

3.4 Praxisbeispiele für Komponenten in komplexen Anforderungsprofilen aus dem Maschinenbau, der Medizintechnik und Messtechnik

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

Die Folien finden Sie ab Seite 285.

3.4.1. 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 Al_2O_3) oder auch die Umkehrung ATZ (Alumina Toughened Zirconia, Basiswerkstoff ZrO_2) genannt. Auch die immer weitergehende Entwicklung der 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.

3.4.2. Kurzdarstellung der CNC Fertigungsweise

Ausgangsbasis für eine Bauteilfertigung ist ein pressfähiges (d. h. Bindemittel enthaltendes und agglomeriertes) Keramikpulvergranulat das den späteren Werkstoff bildet, typischerweise Al_2O_3 in den Reinheiten 92 bis 99,99 % oder ZrO_2 Y-TZP oder 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 kalisostatischen 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 kreideweichen 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 kreideweichen 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-

Vortragsblock 2

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.

3.4.3. 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

Nachfolgend ein keramischer Einsatz einer elektrischen Durchführung. Werkstoff ist hier ein 99,5 % reines Al_2O_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 Verlotung 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.

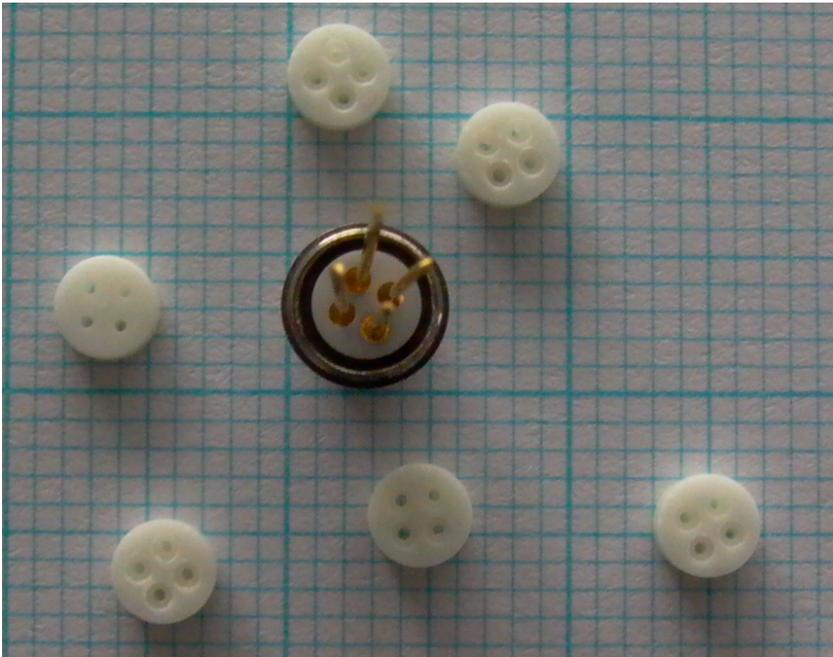


Bild 2: Miniatursteckereinsatz aus Al_2O_3 99,5% aktivgelötet

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 ZrO_2 Y-TZP. Aufgrund der relativ geringen Stückzahl ist die Anfertigung eines Spritzwerkzeuges hier unwirtschaftlich. Die abgebildeten Backen sind

Vortragsblock 2

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

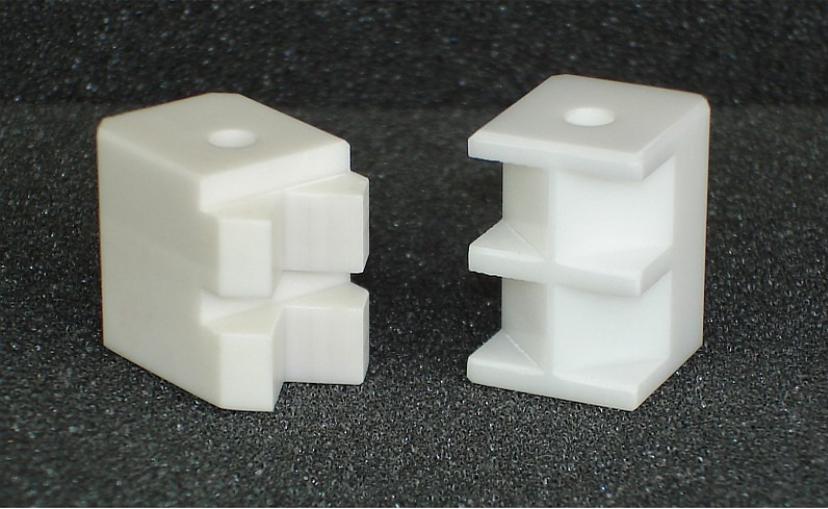


Bild 2: Backen aus ZrO_2 Y-TZP grün gefertigt

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_2 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_2 Mg-PSZ

Vortragsblock 2

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.

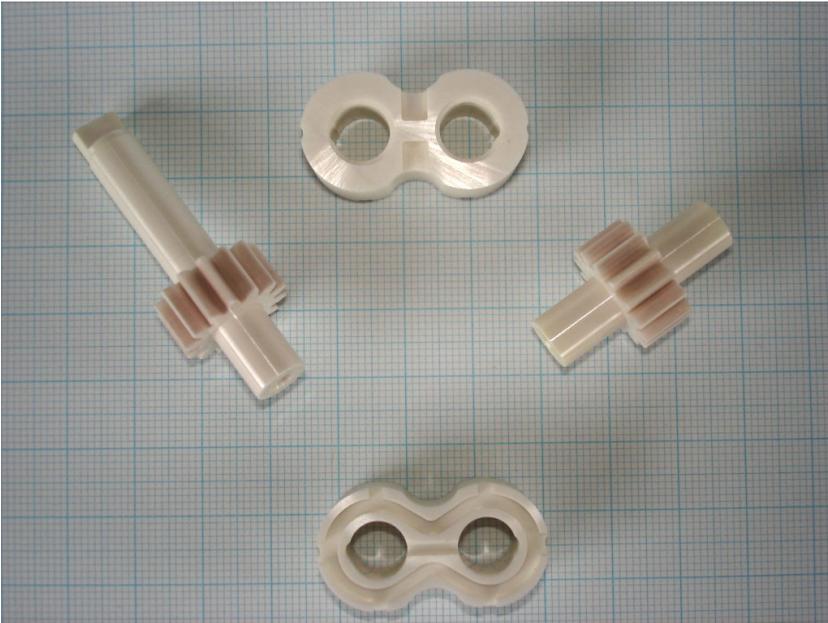


Bild 4: Bauteile einer Zahnradgruppe für Pumpe aus ZrO_2 Y-TZP

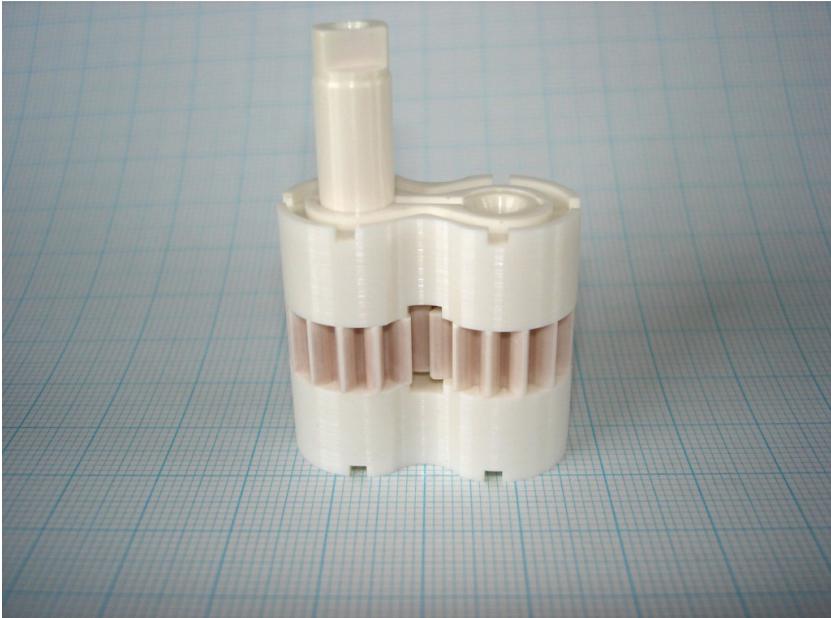


Bild 5: Zahnradgruppe für Pumpe aus ZrO_2 Y-TZP

3.4.4. 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 Maschinenteknologi 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 vielfach applikationsgerechte Hochleistungskeramiken einsetzen um eine sichere Funktionalität des Endproduktes zu gewähren.

Vortragsblock 2

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

**Praxisbeispiele für Komponenten
in Komplexen Anforderungs-
profilen aus dem Maschinenbau,
der Medizintechnik und der
Messtechnik**

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

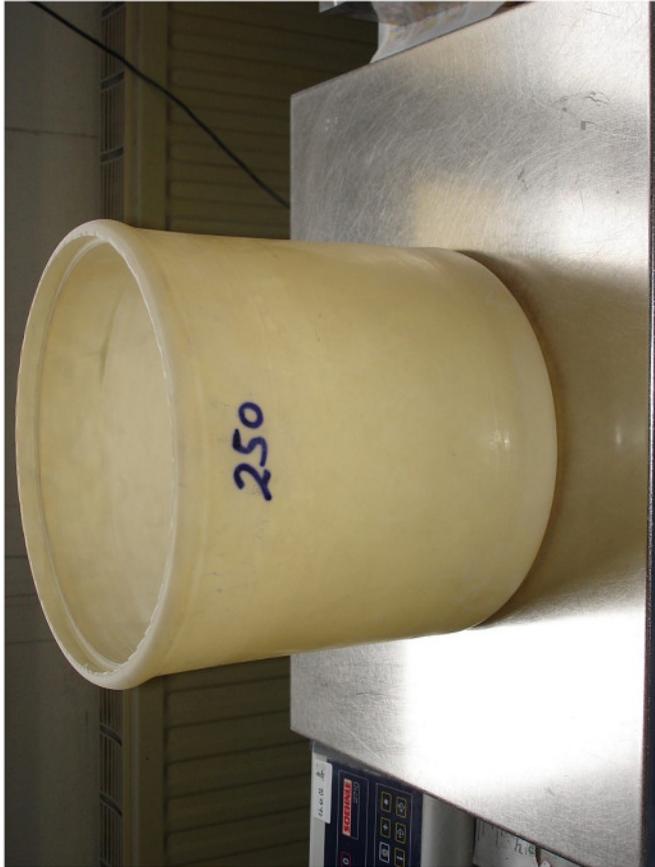
Prinzipielle Arbeitsweise



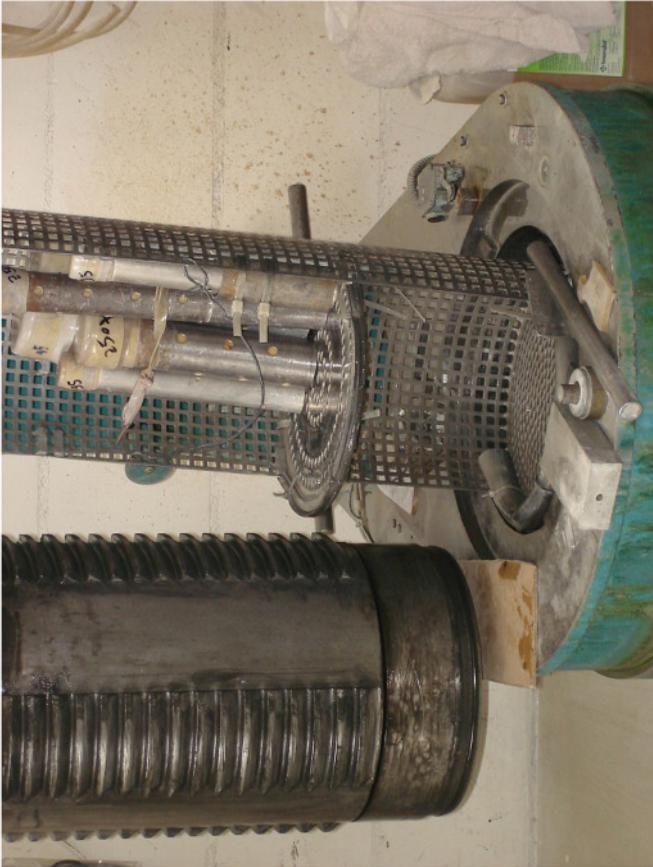
- Isostatisches Pressen eines (Vorform-)Grünlings
- CNC-Bearbeitung: Drehen, Bohren, Fräsen, Gewinde etc.
- Maßkontrolle > Freigabe zur Sinterung
- Sinterung > Rissprüfung > Maßkontrolle (as fired Bauteil) / QS
- schleifende Bearbeitung > Rissprüfung > Maßkontrolle > QS



Kaltisostatisches Pressen (CIP)



Kaltisostatisches Pressen (CIP)



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 4

CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 5

CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



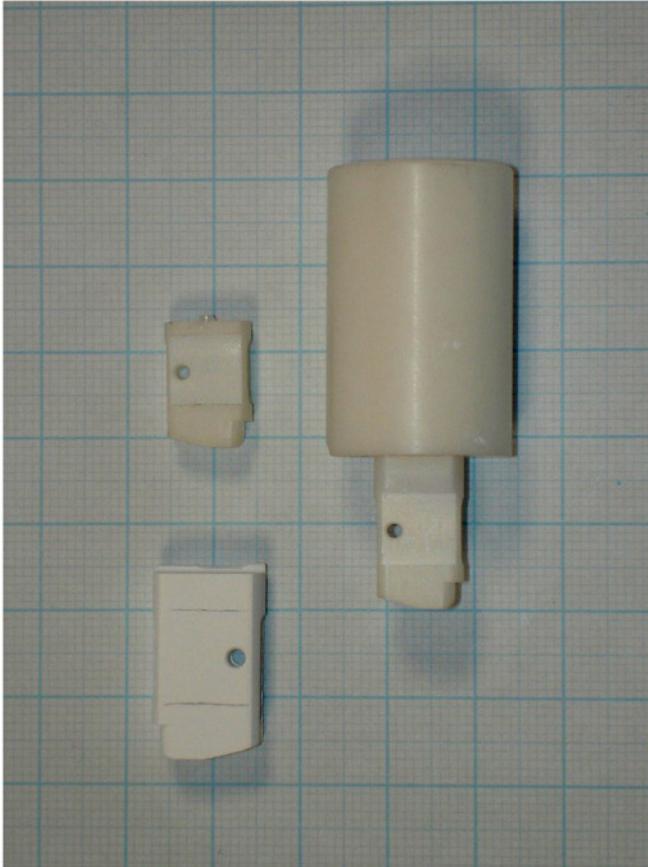
3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 6

CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 7

Etwas Schwund ist immer ...



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - 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 ZrO_2 ; ab M3 bei Al_2O_3

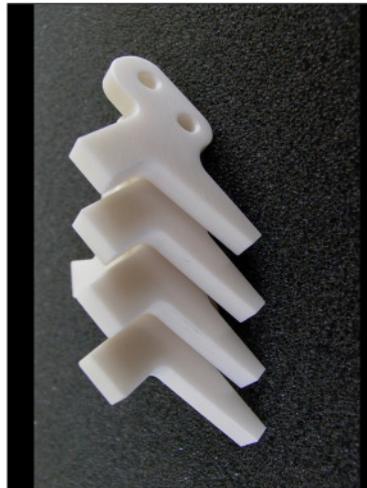


Vorteile / Einschränkungen



- + 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



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 11

Blechverarbeitung



- ☺ Bauteil aus dem Maschinenbau
- ☺ Herausforderungen: Elektrische Isolation, hohe Festigkeit, hohe Formgenauigkeit in der Serie, angemessener Preis...
- ☺ Antwort: Material ZrO_2 Y-TZP, isostatisch gepresst, geringfügige Anpassung der Toleranzen
- ☺ Vorteil: Grünfertigung statt Schleifbauteil (Trockenpressbauteil hat mechanisch versagt)

Biegebuchse



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - 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

Pumpenbau



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 15

Pumpenbau



- ☹ Herausforderung:
- ☹ Mikromechanisch genaues Zahnrad (5 μm)
bei rel. großer Belastung aber kleinen
Abmessungen, korrosionsbeständig
- ☺ Rohling aus ZrO_2 Y-TZP HIP
- ☺ Präzisionsgeschliffen auf 5 μm
- ☺ Festigkeit ca. 1.200 MPa (4 pb)

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 16

Maschinenbau



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 17

Maschinenbau



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

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 18

Maschinenbau Messtechnik



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

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 20

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



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 21

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

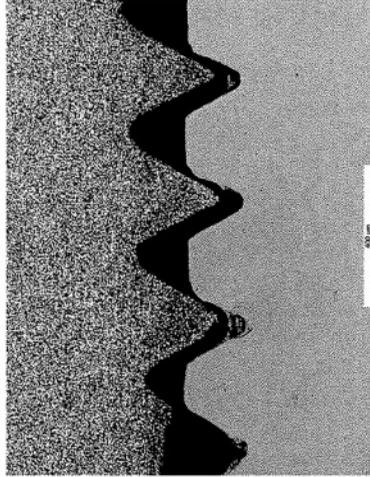


- ☺ Hilfsmittel in Messtechnik bei Hochtemperatur
- ☺ Komplexe Form und recht große Abmaße
- ☺ Thermisch hochbelastete Bauteile

- ☺ Materialien: Al_2O_3 mit 99,5 % Reinheit
- ☺ Grünfertigung ohne schleifende Nacharbeit

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 22

Medizintechnik / Innengewinde



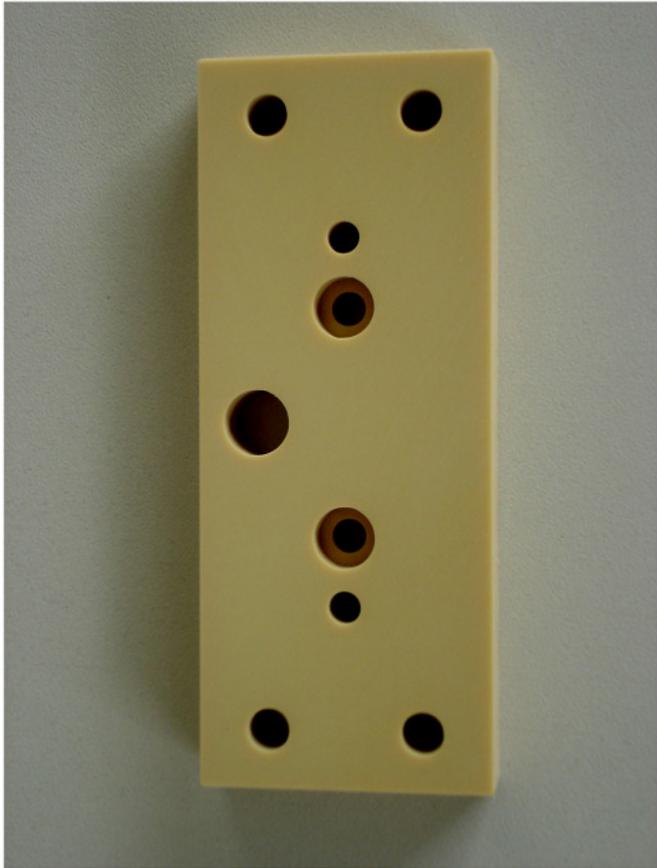
Medizintechnik / Innengewinde



- ☹️ 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 μm

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 24

Maschinenbau, thermische Isolation



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 25

Maschinenbau, thermische Isolation



- ☺ Temperaturbarriere im Bereich 150 bis 300 °C, geringe Wärmeleitfähigkeit
- ☺ Variantenreichtum des Bohrschemas bei mittlerer Stückzahl
- ☺ Material: ZrO_2 Mg PSZ mit ca. 2 W/mK
- ☺ CNC Grünfertigung und schleifender Nachbearbeitung zum planen

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 26

Messtechnik



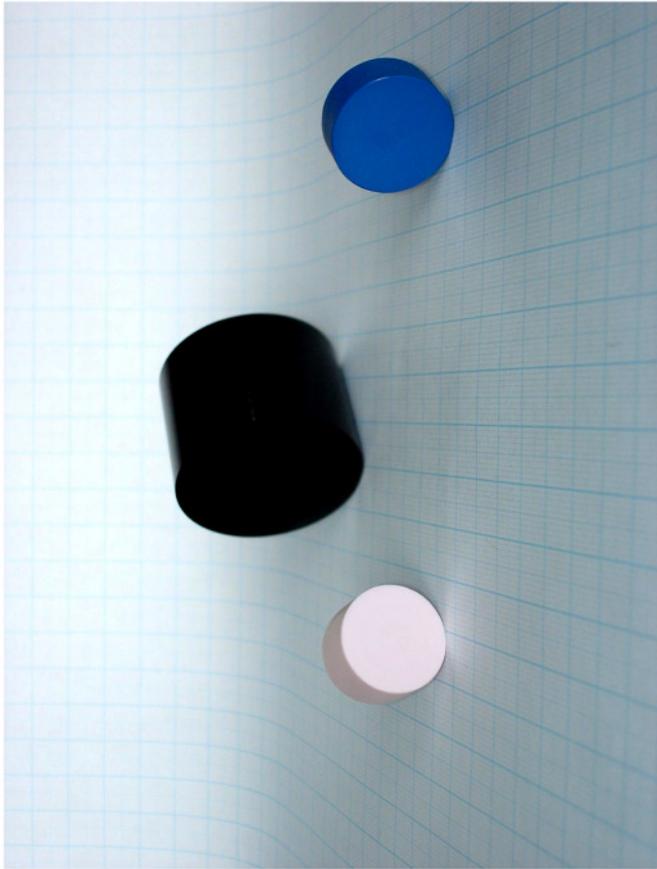
Messtechnik



- ☺ Elektrische Durchführungen von Messsignalen in [mV] bis Hochstrom [A]
- ☺ Vakuum- oder Heliumdicht, autoklavierbar, temperaturbeständig bis 450 °C
- ☺ Keramische Inlays aus Al_2O_3 99,5 %
- ☺ Bis zu 24 Bohrungen \varnothing 0,4 auf \varnothing 9 mm
- ☺ Metallische Fassungen aus Sonderstählen / Titan
- ☺ Partner für die Aktiv- / Lötungen

3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 28

Farben in ZrO₂



3.4 Komplexe Anforderungsprofile im Maschinenbau - Folie 29

Fazit für gemeinsame Wertschöpfung...



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