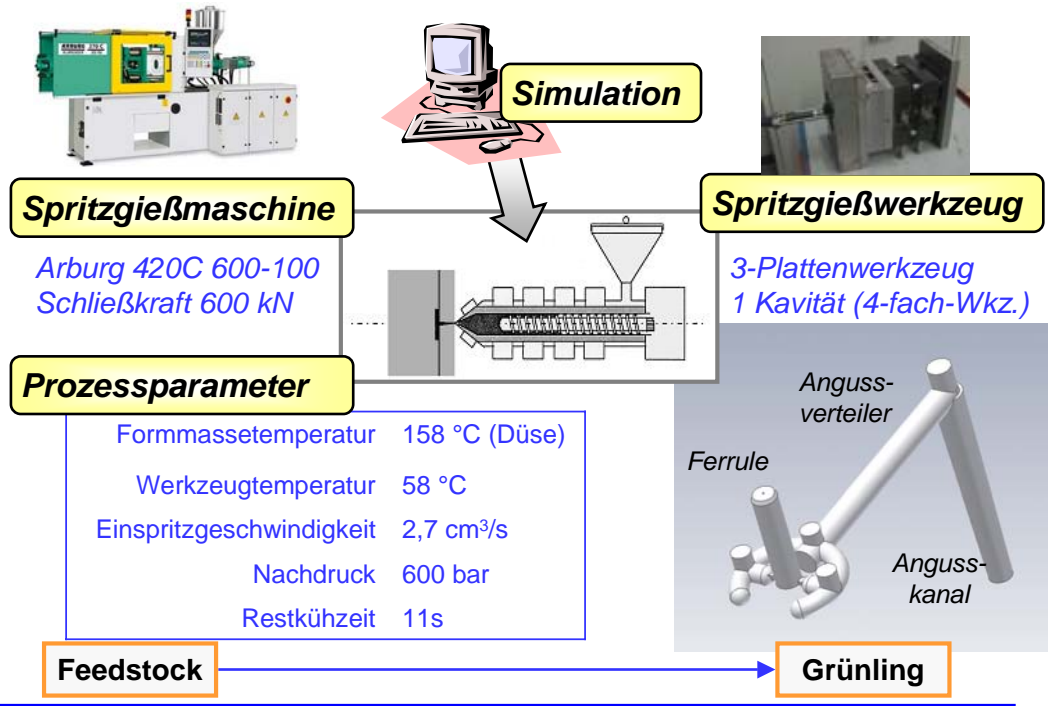
Mechanische Eigenschaften

- Elastizitätsmodul
- Querkontraktionszahl
- Schubmodul

Micro-P-PIM



CIM-Prozess – Spritzgießen

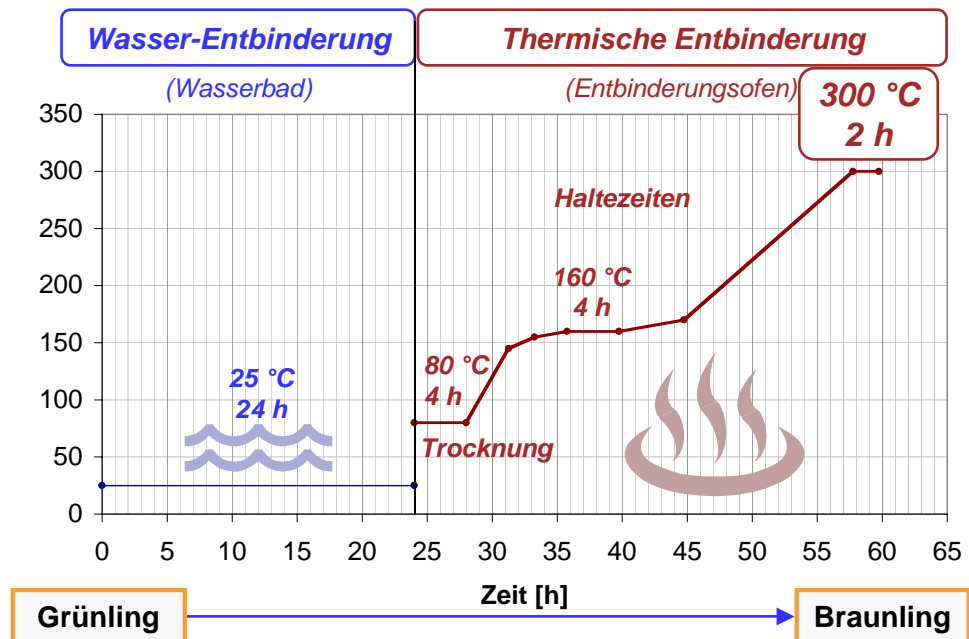


Micro-P-PIM



CIM-Prozess – Entbindern

(Entbinderungszyklus für INMAFEED K1011)

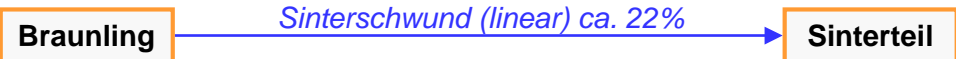
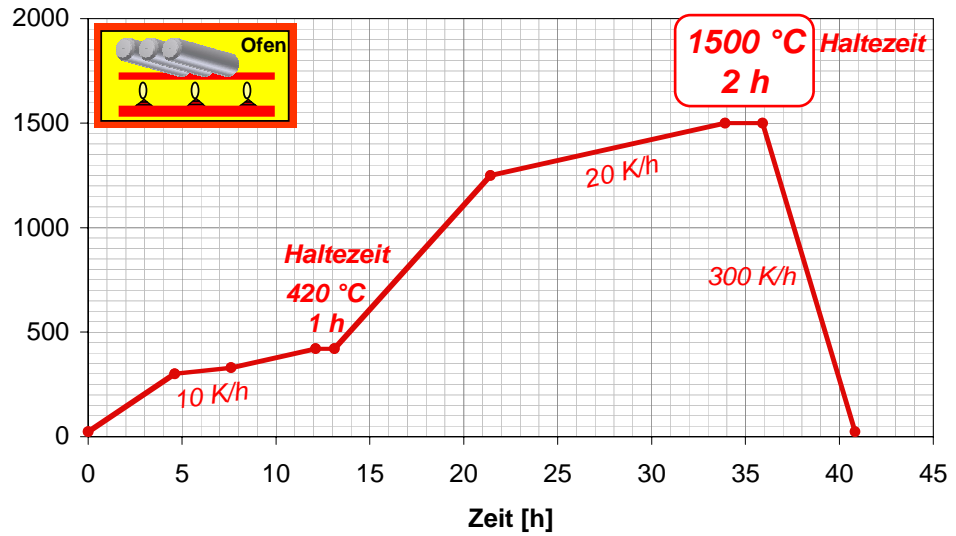


Micro-P-PIM



CIM-Prozess – Sintern

(Sinterzyklus für INMAFEED K1011)

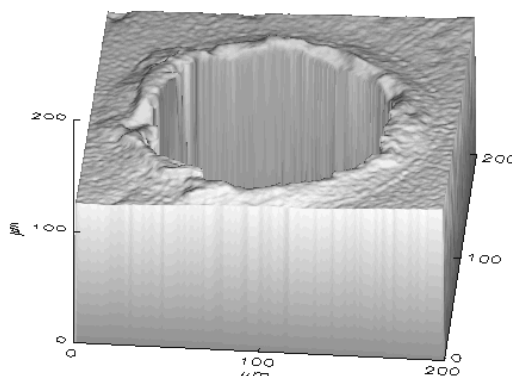


Micro-P-PIM

Vermessung von Ferrulen

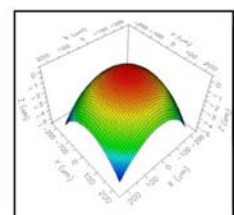
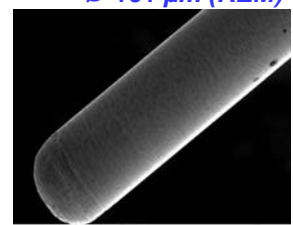
- Vermessung von Grünlingen und Sinterteilen
- Vergleich mit den realen Werkzeugabmessungen
- Vergleich verschiedener Messverfahren

Hartmetallstift
 Ø 161 µm (REM)



Bohrung in Ferrulen-Grünling
 (Kopplungsseite)

Vermessen mit FRT MicroGlider
 Messbereich: 200 µm x 200 µm



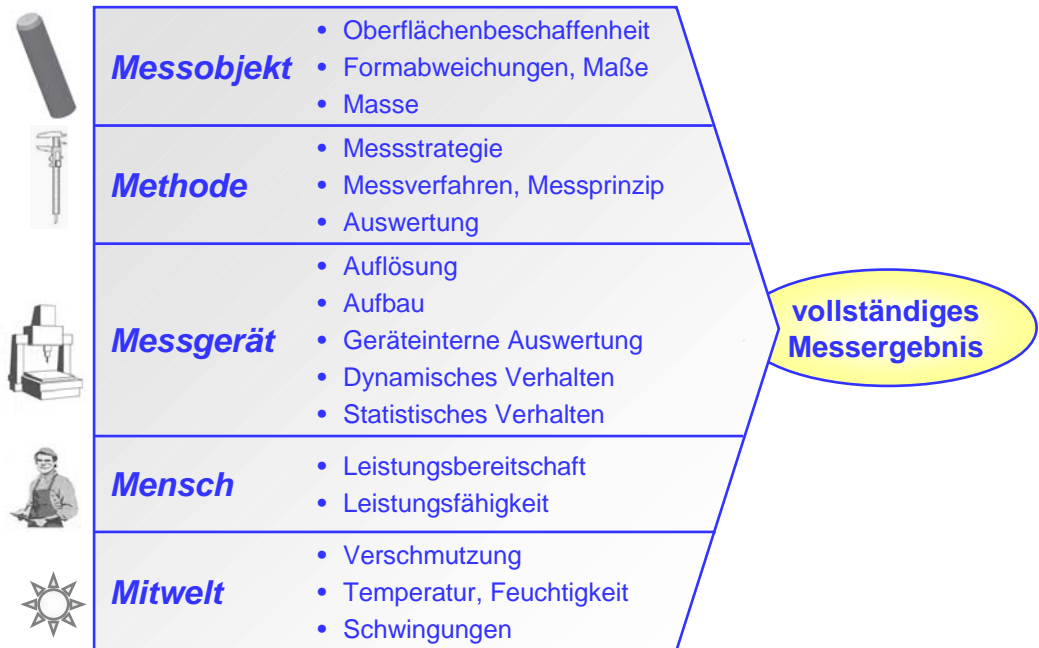
Kontrolle der Stirnfläche (Polversatz)



Micro-P-PIM



Einflussgrößen auf die Messabweichung



Micro-P-PIM



PIM von Keramik-Ferrulen für Glasfaserverbindungen im Monomode-Bereich

M. Beck, V. Pötter, R. Ruprecht, K. Müller, J. Hauselt ¹⁾
D. Rund ¹⁾

¹⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

²⁾ Krone GmbH

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

Spritzgießtechnik für Präzisionsbauteile

aus Al_2O_3 – Keramik

Spritzgießtechnik für Präzisionsbauteile aus Al_2O_3 – Keramik

Helmut Mayer ¹⁾, Jochen Doll ¹⁾, Gissur Örlygsson ²⁾

¹⁾ FRIATEC AG, Mannheim

²⁾ Forschungszentrum Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Spritzgießtechnik bietet als Formgebungsverfahren für oxidkeramische Produkte die Möglichkeit, endkonturnah zu produzieren. Das Ziel des Projektes besteht darin, an Hand eines geeigneten Demonstrators aus dichtgesinterter Al_2O_3 – Keramik das Potential dieser Verfahrenstechnik für eine minimale Hartbearbeitung der Keramik auszuloten. Auf der Basis zweier Rohstoffe mit unterschiedlicher Verteilung der Pulverpartikelgrößen werden die benötigten Feedstocks entwickelt und charakterisiert, das Spritzgießwerkzeug für den Demonstrator hergestellt und die gesinterten Teile in statistisch relevanter Menge hartbearbeitet. In dem Beitrag werden die Zielsetzung des Vorhabens, der zum Jahresende 2003 erreichte Stand und der Plan für das weitere Vorgehen dargestellt.

1. Motivation, Ausgangssituation und Ziel

Die Produktion oxidkeramischer Produkte über die Route der Spritzgießtechnik ist ein in FRIATEC seit Jahrzehnten etabliertes Verfahren. Diese Formgebungstechnik ermöglicht heute 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 Technologie des Pulverspritzgießens anbietet, ist im Vortrag auf Bild 5 in mehreren Varianten dargestellt. Das folgende Bild 6 zeigt seine Anwendung in der Dentaltechnik. Ein solches Teil wird über das Titanimplantat gesetzt und erfüllt damit den kosmetischen Anspruch einer Verblendung des Metalls [1]. Nach heutigem Stand werden diese Zahnblenden aus hochreiner Al_2O_3 – Keramik in mehreren Hartbearbeitungsstufen mit abschließender Politur der äußeren Oberfläche erzeugt. Bild 7 zeigt Anfangs- und Endstadium einer solchen Zahnblende.

Das Teil besitzt eine zentrale Bohrung mit gestuftem Durchmesser, in der sich eine nasenförmige Erhebung befindet. Diese im Bereich von wenigen hundertstel Millimetern tolerierte Erhebung dient der sicheren Fixierung der Zahnblende gegen Verdrehen. Bild 8 zeigt in einer Aufnahme mit einer Mikrofokusröntgenröhre (MFR) die Position dieser Struktur in der Bohrung.

Das Ziel des Projektes ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das die Herstellung von eng tole-

rierten Keramiktteilen mit deutlich reduziertem Aufwand für die Hartbearbeitung ermöglicht. Da diese endkonturnahe Fertigung für FRIATEC eine grundsätzliche Technologie darstellt, wurde eine der Zahnblendentypen (Bild 9) ausgewählt, um an dessen Beispiel die Spritzgießtechnik für hochreine Al_2O_3 – Keramik zu entwickeln und deren Leistungsfähigkeit zu demonstrieren.

2. Arbeitsprogramm und Methoden

Im Teilprojekt von FRIATEC sind als Partner das Forschungszentrum Karlsruhe für die Herstellung und Charakterisierung der Feedstocks sowie für die Simulation der Formfüllung beim Pulverspritzgießen eingebunden [2] und die Fa. Junghans Feinwerktechnik für die Konstruktion und Herstellung des Spritzgießwerkzeugs.

Der Projektrahmen ist in den folgenden Bildern 10 und 12 dargestellt.

Der Arbeitsschwerpunkt der ersten Projektphase besteht zunächst in der Entwicklung spritzgießfähiger Feedstocks aus zwei Al_2O_3 – Rohstoffen A und B. Die beiden Typen unterscheiden sich in ihrem Korngrößenspektrum (Bild 11) und in ihrer chemischen Reinheit mit 99,7 % bei Typ A und 99,9 % bei Typ B. Durch die Verwendung beider Pulvertypen besteht die Möglichkeit, den Einfluss der Pulverteilchengrößen auf die erreichbaren Toleranzen und die Genauigkeit der Strukturabbildung direkt zu betrachten [3].

In dieser Phase sind im zweiten Schritt die Basisparameter für das Entbindern und Sintern der spritzgegossenen Teile zu erarbeiten.

In der zweiten Phase (Bild 12) ist geplant, den Demonstrator aus den jeweils spritzgießfähigen Feedstocks A und B in mehreren hundert Stück unter produktionsähnlichen Bedingungen herzustellen. Dadurch soll eine statistisch relevante Größenordnung erreicht werden. Spätestens in diesem Stadium der Entwicklung werden als Magazin für die Ofenprozesse geeignete Brennunterlagen erforderlich sein, die eine beschädigungs- und kontaminationsfreie Sinterung der entbinderten Teile ermöglichen. Die Herstellung des Demonstrators im Produktionsmaßstab wird darüber hinaus auch erneute Optimierungsschritte in der Entbinderungs- und Sintertechnik mit sich bringen, da die in der ersten Phase erarbeiteten Prozessparameter auf größere Mustermengen anzupassen sein werden.

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

3. Stand der Arbeiten und Ergebnisse

3.1. Feedstock A

In Anlehnung an bestehende Rezepturen wurde zunächst aus Rohstoff A in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe eine 20 kg-Charge Feedstock erzeugt und damit in FRIATEC eine Versuchserie im Pulverspritzgießen durchgeführt. Da zu dem damaligen Zeitpunkt das geplante Werkzeug für den Demonstrator termingemäß noch in Fertigung war, wurde als Testform ein in FRIATEC vorhandenes Spritzgießwerkzeug verwendet, das für Produkte ähnlicher Größe und Toleranzen wie dasjenige des Demonstrators ausgelegt ist. Die erste Versuchsserie führte nach zwei Anpassungsschritten der Rezeptur zu einem Feedstock, der jetzt zu Verarbeitungsversuchen mit dem Demonstratorwerkzeug bereitsteht (Typ A3). Bild 13 zeigt einen oberhalb von 1750 °C in einem gasbeheizten Ofen gesinterten Testkörper und Bild 14 das thermisch geätzte Gefüge dieser Keramik. Ihre mittlere Korngröße liegt im Bereich um 10 µm mit einer maximalen Korngröße von 50 µm. Die gesinterte Dichte erreicht 3,92 g/cm³ (98 % des theoretischen Wertes).

Die viskosen Eigenschaften des A3-Feedstocks wurden im Forschungszentrum Karlsruhe mit Hilfe eines Hochdruck-Einzelkapillar-Rheometers erfasst. Die Messungen erfolgten bei 170, 180 und 190 °C mit einer Rundkapillare mit 0,5 mm Durchmesser und 10 mm Länge. Die Ergebnisse sind auf Bild 15 dargestellt. Die Kurven

zeigen eine relativ stetige Abnahme der scheinbaren Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit insbesondere bei 190 °C. Sie bestätigen damit das problemlose Einspritzverhalten des Feedstocks in der Testform.

Zusätzlich zu diesen rheologischen Daten sind für die Simulation der Formfüllung beim Pulverspritzgießen das Kompressionsverhalten des Feedstocks sowie thermische Werkstoffdaten als Funktion der Temperatur zu bestimmen.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit wird an einem spritzgegossenen, nicht entbinderten Plättchen mit 1 mm Dicke und 10 mm Durchmesser im Temperaturbereich von 20 – 200 °C erfolgen.

3.2. Feedstock B

Analog zur Vorgehensweise mit Pulvertyp A wurde mit Typ B zunächst ein Testansatz für einen Feedstock B hergestellt, der wegen zu hoher Viskosität unter Einspritzbedingungen jedoch nicht verarbeitungsfähig war. Da zwei Anpassungsversuche der Rezeptur nicht zu der erforderlichen Viskosität des Feedstocks für eine gute Spritzgießfähigkeit führten, wird aktuell an der Entwicklung der Rezeptur auf der Basis von Messungen mit dem oben erwähnten Rheometer gearbeitet.

3.3. Spritzgießwerkzeug

Die beiden Rohstofftypen verursachen als Folge ihrer unterschiedlichen Pulverpartikelgrößenverteilung eine verschiedene hohe Schwindung während der Sinterung. Da die absoluten Abmessungen der Teile für die Fragestellung nach der Einhaltbarkeit enger Toleranzwerte eher eine untergeordnete Bedeutung besitzen, wurde das Spritzgießwerkzeug nicht für eine spezielle Schwindung, sondern für einen linearen Schwindungswert von 17 % konzipiert. Dieser Wert liegt zwischen der ermittelten Schwindung der Feedstocks A und B.

Zur Beurteilung der Formqualität wurden von Junghans Feinwerktechnik nach der Herstellung des Werkzeugs 50 Spritzgussteile aus dem Kunststoff Polyoxymethylen POM 13021 erzeugt. Das Ergebnis dieser Beurteilung bestätigte, dass eine Änderung des Werkzeugs (Bild 16) nicht erforderlich war. Optimierungen des Werkzeugs hinsichtlich Pulverspritzgießen können jedoch erfolgen, sobald die Ergebnisse der Simulation der Formfüllung beim Pulverspritzgießen vorliegen. Die dazu notwendigen Werkstoffdaten der entwickelten Feedstocks werden derzeit vervollständigt. Die Geometriedaten und Finite-Element-Netze für die Simulationsrechnungen liegen bereits vor, die Lauffähigkeit des

Programms wurde mit Kunststoffdaten erfolgreich getestet.

4. Ausblick

Die weiteren Schritte im Teilprojekt Zahnblende unter der Leitung von FRIATEC sind wie folgt geplant:

- a. Optimierung der Spritz-, Entbinderungs- und Sinterparameter von Zahnblenden aus Typ A, die mit Hilfe des Demonstratorwerkzeugs von Junghans Feinwerktechnik erzeugt wurden. Danach Herstellung einer Charge aus mehreren hundert Teilen mit anschließender Hartbearbeitung und statistischer Auswertung.
- b. Entwicklung einer spritzgießfähigen Feedstockrezeptur für Pulver B gemeinsam mit dem Forschungszentrum Karlsruhe. Danach Optimierung der Fertigungsparameter analog zu Punkt a. und daran anschließend Herstellung einer Charge aus mehreren hundert Teilen mit nachfolgender Hartbearbeitung.
- c. Herstellung von Sinterunterlagen als Magazin für die Ofenprozesse, die die Reinheit, Maßhaltigkeit und Defektfreiheit des Brennguts nicht beeinträchtigen.
- d. Simulation der Formfüllung beim Pulverspritzgießen zur Optimierung des Spritzgießwerkzeugs für das Keramikpulverspritzgießen.
- e. Herstellung von jeweils 30 Biegeprüfstäben aus den Feedstocks A und B entsprechend DIN 843 – 1 zur Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften der gesinterten Werkstoffe [5]. Dazu wurde ein Spritzgießwerkzeug mit Wechseleinsätzen zur Herstellung verschiedener Probekörper in einer gemeinsamen Arbeit von Forschungszentrum Karlsruhe und Junghans Feinwerktechnik konstruiert und hergestellt.
- f. Übertragung der Ergebnisse auf andere Werkstoffe von FRIATEC. Erste erfolgversprechende Ansätze dazu liegen bereits vor.

5. Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung und dem Projektträger PFT für die Betreuung des Projektes 02PD2131 und 02PD2136, sowie den im Teilprojekt Zahnblende eingebundenen Partnern im BMBF-Projekt Micro-P-PIM für die konstruktive Zusammenarbeit.

6. 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“, *5th 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] Dörre, E., Hübner, H., „Alumina“, *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1984*, 329 S.
- [5] DIN EN 843-1, „Monolithische Keramik – Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur. Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit“, 1995, 10 S.



Micro-P-PIM



Spritzgießtechnik für Präzisionsbauteile aus Al_2O_3 - Keramik

H. Mayer ¹⁾, J. Doll ¹⁾, G. Örlygsson ²⁾

¹⁾ Friatec AG

²⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Statuskolloquium Micro - P - PIM am 11. Februar 2004

FRIATEC AG - Firmengelände



Micro-P-PIM





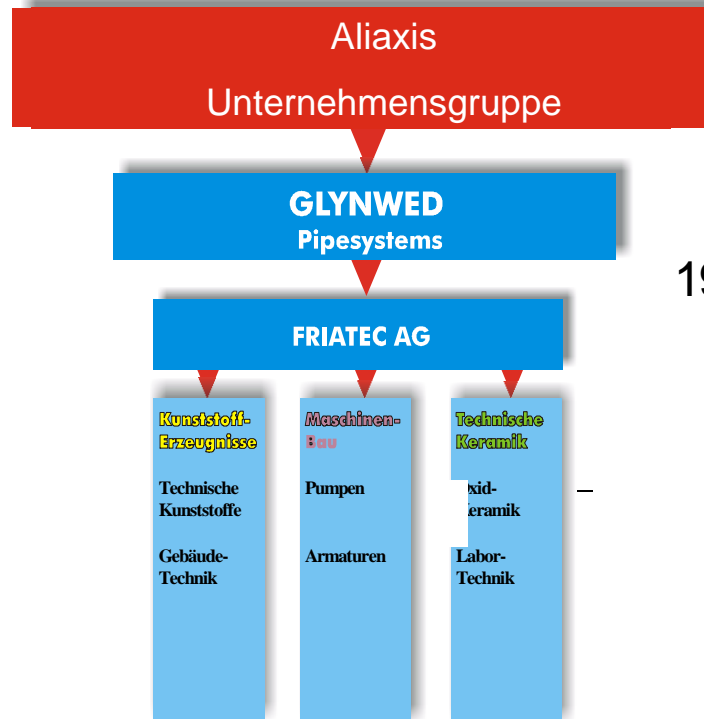
Micro-P-PIM



FRIATEC AG - ein Unternehmen der Aliaxis - Gruppe



2001



1999

Division FRIALIT - DEGUSSIT



- 1962 Gründung der Abteilung FRIALIT
- 1975 Medizintechnik – Hüftprothese
- 1977 Übernahme der DEGUSSIT von der Degussa
- 1980 Medizintechnik wird eine eigene Division
- Heute Werkstoffspezialist für Anwendungen mit thermischer, elektrischer, chemischer und mechanischer Belastung

Micro-P-PIM



Anwendungsgebiete und Beispiele

Rohre und Laborgeräte	Elektrokeramik	Ingenieurkeramik
Rohre	Elektrische Durchführungen	Pumpenbauteile
Mehrfachkapillarrohre	Dioden und Thyristorgehäuse	Ventilsitze
Stäbe/ Platten	Vakuumdurchführungen	Präzisionskugeln
Isolierteile	Druckdurchführungen	Dichtungselemente
Tiegel / Schiffchen	Röhrenkeramik	Pressmatrizen
Sauerstoffionen leitende Keramik	Stützisolatoren	Dosiereinheiten
Dilatometerrohre	Sensorkomponenten	Feinschleifwerkzeuge
Kundenspezifische Produkte		

Beispiele von Zahnblenden, Typ CeraBase

Micro-P-PIM

★ JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

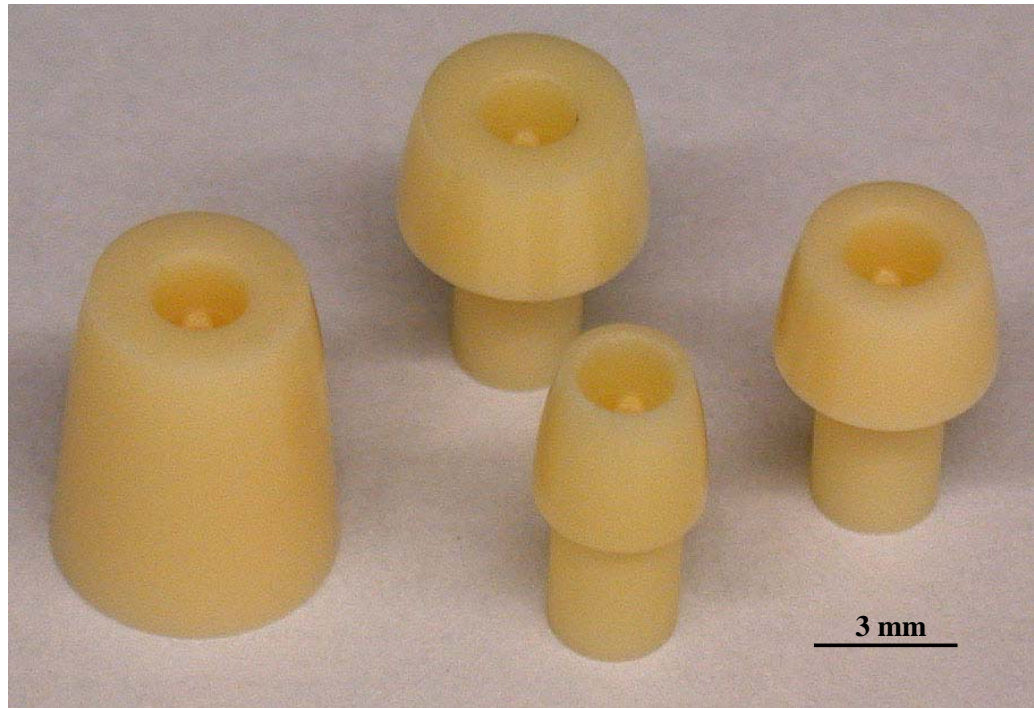
F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU



FRIADENT CeraBase: indirekte Version

Micro-P-PIM

★ JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

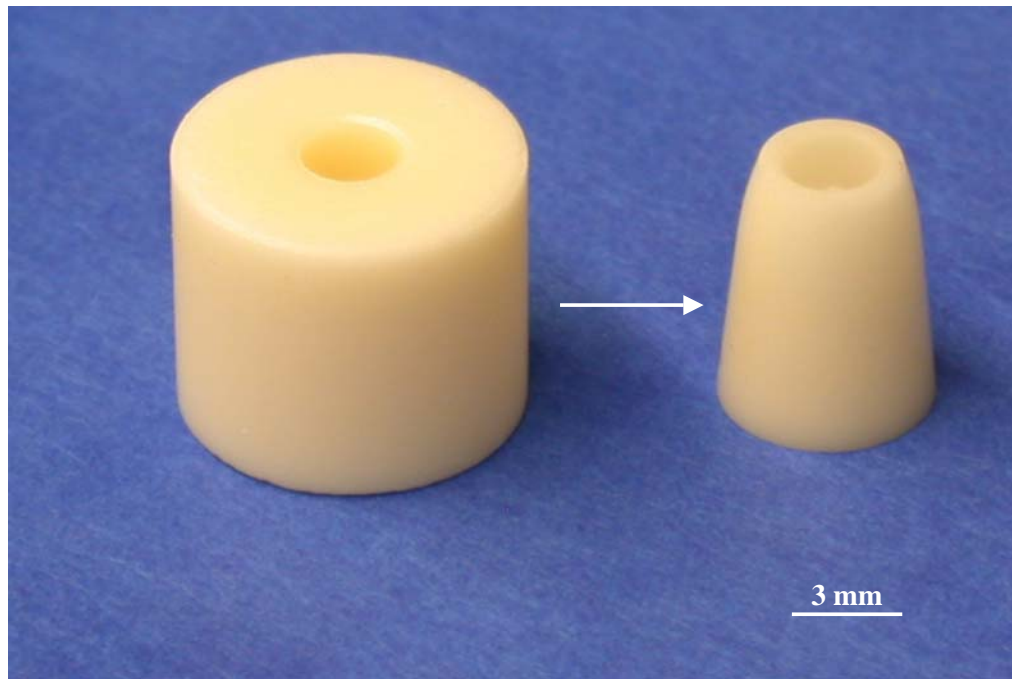
LMU

Zahnblende



Aufwand für die Hartbearbeitung

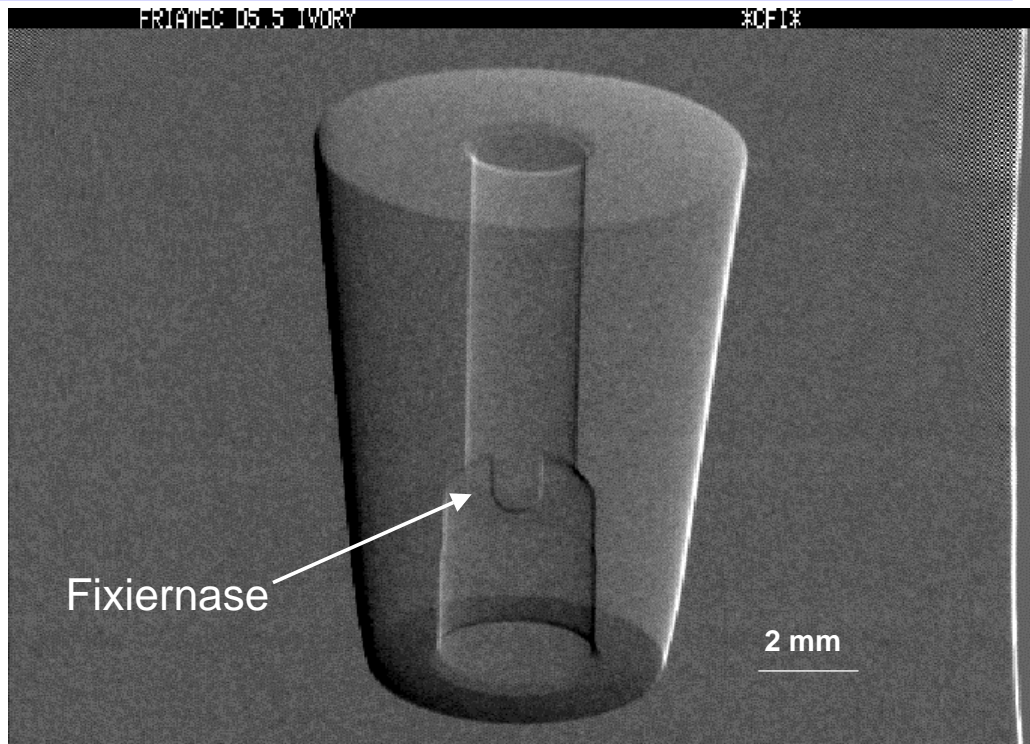
Micro-P-PIM



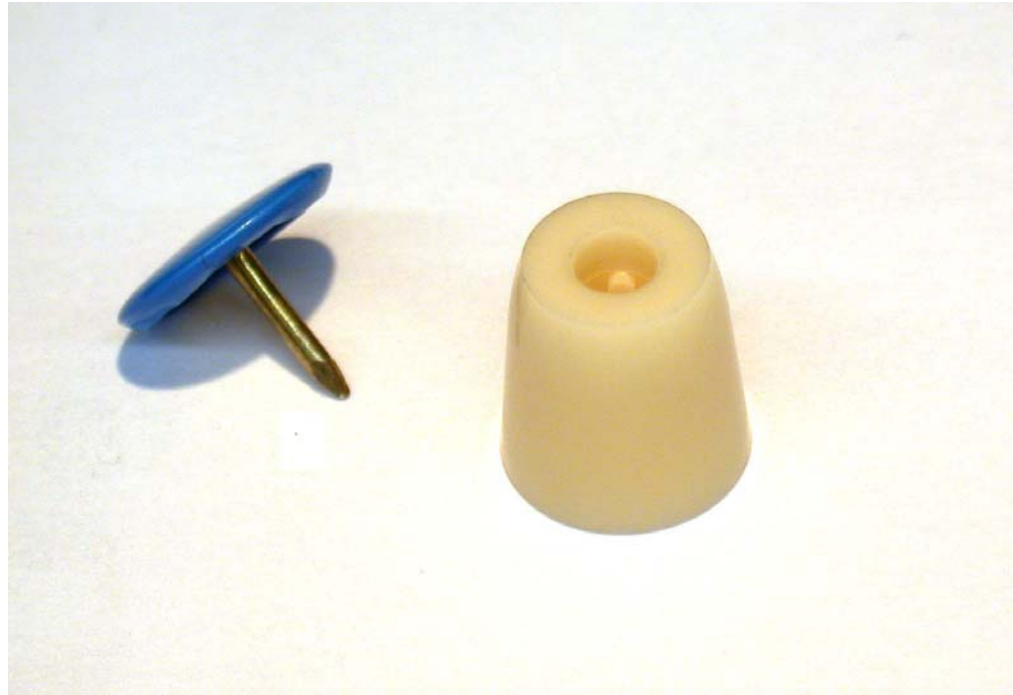
Micro-P-PIM



CeraBase - Aufnahme Mikrofokusröhre



Demonstrator Zahnblende



Micro-P-PIM

gefördert vom
 Bundesministerium
 für Bildung
 und Forschung

Projekträger des BMBF
 Produktion und
 Fertigungstechnologien

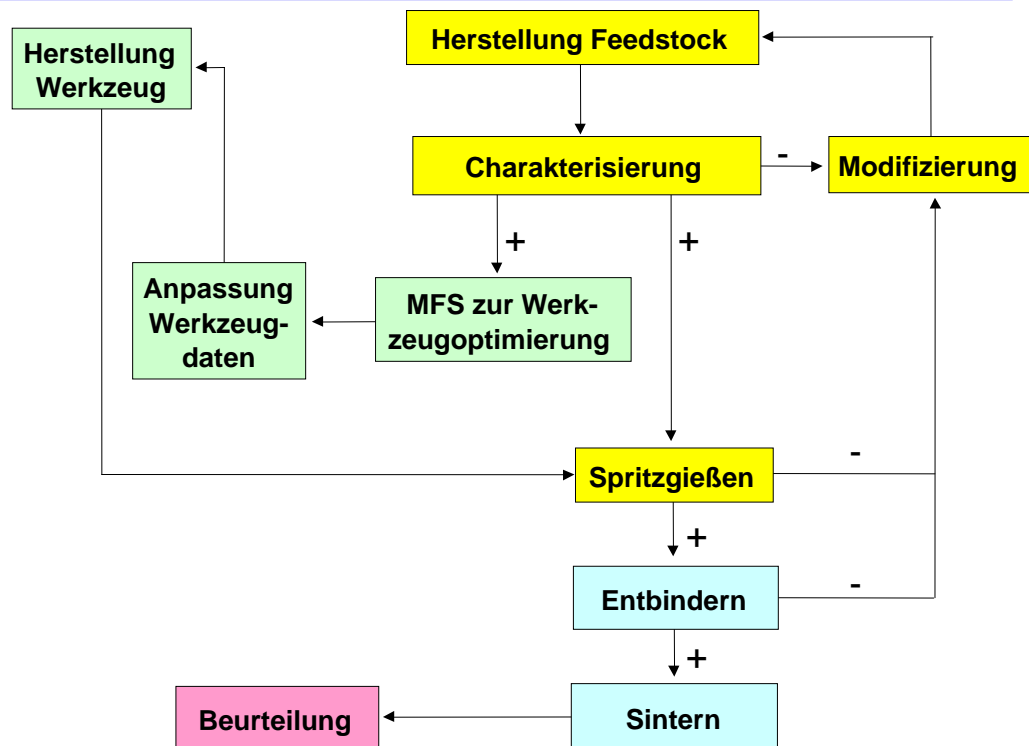


★JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG



Entwicklungsplan - Phase 1



Micro-P-PIM

gefördert vom
 Bundesministerium
 für Bildung
 und Forschung

Projekträger des BMBF
 Produktion und
 Fertigungstechnologien



★JUNGHANS
 Feinwerktechnik

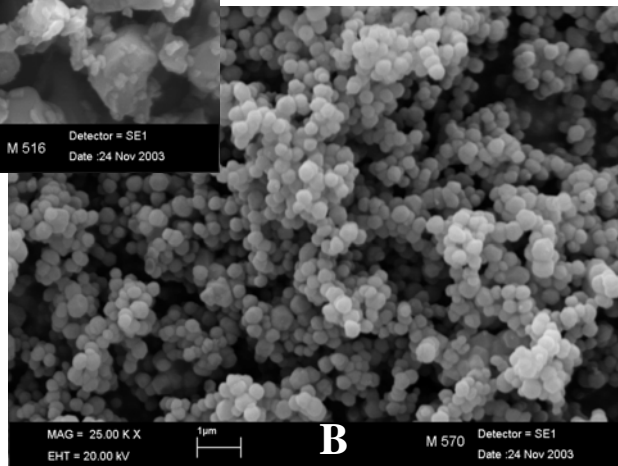
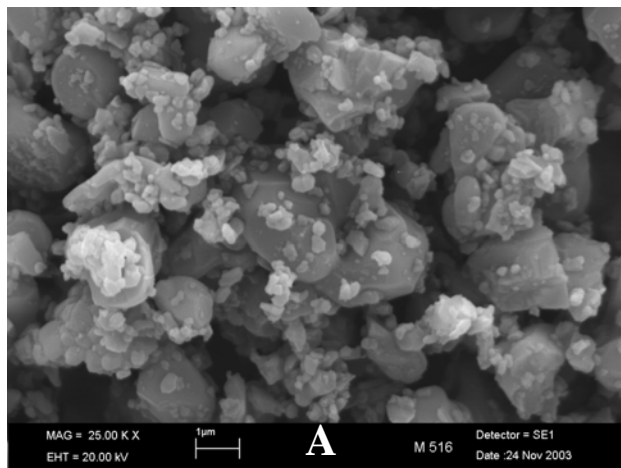
ARBURG



Al₂O₃ - Rohstoffe A und B

Micro-P-PIM

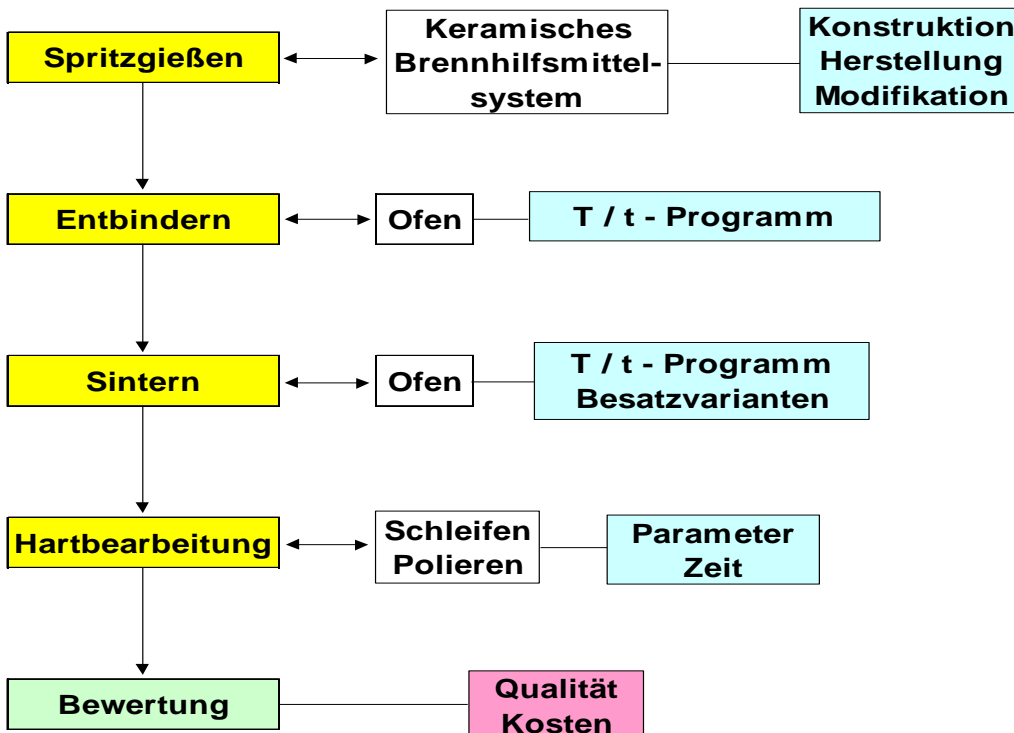
JUNGHANS
 Feinwerktechnik
 ARBURG
 F
 FRIATEC
 KRONE
 schunk
 LMU



Entwicklungsplan - Phase 2

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik
 ARBURG
 F
 FRIATEC
 KRONE
 schunk
 LMU



Testobjekt für Spritzgießversuche

Micro-P-PIM

★ JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

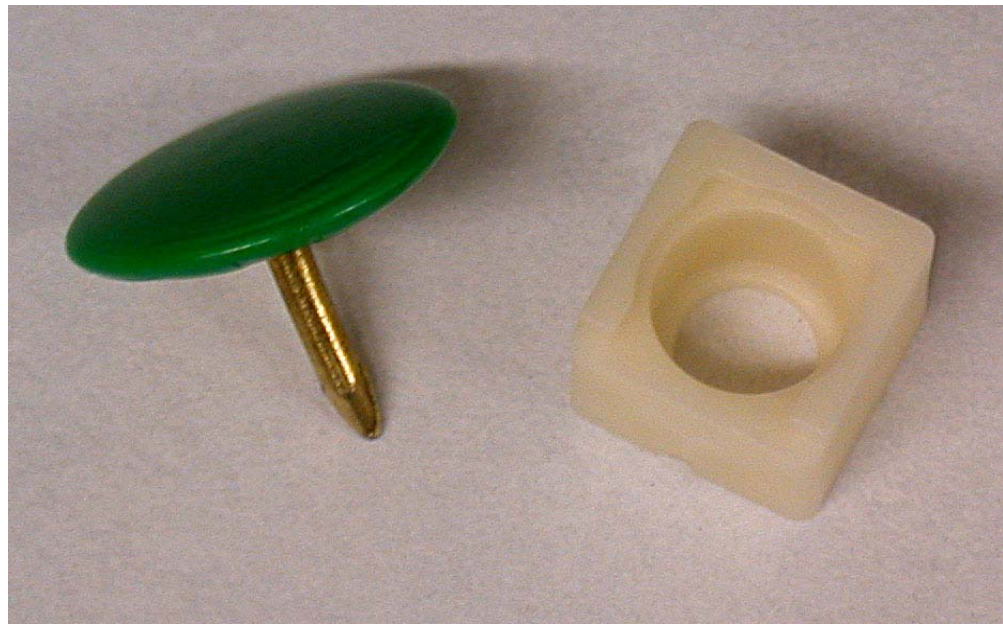
F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU



Gefüge von Al_2O_3 - Keramik aus A 3

Micro-P-PIM

★ JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

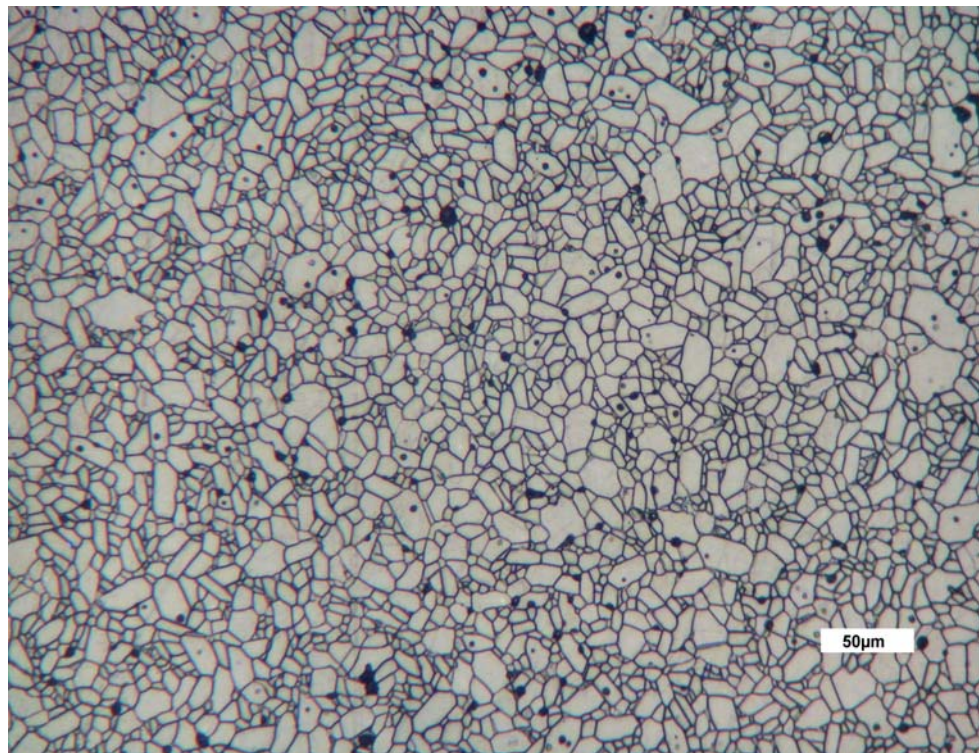
F

FRIATEC

KRONE

schunk

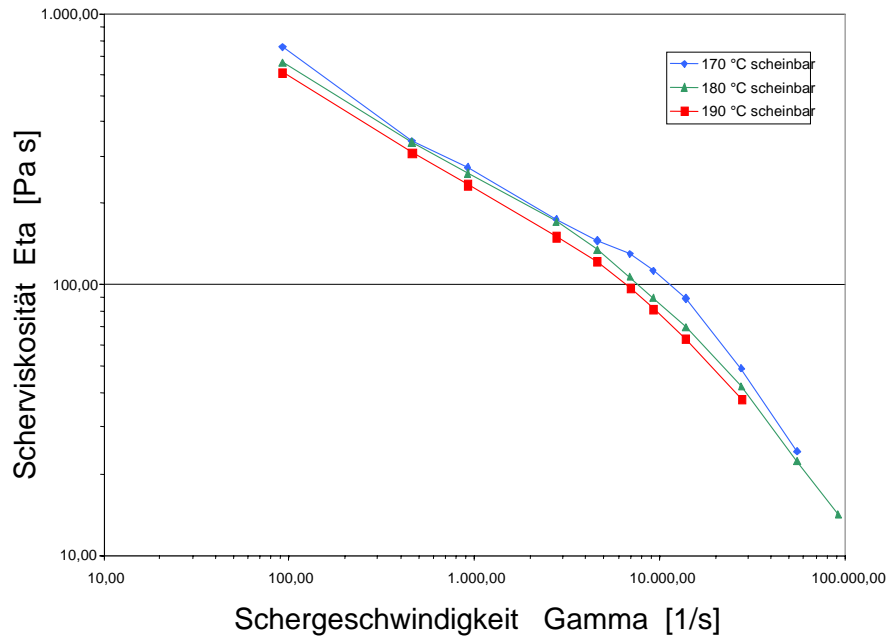
LMU



Rheologisches Verhalten von Feedstock A 3



Micro-P-PIM



Spritzgießwerkzeug

JUNGHANS
Feinwerktechnik



Micro-P-PIM





Micro-P-PIM



Spritzgießtechnik für Präzisionsbauteile aus Al_2O_3 - Keramik

H. Mayer ¹⁾, J. Doll ¹⁾, G. Örlygsson ²⁾

¹⁾ Friatec AG

²⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Wir danken dem BMBWF für die finanzielle Unterstützung und PFT für die Betreuung des Projektes 02PD213-1, -0 und -6.

**Maschinen- und Werkzeugtechnik für PIM von
Mikropräzisionsbauteilen**

Maschinen- und Werkzeugtechnik für PIM von Mikropräzisionsbauteilen

Marko Maetzig ¹⁾, Klaus Müller ³⁾, Johann Pannhorst ²⁾, Hartmut Walcher ¹⁾

¹⁾ ARBURG GmbH + Co KG

²⁾ JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co. KG

³⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Zusammenfassung

Im Projekt Micro-P-PIM wird das „Pulverspritzgießen für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile aus Keramik und Metall“ als ein Hochleistungs-Fertigungsverfahren entwickelt. Mit diesem Massenfertigungsverfahren sollen Produktkomponenten auch unter dem aktuellen Trend zunehmender Präzision und Miniaturisierung wirtschaftlich gefertigt werden. Der Spritzgießvorgang wird unter dem Aspekt Maschine / Werkzeug betrachtet. Die geforderte enge Toleranzvorgabe für das Fertigteil verlangt enge Toleranzen im System Werkzeug – Maschine sowie kontrollierte und geführte Prozessschritte, die während des Spritzgießens von der Maschinensteuerung gewährleistet werden. Maschinen- und Werkzeugentwicklung sowie -realisierung erfolgt durch die Firmen ARBURG und JUNGHANS. Werkzeugkonstruktion und Prozesssimulation führen JUNGHANS und Forschungszentrum Karlsruhe durch.

1. Ausgangssituation und Motivation

Dem Trend der Miniaturisierung folgend hat gerade das Pulverspritzgießen als ein endkonnahes Formgebungsverfahren großes Potential für die Massenfertigung von Mikropräzisionsbauteilen (feinwerktechnische Bauteile mit Toleranzen in Mikrometerbereich), mikrostrukturierten Bauteilen (feinwerktechnische Bauteile mit Details im Mikrometerbereich) oder gar Mikroteilen (Bauteilabmessungen im Submillimeterbereich) aus Metall und Keramik. Bereits für das Pulverspritzgießen von Mikropräzisionsbauteilen muss die Maschinensteuerung, die Formmassenaufbereitung und –dosierung möglichst unter Einsatz kommerzieller Maschinenkonzepte weiterentwickelt werden.

Das Spritzgießwerkzeug muss in seiner Geometrie die Maßänderungen des Werkstücks während der Entbinderungs- und Sinterungsphase berücksichtigen. Ein Herstellverfahren für Werkzeuge nach der Try- und Error-Methode führt zwar letztendlich auch zum Ziel, ist aber aufgrund der mehrfachen Versuchsabspritzungen und Werkzeugnachbesserungen sowohl im Zeitbedarf als auch in den Kosten sehr aufwändig. Der rechtzeitige Einsatz von Simulationsrechnungen ermöglicht es, den Nachbearbeitungsaufwand deutlich zu reduzieren.

2. Arbeitsprogramm und Methoden

Die Arbeiten der ARBURG GmbH + Co KG konzentrieren sich auf die Themen Weiterent-

wicklung von Spritzgießmaschinen für das Mikrospritzgießen, die Feedstockentwicklung sowie die Spritzgießprozessentwicklung für Mikropräzisionsteile und mikrostrukturierte Bauteile.

Im Arbeitspaket von Junghans Feinwerktechnik wird auf Basis der Geometrie der Werkstücke und unter Berücksichtigung der Schwundmaße die Auslegung der Werkzeuge durch intensive Simulation durchgeführt. Besondere Umstände liegen vor, wenn die Schrumpfungsfaktoren längs und quer zur Fließrichtung des Materials unterschiedliche Werte annehmen.

Durch die Erfahrung aus den Versuchen an realen Werkstücken und den Einbau möglichst exakter Materialparameter können Simulationsprogrammen auch für zukünftige Werkzeugauslegungen eingesetzt werden. Damit werden wertvolle Informationen insbesondere zur Formfüllung erhalten. Im Grünling sind Entmischungseffekte nach Stufen, an Kanten oder Hindernissen zu beobachten, die es gilt, durch eine optimale Auswahl der Anspritzpunkte und der Spritzparameter so gering wie möglich zu halten. Es ist zu beobachten, dass selbst sehr gut homogenisierte Feedstocks durch eine nicht optimierte Wahl der Anspritzpunkte oder Spritzparameter zum Entmischen neigen und so Materialeigenschaften der gesinterten Bauteile deutlich negativ beeinflusst werden.

Andere Materialparameter wie z.B. Festigkeit und Dehnbarkeit des Feedstocks sowie die Werkzeuggeometrie und die Spritzparameter

beeinflussen den Entformungsprozess. Als Beispiel mag hier das Ferrulenwerkzeug dienen, bei dem die Anspritzpunkte gegenüberliegend an den hinteren Rand des Werkstücks gelegt wurden (Abb. 1).

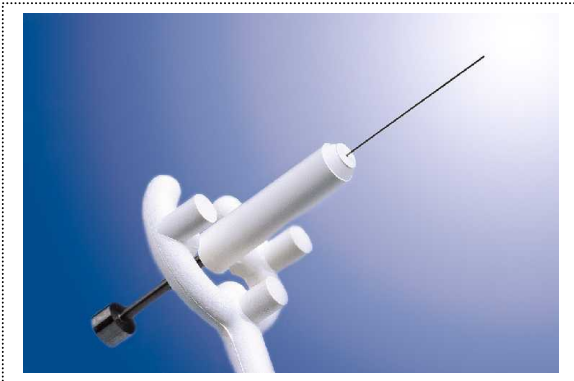


Abb.1: Grünling einer Ferrule mit Teil des Abguss- und Verteilersystems, montiert auf Werkzeugkern.

Bei Werkstücken mit Einsatzgewichten unter 1 g (Mikrobauteile) 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 Werkzeugs sowie der Material-Zuführungskanäle ermöglichen die optimale Ausführung und Gestaltung des Werkzeuges.

3. Fähigkeiten der Firmen

Seit 1991 werden bei der ARBURG GmbH + Co KG alle Entwicklungstätigkeiten für den Pulverspritzguss in einem Labor konzentriert. Dies umfasst neben dem Spritzgießen auch die Entwicklung von Feedstocks einschließlich Fertigung im Labormaßstab. Zur weiteren Laborausstattung gehören Entbinderanlagen für die gängigen Feedstocksysteme und Sinteranlagen zum Sintern von Metall und Keramik.

1861 begann JUNGHANS Feinwerktechnik die Produktion von Uhren. Der Werkzeugbau ist deshalb auf keine genauen Werkstücke ausgerichtet. Mit 35 Mitarbeitern im Werkzeugbau und 17 Maschinenbedienern in der Spritzgießerei stehen verschiedene Ausrüstungen zur Verfügung:

-2 3D Pro-Engineer Systeme

-24 Spritzgießmaschinen mit Schließkräften von 35t bis 100t

- sowie CNC Werkzeugfräsmaschinen, Funkenerosionsanlagen und Drahtschneideanlagen mit Feindraheinrichtungen bis minimal 3/100 Drahtdurchmesser sowie ein 3D-Koordinaten-Meßzentrum

Dies ermöglicht die Herstellung von Werkzeugen und Fertigteilen in Inset-Technik mit automatisierter Ein- und Ausgabepalettierung für Teilegrößen von 0,05g bis 120g.

Das Forschungszentrum Karlsruhe beschäftigt sich seit 1995 mit der Prozesssimulation zum Mikrospritzgießen zunächst in Kunststoff [1], seit 1997 auch für das Pulverspritzgießen [2], mit dem Ziel, gemeinsam mit externen Partnern etablierte Simulationstools für das Mikrospritzgießen zu testen und bei Bedarf zu entwickeln. Die Simulationsergebnisse werden mit den Ergebnissen von JUNGHANS verglichen.

4. Stand der Arbeiten und Ergebnisse

Eine exakt regelbare Hydraulik ist aus maschinentechnischer Sicht für die Fertigung von Präzisionskleinteilen unabdingbar. Daher ist eine 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 beiden Maschinenbaureihen „ALLROUNDER C“ und „ALLROUNDER S“ als auch der „ALLROUNDER 170 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 Aggregate 30, 60 und 100 mit den Schnecken-durchmessern von 15, 18 und 20 mm.

Eine hohe Positioniergenauigkeit beim Einspritzen wird durch den Einsatz der lagegeregelten Schnecke (LGS) erreicht. Beide Seiten des Einspritzkolbens können 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 die Maschine 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 Schmelztemperatur. Hierdurch sind eine optimale Formfüllung und Abformung der Formkonturen durch den Feedstock gewährleistet. Nach Ende des Füllvorgangs wird die Temperatur möglichst schnell auf einen vorgegebenen Sollwert abgesenkt, um eine problemlose Entformung des Grünteiles zu ermöglichen (Abb. 2).

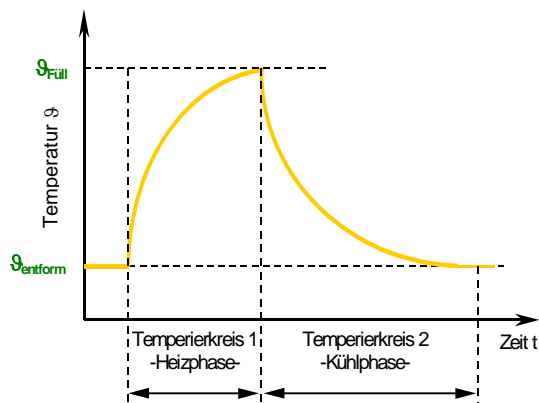


Abb.2: Zeitlicher Verlauf der Werkzeugtemperatur bei einer variothermen Prozessführung.

Für das Variotherm-Verfahren werden im Ablaufeditor zwei Symbole zur Verfügung gestellt (s. Abb. 3). Das Symbol „Start Formnestheizung“, aktiviert die Aufheizphase, indem über ein Ausgangssignal die Solltemperatur der Werkzeugheizung auf die maximale Temperatur für den Füllvorgang gesetzt wird. Über das Symbol „Stop Formnestheizung“, wird die Abkühlphase eingeleitet. Die Solltemperatur der Werkzeugheizung wird in diesem Fall auf die Entformungstemperatur zurückgesetzt. Aufheiz- und Abkühlphase werden durch Eingänge überwacht, für die ein Messsystem (Thermofühler) im Werkzeug die entsprechenden Eingangssignale (Istwerte) liefert. Die Überwachungen bleiben jeweils so lange aktiv, bis der entsprechende

Sollwert erreicht ist. Erst dann werden die nachfolgenden Abläufe ausgeführt. Zusätzlich kann zum Beispiel während der Aufheizphase eine Freigabezeit programmiert werden. Erreicht das System während der definierten Zeit nicht den vorgegebenen Sollwert für die Formnesttemperatur, erfolgt ein sofortiger Maschinenstopp oder ein Stopp am Zyklusende.

Die folgende Grafik zeigt die für das Variotherm-Verfahren relevanten Symbole innerhalb des Ablaufs sowie deren hinterlegte Funktionen.

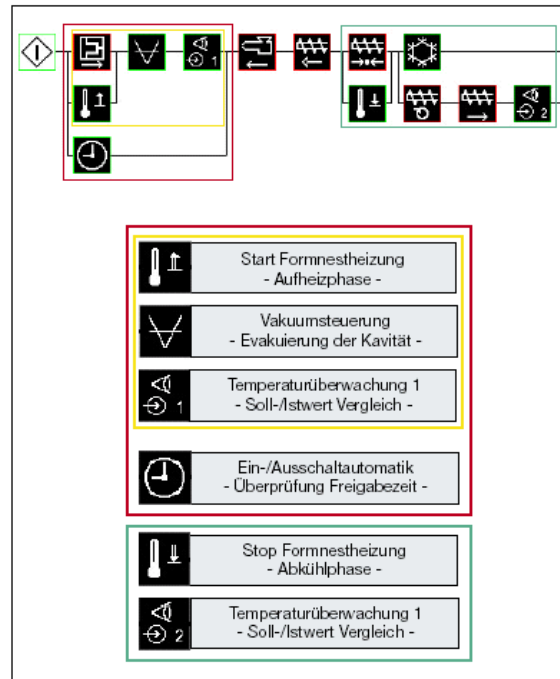


Abb. 3: Ablaufeditor für die Steuerung der Spritzgießmaschinen ALLROUNDER der Fa. ARBURG.

Über die Maschinensteuerung lassen sich alle Einzelphasen der Werkzeugtemperierung überwachen, so dass sowohl die Temperiergeräte als auch die Trägermedien ständig unter Kontrolle sind. Alle vorgestellten Temperieralternativen entsprechen dem Stand der Technik. Die Maschinenteknik und -steuerung lassen auch diese komplexen Produktionsvorgänge transparent und sicher beherrschbar werden.

Aus werkzeugtechnischer Sicht ist folgender Stand der Arbeiten erreicht. In einem speziellen Versuchswerkzeug werden an ausgewählten Probekörpergeometrien Spritzgießexperimente mit metallischen und keramischen Formmassen durchgeführt und mit den Ergebnissen aus den Simulationsrechnungen zum Fließverhalten verschiedener Feedstocks verglichen. Die Experimente dienen der Ermittlung von Gestaltungsrichtlinien zu künftigen Werkzeugen und Konstruktionen für nachbearbeitungsarme spritzgegossene Mikropräzisionsbauteile sowie der Er-

arbeitung von Materialdaten am Grünling und am gesinterten Bauteil.

Das Probekörperwerkzeug ist modular aufgebaut, d. h. es können verschiedene Formeinsätze mit unterschiedlichen Teststrukturen wechselbar eingesetzt werden. Das Werkzeug ist flüssigkeitstemperiert. Der Kavitätsbereich ist zusätzlich mit elektrischen Heizern versehen und außerdem evakuierbar. Entlang des Fließweges der Feedstockschmelze sind Temperaturfühler und Drucksensoren positioniert, um am jeweiligen Ort den Zustand der Formmasse über diese Parameter charakterisieren und mit den Simulationsergebnissen vergleichen zu können. Die verschiedenen Einsätze dienen zur Beurteilung des Materialverhaltens der Feedstocks. Die kreierten Testgeometrien wurden aus Instrumentierungsgründen im Formeinsatz in einer Zweifach-Kavität angeordnet. Das jeweilige Formteil (siehe Abb.) besteht somit aus zwei baugleichen Probekörpern mit zentraler Angusstange (Abb. 4).

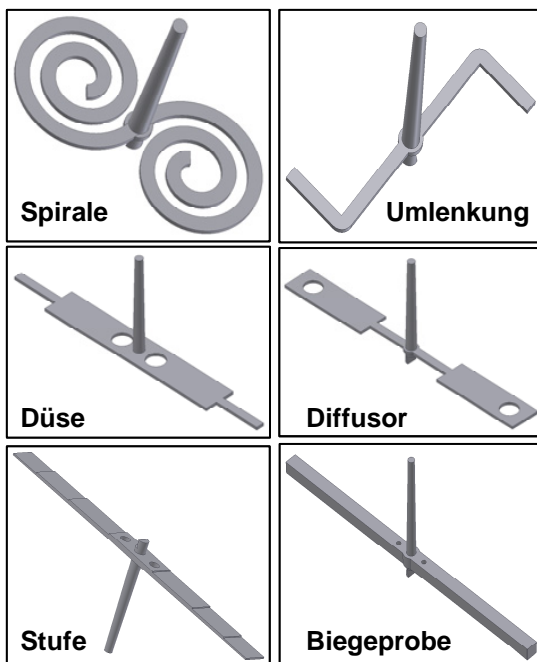


Abb. 4: CAD-Zeichnungen der Grünlinge aus dem Probekörperwerkzeug mit Wechselformeinsätzen

- Spirale: Zur Untersuchung des Füllfaktors in langen Kavitäten: Fließlängen-zu-Wanddicken-Verhältnis
- Umlenkung: 90° Winkel im Werkzeug zur Untersuchung des Temperatur- und Druckverhaltens und ggf. Entmischungen nach Umlenkung des Materialflusses
- Düse: Werkstück mit einem Hindernis nach dem Einspritzpunkt zur Untersu-

chung der Materialvermischung bzw. Anbindung nach dem Hindernis, Erfassung von Kompressionseffekten

- Diffusor: Werkstück mit einem Hindernis am Ende des Materialflusses zur Untersuchung des Füllgrades und der Binde-nahtproblematik, Erfassung von Dekompressionseffekten
- Stufe: Stufenwerkstück zur Beurteilung des Temperatur- und Druckverhalten im Werkzeug an und nach Stufen
- Biegeprobe: Der Grünling und das gesinterte CIM-Bauteil können als Biegeprobe unmittelbar für die Untersuchung der Materialeigenschaften genutzt werden.

Das Probewerkzeug für die Materialuntersuchung ist bereits im Einsatz, Versuche und Vergleiche mit den Simulationsergebnissen werden durchgeführt.

Für die Simulation des Spritzgießprozesses verwendet das Forschungszentrum Karlsruhe das kommerzielle Programm MOLDFLOW®, welches weltweit für detaillierte Berechnungen im makroskopischen Kunststoff-Spritzgießen eingesetzt wird. Es arbeitet nach der Methode der finiten Elemente und bedarf einer vorausgehenden 3D-Formteilkonstruktion in einem kommerziellen CAD-System. MOLDFLOW® kreiert daraus ein Finite-Elemente-Modell und zwar:

- für dünnwandige Formteile z.B. ein 2D-Oberflächenmodell mit dreiknotigen Schalenelementen, denen die Wanddicke als physikalisches Attribut aufgeprägt wird,
- für dickwandige Formteile z.B. ein 3D-Volumenmodell mit vierknotigen Tetraedermodellen.

Die MOLDFLOW-Simulationssoftware ermöglicht u.a. die Berechnung des Formfüllvorganges in Abhängigkeit von Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und dem zu verarbeitenden Formteilwerkstoff. Ferner werden durch MOLDFLOW® wichtige physikalische Größen wie Schubspannung und Schergeschwindigkeit ermittelt. Subroutinen ermöglichen die Berechnung von Abkühlungs-, Schrumpf- und Verzugsvorgängen.

Beispielhaft für die Füllsimulation von Spritzgießteilen ist in Abb. 5 der Fließfrontverlauf für den Probekörper Stufe dargestellt. Auf Basis der angegebenen Spritzgießparameter ergibt die Simulationsrechnung nach ca. 0.2s Einspritzzeit eine vollständige Befüllung der Formteilkavität mit der keramischen Formmasse. Der erforderliche Druckbedarf und die Einspritzzeit stimmen

mit den Parametern an der Spritzgießmaschine sehr gut überein, wenn auch in der Simulation der Umschaltzeitpunkt zwischen Geschwindigkeits- und Druckregelung am Ende der Einspritzphase zu einem geeigneten Zeitpunkt gewählt ist.

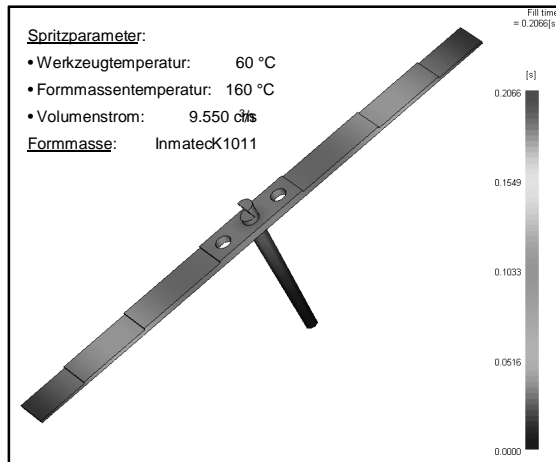


Abb. 5: Darstellung der mit MOLDFLOW berechneten Formfüllung für den Probekörper „Stufe“. Nach eigener Ermittlung und Implementierung der Materialdaten für den ZrO₂-Keramik-Feedstock Inmatec K1011 stimmen die Werte für den berechneten und experimentell ermittelte Druckbedarf und Füllzeit für eine vollständige Formfüllung des Probekörpers „Stufe“ überein.

Des Weiteren sind die Werkzeuge für die Demonstratoren Ferrule und Zahnblende fertiggestellt, vereinbarungsgemäß gemeinsam abgenommen und an die Partner weitergegeben. So konnte bereits mit der Entwicklung und Optimierung der Spritzgießparameter für die CIM-Demonstratoren auch unter Einsatz neu entwickelter Feedstocks begonnen werden.

Neue Feedstocks für Metallbauteile sind ebenfalls entwickelt und werden charakterisiert. Nach der anstehenden Ermittlung der Schwundmaße werden die Kavitäten gefertigt und auch diese Werkzeuge plangemäß fertiggestellt.

5. Ausblick

Bei der Maschinenteknik liegen die nächsten Aufgaben im Bereich der Anpassung der Spritzeinheit an geringere Schussvolumina. Ziel ist die Entwicklung eines Zylindermoduls mit geringerem Schneckendurchmesser. Die Problemstellung dabei liegt insbesondere in der Torsionsfestigkeit der Schnecke.

Nach Festlegung des Sinterschrumpfs für die MIM-Feedstocks werden die Werkzeuge für die Metall-Demonstratoren fertiggestellt, so dass die Entwicklung und Optimierung der Spritzgießparameter beginnen können.

Die Prozessentwicklungen und -untersuchungen sowie die begleitenden Simulationsrechnungen werden zeigen, wo weiterer Verbesserungsbedarf an Werkzeugen, Maschine und Feedstocks besteht.

Nach abgeschlossenem Projekt liegen für die benutzten MIM- und CIM- Feedstocks Eigenschaftsparameter und Prozessdaten vor, die es gestatten sollen, von der Simulation zur Werkzeugauslegung über die Prozessschritte bis zum Fertigteil schnell ohne großen Versuchsaufwand Fertigteile mit engen Toleranzen herzustellen.

6. Danksagung

Wir danken dem BMBF für die finanzielle Förderung und dem Projektträger PFT für die Betreuung des Projekts mit den Förderkennzeichen 02PD213-0, -2 und -6.

7. Literatur

- [1] V. Piötter, T. Benzler, T. Hanemann, K. Müller, P. Norajitra, R. Ruprecht, J. Haußelt: Innovative molding technologies for the fabrication of components for Microsystems; Proc. "Design, Test and Microfabrication of MEMS and MEOMS, Paris (1999), SPIE vol 3680, part 2, pp. 456-463.
- [2] J. Eck: Simulation und experimentellem Versuche beim Pulverspritzgießen von Mikrostrukturen; Diplomarbeit FH Darmstadt (1999), auch: Eck, Piötter, Benzler, Schlüter, interner Bericht Nr. 41.02.01, Forschungszentrum Karlsruhe.

Micro-P-PIM

*JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Maschinen- und Werkzeugtechnik für PIM von Mikropräzisionsbauteilen

M. Maetzig ¹, K. Müller ³, H. Walcher ¹, J. Pannhorst ²

¹ ARBURG GmbH + Co KG

² JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG

³ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Statuskolloquium Micro-P-PIM am 11. Februar 2004

Micro-P-PIM

*JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

ARBURG GmbH + Co KG

- *Firmensitz in Loßburg / nördlicher Schwarzwald*
- *Seit Gründung im Jahr 1923 im Eigentum der Familien Hehl*
- *Positive Strukturen eines Familienunternehmens*
- *International tätiger Produzent von High Tech Spritzgießmaschinen und Anlagen*





Micro-P-PIM

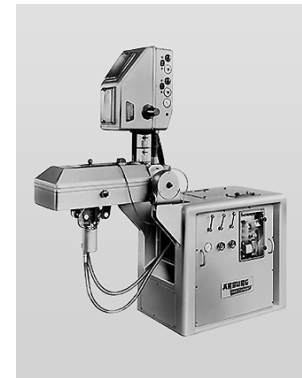


ARBURG

ARBURG GmbH + Co KG

Neuorientierung

- 1950: *Produktion von Blitzlichtern für die Fotografie*
- 1954: *Entwicklung einer Maschine zum Umspritzen der Blitzlichtkontakte mit Kunststoff zur Optimierung der Eigenproduktion*
- 1956: *Beginn Serienproduktion*
- 1961: *Realisierung des „ALLROUNDER Prinzips“*



ARBURG

ARBURG GmbH + Co KG

Meilensteine

- 1962: *Erste Spritzgießmaschine für CIM*
- 1975: *Weltweit erster Hersteller von Spritzgießmaschinen mit Mikroprozessor-Steuerung*
- 1991: *Aufbau des PIM - Labors*
- 1993: *Vorstellung der neuen Steuerungsphilosophie SELOGICA*



Micro-P-PIM



ARBURG GmbH + Co KG

Micro-P-PIM

★ JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

ARBURG Produktpalette

- ALLROUNDER Spritzgießmaschinen von 125 bis 4000 kN
- MULTILIFT Robot-Systeme, horizontal und vertikal
- THERMOLIFT kombinierter Materialtrockner und -förderer



Micro-P-PIM

★ JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

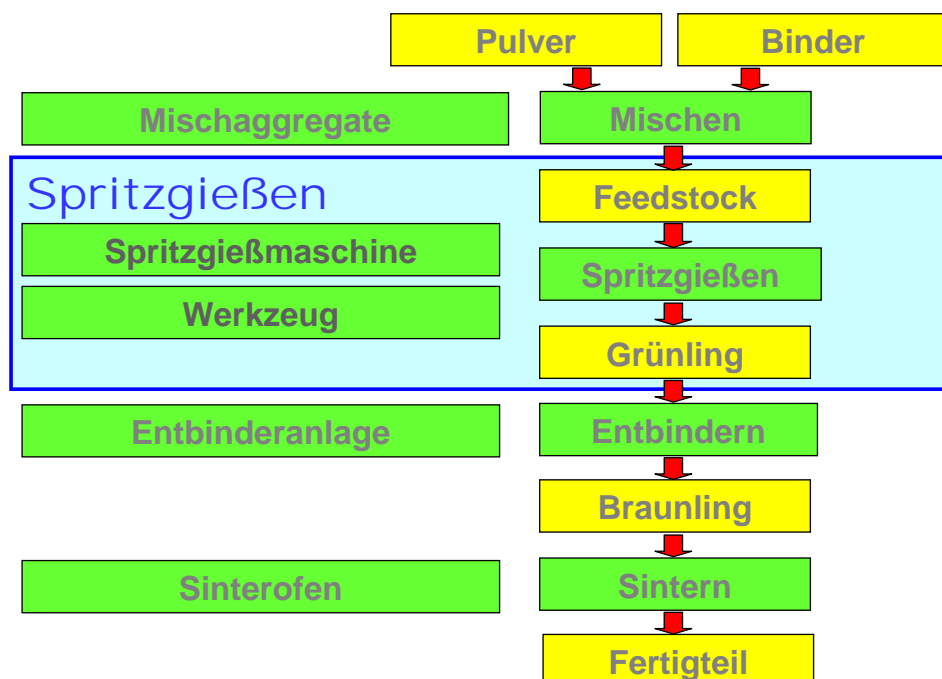
FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

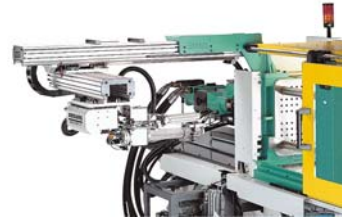
Verfahrensablauf PIM



Maschinentechnik

Technische Spezifikation

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



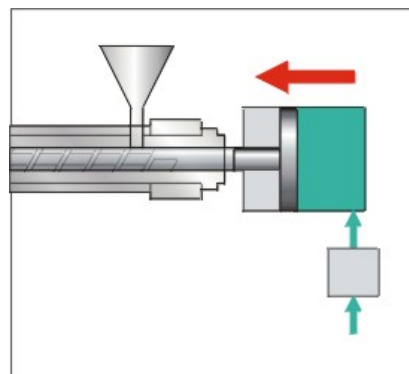
Micro-P-PIM



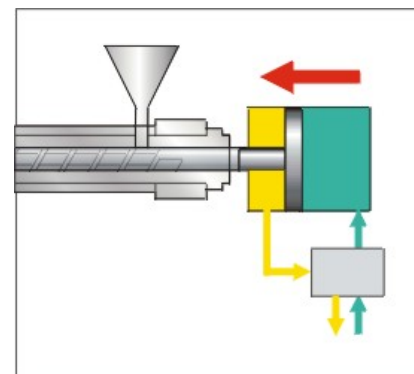
Maschinentechnik

Hydraulische Konzepte im Vergleich:

Einspritzgeregelte Schnecke



Lagegeregelte Schnecke

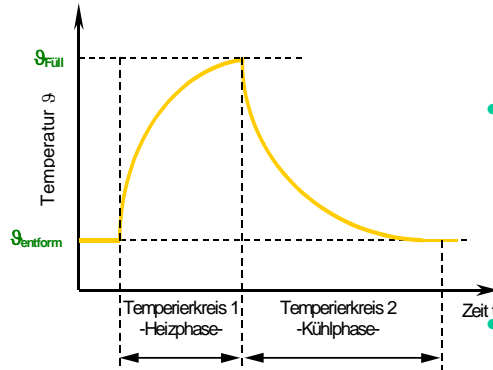


Micro-P-PIM



Maschinentechnik

Variotherme Prozeßführung:



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

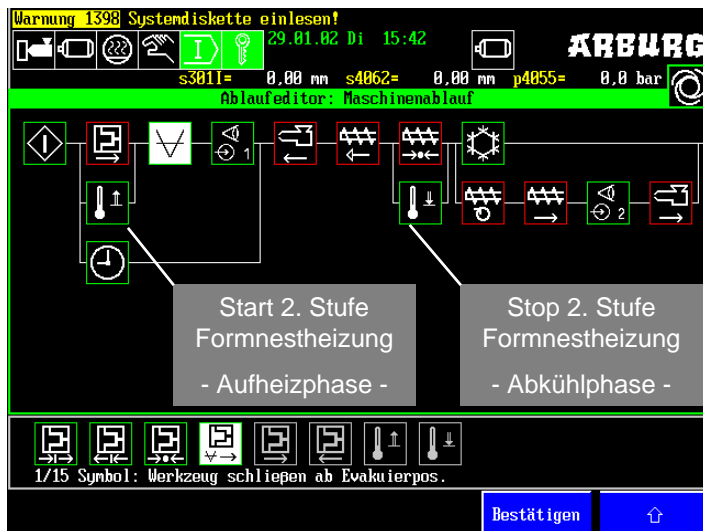


Micro-P-PIM



Maschinentechnik

Variotherme Prozeßführung:



Micro-P-PIM



Maschinentechnik

Variotherme Prozeßführung:

Warning 1398 Systemdiskette einlesen! 29.01.02 Di 15:42

Überwachung Eingang 1/2

Überwachung Eingang 1

4/ 5

E4134 Einspritztemperatur erreicht

F4194 Mess-System 1

Überwachungslogik:

F4184= Istwert > Sollwert

T4134= 240 Grad C Sollwert

T4144= 0 Grad C Istwert

t4154= 0.00 s Verzög. Prüfsymbol

t4150= 90.00 s max. Freigabezeit

Folgefunktion bei Alarm (F4134):

F4165= sofortiger Maschinenstopp

Erlaubt: [28 Ascii]

Eingabe: C4154

Überwachung Eingang 1 Überwachung Eingang 2



Micro-P-PIM



Ausblick Maschinentechnik

Spritzeinheit für Mikrospritzguß:

Motivation:

- Anpassung des Schussgewichts an Bauteilvolumen
- Geringe Verweilzeit der Feedstocks
- keine thermische Schädigung der Formmasse

Umsetzung:

- Zylindermodul mit Schnecke $\varnothing 12 \text{ mm}$



Micro-P-PIM





Micro-P-PIM



JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co



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

Schramberg: Teilefertigung, Vertrieb und Administration

Seedorf: Montage, Entwicklung und Musterwerkstatt

Zahlen aus 2003

**Mitarbeiter: 385
Umsatz: 33 MioEUR**



Vorstellung der JUNGHANS Spritztechnik

Mitarbeiter:

- Werkzeugbau: 30
- Konstruktion: 3
- Maschinenbediener: 17

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 Palettierung
Teilegrößen 0,05 g bis 120 g**



Micro-P-PIM



Der Fertigungsbereich bei JUNGHANS Feinwerktechnik

Micro-P-PIM



JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Der JUNGHANS Werkzeugbau

Micro-P-PIM

- Der folgende **Maschinenpark teilweise in klimatisierten Räumen** lässt die präzise Herstellung von Werkzeugen für **kleine, komplexe und präzise** Werkstücke zu.
- 4 CNC - Werkzeugfräsmaschinen (HERMLE, MIKRON, MAHO)
 - von 400x400x400 bis 690x490x490
- 3 CHARMILLES Funkenerosionsanlagen
 - 350x250x300, 320x220x320 bzw. 450x320x400
- 1 FEHLMANN Präzisionskoordinaten-Bohr und Fräsmaschine
- 2 HAUSER Lehrenbohrmaschinen
- 1 NC Drehmaschine Ø175 x 270
- 7 Werkzeugfräsmaschinen (HERMLE, MIKRON, MAHO)
- 2 AGIECUT Drahtschneideanlagen
 - mit Feindrahteinrichtung für 3/100 bzw. 5/100 Drahtdurchmesser
- 1 Zeiss Koordinatenmeßzentrum
 - 400x500x350

JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Werkzeuge für das Projekt Micro-P-PIM

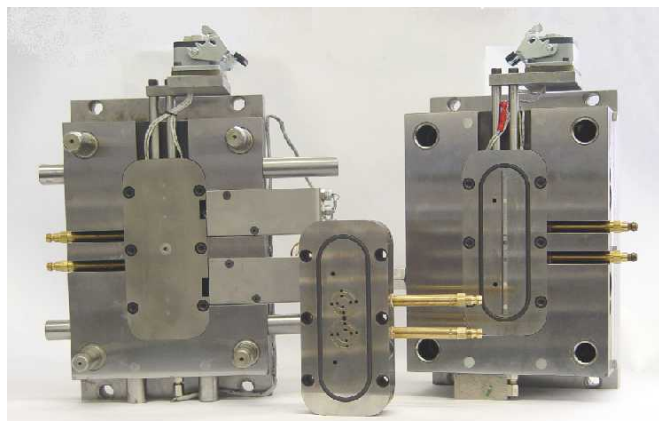
Für Micro-P-PIM werden 5 Werkzeuge benötigt:

- Probekörper mit sechs Formeinsätzen
 - Spirale, Umlenkung, Düse, Diffusor, Stufe und Biegeprobe
- Demonstrator für Ferrule
 - (CIM ZrO_2 Werkstoff, Genauigkeit 0,05%)
- Demonstrator für Zahnblende
 - (CIM Al_2O_3 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)

Micro-P-PIM



Werkzeug für Probekörper



temperierbares Werkzeug
mit Formteileinsatz Doppelschnecke, eingebaut sind:

- Heizung
- Wasserkühlung
- Temperatur-Sensoren
- Drucksensoren

Micro-P-PIM



Formeinsatz „Doppelspirale“

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

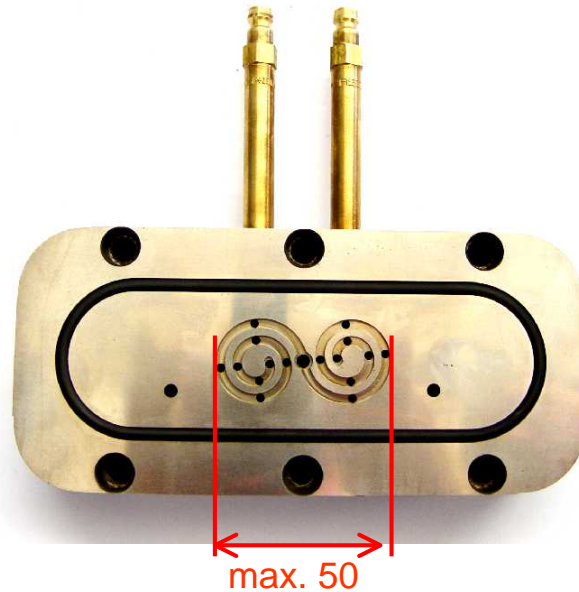
F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU



An der Spirale ist
 zu sehen

◆ Anspritzpunkt

◆ Öffnungen für
 Sensoren

Probekörper „Biegeprobe“ und „Düse“

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

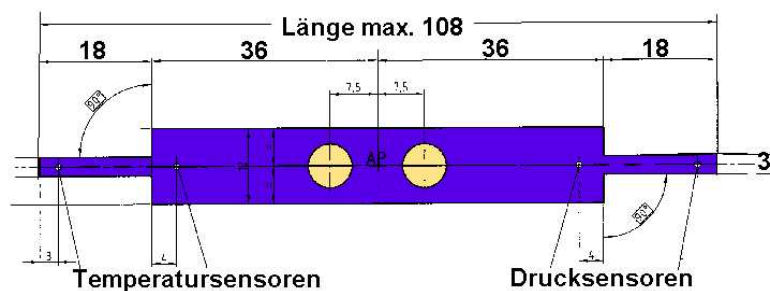
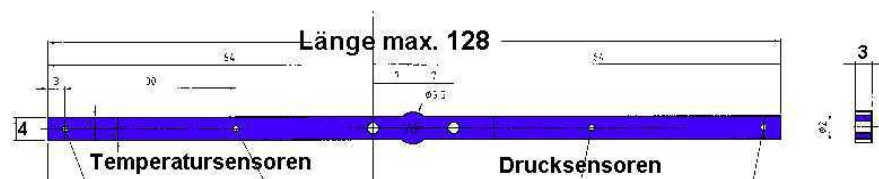
F

FRIATEC

KRONE

schunk

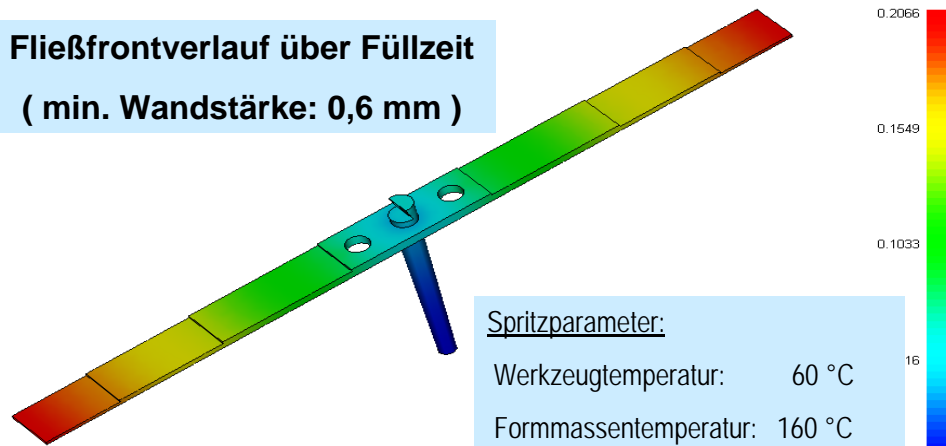
LMU



Weitere Probekörper-Geometrien im Text des Tagungsbands

Simulation zu PIM von Probekörper „Stufe“

Fließfrontverlauf über Füllzeit
 (min. Wandstärke: 0,6 mm)



Spritzparameter:

Werkzeugtemperatur: 60 °C
 Formmassentemperatur: 160 °C
 Volumenstrom: 9.550 cm³/s
 Formmasse: Inmatec K1011

Vergleich Simulation : Experiment:

Vergleichbare Werte für Druckbedarf und Füllzeit zur Formfüllung

bei geeigneter Wahl des Umschaltzeitpunkt zwischen Geschwindigkeits- und Druckregelung am Ende der Einspritzphase

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

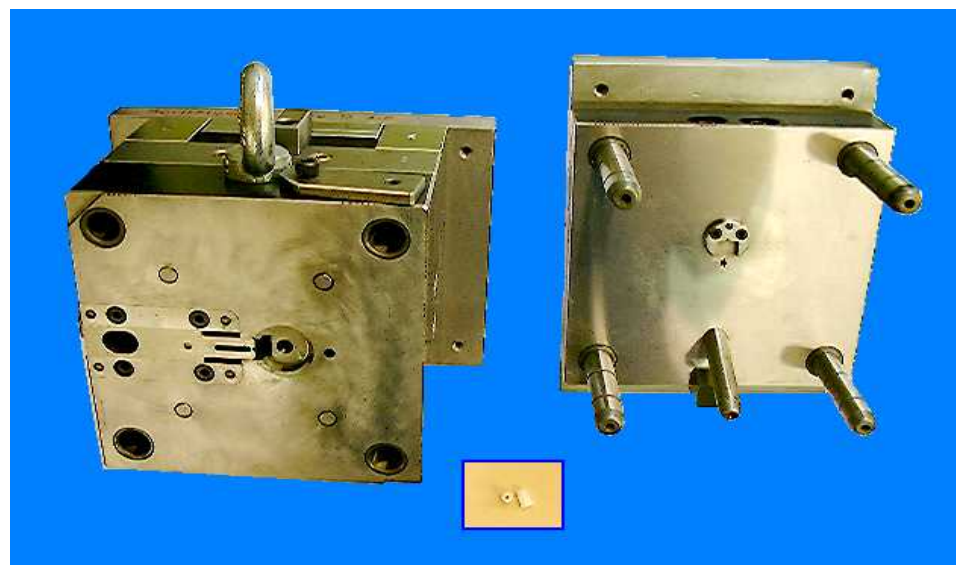
FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Werkzeug für Zahnblende



Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

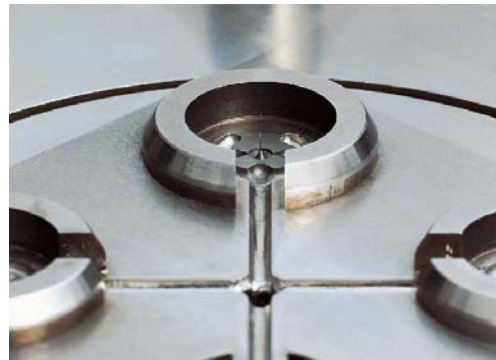
FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

Werkzeug für Ferrule



Vier-Fach-Werkzeug
für die Ferrule

Spritzteil mit Pin aus
dem Werkzeug
„Ferrule“
Kerndurchmesser:
0,16mm



Weitere Arbeiten

- Die Werkzeuge für die MIM- (17-4 PH) -Demonstratoren sind in der Fertigung, wenn die Schrumpf-Faktoren ermittelt sind, werden die Kavitäten bearbeitet.
- Sicher müssen auch an bereits gefertigten Werkzeugen nach weiterer Feedstock-Entwicklungen Anpassungen durchgeführt werden.



Micro-P-PIM



Maschinen- und Werkzeugtechnik für PIM von Mikropräzisionsbauteilen

M. Maetzig ¹, K. Müller ³, H. Walcher ¹, J. Pannhorst ²

¹ ARBURG GmbH + Co KG

² JUNGHANS Feinwerktechnik GmbH & Co KG

³ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

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

Metallpulver-Spritzgießen für Getriebekomponenten aus Stahl

Metallpulver-Spritzgießen für Getriebekomponenten aus Stahl

Frank Baumgärtner ¹⁾, Martin Enders ¹⁾, Christian Thürigen ²⁾,
J. Pannhorst ³⁾, H. Paul ⁴⁾, S. Rath ⁵⁾, M. Schulz ⁵⁾,

¹⁾ Schunk Sintermetalltechnik GmbH

²⁾ Dr. Fritz Faulhaber GmbH

³⁾ Junghans Feinwerktechnik GmbH

⁵⁾ FNE Forschungsinstitut für Nichteisen-Metalle Freiberg GmbH, ZMU

⁵⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, IMF III

Zusammenfassung

Die Miniaturisierung nimmt zunehmend in allen technischen Bereichen stark zu. Hinsichtlich großserienfähiger Fertigungsverfahren zeigt sich, dass für hochbelastete Bauteile vornehmlich das pulvermetallurgische Spritzgießverfahren (Metal Injection Molding = MIM) eine elegante Möglichkeit darstellt, feinstrukturierte Bauteile endkonturnah herzustellen. Hinsichtlich zunehmender Miniaturisierung müssen Fragestellungen der Abbildegenauigkeit, der möglichen Toleranzen und der Werkstoffeigenschaften von Bauteilen in Minidimensionen bearbeitet werden, um die Grenzen der Machbarkeit immer mehr zu erweitern. Hauptaufgaben sind neben der Pulverauswahl, der Feedstockoptimierung, der Werkzeugauslegung und der Formgebung auch die Betrachtung nachgeschalteter Prozesse.

1. Motivation, Ausgangssituation und Ziel

Der Zwang zur Ressourcenschonung und der damit einher gehende Druck zur Gewichtsreduktion von Bauteilen und Gesamtsystemen steigert das Interesse an Klein- und Kleinstbauteilen. Gleichzeitig stoßen bei der Miniaturisierung bestehende, etablierte Fertigungsverfahren immer mehr an ihre Grenzen hinsichtlich der Machbarkeit, erzielbarer Toleranzen und schließlich der Kosten. Weiterhin sind für Bauteile mit hohen mechanischen und tribologischen Beanspruchungen hochpreisige Werkstoffe notwendig. Somit wird eine höhere Werkstoffausnutzung zwingend, die damit Fertigungsverfahren der Urformtechnik nahe legen.

Mittels des pulvermetallurgischen Spritzgusses (MIM) wurden schon Anfang der 90er Jahre erste Serienteile aus Edelstahl gefertigt, die im Stückgewicht kleiner 0,5 g lagen [1]. Die nahezu 100%-ige Rohstoffausnutzung und hervorragenden Reproduzierbarkeit, die mittels der MIM-Technik gegeben ist, legt es natürlich nahe eine weitere Miniaturisierung und Erhöhung der Detailtreue zu ermöglichen.

Hinsichtlich der geforderten Toleranzen sind bisher erzielbare Größenordnungen bei ca. 1% des Nennmaßes [2], bei größervolumigen Bauteilen teilweise deutlich besser. Für Mikrobau- teile muß es das Ziel sein, diese Abbildungs- genauigkeit weiter zu verbessern, wozu vornehm-

lich die Feedstockanpassung und die Prozess- adaption auf Mikrodimensionen (Werkzeug- gestaltung, Spritzparameter, Wärmebehandlung, Chargierung, etc.) als Einflussgrößen zu nennen sind.

Das Projekt zielt dabei auf ein nachbearbei- tungsarmes Verfahren ab, das es ermöglicht, mittels einer Adaption der Maschinen-, Werk- zeug, Prozess- und Werkstofftechnologie für Mikropräzisionsbauteile kostengünstig zu fertigen. Deshalb wird die Prozesskette des Metall- pulver-Spritzgießens für Bauteile mit einer Prä- zision bis in den Mikrometerbereich entwickelt.

2. Arbeitsprogramm und Methoden

Um den Entwicklungserfolg für MIM zu verifizie- ren, wurden Bauteile mit unterschiedlichen ge- ometrischen Herausforderungen, die heute in Kunststoff gefertigt werden, als Demonstratoren ausgewählt. Diese zwei Demonstratorbauteile aus Stahl (Planetenträger, Getriebeschnecke) zweier unterschiedlicher, künftiger Anwender (Faulhaber/Junghans) sind durch zwei unter- schiedliche Bauteilhersteller (Schunk/Junghans) mit jeweils unabhängigen Feedstocksystemen zu entwickeln. Beide Bauteile sind im Anhang (Folienpräsentation) dargestellt und deren Funk- tion sowie deren Anwendungen aufgeführt. Für jedes Bauteil sind konkrete Ziele definiert, wobei vornehmlich die Prozessoptimierung und die

Beschreibung von Abhängigkeiten parallel für beide Feedstocksysteme durchgeführt werden, um während der Projektphase Optimierungsschritte zu ermöglichen. Die Arbeiten, die einen Vergleich und Synergien erlauben, werden durch eine Simulation der Formfüllung beim Pulverspritzgießen unterstützt. Konkret sind für die Bauteilfertiger die nachfolgenden Aufgabenpakete definiert:

Die Voraussetzung für die eigentliche Produktionstechnik für nachbearbeitungsarme Mikropräzisionsbauteile müssen definiert und entwickelt werden. Dies ist sowohl die geeignete Maschinen- als auch Werkzeugadaption an die gewünschte Präzision der Bauteile möglichst bis in den Mikrometerbereich.

Weiterhin ist für das Mikropräzisions-Pulverspritzgießen ein entscheidender Punkt die Entwicklung homogener Feedstocks unter Verwendung ausreichend grüfester und leicht entbindebarer Binder. Die Abblidegenauigkeit von Kleinststrukturen wird einhergehen mit der Pulverpartikelgröße, so dass die Beschreibung von ggf. auftretenden Skalierungseffekten mit zur Entscheidung über eine Feedstockeignung beitragen wird.

Sind für Makrobauteile die feedstockabhängigen Prozessdaten für das heutige Pulverspritzgießen selbst längst genau genug bekannt, so muss für die Mikropräzisionsbauteile gerade an diesem Teilprozess verstärkt entwickelt werden. Damit verbunden ist das Ziel die Maßgenauigkeit der Bauteile soweit zu verbessern, daß Nachbearbeitungsschritte möglichst entfallen können. Hierzu werden auch Simulationsrechnungen unumgänglich sein, die insbesondere seitens Forschungszentrum Karlsruhe erfolgen werden, nachdem die für die Berechnung notwendigen Feedstockdaten ermittelt sind.

Mikrobauteil geeignete Entbinderungszyklen, die eine ausreichende Bauteilfestigkeit der Braunlinge nach dem Entbindern für die Weiterverarbeitung gewährleisten sind weiterhin zu definieren.

Schließlich ist es notwendig, das eigentliche Sintern weiter zu entwickeln, damit die mechanisch- als auch chemisch-physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs den Anforderungen genügen.

3. Stand der Arbeiten und Ergebnisse

Für die Anforderungen an die zwei Demonstratorbauteile wurde der Stahl 17-4PH als beste Werkstoffalternative definiert. 17-4PH ist ein aushärtbarer ferritischer Edelstahl der Zusammensetzung X5CrNiCuNb17-4. Die bedingte Korrosionsbeständigkeit bei gleichzeitig hoher

einstellbarer mechanischer Festigkeit ist für Anwendungen mit mechanischer Beanspruchung in der Feinwerktechnik die ideale Werkstoffzusammensetzung.

Die für unlegierte Stähle typisch feine Pulverkörnung von $< 10\mu\text{m}$ ist für diese Werkstoffgruppe, die für die spezielle Anwendung als durchlegiertes Pulver vorliegen muss, leider nicht bzw. nur zu sehr hohen spez. Pulverpreisen erwerbbar. Wie weit mit groben bzw. mittelfeinen Pulvern die Maßtoleranzen und die Abblidegenauigkeit erreichbar sind, wird deshalb anhand drei verschiedener Ansätze untersucht. Dabei findet ein grobes, ein mittelfeines und ein feinstskaliges Pulver Verwendung (so auch die Nomenklatur im Anhang). Das grobe Pulver entspricht einer Fraktion, wie sie heute in speziellen Fällen in der Produktion von Bauteilen bereits eingesetzt wird, die feinste Fraktion wurde speziell für das Projekt am Zentrum für Material- und Umwelttechnik GmbH, einem gemeinnützigen Unternehmen des Forschungsinstituts für Nichteisen Metalle Freiberg GmbH, gesichtet.

Zwecks Absicherung aller folgender Ergebnisse wurden zunächst alle Pulver von mehreren Partnern unter Vergleich der Methoden vollständig charakterisiert (Ergebnisse siehe Vortrag).

Aus diesen Pulvern und zwei unterschiedlichen Bindern wurden verschiedene Feedstocks entwickelt. Die Beschreibung der Feedstockeigenschaften ist für die Simulation des Einspritzvorgangs, der Formfüllung etc. von großer Wichtigkeit. Mittels eines ersten Ansatzes eines gewöhnlichen Feedstocks, wie er für makroskopische Bauteile verwendet wird, zeigt sich, dass eine Anpassung hinsichtlich der Abbildung von Mikrostrukturen zwingend notwendig ist. Mittels einer ersten Optimierungsschleife konnten Verbesserungen im Fließverhalten, Formfüllvermögen etc. erzielt werden, so dass weitere Voruntersuchungen zur exakten Werkzeugauslegung erfolgen können.

Festigkeiten, Rauheiten und weitere technische Daten konnten vorab an makroskopischen Prüfkörpern bestimmt werden, so dass darauf die richtige Werkstoffauswahl bestätigt werden konnte.

Ein von der Pulverauswahl nahezu unabhängiges Schrumpfmaß wurde durch Dilatometermessungen ermittelt. Der Wärmebehandlungszyklus insbesondere während dem Sintern kann infolge der höheren Sinteraktivität den Feinstpulvern angepasst und gegebenenfalls verkürzt werden. Erwartete Kornwachstumsprozesse in gesinterten Gefügen müssen noch gesondert untersucht werden.

4. Ausblick

Der Trend der Miniaturisierung wird sich weiter verstärken. Mit den aktuell laufenden Entwicklungen wird den erwarteten Anforderungen des künftigen Marktes gerecht reagiert.

Werden im weiteren Verlauf des Projekts die ersten Demonstratorbauteile gefertigt, dann wird sich durch deren Test innerhalb von Baugruppen zeigen, in wie weit die technischen Anforderungen und Erwartungen der Anwender erfüllt werden können.

5. Danksagung

Die Ergebnisse resultieren aus dem vom BMBF geförderten Projekt mit den Förderkennzeichen 02PD2130, 02PD2133 und 02PD2136, wofür wir auch dem Projektträger PFT für seine Unterstützung danken.

6. Literatur

- [1] *Cohrt, H.; Enders, M.: Large scale production of stainless steel gears by metal injection moulding. Proceedings of the international Conference on Powder Metallurgy, Paris (1994.)*
- [2] *MIM Expertenkreis (Hrsg.): Toleranzdatenblatt – Merkblatt der deutschen MIM-Industrie zu Toleranzen von MIM-Bauteilen. April 2003.*

Micro-P-PIM



Metallpulver-Spritzgießen für Getriebekomponenten aus Stahl

F. Baumgärtner ¹⁾, **M. Enders** ¹⁾, **C. Thürigen** ²⁾,
A. Paul ⁴⁾, **J. Pannhorst** ⁵⁾, **S. Rath** ³⁾, **M. Schulz** ³⁾

- 1) Schunk Sintermetalltechnik GmbH
- 2) Dr. Fritz Faulhaber GmbH
- 3) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, IMF III
- 4) Institut für Nichteisen Metalle Freiberg GmbH
- 5) Junghans Feinwerktechnik GmbH

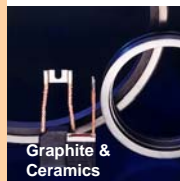
Statuskolloquium Micro-P-PIM am 11. Februar 2004



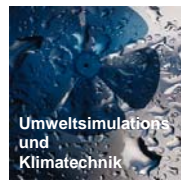
Micro-P-PIM



Schunk-Gruppe



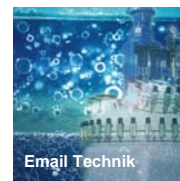
Kohlenstoff
 Keramik
 Quarz
 Module
 Bahntechnik



Umwelt-
 simulations-
 und
 Klimatechnik
 Komponenten-
 und Anlagenbau



Formteile
 Lager
 Pulver-
 Spritzguß
 Filter
 Elektroden
 Metall
 Schäume



Stahl/Email
 Chemie-
 Apparate
 Sanitärprodukte
 Fassaden



Stromüber-
 tragungs-
 systeme
 Ultraschall-
 technik
 Materialfluß-
 systeme
 Komponenten



Schunk Sintermetalltechnik GmbH

gefördert vom
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung
PFT
Projekträger des BMBF
Produktion und
Fertigungstechnologien
Forschungszentrum
Karlsruhe

Micro-P-PIM

JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

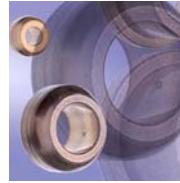
F

FRIATEC

KRONE

schunk

LMU



Sinterlager



MIM



Sinterformteile



Elektroden



Filter



Aluminiumschäume



Motivation für MIM

gefördert vom
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung
PFT
Projekträger des BMBF
Produktion und
Fertigungstechnologien
Forschungszentrum
Karlsruhe

Micro-P-PIM

JUNGHANS
Feinwerktechnik

ARBURG

F

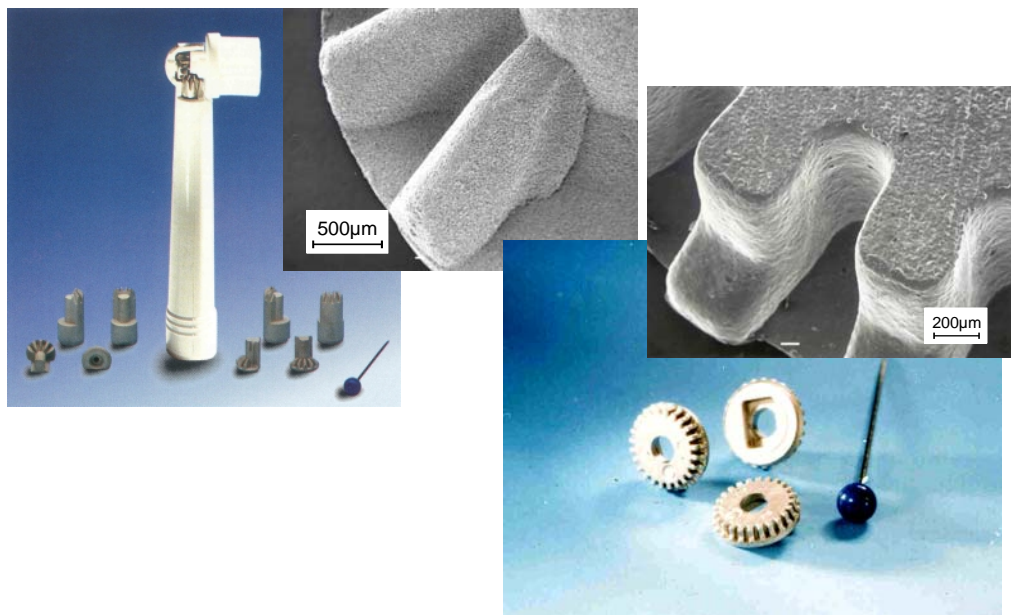
FRIATEC

KRONE

schunk

LMU

1990



Micro-P-PIM



Status zu 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 extremer Kostenerhöhung für Bauteilfertiger
- wirtschaftliche Pulver mit geringer mittlerer Pulverpartikelverteilung
- vorhandene Binder / Feedstocks prozessfähig? -> ggf. Anpassung vornehmen:
Toleranz / Präzision / Oberflächenqualität / Nacharbeit
- Werkzeugbau: Toleranzen



Micro-P-PIM



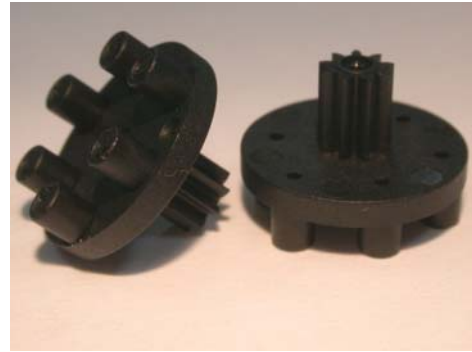
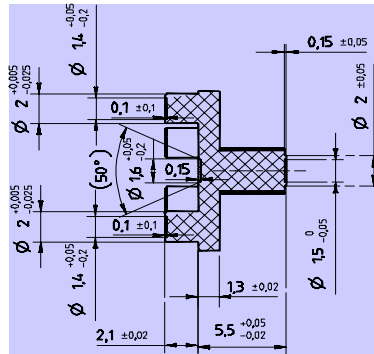
Aufgaben Arbeitskreis Getriebeteile

- Miniaturisierung von MIM-Bauteilen
- Toleranzoptimierung von MIM-Komponenten durch verbesserte / angepasste Rohstoffe u. Fertigungsprozesse
- Verringerung / Eliminierung von Nacharbeit
- QS-Kontrolle an Mikrobauteilen
- optimierte Bauteile hinsichtlich:
 - Drehmomentübertragung
 - Tribologie
 - Bauteilgröße
 → ? →
 - Skalierungseffekte
 - Gefüge



Getriebekomponente - Planetenträger

Micro-P-PIM

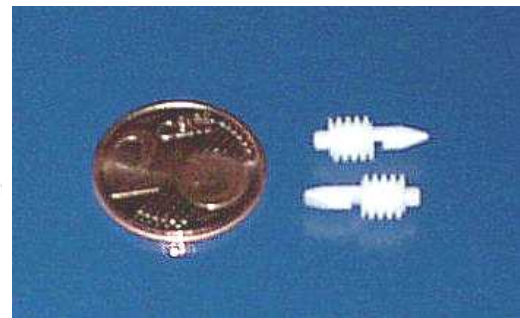
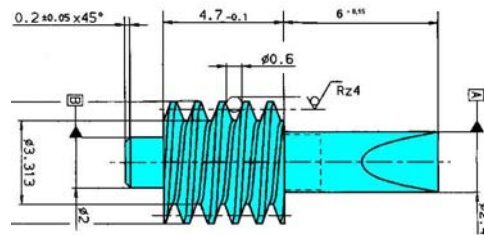


Anforderungen an den Planetenträger
 Temperaturbereich: - 30°C bis + 85°C
 Drehzahlbereich: bis 2500 Upm
 Momentübertragung: max. 150 mNm



Getriebekomponente - Getriebeschnecke

Micro-P-PIM



Anforderungen an die Getriebeschnecke
 Funktionsbereich: - 46°C bis + 71°C
 Drehzahlbereich: 10.000 bis 25.000 Upm
 Karftübertragung: (keine Spezifikation, bisher)



Pulvervarianten 17-4 PH

Micro-P-PIM



Ziel Pulvervorauswahl:

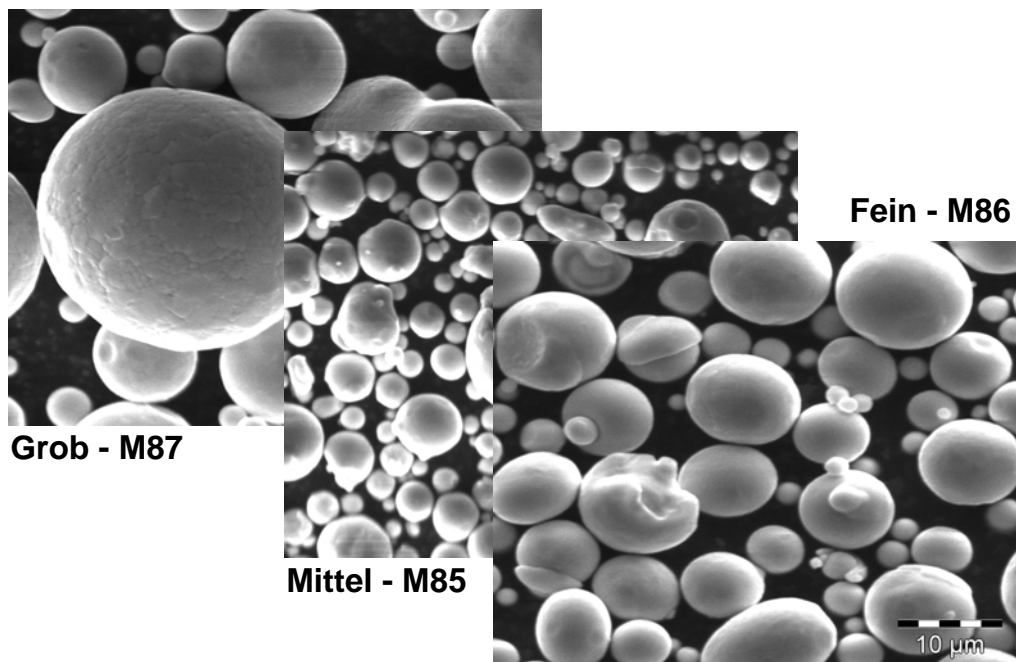
- Bewertung der Verarbeitbarkeit
- Verfügbarkeit
- Kosten
- Gefügeausbildung
- Toleranzen / Kantenschärfe
- Oberflächenausbildung

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



Pulvervarianten 17-4 PH

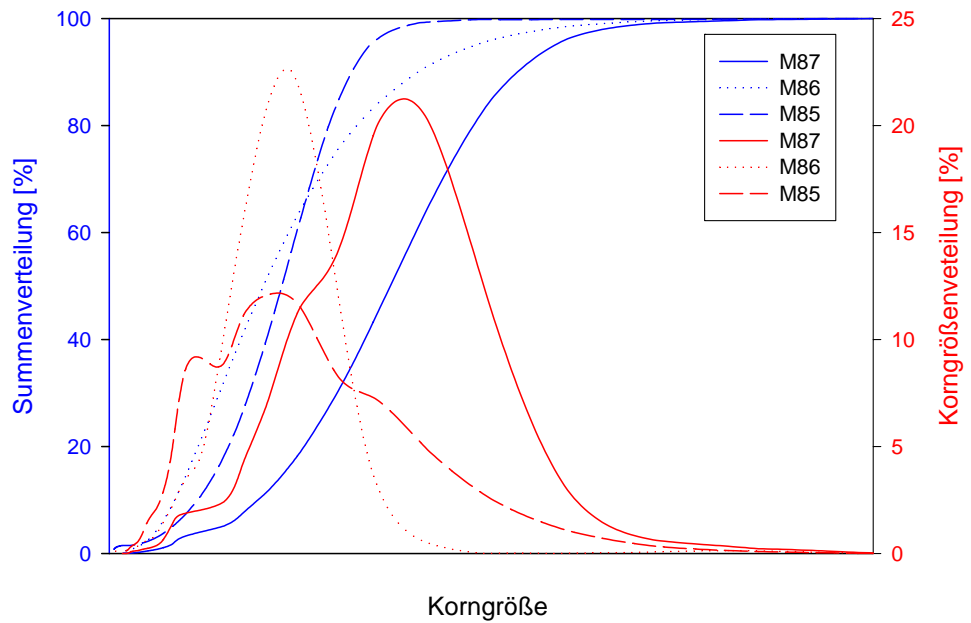
Micro-P-PIM



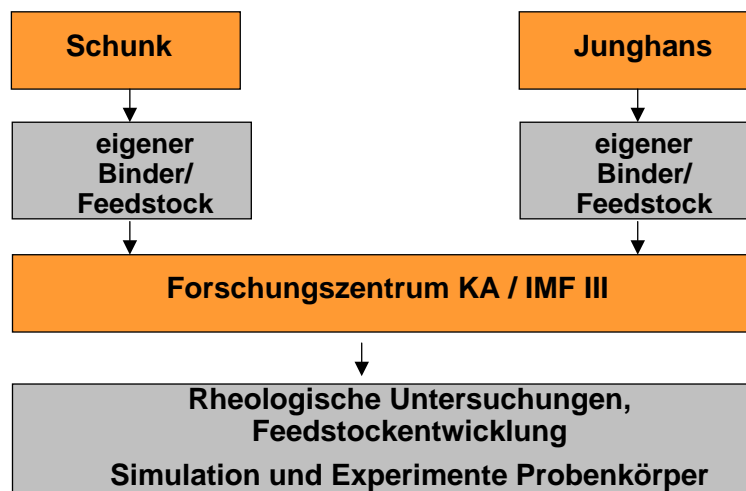
Micro-P-PIM



Partikelgrößenverteilung



Feedstockentwicklung



Ergebnisse: Feedstockoptimierung ist notwendig!

zweite „Regelschleife“ mit Start Nov. 2003 -> Lösungsansätze für Feedstockoptimierung positiv

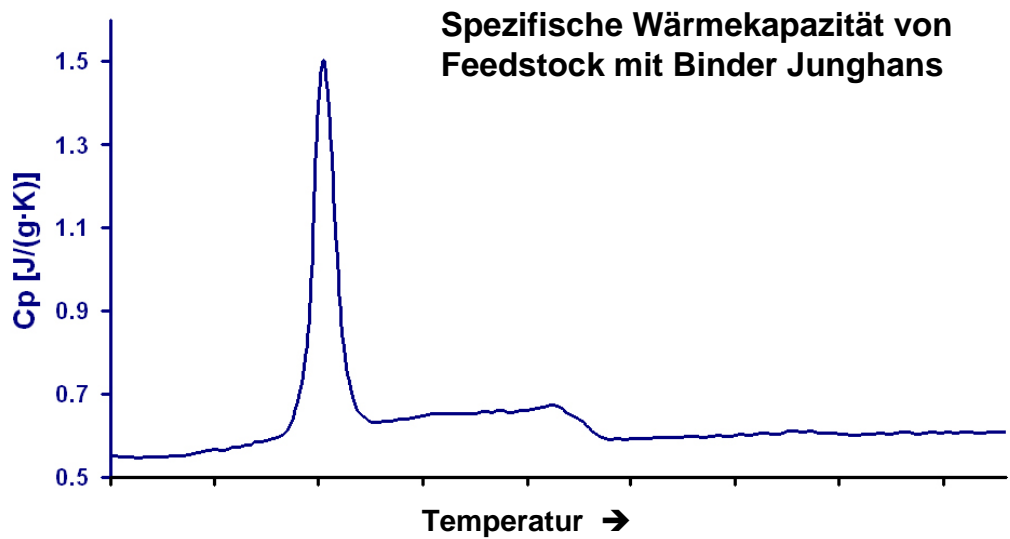


Micro-P-PIM



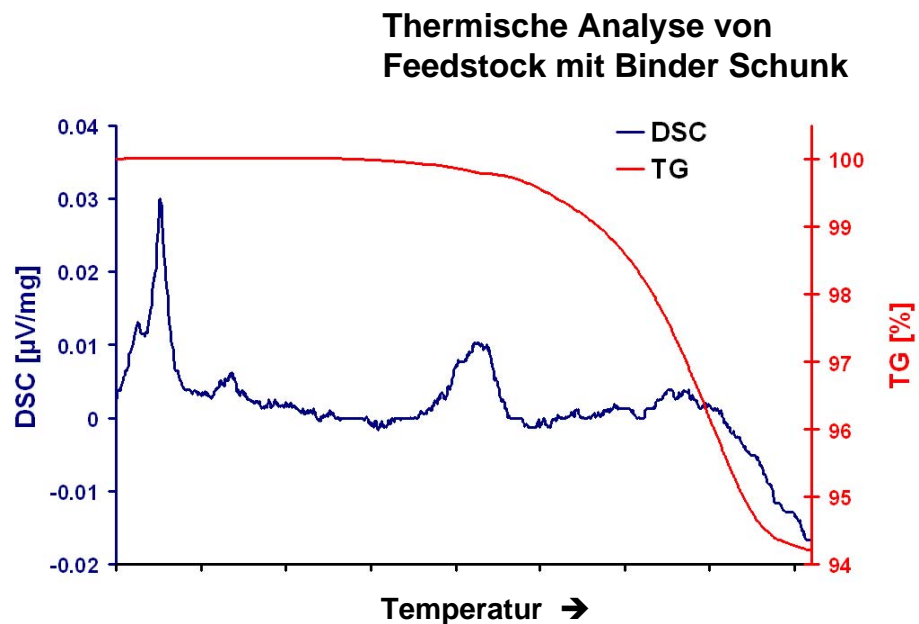
Feedstockcharakterisierung

Micro-P-PIM



Feedstockcharakterisierung

Micro-P-PIM



Prüflingkörper für mechanische Charakterisierung

gefördert vom
 Bundesministerium für Bildung und Forschung
 PFT
 Projektträger des BMBF
 Produktion und Fertigungstechnologien
 Forschungszentrum Karlsruhe

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

F

FRIATEC

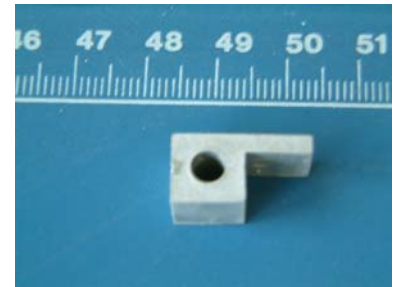
KRONE

schunk

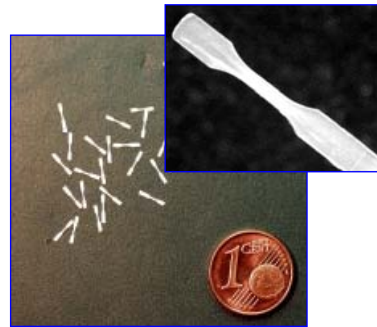
LMU



Zugstab



Winkel



Mikro-Zugstab
 0,2 x 0,1 mm²



Stand erzielbarer Sinterdichten

gefördert vom
 Bundesministerium für Bildung und Forschung
 PFT
 Projektträger des BMBF
 Produktion und Fertigungstechnologien
 Forschungszentrum Karlsruhe

Micro-P-PIM

JUNGHANS
 Feinwerktechnik

ARBURG

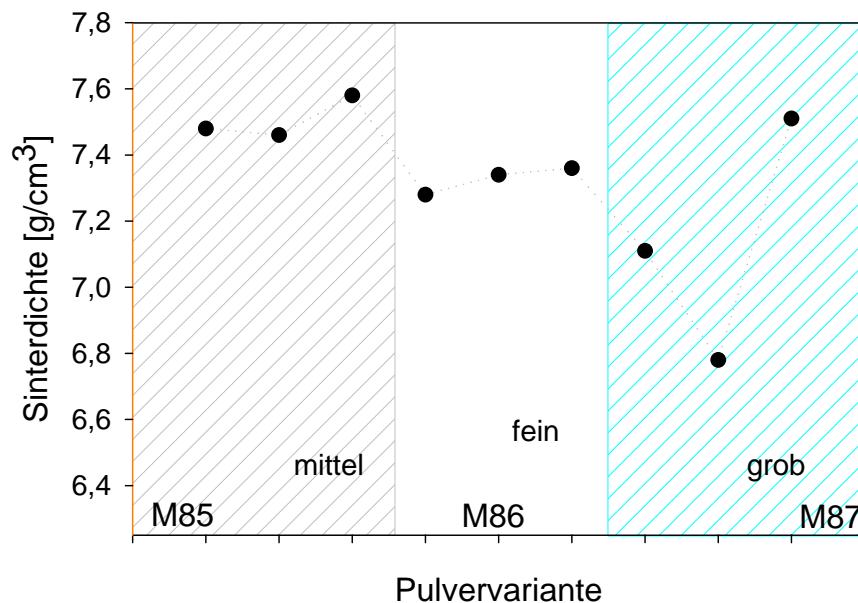
F

FRIATEC

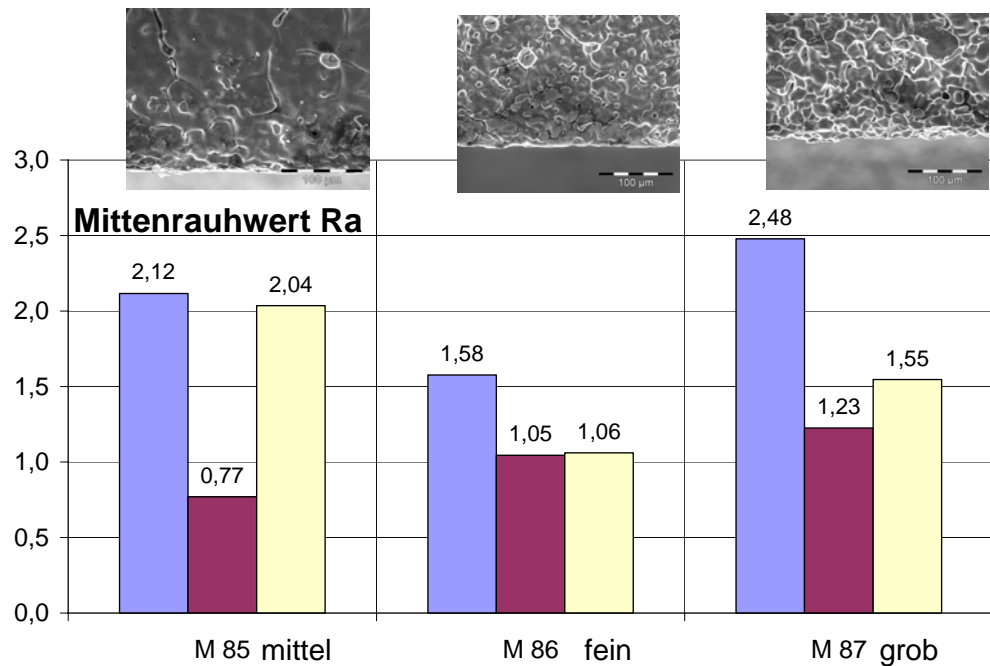
KRONE

schunk

LMU



Gesinterte Oberflächenqualität



Micro-P-PIM

Zusammenfassung

- Technologische Daten für MIM (Formgebung und Sinterung) sind ermittelt für den aktuellen Stand der Feedstockentwicklung
- Werkstoffeigenschaften an makroskopischen Probekörpern sind bestimmt
- Feedstock für Mikropräzisionsbauteile ist vorhanden
- Sinterschrumpf für ein Feedstocksystem ist bestimmt
- Werkzeugkonzeption und Werkzeugbau erfolgt aktuell
- Anstehende Arbeiten:
 - Spritzgießen der Demobauteile
 - weitere Feedstockoptimierung für fortschreitende Miniaturisierung
 - Spritzgießen von Probekörpern -> Werkstoffdaten und Gestaltungsrichtlinien erarbeiten



Micro-P-PIM

Micro-P-PIM



Ausblick

- Trend der Miniaturisierung wird sich verstärken
- Ressourcenschonung durch Miniaturisierung wird den Markt weiter anheizen
- Über die Antriebstechnik hinaus werden weitere Anwendungen in der Feinwerktechnik, Optik etc. erschließbar
- Die direkte Umsetzung der Demonstratoren erschließt weitere Bauteile innerhalb der Baugruppen und über verwandte Baugruppen hinaus
- Kompetenz von Schunk im Segment der Klein- und Kleinstbauteile wird weiter ausgebaut



Micro-P-PIM



Metallpulver-Spritzgießen für Getriebekomponenten aus Stahl

F. Baumgärtner ¹⁾, M. Enders ¹⁾, C. Thürigen ²⁾,
A. Paul ⁴⁾, J. Pannhorst ⁵⁾, S. Rath ³⁾, M. Schulz ³⁾

¹⁾ Schunk Sintermetalltechnik GmbH

²⁾ Dr. Fritz Faulhaber GmbH

³⁾ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, IMF III

⁴⁾ Institut für Nichteisen Metalle Freiberg GmbH

⁵⁾ Junghans Feinwerktechnik GmbH

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

