

4.2 Multifunktionalität in der Technischer Keramik

- Friedrich Moeller
Rauschert GmbH
Pressig

Die Folien finden Sie ab Seite 355.

4.2.1. Einleitung

Multifunktionalität ist in der globalen Welt ein wichtiges Thema geworden. Produkte sollen immer kleiner werden, sollen immer weniger wiegen und immer weniger kosten. Damit Bauteile eingespart werden, müssen einzelne Komponenten zusätzlich funktionalisiert werden. D. h. sie müssen die Funktion einzusparender Komponenten übernehmen.

Am Beispiel von Aluminiumoxid soll gezeigt werden, dass die Technische Keramik das Potential für Multifunktionalität bietet.

Aluminiumoxid kann zusätzlich funktionalisiert werden durch:

- Anpassung des Eigenschaftsprofils
- Thermisches Spritzen
- Formgebungsverfahren mit größerer Designfreiheit
- Porosierung des Werkstoffs
- Metallisierung

4.2.2. Keramische Beschichtungen

Die Oberflächeneigenschaften von Aluminiumoxid, wie die hohe Härte und die gute elektrische Isolationsfestigkeit können auch genutzt werden, wenn Aluminiumoxid in dünnen Schichten von 0.1 bis 2 mm auf metallische Oberflächen thermisch aufgespritzt werden.

Im Maschinen- und Anlagenbau stoßen metallische Werkstoffe bei steigenden Prozessgeschwindigkeiten und bei der Verarbeitung abrasiver Materialien immer öfter an ihre Grenzen. Bauteile fallen dann

durch Verschleißerscheinungen, wie Verschleißrillen oder großflächigen Materialabtrag aus. Durch die keramische Beschichtung der Metalloberflächen können die Metallteile zusätzlich funktionalisiert und nachhaltig gegen Verschleiß geschützt werden. Vorteile der Metallverarbeitung, wie die kostengünstige Formgebung großer komplexer und maßgenauer Bauteile werden beibehalten. Sollte sich die Keramikschiicht im Laufe der Zeit verbrauchen, so kann die Schicht abgestrahlt und neu aufgetragen werden. Durch die Reparaturbeschichtung lässt sich die Neuanfertigung von teuren Metallteilen vermeiden.

Welche Fragen sind für den Anwender interessant?

Es findet kein Versintern von Aluminiumoxid mit dem Metall statt, sondern das Aluminiumoxidpulver wird in einer Plasmaflamme aufgeschmolzen. Durch das auftreffende Aluminiumoxidpulver erhitzt sich das Metallteil nur bis ca. 200 °C so dass keine nachteiligen metallurgischen Veränderungen des Gefüges eintreten. Ausgenommen sind dünne Metallfolien und Drähte, die einen notwendigen Wärmeabfluss nicht zulassen.

Die Keramikschiichten sind 0,1 bis 0,2 mm dick und werden bei tribologischer Beanspruchung je nach Anforderung auf R_a -Werte von 0,3 bis 2 μm bearbeitet.

Durch unterschiedlichen Zusatz von Titanoxid mit 3, 13, 40 % wird die Keramikschiicht zunehmend bruchzäher, verliert aber auch an Härte. Auch das bedeutet eine zusätzliche Funktionalisierung der Keramikschiichten.

Die Keramikschiichten sind in der Struktur nicht mit der Vollkeramik vergleichbar. Sie haben eine lamellare Struktur mit einer Porosität von ca. 3 %. Diese Struktur trägt dazu bei, dass die Keramikschiicht Schlägen widersteht.

Die Keramikschiichten können partiell aufgetragen werden. An Kanten empfiehlt es sich eine metallische Stoßkante stehen zu lassen.

4.2.3. Werkstoff

Aluminiumoxid spielt nach wie vor eine wichtige wirtschaftliche Rolle. Aufgrund seines Eigenschaftsprofils ist Aluminiumoxid multifunktional einsetzbar. Es ist u. a. hart und verschleißfest, korrosionsbeständig, und hat ein hohes elektrisches Isolationsvermögen. Es kann in seinen

Vortragsblock 3

Werkstoffeigenschaften an unterschiedliche Anforderungsprofile angepasst werden.

Aluminiumoxide unterscheiden sich u. a. in ihren Aluminiumoxidgehalten und ihrem Gefüge, wovon wieder die Werkstoffeigenschaften abhängen. So steigen mit dem Aluminiumoxidgehalt die Härte und die Wärmeleitfähigkeit an, die Thermoschockbeständigkeit nimmt hingegen ab.

Braunes Aluminiumoxid enthält Manganoxid und besitzt, wegen dem Manganoxid, hervorragende tribologische Eigenschaften.

Bei tribologischen Anwendungen spielt die Werkstoffpaarung eine große Rolle. Die Härten der Werkstoffe müssen auf einander abgestimmt werden, es werden daher oft Werkstoffpaarungen mit unterschiedlichen Werkstoffen verwendet.

Das braune Aluminiumoxid besitzt u. a. gute Gleiteigenschaften. Darum läuft der Werkstoff als Hart-Hartpaarung gut mit sich selbst. Deshalb hat sich das braune Aluminiumoxid bei Dichtscheiben in Armaturen und in Pumpen als Werkstoff für Kolben und dazugehörigen Lagern sehr gut bewährt.

Durch den Zusatz von Zirkonoxid wird die Biege- und Bruchfestigkeit von Aluminiumoxid erhöht, da Zirkonoxid eine monokline Phase ausbildet und das Kristallwachstum dadurch gehemmt wird. Damit bildet sich ein feines kugeliges Gefüge aus. Das so modifizierte Aluminiumoxid wird auch ZTA (Zirconia toughened Alumina) genannt und besitzt Werkstoffeigenschaften, die zwischen denen von Aluminiumoxid und Zirkonoxid liegen. U. a. hat ZTA eine, i. vgl. zu Aluminiumoxid, verbesserte Kantenfestigkeit. Die Bauteile können deshalb dünnwandiger ausgeführt werden.

Durch den Zusatz von Chromoxid kann Aluminiumoxid eingefärbt werden, wobei die Mengen des Chromoxids für die Tönung verantwortlich ist. Damit sind Färbungen von pink, über hellrot bis dunkelrot möglich. Diese werden z.B. im Textilmaschinenbau genutzt um Baueile mit bestimmten speziellen Oberflächenstrukturen zu kennzeichnen. Dies ist eine für die Textilindustrie wichtige Funktion, da die Oberflächen sich unterschiedlich auf das tribologische System und damit auf die Fäden auswirken. Verwechslungen können durch diese Maßnahme, gerade beim Austausch von Teilen in der Maschine, ausgeschlossen werden.

4.2.4. Design-Freiheit

Das beste Eigenschaftsprofil eines Werkstoffs nutzt nichts, wenn der Werkstoff nicht wirtschaftlich in Form gebracht werden kann.

Auch Keramiken haben, bei Verwendung der richtigen Prozesse, hohe Freiheitsgrade im Design und können dadurch mehr Funktion übernehmen.

Bauteile aus Aluminiumoxid können mit nahezu allen gängigen keramischen Formgebungsverfahren hergestellt werden. Keramikgerecht konstruieren heißt, die Grenzen der einzelnen Formgebungsverfahren zu kennen und die Möglichkeiten des jeweiligen Formgebungsverfahrens voll auszunützen.

Am Beispiel des keramischen Ventils wird gezeigt, wie die Komplexität eines Bauteils schrittweise erhöht werden kann um ein mehr an Funktionen in das Bauteil zu integrieren. Dabei ändert sich auch der keramische Fertigungsprozess vom Extrudieren über das Trockenpressen und die zusätzliche Grünbearbeitung bis hin zum Keramikspritzguss.

Typisch für das Extrudieren ist das 2-dimensionale Design von Rohren und Stäben.

Beim Trockenpressen wird das keramische Granulat zwischen Ober- und Unterstempel unter hohem Druck verpresst und der Pressling anschließend ausgestoßen. Abstufungen im Bauteil sind bei diesem Verfahren möglich, wobei werkstoffspezifische Grenzen vorhanden sind.

Der Keramikspritzguss bietet die größte geometrische Komplexität mit hoher 3D-Freiheit. Das Verfahren ist endkonturnah. Auf Weißbearbeitungsvorgänge vor dem Brand kann in der Regel verzichtet werden. Der Keramikspritzguss ist weitgehend vergleichbar mit dem Keramikspritzguss. Das Keramikpulver wird mit einem organischen Binder plastifiziert und unter hohem Druck in Form gebracht. Der Spritzling wird anschließend thermisch entbindert, entgratet und gesintert. Dabei schwindet der Spritzling je nach Werkstoff um ca. 20 bis 30 % , Beim keramikgerechten Design muss beachtet werden, dass die Spritzlinge rissfrei entbindert werden müssen und sich beim Brand nicht verziehen dürfen.

Das Beispiel eines Fadenölers aus dem Maschinenbau zeigt, wie Bauteile eingespart werden können. Das Bauteil wurde in der vorher-

gehenden Version trocken gepresst. Die Präparationsflüssigkeit wird durch ein Rohr aus rostfreiem Stahl zugeführt. Das Rohr wird mit dem Keramikteil verklebt. Bei einem Re-Design wurden die aufwändige Klebeverbindung und das Stahlteil eingespart. Dadurch erhöhte sich die Komplexität des Bauteils. Die Realisierung erfolgte mit Keramikspritzguss.

Damit ist klar: Keramikspritzguss kann gespart werden.

4.2.5. Beispiele

4.2.5.1. Aluminiumoxid für die Nanomembranfiltration

Aluminiumoxid kann auch porosiert werden. Mit einer gut reproduzierbaren Porengröße von 3 μm und einer Porosität von 30 % eignet sich Aluminiumoxid gut als Substratwerkstoff für die Nanomembranfiltration. Die Rohre haben eine Länge von 1.200 mm und einem Außendurchmesser von 10 mm für die Einkanalausführung bis zu 25 mm für die 19-Kanalausführung. Durch Sol-Gel-Verfahren werden mehrere bis zu 3 Lagen von Titanoxid in den Kanalstrukturen aufgebracht.

Eine erfolgreich abgeschlossene Projektentwicklung war die Reinigung von Prozess-Abwässern, die beim Färben und Waschen von Textilien anfallen. Die Einleitung des schmutzig blauen Abwassers in die kommunalen Abwassersysteme ziehen Auflagen und Gebühren nach sich, deshalb kann sich eine Abwasserreinigungsanlage schnell amortisieren. Das zu reinigende Abwasser wird den Filtermodulen zugeführt. Farbstoffmoleküle bis herunter zu einer Molekülgröße von 600 Dalton werden an der Membranschicht zurückgehalten. Der Flux beträgt 150 bis 250 $\text{l/m}^2/\text{h}$. In Abreinigungszyklen wird das Filtrat ausgeschwemmt, eingedickt und durch kathodische Reduktion aufgearbeitet.

Membranfilter werden auch aus Kunststoff relativ preisgünstig hergestellt, z. B. für die Dialyse. Substrate aus poröser Aluminiumoxid können gegenüber Kunststoffmembranen Bei Aluminiumoxid wird die Hochtemperaturfestigkeit genutzt, um bis 350 °C heißes Filtrat direkt in die Filtrationsanlage einzuleiten. Vorhergehendes Abkühlen ist nicht notwendig.

Korrosive Abwässer im pH-Bereich zwischen 0 und 14 und abrasive Abwässer können gereinigt werden. Die Standzeit ist höher, da durch die mechanische Festigkeit der Mehrkanalrohre eine mehrmalige Abreinigung möglich ist.

4.2.5.2. Aluminiumoxid für die Direktheizung

Aluminiumoxid kann nicht nur als Schichtwerkstoff auf metallische Grundkörper aufgetragen werden und sie zusätzlich funktionalisieren. Aluminiumoxid kann selbst als Substrat für anschließende Metallisierungen dienen. Für Heizleiteranwendungen hat sich Platin bewährt, das mit Siebdruck auf eine Grünfolie aus Aluminiumoxid aufgebracht wird. Die metallisierte Folie wird dann auf ein Trägerrohr aus Aluminiumoxid laminiert und mit dem Rohr versintert.

Die Rohheizkörper können innerhalb von 60 s eine Temperatur von 1.000 °C im Dauer – und Wechselbetrieb erreichen. Bei einem Anschlusswert von 220 V haben sie eine Leistungsdichte von 13 W/cm². Die Heizelemente sind nach außen hin elektrisch isoliert und oxidations- und korrosionsbeständig und können im gesamten Temperaturbereich geregelt werden.

4.2.5.3. 3D-Präzision bei Maschinenbauteilen

Die Werkstoffe aus Technischer Keramik haben im Maschinen- und Anlagenbau an wichtigen hoch beanspruchten Funktionsstellen oft eine Schlüsselfunktion.

Hohe Verschleißfestigkeit, hohes elektrisches und thermisches Isolationsvermögen und das bei hohen Arbeitstemperaturen, Formsteifigkeit, Korrosionsbeständigkeit zeichnen das Eigenschaftsprofil der technischen Keramik aus.

Mit dem Einsatz technischer Keramik konnten in vielen Anwendungsgebieten die Leistungsgrenzen von Maschinen ausgedehnt und die Zuverlässigkeit der Maschinen und Anlagen erhöht werden.

Maschinenbauteile aus Metall oder Kunststoff können nicht einfach durch Keramik substituiert werden. Es muss keramikgerecht konstruiert werden. Die Regeln keramischer Formgebung und die werkstoffspezifische Schwindung müssen beachtet werden. Für die Hartbearbeitung sind Diamant-Werkzeuge erforderlich. Bei kleinen Losgrößen, wie sie im Maschinenbau oft anzutreffen sind, bilden wirtschaftliche Erwägungen gerade beim Ersteinsatz eine Hemmschwelle. Bei nachgewiesener Wirtschaftlichkeit wird dann oft Zug um Zug der Einsatz der Keramik umgesetzt.

In vielen Fällen ist Präzision gefragt.

Vortragsblock 3

Durch ein innovatives Hartbearbeitungsverfahren können nun 3D – Präzisionsteile in kleinen Stückzahlen wirtschaftlich hergestellt werden. Bohrungen mit 0,5 mm, 3-dimensionale Kavitäten und R_a -Werte $< 0,2$ an gekrümmten Oberflächen sind in guter Reproduzierbarkeit erreichbar.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 24) finden sich auf den folgenden Seiten.

Einführung

Multifunktionalität

in der Technischen Keramik

Friedrich Moeller
Rauschert GmbH
Pressig



Die Trends in der globalen Wirtschaft

- **Kosten senken**
- Kundennutzen verbessern
- Kundenzufriedenheit verbessern

Es setzt sich die funktions- und systemorientierte Betrachtungsweise durch.

Anforderungen

Die einzelnen Komponenten müssen bei veränderten Kundenanforderungen optimiert oder substituiert werden.

Die Werkstoffe der Technischen Keramik können aufgrund ihrer Eigenschaften viele Funktionen erfüllen und leisten ihren Beitrag bei der

- Ausweitung der Leistungsgrenzen
- Erhöhung der Lebensdauer
- Verbesserung der Zuverlässigkeit
- Einsparung von Gewicht und Raum

Multifunktionalität am Beispiel von Aluminiumoxid

Das Eigenschaftsprofil von Aluminiumoxid:

- hart und verschleißfest
- korrosionsbeständig
- elektrisch isolierend bei Temperaturen $> 200\text{ °C}$
- hochtemperaturbeständig

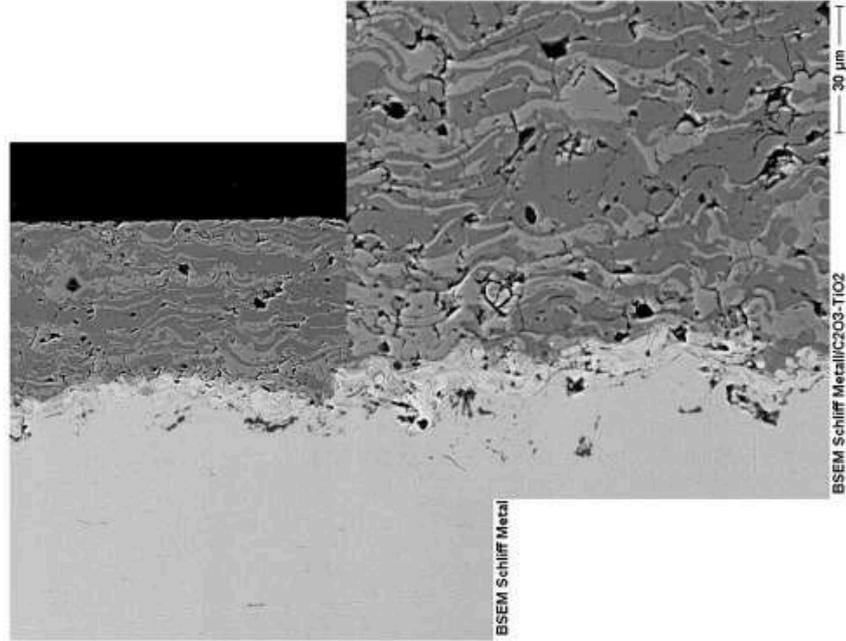
Die Funktionalisierung wird z. B. erreicht durch:

- Anpassung des Eigenschaftsprofils (Mischoxidbildung)
- Keramik-Schichten
- Erweiterung der Designmöglichkeiten (Keramikspritzguss)
- Porosierung für die Filtration
- Schichtverbund für die Direktheizung

Keramikschichten funktionalisieren Metallteile

Prinzip des thermischen Spritzens

- In einer Plasmaflamme wird bei ca. 10.000 °C Keramikpulver in 0,5 ms aufgeschmolzen und auf die vorher sandgestrahlte Metalloberfläche aufgeschossen
- Dabei entsteht eine 100 µm dicke Keramikschicht mit einer porösen lamellaren Struktur .
- Typische Keramik-Schichtwerkstoffe sind $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, ZrO_2 , $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$



Keramik-Schichten funktionalisieren Metallteile

Elektrische Isolation
für Temperaturen > 200 °C
und Spannung < 500 V

mit Schichtwerkstoff Al_2O_3 (99 %) weiß, Schichtdicke 200 nm

Beispiel: Spulenkörper

Die Keramikschicht gewährleistet die elektrische Trennung der metallischen Oberfläche endkonturnah auf kleinem Raum



Keramik-Schichten funktionalisieren Metallteile



Im Verschleißschutz

Schichtwerkstoff $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ mit einer Schichtdicke von $100 \mu\text{m} \pm 30 \mu\text{m}$

Beispiel: Drahtführungsrolle

Die Keramikschicht schützt die metallische Oberfläche vor Verschleiß und erhöht damit die Standzeit des Bauteils



Eigenschaftsverbesserung durch Mischoxidbildung

Zusatz von Manganoxid

- Verbessert die tribologischen Eigenschaften u.a. für den Einsatz im Pumpenbau.
- Wegen der guten Gleiteigenschaft können Kolben und Lagerbuchsen aus dem gleichen Werkstoff hergestellt werden.

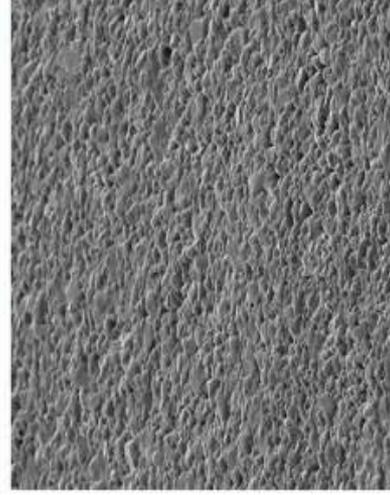


Eigenschaftsverbesserung durch Mischoxidbildung



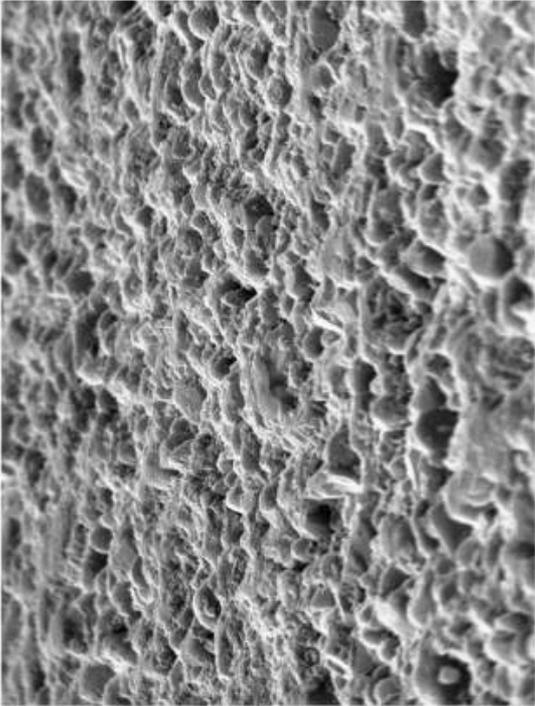
Zusatz von Chromoxid

- Chromoxid verleiht Aluminiumoxid eine Tönung von pink über hell- bis dunkelrot.
- Kennzeichnung von Oberflächen ohne tribologische Einbusen ist möglich. Damit werden Verwechslungen bei der Montage vermieden.



think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

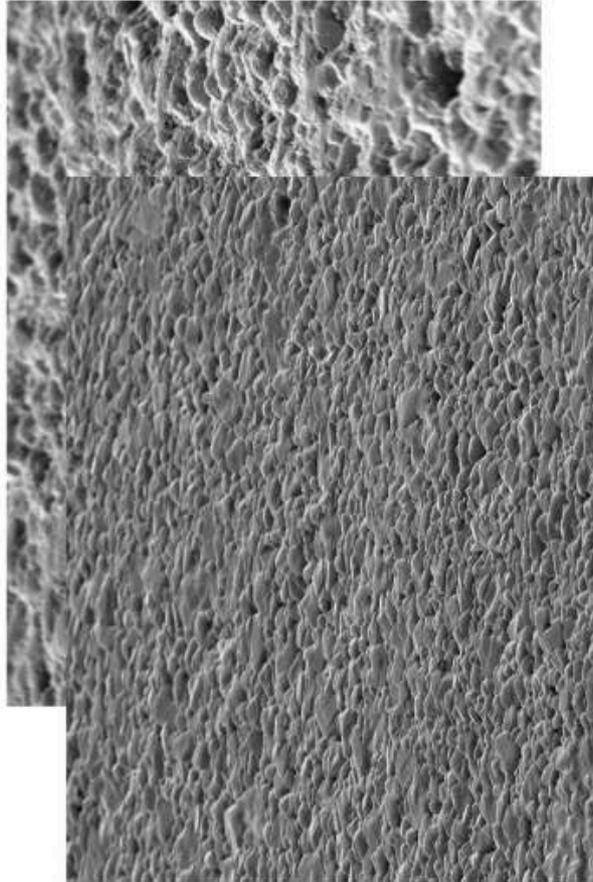
Oberflächen von Fadenführen



The image shows a scanning electron microscope (SEM) view of a highly porous, interconnected network of fibers or filaments. The structure is dense and irregular, with many small, rounded voids and sharp, protruding edges, characteristic of a sintered ceramic fiber mat or a porous ceramic structure. The overall appearance is that of a complex, three-dimensional lattice.

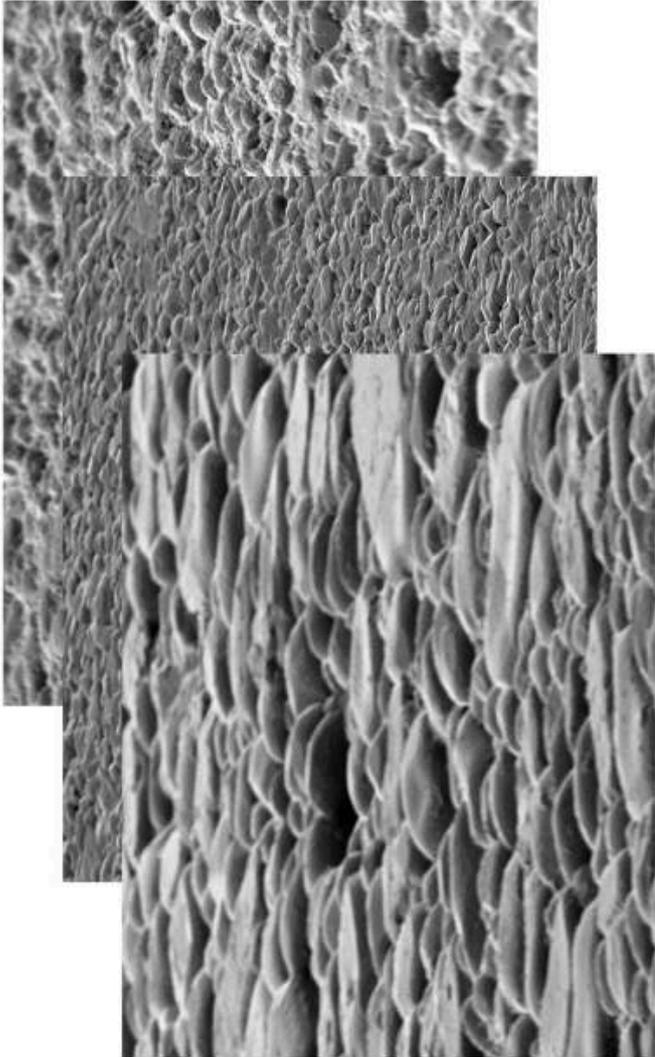
4.2 Multifunktionalität - Folie 10

Oberflächen von Fadenführen



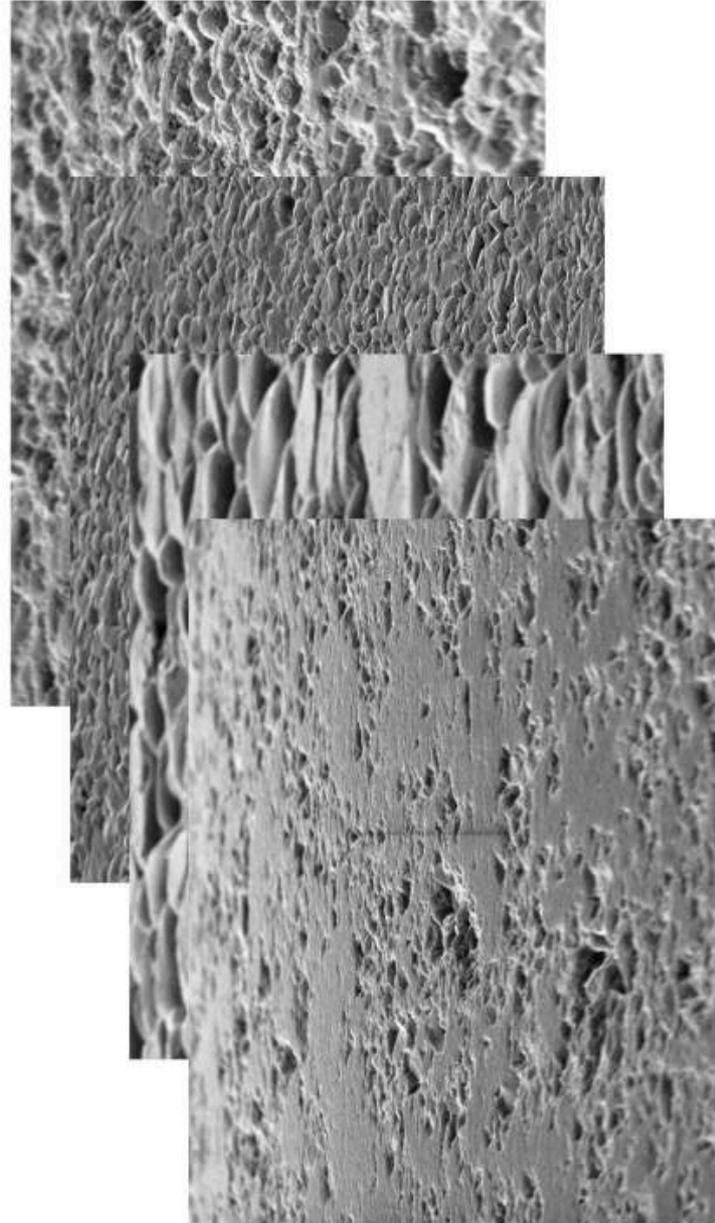
think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

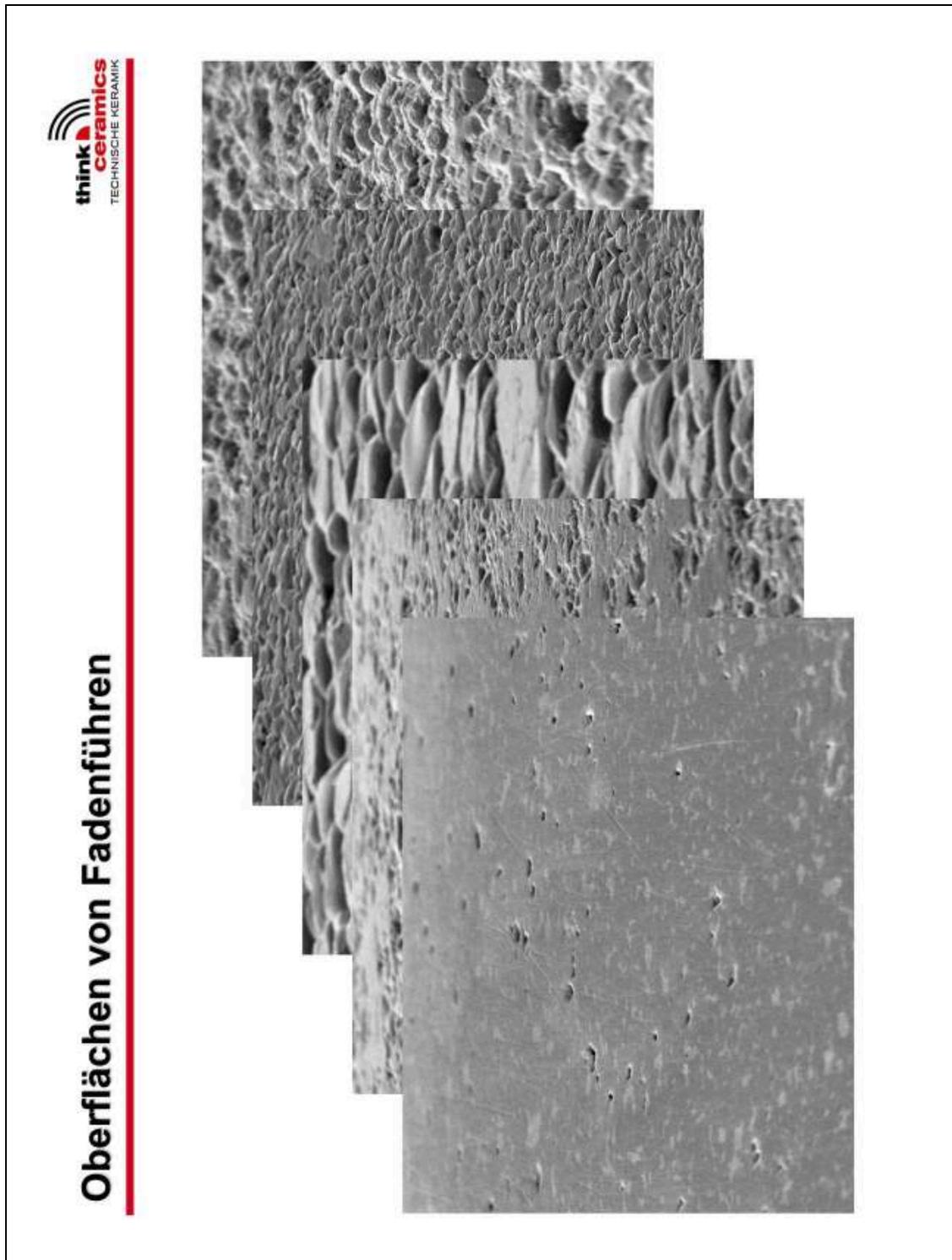
Oberflächen von Fadenführen



4.2 Multifunktionalität - Folie 12

Oberflächen von Fadenführen





4.2 Multifunktionalität - Folie 14

Eigenschaftsverbesserung durch Mischoxidbildung



Zusatz von Zirkonoxid

- Zirkonoxid im Aluminiumoxid verbessert die Bruchfestigkeit und die erhöht die Kantenfestigkeit.
- Grund: Das Zirkonoxid behindert das Kornwachstum und führt zu einem kugeligen feinkörnigen Gefüge.



Erweiterung der Designmöglichkeiten

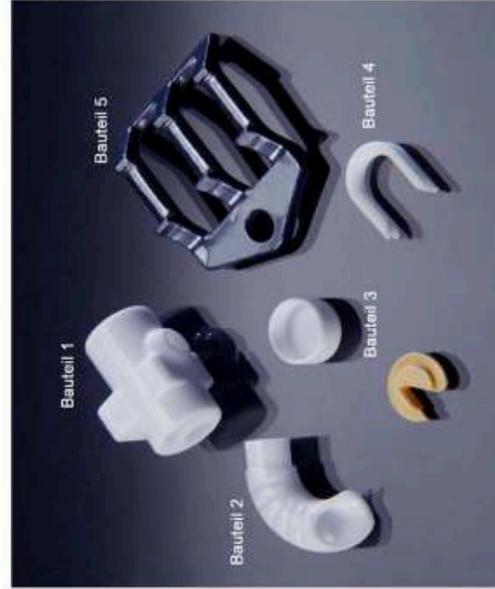


Möglichkeiten der Formgebung:

- Extrudieren
- Pressen und CNC-Bearbeiten
- Spritzgießen

Mittels Keramikspritzgussteilen weitere Funktionen integrieren

Beispiel:
Asymmetrisches Ventilbauteil (1) mit
Bohrung (Chemietechnik)



Erweiterung der Designmöglichkeiten



Möglichkeiten der Formgebung:

- Extrudieren
- Pressen und CNC-Bearbeiten
- Spritzgießen

Mittels Keramikspritzgussteilen weitere Funktionen integrieren

Beispiel:
Asymmetrisches Ventilbauteil (1) mit
Bohrung (Chemietechnik)



Keramik- Spritzguss integriert Funktionen

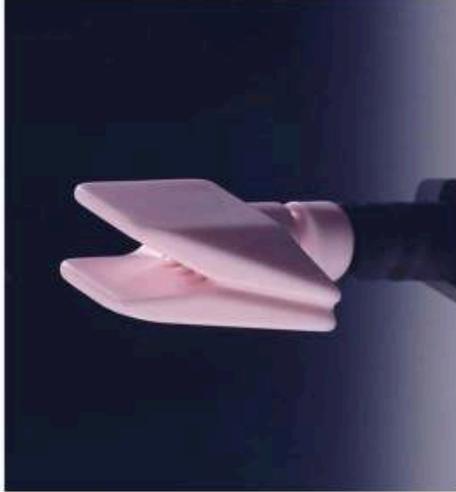
Beispiel

Präparations – Fadenführer

Zum Beölen der frisch gesponnenen Faser

Die größere 3D-Gestaltungs-Freiheit des Keramikspritzguss wird genutzt zur

- Erhöhung der Komplexität des Bauteils
- Integration zusätzlicher Funktionen
- Einsparung von Bauteilen und Arbeitsschritten

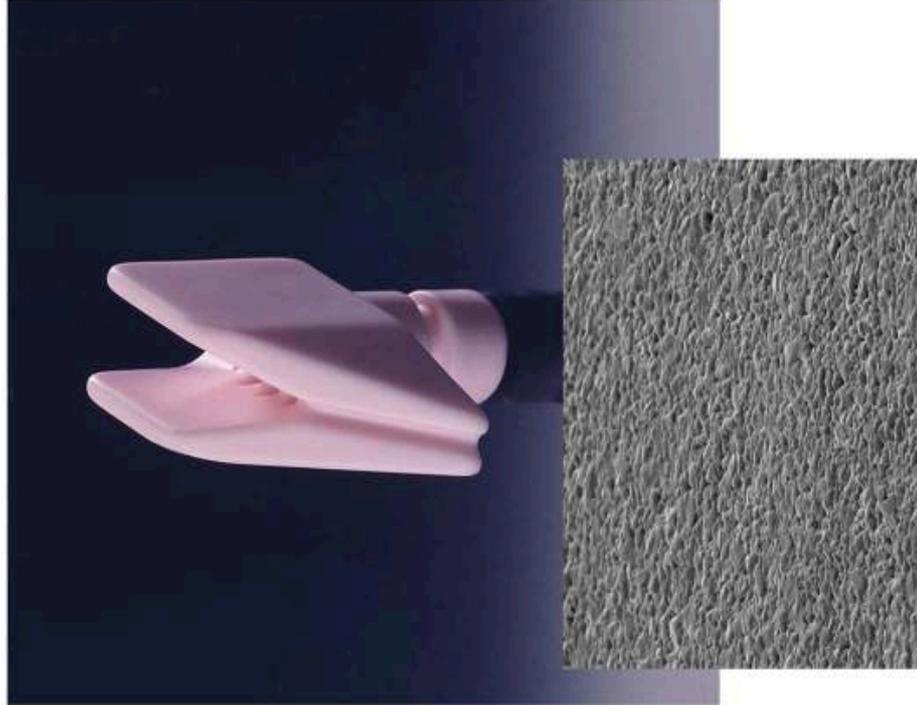


Beispiel für ein Keramik- Spritzguss- Bauteil



Präparations–Fadenführer für das beölen der Faser

- Fadenlaufbereich:
hohe Oberflächengüte
- Gefügeoberfläche:
reibungssarm
- Integriertes Zuführrohr
mit Nut zur Aufnahme des
Dichtrings
- Farbe zur Kennzeichnung der
Oberfläche



Keramik- Spritzgussteile sparen Platz und Gewicht

Beispiel

Mikro – Bauteile

- Medizintechnik
- Dentaltechnik
(Isolationsteil)
- Textilindustrie
(Changierfadenführerplättchen)

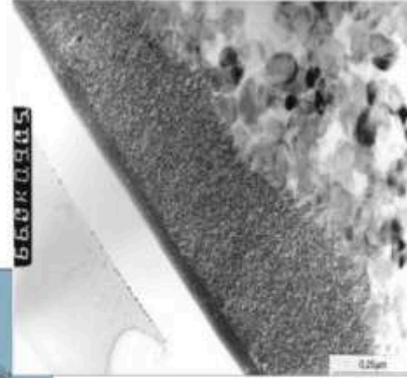


Porosiertes Aluminiumoxid

Für die Nanomembran-Filtration

Extrudierte Rohre aus porösem Al_2O_3 mit einer Porengröße von $3\ \mu\text{m}$ dienen als Substrate für poröse Schichtstrukturen mit einer Porosität von ca. 30 %.

Durch sukzessives Auftragen von Schichten aus Al_2O_3 und TiO_2 werden je nach Anwendung Porengrößen von 600 nm, 200 nm, 60 nm, 5 nm und 0,9 nm erzeugt.



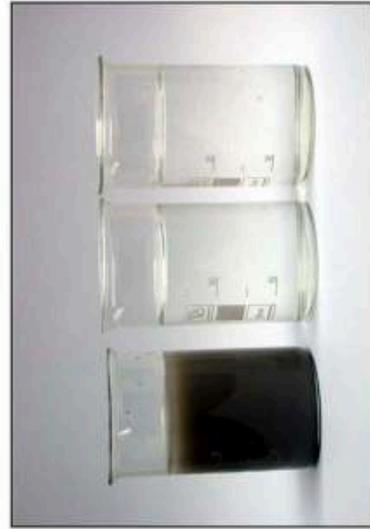
Poröses Aluminiumoxid



Für die Nanomembran-Filtration

Einkanal-, 7-Kanal-, oder 19-Kanalrohre werden in Modulen aus rostfreien Stahl gefasst.

Gezeigt wird eine Abwasser-Reinigungsanlage in der Textilindustrie



Metallisierte Aluminiumoxidkeramik



Direktbeheizung bis 1.000°C

- Rohre und Stäbe aus Aluminiumoxid dienen als Substrat für ein Direkt-Heizelement
- Eine Aluminiumoxid-Folie wird mit einer Heizleiterstruktur aus Platin bedruckt und laminiert .
- Aufheizdauer 60 s auf 1.000 °C
- Leistung 13 Watt / cm² bei 220V



Design-Freiheit + 3D-Präzision



Herstellung von Maschinenbauteilen in 3D-Präzision ist möglich

- Gesinterte Halbzeuge werden im an Freiformflächen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm hartbearbeitet.
- Bohrungen mit $d=0,5$ mm und
- 3D-Kavität mit R_a -Werten $< 0,1$ μm sind realisierbar.

