

2.3 Komplexe Geometrien – kleine Strukturen in Keramik

- Roland Schreiber
MicroCeram GmbH
Meißen
- Aaron Makrlik
MicroCeram GmbH
Meißen

Die Folien finden Sie ab Seite 123.

2.3.1. Aufgabenstellungen für neue Produkte

Ein Konstrukteur wird bei der Entwicklung neuer Produkte stets darauf orientieren, durch die optimale Auswahl von Hochleistungswerkstoffen für seine Einzelkomponenten sehr gute Produkteigenschaften zu erzielen. Dabei sind Betrachtungen zu nachfolgenden Anforderungsprofilen von großer Bedeutung:

- Mechanische Anforderungen
 - Tribologische Eigenschaften (Verschleiß)
 - Festigkeiten
 - Härte
 - Dichte
- Elektrische Beanspruchung
 - Durchschlagfestigkeit
 - Dielektrische Eigenschaften
 - spezifischer Widerstand
- Thermische Belastung
 - maximale Einsatztemperaturen
 - Thermoschockbeständigkeit
 - Wärmedehnung
 - Wärmeleitfähigkeit

- Chemische Belastung
 - Säure- und Laugenbeständigkeit
 - Umwelteinflüsse

Wenn das Anforderungsprofil für die Werkstoffgruppen Metall und Kunststoff als nicht optimal eingestuft wird, bietet sich Keramik als Alternative an.

Keramik in seinem breiten Werkstoffsortiment löst Anwendungsprobleme vorzugsweise im Hochtemperaturbereich, bei Verschleiß und beim elektrischen Isolationsvermögen, ist aber durch seine aufwändige Herstellungstechnologie kostenintensiv.

Bei der Entwicklung neuer Produkte ist deshalb schon in der Planungsphase gemeinsam mit potentiellen Keramikherstellern eine Analyse der technischen Anforderungen an die Keramikkomponenten durchzuführen.

- Welche Komponente muss zwingend aus einem Keramikwerkstoff sein? (Metall und Kunststoff ist stets die kostengünstigere Variante.)
- Welcher Ingenieurkeramikwerkstoff ist für die Lösung des Problems geeignet?
- Wie erfolgt der Aufbau der Keramikkomponente (ein- oder mehrteiligen Aufbau)?
- Welche konstruktiven Randbedingungen hinsichtlich einer keramikgerechte Konstruktion der Bauteile sind zu beachten.

2.3.2. Kostenanalyse der Keramikbauteile

Bei der Entwicklung neuer Produkte sind stets die Preise für das Serienprodukt dominierend. Es muss deshalb auf ein endkonturnahes Formgebungsverfahren orientiert werden. Schleifbearbeitung der Keramikbauteile ist der überragende Kostenfaktor und muss auf ein Mindestmass reduziert werden.

Aber auch in der Entwicklungsphase der Produkte steigt der Kostendruck für die Bauteile als Versuchsmuster und Pilotserien. Zusätzlich werden die Produktentwicklungszeiten immer kürzer und damit steigt der Termindruck für die Bereitstellung von Keramikkomponenten.

Unter diesem Aspekt ist es notwendig, den potentiellen Anwendern von Keramikkomponenten ein schlüssiges Konzept vom Versuchsmuster über die Pilotproduktion hin bis zum Serienprodukt anzubieten. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik fordern die Keramikhersteller mit immer kleineren und komplex aufgebauten Keramikbauteilen heraus.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die Entwicklung und Produktion von kleinen und kleinsten Keramikbauteilen aus Ingenieurkeramikwerkstoffen. Im Mittelpunkt stehen dabei die endkonturnahen Formgebungsverfahren „Heißgießen“ und „Spritzguss“.

2.3.3. Auswahl des Keramikwerkstoffes und die Geometrie des Bauteiles

In der Praxis wird der Konstrukteur nicht immer die präzisen Anforderungen unter extremen Einsatzbedingungen an das Keramikbauteil benennen können. Auch die Kostenanalyse der Ausgangspulver für die Ingenieurkeramikwerkstoffe (Kilogrammpreise zwischen 2 und 250 €) zwingt den Anwender zu einem optimalen Werkstoff.

Sowohl die konstruktive Gestaltung wie auch der Keramikwerkstoff sind für die Problemlösung von Bedeutung. Ein umfassender Überblick ist im Brevier Technischer Keramik nachzulesen (www.keramverband.de/brevier). Größte Sicherheit für das Funktionieren des Systems ist der Versuch unter Einsatzbedingungen.

2.3.4. Bereitstellung von Funktionsmustern

Die einfachste und schnellste Herstellung von Funktionsmustern erfolgt über eine Hartbearbeitung aus gesinterten Rohlingen. Kostengünstiger ist die Grün- / Weißbearbeitung der Rohteile mit anschließender Sinterung und ggf. nachfolgender Hartbearbeitung. Komplexe Strukturen insbesondere im Bereich der Mikrosystemtechnik lassen sich durch eine Kombination von endkonturennaher Formgebung, nachfolgend Grünbearbeitung, anschließender Sinterung und ggf. Hartbearbeitung herstellen.

2.3.4.1. Hartbearbeitung von Rohlingen

Die Hartbearbeitung von fertig gesinterten Keramikrohlingen aus unterschiedlichen Werkstoffen ist die einfachste und schnellste Methode ein Bauteil mit komplexer Geometrie herzustellen. Zum Einsatz kommen dabei die unterschiedlichsten Hartbearbeitungsverfahren wie:

- Flachscheifen und Rundscheifen
- Läppen und Polieren
- Ultraschallunterstütztes Schleifen und Bohren
- Honen

Einschränkungen gibt es derzeit noch bei der Herstellung und Bearbeitung von sehr feinen Bohrungen insbesondere im Rahmen der Bauteile für die Mikrosystemtechnik.

Diese Methode der Bereitstellung von Mustern ist gekennzeichnet durch:

- Schnellste Reaktionszeiten bei Herstellung der Muster und bei notwendigen Korrekturen an der Geometrie durch CAD-gestützte Bearbeitung
- Möglichkeiten der besten Maßtoleranzen und hoher Oberflächengüte
- Hohe Sicherheit hinsichtlich Werkstoffqualität unter der Voraussetzung, dass keine Schädigung des Werkstoffes durch die Hartbearbeitung entsteht
- Sehr hohe Kosten
- Begrenzte Machbarkeit

2.3.4.2. Grün- und Weißbearbeitung von Rohlingen

Als Rohkörper werden einfache Formlinge eingesetzt. Diese Rohlinge werden durch Pressen (uniaxial / isostatisch), Heissgiessen und Spritzgiessen gefertigt.

Im Gegensatz zur Grünbearbeitung werden bei der Weißbearbeitung Rohlinge verwendet, bei denen der zur Formgebung notwendige

Binder durch einen Temperaturprozess entfernt ist. Mit diesem Temperaturprozess wird gleichzeitig die Grundfestigkeit des Rohlings eingestellt.

Voraussetzung für eine endkonturennahe Grün- und Weißbearbeitung sind modifizierte CNC-gesteuerte Dreh- und Fräsmaschinen.



Bild 1: 5-Achs-Mikrofräsmaschine

Bild 1 zeigt eine 5-Achs-CNC-Microbearbeitungsmaschinen mit einer Heidenhain-Steuerung und einer Hochfrequenzspindel mit 40.000 1/min, die zur Grünbearbeitung komplexer Geometrien eingesetzt wird.

Das Anforderungsprofil an die Bearbeitungstechnik (zum Beispiel Fräsmaschine) von Grünteilen ist sehr hoch:

- hohe Genauigkeit und Dynamik
- möglichst 4 oder 5 Achsen
- Optimierte Absaugvorrichtung
- Sperrluft auf den Achsen

Vortragsblock 1

- Speziell beschichtete Fräser (diamantbeschichtet, galvanisch mit Diamanten belegt bzw. Schneiden aus PKD oder Naturdiamant)

Mit dieser Technologie sind Keramikbauteile herstellbar, die nach dem Sinterprozess gekennzeichnet sind:

- hohe Oberflächenqualität und Strukturfeinheit
- Toleranzen ohne Hartbearbeitung
 - > 4 mm $\pm 1/100$ mm
 - ab 4 mm $\pm 0,25\%$

Es sind spezielle Strategien erforderlich um Ausbrüche zu minimieren. Optimierte Werkzeugschneiden und Beschichtungen ermöglichen hohe Standzeiten.

Es gibt eine Reihe von Anwendungsfällen, bei denen am Keramikbauteil für die spätere Produktion keine Bearbeitung vorgesehen ist, aber extreme Anforderungen hinsichtlich der Oberflächenqualität bestehen. Dies trifft zum Beispiel für Bohrungen in Düsensysteme zu. Dort ist die geforderte Oberflächenqualität durch eine spanende Bearbeitung im Grünzustand nicht erreichbar. In diesem Fall wird ein kombiniertes Verfahren für die Musterfertigung eingesetzt. Einbringen der qualitätsbestimmenden Bohrungen durch Heißgießen in einen Rohkörper und nachfolgende Grünbearbeitung.

2.3.5. Pilot- und Serienproduktion

Spätestens nach erfolgreicher Mustererprobung stellt sich die Frage nach der Produktion und den Produktionsstückzahlen. Im Zuge der endkonturennahen Fertigung bieten sich 2 Verfahren an:

- Spritzguss in Analogie zur Herstellung von thermoplastischen Kunststoffteilen
- Heißgießen

In beiden Fällen werden die Keramikpulver mit thermoplastischem Binder zu Feedstocks verarbeitet, die dann in eine Negativform aus Metall oder Hartmetall gespritzt werden. In einem dem eigentlichen Sinterprozess vorgelagerten Technologieschritt müssen die thermoplastischen Binder aus dem Formkörper entfernt werden. Der Einsatz von hohen Anteilen an Thermoplasten als Binder (> 30 Vol.%) führt zu

Einschränkungen in der konstruktiven Gestaltung des Bauteiles. Das Bauteil sollte möglichst gleichmäßige Wanddicken unter 10 mm haben. Beide Verfahren haben im Produktionsprozess ihre Vorzüge, die nachfolgend ausgeführt werden.

2.3.5.1. Spritzguss

Der Keramikspritzguss bietet dem Konstrukteur umfassende geometrische Freiheiten in 3D-Design. Hinterschneidungen, seitliche Durchbrüche, geringe Wandstärken und kleine Löcher sind möglich.

Beim Keramikspritzguss ändert sich im Gegensatz zur spanenden Bearbeitung die Denkweise hin zu:

- maximale Reduzierung des Werkstoffes
- dünne Wandstärken
- leichte Bauteile



Bild 2: Spritzgussmaschine der Fa. Arburg



Bild 3: Spritzgusswerkzeug

Bild 2 zeigt eine Spritzgussmaschine der Firma Arburg, wie sie bei der Herstellung von Keramikbauteilen zum Einsatz kommt. Mit dem in Bild 3 dargestellten Spritzgusswerkzeug ist man in der Lage vollautomatisiert Formteile zu spritzen.

Durch Handlingtechnik und Qualitätssicherungssysteme kann man mit sehr hoher Wiederholgenauigkeit Formteile aus Keramikfeedstock unterschiedlichster Zusammensetzung herstellen. Dabei wird der Keramikfeedstock mit Spritzdrücken bis zu 100 MPa in die Form gepresst.

Dabei laufen während des Formgebungsvorgangs nachfolgende Prozessschritte ab:

- Aufschmelzen des Feedstocks und Dosieren
- Spritzgießen der Masse (geschwindigkeitsgeregelt)
- Nachdruck (druckgeregelt)
- Abkühlung der Bauteile

- Entformung

Die Weiterverarbeitung der Formlinge erfolgt über die Prozessschritte „Entbinderung“ und „Sinterung“.

Diese Technologie ist für einen automatisierten Fertigungsprozess geeignet. Eine sehr gute Rohbruchfestigkeit der Spritzlinge und der Zwischenprodukte erlauben ein risikoloses Handling über die gesamte Fertigungskette.

2.3.5.2. Heißgießen

Heißgießen ist ein dem Spritzguss verwandtes thermoplastisches Formgebungsverfahren zur Herstellung von Keramikbauteilen. Im Unterschied zum Spritzguss mit dem Einsatz von Thermoplasten als Plastifizierer werden beim Heißgießen ausschließlich Paraffine und flüssig schmelzende Wachse als Binder verwendet.



Bild 4: Heißgießmaschine

Heißgießen erfolgt bei Spritzdrücken zwischen 0,2 und 5 MPa und Temperaturen zwischen 60 und 100°C. Im Vergleich zum Spritzguss, der ähnlich komplizierte Geometrien der Keramikbauteile zulässt, bietet das Heißgießen eine Reihe von Vorteilen, die sich von den verfahrenstechnischen Parametern „geringer Spritzdruck“ und „geringe Fließgeschwindigkeit“ der Formmassen bei Formfüllen ableiten.

Vortragsblock 1

- einfache und material sparende Werkzeugkonstruktionen durch geringere Schließdrücke. Dies führt zu Werkzeugkosten, die um den Faktor 3 bis 5 niedriger liegen
- Geringerer Verschleiß an Werkzeug und Heißgießanlage beim Einsatz abrasiver Keramikpulver
- Minimierung der Entmischungserscheinungen beim Formgebungsprozess
- Geringere Schwindung der Formmassen. Minimierung des Bindemittelanteils und Verbesserung der Maßtoleranzen „as fired“
- Feinere Strukturen und kleinere Löcher durch eine weitaus geringere Belastung der Werkzeugeinbauten während des Formfüllvorganges
- Das Formenmaterial wird weniger belastet – es können auch ungehärtete Metalle und sogar Kunststoffe als Formwerkstoff eingesetzt werden
- Unbegrenzte Wiederverwendung von Feedstockabfällen, die im Arbeitsgang „Formgebung“ auf treten

Nachteile des Heißgießens gegenüber dem Spritzguss sind

- geringere Rohbruchfestigkeit des Feedstock und damit begrenzte Möglichkeiten zur Automatisierung des Formgebungsprozesse
- Teilweise erhöhte Aufwendungen beim Entbindern in einer Pulverschüttung

Das Heißgießen wird im Wesentlichen im teilautomatisierten Betrieb realisiert. Die Entformung der Bauteile erfolgt manuell – die Werkzeuge besitzen eine und mehrere Kavitäten.

2.3.5.2.1. Praxisbeispiele

Das Heißgießen mit der verfügbaren Anlagentechnik hat und den technologischen Rahmenbedingungen lässt sich fast unbegrenzt für die bekannten Hochleistungskeramikwerkstoffe einsetzen.

2.3.5.2.1.1. Lampenfassung

Das nachfolgend beschriebene Bauteil (Lampenfassung 20x40x60mm) gehört zu den größeren Bauteilen, die mittels Heißgießen herstellbar sind. Es besitzt aber eine hohe Komplexität im Aufbau und ist ein Beispiel, wie man mit einfachen werkzeugtechnischen Mitteln solche Bauteile abformen und zu fehlerfreien Keramikbauteilen sintern kann.

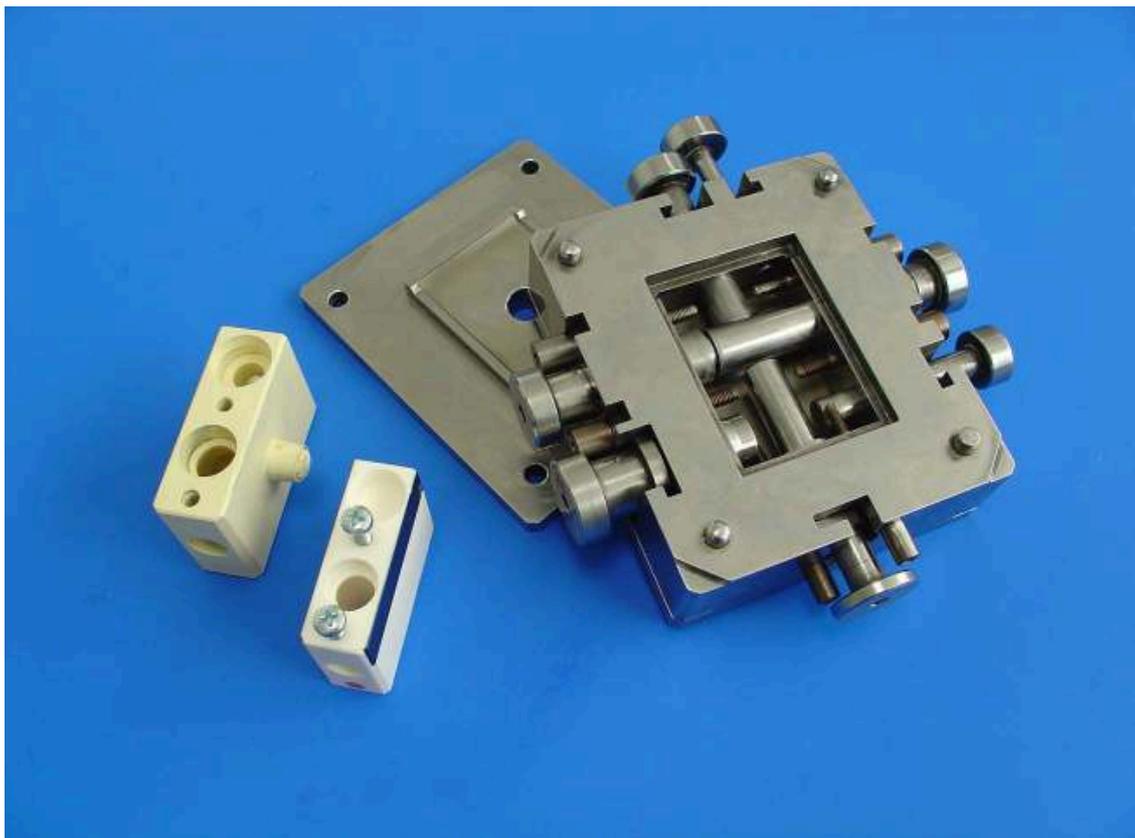


Bild 5: Heißgießwerkzeug „Lampenfassung“

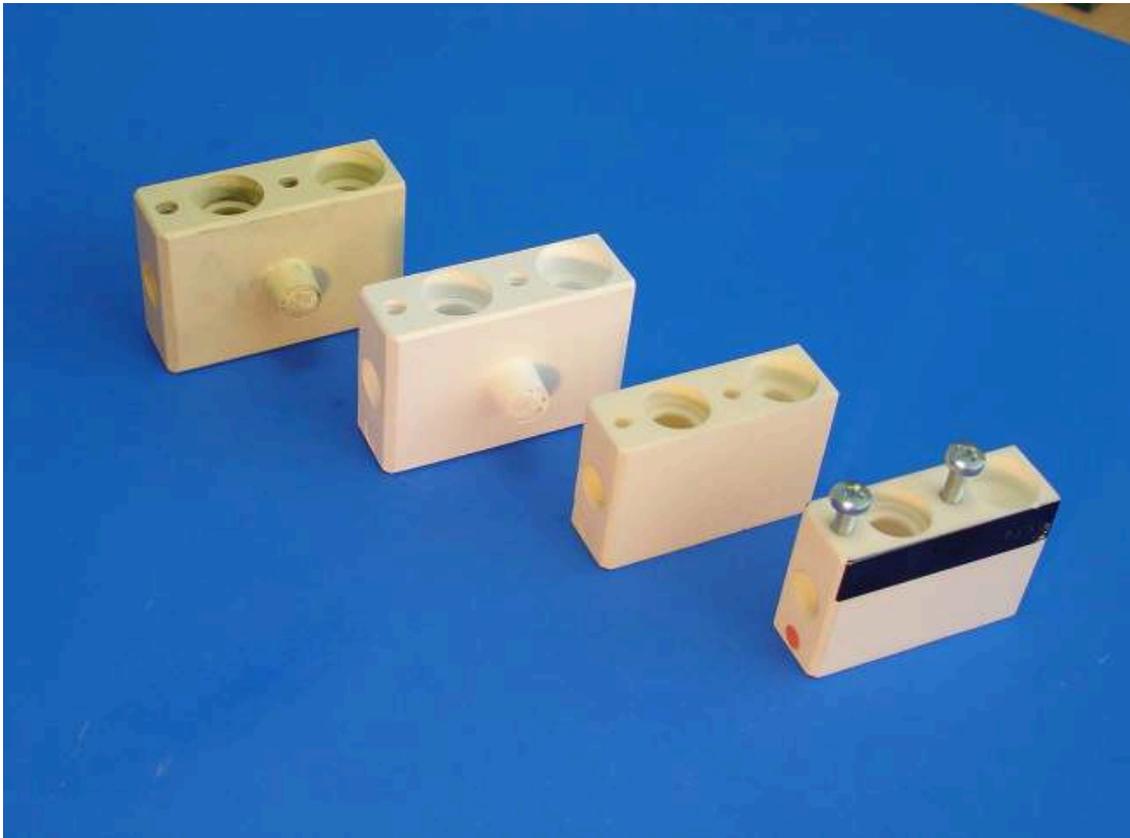


Bild 6: „Lampenfassung“ – Bearbeitungsstufen

Bild 5 zeigt das „Handspritzwerkzeug“ mit 6 Gewindestiften und 7 Stifteinsätzen, das vom Bediener manuell entformt und wieder zusammengesetzt wird. Durch die einfache Bauweise des Werkzeuges reduziert sich der Werkzeugkostenaufwand wesentlich. Damit ist es möglich solche Bauteile in Stückzahlen zwischen 100 und 10.000 Stück pro Jahr zu marktfähigen Kosten herzustellen.

Bild 6 zeigt das geformte Teil in den unterschiedlichen Bearbeitungsstufen:

- Formteil nach dem Heißgießen
- Formteil entbindert
- Keramikteil – Anguss entfernt und Planflächen geschliffen
- Keramikbauteil fertig

2.3.5.2.1.2. Miniaturfixpunktiegel

Bild 7 und Bild 8 zeigen die Anordnung von sehr dünnwandigen und strukturierten Keramikbauteilen, die endkonturennah und passgenau gefertigt wurden.

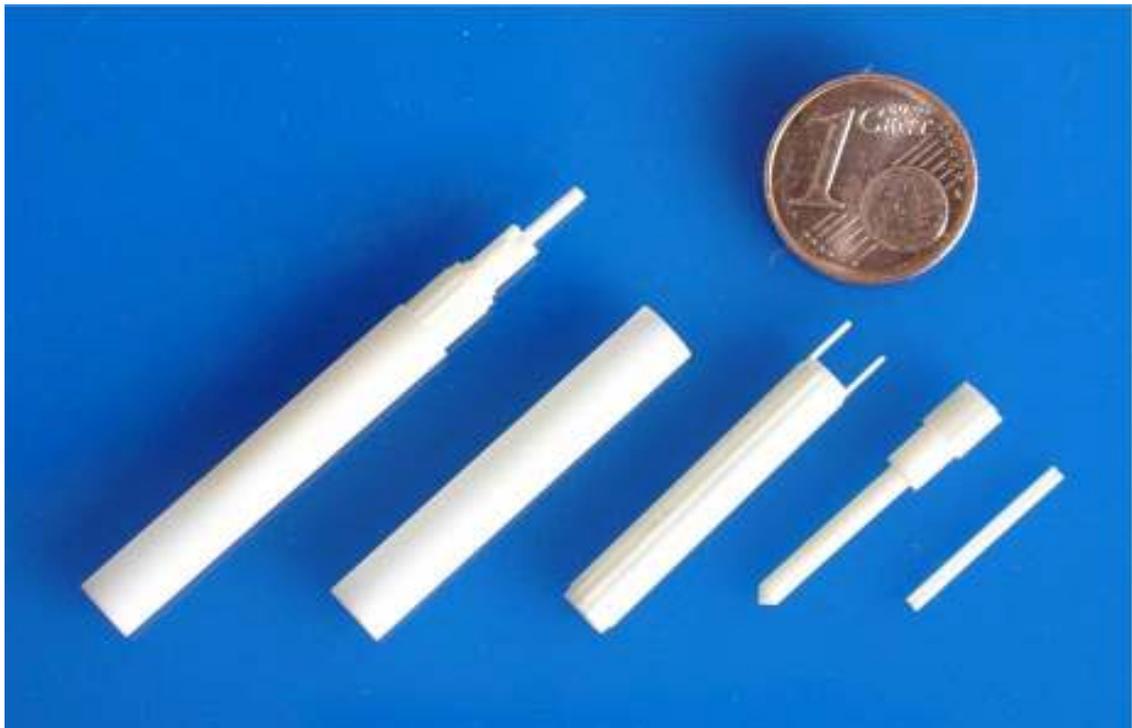


Bild 7: Anordnung von 4 Keramikbauteilen „Miniaturfixpunktiegel“

Vortragsblock 1

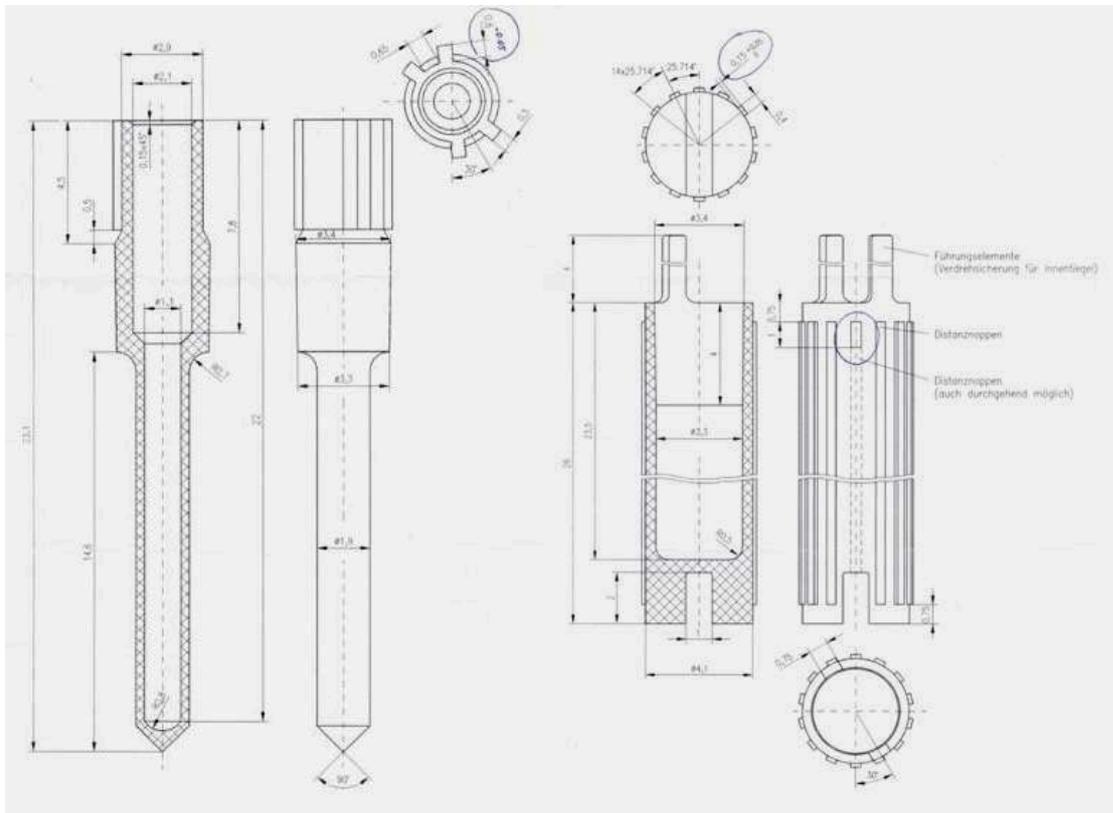


Bild 8: Zeichnungen von 2 Einzelteilen

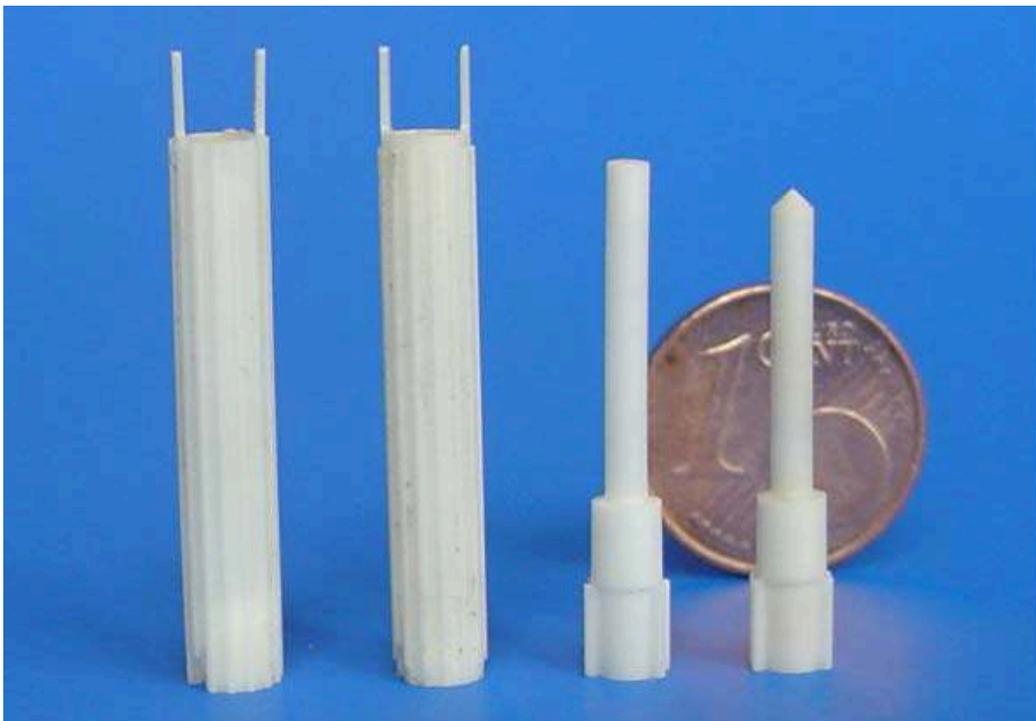


Bild 9: Innen- und Außentiegel

Bild 9 stellt links jeweils das Keramikbauteil „as fired“ dar, während rechts das Fertigteil nach geringfügiger Schleifbearbeitung zu sehen ist.



Bild 10: Heißgießwerkzeug Außentiegel

Bild 10 zeigt das Heißgießwerkzeug für den Außentiegel. Ähnlich ist das Werkzeug für den Innentiegel aufgebaut.

Die Formgebung von kleinen und dünnwandigen Bauteilen gestaltet sich über das Heißgießen effektiv. Die exzellente Flieseigenschaften der Heißgießfeedstocks gestatten die Ausformung von dünnwandigen Bauteile bis 0,20 mm Wandstärke schon bei Temperaturen nur 10 bis 20 K oberhalb der Schmelztemperatur des Bindemittels. Eine Temperierung des Werkzeuges ist nicht notwendig. Die Taktzeiten des Formgebungsvorganges liegen bei 30 sec.

2.3.6. Zusammenfassung

Für die Herstellung von endkonturennahen Keramikbauteilen komplexer Geometrie in geeigneter Größe als Massenprodukt ist der Spritzguss das effizienteste Formgebungsverfahren. Automatisierte Verfahrensschritte ermöglichen Produktionsketten mit zwischengeschalteten Qualitätssicherungssystemen, die ein hohes Maß an Produktsicherheit für das Keramikbauteil garantieren.

Als Alternative für die Klein- und Mittelserie ist das Heißgießen geeignetes Formgebungsverfahren. Kostengünstige Werkzeuge und geringe Rüstkosten ermöglichen ein schnelles Reagieren auf Kundenwünsche. Durch den schonenden Formfüllvorgang ergeben sich neue Aspekte zur Fertigung filigraner Kleinteile.

Für die Bereitstellung von Mustern ist die Grünbearbeitung durch CNC-Drehen und –Fräsen wegen ihrer flexiblen Reaktion auf Geometrieänderungen und aus Kostengründen einzusetzen.

Die Laserbearbeitung zum Einbringen von filigranen Strukturen in der Grün-, Weiß- und Hartbearbeitung gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 15) finden sich auf den folgenden Seiten.

Komplexe Geometrien Kleine Strukturen in Keramik

Dipl.-Chem. Roland Schreiber
MicroCeram GmbH
Meißen

Aufgabenstellung für neue Produkte



Anforderungsprofil an Werkstoff

- Mechanische Anforderungen
- Elektrische Beanspruchung
- Thermische Belastung
- Chemische Belastung

Metalle und Kunststoffe entsprechen nicht dem Anforderungsprofil

Alternative: Hochleistungskeramikwerkstoff

Hochleistungskeramikwerkstoffe

Breites Werkstoffsortiment löst Anwendungsprobleme

- Im Hochtemperaturbereich
- Bei Verschleiß
- Beim elektrischen Isolationsvermögen

Fertigungstechnologien für Keramikbauteile sind aufwändig und kostenintensiv

- Formgebung
- Entbindern
- Sintern
- Hartbearbeitung mittels Diamant

Planung des Einsatzes von Keramikbauteilen

Gemeinsame Analyse der technischen Anforderungen an die Keramikkomponenten

- Welche Systemkomponente muss zwingend aus einem Keramikwerkstoff sein ?
- Welcher Hochleistungswerkstoff ist für die Lösung des Problems geeignet ?
- Wie erfolgt der Aufbau der Keramikkomponente (ein- oder mehrteilig) ?
- Welche Randbedingungen der keramikgerechte Konstruktion der Bauteile sind zu beachten ?

Kostenanalyse der Keramikbauteile

Materialkosten

- Ausgangspulver für Ingenieurkeramikwerkstoffe kosten 2 bis 250 € / kg
- Orientierung auf optimalen Werkstoff

Technologische Herstellkosten

- Zeitintensive technologische Prozesse
- Energieintensive technologische Prozesse

Hohe Bearbeitungskosten

- Einsatz von Diamantwerkzeuge
- Geringe Abtragraten

Konstruktion und Aufbau des Keramikbauteils



- Orientierung auf den optimalen Keramikwerkstoff
- Keramikgerechte Konstruktion des Systems und der Keramikbauteile
- Erprobung des Systems unter Einsatzbedingungen
- Bauteilkonstruktion für eine endkonturenahe Formgebung

2.3 Kleine Strukturen – Folie 6

Funktionsmuster

Hartbearbeitung von Rohlingen

- Flach- und Rundschleifen
- Läppen und Polieren
- Ultraschallunterstütztes Schleifen und Bohren
- Honen

Vor- und Nachteile

- Schnellste Reaktionszeiten bei Herstellung und Änderungen
- Sehr gute Masstoleranzen und hohe Oberflächengüte
- Hohe Sicherheit hinsichtlich Werkstoffqualität
- Sehr hohe Kosten
- Begrenzte Machbarkeit

Funktionsmuster



Grün- und Weißbearbeitung

Bearbeitungstechnik

- Hohe Genauigkeit und Dynamik
- Möglichst 4 oder 5 Achsen
- Optimierte Absaugvorrichtung
- Sperrluft auf den Achsen
- Speziell beschichtete Fräser



5-Achs-CNC-Microbearbeitungsmaschine

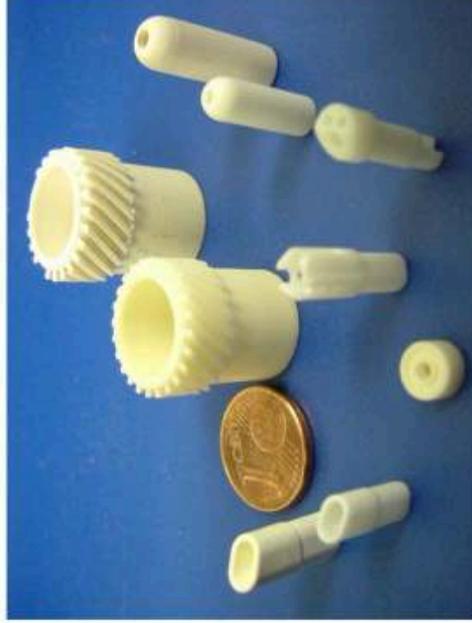
Funktionsmuster

Grün- und Weißbearbeitung

Als Rohlinge werden einfache Bauteile mit und ohne Bindemittel eingesetzt

Bauteile nach dem Sinterprozess

- Hohe Oberflächenqualität und Strukturfeinheit
- Toleranzen ohne Hartbearbeitung
 - > 4 mm $\pm 1/100$ mm
 - ab 4 mm $\pm 0,25\%$
- Spezielle Strategien zur Minimierung von Ausbrüchen
- Optimierte Werkzeugschneiden
- Vorzugsweise Spritzguss- / Heißgießrohlinge



Grünbearbeitete Bauteile

Spritzguss

Großserienfertigung

- Einsatz von thermoplastischen Feedstocks
- Aufwändiges Spritzgusswerkzeug
- Vollautomatische Formgebung
- Automatisierte Qualitätssicherung
- Gute Rohbruchfestigkeit
- Gute Reproduzierbarkeit
- Weiterverarbeitung über Entbindern und Sintern



Spritzgussmaschine Fa. Arburg



Spritzgusswerkzeug mit Bauteil

Heißgießen

Klein- und Mittelserienenfertigung

- Thermoplastische Feedstocks
- Spritzdruck 0,2 bis 5 MPa
- Spritztemperatur 60 bis 100°C
- Einfache und material sparende Werkzeugkonstruktion
- Einsatz von ungehärteten Metallen und Kunststoff als Formwerkstoff
- Geringer Verschleiß an Werkzeug und Maschine durch abrasive Keramikpulver
- Minimaler Bindemittelanteil – geringere Schwindung
- Teilautomatisierter Betrieb



Heißgießmaschine

Heißgießen



Praxisbeispiel Lampenfassung

- Bauteil 60 x 50 x 20 mm
- Unterschiedliche Wanddicken
- Hohe Komplexität im Aufbau
- Handspritzwerkzeug
- 6 Gewindestifte
- 7 Stifteinsätze
- Manuelles Entformen des Formlings
- Einfache Bauweise des Werkzeuges reduziert den Werkzeugpreis auf ein Bruchteil des Automatenwerkzeugs
- geeignet für Klein- und Mittelserie



Heissgießwerkzeug Lampenfassung

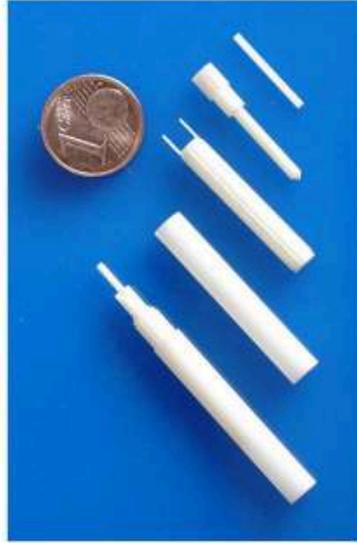


Lampenfassung – Bearbeitungsstufen

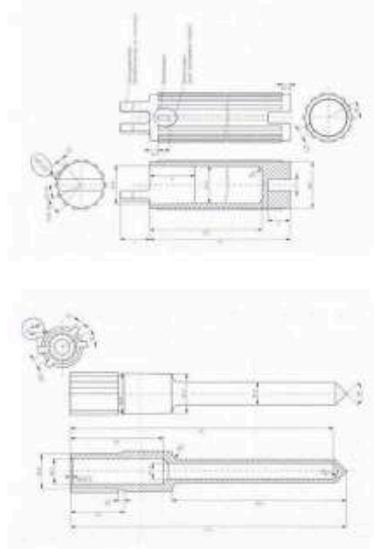
Heißgießen

Praxisbeispiel Miniaturfixpunktziegel

- Endkonturenah und passgenau geformt
- Dünnwandige und strukturierte Keramikbauteile
- Ausformung dünnwandiger Bauteile bis 0,20 mm
- Taktzeiten des Formgebungsvorganges 30 sec.



4 Keramikbauteile Miniaturfixpunktziegel



Heißgießen



Praxisbeispiel Miniaturfixpunktziegel

- Einfacher Aufbau des Heißgießwerkzeuges
- Einfache Bedienung
- Bauteile endkonturennah gefertigt, minimaler Schleifaufwand



Werkzeug Außentiegel



Innen- und Außentiegel

Zusammenfassung



- Spritzguss ist für Massenprodukte das effizienteste Formgebungsverfahren
- Für Klein- und Mittelserien ist das Heißgießen eine geeignete Technologie schnell und effizient Keramikbauteile mit komplexer Geometrie zu fertigen
- Für die Bereitstellung von Mustern ist die CNC-Bearbeitung des Grünlings wegen ihrer flexiblen Reaktion auf Änderungen der Geometrie und aus Kostengründen alternativlos
- Die Laserbearbeitung zum Einbringen von filigranen Strukturen in der Grün-, Weiß- und Hartbearbeitung gewinnt zunehmend an Bedeutung