

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich gefertigt – Praxisbeispiele für Komponenten in komplexen Anforderungsprofilen

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

Die Folien finden Sie ab Seite 389.

4.4.1. Einleitung

Unter den Hochleistungskeramiken stellt die Gruppe der Oxidkeramik weiterhin den größten Anteil und ist deshalb neben den spektakulären Erfolgen der „schwarzen“ oder auch Nicht-Oxid-Keramik - wie Siliziumnitrid oder Siliziumkarbid - ein interessantes Optimierungsaufgabengebiet. Diese Weiterentwicklungen vollziehen sich im Wesentlichen auf zwei Feldern, nämlich den eigentlichen Werkstoffen selbst und deren Verarbeitungswegen zu Bauteilen.

Beispielhaft für die werkstoffseitigen Entwicklungen seien hier die Mischoxidkeramiken ZTA (Zirconia Toughened Alumina, Basiswerkstoff: Al_2O_3) oder ATZ (Alumina Toughened Zirconia, Basiswerkstoff: ZrO_2) genannt. Auch die fortlaufenden Weiterentwicklungen an den etablierten ZrO_2 Mg-PSZ-Typen (Magnesiumoxid teilstabilisierte Zirkonoxidkeramik) in höchste Festigkeitsregionen (600 MPa bis 800 MPa Biegefestigkeit) spiegeln die erfolgreichen werkstofflichen Anstrengungen wider.

Auf der anderen Seite sind erfolgreiche Fortschritte in den Bereichen des hocheffizienten und genauen Trockenpressens oder diverse Entwicklungen im Spritzguss zu verzeichnen, die den steigenden Anforderungen an die Qualität bei geringen Stückkosten weitgehend Folge leisten. Eine weitere Herstellungsrouten insbesondere für Klein- und Kleinstserien stellt die präzise CNC-Bearbeitung von Grünlingen (z.B. kalt-isostatisch gepresste Formlinge) dar. Unter Berücksichtigung der

Schwindung beim Sintern werden hiermit ohne schleifende Nachbearbeitung komplexe Formen in den keramischen Bauteilen realisiert, die „as fired“ zum Einsatz kommen können. Vorteile aus Kundensicht sind die „fehlenden“ Werkzeugkosten und die relativ kurze Fertigungszeit bei sehr hoher Materialqualität.

4.4.2. 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 99,9% oder ZrO_2 Y-TZP bzw. ZrO_2 Mg-PSZ. Die Eigenschaften des Granulats sowie die Parameter der kalt-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 der Geometrie des Endbauteils angemessene, elastische Gummiform gefüllt. Diese wird dicht verschlossen und anschließend in der kalt-isostatischen Presse (CIP = cold isostatic press) unter Anwendung hoher hydrostatischer Drücke (600 bar bis 2050 bar) homogen verdichtet.

Der nunmehr gepresste Grünling besitzt eine gewisse Festigkeit die es erlaubt, unter Berücksichtigung des kreideweichen Zustandes und mit Zuhilfenahme geeigneter Spanntechniken, eine CNC-Bearbeitung vorzunehmen. Der gepresste Grünling, so wie er aus der kalt-isostatischen Presse kommt, hat in den meisten Fällen kaum eine Ähnlichkeit mit der Endkontur des Bauteils. Diese entsteht erst durch die nachfolgenden spanenden Bearbeitungsschritte. Ausnahmen sind in gewisser Hinsicht das Pressen von kleinen Rohren, Buchsen oder komplexeren Innenkonturen, bei denen sinnvollerweise auf einen vorkonturierten Dorn oder Kern gepresst wird, um somit die Innenkontur schon fertig abzubilden. Die Außengeometrie wird in den meisten Fällen durch drehende oder fräsende Bearbeitung erzeugt. Unterstützt wird diese Arbeitsweise durch den Einsatz einer CAD-CAM Ket-

te, die ihre Stärken insbesondere bei Freiformflächen unter Zuhilfenahme mehrachsiger Fräszentren ausspielen kann. Trotz des kreideweichen Zustandes lassen sich nur geeignete Hartmetall- oder PKD-Werkzeuge zur Bearbeitung einsetzen, da trotz des weichen Binderanteils des verpressten Pulvers die einzelnen keramischen Partikel schon eine gewisse Härte und Abrasivität besitzen.

Bei der gesamten Bearbeitung darf die Schwindung der einzelnen Werkstoffe/Pressgranulate nicht außer Acht gelassen werden, da die Sinterung zu diesem Zeitpunkt noch aussteht. D.h. alle Konturen oder Maße müssen mit entsprechenden Koeffizienten in den Raumrichtungen für isotrope oder anisotrope Schwindung beaufschlagt werden, eventuell zusätzlich unter Berücksichtigung von Aufmaßen für eine nachfolgende schleifende Hartbearbeitung. 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 (Aufheiz-/Abkühlraten, Endtemperaturen, Haltezeiten) verfestigen durch Diffusionsvorgänge bei Temperaturen im Bereich von 1450°C bis 1750°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 als „as fired“ Bauteil oder zur weiteren schleifenden Bearbeitung.

4.4.2. Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie

Es lassen sich auf diese Art und Weise sehr komplexe und filigrane Strukturen herstellen, die teilweise durch eine schleifende Bearbeitung gar nicht oder nur mit sehr großem Aufwand realisierbar sind (z.B. mangels zu kleiner Diamantwerkzeuge). Als Beispiel soll hierfür exemplarisch das Einbringen von Innengewinden genannt werden: durch eine schleifende Bearbeitung sind Innengewinde bis M 5 darstellbar, mit Hilfe der CNC-Fertigungstechnik im Grünzustand hinunter bis M 1,6.

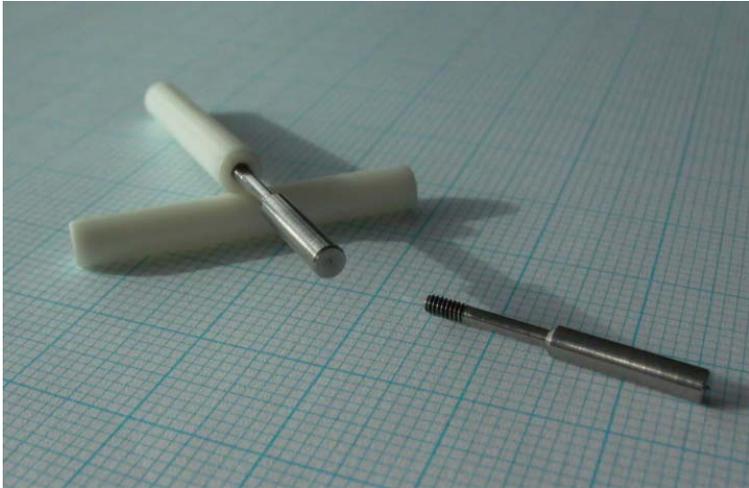


Bild 1: Gewindehülse in ZrO_2 mit Innengewinde M 1,6

Nachfolgend ist ein keramischer Einsatz einer elektrischen Durchführung dargestellt. Werkstoff ist hier ein 99,7% reines Al_2O_3 mit Pins aus vergoldetem Metall. Der gesamte Stecker ist aktivgelötet. Diese Füge-technik bietet die Möglichkeit eines Hochtemperatureinsatzes ($300^\circ C \dots 500^\circ C$) und ist zudem noch vakuumdicht. Der Bohrungsdurchmesser für die Kontaktdrähte beträgt 0,255 mm. Zur sicheren Verlotung sind kleine Taschen um die Bohrungen angebracht, 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. $150 \mu m$, allerdings ist die Bohrungstiefe auf nur wenige Millimeter begrenzt – der limitierende Faktor ist hier das Hartmetallwerkzeug.

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 Spritzgießwerkzeuges hier unwirtschaftlich. Die abgebildeten Backen sind für den Einsatz in einem universellen Drahtführungssystem im

EDM-Bereich (electrical discharge machining, Funkenerodieren) vorgesehen.



Bild2: Miniatursteckereinsatz aus Al₂O₃ 99,7%, aktivgelötet

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-basierter Grünfertigung der Rohlinge mit anschließender passgenauer Schleifbearbeitung eine rasche Anpassung der Kontur von Sitz und Kegel für eine optimale Regelung.

Eine Überarbeitung der Geometrie bzw. der Dichtflächen ist in der Regel mit dem vorhandenen Standard-Werkzeugpark und durch CNC-Schleiftechnik zu realisieren, ohne weitere Werkzeugkosten für spezielle, vorkonturierte Schleifscheiben zu generieren. Die Freiheitsgrade im Design steigen, trotz der oftmals geringen Stückzahlen für Spezialanlagen und Kundenwünsche. Durch die CNC-Fertigung ist das wirtschaftlich umsetzbar.

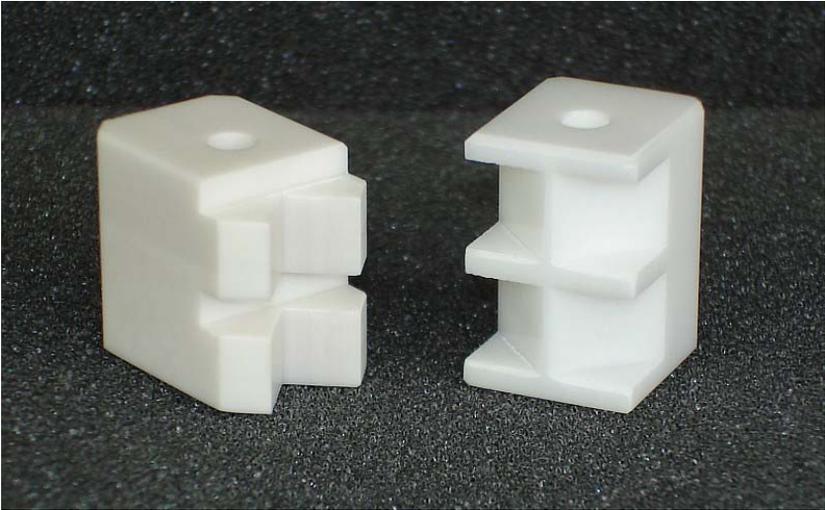


Bild 3: Backen aus ZrO₂ Y-TZP, grün gefertigt

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°C bis 250 °C) Bauteilen, muss hier auf ZrO₂ 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.



Bild 4: Ventilkegel aus ZrO_2 Mg-PSZ

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 (=kostenoptimiert) fertigen zu können.



Bild 5: Bauteile für Pumpe aus ZrO_2 Y-TZP



Bild 6: Zahnradgruppe für Pumpe aus ZrO_2 Y-TZP

4.4.3. Schlussbemerkung

Die Fertigung von Hochleistungskeramik mittels kalt-isostatisch gepresster Rohlinge 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 von keramischen Massen und Pulvern sowie der Maschinentechologie und Werkzeugentwicklungen (exaktere Schneidengeometrie, beschichtete Werkzeuge für eine längere Standzeit, etc.) immer weiter. Da dadurch Faktoren wie Kantenstabilität der Presslinge und Restwandstärken ständig verbessert werden, können immer filigranere Strukturen gefertigt werden. Im Dialog mit dem Anwender lassen sich auf diesem Wege vielmals applikationsgerechte Hochleistungskeramiken einsetzen, die eine sichere Funktionalität des Endproduktes gewährleisten.

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

**Kleine Stückzahlen, hohe
Präzision wirtschaftlich gefertigt**

***Praxisbeispiele für Komponenten in
komplexen Anforderungsprofilen***

Dr.-Ing. Torsten Weiß
Dr.-Ing. Torsten Prescher

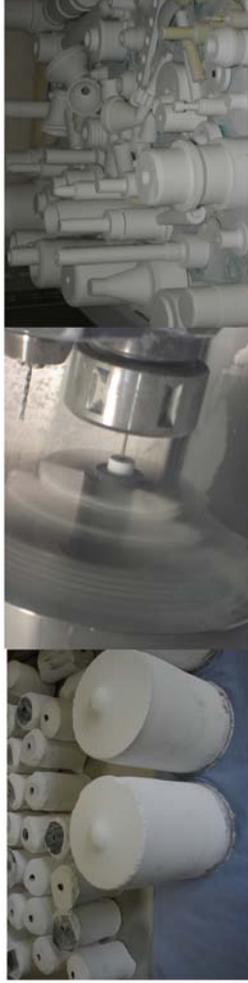
BCE Special Ceramics GmbH, Mannheim



Prinzipielle Arbeitsweise



- Kalt-isostatisches Pressen (CIP) 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)



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 3

Kaltisostatisches Pressen (CIP)



Schalt-
schrank Hydraulik-
aggregat Druck-
behälter



Flexible Formen -
mit Keramikpulver
befüllt und dicht
verschlossen...

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 4

CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 5

CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



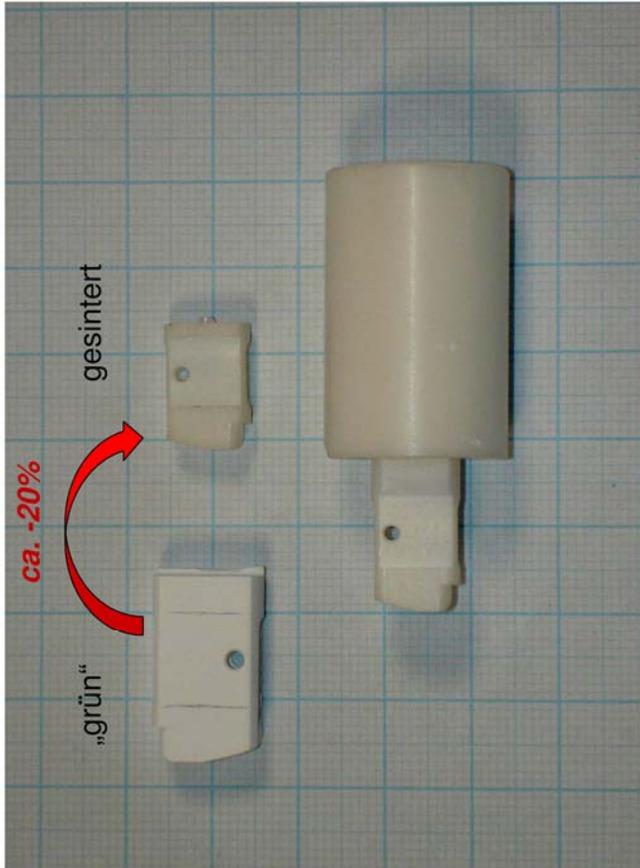
4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 6

CNC Bearbeitung des gepressten Pulvers



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 7

Etwas Schwund ist immer...



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - 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 geringe Tiefe realisierbar)
- Gewinde ab M 1,6 bei ZrO_2 ; ab M 3 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 eingeschränkter als im Vergleich zum Spritzguss

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 10

Catch me if you can... Blechverarbeitung



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 11

Catch me if you can... 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)

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 12

Bend me as you like... Biegebuchse



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 13

Bend me as you like... 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

Armed to the Teeth... Pumpenbau



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 15

Armed to the Teeth... Pumpenbau



Herausforderung:

- ☺ Mikromechanisch genaues Zahnrad (5 μm) bei relativ großer Belastung aber kleinen Abmessungen, korrosionsbeständig
- ☺ Rohling aus ZrO_2 Y-TZP HIP
- ☺ Präzisionsgeschliffen auf 5 μm
- ☺ Festigkeit ca. 1.200 MPa (4-Punkt-Biegefestigkeit)

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 16

Twist and roll... Formrolle



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 17

Twist and roll ... Formrolle



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

Heavy Duty... Lagerschalen für Luftlager



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 19

Heavy duty... Lagerschalen für Luftlager



Herausforderung:

- ☹ Hochgenaue, schwimmende Lagerung von Nockenwellen zur automatischen Vermessung und Auswuchtung, bei minimalen Verschleiß
- ☺ Material ZrO_2 Y-TZP, Bohrungen im Grünzustand gefertigt, Schleifen der jeweiligen Radien

Short-circuit Proof... elektr. Isolierkörper



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 21

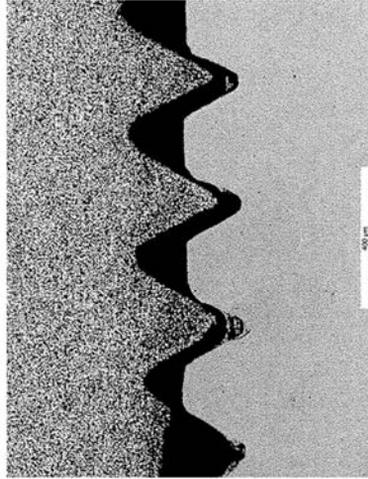
Short-circuit Proof... elektr. Isolierkörper



- ☺ Hilfsmittel bei Hochtemperaturanwendungen
> 1.000 °C in der Messtechnik
- ☺ Komplexe Form und recht große Abmessung
- ☺ Thermisch hochbelastete Bauteile

- ☺ Materialien: Al_2O_3 mit bis zu 99,9% Reinheit
- ☺ Grünfertigung ohne schleifende Nacharbeit

Screw driving... Medizintechnik



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 23

Screw driving... Medizintechnik



- ☺ Gewinde in Keramik? Außen / Innen ??
- ☺ Miniaturisierung in der Medizintechnik erfordert kleine 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

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 24

Keep me cool... thermische Isolation



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 25

Keep me cool... thermische Isolation



- ☺ Temperaturbarriere im Bereich 150°C bis 300°C, geringe Wärmeleitfähigkeit
- ☺ Variantenreichtum des Bohrschemas bei mittlerer Stückzahl
- ☺ Material: ZrO₂ Mg-PSZ mit ca. 2 W/mK
- ☺ CNC Grünfertigung und schleifender Nachbearbeitung zum Planen

Inside out... gelötete Durchführungen



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 27

Inside out... gelötete Durchführungen



- ☺ Elektrische Durchführungen von Messsignalen in [mV] bis Hochstrom [A]
- ☺ Vakuum- oder Heliumdicht, autoklavierbar, temperaturbeständig bis 450°C
- ☺ Keramische Inlays aus Al_2O_3 99,7 %
- ☺ Bis zu 24 Bohrungen \varnothing 0,4 auf \varnothing 9 mm
- ☺ Metallische Fassungen aus Sonderstählen bzw. Titan
- ☺ Partner für die Aktiv- / Lötungen

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 28

Brightly coloured... farbiges ZrO₂



4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 29

Fazit für gemeinsame Wertschöpfung...



- ☑ **Kundenorientierter Dialog**
- ☑ **Gemeinsame, frühzeitige Designplanung**
- ☑ **Sorgsame Werkstoffauswahl**
- ☑ **Optimierte Fertigungsstrategie(n)**
- ☑ **Prototypen / Muster → Auswertung**

 **Erfolgreiches Produkt...** 

4.4 Kleine Stückzahlen, hohe Präzision wirtschaftlich - Folie 30