

### 4.3 Hochleistungsbauteile aus Oxidkeramik – Verfahrensweg und Praxisbeispiele

- Dr.-Ing. Torsten Weiß  
BCE Special Ceramics GmbH  
Mannheim

*Die Folien finden Sie ab Seite 358.*

#### 4.3.1. Einleitung

Die Oxidkeramiken unter den Hochleistungskeramiken stellen weiterhin den größten Anteil und sind deshalb neben den spektakulären Erfolgen der schwarzen oder Nicht-Oxid-Keramik wie Siliziumnitrid oder Siliziumkarbid ein interessantes Optimierungsaufgabengebiet. Diese Weiterentwicklungen vollziehen sich im Wesentlichen auf zwei Feldern, nämlich den Werkstoffen selber und deren Verarbeitungswegen zu Bauteilen.

Beispielhaft für die Werkstoffseite seien hier die Mischkeramiken wie ZTA (Zirconia Toughened Alumina, Basiswerkstoff  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oder auch die Umkehrung ATZ (Alumina Toughened Zirconia, Basiswerkstoff  $\text{ZrO}_2$ ) genannt. Auch die immer weitergehende Entwicklung der  $\text{ZrO}_2$  Mg PSZ Typen (Magnesiumoxid teilstabilisierte Zirkonoxidkeramik) in höchste Festigkeitsregionen (600 bis 800 MPa Biegefestigkeit) spiegelt die erfolgreichen werkstofflichen Anstrengungen wieder.

Auf der anderen Seite wurden erfolgreiche Entwicklungen in den Bereichen des hocheffizienten und genauen Trockenpressens oder diverse Entwicklungen im Spritzguss geleistet, die den steigenden Anforderungen an die Qualität bei geringen Stückkosten weitgehend Folge leisten. Eine weitere Route, die insbesondere für nicht so große Stückzahlen interessant ist, stellt die präzise CNC-Bearbeitung von Grünlingen (z. B. isostatisch gepresste Formlinge) dar. Unter Berücksichtigung der Schwindung beim Sintern können hiermit ohne schleifende Nachbearbeitung komplexe Formen in den Bauteilen realisiert werden, die „as fired“ zum Einsatz kommen können. Vorteile aus Kun-

densicht sind die „fehlenden“ Werkzeugkosten und die relativ kurze Fertigungszeit bei sehr hoher Materialqualität.

### 4.3.2. Kurzdarstellung der CNC Fertigungsweise

Ausgangsbasis für eine Bauteilfertigung ist ein pressfähiges (d. h. Bindemittel enthaltendes und agglomeriertes) Keramikpulvergranulat das den späteren Werkstoff bildet, typischerweise  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in den Reinheiten 92 bis 99,99 % oder  $\text{ZrO}_2$  Y-TZP oder  $\text{ZrO}_2$  Mg-PSZ. Die Eigenschaften des Granulats, sowie die Parameter der isostatischen Pressung bestimmen maßgeblich die weitere Verarbeitung oder Machbarkeit bestimmter Geometrien. Einen entscheidenden Einfluss haben auch die zur Verwendung kommenden Werkzeuge (Schneid-geometrien und Werkstoffe; HM, PKD) und die Schnittparameter bei der CNC Bearbeitung wie z. B. Vorschub, Zustellung, Bohrhöhe usw.

Das Granulat wird gleichmäßig in eine angemessene, elastische Gummiform gefüllt. Diese wird dicht verschlossen und anschließend in der kaltisostatischen Presse (CIP) unter Anwendung hoher hydrostatischer Drücke (600 bis 2.500 bar) homogen verdichtet.

Der nunmehr gepresste Grünling besitzt eine gewisse Festigkeit die es erlaubt, bei vorsichtiger Einspannung unter Berücksichtigung des krei-deweichen Zustandes, eine CNC Bearbeitung vorzunehmen. Der nur gepresste Grünling hat in vielen Fällen kaum Ähnlichkeit mit der Endkontur des Bauteils, diese entsteht erst durch die Bearbeitung. Ausnahmen sind in gewisser Hinsicht das Pressen von kleinen Rohren, Buchsen oder komplexeren Innenkonturen, wo es sich lohnt auf einen Dorn oder Kern zu pressen und somit die Innenkontur schon abzubilden. Die Außengestalt wird dann dennoch durch drehende oder fräsende Bearbeitung erstellt. Unterstützt wird diese Arbeitsweise durch den Einsatz einer CAD-CAM Kette, was sich bei gekrümmten Oberflächen positiv niederschlägt. Trotz des krei-deweichen Zustandes lassen sich nur geeignete Hartmetallwerk- oder PKD-Werkzeuge zur Bearbeitung einsetzen, da ja die Einzelteilchen des verpressten Pulvers schon aus Keramik bestehen und somit die hohe Härte und Abrasivität besitzen.

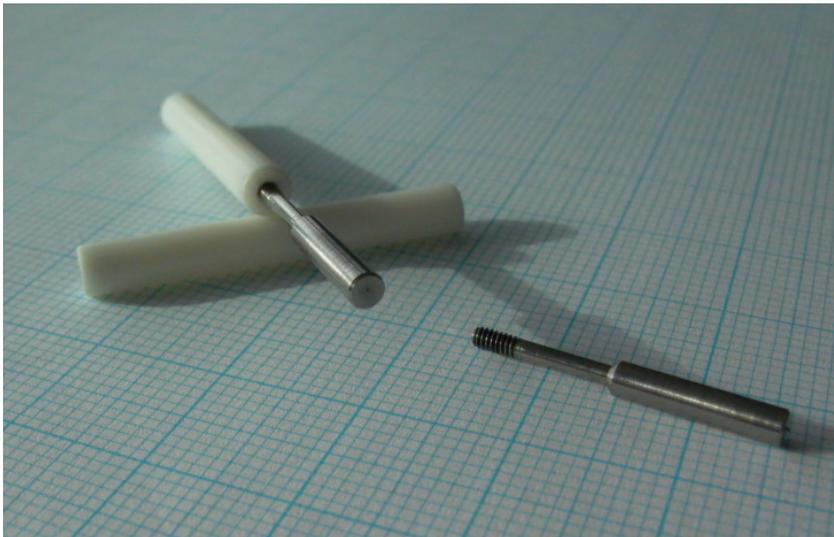
Berücksichtigt werden muss allerdings die Schwindung der einzelnen Werkstoffe / Pressgranulate, da die Sinterung zu diesem Zeitpunkt noch aussteht. D.h. die Konturen oder Endmaße müssen alle mit entsprechenden Koeffizienten in den Raumrichtungen für isotrope oder anisotrope Schwindung, eventuell unter Berücksichtigung von Auf-

massen für eine nachfolgende, schleifende Hartbearbeitung, hochgerechnet werden. Durchschnittlich muss mit 16 bis 25 % Schwindung gerechnet werden.

Ist der bearbeitete Grünling maßlich korrekt und rissfrei angefertigt, wird er zur Sinterung freigegeben. Speziell an den Werkstoff und die Geometrie angepasste Sinterkurven, also Aufheiz- und Abkühlraten, Endtemperaturen und Zeiträume der Zeit-Temperatur-Kurve verfestigen durch Diffusionsvorgänge bei Temperaturen von 1.450 °C bis 1.750 °C (bei der meistens vorliegenden Festkörpersinterung) den ehemals weichen Grünling zur harten Hochleistungskeramik. Eine abschließende 100 % Rissprüfung aller Bauteile nach dem Sintern sowie eine Maßkontrolle entscheiden dann über die Freigabe zur weiteren schleifenden Bearbeitung oder als „as fired“ Bauteil.

#### **4.3.3. Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie**

Es lassen sich auf diese Art und Weise recht komplexe und filigrane Strukturen herstellen, die teilweise durch schleifende Bearbeitung gar nicht machbar sind (z. B. mangels so kleiner Diamantwerkzeuge), beispielsweise kleine Innengewinde.

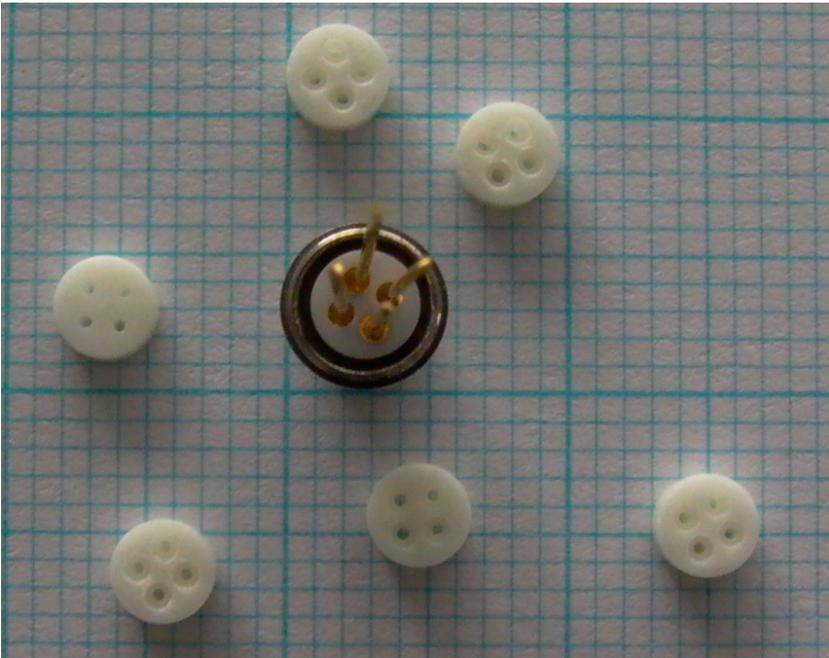


**Bild 1:** Gewindehülse in  $ZrO_2$  mit Innengewinde M 1,6

### Vortragsblock 3

---

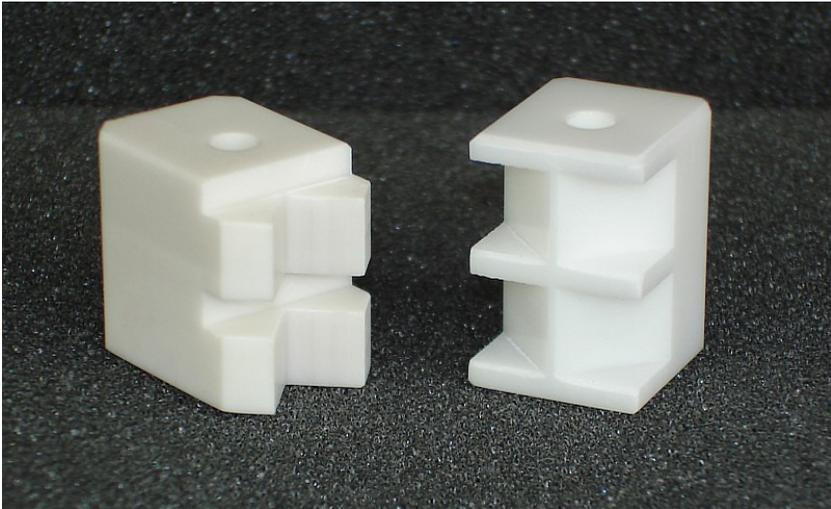
Nachfolgend ein keramischer Einsatz einer elektrischen Durchführung. Werkstoff ist hier ein 99,5 % reines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Der gesamte Stecker ist aktivgelötet. Dies gewährt die Möglichkeit eines Hochtemperatureinsatzes (300...500 °C) und ist vakuumdicht. Der Bohrungsdurchmesser für die Kontaktdrähte beträgt 0,255 mm. Zur sicheren Verlötung sind kleine Taschen um die Bohrungen, die einen dichten Abschluss des Lots gewährleisten. Die Vielzahl der unterschiedlichen und teilweise kundenspezifischen Steckerlösungen in Bezug auf Bohrungsanzahl und Drahtstärken lassen sich durch die Grünfertigung wirtschaftlich bewältigen. Die kleinste zuverlässig anzufertigende Bohrung beträgt ca. 150 µm, allerdings ist die Bohrungstiefe auf wenige mm begrenzt.



**Bild 2:** Miniatursteckereinsatz aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,5% aktivgelötet

Ein Beispiel für die CAD-CAM Umsetzung einer komplexen Geometrie ist die nachfolgende Backe. Diese Kontur wird grün gefertigt und nur noch schleifend geplant, um einbaufertig zu sein. Material ist  $\text{ZrO}_2$  Y-TZP. Aufgrund der relativ geringen Stückzahl ist die Anfertigung eines Spritzwerkzeuges hier unwirtschaftlich. Die abgebildeten Backen sind

für den Einsatz in einem universellen Drahtführungssystem im EDM Bereich vorgesehen.



**Bild 2:** Backen aus  $ZrO_2$  Y-TZP grün gefertigt

Für die Verfahrenstechnik sind hochbelastbare Ventilkegel und Sitze aus Keramik insbesondere im Einsatzbereich der chemischen Industrie oft unverzichtbar. Hier ermöglicht das enge Zusammenspiel von CNC technischer grün Vorfertigung mit anschließender passgenauer Schleifbearbeitung die rasche Anpassung an für eine optimale Regelung sinnvolle Kontur.

Eine Überarbeitung der Konturen ist ohne Werkzeugkosten, nur durch CNC Anpassung zu realisieren. Die Freiheitsgrade im Design steigen, trotz der oftmals geringen Stückzahlen für Spezialanlagen und Kundenwünsche. Durch die CNC Fertigung ist das wirtschaftlich umsetzbar.



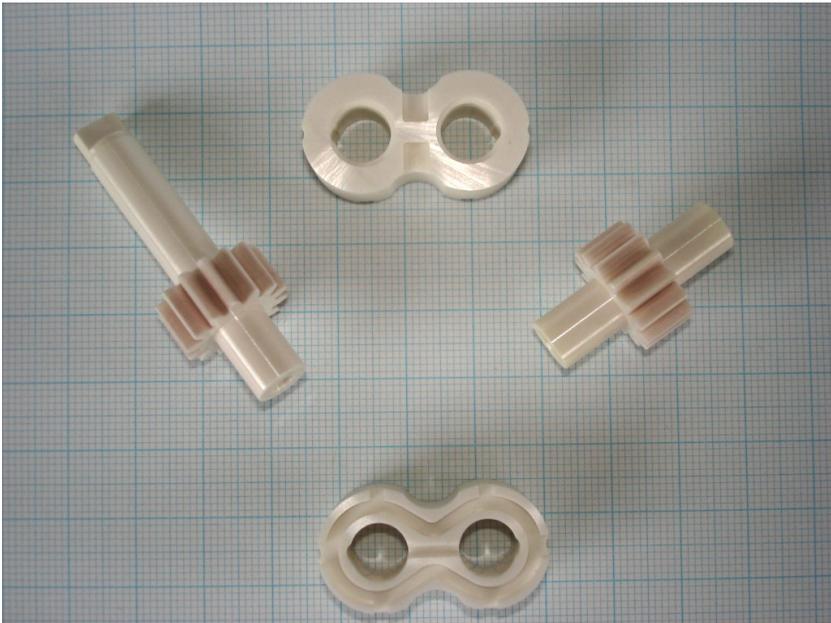
**Bild 3:** Ventilkegel aus ZrO<sub>2</sub> Mg-PSZ

Die Anforderungen an das Material sind sehr hoch, da Korrosion, Abrasion und oft auch thermische Wechselbelastungen das Material beanspruchen. Für eine dauerhafte Lösung bei temperaturbeanspruchten (100 bis 250 °C) Bauteilen, muss hier auf ZrO<sub>2</sub> Mg-PSZ

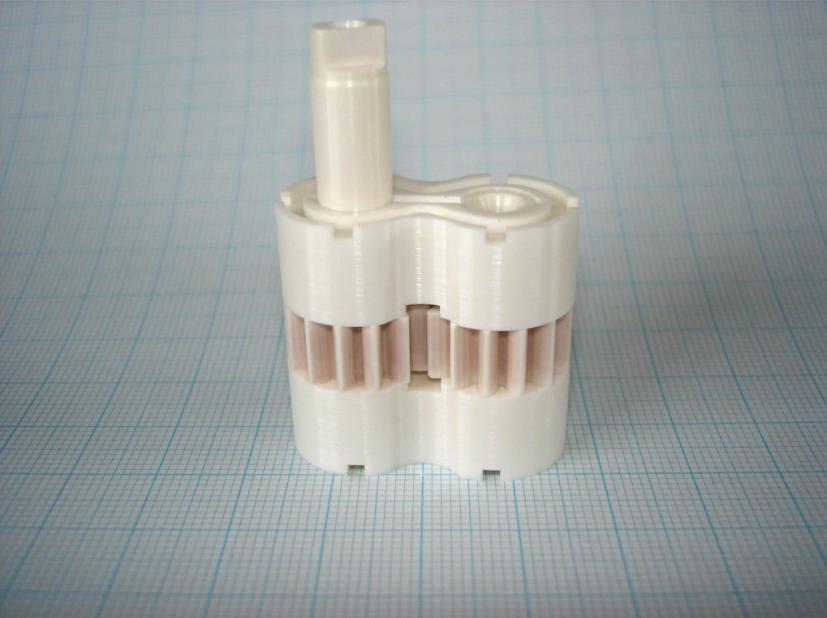
anstelle der eigentlich etwas festeren Y-TZP Materialien ausgewichen werden.

Ähnliches gilt für die vergleichbaren Konturen aus dem Bereich der Schweißtechnik, also Positionierstifte. Diese können manchmal, wenn die Toleranzen es zulassen, direkt durch eine reine Grünfertigung hergestellt werden, ohne schleifende Nachbearbeitung.

Abschließend ein Beispiel einer abgestimmten Gesamtfertigung aus Grün- und Hartbearbeitung. Zahnradpumpen zur Klein- und Mikrodosierung sollten besonders verschleiß- und/oder korrosionsfest ausgelegt werden. Da die Anforderung die zu übertragenden Kräfte recht hoch ist (die einzuleitenden Drehmomente je nach Druckbeaufschlagung) wurde  $ZrO_2$  Y-TZP als Material gewählt, als Kompromiss zwischen Härte und Festigkeit anstelle eines  $Al_2O_3$ . Eine genaue Abstimmung der Grüngeometrie auf die nachfolgende Hartbearbeitung ist notwendig, um die Baugruppe sinnvoll fertigen zu können.



**Bild 4:** Bauteile einer Zahnradgruppe für Pumpe aus  $ZrO_2$  Y-TZP



**Bild 5:** Zahnradgruppe für Pumpe aus ZrO<sub>2</sub> Y-TZP

### 4.3.4. Schlussbemerkung

Die Fertigung von Hochleistungskeramik mittels isostatisch gepresster Formlinge und anschließender CNC Formgebung ist ein sehr flexibles Instrument um dem steigenden Bedarf an individueller Gestaltung bei oftmals kleinen bis mittleren Stückzahlen wirtschaftlich begegnen zu können. Diese Technologie entwickelt sich mit Fortschreiten der Aufbereitung der keramischen Massen und Pulver sowie der Maschinentechologie und Werkzeugverfeinerungen (exaktere Schneiden, beschichtete Werkzeuge etc.) immer weiter, da Faktoren wie Kantenstabilität der Preßlinge und Restwandstärken ständig verbessert werden, was wiederum filigranere Strukturen zulässt. Im Dialog mit dem Anwender lassen sich auf diesem Wege oftmals applikationsgerechte Hochleistungskeramiken einsetzen um eine sichere Funktionalität des Endproduktes zu gewähren.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 30) finden sich auf den folgenden Seiten.

**Hochleistungsbauteile aus  
Oxidkeramik  
Verfahrensweg und  
Praxisbeispiele**

Dr.-Ing. Torsten Weiß  
BCE Special Ceramics GmbH  
Mannheim

## Prinzipielle Arbeitsweise



- Isostatisches Pressen eines (Vorform-)Grünlings
- CNC-Bearbeitung: Drehen, Bohren, Fräsen, Gewinde etc.
- Maßkontrolle > Freigabe zur Sinterung
- Sinterung > Rissprüfung > Maßkontrolle (as fired Bauteil) / QS
- schleifende Bearbeitung > Rissprüfung > Maßkontrolle > QS

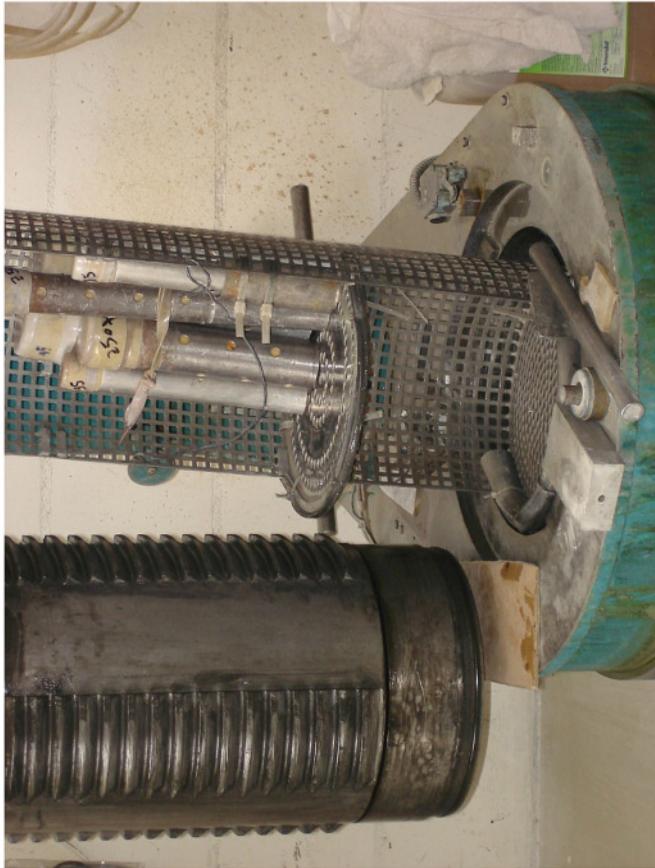


## Kaltisostatisches Pressen (CIP)



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 3

## Kaltisostatisches Pressen (CIP)



CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 5

## CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers

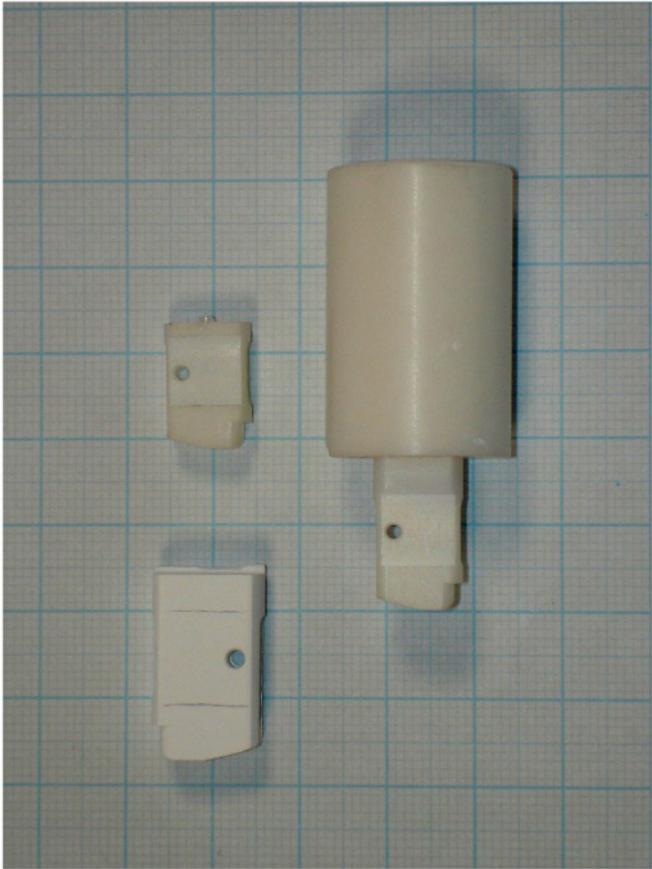


## CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 7

Etwas Schwund ist immer ...



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 8

Geht, geht nicht ... bei der Grünbearbeitung



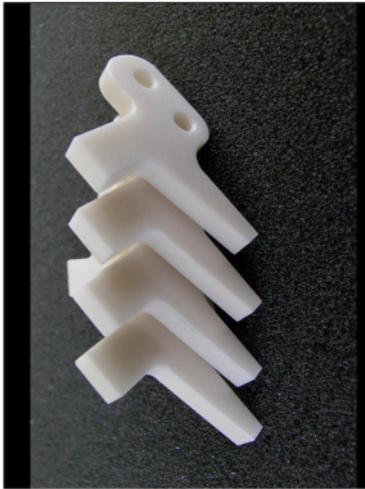
- Genauigkeit ist Bauteilgrößen und Materialabhängig:
- $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 0,3 \dots 0,1 \text{ mm}$ ,  $\text{ZrO}_2 \sim 0,05 \dots 0,1 \text{ mm}$
- Wandstärken bis runter zu ca. 1 ... 2 mm
- Bohrungen bis 0,15 mm (nur sehr kurz)
- Gewinde ab M 1,6 bei  $\text{ZrO}_2$ ; ab M3 bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$



## Vorteile / Einschränkungen

- + Hohe Werkstoffqualität
- + Prototypen / kleine Losgrößen ökonomisch herstellbar
- + Keine Werkzeugkosten für Press- / Spritzformen
- + Kurze Entwicklungszeiten für neue Bauteile
- + Anpassungsänderungen einfach möglich via CNC
- Fertigungsweise begrenzt Serienstückzahlen
- Komplexitätsgrad der Bauteile ist auf hohem Niveau, aber eingeschränkter als z. B. beim Spritzguss

Blechverarbeitung



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 11

## Blechverarbeitung

---

- ☺ Bauteil aus dem Maschinenbau
- ☺ Herausforderungen: Elektrische Isolation, hohe Festigkeit, hohe Formgenauigkeit in der Serie, angemessener Preis...
- ☺ Antwort: Material  $\text{ZrO}_2$  Y-TZP, isostatisch gepresst, geringfügige Anpassung der Toleranzen
- ☺ Vorteil: Grünfertigung statt Schleifbauteil (Trockenpressbauteil hat mechanisch versagt )

Biegebuchse



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 13

## Biegebuchse

- ☺ Bauteil aus dem Maschinenbau
- ☺ Herausforderungen: Harter aber zäher Werkstoff, verschleißbeständig, sehr hohe Festigkeit
- ☺ Antwort: Material  $ZrO_2$  Y-TZP, isostatisch gepresst, HIP nachverdichtet, sehr hohe Oberflächengüte
- ☺ Vorteil: Kontur weitgehend „grün“ gefertigt, wenig Schleifarbeit, hohe Politurgüte
- ☺ Radienanpassung an andere Belastungen und Durchmesser leicht möglich



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 15

## Pumpenbau

---

- ☹ Herausforderung:
- ☹ Mikromechanisch genaues Zahnrad (5  $\mu\text{m}$ )  
bei rel. großer Belastung aber kleinen  
Abmessungen, korrosionsbeständig
- ☺ Rohling aus  $\text{ZrO}_2$  Y-TZP HIP
- ☺ Präzisionsgeschliffen auf 5  $\mu\text{m}$
- ☺ Festigkeit ca. 1.200 MPa (4 pb)



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 17

## Maschinenbau



- ☺ Konturgenaue Formrolle zur Highspeed Blechformung direkt im Schweißbereich bei minimalen Verschleiß
- ☺ Geringe Stückzahlen bei vielen Varianten
- ☺ Material  $ZrO_2$  Mg PSZ, Radian grün vorgefertigt, minimales Schleifen und Polieren der jeweiligen Endradien

Maschinenbau Messtechnik



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 19

## Maschinenbau Messtechnik

---

- ☺ Herausforderung:
- ☺ Hochgenaue, schwimmende Lagerung von Nockenwellen zur automatischen Vermessung und Auswuchtung, bei minimalen Verschleiß
- ☺ Material  $ZrO_2$  Y-TZP, Bohrungen grün gefertigt, Schleifen der jeweiligen Radien

Elektrische Isolation bei  $> 1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$

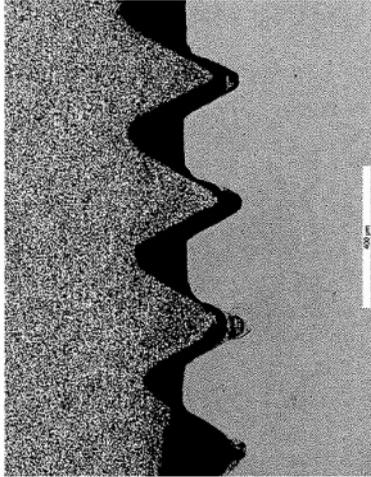


4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 21

Elektrische Isolation bei > 1.000 °C

- ☺ Hilfsmittel in Messtechnik bei Hochtemperatur
- ☺ Komplexe Form und recht große Abmaße
- ☺ Thermisch hochbelastete Bauteile
- ☺ Materialien:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit 99,5 % Reinheit
- ☺ Grünfertigung ohne schleifende Nacharbeit

# Medizintechnik / Innengewinde

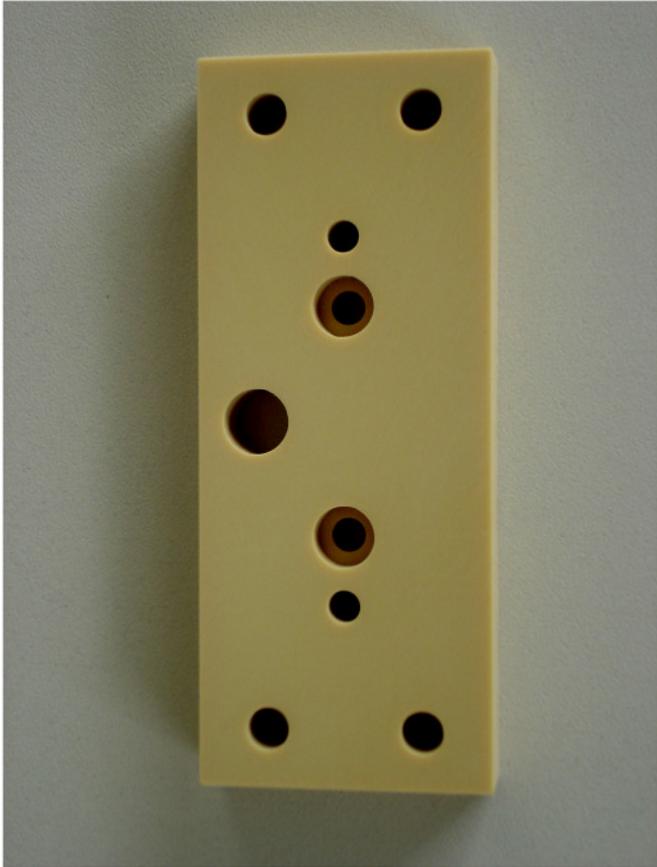


4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 23

## Medizintechnik / Innengewinde

- ☹️ Gewinde in Keramik? Außen / Innen ??
- ☹️ Miniaturisierung in der Medizintechnik erfordert kleines Innengewinde M 1,6
- ☹️ Bauteil muss Zulassung als Implantat erhalten können
- ☺️ Spezial stabilisiertes  $ZrO_2$  Y-TZP HIP (ISO 13356)
- ☺️ Gewinde und Konturen „grün“ gefertigt
- ☺️ Genauigkeit bei ca. 15..20  $\mu m$

Maschinenbau, thermische Isolation



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 25

## Maschinenbau, thermische Isolation

---



- ☺ Temperaturbarriere im Bereich 150 bis 300 °C, geringe Wärmeleitfähigkeit
- ☺ Variantenreichtum des Bohrschemas bei mittlerer Stückzahl
- ☺ Material: ZrO<sub>2</sub> Mg PSZ mit ca. 2 W/mK
- ☺ CNC Grünfertigung und schleifender Nachbearbeitung zum planen

Messtechnik

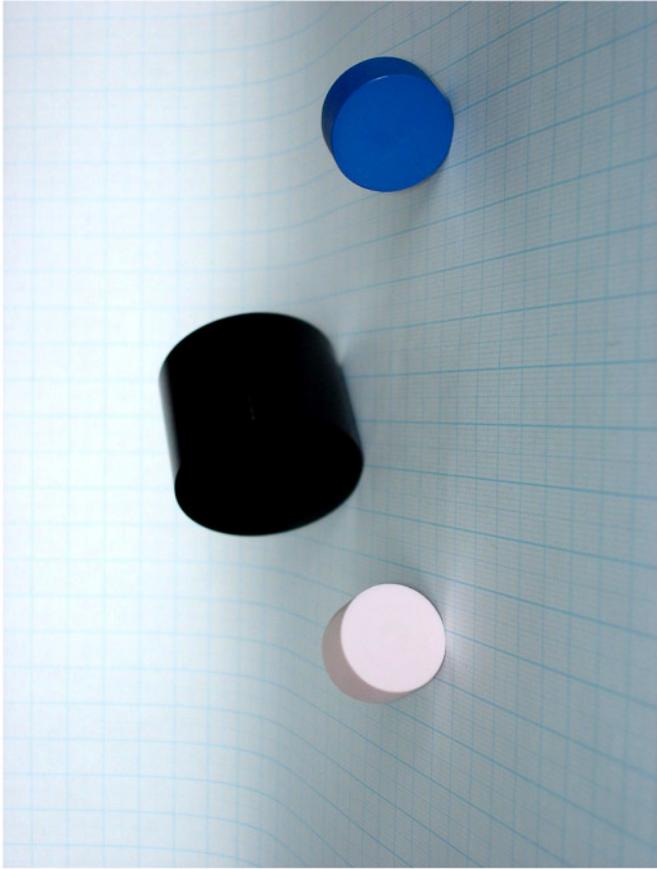


## Messtechnik



- ☺ Elektrische Durchführungen von Messsignalen in [mV] bis Hochstrom [A]
- ☺ Vakuum- oder Heliumdicht, autoklavierbar, temperaturbeständig bis 450 °C
- ☺ Keramische Inlays aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,5 %
- ☺ Bis zu 24 Bohrungen Ø 0,4 auf Ø 9 mm
- ☺ Metallische Fassungen aus Sonderstählen / Titan
- ☺ Partner für die Aktiv- / Lötungen

# Farben in ZrO<sub>2</sub>



4.3 Hochleistungsbauteile - Folie 29

## Fazit für gemeinsame Wertschöpfung...

---

- ☺ Kundenorientierter Dialog
- ☺ Gemeinsames, rechtzeitiges Design
- ☺ Sorgsame Werkstoffauswahl
- ☺ Fertigungsstrategie(n)
- ☺ Prototypen / Muster > Auswertung
- ☺ Erfolgreiches Produkt...