

2.2 Keramik – die maßgeschneiderte Lösung für vielfältige Anwendungen

- Carmen Eil
Kristina Leßnau
CeramTec AG
Plochingen

Die Folien finden Sie ab Seite 77.

2.2.1. Einleitung: Wie funktioniert das Maßschneiden von keramischen Werkstoffen?

2.2.1.1. Werkstoffauswahl entsprechend des Bauteileinsatzes am Beispiel Schneidkeramik

Moderne Hochleistungsanwendungen für technische Keramik erfordern häufig ein für die jeweilige Anforderung maßgeschneidertes Eigenschaftsprofil. Neben der gezielten Auswahl des keramischen Werkstoffsystems müssen darüber hinaus die verschiedenen Prozessschritte bei der Herstellung gezielt angepasst und gegebenenfalls weiter entwickelt werden. Dieses Vorgehen wird am Themenfeld Schneidkeramik beispielhaft aufgezeigt.

Schneidwerkzeuge werden bei der Zerspanung metallischer Werkstoffe hohen mechanischen und thermischen Belastungen gerecht. Keramische Schneidstoffe bestehen dabei auch in anspruchsvollsten Anwendungen, z. B. in der Trockenbearbeitung von Gusseisenwerkstoffen bei stark unterbrochenem Schnitt.

Aus der Summe der Belastungen des Werkstoffs in der Anwendung, ob mechanisch, thermisch oder korrosiv, kann ein **Anforderungsprofil** erstellt werden. Das Anforderungsprofil sagt aus, welche Eigenschaften der Werkstoff benötigt, um für die Anwendung geeignet zu sein. Am Beispiel der Schneidstoffe sieht das Anforderungsprofil folgendermaßen aus:

- hohe Härte
- hohe Druckfestigkeit
- gute Biegebruchfestigkeit
- hohe Bruchzähigkeit
- sehr gute chemische Beständigkeit
- gute Temperaturwechselbeständigkeit

Für Schneidkeramiken wird eine hohe **Härte** gefordert. Das Werkzeug muss eine höhere Härte als das zu zerspanende Material haben, um eine Spanbildung möglich zu machen. Wichtig ist auch, dass die Härte bei hohen Temperaturen erhalten bleibt, da davon die maximale Schnittgeschwindigkeit abhängt, die in erheblichem Maße für die Wirtschaftlichkeit eines Bearbeitungsvorgangs mitverantwortlich ist.

Um den im Trennvorgang auftretenden Schnittkräften zu widerstehen, erfüllt der Schneidstoff die Anforderungen an hohe **Druckfestigkeit**, **Biegebruchfestigkeit** und **Zähigkeit**. Die mechanischen Eigenschaften beeinflussen zusammen mit dem Reibungsverhalten zwischen Scheidkeramik und Werkstoff die Verschleißfestigkeit, die für einen wirtschaftlichen Prozess ebenfalls von entscheidender Bedeutung ist.

Weiterhin ist eine gute **chemische Beständigkeit** nötig. Das heißt, der Schneidstoff zeigt auch bei hohen Temperaturen eine geringe Reaktionsneigung gegenüber dem zu zerspanenden Material sowie eine gute Oxidationsbeständigkeit gegenüber dem Luftsauerstoff.

Zusätzlich wichtig ist eine gute **Temperaturwechselbeständigkeit**. Die Schneidplatte ist im Einsatz großen Temperaturschwankungen ausgesetzt, besonders im unterbrochenen Schnitt.

Wie stark die einzelnen Eigenschaften im Verhältnis zueinander ausgeprägt sein müssen, kann von Anwendungsfall zu Anwendungsfall variieren. Faktoren sind hier der zu zerspanende Werkstoff mit seinen mechanischen Eigenschaften und die genaue Zerspanungsaufgabe. Hoher Materialabtrag beim Abdrehen von Gusshaut mit geringer Oberflächengüte ergibt andere Anforderungen als bei schnellen Feindreihen bei geringem Vorschub. Beispielhaft sollen die Anwendungen **Schruppen** und **Schlichten** gegenübergestellt werden.

Schruppen bezeichnet bei spanenden Fertigungsverfahren das Abheben von Werkstoff mit großem Spanvolumen. Innerhalb möglichst kurzer Bearbeitungszeit soll das Werkstück der Endkontur so weit wie möglich angenähert werden. Dies wird erreicht durch große **Schnitttiefe** und schnellen **Vorschub**. Der Schruppvorgang hinterlässt meist raue Oberflächen mit geringer Maßgenauigkeit. Die Anforderungsschwerpunkte an den Werkstoff sind hierbei Zähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit.

Für exakte Endkonturen und hohe Oberflächengüte folgt der Vorgang des Schlichtens. Dabei handelt es sich um eine Feinbearbeitung mit hoher **Schnittgeschwindigkeit** bei geringem Materialabtrag. Die Anforderungsschwerpunkte sind chemische Beständigkeit und hohe Härte bzw. Warmhärte.

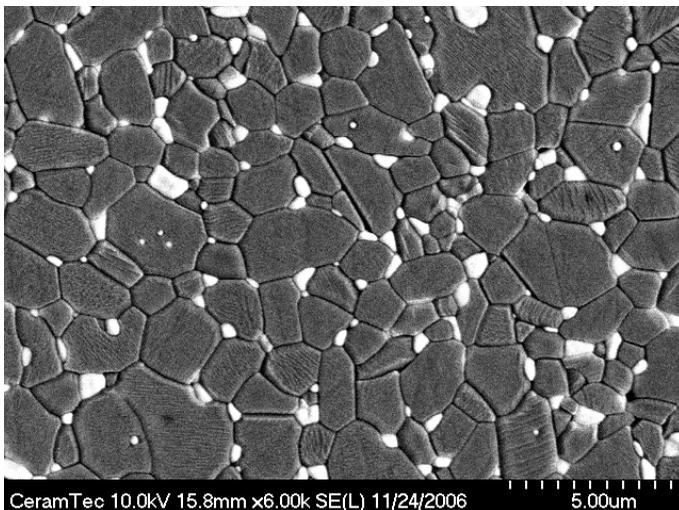


Bild 1: Gefüge von ZTA

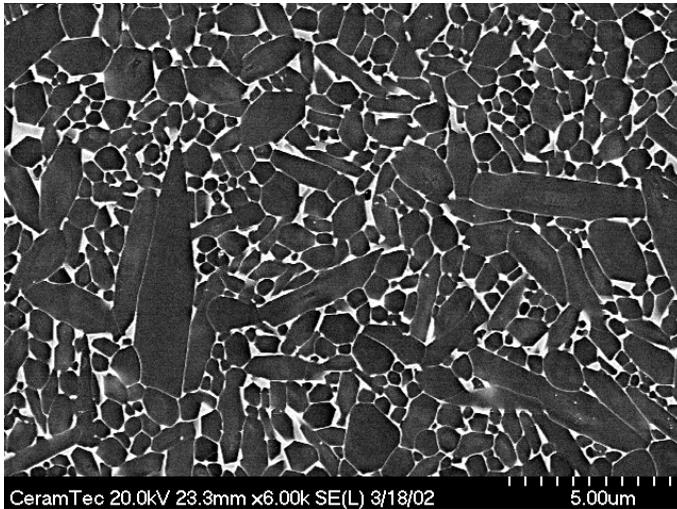


Bild 2: Gefüge von Si_3N_4

Für das Schruppen ist Siliziumnitrid Si_3N_4 am besten geeignet, für das Schlichten dagegen eher ein Zirkonoxidverstärktes Aluminiumoxid **ZTA**. Die mikroskopische Betrachtung der keramischen Gefüge (siehe Abb. 1) gibt weitere Hinweise auf die Eigenschaften der Werkstoffe. Die hohe Biegebruchfestigkeit und Zähigkeit des Si_3N_4 -Werkstoffs kann aus der nadelförmigen Ausbildung der Körner abgeleitet werden. Der homogene Verbund des Al_2O_3 mit dem fein verteilten ZrO_2 gibt dem Material die hohe Härte des Al_2O_3 bei verbesserter Zähigkeit durch die Umwandlungsverstärkung des Zirkonoxids.

Durch eine gezielte Einstellung des keramischen Gefüges können folglich Materialeigenschaften maßgeschneidert werden.

2.2.1.2. Prozessschritte zur Herstellung des keramischen Bauteils

Die Erzeugung des keramischen Gefüges, welches die Materialeigenschaften wesentlich mitbestimmt, geschieht im Herstellungsprozess. Entscheidend ist dabei das Zusammenspiel der einzelnen Prozessschritte, wie in der Übersicht Bild 3 dargestellt ist.

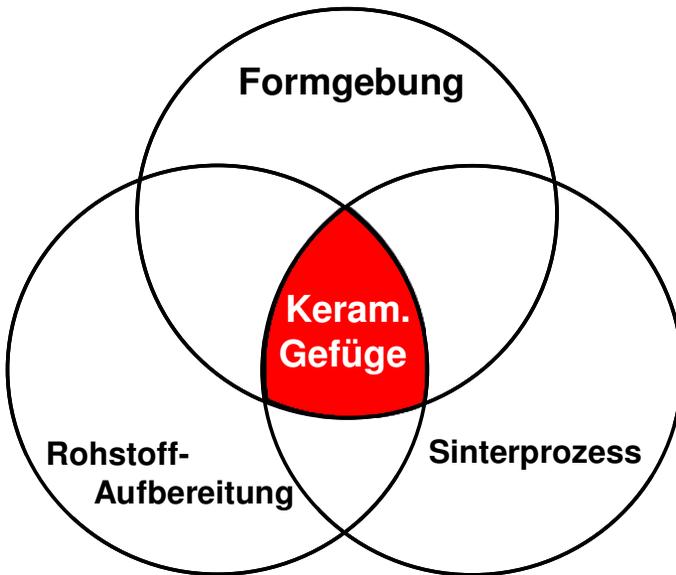


Bild 3: Prozessschritte in der Herstellung von Keramik

Die **Rohstoffauswahl** steht zu Beginn des Herstellprozesses. Jede chemische Verbindung bringt von Natur aus bestimmte Eigenschaften mit (beispielsweise die hohe Härte von Al_2O_3 aufgrund der hohen chemischen Bindungsenergie).

In der **Rohstoffaufbereitung** werden Feinheit und Form der Rohstoffpartikel über Misch- und Mahlprozesse definiert eingestellt. Je nach angewandtem Formgebungsverfahren wird im Anschluss daran granuliert oder plastifiziert.

Für die **Formgebung** stehen eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, z. B. Trockenpressen, Schlickerguss, Foliengießen oder Spritz- und Extrusionsverfahren. Die Auswahl des Verfahrens erfolgt anhand der Komplexität der Bauteilgeometrie und wirtschaftlicher Aspekte.

Ein weiterer charakteristischer Teilprozess bei der Keramikherstellung ist die Temperaturbehandlung, das **Sintern**. Erst durch das Sintern erhält der keramische Werkstoff seine Eigenschaften. Während des Sinterns kommt es zu Verdichtungs- und Schwindungsprozessen und zur Ausbildung des keramischen Gefüges.

Nach dem Sintern kann ein weiterer Form bestimmender Schritt, die **Hartbearbeitung**, folgen. Hartbearbeitung ist aufgrund der hohen Härte der Keramik meist nur mit Diamantwerkzeugen und geringem Materialabtrag möglich. Beispiele sind das Schleifen für hohe Maßgenauigkeit und das Polieren zur Erzeugung hoher Oberflächengüte.

2.2.1.3. Herstellung der Werkstoffe ZTA und Siliziumnitrid

Bezogen auf das Beispiel der Schneidkeramik kann man feststellen, dass jeweils unterschiedliche Prozessschritte eine zentrale Bedeutung für die Erzeugung des Gefüges haben.

Die ZTA-Keramik hat besondere Anforderungen an die **Masseaufbereitung**. Die Herausforderung ist dabei die absolut homogene Verteilung der ZrO_2 -Phase im Al_2O_3 , wobei ZrO_2 eine deutlich höhere spezifische Dichte als Al_2O_3 hat. Aufgabe ist die Erzeugung eines homogenen Ausgangsprodukts für den Formgebungsprozess. Im Fall der ZTA-Schneidkeramik verläuft die Grünformgebung über Trockenpressen, wofür ein homogenes und rieselfähiges Granulat erzeugt werden muss. Die Rohstoffkomponenten werden gemischt und bis zur gewünschten Partikelfinheit gemahlen. Die Aufbereitung erfolgt über einen keramischen Schlicker, d. h. eine Dispergierung der keramischen Partikel in Wasser oder einem anderen Lösungsmittel. Die Herausforderung liegt dabei in der homogenen Verteilung der ZrO_2 -Partikel zwischen den Al_2O_3 -Partikeln. Das System muss dabei gut stabilisiert sein, d.h. die einzelnen Partikel müssen in Schwebelage gehalten werden. So können weder Entmischungsvorgänge noch Sedimentationsprozesse die Dispersion zerstören. Zur Stabilisierung der Keramiksuspensionen werden spezielle Additive zugegeben. Die Granulatherstellung erfolgt über einen Sprühtrocknungsprozess.

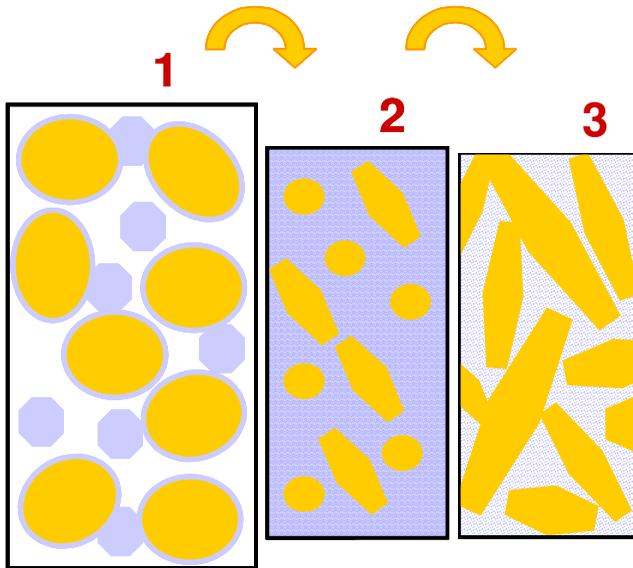


Bild 4: Schematischer Verlauf des Flüssigphasensinterns

Beim Si_3N_4 -Werkstoff werden die gewünschten Eigenschaften vor allem durch einen angepassten **Sinterprozess** mit gezielter Steuerung von Temperatur, Druck und Atmosphäre erreicht. Das nadelige Gefüge muss erzeugt und die vollständige Verdichtung des diffusions-trägen Materials gewährleistet werden. Dafür ist die Auswahl feiner und sinteraktiver Rohstoffe nötig. Die Verdichtung läuft über Flüssigphasensintern, siehe dazu Schema in Abb. 3. Zur Bildung der flüssigen Schmelzphase zwischen den festen Si_3N_4 -Partikeln werden der Masse Sinteradditive hinzugefügt. Diese bilden zusammen mit dem SiO_2 , das auf der Oberfläche der Si_3N_4 -Partikel vorliegt, beim Aufheizen die flüssige Phase. Der Si_3N_4 -Rohstoff liegt hauptsächlich in der metastabilen α -Phase vor. Die α -Kristalle lösen sich nach und nach in der Schmelzphase und kristallisieren als nadelförmige β - Si_3N_4 -Partikel aus. Dafür sind Kristallisationskeime nötig, kleine β - Si_3N_4 -Partikel die bereits im Rohstoff vorliegen. Beim Abkühlen entsteht aus der flüssigen Phase eine amorphe, glasige Phase an den Korngrenzen. Der Anteil dieser „Glasphase“ muss möglichst gering sein für ausreichende Temperaturbeständigkeit und gute mechanische Eigenschaften. Für eine wirtschaftliche Verdichtung des Werkstoffs und um der bei

hohen Temperaturen einsetzenden Zersetzung des Materials entgegenzuwirken, wird beim Sintern ein hoher (ca. 100 bar) Stickstoff-Gas-Druck angelegt.

Am Beispiel der zwei unterschiedlichen Schneidkeramik-Werkstoffe wurde gezeigt, wie durch gezielte Einstellung der Herstellungsparameter die keramischen Eigenschaften maßgeschneidert werden können und damit das für die Anwendung benötigte Eigenschaftsprofil erzeugt wird. Die Wünsche des Anwenders und die Möglichkeiten des Herstellers werden in der gemeinsamen Diskussion zusammengeführt (vgl. Bild 5).

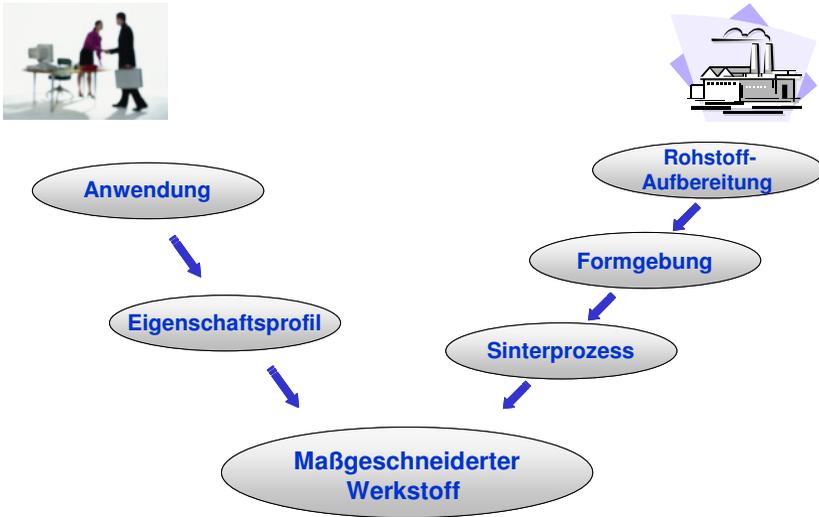


Bild 5: Maßschneidern des Keramikwerkstoffs aus Kunden- und Herstellersicht

2.2.2. Wie vielfältig sind die Anwendungsmöglichkeiten für Bauteile aus technischer Keramik?

Das Prinzip des Maßschneiderns ist für eine enorme Vielfalt von Anwendungen in vergleichbarer Weise möglich. Dies soll im folgenden anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele gezeigt werden, die jedoch nur einen bescheidenen Ausschnitt der möglichen Anwendungen abdecken können.

2.2.2.1. Dicht- und Regelscheiben

Eine klassische Anwendung für technische Keramik und den Werkstoff Aluminiumoxid bilden Dicht- und Regelscheiben, die beispielsweise in Sanitärarmaturen, Kaffeemaschinen und chemischen Analysegeräten eingesetzt werden. Die entscheidenden Voraussetzungen für diese Anwendung sind hervorragende tribologische Eigenschaften der Oberfläche, chemische Inertheit und hohe Härte. Für die präzisionsgeschliffenen und polierten Bauteile bedeutet das außergewöhnliche Langlebigkeit und optimale Dichtfunktion auch bei höheren Temperaturen und Druck. Gleichzeitig besteht die Herausforderung darin, für diese Massenprodukte Bauteile mit komplexen geometrischen Merkmalen in hohen Stückzahlen wirtschaftlich zu produzieren. Dies stellt besondere Anforderungen an die verarbeitete keramische Masse und die Prozesssicherheit bei den nachfolgenden Prozessschritten, insbesondere beim Sintern und Hartbearbeiten.

2.2.2.2. Kühlkörper für High Power LED Systeme

Für die Kühlkörper in High Power LEDs sind gute elektrische Isolierfähigkeit und hohe Durchschlagfestigkeit entscheidende Eigenschaften. Ein weiterer Vorteil ist die Korrosionsbeständigkeit der Bauteile. Die Kühlkörper können wie herkömmliche keramische Substrate direkt metallisiert werden und damit als Schaltungsträger dienen. Dem kommt auch der an Halbleitermaterialien angepasste Wärmeausdehnungskoeffizient entgegen. Bei Anwendung in Systemen mit besonders hohem Wärmeüberschuss eignet sich besonders der Werkstoff Aluminiumnitrid, der die scheinbar widersprüchlichen Eigenschaften der elektrischen Isolation mit einer sehr hohen Wärmeleitfähigkeit in sich vereint.

2.2.2.3. Isolationsstücke für Bremse

Hervorragende thermische Isolierwirkung bringt den entscheidenden Vorteil in einem weiteren Anwendungsbeispiel. In Bremssystemen von Sportwagen muss die Bremsflüssigkeit vor der beim Bremsen entstehenden Reibungshitze geschützt werden. Die Anforderungen erfüllt ein Magnesiumstabilisiertes Zirkonoxid durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit.

2.2.2.4. Funktionselemente für Fleischwolf

Eine spannende Werkstoffkombination findet sich im Schneidwerk von industriell eingesetzten Fleischwölfen: Messer aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid schneiden das Fleisch auf Lochplatten aus Siliziumnitrid. Das System ist im Vergleich zu standardmäßig verwendetem Edelstahl unglaublich verschleißfest. Die Edelstahlplatte zeigt nach einem Durchsatz von 200 t Fleisch bereits den kritischen Verschleiß von 2 mm, während im keramischen System der Abrieb nach 2000 t Durchsatz lediglich 2 μm beträgt (siehe Bild 6). Dadurch entsteht ein wirtschaftlicher Vorteil, da die Systeme viel seltener ausgetauscht werden. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist aber, dass weniger Abrieb des Schneidwerks in die Fleischmasse gelangt. Für diese Anwendung ist selbstverständlich auch die Lebensmittelverträglichkeit der verwendeten Werkstoffe gefordert.

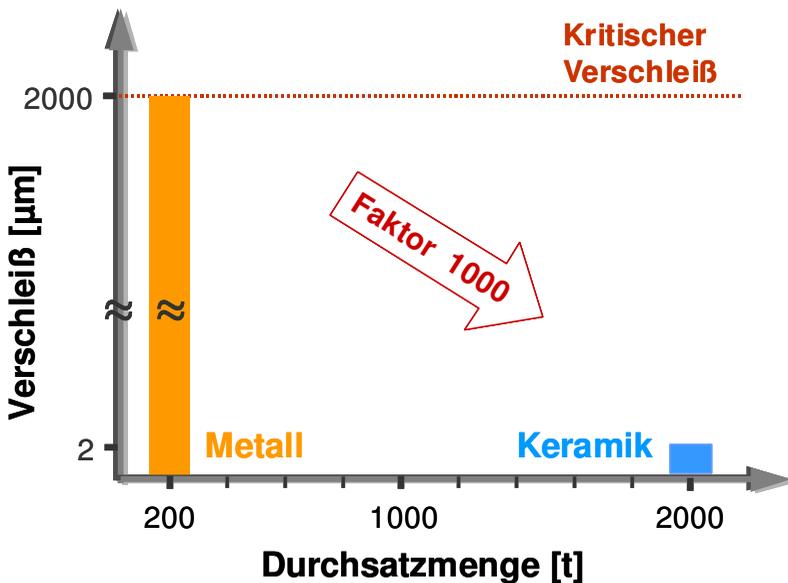


Bild 6: Verschleiß an Funktionselementen / Durchsatzmenge

2.2.2.5. Endoprothesen für künstliche Gelenke

Als Weiterentwicklung der ZTA-Keramik, die als Beispiel eines oxidischen Schneidwerkstoffs gezeigt wurde, ist die sogenannte ZPTA-Keramik zusehen. ZPTA bedeutet „zirconia platelet toughened alumina“. Im keramischen Gefüge wirkt also ein zusätzlicher Verstärkungsmechanismus durch plättchenförmige Partikel zwischen den isometrischen Aluminiumoxid- und Zirkonoxidkörnern. Dadurch ergibt sich für die mechanischen Kennwerte Biegefestigkeit, Verschleißbeständigkeit und Bruch-zähigkeit eine signifikante Verbesserung. Typische Anwendungen dieser Keramik sind Bauteile für den Gelenkersatz, z. B. Knie- oder Hüftgelenksimplantate.

2.2.2.6. Beschichtete Schneidkeramik

Nicht nur der oxidische ZTA-Werkstoff lässt sich für noch höhere Anforderungen weiter optimieren. Auch die Eigenschaften der Si_3N_4 -Schneidkeramik lassen sich noch übertreffen. Die Verwendung von Sialon ($\text{Si}_3\text{N}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) als Werkstoff bringt höhere Härte und chemische Beständigkeit. Dadurch wird der Verschleiß auch bei höheren Temperaturen minimiert. Zusätzlich kann die Oberfläche der Schneidplatten beschichtet werden, was je nach Zusammensetzung der Schicht einen thermochemischen Schutz für den Substratwerkstoff bedeutet, der die Oberflächenhärte nochmals steigert oder die tribologischen Eigenschaften optimiert. Dadurch kann die Wirtschaftlichkeit der spanenden Bearbeitung durch höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten und höhere Werkzeugstandzeiten weiter gesteigert werden.

2.2.3. Fazit

Die Auswahl konkreter Anwendungen von Keramikbauteile zeigt, dass die Werkstoffgruppe der technischen Keramik für vielfältige Einsatzmöglichkeiten herausragende Lösungen bietet. Über die Einflussparameter bei der Bauteilherstellung kann das Eigenschaftsprofil gezielt eingestellt werden. Keramik wird bereits in unzähligen Einsatzgebieten verwendet und ist oft nicht auf den ersten Blick sichtbar, aber von entscheidender funktioneller Bedeutung.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 23) finden sich auf den folgenden Seiten.

- Keramik - die maßgeschneiderte Lösung für vielfältige Anwendungen



Carmen Eil
Kristina Leßnau

CeramTec AG



Überblick

- Wie funktioniert das **Maßschneidern** von keramischen Werkstoffen?
 veranschaulicht an Schneidkeramik
- Wie vielfältig sind die **Anwendungsmöglichkeiten** für Bauteile aus technischer Keramik?

Schneidkeramik im Einsatz

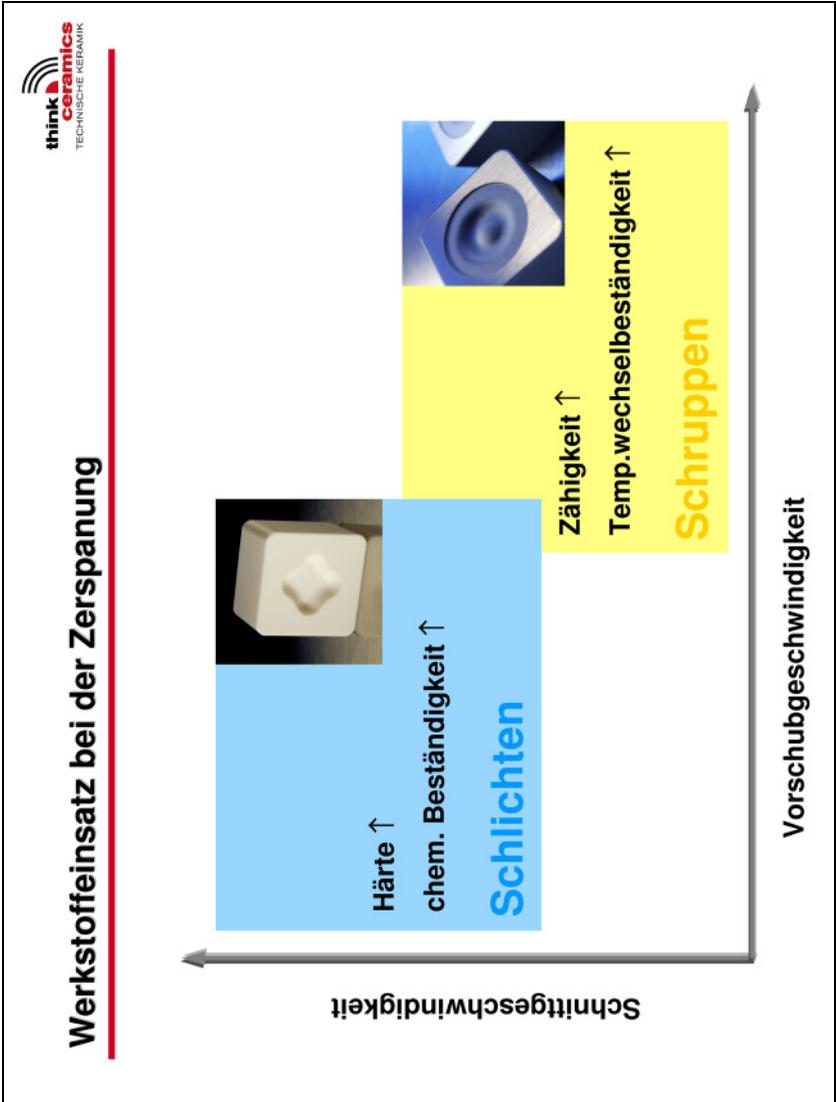
- CNC Drehbearbeitung
- Differentialgehäuse aus GGG-60
- stark unterbrochener Schnitt
- Trockenbearbeitung



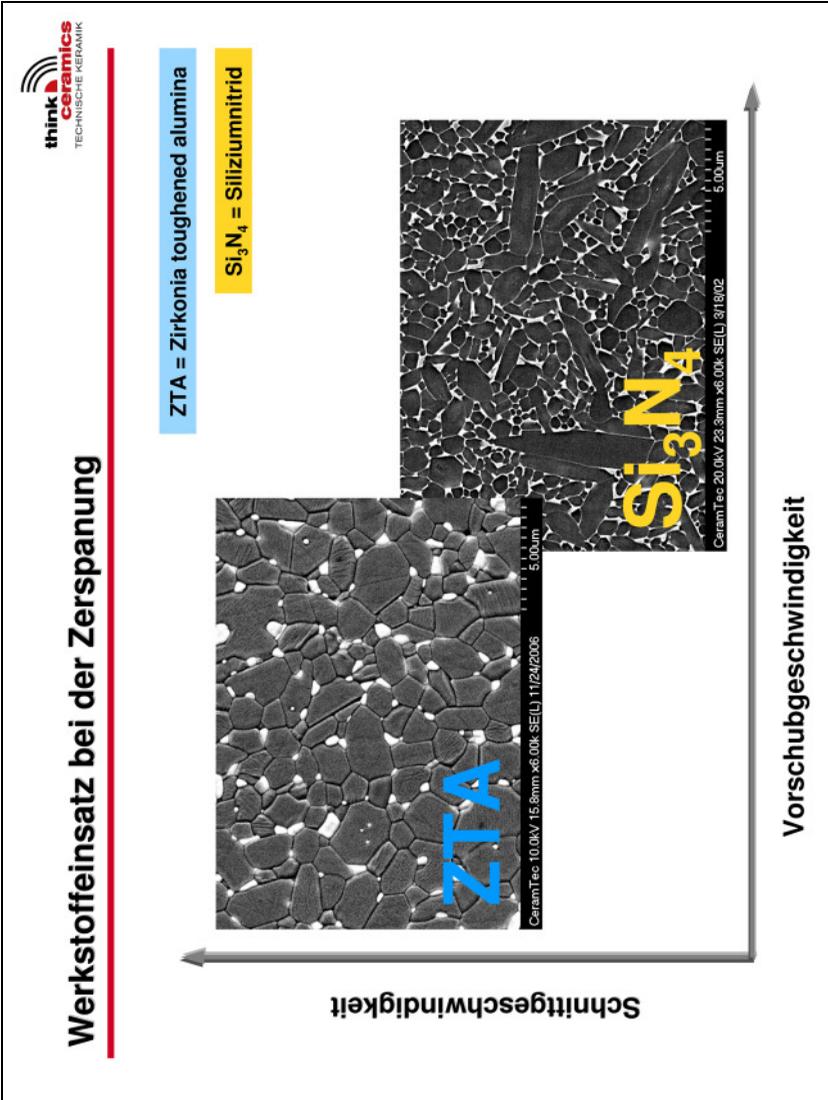
Anforderungsprofil Zerspanung

- hohe Härte
- hohe Druckfestigkeit
- gute Biegebruchfestigkeit
- hohe Bruchzähigkeit
- sehr gute chemische Beständigkeit
- gute Temperaturwechselbeständigkeit

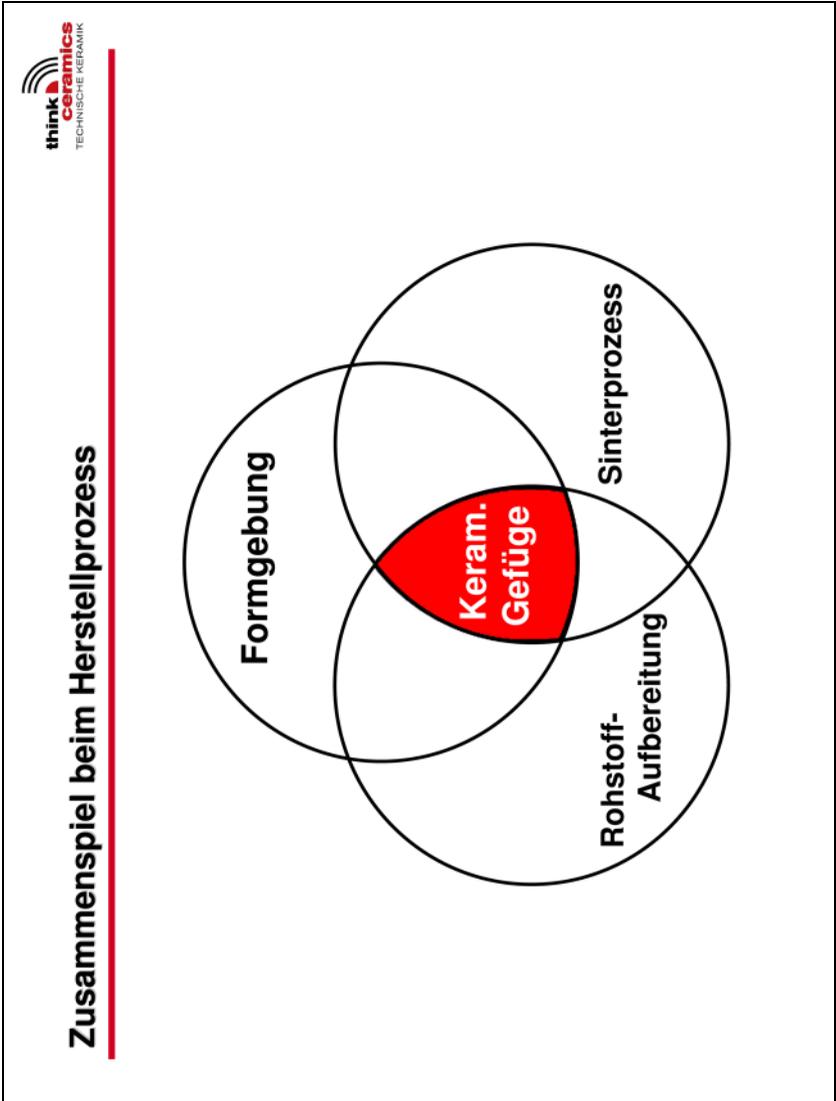




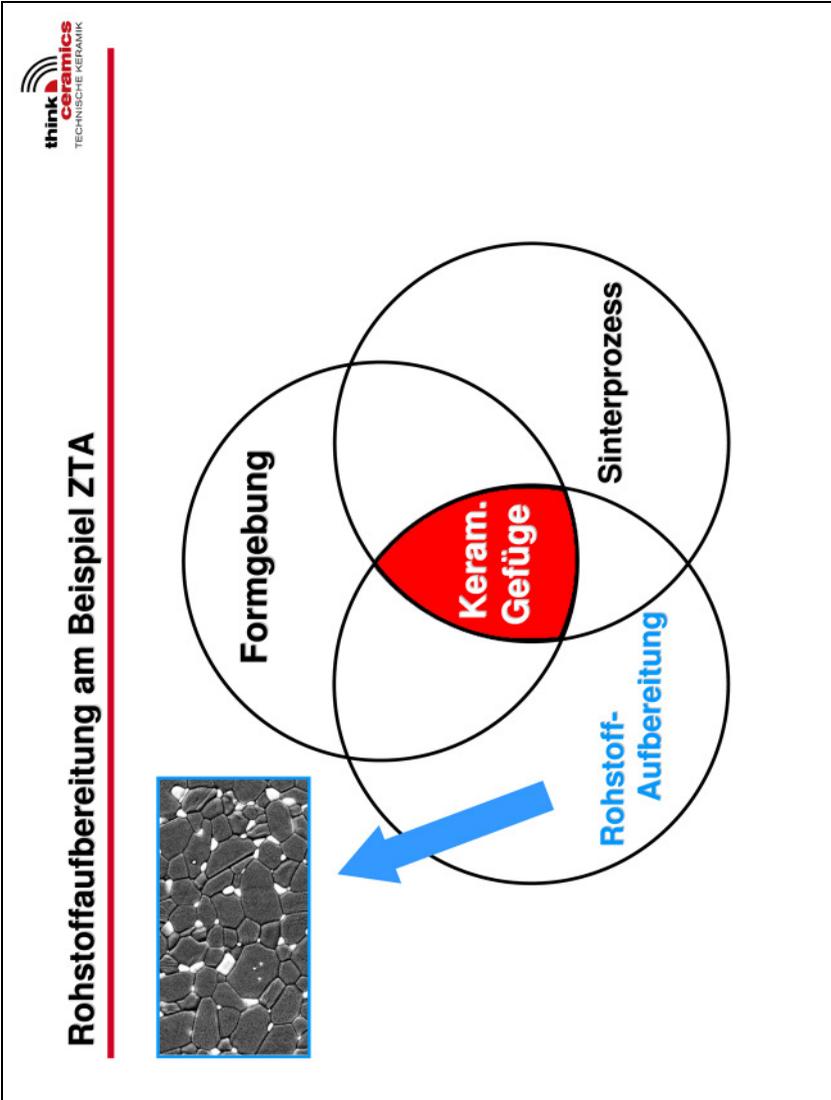
2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 5



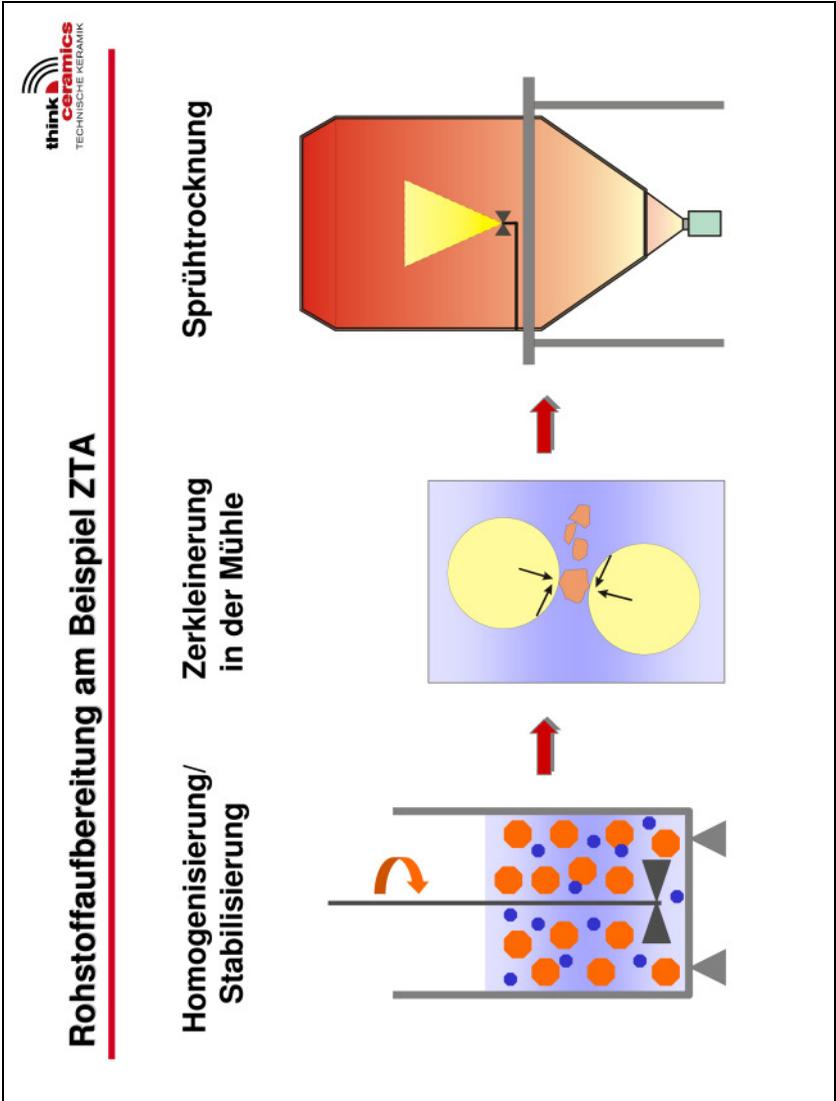
2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 6



2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 7



2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 8



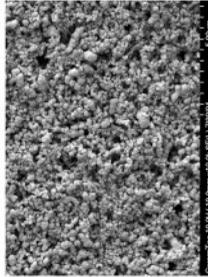
2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 9

Rohstoffaufbereitung am Beispiel ZTA

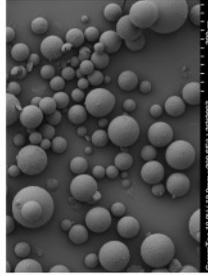
Rohstoffe im
Ausgangszustand

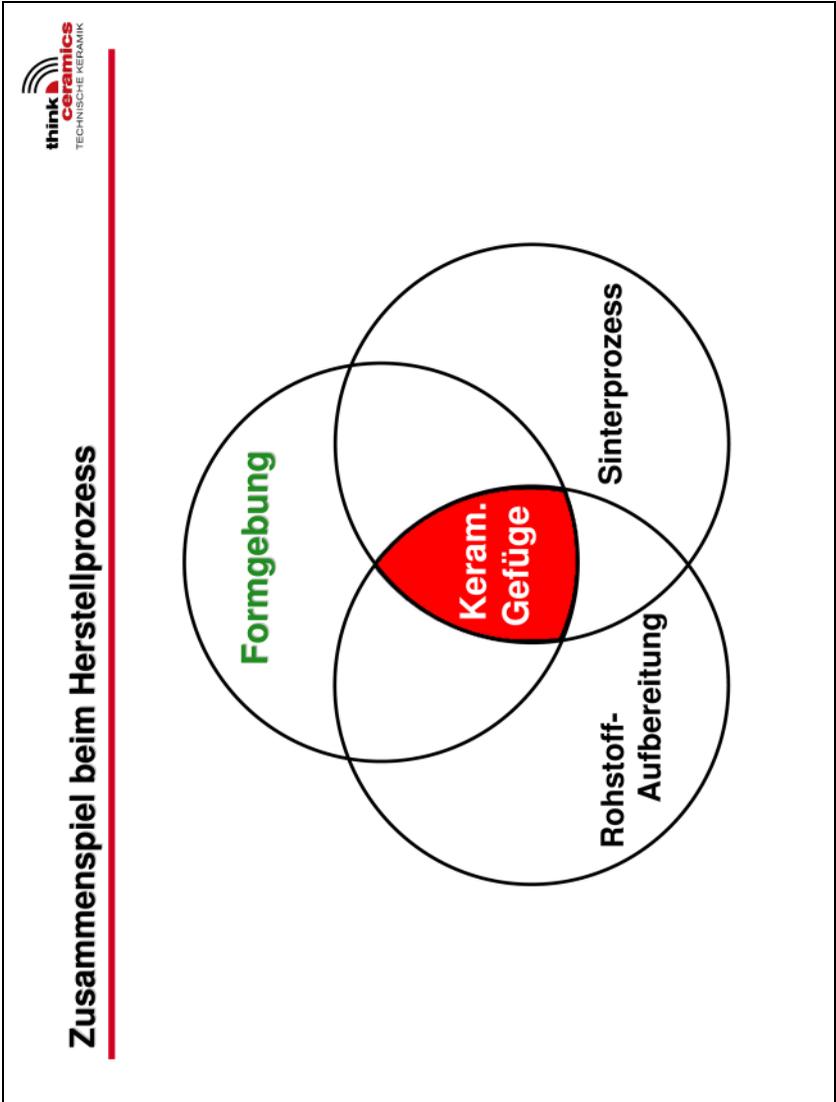


Gemahlene
Keramikpartikel



Sprühgetrocknetes
Granulat

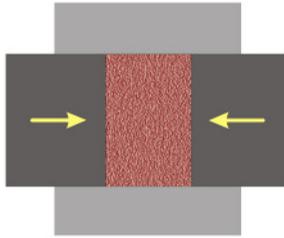




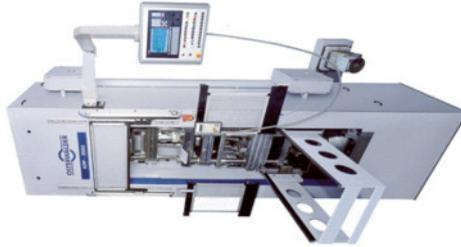
2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 11

Formgebung

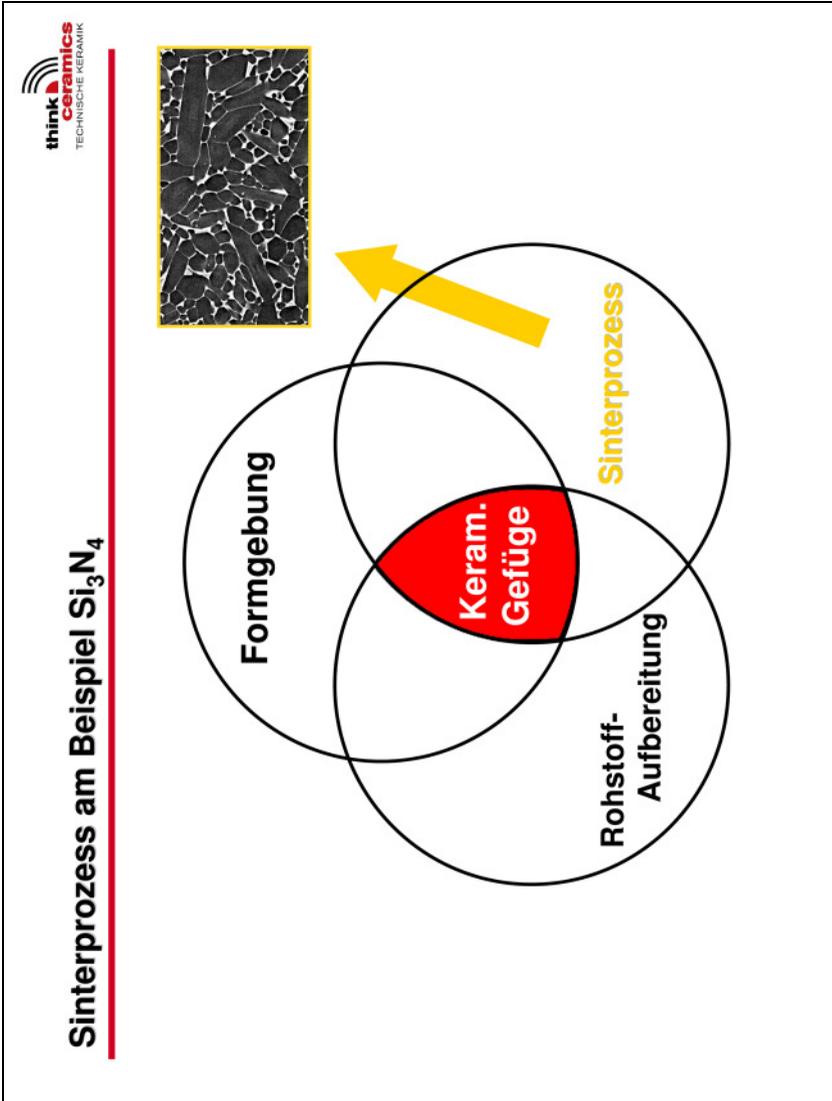
Trockenpressen



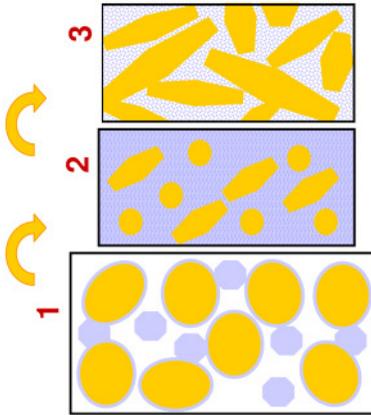
Weitere Verfahren



- Isostatisch Pressen
- Spritzgießen
- Extrudieren
- Schlickerguss

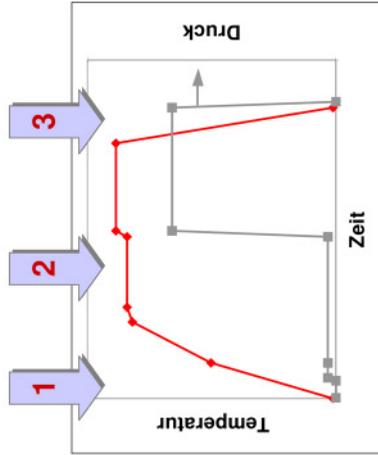


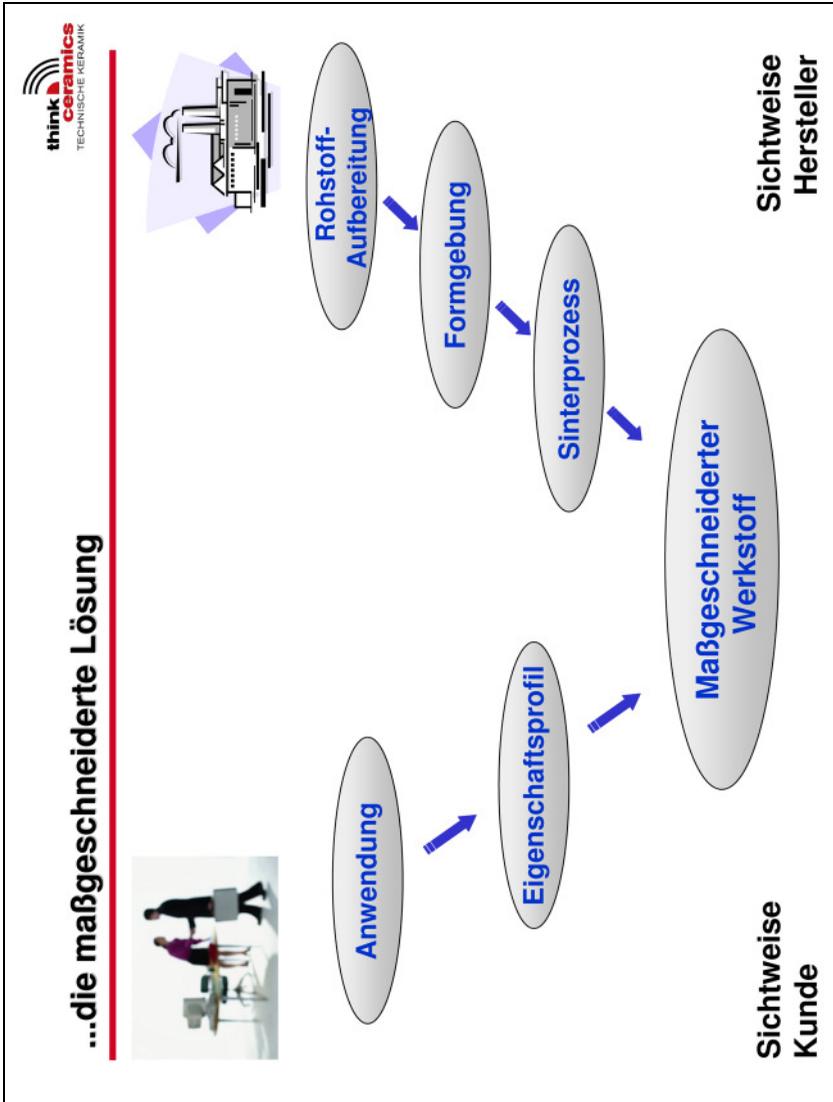
Sinterprozess am Beispiel Si_3N_4



Si_3N_4 -Körner

Flüssigphase





2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 15

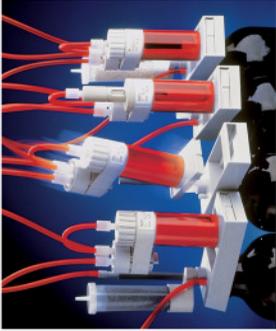
...für vielfältige Anwendungen



2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 16

Dicht- und Regelscheiben

Aluminiumoxid:
+ Tribologie
+ chemische Beständigkeit
+ wirtschaftliche Produktion
+ komplexer Formteile

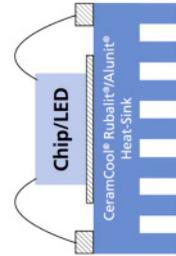
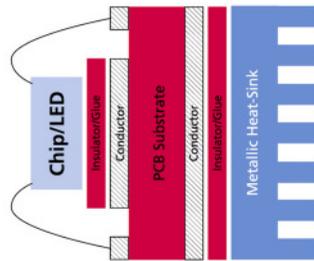
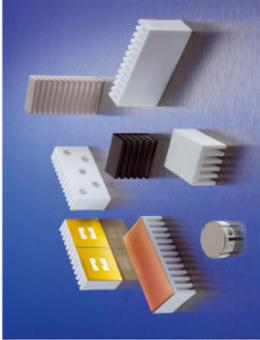


think
ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 17

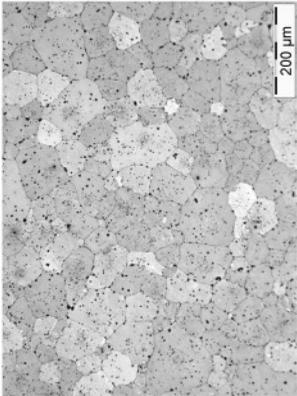
Kühlkörper für High Power LED Systeme

- Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid**
- + Elektrische Isolierung
- + Temperaturwechselbeständigkeit
- + Wärmeleitfähigkeit (AlN)



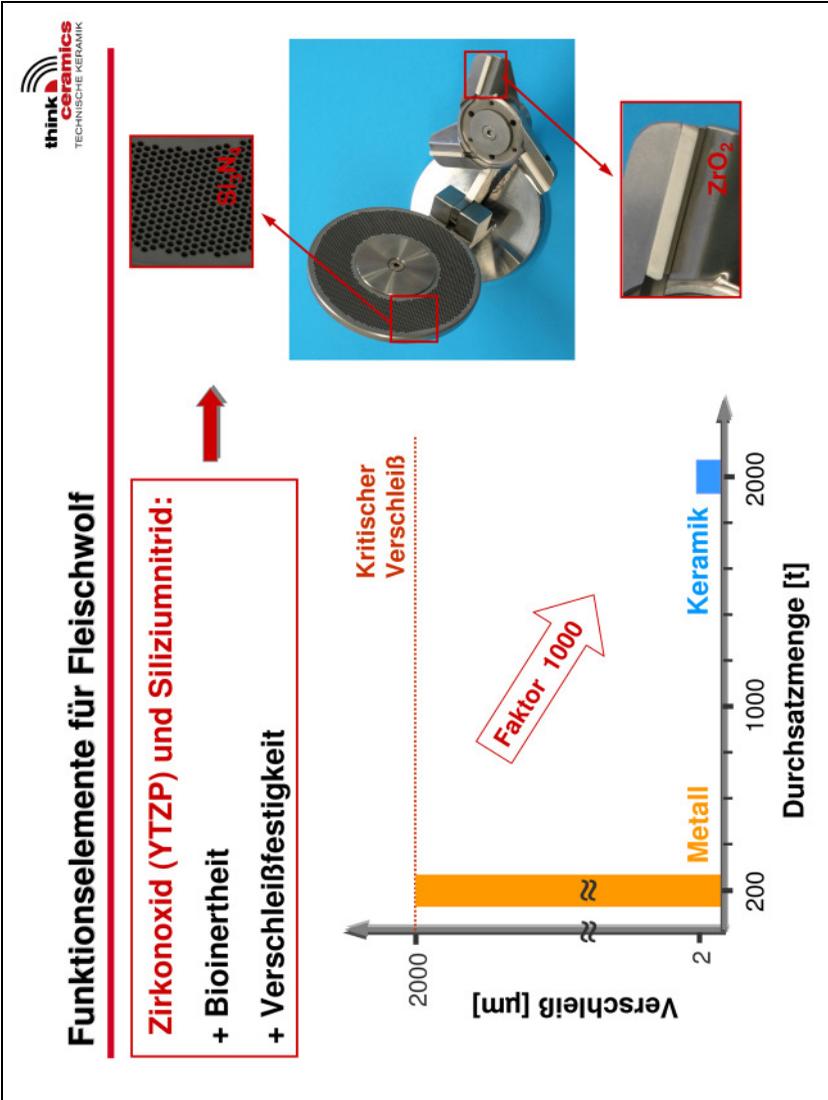
Isolationsstücke für Bremse

Zirkonoxid (PSZ)
+ Wärmeisolation
+ Temperaturstabilität

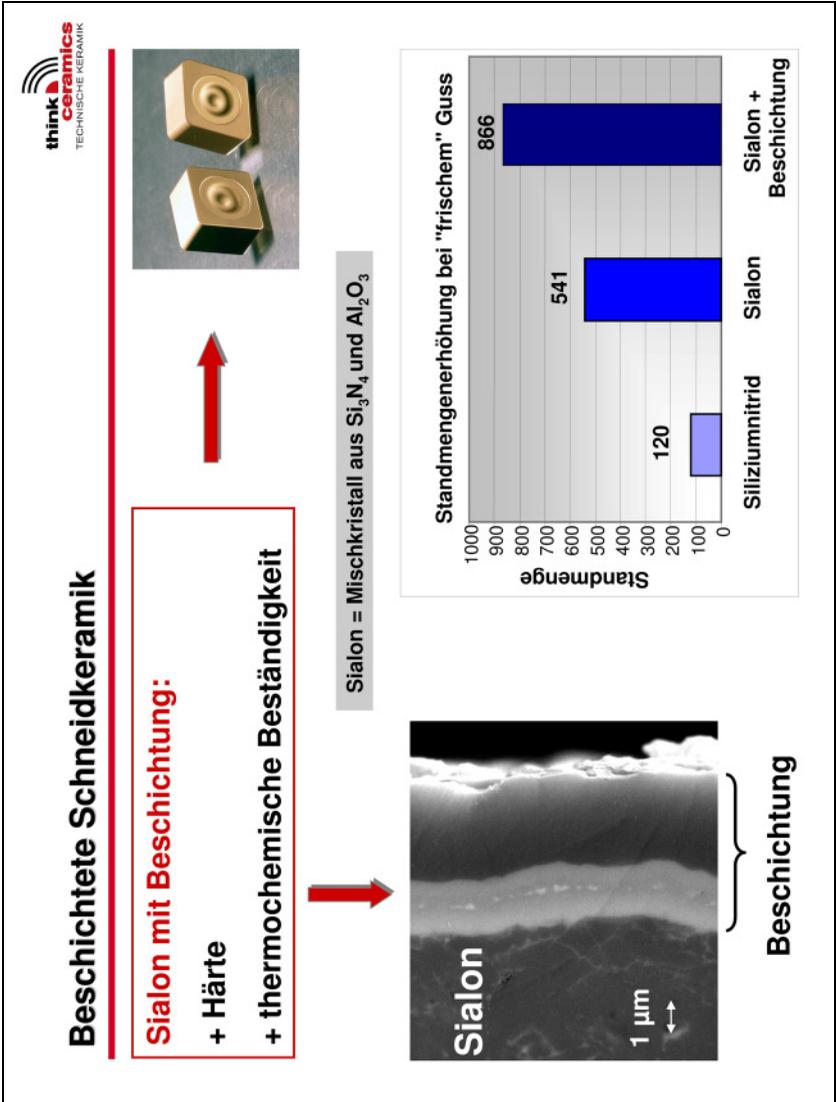


The diagram illustrates the application of ceramic technology in automotive braking systems. It features a central text box with a red border containing the text: **Isolationsstücke für Bremse**, **Zirkonoxid (PSZ)**, **+ Wärmeisolation**, and **+ Temperaturstabilität**. To the left of this text is the 'think ceramics TECHNISCHE KERAMIK' logo. To the right of the text box is a microscopic image of a ceramic material with a scale bar indicating 200 µm. Below the text box is a red arrow pointing to the right. To the right of the microscopic image is a photograph of a yellow brake caliper with a dark ceramic brake disc. Above the microscopic image is a red arrow pointing upwards, and to the right of this arrow is a photograph of four yellow ceramic insulators.

2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 19



2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 20



2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 21

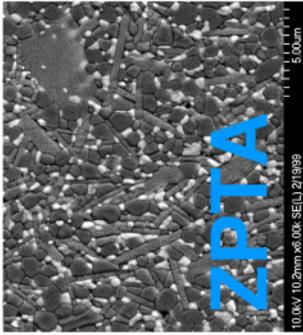
Gelenk-Implantate

ZPTA:
 + Bioinertheit
 + Festigkeit und Zähigkeit
 + Verschleißfestigkeit

↑



→



	Al ₂ O ₃	ZPTA	Steigerung
Biegefestigkeit [MPa]	650	1400	+ 115%
Zähigkeit K _{Ic} [MPam ^{1/2}]	3	5,5	+ 83%

ZPTA = Zirkonia platelet toughened alumina



2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 22

think
ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

...mehr Lebensqualität durch Hochleistungskeramik



The collage consists of six images arranged in a 2x3 grid. The top row shows a variety of meats and cheeses, a wind turbine in a field, and a red sports car on a road. The bottom row shows a cup of coffee with a biscuit, two hikers on a trail, and a set of striped pajamas.

2.2 Die maßgeschneiderte Lösung - Folie 23